جيم الخليلي وجونجو مكفادِن

# الحياة على الحافة

## بداية عصر علم الأحياء الكمي

ترجمة إبراهيم سند أحمد

# الحياة على الحافة

## بداية عصر علم الأحياء الكمي


**تأليف**

**جيم الخليلي وجونجو مكفادِن**

ترجمة

إبراهيم سند أحمد

مراجعة

مصطفى محمد فؤاد



هنـــداوي

# الحياة على الحافة

جيم الخليلي
وجونجو مكفادِن

# Life on the Edge

Jim Al-Khalili
and Johnjoe McFadden

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

يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، 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: ٢ ٣٠٨٣ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠١٤.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٣.

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 للمؤلفين جيم الخليلي وجون ماكفادن، عناية بيو ليتراري أجنسي ليمتد.

Copyright © 2014 Jim Al-Khalili and Johnjoe McFadden.

# المحتويات


| | |
|---|---|
| شكر وتقدير | ٩ |
| ١- مقدمة | ١١ |
| ٢- ما الحياة؟ | ٣٥ |
| ٣- مُحرِّكات الحياة | ٦٩ |
| ٤- النبضة الكمية | ١٠٩ |
| ٥- البحث عن موطن نيمو | ١٤٣ |
| ٦- الفراشة وذبابة الفاكهة وطائر أبي الحناء الكمِّي | ١٧٧ |
| ٧- الجينات الكمية | ٢٠٧ |
| ٨- العقل | ٢٤١ |
| ٩- كيف بدأت الحياة؟ | ٢٧٥ |
| ١٠- علم الأحياء الكمي: الحياة على حافةِ عاصفة | ٢٩٩ |
| خاتمة: الحياة الكمية | ٣٣٣ |
| ملاحظات | ٣٣٥ |

إهداء إلى بيني وأولي وجولي وديفيد وكيت.

# شكر وتقدير

لقد استغرق تأليفُ هذا الكتاب ثلاثَ سنواتٍ على الرغم من تعاوُن المؤلفَيْن في البحوث التي أُجرِيَت في هذا المجال الجديد المثير الذي يجمع بين علوم فيزياء الكمِّ والكيمياء الحيوية والأحياء، على مدار ما يقرب من عَقدَيْن. غير أنه عندما يتعلق الأمر بمجالٍ علميٍّ متعددِ التخصصات مثل علم الأحياء الكمِّي، فلا يمكن أن يتمتع مؤلفُ أي كتاب عنه بالخبرة الكافية لشرح جميع الموادِّ العلمية اللازمة لرسم الصورة الكاملة شرحًا متعمقًا ووافيًا؛ لا سيما إذا كان هذا الكتاب هو الأولَ من نوعه في ذلك المجال لغيرِ المتخصصين.

لا شك بأنَّ أحدًا من المؤلفَيْن لم يكن ليتمكَّن من تأليف هذا الكتاب بمفرده؛ إذ يُسهِم كلٌّ منَّا في النقاش بخبرتِهِ في عالَمَي الفيزياء والأحياء، على التوالي. الحقُّ أننا ما كنا لِنُنتج كتابًا يفتخر به كِلانا للغاية من دون مساعدة العديد من الشخصيات، ومعظمهم من روَّاد العالم في مجالاتهم البحثية.

إننا نُكِنُّ شعورًا بالامتنان تجاه بول ديفيز لما أجراه مع كِلَينا على مدار الخمسَ عشرةَ سنةً الماضيةِ من مناقشاتٍ عديدة مثمرة عن ميكانيكا الكمِّ وعلاقتها المحتملة بعلم الأحياء. ونحن نَدين بالشكر للعديد من علماء الفيزياء والكيمياء والأحياء الذين يُحرِزون الآن تقدمًا كبيرًا في هذا المجال الجديد؛ إذ إننا لم ولن نتمتعَ بما يتمتعون هم به في مجالات تخصصاتهم من خبرةٍ متعمقة ومعرفة. ونخصُّ بالذكر هنا كلًّا من جينيفر بروكس، وجريجوري إنجل، وآدم جودبير، وسيث لويد، وألكسندرا أولايا–كاسترو، ومارتن بلينيو، وساندو بوبيسكو، وثورستن ريتز، وجريجوري سكولز، ونايجل سكروتون، وبول ستيفنسون، ولوكا تورين، وفلاتكو فيدرال. نرغب أيضًا في التعبير عن شكرنا إلى ميريلا دوميك، المنسِّقة لدى معهد الدراسات المتطورة بجامعة سَري، التي قامت وحدها تقريبًا بتنظيم الورشة الدولية التي

جاءت بعُنوان: «علم الأحياء الكمي: الوضع الحالي والفرص المستقبلية»، والتي عُقِدَت بجامعة سَري عام ٢٠١٢ ولاقت نجاحًا باهرًا، وكان قد تعاون في تمويلها كلٌّ من معهد الدراسات المتطورة، ومجلس بحوث التكنولوجيا الحيوية والعلوم البيولوجية، ومشروع النماذج والرياضيات في علوم الحياة والعلوم الاجتماعية. وعلى الرغم من أن مجال علم الأحياء الكمِّي لا يزال ناشئًا ولا يُوجَد به سوى عددٍ قليل من المتخصصين، فقد جمعَت هذه الورشة من جميع أنحاء العالم العديد من الشخصيات الرائدة من المشتغِلين بالأبحاث في هذا المجال، وساعدَتنا على الإحساس بأننا في الحقيقة جزءٌ من هذا المجتمع البحثي المثير.

فور أن أصبح هذا الكتاب في شكلٍ مُسوَّدة، طلَبنا من العديد من الشخصيات المذكورة فيما سبق أن يطَّلعوا على الكتاب ويُخبرونا بآرائهم فيه. ومِن ثَم، فإننا نتوجَّه بشكرٍ خاصٍّ إلى كلٍّ من مارتن بلينيو، وجينيفر بروكس، وألكسندرا أولايا–كاسترو، وجريجوري سكولز، ونايجل سكروتون، ولوكا تورين. نودُّ أيضًا أن نتقدَّم بالشكر إلى كلٍّ من فيليب بول، وبيت داونز، وجريج نولز؛ لاطِّلاعهم على بعضِ أجزاء المسودة النهائية أو كلِّها، ولِما قدَّموه من تعليقاتٍ ثاقبة ومفيدة حسَّنَت من محتوى الكتاب بدرجةٍ هائلة. ونحن نتوجَّه بالشكر الجزيل إلى وكيلنا باتريك والش، الذي ما كان الكتابُ ليرَى النورَ لولاه، وإلى سالي جامينارا العاملة لدى مؤسسة راندم هاوس للنشر؛ لإيمانها بنا وحماسها الكبير تجاه المشروع. ولا بد لنا أن نُقدِّم أسمى معاني الشكر إلى باتريك وكاري بليت العامِلَين لدى شركة كونفيل آند والش على ما قدَّماه من مَشورات واقتراحات بشأن بِنْية الكتاب وتنسيقه، وعلى المساعدة في صياغة الكتاب في نسخته النهائية التي تتفوَّق على حالته الأولية غير الجذابة بمقدار سنواتٍ ضوئية. نحن مَدينان أيضًا إلى جيليان سومرسكالس على براعتها في التحرير.

أخيرًا وليس آخِرًا، نودُّ أن نشكر أفرادَ عائلتَينا على ما قدَّموه لنا من دعمٍ سخي، لا سيَّما في الأوقات التي فرَضْنا فيها المواعيدَ النهائية على أنفسِنا وعلى دار النشر، مما يعني أننا نحَّينا كلَّ الالتزامات الأخرى جانبًا، وأغلقنا على أنفسنا ومعنا أجهزة الكمبيوتر المحمولة الخاصة بنا. إننا لم نعُد نتذكر عددَ الأمسيات وعطلات نهاية الأسبوع والعطلات العائلية التي أعطينا الأولويةَ فيها لعِلم الأحياء الكمِّي. لذا نرجو أن يكون الكتاب جديرًا بهذا الجهد.

وبالنسبة إلى كِلَينا وإلى مجال علم الأحياء الكمي الجديد، فلعلَّ الرحلة قد بدأتْ للتو.

جيم الخليلي وجونجو مكفادِن
أغسطس ٢٠١٤

الفصل الأول

# مقدمة

هطَلَت ثلوج الشتاء مبكرًا على أوروبا هذا العام، والبرودةُ تتخلَّل هواءَ الليل. في أعماق عقلِ إحدى إناث طيور أبي الحناء الصغيرة، ثَمة إحساسٌ دفينٌ بالغاية والعزيمة، كان مُبهَمًا من قبلُ لكنه صار يزدادُ قوة.

قضَت أُنثى أبي الحناء الأسابيعَ القليلة الماضية في التهامِ الحشرات والعناكب والديدان والتوت بكمياتٍ أكبرَ كثيرًا من المعتاد، مما أدَّى إلى زيادة وزنها إلى ضعف ما كان عليه حينما تمكَّن صغارها من الطيران في شهر أغسطس. تتركَّز غالبيةُ هذا الوزن الزائد في مستودعات الدهون التي ستستخدمها وَقودًا في رحلتها الشاقة التي توشك أن تُقدِم عليها.

تلك هي الهجرة الأولى التي تبتعِد فيها عن غابة التنوب بوسطِ السويد حيث عاشت مدةَ حياتها القصيرة، واعتنت بأفراخها الصغيرة منذ أشهرٍ قليلة. من حُسن حظها أنَّ الشتاء السابق لم يكن قارسًا جدًّا؛ إذ لم يكن نموُّها قد اكتمل قبل عام، ومِن ثمَّ لم تكن تتمتَّع بالقوة الكافية للقيام بمثلِ هذه الرحلة الطويلة. أما الآن وقد أدَّت مسئولياتها في الأمومة وصارت حرةً منها حتى الربيع التالي، فليس عليها التفكيرُ إلا في نفسها، وهي مستعدةٌ للفرار من الشتاء الذي يلوح في الأفق والاتجاه نحو الجنوب طلبًا لمناخٍ أدفأ.

مضَت ساعتان منذ غروب الشمس. وبدلًا من السكون في الليل، تقفز أنثى أبي الحناء في الظلام المنسدِل إلى طرَفِ غصنٍ قريب من أسفل الشجرة الضخمة التي بنَت فيها عُشها في الربيع. تهزُّ أنثى أبي الحناء جسمَها وتنفضه بسرعة على نحوٍ شديد الشبَه بما يفعل عَدَّاء الماراثون مُمدِّدًا عضلاته قبل السباق. صدرُها البرتقالي يلمع في ضوء القمر. أمسى ما بذلَتْه في بناء عُشِّها الذي يقع على بُعد بضع أقدام، والمختبئ جزئيًّا في لحاء جِذْع الشجرة المغطَّى بالطحالب من جهدٍ شاق وعناية، ذكرى خافتة.

ليست هي بالطائر الوحيد الذي يستعدُّ للهجرة؛ فالعديد غيرها من طيور أبي الحناء، ذكورًا وإناثًا، قد اتخذَت القرار بأن هذه الليلة مناسبةٌ لبدء رحلةِ هجرتها الطويلة نحو الجنوب. وعلى الأشجار المحيطة، تسمع أنثى أبي الحناء التغريدَ عاليًا وصاخبًا يُغطِّي على الأصوات المعتادة التي تَصدُر من كائنات الغابة التي تنشط في الليل. وكأنَّ الطيور تشعر بالحاجة إلى الإعلان عن مُغادرتها، وكأنها تُخبر الكائنات الأخرى التي تسكن الغابةَ أنَّ عليها التفكيرَ مَليًّا قبل أن تنويَ غزو منطقة الطيور المهاجرة في فترة غيابها وأعشاشها الفارغة. فطيور أبي الحناء تُخطط للعودة في فصل الربيع، لا ريب في ذلك.

قبل أن تُحلق الطيور في سماء الليل، تلتفتُ برأسها في عدة اتجاهات كي تتأكَّد من أمان الأفق. بدأ الليل يطول مع اقتراب الشتاء، وستُحلق الطيور عشرَ ساعات تقريبًا قبل أن تتمكنَ من الاستراحة مرة أخرى.

تنطلقُ الطيور في مسار باتجاه ١٩٥ درجة (١٥ درجةً نحو الغرب من اتجاه الجنوب المنشود). وعلى مدار الأيام القليلة القادمة، ستستمرُّ الطيور في التحليق نحو الاتجاه ذاتِه تقريبًا، وتقطع مسافةَ مائتي ميلٍ في اليوم حين تكونُ الظروف مُواتية. لا تعرف أنثى أبي الحناء ما ينتظرها في تلك الرحلة الطويلة ولا تعرف كم ستستغرق الرحلةُ من الوقت. إنها تعرف التضاريسَ التي تُحيط بغابة التنوب التي تسكن بها، لكنها بَعد بِضعة أميالٍ تُحلق فوق أراضٍ غريبة من البُحيرات والوديان والمدن يُنيرها ضوءُ القمر.

وفي مكانٍ ما على مقربةٍ من البحر الأبيض المتوسط، ستصل إلى وجهتها، وإن كانت لا تقصد موقعًا بعينِه، ولكنها ستتوقَّف عن الطيران حينما تصل إلى بقعةٍ تُناسبها، وتحفظ معالم المكان في ذاكرتها؛ كي تتمكنَ من العودة إليه في السنوات القادمة. وإذا كانت لديها القدرة، فستُحلِّق حتى تصل إلى سواحل الشمال الإفريقي. غير أنَّ هذه هي المرة الأولى التي تُهاجر فيها، وتتمثَّل أولويتها في الفرار من البرودة القارسة للشتاء الاسكندنافي.

تبدو أُنثانا غافلةً عن غيرها من طيورِ أبي الحناء المحيطة بها المحلِّقةً في الاتجاه ذاتِه تقريبًا، والتي قد قطع بعضُها هذه الرحلةَ عدة مرات من قبل. وبالرغم من قُدراتها الممتازة في الرؤية الليلية، فهي لا تبحث عن أي معالم — مثلما قد نفعل نحن البشرَ إن كنا نقوم برحلةٍ كتلك — ولا هي تتبع نمط النجوم في سماء الليل الصافية بالرجوع إلى خريطتها السماوية الداخلية، مثلما تفعل العديدُ من الطيور الأخرى التي تُهاجر في الليل. وبدلًا من هذا وذاك، هي تنعمُ بمهارةٍ كبيرة وبتطوُّرِها على مدار عدة ملايينَ من السنين، وهما ما

تُعزى إليه قُدرتها على القيام بهذه الرحلة التي ستُصبح هجرةً سنوية في الخريف تقطع فيها نحوَ ألفَي ميل.

لا شك أنَّ الهجرة أمرٌ مألوف في مملكة الحيوان. ففي كلِّ شتاء على سبيل المثال، تضع أسماكُ السلمون بيضَها في أنهار شمال أوروبا وبحيراتها، وتترك البيضَ في تلك المياه، ثم تخرج الأسماكُ الصغيرة بعد الفقس وتتبع مسار النهر حتى تصل إلى البحر، ومنه إلى شمال المحيط الأطلسي حيث تنمو وتنضج، وبعد ثلاث سنوات، تعود تلك الأسماك لتتزاوجَ في تلك الأنهار والبحيرات التي فقسَت فيها نفسها. وفي فصل الخريف، تُهاجر الفراشات الملَكية آلافَ الأميال جنوبًا فتَعبُر رُقعة الولايات المتحدة بكاملها. بعد ذلك، تعود تلك الفراشات — أو نسلها (لأنها ستتكاثرُ في الطريق) — في فصل الربيع باتجاه الشمال إلى الأشجار نفسِها التي تشرنقَت فيها. إضافةً إلى ذلك، فالسلاحفُ الخضراء التي تفقس على شواطئ جزيرة أسينشين جنوب المحيط الأطلسي تسبح آلافَ الأميال في المحيط قبل أن تعود كلَّ ثلاث سنوات؛ كي تتزاوجَ على الشاطئ ذاتِه المليء بقِشر البيض الذي خرَجَت منه. لا تتوقف قائمةُ الكائنات المهاجرة عند هذا الحد؛ فالعديد من أنواع الطيور والحيتان ووُعول الرنَّة والكركند الشوكي والضفادع والسلمون وحتى النحل تقوم برحلاتٍ تصعب على أعظم المستكشِفين من البشر.

ظلَّت الكيفية التي تعرف بها الحيواناتُ طريقَها حول العالم لغزًا على مدار قرون. غير أننا نعرف الآن أنَّ تلك الحيوانات تستخدم مجموعةً من الطرق؛ فبعضها يستخدم نظامَ المِلاحة الشمسي خلال النهار ونظام الملاحة السماوي في الليل، وبعضها يحتفظ بمعالم الطريق في ذاكرته، بينما يعرف البعضُ الآخَر طريقه حول الكوكب من خلال «الشم». لكنَّ حاسة الملاحة الأكثرَ غرابة على الإطلاق هي تلك التي يمتلكُها طائرُ أبي الحناء الأوروبي؛ القدرة على تحديد اتجاه المجال المغناطيسي للأرض وقوته، وهي ما يُعرف باسم الاستقبال المغناطيسي. ورغم أننا نعرف الآن عددًا من الكائنات الأخرى التي تمتلك تلك القدرة، فإنَّ الكيفية التي يُحدد بها طائرُ أبي الحناء الأوروبي طريقَه في هذه الأرض هي أكثرُ ما يُهمنا في هذا النقاش.

إنَّ الآلية التي تُمكِّن طائرَ أبي الحناء من معرفة المسافة التي ينبغي أن يَطيرها والاتجاه الذي يسلكه؛ مشفَّرةٌ في الحمض النووي الذي يرثُه من أبوَيه. هذه القدرة متطورةٌ جدًّا وغير عادية، فهي أشبهُ بـ «حاسة سادسة» يستخدمها الطائرُ في تحديد مسار رحلته. فعلى غِرار العديد من الطيور الأخرى وحتى الحشرات والكائنات البحرية، يتمتَّع هذا الطائر

بالقدرة على الإحساس بالمجال المغناطيسي الضعيف للأرض، واستنتاج المعلومات المتعلقة بالاتجاهات من هذا المجال عن طريق حاسة ملاحة متأصِّلة في تكوينه؛ ممَّا يستلزم في هذه الحالة نوعًا حديثًا من البوصلة الكيميائية.

تُعَد حاسةُ الاستقبال المغناطيسي أمرًا مُلغِزًا. ذلك أنَّ المجال المغناطيسي للأرض ضعيفٌ للغاية، فهو يتراوح ما بين ٣٠ إلى ٧٠ ميكروتسلا على السطح، وهي قوةٌ كافية لانحراف إبرة مغناطيس متوازنة بدقة، وينعدم فيها الاحتكاكُ تقريبًا، لكنها لا تُمثل سوى واحدٍ على مائة من قوة مغناطيس الثلاجة العادي. وهنا يَكمُن اللغز؛ لكي يتمكَّن حيوانٌ ما من تحديد المجال المغناطيسي للأرض، لا بد أنه يتأثر بتفاعلٍ كيميائي في منطقةٍ ما بجسمه؛ فتلك على أي حال هي الكيفيةُ التي تُحس بها كلُّ الكائنات الحية، بما فيها البشر، بأي إشارة خارجية. غير أنَّ كميةَ الطاقة التي يُوفِّرها تفاعلُ المجال المغناطيسي للأرض مع الجزيئات داخل الخلايا الحية أقلُّ من واحد على مليار من كمية الطاقة اللازمة لكسر رابطةٍ كيميائية أو لتكوينها. فكيف يمكن إذن لطائر أبي الحناء أن يُحس بالمجال المغناطيسي؟

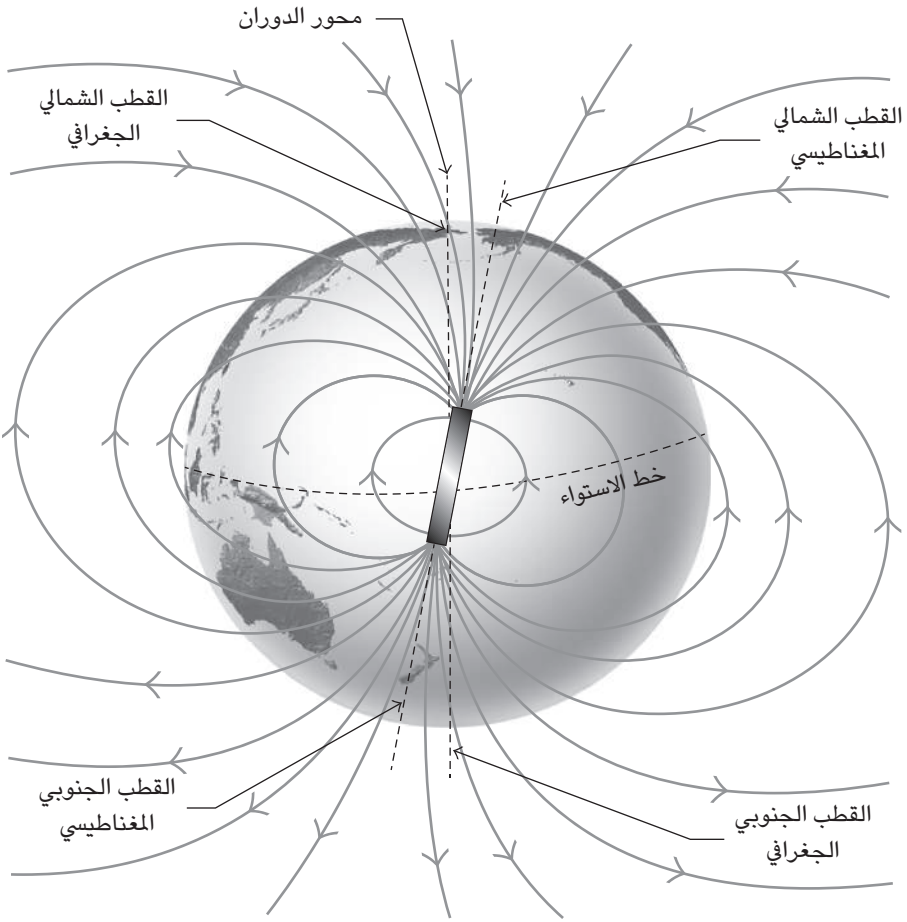
تبقى الألغازُ مذهلة وإن كانت صغيرة؛ فثَمة احتمال قائم على الدوام بأنَّ حلَّها قد يؤدي إلى تحولٍ كبير في فهمنا للعالم. ففي القرن السادس عشر، على سبيل المثال، أدَّت تأملاتُ كوبرنيكوس بشأن مسألةٍ ثانوية نِسبيًّا فيما يتعلق بهندسة النموذج البطلمي القائلِ بمركزية الأرض في المجموعة الشمسية، إلى تحويل مركز جاذبية الكون بأكمله بعيدًا عن الجنس البشري. وأدَّى اهتمامُ داروين بالتوزيع الجغرافي لأنواع الحيوانات، وبالسبب الغامض في أنَّ الأنواع التي تعيش على الجزر المعزولة مثل طيور الشرشوريات والطيور المحاكية، غالبًا ما تختلف عن مَثيلاتها في الأماكن الأخرى بصفات خاصة، إلى اقتراح نظرية التطور. ولنا أيضًا في عالِم الفيزياء الألماني ماكس بلانك مثالٌ آخر، حين تمكَّن من حلِّ لغز إشعاع الجسم الأسود، فيما يتعلق بكيفية انبعاث الحرارة من الأجسام الدافئة؛ مما قاده إلى اقتراح أن الطاقة تُوجَد في كُتَلٍ منفصلة تُسمى «الكموم»، فنَتج عن ذلك ميلادُ نظرية الكم عام ١٩٠٠. فهل يمكن أن يُؤدِّيَ حلُّ اللغز المتمثلِ في كيفية معرفة الطيور لطريقها حول العالم إلى ثورةٍ في علم الأحياء؟ بالرغم مما قد يبدو في ذلك من الغرابة، فالجواب هو: نعم.

بالرغم من ذلك، تُمثل ألغازٌ كهذه ملاذًا لأشباه العلماء وأصحاب المذاهب الروحانية؛ فكما قال عالم الكيمياء في جامعة أكسفورد بيتر أتكينز عام ١٩٧٦: «ظلَّت دراسةُ تأثيرات المجال المغناطيسي في التفاعلات الكيميائية مَرتعًا للمشعوِذين مدةً طويلة.»[1] وفي مرحلةٍ

ما أو غيرها، اقتُرِحت بالفعل جميعُ أنواع التفسيرات الغريبة باعتبارها آلياتٍ تستخدمها الطيورُ المهاجرة كي تُرشِدَها طَوال رحلاتها، ومِن هذه التفسيرات التخاطُر وخطوطُ الطاقة القديمة (وهي مسارات غير مرئية تربط العديدَ من المواقع الأثرية والجغرافية التي يُزعَم أنها حُبِيَت بطاقةٍ روحانية) وحتى مفهوم «رنين التحوُّل» الذي صاغَه عالمُ التخاطر المثيرُ للجدل روبرت شيلدريك. ومن ثمَّ كانت تَحفُّظاتُ أتكينز في سبعينيَّات القرن العشرين مفهومةً؛ مما يعكس التشكُّكَ الذي ساد بين معظم العلماء الذين كانوا يتقدَّمون حينذاك نحو أيِّ اقتراحٍ باحتمالية أن تكون الحيوانات قادرةً على الإحساس بالمجال المغناطيسي للأرض. لقد بدا أنه لا تُوجَد آليةٌ جزيئيَّة يمكن أن تُتيح للحيوان القيامَ بذلك، أو هي غيرُ موجودة على الأقل في مجال الكيمياء الحيوية التقليدية.

بالرغم من ذلك، ففي السنة نفسِها التي أعلن فيها بيتر أتكينز عن تشكُّكِه، نشَر فولفجانج وروزفيتا فيلتشكو — وهما فريقٌ ألماني من زوجٍ وزوجته، عالِمَين في الطيور ومُقيمين في فرانكفورت — بحثًا مُهمًّا للغاية في مجلة «ساينس»، وهي من المجلات الأكاديمية المرموقة على مستوى العالم، وأثبَتا فيه بما لا يدعُ مجالًا للشك أنَّ طيور أبي الحناء تستطيع تحديدَ المجال المغناطيسي للأرض.[2] والأهمُّ من ذلك أنهما أوضَحا أنَّ هذه الحاسة لدى الطائر لا تعمل بالطريقة نفسِها التي تعمل بها البوصلة العادية على ما يبدو. فالبوصلة تُميز بين القُطبَين المغناطيسيَّين الشماليِّ والجنوبي، لكن طائر أبي الحناء لا يُميز إلا بين القطب وخطِّ الاستواء.

لِفَهم الكيفية التي يمكن أن تعملَ بها مثلُ هذه البوصلة؛ ينبغي دراسةُ خطوط المجال المغناطيسي، وهي مساراتٌ غيرُ مرئيةٍ تُحدد اتجاه المجال المغناطيسي الذي ستُحاذيه إبرة البوصلة عند وضعها في أيِّ مكانٍ داخل ذلك المجال الذي يتمثَّل لنا على النحو الأوضح في الخطوط التي تتشكَّل عند وضع بُرادة الحديد على قطعةٍ من الورق وتحتها قضيبٌ مغناطيسي. لنتخيَّل أنَّ الكرة الأرضية بأكملها قضيبٌ مغناطيسي عملاق تنبثق خطوطُ مجاله من القطب الجنوبي مُتجهةً نحوَ الخارج، ثم تنحني في شكل حلقاتٍ كي تدخلَ إلى القطب الشمالي (انظر الشكل ١-١). نجد أنَّ خطوط المجال بالقرب من القطبَين تكاد أن تكون عمودية؛ سواء أكانت ساقطة على الأرض أو خارجةً منها، لكنها تنبسطُ وتكاد أن تُصبح موازيةً لسطح الكوكب كلما اقتربَت من خط الاستواء. إذن، فالبوصلة التي تقيس زاويةَ الميل بين خطوط المجال المغناطيسي وسطح الأرض — وتُسمى «بوصلة الميل المغناطيسي» — يمكنها التمييز بين الاتجاه نحو أحدِ القُطبَين والاتجاه نحو خطِّ الاستواء،




شكل ١-١: المجال المغناطيسي للأرض.

لكنها لا تُميز بين القطبين الشمالي والجنوبي لأن خطوط المجال تُشكِّل الزاوية نفسَها مع الأرض عند قطبَي الكرة الأرضية كليهما. وقد أوضحَت دراسةُ الزوجين فيلتشكو عام ١٩٧٦ أنَّ آلية الحاسة المغناطيسية لدى طائر أبي الحناء مماثلةٌ لآلية بوصلة الميل المغناطيسي. ظلَّت المُعضلة أنَّ أحدًا لم يستطع تكوينَ أيِّ فكرة على الإطلاق عن الطريقة

المحتملة لآلية عمل بوصلة الميل المغناطيسي البيولوجية تلك؛ إذ لم تكن تُوجَد حينها آليةٌ معروفة، أو حتى آليةٌ يمكن تخيُّلُها لتفسير كيفية تحديد زاوية ميل المجال المغناطيسي للأرض من خلال جسم الحيوان. تبيَّن أنَّ الإجابة تَكمُن في إحدى النظريات العلمية الأكثر إثارةً للدهشة في العصر الحديث، وأنها تتعلق بالعلم الغريب المتمثِّل في ميكانيكا الكم.

## واقعٌ طيفي خفي

إذا أجريتَ اليوم استطلاعَ رأيٍ غيرَ رسمي بين العلماء وسألتَهم عمَّا يرون أنها النظرية العِلمية الأنجح والأهم والأكثر تأثيرًا في تاريخ العلوم كلِّه، فستتوقَّف الإجابات على تخصصِ مَن يُجيب عن السؤال وما إن كان متخصصًا في الفيزياء أم في علوم الحياة. فمُعظم علماء الأحياء يرَون أنَّ نظرية التطور عن طريق الانتقاء الطبيعي التي وضعها داروين هي أعمقُ فكرة تشكَّلَت على الإطلاق. غير أنَّ علماء الفيزياء سيُحاجُّون على الأرجح بأنَّ علم ميكانيكا الكمِّ هو ما ينبغي أن يحظى بالصدارة؛ فهو الأساسُ الذي يستند إليه الجزءُ الأكبر من علوم الفيزياء والكيمياء بالرغم من كل شيء، وهو يُقدِّم لنا صورةً مكتملة بدرجةٍ لافتة عن وحدات البناء التي يتألَّف منها الكونُ بأكمله. الحق أنه لولا القوةُ التفسيرية لذلك العلم، لغاب عنا قدرٌ كبير من فهمنا الحاليِّ للكون وآلياته.

لا بد أنَّ الغالبية العُظمى قد سمعت عن «ميكانيكا الكم»، حتى إننا نجد في الثقافة الشعبية تلك الفكرةَ القائلة بأنها مجالٌ علمي محيِّر وصعبٌ لا يفهمه إلا قلةٌ قليلة من البشر الأذكياء. لكن الواقع أنَّ ميكانيكا الكم تُشكل جزءًا من حياتنا منذ أوائل القرن العشرين. تَشكَّل هذا العلمُ في منتصف عشرينيَّات القرن العشرين بصفته نظريةً رياضية لتفسير عالم الجزيئات الصغيرة (أو العالم المصغَّر كما يُطلَق عليه)؛ أي: تفسير سلوك الذرَّات التي تُكوِّن كلَّ ما نراه حولنا، وخصائصِ حتى الجسيمات الأصغر التي تتشكَّل منها تلك الذرات. فمن خلال وصفِ القواعد التي تتبعُها الإلكترونات على سبيل المثال وكيفيةِ تنظيمها لنفسها داخل الذرات؛ تدعم ميكانيكا الكم علومَ الكيمياء وعلومَ المواد وحتى علم الإلكترونيات. وعلى الرغم من غرابة هذا المجال، فإنَّ قواعده الرياضية تكمن في صميم غالبيةِ أوجُه التطور التكنولوجي التي حدَثَت في الخمسين عامًا الماضية. فلولا تفسيرُ ميكانيكا الكم للطريقة التي تتحرَّك بها الإلكتروناتُ داخل المواد، لَما فَهِمنا سلوكَ أشباه الموصِّلات التي تُمثل أساسَ الإلكترونيات الحديثة، ولولا أننا فهمنا أشباهَ الموصلات، لما طوَّرْنا الترانزستور المصنوعَ من السيليكون، ولَما طوَّرنا الرقاقاتِ المصغَّرةَ، ومِن بعدها

أجهزةَ الكمبيوتر الحديثة. ليس هذا فحسب؛ فلولا التقدمُ في المعرفة بفضل ميكانيكا الكم، لَما تمَكَّنَّا من اختراع الليزر؛ ومن ثمَّ لم نكن لِنُطوِّر أجهزةَ تشغيل أقراص «بلو راي» أو الأقراص المُدمجة أو أقراص الفيديو الرقمي؛ ولولا ميكانيكا الكم، لما أصبح لدينا الهواتفُ الذكية ولا أنظمة الملاحة باستخدام القمر الصناعي، ولا أجهزةُ المسح الضوئي باستخدام التصوير بالرنين المغناطيسي. لقد أشارت التقديراتُ بالفعل إلى أنَّ أكثرَ من ثُلث إجمالي الناتج المحليِّ في الدول المتقدِّمة يعتمد على تطبيقاتٍ لم تكن لِتُوجَد ببساطةٍ لولا فَهمُنا لعالم ميكانيكا الكم.

تلك هي البداية فحسب. يمكننا أن نتطلَّع إلى مستقبلٍ كَمِّي سنشهده في حيواتنا على الأرجح، ربما نتمكَّنُ فيه من توفير كمياتٍ مَهولة من الطاقة الكهربية بفضل الاندماج النوويِّ الناتج عن أشعَّة الليزر، وستقوم فيه الآلاتُ الجزيئيَّة الاصطناعية بمجموعةٍ كبيرة من المهام في مجالات الهندسة والكيمياء الحيوية والطب، وتُوفر أجهزة الكمبيوتر الكمية حلولَ الذكاء الاصطناعي، وربما يمكن أيضًا أن ينتشرَ استخدامُ تكنولوجيا النقل الآنيِّ التي لم تزَل ضربًا من الخيال العلمي في نقل المعلومات. إنَّ الثورة الكمية التي بدأتْ في القرن العشرين تُسرع الخُطى في القرن الحادي والعشرين، وسوف تُغير حياتنا بطرقٍ لا يتخيَّلها أحد.

فما هي ميكانيكا الكم بالضبط؟ سنناقش إجابةَ هذا السؤال على مدار الكتاب، وسنبدأ الآن بمقتطَفٍ منها من خلال ذِكر بعض الأمثلة على الواقع الكمي الخفي، الذي يُشكل أساسَ حياتنا.

سيُوضح المثالُ الأول واحدةً من السِّمات الغريبة في العالم الكَمِّي، ويمكن القولُ إنها السمة المميزة له، وهي ازدواجيةُ الموجةِ والجُسَيم. نحن نعرف أنَّ الإنسان وكلَّ ما حوله يتكوَّن من عددٍ كبير من الجسيمات الصغيرة المنفصلة، مثل الذرات والإلكترونات والبروتونات والنيوترونات. وربما تعرف أيضًا أنَّ الطاقة — مثل الضوء أو الصوت — تنبعثُ في صورةِ موجاتٍ وليس في صورةِ جُسيمات. لا تُوجَد الموجات في صورةٍ جُسَيمية، بل تنتشر وتتدفَّق في الفضاء في شكلٍ مَوجي من قِمَم وقيعان يُشبه أمواجَ البحر. وُلِدَت ميكانيكا الكم حين اكتشَف العلماء في أوائل القرن العشرين أنَّ سلوك الجسيمات دون الذريَّة يمكن أن يُشبِهَ سلوك الموجات، وأنَّ سلوك موجات الضوء يمكن أن يُشبه سلوك الجسيمات.

بالرغم من أنَّ ازدواجية الموجة والجسيم ليست بالفكرة التي نحتاج إلى تأمُّلِها كلَّ يوم، فهي الأساسُ الذي يقوم عليه كثيرٌ من الأجهزة المهمَّة؛ مثل المجهر الإلكترونيِّ الذي يُتيح

للأطباء والعلماء رؤيةَ الأجسام المتناهيةِ الصِّغَر التي تصعب رؤيتها تحت المجهر الضوئي العادي، والتعرفُ عليها ودراستها، ومن ذلك الفيروسات المُسبِّبة للإيدز، وتلك المسبِّبة لنزلات البرد الشائعة. لقد استُلهِمَت فكرةُ المجهر الإلكتروني من اكتشاف أن الإلكترونات تتَّسم بخصائصَ شبيهةٍ بخصائص الموجات. أدرك العالمان الألمانيَّان ماكس نول وإرنست روسكا أنه لَمَّا كان الطولُ الموجي — أي: المسافة بين أيِّ قمتين متتاليتين أو قاعَين متتاليين في أيِّ موجة — المرتبطُ بالإلكترونات أقصرَ من الطول الموجيِّ للضوء المرئي، فسيكون المجهر الذي يَستخدِم التصويرَ بالإلكترونات قادرًا على التقاطِ التفاصيل بدقةٍ أكبرَ كثيرًا من دقة المجهر الضوئي. ويرجع السبب في ذلك إلى أنَّ أي تفصيلةٍ أو جسم صغير أبعادُه أصغر من الموجة الواقعة عليه، لن يُؤثر فيها. ولنضرب مثالًا على ذلك بأمواج المحيط التي تَترامى على حَصى الشاطئ، بينما يبلغ ارتفاعُها عدةَ أمتار. لن نستطيع معرفةَ أيِّ شيء عن شكلِ حَصاةٍ منفردة أو حجمِها بدراسة الأمواج. وإنما سنحتاج إلى موجاتٍ أقصرَ كثيرًا مثل الأمواج التي تتشكَّل في حوض التموُّج الذي يراه الجميعُ في دروس العلوم بالمدرسة؛ وذلك لكي «نرى» الحَصاة من خلال معرفة كيفية ارتداد الأمواج عنها، أو الكيفية التي تَحيد بها عنها. ومن ثَمَّ، ففي عام ١٩٣١، صمَّم نول وروسكا أولَ مجهرٍ إلكتروني في العالم، واستخدَماه في التقاطِ أول صورٍ للفيروسات، وقد حصَل إرنست روسكا على جائزة نوبل عن هذا الاختراع، غير أنَّ ذلك جاء متأخرًا بعضَ الشيء في عام ١٩٨٦ (أي: قبل وفاته بعامين).

نأتي الآن إلى مثالنا الثاني وهو جوهريٌّ بدرجةٍ أكبر. لماذا تسطعُ الشمس؟ ربما يُدرك معظمُ الأشخاص أنَّ الشمس في الأساس هي مُفاعِلُ اندماج نووي، يحرق غازَ الهيدروجين لإصدار الحرارة والضوء اللذَين يدعمان جميعَ أشكال الحياة الموجودة على الأرض، لكنَّ القليل هم مَن يعلمون أنَّ الشمس لم تكن لِتَسطعَ على الإطلاق لولا خاصيةٌ كمية مميزة تُتيح للجسيمات أن «تخترق الحواجز». إنَّ الشمس — وجميعَ النجوم في الكون بالطبع — تتمكَّن من إصدار هذه الكميات الهائلة من الطاقة لأنَّ أنوية ذرَّات الهيدروجين التي تتكون كلٌّ منها من جسيمٍ واحد ذي شحنةٍ موجبة يُسمَّى البروتون، قادرةٌ على الاندماج؛ ومن ثمَّ تُولد الطاقةَ في شكل الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي نُسميه بضوء الشمس. لكي تتمكَّن نَواتا هيدروجين من الاندماج؛ لا بد أن تقترب إحداهما للغاية من الأخرى، لكنَّ قوة التنافُر بينهما تزداد كلَّما اقترَبتا لأن كلَّ نَواةٍ منهما تحملُ شحنةً كهربية موجبة، والشحنات «المتشابهة» تتنافر. واقعُ الأمر أنه كي تتمكنَ النَّواتان من الاقتراب بالدرجة التي تسمح

بالاندماج، ينبغي أن تكون الجسيماتُ قادرةً على عبور حاجزٍ دونَ ذرِّيٍّ يمكن تشبيهُه بجدارٍ من الطوب؛ حاجز طاقة لا يمكن اختراقُه على ما يبدو. إنَّ الفيزياء الكلاسيكية[1] التي تأسَّسَت على القوانين التي وضعها إسحاق نيوتن للحركة والميكانيكا والجاذبية، والتي تصفُ عالم الحياة اليومية بما فيه من كُرات ونَوابض ومُحركات بُخارية (وحتى الكواكب) على نحوٍ دقيق، تتنبَّأ بأنَّ ذلك لا يمكن أن يحدث؛ أي إنَّ الجسيمات لا تستطيع اختراقَ الحواجز، ومِن ثمَّ لا يمكن للشمس أن تُضيء.

غير أنَّ الجسيمات التي تتبع قواعدَ ميكانيكا الكم مثل أنوية الذرَّات لا تخلو جَعْبتُها من حيلٍ ذكية؛ إذ يسهل عليها اختراقُ تلك الحواجز عبر عمليةٍ تُسمى «النفَق الكمي». الحقُّ أنَّ خاصية ازدواجية الموجة والجسيم هي تحديدًا ما يُمكِّنها من فعل ذلك. فمِثلما أنَّ الموجات يمكن أن تتدفقَ حول الأجسام كالحصى الموجودِ على الشاطئ، يُمكنها أيضًا أن تتدفَّق عبر الأجسام مثلما تفعل موجاتُ الصوت التي تخترق جدرانَ منزلك حينما تسمعُ صوت التلفزيون الصادر من منزلِ جارك. لا شك أنَّ الهواء الذي يحمل الموجات الصوتية لا يخترق الجدرانَ ذاتَها في الواقع، بل إنَّ ذَبْذبة الهواء — الصوت — هي التي تتسبَّب في اهتزاز جِدارك؛ ومِن ثم تضغط على الهواء في داخل غرفتك لنقلِ الموجات الصوتية ذاتِها إلى أذنك. لكنك إذا تمكَّنتَ من التصرُّف كنَواةِ إحدى الذرات، فستتمكَّن في بعض الأحيان من اختراق الجدران الصُّلبة مباشرةً كطيف.[2] وهذا بالتحديد ما تفعله نَواةُ ذرة الهيدروجين داخل الشمس؛ فهي تتمدَّد ثم «تتسرب» عبر حاجز الطاقة مثل طيف كي تقتربَ بما يكفي من شريكتها على الجانب الآخَر من الحاجز كي تندمجا. لذا، ففي المرة القادمة التي تستمتع فيها بحمَّامِ شمس على الشاطئ بينما تُشاهد الأمواج تتكسَّر على الشاطئ، اقتطِعْ من وقتك بُرهةً تتأمَّل فيها ما تُصدره الجسيماتُ الكمية من حركاتٍ طيفية شبيهةٍ بالأمواج لا تُتيح لك الاستمتاع بأشعة الشمس فحسب، بل إنها ما يجعل كلَّ أشكال الحياة ممكنةً على الكوكب.

يُعَد مثالنا الثالث وثيقَ الصلة أيضًا بما نريد توضيحه، لكنه يوضِّح سِمةً مختلفة، وحتى أغرب، من سمات العالم الكمي؛ وهي ظاهرةٌ يُطلق عليها اسم «التراكب»، التي وَفْقًا لها يمكن للجسيمات أن تُؤدِّيَ عمليتَين — أو مائة، أو حتى مليون عملية — في وقتٍ واحد. تلك الخاصية هي المسئولة عن ثراء كوننا وتعقيده على نحوٍ مُثير للاهتمام. بعد مدةٍ قصيرة من الانفجار العظيم الذي أتى بالكون إلى الوجود، امتلأ الفضاءُ بنوعٍ واحد فقط من الذرَّات هو الأبسطُ في التركيب، ألا وهو ذرَّات الهيدروجين التي تتكوَّن من بروتون واحد

موجب الشحنة، وإلكترونٍ واحد سالب الشحنة. كان الكون قاتمًا؛ إذ كان خاليًا من النجوم والكواكب، ومن الكائنات الحية بالطبع؛ لأن عناصر البِناء الأساسية التي تتكوَّن منها كلُّ المخلوقات — بما في ذلك البشر — لا تتكون من الهيدروجين فحسب، بل تتضمَّن عناصرَ أثقل؛ مثل الكربون والأكسجين والحديد. ومن حُسن الحظ أنَّ تلك العناصرَ الأثقل تكوَّنَت داخل النجوم المُمتلئة بالهيدروجين، ويعود الفضل في تشكيل المُكوِّن الأوَّلي لتلك العناصر، وهو شكلٌ من أشكال الهيدروجين يُعرف باسم الديوتيريوم، إلى درجةٍ من السحر الكمي.

تتمثَّل الخطوة الأولى من تلك العملية فيما ذكَرناه للتو: تقترب نَواتا هيدروجين — بروتونين — إحداهما من الأخرى بالدرجة الكافية عبر النفَق الكمِّي لإنتاج قدرٍ من الطاقة التي تتحوَّل إلى ضوء الشمس الذي يُدفئ كوكبَنا. بعد ذلك، ينبغي أن يندمج البروتونان معًا، لكن ذلك لا يحدث بطريقة مباشرة لأن القُوى الموجودةَ بينهما لا تُوفر قوةً كافية للتلاحم. فأنويةُ الذرات جميعها تتألَّف من نوعَين من الجسيمات وهما البروتونات، وشريكتها ذات الشحنة الكهربية المحايدة: النيوترونات. وإذا كانت النواة تحتوي على قدرٍ كبير من نوع واحد دونَ الآخر، فإن قواعد ميكانيكا الكم تقتضي استعادةَ التوازُن بين النوعَين؛ ومِن ثم تتحول تلك الجسيمات الزائدة إلى النوع الآخر؛ أي: تتحول البروتونات إلى نيوترونات أو النيوترونات إلى بروتونات عبر عمليةٍ تُسمى «تُحلل بيتا». هذا هو بالضبط ما يحدث حين يجتمع اثنان من البروتونات معًا؛ إذ يستحيل وجود مركَّب يتألف من اثنين من البروتونات، ومن ثمَّ يتحول أحدهما إلى نيوترون عبر عملية تَحلُّل بيتا. عندئذٍ، يمكن للبروتون المتبقِّي والنيوترون المتحوِّل حديثًا أن يتَّحدا معًا لتكوين جسم يُسمَّى الديوتيرون (وهو نَواة ذرة نظير الهيدروجين[٣] الثقيل المُسمَّى الديوتيريوم)، وبعد ذلك تُتيح المزيد من التفاعلات بناء نواةٍ أعقدَ تتكون من عناصرَ أخرى أثقل من الهيدروجين، بدايةً من الهيليوم (تتكون نَواة الهيليوم من بروتونَين ونيوترونٍ واحد أو اثنين) وحتى الكربونِ والنيتروجين والأكسجين وغيرِها من العناصر.

إنَّ أكثر ما يُهمنا في هذا المثال أنَّ الفضل في وجود الديوتيرون يعود إلى قُدرته على الوجود في حالتَين في آنٍ واحد؛ وذلك بسبب ظاهرة التراكُب الكَمِّي. يرجع السبب في ذلك إلى إمكانيةِ اتحاد البروتون والنيوترون معًا بطريقتَين مختلفتين يمكن التمييزُ بينهما من خلال كيفية «دورانهما». وسوف نَعرِض في جزءٍ لاحق من هذا الكتاب الاختلاف الكبير بين مفهوم «الدوران الكمي» ومفهوم الدوران العادي لأيِّ جسمٍ كبير مثل كرة التنس، لكننا سنكتفي الآن بتصوُّرنا البديهي التقليدي للجسيم الدوار ونتخيل أنَّ كلًّا من

البروتون والنيوترون يدوران معًا داخل الديوتيرون في رقصةٍ مُصمَّمة بعناية تجمع بين إيقاع الفالس الحميمي البطيء وإيقاع الجايف السريع. يعود اكتشاف الدوران الكمِّي إلى ثلاثينيَّات القرن العشرين حينما اكتُشف أنَّ هذين الجسيمَين لا يدوران داخل الديوتيرون معًا بحالة «واحدة» من الحالتَين دون «الأخرى»، بل يدوران في الحالتين كلتَيهما في وقتٍ واحد؛ أي: إنهما في حركة دوران تجمع بين الإيقاع البطيء والإيقاع السريع في آنٍ واحد — وهذا ما يُمكِّنهما من الاتحاد معًا.[٤]

ثَمة استجابة واضحة قد تَرِد على ذلك الزعم وهي: «كيف نعرف ذلك؟» لا شك أنَّ نواة الذرة بالغةُ الضآلة، ولا تُرى بالعين المجردة؛ أليس من المنطقي إذن أن نفترض وجودَ حلقةٍ مفقودةٍ في فَهمِنا للقُوى النووية؟ لكنَّ الإجابة عن هذا السؤال بكلَّا؛ لأنه قد تأكَّد مرارًا وتَكرارًا في العديد من المختبرات أنه إذا كان البروتون والنيوترون يؤدِّيان ما يُكافئ «إمَّا» الإيقاع الكمي البطيء «أو» ما يُكافئ الإيقاع الكمِّي السريع، فإن «الرابط» النوويَّ بينهما لن يكون قويًّا بالدرجة الكافية لاتحادهما معًا؛ ذلك أنَّ قوة الاتحاد لا تُصبح قويةً بما يكفي إلا عندما تتراكب الحالتان إحداهما فوق الأخرى — أي: عندما يحدث الواقعان في آنٍ واحد. يمكن تخيلُ تراكب الواقعَين على أنه شبيهٌ بعض الشيء بمزجِ لونين — ولْيَكونا الأزرق والأصفر — لإنتاج لونٍ مركَّب هو الأخضر. فعلى الرغم من أنك تعرف أنَّ اللون الأخضر يتألَّف من هذين اللونين الأساسيَّين، فهو ليس بهذا اللون أو ذاك. ثم إنَّ مزج نسبٍ مختلفة من الأزرق والأصفر سيُنتج درجاتٍ مختلفةً من اللون الأخضر. وعلى غِرار ذلك، يتكون الديوتيرون حينما يشترك البروتون والنيوترون في رقصة الإيقاع البطيء في معظم الأحيان، مع اشتراكهما في رقصة الإيقاع السريع في قليلٍ منها فقط.

إذن، إن لم تكن الجسيمات قادرةً على الرقص على الإيقاعَين البطيءِ والسريع في آنٍ واحد، لَظل الكونُ حساءً من غاز الهيدروجين ولا شيء غيرَ ذلك؛ فلم تكن النجوم لِتَسطع ولم تكن العناصرُ الأخرى لتتشكَّل، ولَما قرأتَ هذه الكلمات. إنَّ السبب في وجودنا هو قدرةُ البروتونات والنيوترونات على التصرُّف بتلك الطريقة الكمية المناقِضة للبديهة.

سنتناول الآن مِثالَنا الأخير الذي سيأخذنا إلى عالم التكنولوجيا مرةً أخرى. لا تتوقَّف استخداماتُ طبيعة العالم الكمِّي عند رؤية الأجسام الدقيقة مثل الفيروسات فحسب، بل تُستخدَم أيضًا لرؤيةِ ما بداخل أجسامنا. يتجسَّد هذا الاستخدام في التصوير بالرنين المغناطيسي، وهي تقنيةٌ للفحص الطبي تُنتج صورًا ذاتَ تفاصيل رائعةٍ للأنسجة اللينِّة. عادةً ما يُستخدَم التصويرُ بالرنين المغناطيسي في تشخيص الأمراض؛ لا سيما اكتشاف

الأورام التي تُصيب أعضاءَ الجسم الداخلية. والحقُّ أنَّ معظم الشروحات غير المتخصِّصة التي تُناقش التصوير بالرنين المغناطيسي تتجنَّب ذِكر أن تلك التقنية تعتمد على الطريقة الغريبة التي يعمل بها العالم الكمي. ذلك أنَّ هذه التقنية تعتمد على استخدام مَغانِطَ كبيرةٍ قوية لكي تُصبح مَحاورُ أنويةِ ذرات الهيدروجين الدوَّارة مُحاذيًا بعضُها لبعض داخل جسم المريض. بعد ذلك تُعرَّض تلك الذرَّات لنبضةٍ من الموجات الراديوية، مما يُجبِر الأنويةَ المتحاذية على أن تُوجَد في تلك الحالة الكمية الغريبة التي تدور فيها في كِلا الاتجاهين في آنٍ واحد. ما من جدوى في أن تُحاول حتى تصوُّر ما ينطوي عليه ذلك؛ لأنه بعيدٌ كلَّ البعد عن خبراتنا في الحياة اليومية! ما يُهمنا الآن هو أنه عندما تعود أنويةُ الذرات إلى حالتها الأولية التي كانت عليها قبل أن تتلقَّى دَفْقة الطاقة التي دفعَتها إلى حالة التراكُب الكمِّي، فإنها تُطلق تلك الطاقة؛ ومن ثَم تلتقطها الأدواتُ الإلكترونية الموجودة في جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي وتستخدمها كي تُولِّد صورًا رائعةَ التفاصيل لأعضائك الداخلية.

لذا، إن وجدتَ نفسك مُستلقيًا في جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي، وربما كنت تستمع إلى الموسيقى التي تنبعث في سماعات الرأس، فلْتتمهَّل لحظةً للتفكير في السلوك الكميِّ المناقض للبديهة الذي تَسلُكه الجسيمات دون الذرية، والذي جعل ابتكارَ هذه التقنية أمرًا ممكنًا.

## علم الأحياء الكمي

ما علاقة كلِّ هذا القدْر من الغرابة في العالم الكمي برحلةِ أُنثى طائر أبي الحناء الأوروبي وهي تجوب العالم؟ حسنًا، لعلَّك تتذكَّر أنَّ بحث الزوجين فيلتشكو الذي أُجري في أوائل سبعينيَّات القرن العشرين أثبتَ أنَّ الحاسة المغناطيسية لدى طائر أبي الحناء تعمل بالطريقة ذاتِها التي تعمل بها بوصلة الميل المغناطيسي. وقد كانت هذه النتيجة مُحيرةً للغاية؛ إذ لم يكن أحدٌ يعرف على الإطلاق حينذاك أيَّ كيفية يمكن أن تعمل بها بوصلةُ ميلٍ مغناطيسي بيولوجية. لكن في الوقت نفسِه تقريبًا، ثمة عالم ألماني يُدعى كلاوس شولتن صار مُهتمًّا بكيفية انتقال الإلكترونات في التفاعلات الكيميائية التي تتضمَّن الجذورَ الحرة. إنَّ هذه الجذور هي جزيئاتٌ بها إلكترونات منفردة في غلافها الإلكتروني الخارجي، وذلك على عكس معظم الإلكترونات؛ إذ إنها تقترنُ في مدارات ذرية. تبرز أهمية تلك النقطة عند دراسة خاصية الدوران الكمِّي الغريبة؛ فلأنَّ الإلكترونات المقترنةَ عادةً ما تدور في

اتجاهَين معاكسين، فإنَّ القيمة الإجمالية للدوران تُصبح صفرًا في النهاية. بالرغم من ذلك، من دون توءمٍ يُلغي الدوران، فإن قيمةَ صافي الدوران للإلكترونات المنفردة في الجذور الحرة تمنحها خاصيةً مغناطيسية؛ ومن ثَمَّ يُمكن تحقيق الاتساق بين دورانها وبين مجالٍ مغناطيسي.

لقد اقترح شولتن أن «أزواج» الجذور الحرة الناتجة عن عمليةٍ تُسمى «تفاعل الحالة الثلاثية السريع» يمكن أن تجعل الإلكترونات المقابلةَ لها في حالةِ «تشابك كَمِّي». ولأسباب معقَّدة ستتضحُ فيما بعد؛ فتلك الحالة الكمية الدقيقة لإلكترونين منفصلين، شديدةُ الحساسية لاتجاهِ أي مجال مغناطيسي خارجي. ولهذا، فقد اقترح شولتن أيضًا أنَّ البوصلة المحيرة التي تتمتع بها الطيورُ ربما تستخدم هذا النوع من آلية التشابك الكمي.

إننا لم نتطرَّق إلى ذِكر التشابك الكمِّيِّ حتى الآن؛ لأنها أغربُ سِمات ميكانيكا الكمِّ على الأرجح. فهي ما يُتيح للجسيمات التي اقترَنَت معًا مرةً أن تبقى، بالرغم من المسافات الطويلة التي تفصل بينها، على اتصالٍ فوري يَكاد أن يكون أشبهَ بالسحر. على سبيل المثال، يمكن للجسيمات، التي كان بعضُها قريبًا من بعض في أحد الأوقات، ثم صارت تفصل بينها مسافاتٌ كبيرة للغاية، حتى إنها أصبحَت تُوجَد في جانبَين متقابلين من الكون، أن تظل متصلةً ببعضها البعض، وإن كان ذلك من حيث المبدأُ على الأقل. واقعُ الأمر أنَّ إثارة جُسيم واحد كفيلةٌ بأن تُحفِّز شريكه البعيدَ إلى القفز في اللحظة نفسِها.[٥] لقد أوضَح رُوَّاد ميكانيكا الكم أنَّ التشابك نتيجةٌ طبيعية لمعادلاتهم، لكن تأثيراته كانت استثنائيةً للغاية حتى إنَّ أينشتاين نفسَه الذي طرَح مفهوم الثقوب السوداء والزمَكان المشوَّه، رفض قَبوله وتهكَّم عليه باعتباره «فعلًا طيفيًّا عن بُعد». الحق أنَّ هذا الفعل الطيفيَّ الذي يجري عن بُعد هو غالبًا ما يُثير اهتمامَ «مهاويس الكم» ممَّن يُغالون في ادعاءاتهم عن التشابك الكمي مزاعمَ مُغالية، إذ يزعمون أنه يُفسر «الظواهر» الخارقة مثل التخاطر. لقد تشكَّك أينشتاين في فكرةِ التشابك؛ لأنها بدَت مخالفةً لنظريتِهِ عن النسبية التي تقول إنه لا يمكن لأيِّ تأثير أو إشارة أن تُسافر عبر الفضاء بسرعةٍ أكبر من سرعة الضوء. فوَفقًا لأينشتاين، لا يمكن للجسيمات البعيدة أن تمتلكَ اتصالاتٍ طيفيَّةً آنيَّة. وفي هذا أخطأ أينشتاين؛ فنحن نعلم الآن بالوسائل التجريبيَّة أنَّ الجسيمات الكمية يمكن أن تُوجَد بينها روابطُ آنية طويلة المدى في الحقيقة. بالرغم من ذلك، فلا يمكن استخدام التشابك الكمِّي لإثبات التخاطر.

في أوائل سبعينيَّات القرن العشرين، كانت الفكرة القائلة باشتراك خاصية التشابك الكمِّي الغريبة في التفاعلات الكيميائية العادية تُعَد من الأفكار الشاذة. ففي ذلك الوقت،

انضمَّ العديد من العلماء إلى أينشتاين في تشكيكه فيما إذا كانت الجسيمات المتشابكة موجودةً بالفعل أصلًا؛ إذ لم يكن أحدٌ قد اكتشفها بعد. غير أنه على مدار عقودٍ منذ ذلك الوقت، أكَّدَت العديد من التجارِب المختبرية المبتكَرة حقيقةَ وجود تلك الروابط الطيفية، وقد أُجريَت أشهرُ تلك التجارِب مبكرًا في عام ١٩٨٢ على يد فريقٍ من علماء الفيزياء الفرنسيين بقيادة آلان أسبيه بجامعة باريس الجنوبية.

أنتج فريقُ أسبيه أزواجًا من الفوتونات (جُسيمات الضوء) تُوجَد في حالاتِ استقطابٍ متشابكة. من المرجَّح أنك تعرف استقطابَ الضوء من خلال ارتداء النظارات الشمسية المستقطِبة للضوء. فلكلٍّ فوتون من فوتونات الضوء نوعٌ من الاتجاه يُسمى زاوية الاستقطاب، وهي شبيهةٌ إلى حدٍّ ما بخاصية الدوران التي تَحدَّثنا عنها سابقًا.[٦] تَصدر فوتونات أشعَّة الشمس بكل زوايا الاستقطاب المحتملة، لكن النظارات الشمسية ذات العدسات المستقطِبة تُرشِّح تلك الفوتونات ولا تسمح إلا بمرورِ فوتوناتٍ ذاتِ زاوية استقطاب مُعيَّنة. لم تكن أزواجُ الفوتونات التي أنتجَها أسبيه ذاتَ اتجاهاتِ استقطابٍ مختلفة فحَسْب — لنقُل إنَّ أحد الاتجاهات كان يُشير إلى الأعلى وأحدها إلى الأسفل— بل كانت متشابكةً أيضًا، وعلى غِرار مثالِ الرقص الذي ذكرناه سابقًا، لم يكن أيٌّ من الأزواج المتشابكة يُشير إلى اتجاهٍ دون الآخر، وإنما كانا يشيران إلى الاتجاهَين كِلَيهما في آنٍ واحد، «حتى خضَعا للقياس».

يُعَد القياس من السِّمات الأكثر غموضًا في ميكانيكا الكم، وهو أكثرُ ما يُناقَش منها بالطبع؛ لأنه يتعلق بالسؤال الذي تبادر إلى ذهنك بالفعل لا ريب: لماذا لا تفعل كلُّ الأجسام التي نراها كلَّ تلك الأشياء الغريبة والرائعة التي تفعلها الجُسيمات الكمية؟ والإجابة هي أنه في العالم الكَمِّي المجهري، يمكن للجسيمات أن تتصرف بهذه الطرُق الغريبة، مثل فعل شيئَين في آنٍ واحد أو اختراق الحواجز أو امتلاك اتصالات طيفية، شريطةَ ألا يوجد مَن يُراقبها. ففور أن تُرصَد الجسيمات أو تُقاس بطريقةٍ ما، فإنها تفقد غرابتها وتتصرَّف مثل الأجسام العادية التي نراها مِن حولنا. غير أنَّ ذلك يطرح سؤالًا آخَر بالطبع وهو: ما المُميز إلى هذا الحد بشأن القياس ليُحوِّل السلوك الكمي إلى سلوكٍ عادي؟[٧] لإجابة هذا السؤال أهميةٌ بالغة في موضوع حديثنا؛ لأن القياس يقع على الحد الفاصل بين العالم الكمي والعالم الكلاسيكي، تلك الحافَة الكمية التي نزعم أنَّ الحياة أيضًا تكمن عندها، مثلما خمَّنتَ مِن عنوان هذا الكتاب.

سنستعرضُ القياس الكميَّ على مَدار مُناقشتنا في هذا الكتاب، ونحن نأمُل أنك ستبدأ تدريجيًّا في فَهْم خفايا تلك العمليةِ الغامضة. أما الآن، فسوف نكتفي بالتفسير الأبسط لتلك الظاهرة ونقول إنه عند قياس خاصيةٍ كمية — مثل حالة الاستقطاب — باستخدام أداة عِلمية، فإنها تُضطَرُّ على الفور إلى فقدان قُدراتها الكميَّة مثل اتخاذ اتجاهاتٍ مُتعددة في آنٍ واحد، والتحلِّي بخاصية كلاسيكية تقليدية بدلًا من ذلك، مثل اتخاذ اتجاهٍ واحد فقط. ولهذا؛ عندما قاس أسبيه حالةَ الاستقطاب لزوجَين من الفوتونات المتشابكة عن طريقِ مُلاحظة ما إذا كانت الفوتونات قادرةً على المرور من خلال عدسةٍ مستقطبة أم لا، فقدَ الفوتون الأول الاتصالَ الطيفي مع شريكه على الفور، ولم يتخذ سوى اتجاهِ استقطابٍ واحد. فعل الفوتون الشريكُ الأمرَ نفسَه أيضًا على الفور، بصرف النظر عن طولِ المسافة التي يبعدها؛ ذلك ما تنبَّأتْ به معادلاتُ ميكانيكا الكم على الأقل، وهذا بالتحديد ما أدى إلى عدم قَبول أينشتاين لها.

أجرى أسبيه وفريقه تجرِبتَهم الشهيرة على أزواجٍ من الفوتونات تفصل بينها مسافةُ عدةِ أمتار داخل المختبَر، وهي مسافةٌ كبيرة بما يكفي، حتى إنه لم يكن من الممكن لتأثيرٍ ينتقل بسرعة الضوء — تُخبرنا النسبية أنه لا يُوجَد أيُّ شيء أسرع من الضوء — أن يمرَّ من خلالها لتنسيق زوايا الاستقطاب. وعلى الرغم من ذلك، أشارت النتائجُ إلى وجود ترابط بين قياسات الجسيمات المقترنة: حين كان استقطابُ أحد الفوتونات يُشير إلى الأعلى، فإن استقطاب الآخَر كان يُشير إلى الأسفل. ومنذ عام ١٩٨٢، أُعيد إجراء التجرِبة على جسيمات تفصل بينها مئاتُ الأميال، وقد ظلَّت محتفظةً بذلك الترابُطِ المتشابك الطيفي الذي لم يقبَلْه أينشتاين.

لم تُنفَّذ تجرِبةُ أسبيه إلا بعد سنواتٍ من اقتراح شولتن أنَّ ثمة دورًا للتشابك الكمِّي في بوصلة الطيور، وكانت الظاهرة لم تزَل محلَّ جدال. إضافةً إلى ذلك، لم تكن لدى شولتن أيُّ فكرة عن «الكيفية» التي يُتيح بها هذا التفاعلُ الكيميائي الغامض لطائر أبي الحناء أن يرى المجالَ المغناطيسي للأرض. لقد استخدمتُ الفعل «يرى» في الجملة السابقة بسبب سِمَةٍ غريبة أخرى اكتشفها الزوجان فيلتشكو. فبالرغم من أن أبا الحناء الأوروبيَّ من الطيور التي تُهاجر ليلًا، فإن تنشيط بوصلته المغناطيسية يتطلَّب قدرًا ضئيلًا من الضوء (بالقرب من الطرَف الأزرق من الطيف المرئي)؛ مما يُشير إلى أن عين الطائر تؤدِّي دورًا بالغَ الأهمية في طريقةِ عمل البوصلة. لكن بخلاف الرؤية، كيف تُساعد عينُ الطائر في

شكل ١-٢: صورةٌ للحاضرين في ورشة علم الأحياء الكمي التي أقامَتها جامعة سَري عام ٢٠١٢. من اليسار إلى اليمين: المؤلفان جيم الخليلي وجونجو مكفادِن؛ ثم فلاتكو فيدرال، ثم جريج إنجل، ثم نايجل سكروتون، ثم ثورستن ريتز، ثم بول ديفيز، ثم جينيفر بروكس، ثم جريج سكولز.

توفير الحاسة المغناطيسية؟ وسواءٌ أكانت هذه الحاسةُ تعتمد على آليَّة الزوج الجذريِّ أم لا؛ فقد كانت لغزًا غامضًا تمامًا.

ظلَّت النظرية القائلة بأنَّ بوصلة الطيور تنطوي على آليةٍ كَمية مهملة أكثرَ من عشرين عامًا. عاد شولتن إلى الولايات المتحدة حيث أسَّس بجامعة إلينوي في إربانا وشامبين مجموعةَ فيزياء كيميائية نظرية ناجحة للغاية. غير أنه لم ينسَ نظريته الغريبة قط، وأخذ يكتب أوراقًا بحثية تقترح الجزيئاتِ الحيوية (أي: الجزيئات التي تُشكِّلها الخلايا الحية) المحتملة التي قد تُنتج الأزواج الجذرية الضرورية لتفاعل الحالة الثلاثية السريع. غير أنَّ أيًّا منها لم يكن مُلائمًا للغرض؛ إما لأنها لم تُولِّد أزواجًا جذرية، أو لأنها لم تكن موجودةً في عيون الطيور. بالرغم من ذلك، ففي عام ١٩٩٨، قرأ شولتن عن اكتشافِ مستقبِلٍ ضوئي

غامض في عيون الحيوانات يُسمى الكريبتوكروم. أدَّى هذا الاكتشاف إلى إيقاظِ حَدْسِه العلمي فورًا؛ إذ يُعرَف الكريبتوكروم بأنه من البروتينات التي يحتمل أن تولد الأزواج الجذرية.

ثمة طالبُ دكتوراه يُسمى ثورستن ريتز كان قد انضمَّ إلى مجموعة شولتن حديثًا. وحينما كان ريتز طالبًا بجامعة فرانكفورت، سمع شولتن يُلقي محاضرةً عن بوصلة الطيور، وصار شَغوفًا للغاية بالموضوع. وعندما ظهرَت الفرصة لإعداد الدكتوراه في مختبر شولتن حيث عمل في البداية على عملية البناء الضوئي، اغتنمَها على الفور. وحين انتشرَت أنباءُ اكتشاف الكريبتوكروم، تحوَّل إلى العمل على الاستقبال المغناطيسي، وفي عام ٢٠٠٠ كتب بحثًا بالتعاون مع شولتن بعنوان «نموذج للاستقبال المغناطيسي القائم على مُستقبِلٍ ضوئي لدى الطيور»، يصفُ كيف أنَّ الكريبتوكروم يمكن أن يُزوِّد عينَ الطائر ببوصلة كمِّية. (سنعود إلى تناول هذا الموضوع باستفاضةٍ في الفصل السادس.) وبعد ذلك بأربع سنوات، انضم ريتز إلى الزوجَين فيلتشكو لإجراء دراسة على طائر أبي الحناء الأوروبي قدمت أولَ دليلٍ عمَلي يدعم النظريةَ التي تقول باستخدام الطيور للتشابُك الكمي في الانتقال حول العالم. بدا أنَّ شولتن كان مُحقًّا فيما قاله منذ البداية. نُشِر بحثهم عام ٢٠٠٤ في الدوريَّة البريطانية المرموقة «نيتشر»، وقد أثار هذا البحثُ قدرًا هائلًا من الاهتمام، وسرعان ما أصبَح موضوعُ البوصلة الكمية لدى الطيور هو واجهةَ عِلم الأحياء الكمي الجديد.

## إذا كانت ميكانيكا الكمِّ طبيعية، فلِمَ كلُّ هذا الاهتمام بعلم الأحياء الكمي؟

سبق أن تحدَّثنا عن النفق الكمي والتراكُب الكمي في باطن الشمس، وفي الأجهزة التكنولوجية مثل المجهر الإلكتروني، وأجهزةِ التصوير بالرنين المغناطيسي. فلماذا نندهشُ من اكتشاف الظواهر الكَمية في علم الأحياء؟ إنَّ علم الأحياء في نهاية المطاف هو ضربٌ من الكيمياء التطبيقيَّة، والكيمياء ضربٌ من الفيزياء التطبيقية. إذن، أليس كلُّ شيء — بما في ذلك البشَر والكائنات الحية الأخرى — هو جوهريًّا جزءٌ من الفيزياء؟ الحقُّ أنَّ هذه الحُجة هي التي يستخدمها العديدُ من العلماء ممَّن يَقبلون بضرورة تغلغُل ميكانيكا الكم في علم الأحياء، لكنهم يُصرُّون على أن دورها غيرُ مهم. وهم يقصدون بذلك أنه ما دامت قواعدُ ميكانيكا الكم تحكم سلوكَ الذرَّات، وما دام علم الأحياء ينطوي على تفاعُلات الذرات في نهاية المطاف، فلا بد أنَّ قواعد العالم الكمي تَسري في علم الأحياء بمستوياتٍ شديدة

الضَّآلة، بل تسري بتلك المستويات «فحسب»؛ ومن ثَمَّ فلن يكون تأثيرُها في العمليات الكبرى المهمة من أجل الحياة إلا ضئيلًا للغاية، إن لم يكن منعدمًا.

لا شك أنَّ هؤلاء العلماءَ محقُّون جزئيًّا على الأقل. فالجزيئات الحيوية مثل الحمض النووي والإنزيمات تتألَّف من جسيمات أساسية مثل البروتونات والإلكترونات التي تخضع تفاعلاتها لميكانيكا الكم. غير أنَّ بِنْيتَي هذا الكتاب الذي تقرؤه والكرسي الذي تجلس عليه تخضعان هما أيضًا لقواعد ميكانيكا الكم. حتى الطريقة التي تمشي بها أو تتحدَّث بها أو تأكل بها أو حتى تنام أو تُفكر بها؛ لا بدَّ أن تعتمد جوهريًّا على قُوى ميكانيكا الكم التي تحكم البروتونات والإلكترونات وغيرَها من الجسيمات، مثلما أنَّ تشغيل سيارتك أو جهاز تحميص الخبز الخاص بك يعتمد جوهريًّا أيضًا على ميكانيكا الكم. غير أنك لا تحتاج في المجمَل إلى معرفة ذلك. إنَّ ميكانيكي السيارات ليس مُضطرًّا إلى حضور دوراتٍ تدريبية في الجامعة عن ميكانيكا الكم، ومعظم مناهج الأحياء لا تنطوي على أيِّ ذكر للنفَق أو التشابك أو التراكب الكمي. يمكن لمعظمنا تدبُّرُ أمره من دون معرفة أن العالم يعمل — على مستوًى جوهري —وَفقًا لمجموعةِ قواعدَ مختلفةٍ تمامَ الاختلاف عن القواعد التي نعرفها. فالأشياء الكمية الغريبة التي تحدث على مستوى الأجسام الصغيرة للغاية لا تؤثر عادةً في الأشياء الكبيرة التي نراها ونستخدمها كلَّ يوم، كالسيارة وجهاز تحميص الخبز.

لمَ لا؟ إنَّ كرة القدَم لا تخترق الحائط، ولا تُوجَد بين الأشخاص اتصالاتٌ طيفية (على الرغم من الادِّعاءات الزائفة بشأن التخاطُر)، وأنت لا تستطيع، مع الأسف، أن تكون موجودًا في المكتب وفي المنزل في آنٍ واحد. على الرغم من ذلك، فالجسيمات الأساسية داخلَ كرة القدَم أو الإنسان تستطيع أن تفعل كلَّ هذه الأشياء. فلماذا يُوجَد حدٌّ أو خطٌّ فاصل بين العالَم الذي نراه والعالم الذي يعرف علماء الفيزياء أنه موجودٌ بالفعل تحت السطح؟ تلك واحدةٌ من أعمق المسائل في علم الفيزياء كلِّه، وهي تتعلق بظاهرة القياس الكمي التي ذكرناها منذ قليل. حينما يتفاعلُ نظامٌ كمِّي مع جهاز قياس كلاسيكي مثل عدسات الاستقطاب المستخدمة في تجرِبة آلان أسبيه، فإنه يفقد سِماته الكميةَ الغريبة ويتصرَّف كجسمٍ عادي. غير أنَّ القياسات التي يُجْريها علماء الفيزياء لا يمكن أن تكون مسئولة عن الطريقة التي نرى بها العالم من حولنا. فما الذي يؤدي إذن إلى الوظيفة المكافئة لتدمير السلوك الكمِّي خارج مختبر الفيزياء؟

لا بد أنَّ الإجابة تتعلق بكيفية ترتيب الجسيمات وكيفية تَحرُّكها داخل الأجسام الكبيرة (التي تُرى بالعين المجردة). عادةً ما تكون الذراتُ والجزيئات موزَّعةً على نحوٍ

عشوائي كما أنها تهتزُّ بوتيرة غيرِ منتظمة داخل الأجسام الصلبة الجامدة، بينما تظلُّ في المواد السائلة والغازية في حالةٍ مستمرة من الحركة العشوائية نتيجة الحرارة. وهذه العوامل الباعثة على العشوائية — الانتشار والاهتزاز والحركة — تؤدي إلى تبدُّد الخصائص الكمية الموجية في الجسيمات بسرعةٍ كبيرة. ومن ثمَّ، فإنَّ التأثير المشترك لجميع المُكوِّنات الكمية لجسم يؤدي وظيفةَ «القياس الكمي» لعناصره جميعًا ولكلٍّ منها على حِدَة، هو ما يجعلنا نرى العالمَ من حولنا طبيعيًّا. أما إذا كنت ترغب في رصد الغرابة الكمية، فينبغي عليك الانتقالُ إلى أماكنَ غيرِ عادية (مثل باطن الشمس)، أو إمعانُ النظر في العالم المصغَّر (باستخدام أدوات مثل المجهر الإلكتروني)، أو يمكنك ترتيبُ الجسيمات الكمية بعنايةٍ بحيث تسير بإيقاعٍ محدَّد (كما يحدث في دوَران نواة الهيدروجين داخل جسم الإنسان منذ أن يدخل إلى جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي وحتى تتوقَّف المغانط عن العمل، وحينها يتحول اتجاهُ دوران النواة إلى الحالة العشوائية مرةً أخرى، ومِن ثمَّ يُلغي الترابُطَ الكميَّ مرةً أخرى). إنَّ هذا النوع نفسَه من عشوائية الجزيئات هو المسئول عن حقيقةِ أننا لا نحتاج إلى الإلمام بميكانيكا الكم في معظم الأحيان؛ فجميع السمات الكمية الغريبة تختفي في الجزيئات الموجَّهة عشوائيًّا، التي لا تتوقَّف عن الحركة التي تتكوَّنُ منها الجمادات التي نراها من حولنا.

غير أنَّ ذلك ينطبق في معظم الأحيان وليس فيها كلِّها. وَفقًا لما اكتشفه شولتن، فإنه لا يمكن تبريرُ سرعة تفاعل الحالة الثلاثية السريع الكيميائي إلا في حالةِ تضمين تلك الخاصية الدقيقة المتمثلة في التشابك الكمي. لكن هذه السرعة جوهريةٌ في تفاعل الحالة الثلاثية السريع. ثم إنه لا يتضمَّن أكثرَ من جُزيئَين. ولكي يكون هذا التفاعل مسئولًا عن الملاحة لدى الطائر، فلا بد أن يكون له تأثيرٌ باقٍ في جميع حواسِّ طائر أبي الحناء. وبهذا، فإن الزعم بأن البوصلة المغناطيسية لدى الطائر تخضع للتشابك الكمي هو افتراض على مستوًى مختلف تمامًا عن القول بأن التشابك يشترك في تفاعل كيميائي غريب لا يتضمَّن سوى جُسَيمين، وقد قوبل بقدرٍ كبير من التشكك. كان الاعتقاد السائد أنَّ الخلايا الحية تتكوَّن في معظمها من الماء مع جزيئاتٍ حيوية تُوجَد في حالةٍ مستمرَّة من الاستثارة الجزيئية، وسيكون من المتوقَّع أن تقيسَ تلك التأثيرات الكمية الغريبة على الفور وتُبدِّدها. لسنا نعني بكلمة «تقيس» هنا بالطبع أنَّ جزيئات الماء أو الجزيئات الحيوية تجري قياسًا على النَّحو الذي نقيس به نحن وزنَ جسمٍ ما أو درجةَ حرارته، ثم نُسجل قيمةَ القياس بصفةٍ دائمة على ورقةٍ أو على القرص الصُّلب في الكمبيوتر، أو حتى في دماغنا. فما نَعنيه

في هذا السياق هو ما يحدث عندما يصطدم أحدُ جُزيئات الماء في زوجَين من الجسيمات المتشابكة، وهو أنَّ حركته اللاحقة ستتأثر بحالة ذلك الجسيم، ومن ثَمَّ إذا درستَ الحركة اللاحقة لِجُزيء الماء، فيُمكنك استنتاج بعض خصائص الجسيم الذي ارتطم به. ووفقًا لهذا السياق، يكون جزيءُ الماء قد أجرى «قياسًا» لأن حركته تُمِدُّنا بتسجيلٍ لحالة الزوجين المتشابكَين، سواءٌ أكان هناك مَن يدرسها أم لا. وعادةً ما يكون هذا النوع من القياس «العرَضي» كفيلًا بتدمير حالات التشابك. وبناءً على هذا رأى الكثيرون أنَّ القول بأن حالات التشابك الكمِّي ذاتَ الترتيب الدقيق يمكن أن تنجح في البقاء بداخل الخلايا الحيَّة التي تتَّسم بالدِّفء والتعقيد؛ فكرةٌ غريبة، بل تكاد أن تُعَدَّ ضربًا من الجنون.

بالرغم من ذلك، فقد حقَّقَت المعارفُ التي توصَّلْنا إليها عن تلك الأشياء تقدُّمًا كبيرًا في السنوات الأخيرة، وليس ذلك مُقتصِرًا على الطيور فحسب. فقد اكتُشِفَت ظواهرُ كَميةٌ مثل التراكب والنفَق في العديد من الظواهر البيولوجية، بدايةً من الطريقة التي تحصد بها النباتات أشعَّة الشمس وحتى طريقة تكوين الجزيئات الحيوية في خلايانا. حتى حاسة الشم أو الجينات التي نرثُها عن آبائنا من المحتمَل أنها تعتمد على العالم الكمِّي الغريب. لقد أضْحَت الأبحاث المتعلقة بعلم الأحياء الكمِّي تظهر بانتظامٍ في أرقى المجلات العِلمية على مستوى العالم، وثمة عددٌ ضئيل — لكنه متزايد — من العلماء الذين يؤكِّدون على أن جوانب ميكانيكا الكم تؤدِّي في ظاهرة الحياة دورًا ليس بالضئيل، بل هو دورٌ جوهري في واقع الأمر، وأنَّ الحياة في وضعٍ فريد إذ تدعم تلك الخصائص الكمية الغريبة على الحافة بين العالم الكمي والعالم الكلاسيكي.

إنَّ حقيقةَ قلَّة هؤلاء العلماء في العدد قد بدَت لنا جَليًّا حينما استضفنا بجامعة سَري في سبتمبر عام ٢٠١٢ ورشة دولية عن علم الأحياء الكمي حضَرها معظمُ العامِلين في المجال، وقد وسِعَتهم قاعةُ محاضراتٍ صغيرة. غير أنَّ هذا المجال يتنامى بسرعةٍ نظرًا إلى الإثارة التي تصحب اكتشافَ أدوار ميكانيكا الكَمِّ في الظواهر البيولوجية اليومية. ومن ضِمن المجالات البحثيَّة الأكثر إثارةً الكشفُ الحديث عن اللُّغز المتعلِّق بالكيفية التي تتمكَّن بها الغرابةُ الكمية من البقاء داخلَ أجسام حية حارَّة ورطبة وفوضوية، وهو من المجالات التي قد يكون لها آثارٌ هائلة في تطويرِ أساليبَ تكنولوجيةٍ كَميةٍ جديدة.

بالرغم من هذا، فلكي نُدرك أهمية النتائج تمامًا؛ ينبغي أولًا أن نطرح سؤالًا بسيطًا على نحوٍ خادع، ألا وهو: ما الحياة؟

## هوامش

(١) عادةً ما يُطلق مصطلح الفيزياء الكلاسيكية على النظريات الفيزيائية الحتميَّة التي سبَقَت ميكانيكا الكم، بما في ذلك نظريَّتا النِّسبية الخاصةُ والعامَّة؛ تمييزًا لها عن ميكانيكا الكمِّ غيرِ الكلاسيكية.

(٢) على الرغم من ذلك، فمِن الخطأ الاعتقادُ بأن النفق الكميَّ يعني التسرُّبَ من خلال حواجزِ الموجات الفيزيائية، بل إنَّ موجاتٍ رياضيةً مجردة هي ما يُعطينا احتماليةَ إيجاد الجسيم الكَميِّ على الجانب الآخر من الحاجز في الحال. إننا نُحاول في هذا الكتاب، كلما أمكَن، تقديمَ أمثلةٍ بديهية لتفسير الظواهر الكمية، لكن ميكانيكا الكم مُناقضةٌ للبديهة تمامًا في واقع الأمر؛ ولهذا سينطوي التبسيطُ المُفرِط لأغراض التوضيح على مُخاطَرة.

(٣) تُوجَد تَبايُنات مختلفةٌ من العناصر الكيميائية تُسمى بالنظائر. تُعرَّف العناصر بِناءً على عدد البروتونات الموجودة في أنوية ذرَّاتها؛ فنَواة الهيدروجين تحتوي على بروتونٍ واحد، وتحتوي نَواة الهيليوم على بروتونين، وهكذا. بالرغم من ذلك، قد يختلف عددُ النيوترونات الموجود في النواة. ومن ثمَّ؛ تُوجَد ثلاثُ تنويعات (نظائر) من الهيدروجين: تحتوي ذرَّة الهيدروجين العادي على بروتون واحد، بينما تحتوي نَواتا النظيرَين الأثقل — الديوتيريوم والتريتيوم — على نيوترون واحدٍ ونيوترونين على التوالي.

(٤) من المنظور التِّقني، يُعزى استقرارُ الديوتيرون إلى سِمةٍ من سمات القوة النووية تُحافظ على تماسُك البروتون والنيوترون معًا وتُسمى «التفاعل التنسوري»، الذي يُجبر الجُسيمَين على أن يكونا في تراكبٍ كميٍّ لحالتَين من حالات الزخم الزاوي: الموجة S والموجة D.

(٥) يجدر بنا التنبيهُ إلى أنَّ علماء فيزياءِ الكم لا يستخدمون مثلَ هذه اللغة المبسَّطة. فالوصف الأصحُّ لجُسيمين بعيدَين لكنهما متشابكان كَميًّا أن يُقال عنهما إنهما مرتبطان ترابطًا غيرَ موضعي؛ لأنهما جُزآن من الحالة الكمية نفسِها. غير أنَّ الوصف بهذه الطريقة لا يُساعد على الفَهم كثيرًا، أليس كذلك؟!

(٦) بالرغم من ذلك، بما أن الضوء يُعَد موجةً وجُسيمًا أيضًا، فعلى خلاف الدوران الكَمي، من الأسهل أن نفهمَ فكرة الاستقطاب بأنها الاتجاه الذي تتذبذبُ فيه موجة الضوء.

(٧) أُكرِّر أننا تعمَّدنا الإفراطَ في التبسيط في هذا الموضع تحرِّيًا للوضوح. فقياسُ خاصية معيَّنة لجسيمٍ كمي، ولْيكُن موضعه مثلًا، يعني أننا لم نَعُد غيرَ مُتيقِّنين بشأن

مكان وجوده — فكأنه صار في بؤرة التركيز وصار واضحَ المعالم. لكن هذا لا يعني أنه بات يتصرَّف مثل الجسيمات العادية. فوَفقًا لمبدأ اللايقين الذي وضعه هايزنبرج، لم تَعُد سرعةُ الجسيم ثابتة. وبالفعل، فإن الجسيم الذي يكون في موضعٍ محدد، سيُوجَد في تلك اللحظة بعينها، في حالةِ تراكُبٍ حرَكي بكل السرعات الممكنة وكلِّ الاتجاهات الممكنة. أما الدوَران الكمِّي، فلأن هذه الخاصية لا تُوجَد إلا في عالم الكم، فلن يؤدِّي قياسها إلى تصرُّف الجسيم بطريقةٍ كلاسيكية.

الفصل الثاني

# ما الحياة؟

بدأتْ واحدةٌ من أنجح البعثات العلمية على مرِّ العصور في العشرين من أغسطس ١٩٧٧، حين انطلقت المركبةُ الفضائية «فوياجر ٢» إلى سماء فلوريدا، وتبعتها المركبةُ الفضائية الشقيقة «فوياجر ١» بعد ذلك بأسبوعين. وبعد عامين، وصلت المركبة الفضائية «فوياجر ١» إلى وجهتها الأولى، كوكب المشتري، حيث التقطَت صورًا للسحب الغازيَّة الدوَّارة العملاقة والبقعة الحمراء الضخمة الشهيرة، ثم انطلقت لتُحلق فوق السطح الجليدي لأحد أقمار الكوكب، قمر جانيميد، وتشهد ثوَرانًا بُركانيًّا على قمرٍ آخَر وهو قمر آيو. في هذه الأثناء، كانت المركبة الفضائية «فوياجر ٢» تُسافر في مسارٍ مختلف لتصلَ إلى كوكب زُحل في أغسطس عام ١٩٨١، وبدأت تُرسل إلى الأرض صورًا جميلةً لحلقات الكوكب، بدَت فيها الحلقات وكأنها عِقدٌ مجدولٌ من ملايين الصخور الصغيرة والأقمار. غير أنَّ عَقدًا بأكمله من الزمان تقريبًا قد مرَّ قبل أن تلتقطَ المركبةُ الفضائية «فوياجر ١» في الرابعَ عشر من فبراير ١٩٩٠، صورةً من أروع الصور التي التُقطت على الإطلاق: صورة لِبُقعةٍ زرقاء صغيرة على خلفيةٍ رمادية حبيبية.

على مدار نصف القرن المنصرِم، أتاحت بعثاتُ المركبتَين فوياجر وغيرها من المركبات الفضائية الاستكشافية للبشر أن يمشوا على القمر، وأن يستكشفوا وِديانَ المِرِّيخ عن بُعد، وأن يُمعنوا النظرَ في الصَّحاري الحارقة لكوكب الزهرة، كما أنها مكَّنَتهم حتى من رؤيةِ مذنَّبٍ وهو يندفع إلى الغلاف الجوي الغازي للمشتري. بالرغم من ذلك، فإنَّ جُلَّ ما اكتشفوه هو صخور فحسب، بل كمٌّ كبير منها. يمكن القول بالفعل إنَّ استكشافنا للكواكب الأخرى في مجموعتنا الشمسية كان دراسةً لصخورها، بدايةً من المعادن الكثيرة للغاية التي جلبها روادُ فضاء بعثة أبولو من القمر، أو الشظايا المجهرية للمذنَّب التي جلبَتها بعثةُ ستارداست التي أطلقتها وكالة ناسا، وحتى اللقاء المباشر لمسبار روزيتا

مع أحدِ المذنَّبات في عام ٢٠١٤ أو تحليل سطح المريخ من خلال المركبة «كيوريوسيتي روفر»؛ كل ذلك ينطوي على الكثير والكثير من الصخور.

لا شكَّ أنَّ صخور الفضاء أجسامٌ رائعة؛ إذ يُمِدنا تركيبُها وبِنيتُها ببعض الدلائل عن أصل المجموعة الشمسية وتَكوُّنِ الكواكب وحتى الأحداث الكونية التي سبقَت تَكوُّنَ الشمس. لكنَّ معظم غير المتخصِّصين في الجيولوجيا لا يرَون اختلافًا كبيرًا بين مادة الكوندريت المريخية (وهي نوعٌ من النيازك الصخرية غير المعدنية) ومادة التروكتوليت القمرية (وهي حجر نيزكي غنيٌّ بالحديد والماغنيسيوم). على الرغم من ذلك، ثَمة مكانٌ في مجموعتنا الشمسية قد تجمَّعَت فيه المكوِّناتُ الأساسية التي تؤلف الصخور والأحجار، وهي تُوجَد فيه بدرجةٍ كبيرة من التنوُّع في التكوين والوظائف والمواد الكيميائية حتى إنَّ جرامًا واحدًا من المادة الناتجة يتفوق في تنوُّعه على جميع الموادِّ الموجودة في الكون الذي نشهده. ذلك المكان بالطبع هو النقطة الزرقاء الباهتة التي صوَّرَتها المركبةُ الفضائية «فوياجر ١»، وهذه النقطة هي الكوكب الذي نُسميه الأرض. غير أنَّ أكثر ما يَسترعي الانتباهَ أن تلك الموادَّ الخام المتنوِّعة التي تجعل سطح كوكبنا فريدًا للغاية، قد تجمَّعَت معًا لتتشكَّل الحياة.

الحياةُ مثيرةٌ للانتباه. لقد ناقَشْنا بالفعل حاسةَ الاستقبال المغناطيسي المذهلة التي يتمتع بها طائرُ أبي الحناء الأوروبي، لكنَّ تلك المهارة المميزة ليست سوى واحدةٍ من قدراته المتعددة والمتنوعة. فهذا الطائر يستطيع رؤيةَ الذباب وشمَّه وسماعَه واصطيادَه، ويمكنه أيضًا أن يقفز على الأرض أو بين أغصانِ شجرة، ويمكنه التحليقُ وقَطْعُ مئات الأميال بالطيران. والأكثرُ لفتًا للنظر أن هذا الطائر يستطيع، بعد تَلقِّي قدرٍ قليل من المساعدة من زوجه، أن يُشكل مجموعةً كاملة من الأفراخ المماثلة له، وذلك من المواد نفسِها التي تتألف منها كلُّ تلك الصخور. وليس طائر أبي الحناء سوى نوعٍ واحد من بين تريليونات الكائنات الحية القادرة على القيام بتلك العمليات المذهلة والعديد من العمليات الأخرى التي لا تقلُّ عنها في الإبهار.

ثمة كائنٌ آخَرُ مُثيرٌ للانتباه، وهو «أنت» بالطبع. حدِّقْ ببصرك في سماء الليل وستدخل فوتوناتُ الضوء إلى عينَيك؛ ومِن ثَم تُحولها أنسجة الشبكية إلى تيَّارات كهربية ضعيفة تسري في الأعصاب البصرية وتصل إلى الأنسجة العصبية في الدماغ. وفي الدماغ، تُحفز هذه الفوتوناتُ الأعصابَ في نمطٍ أشبهَ بالوميض تختبره في صورة النجم المتلألئ في السماء من فوقك. وفي الوقت نفسِه، يُسجل نسيجُ خلايا الشعر في أذنك الداخلية تباينات

ضئيلةً للغاية في الضغط حتى إنها تصل إلى أقلَّ من واحدٍ على مليار من الضغط الجوي، مما يُولِّد إشاراتٍ عصبيةً سمعية تُنبِّئُك بحفيف الأشجار. علاوةً على ذلك، تعوم حَفنةٌ من الجزيئات في الأنف وتلتقطها مُستقبِلاتٌ شَمِّية مُتخصِّصة، وتُنقَل هُويَّتُها الكيميائية إلى الدماغ كي تُخبرك بقدوم الصيف وتفتُّح زهور نبات العسلة. ثم إنَّ كل حركة صغيرة تصدُر من جسمك، بينما تُشاهد النجوم وتسمع هفيفَ الرياح وتستنشق الهواء، تنتجُ عن العمل المشترك المتناسِق بين مئات العضلات.

وعلى الرغم من روعة العمليات التي تُنفذها أنسجةُ أجسادنا، فإنها ليست بالمُميزة مقارنةً بالعمليات الجسدية التي تقوم بها العديدُ من الكائنات الأخرى التي تعيش معنا على الكوكب. فالنمل قاطعُ الأوراق قادرٌ على حمل ما يزِنُ ثلاثين ضعفًا من وزنه؛ أي: ما يُعادل حَمْل سيارة على ظهرك. ونجد أيضًا أنَّ النمل ذا الفكِّ الصائد قادرٌ على زيادة سرعة فكَّيهِ من صفر إلى ٢٣٠ كم في الساعة في غضون ٠,١٣ ميللي ثانية، في حين أن سيارة السباق «فورميولا ١» تستغرق وقتًا يبلغ أربعين ألفَ ضِعف ذلك الوقت (نحو ٥ ثوانٍ) للوصول إلى السرعة نفسِها. ويمكن لثعبان الماء الكهربائي الذي يعيش في حوض الأمازون توليدُ ٦٠٠ فولت من الكهرباء القاتلة. ويمكن للطيور أن تطير والأسماك أن تسبح، بينما تستطيع الديدانُ أن تحفر في الأرض، وتستطيع القرودُ التأرجُحَ بين الأشجار. ومثلما اكتشفنا بالفعل، تستطيع العديدُ من الحيوانات بما في ذلك طائر أبي الحناء الأوروبي أن تجد طريقَها عبر آلاف الأميال باستخدام المجال المغناطيسي للأرض. وفيما يتعلق بالقدرة على التخليق الحيوي، فلا شيء يُضاهي الحياة الخضراء على الأرض؛ إذ تجمع معًا جزيئات الهواء والماء (إضافةً إلى بعض المعادن)، فينبت العشبُ وأشجار البلوط والأعشاب البحرية والهندباء وأشجار السيكويا العملاقة والأشنات.

لكلٍّ من الكائنات الحية مهاراتُه الخاصة وسِماته المميزة، مثل حاسة الاستقبال المغناطيسي لدى طائر أبي الحناء أو سرعة الإطباق لدى النمل ذي الفكِّ الصائد، لكن الإنسان يمتلكُ عضوًا ليس لأدائه مثيل. فمهارةُ الحَوسبة التي تتمتَّع بها تلك المادةُ الرمادية اللينة الحبيسة داخل جُمجمة عظمية أعظم من جميع أجهزة الكمبيوتر الموجودة على الأرض؛ فتلك المهارةُ هي التي أنتجَت الأهرامات ونظرية النسبية العامة ومعزوفة «بحيرة البجع» ونصوص «ريجفدا»، وهي التي أنتجَت «هاملت»، ومشغولات «مينج» الخزفية وشخصية «دونالد داك». ولعل الأهمَّ من هذا كلِّه هو أن العقل البشري يمتلك القدرة على «معرفة» أنه موجود.

بالرغم من ذلك، فإن كل هذا التنوُّع في المادة الحية بأشكالها التي لا تُحصى، وتَنوُّع وظائفها الهائل، يتألف بدرجةٍ كبيرة من الذرَّات نفسِها التي وُجِدَت في كُتَل الكوندريت المريخي.

يُعنى السؤالُ الأكبر في العلم، وهو أيضًا أحد الأسئلة المركزية في هذا الكتاب، بكيف تتحوَّل الجزيئاتُ والذرَّات الخاملة في الصخور في كلِّ يوم إلى مادةٍ «حية» تجري وتقفز، وتطير وترتحل، وتسبح وتنمو، وتُحب وتكره، وتشتهي وتخاف، وتُفكر وتضحك وتبكي. صحيحٌ أنَّ الاعتياد يجعلنا نغفل عن ملاحظةِ هذا التحول الاستثنائي، لكن ينبغي أن نتذكَّر أنه حتى مع ما نمتلكُه في هذا العصر من تقنيات الهندسة الوراثية وعلم الأحياء التخليقي، لم يخلق البشر شيئًا حيًّا من موادَّ غيرِ حية تمامًا. إنَّ فشل التكنولوجيا حتى الآن في إنجاز تحوُّلٍ ينفذه أبسط ميكروب على الكوكب بلا جهدٍ يُخبرنا أنَّ معرفتنا بما يؤدي إلى ظهور الحياة غيرُ مكتملةٍ بعد. فهل أغفَلْنا شرارةً حيويةً ما تبثُّ الحياة في الكائن الحي وهي غيرُ موجودة في الجماد؟

غير أنَّ هذا لا يعني الزعمَ أنَّ نوعًا ما من القوة الحيوية أو الروح أو المكونات السحرية هو ما يؤدِّي إلى بثِّ الحياة. فقصتُنا أكثرُ تشويقًا من هذا بدرجةٍ كبيرة. وسنستعرِض بدلًا من ذلك أبحاثًا جديدة تُشير إلى أنَّ قطعةً واحدة على الأقل من القطع المفقودة في أُحجية الحياة، تكمُن في عالم ميكانيكا الكم، حيث يمكن للأجسام أن تُوجَد في مَكانَين في آنٍ واحد وأن تربط بينها اتصالات طيفية وأن تعبُر حواجزَ تبدو في ظاهرها غير قابلةٍ للاختراق. يبدو أنَّ الحياة تضع قدمًا لها في العالَم الكلاسيكي للأشياء اليومية، بينما تغرس قدمَها الأخرى في الأعماق الغريبة والعجيبة للعالم الكمِّي. ولهذا، فسوف نُحاجج بأنَّ الحياة تُوجَد على الحافة الكمية.

لكن هل يمكن حقًّا أن تكون الحيوانات والنباتات والميكروبات محكومةً بقوانينَ طبيعيةٍ نعتقد حتى الآن أنها لا تصفُ سوى سلوكِ الجسيمات الأساسية؟ لا شك أنَّ الكائنات الحية التي تتركَّب من تريليونات الجسيمات هي أشياءُ تُرى بالعين المجردة، ويمكن وصفُها وصفًا وافيًا بالقواعد الكلاسيكية مثل قوانين نيوتن للحركة وعلوم الديناميكا الحرارية، مثلها في ذلك مثل كُرات القدم والسيارات والقطارات البُخارية. ولكي نعرف سببَ احتياجنا إلى عالم ميكانيكا الكم الخفي في تفسير الخصائص المذهلة للمادة الحية، فإننا نحتاج أولًا إلى أن ننطلق في رحلةٍ قصيرة نُناقش فيها الجهودَ العِلمية المَعنيَّة بفَهم ما يُميز الحياة على نحوٍ خاص للغاية.

## القوة الحيوية

يتمثَّل اللغز المركزي بشأن الحياة في السؤال التالي: لماذا تتبع المادةُ سلوكًا مختلفًا للغاية عندما يتألَّف منها مخلوقٌ حي، مقارنةً بسلوكها عندما تكون صخرة؟ كان اليونانيون القدماء من أوائل الشعوب التي حاولت الإجابةَ عن هذا السؤال. وقد أصاب الفيلسوف أرسطو، وهو على الأرجح أولُ العلماء العِظام في العالم، في تحديد خصائصَ مُعيَّنة للجمادات يمكن الاعتماد عليها والتنبُّؤ بها؛ ومن هذه الخصائص على سبيل المثال أن تميل الأجسام الصُّلبة إلى السقوط بينما تميل النيران والأبخرة إلى التصاعد، والأجسام السماوية إلى التحرك في مساراتٍ دائرية حول الأرض. غير أنَّ الحياة كانت مختلفة؛ فعلى الرغم من أن العديد من الحيوانات تسقط، فإنها تركض أيضًا، والنباتات تنمو إلى الأعلى، ثم إنَّ الطيور تُحلق في أرجاء الأرض. فما الذي يجعل هذه الكائناتِ مختلفةً عن بقية العالم؟ اقترح المفكرُ اليوناني العظيم سقراط إجابة عن هذا السؤال وسجَّلها تلميذُه أفلاطون إذ قال: «ما ذلك الذي يجعل الجسدَ حيًّا حين يُوجَد فيه؟ إنها الروح.» اتفق أرسطو مع سقراط في أنَّ الكائنات الحية لها أرواح، لكنه قال إنها تأتي في مَراتب مختلفة. أدنى تلك المراتبِ هي التي تُوجَد لدى النباتاتِ وهي التي تُمكِّنُها من النموِّ والحصول على الغذاء، بينما تأتي أرواحُ الحيوانات في مرتبةٍ أعلى حيث إنها وهَبَت تلك الحيوانات الشعورَ والحركة، لكنَّ الروح البشرية هي الوحيدة التي منَحَت أصحابها التفكير والعقل. وبالمثل، اعتقد الصينيون القدماء أنَّ الحياة تدبُّ في الكائنات الحية بفعل قوةٍ معنوية تُسمى «تشي»، تسري في هذه الكائنات. بعد ذلك، دخل مفهومُ الروح في كل الأديان الكبرى في العالم، لكن كُنْه تلك الروح وعلاقتها بالجسد ظلَّا لغزًا.

ثمة لغزٌ آخرُ أيضًا، وهو الموت. لقد كان الاعتقاد السائد أنَّ الأرواح خالدة، فلِمَ تزول الحياة سريعًا إذن؟ تمثَّلت الإجابة التي توصَّلَت إليها معظمُ الثقافات في أنَّ الموت يُصحَب بمغادرة تلك الروح الواهبة للحياة من الجسد. وحتى وقتٍ حديث للغاية في عام ١٩٠٧، زعم الطبيب الأمريكي دانكان ماكدوجال أنه يستطيع قياسَ الروح عن طريقِ وزن المرضى المحتضرين قبل الموت وبعده مباشرة. وأقنعَته تَجارِبُه أن الروح تزنُ نحو ٢١ جرامًا. غير أنَّ السبب في خروج الروح من الجسد بعد السبعين عامًا تقريبًا المخصَّصة له ظلَّ لغزًا.

على الرغم من أنَّ مفهوم الروح لم يعُد جزءًا من العلم الحديث، فقد فصل على الأقل بين دراسة الجماد والكائن الحي، مما أتاح للعلماء أن يَدرُسوا أسبابَ الحركة في

الجمادات دون عبء أسئلة الفلسفة واللاهوت التي عرقلَت أيَّ دراسة للكائنات الحية. إنَّ تاريخ دراسة مفهوم الحركة طويل ومعقَّد ومذهل، لكننا سنُقدم عنه في هذا الفصل نبذةً مختصرة للغاية. لقد ذكَرْنا بالفعل رأيَ أرسطو بشأن نزعة الأجسام إلى الحركة تجاه الأرض أو بعيدًا عنها أو حولها، وقد اعتبر أنَّ تلك الحركات كلَّها «طبيعية». لاحظ أرسطو أيضًا أنَّ الأجسام الصُّلبة يمكن أن تُدفَع أو تُسحَب أو تُرمى، وقد أطلق على كلِّ تلك الحركات اسم «الحركات العنيفة» واعتبر أنها تتولد عن نوعٍ من القوة يُقدِّمه جسمٌ آخر، مثل الشخص الرامي. لكن ما الذي يُنتج حركة الرمي نفسَها، أو تحليق الطائر؟ بدا أنه لا يُوجَد سببٌ خارجي. فزعم أرسطو أنَّ الكائنات الحية قادرةٌ على إصدار حركتها من تِلْقاء نفسها، على خلاف الجمادات، وأنَّ سبب الحركة في هذه الحالة هو روح الكائن الحي.

ظلَّت آراءُ أرسطو عن مصادر الحركة هي السائدة حتى العصور الوسطى، غير أنَّ شيئًا عظيمًا قد حدث بعد ذلك. بدأ علماء (وصفوا أنفسهم حينذاك باسم فلاسفة الطبيعة) في وضع نظرياتٍ بشأن حركة الجمادات بلُغة المنطق والرياضيات. لا يُوجَد اتفاق بشأن المسئول عن هذا التحول الاستثنائي والمثمر الذي شهده الفكرُ البشري، لكنَّ المؤكد أن العلماء العرب والفارسيِّين في العصور الوسطى مثل ابن الهيثم وابن سينا أسهَموا بدورٍ كبير في ذلك، ثم تَبنَّت المؤسساتُ التعليمية الأوروبية الناشئةُ مثل جامعة باريس وجامعة أكسفورد هذا الاتجاهَ. غير أنَّ هذه الطريقة في وصف العالم قد آتت ثمارَها للمرة الأولى على الأرجح في جامعة بادوفا بإيطاليا؛ حيث وضع جاليليو قوانينَ بسيطةً للحركة في صورة صِيَغ رياضيَّة. مات جاليليو سنة ١٦٤٢، وفي السنة نفسِها وُلد إسحاق نيوتن بلنكنشاير بإنجلترا، وقد قدَّم وصفًا رياضيًّا ناجحًا جدًّا لكيفية تغيُّرِ حركة الجمادات بفعل القُوى، ويُعرَف هذا النظام الذي وضَعه نيوتن حتى يومنا هذا باسم الميكانيكا النيوتنية.

كانت قُوى نيوتن أفكارًا غامضة في البداية، لكن ارتباطها صار يتزايد على مرِّ العقود التالية بمفهوم «الطاقة». كان يُقال إن الأجسام المتحركة تمتلك طاقةً يمكن أن تنتقل إلى الأجسام الثابتة التي تصطدم بها، مما يتسبَّب في حركتها. غير أنَّ القُوى يمكن أن تنتقل بين الأجسام «عن بُعد» أيضًا، ومن الأمثلة على ذلك قوةُ جاذبية الأرض التي سحبَت تفاحة نيوتن إلى الأرض، أو القُوى المغناطيسية التي تتسبَّب في انحراف إبرة البوصلة.

في القرن الثامن عشر، شهد التقدمُ العلمي الهائل الذي بدأه جاليليو ونيوتن قدرًا كبيرًا من الزخم، وباقتراب القرن التاسع عشر، كان الإطارُ الأساسي لما عُرف فيما بعدُ باسم «الفيزياء الكلاسيكية» قد اكتمل تقريبًا. بحلول ذلك الوقت، صار من المعروف أنَّ أشكالًا أخرى من الطاقة، مثل الحرارة والضوء، قادرةٌ هي أيضًا على التفاعل مع عناصر المادة والذرات والجزيئات، مما يُؤدِّي إلى زيادةِ درجة حرارتها أو إصدارها للضوء أو تَغيُّر لونها. وكان العلماء يرَون أنَّ الأجسام تتكوَّن من جسيمات تخضع حركتها لقوة الجاذبية أو القوة الكهرومغناطيسية.[1] وبِناءً على هذا، قَسَّم العالم المادي — أو ما به من جماداتٍ على الأقل — إلى مجموعتَين مُتمايزتَين وهما المادة المرئية المكوَّنة من الجسيمات، والقُوى غير المرئية التي كانت تؤثر فيما بينها بطريقةٍ لم تكن مفهومةً على نحوٍ جيد آنذاك، سواء فيما يتعلق بموجات الطاقة التي تنتشرُ عبر الفضاء أو مجالات القُوى. لكن ماذا عن المادة الحيوية التي تتكوَّن منها الكائنات الحية؟ مِمَّ تتكون؟ وكيف تتحرك؟

## انتصار الآلات

إنَّ الفكرة القديمة القائلة بأنَّ الحياة تُنفَخ في كلِّ الكائنات الحية بفعل مادةٍ ما خارقةٍ للطبيعة أو كِيانٍ ما قد قدَّمَت على الأقل بعضَ التفسيرات للاختلافات البارزة بين الكائن الحي والجماد. كانت الحياة مختلفة وفقًا لهذه الفكرة؛ لأنَّ ما يُحركها هو قوةٌ روحية وليست أيًّا من القوى الميكانيكية المعتادة. لكن هذا التفسير لم يكن وافيًا أبدًا؛ إذ إنه مرادفٌ لتفسير حركة الشمس والقمر والنجوم القائل من خلال الزعم بأنَّ الملائكة تدفعها. الحقُّ أنه لم يكن يُوجَد تفسيرٌ فِعلي لأن طبيعة الأرواح (والملائكة) ظلت غامضةً تمامًا.

في القرن السابعَ عشر، قدَّم الفيلسوف الفرنسي رينيه ديكارت وجهةَ نظرٍ مختلفةً تمامًا. كان شديدَ الإعجاب بالساعات والألعاب الميكانيكية والدُّمى الآلية التي كانت مصدرَ التسلية في البلاط الأوروبي حينذاك، وقد ألهمَته آلياتُها طرْحَ زعمِه الثوري بأن أجسام النباتات والحيوانات — بما في ذلك البشر — ليست سوى آلاتٍ معقَّدة تتألفُ من موادَّ تقليديةٍ وتُحركها أجهزة ميكانيكية شبيهة بالمضخات والتروس والمكابس والكامات، وهي خاضعةٌ بدورها إلى القُوى نفسِها التي تحكم حركةَ الجمادات. استثنى ديكارت العقل البشري من نظريته الميكانيكية، وعزا نشاطَه إلى وجود روحٍ خالدة، لكن فلسفته حاولتْ على الأقل أن تُقدِّم إطارًا عِلميًّا لتفسير الحياة في سياق القوانين الفيزيائية التي كان يكتشف أنها تحكم الجمادات.

استمرَّ النهج الميكانيكي البيولوجي على يدِ معاصرٍ قريب للسير إسحاق نيوتن وهو الطبيب ويليام هارفي الذي اكتشف أنَّ القلب ليس سوى مِضخَّةٍ ميكانيكية. وبعد ذلك بقرن، أوضح عالمُ الكيمياء الفرنسيُّ أنطوان لافوازييه أنَّ الخنزير الغيني يستنشق الأكسجين في عملية التنفُّس، ويُخرج ثانيَ أكسيد الكربون، وذلك على نحوٍ شبيه بالنار التي وفَّرَت قوة الدفع في تقنية المحركات البخارية الجديدة. وبناءً على ذلك استنتج أنَّ «التنفُّس عبارةٌ عن ظاهرةِ احتراقٍ بالغةِ البُطء شبيهةٍ بعملية احتراق الفحم إلى حدٍّ كبير». وعلى النحو الذي كان يمكن لديكارت أن يتنبَّأ به، بدا أن الحيوانات لا تختلف كثيرًا عن القاطرات التي تعمل بطاقةِ الفحم التي سرعان ما كانت تنقل الثورةَ الصناعية في ربوع أوروبا.

لكن هل يُمكن حقًّا أن تكون القُوى التي تُحرك القطارات البخارية هي ما تُحرك الحياة أيضًا؟ للإجابة عن هذا السؤال، يجب أن نفهم كيفيةَ سير القطارات البخارية وصعودها على التِّلال.

## طاولة بلياردو جزيئية

ثَمة مجالٌ في العلم يصف كيفية تفاعل الحرارة مع المادَّة ويُدعى «الديناميكا الحرارية»، وقد طُرِحَت فكرته الأساسية في القرن التاسعَ عشَر على يد عالم الفيزياء النمساوي لودفيج بولتزمان الذي اتخَذ الخطوة الجريئة المتمثِّلة في التعامُل مع جزيئات المادة وكأنها مجموعةٌ كبيرة من كرات البلياردو التي تتصادم عَشوائيًّا وتتبع قوانين الميكانيكا التي وضعها نيوتن.

تخيل سطح طاولة بلياردو[٢] مقسَّمًا إلى جانبَين باستخدام عصًا متحركة. تقع كلُّ الكرات بما فيها الكرة البيضاء على الجانب الأيسر من العصا، وجميع الكرات مرتَّبةٌ بانتظامٍ على شكل مثلَّث. والآن تخيل ضرب مجموعةِ الكرات بالكرة البيضاء ضربةً قوية أدَّت إلى تحرُّك الكرات بسرعةٍ في كل الاتجاهات، بينما تتصادم بعضُها مع بعضٍ وترتدُّ عن الجدران الصُّلبة للطاولة والعصا المتحرِّكة. تأمَّل ما سيحدث للعصا: ستتعرَّض إلى قوة العديد من الاصطدامات الآتية من جهة اليسار التي تُوجَد فيها الكرات، لكنها لن تتعرَّض إلى اصطدامات من الجانب الأيمن للطاولة حيث لا تُوجَد كُرات. على الرغم من

أنَّ حركة الكرات عشوائيةٌ تمامًا، فسوف تتعرَّض العصا — بفعل كل تلك الكرات التي تتحركُ عَشوائيًّا — إلى قوةٍ متوسطة تدفعها نحوَ اليمين مما يؤدِّي إلى توسيع مساحة اللعب الواقعة في الجهة اليسرى وتضييق المساحة الفارغة. لِنتخيَّلْ أيضًا أننا نَستخدِمُ طاولة البلياردو في القيام بوظيفةٍ ما عن طريقِ بناء أداةٍ غريبة مكوَّنةٍ من رافِعات وبَكرات تُوقف حركةَ العصا إلى جهة اليمين وتُعيد توجيهَها حتى تدفع — على سبيل المثال — لعبة قطار لصعود تل.

أدرك بولتزمان أنَّ تلك هي الطريقة نفسُها التي تتبعها المحرِّكات الحرارية لدفع القطارات البخارية الفعلية كي تصعدَ التل، ويجب أن تتذكر أننا نتحدثُ عن عصر الطاقة البخارية. إنَّ سلوك جزيئات المياه داخل أسطوانة المحرك البخاري شبيهٌ إلى حدٍّ كبير بسلوك كُرات البلياردو بعد تفرُّقها جَرَّاء اصطدام الكرة البيضاء بها؛ إذ تتسارع حركاتها العشوائية بفعل حرارة الفرن فتتصادمُ الجزيئات بعضُها مع بعض؛ ومِن ثَم يندفع مكبس المحرك بمزيدٍ من القوة نحو الخارج لتحريك الأعمدة الدوَّارة للمحرِّك والتروس والسلاسل والعجلات في القطار البخاري، ومن ثَمَّ تتولد حركةٌ مُوجَّهة. بعد ما يزيد على قرنٍ من نظرية بولتزمان، لا تزال السيارات التي تعمل بالبنزين تعمل وفقًا للمبادئ نفسِها تحديدًا، باستثناء أنَّ نواتج احتراق البنزين حلت محلَّ البخار.

من الجوانب الرائعة في علم الديناميكا الحرارية أنَّه يتلخَّص فِعليًّا فيما أوضحناه. فالحركةُ المنتظمة في جميع المحركات الحرارية منذ اختراعها تتولَّد عن طريق استخدام متوسطِ حركة تريليونات الذرَّات والجزيئات التي تتحركُ عَشوائيًّا. علاوةً على ذلك، فهو مجالٌ عمومي على نحوٍ استثنائي؛ إذ لا ينطبق على المحركات التي تعمل بالحرارة فحسب، بل على كل الأنماط الكيميائية القياسية التي تحدث عندما نحرقُ الفحم في الهواء، أو نترك مِسمارًا حديديًّا حتى يَصْدأ، أو نطهو وجبة، أو نُصنِّع الفولاذ، أو نُذيب المِلح في الماء، أو نغلي الماء، أو نُرسل صاروخًا إلى القمر. فجميع هذه العمليات الكيميائية تتضمَّن تبادُل الحرارة، وما يُسيرها جميعها على مستوى الجزيئات هو مبادئُ الديناميكا الحرارية التي تعتمد على الحركة العشوائية. الحقُّ أنَّ كل العملياتِ غيرِ البيولوجية (الفيزيائية والكيميائية) التي تؤدي إلى تغييرٍ في عالمنا تستندُ إلى مبادئِ الديناميكا الحرارية. فتياراتُ المحيطات والعواصف العنيفة وتَجْوية الصخور واحتراق الغابات وتآكل المعادن، كلها ظواهرُ خاضعةٌ لقُوى الفوضى الحتميَّة التي تقوم عليها الديناميكا الحرارية. ربما تبدو

جميعُ العمليات المعقَّدةِ مُهيكلةً ومرتَّبة في نظرنا، لكنها تقوم في جوهرها على الحركة العشوائية للجزيئات.

## هل الحياة فوضوية؟

هل ينطبق الأمر نفسُه على الحياة؟ لِنَعُد إلى طاولة البلياردو، لكننا سنعود إليها في بداية اللعبة والكراتُ مرتبةٌ على شكلِ مثلث. وفي هذه المرة، سنُضيف عددًا كبيرًا من الكرات الإضافية (لنتخيَّل أنها طاولةٌ كبيرة للغاية)، وسنُخطط لأنْ نضربها بقوةٍ بالقُرب من مثلث الكرات الأصلية. مرةً أخرى، ستُستخدَم الحركة العشوائية للعصا القاسمة، التي هي ناتجةٌ عن التصادم، في عملٍ مُفيد، لكن بدلًا من الاكتفاء باستخدامها في دفع قطار لُعبة للصعود على تل، سنخترع جهازًا أذكى. ففي هذه المرَّة، ستقوم آلتُنا التي تُسيرها الحركةُ التي أثارَتْها الارتدادات الفوضوية لكلِّ تلك الكرات بشيء خاص، وهو: الحفاظ على ترتيب الكرات الأصلية على شكلِ مثلَّث في وسط هذه الفوضى. فكلَّما خرجَت إحدى الكُرات من مكانها في المثلَّث بسبب الحركة العشوائية لكرةٍ أخرى، ثَمة جهاز استشعاريٌّ سيكتشف ذلك ويمدُّ ذراعًا ميكانيكيَّةً ليستبدلَ بالكرة المفقودة من المثلث كرةً أخرى مُماثلة لها يأخذها من بين الكرات المتصادمة عشوائيًّا، وربما يسدُّ بها فجوةً في إحدى زوايا المثلث.

نرجو أنَّك تُدرك أن النظام يَستخدِم الآن جزءًا من الطاقة التي توفَّرَت نتيجةَ كلِّ تلك التصادمات العشوائية بين الجزيئات للحفاظ على جزءٍ من نفسه في حالةٍ بالغةِ الترتيب. في الديناميكا الحرارية، يُستخدَم مصطلح «الإنتروبي» لوصف غياب النظام، ومن ثَم تُوصَف الحالات التي تتَّسم بدرجةٍ عالية من الترتيب بأنها تتضمَّن قدرًا ضئيلًا من الإنتروبي. وفيما يتعلَّق بطاولة البلياردو، يمكن القولُ إنها تكتسب طاقةً من التصادمات (الفوضوية) ذات درجة إنتروبي عالية للحفاظ على جزءٍ من نفسِها، وهو مثلَّث الكرات في المنتصف، في حالة (منظمة) ذات درجة إنتروبي منخفضة.

ليس عليك أن تنشغل في الوقت الحاليِّ بكيفية تصميم اختراعٍ صعب كهذا، فالمهم أن شيئًا مثيرًا جدًّا للاهتمام يجري على طاولة البلياردو المحكومة بمفهوم الإنتروبي. فمن خلال الحركة العشوائية للكُرات فقط، يتمكَّن هذا النظام الجديد المتمثل في الطاولة والعصا وجهاز اكتشاف الكرات والذراع المتحرِّكة، من الحفاظ على النظام في نظامٍ فرعي من نفسِه.

لِنتخيَّل الآن مستوًى آخرَ من التعقيد؛ ففي هذه المرة، يُستخدم جزءٌ من الطاقة التي تُوفِّرها العصا المتحركة — وسنُطلق عليها «الطاقة الحرة» للنظام[٣] — من أجل «بناء» جهازِ استشعارٍ و«الحفاظ» عليه، إضافةً إلى تشكيلِ ذراعٍ متحركة واستخدام عددٍ كبير من كُرات البلياردو باعتبارها مادةً خامًا لبناء هذه الأجهزة في المقام الأول. الآن، أصبح النظامُ بأكمله قائمًا بذاته، ويُمكنه من حيث المبدأُ الحفاظُ على نفسه إلى ما لا نهاية؛ بشرط تزويده على الدوام بعددٍ كبير من الكرات ذاتِ الحركة العشوائية ومساحة تسَعُ حركةَ العصا.

وأخيرًا، فعلاوةً على حفاظ النظام على نفسِه، سيُنجِز هذا النظام مهمةً أخرى مذهلة: سيستخدم الطاقةَ الحرة المتوفرة للكشف عن كُرات البلياردو والإمساكِ بها وترتيبِها لعمل نسخةٍ من نفسه بالكامل؛ أي: الطاولة والعصا وجهاز اكتشاف الكرات والذراع المتحرك ومثلث الكرات. وبالطريقة نفسِها، ستكون هذه النُّسخ قادرةً على استخدام كرات البلياردو «الخاصة بها» والطاقة الحرة المتوفرة من عمليات تصادُم هذه الكرات لعمل المزيد من مِثل هذه الأجهزة الذاتيةِ الاستدامة. وتلك النُّسخ تصنع المزيدَ من النسخ الأخرى …

حسنًا، ربما خمَّنت إلى أين يُفضي بنا كلُّ هذا. لقد أنشأ مشروعُنا اليدويُّ الخيالي نظامًا قائمًا على كرة بلياردو يُكافئ الحياة. ومِثلما هو الحال مع الطائر أو السمكة أو الإنسان، يستطيع الجهاز الخيالي تعزيزَ ذاته ومضاعفتَها عن طريق استخدام الطاقة الحُرَّة من التصادمات الجزيئية العشوائية. وعلى الرغم من تعقيدِ تلك المهمَّة وصعوبتها، فإنَّ قوتها الدافعةَ تُعتبر بوجهٍ عام هي نفسُها القوةَ المستخدَمة في دفع القطارات البخارية لصعود التلال. في حالة الحياة، تُستبدَل بكرات البلياردو الجزيئاتُ المكتسَبةُ من الطعام، وصحيحٌ أنَّ العملية أكثرُ تعقيدًا للغاية من العملية المذكورة في مثالنا البسيط، لكن المبدأ واحد؛ تُوجَّه الطاقة الحرة المكتسَبة من التصادم العشوائي للجزيئات (وتفاعلاتها الكيميائية) للحفاظ على جسمٍ ما وصُنع نسخةٍ منه.

فهل الحياة فرعٌ من الديناميكا الحرارية فحسب؟ هل نهبط التلالَ حينما نتنزَّه عن طريق العمليات نفسِها التي تدفع القطارات البخارية؟ وهل رحلةُ طائر أبي الحناء لا تختلف كثيرًا عن رحلةِ قذيفة المدفع؟ وهل الشرارة الحيوية للحياة في جوهرها ليست سوى حركةٍ عشوائية للجزيئات؟ للإجابة عن هذا السؤال، ينبغي أن نتأمَّل البِنية الدقيقة للكائن الحي.

## سَبْر أغوار الحياة

حدث أولُ تقدمٍ كبير في الكشف عن البِنْية الدقيقة للحياة في القرن السابعَ عشر على يد «عالم الفلسفة الطبيعة» روبرت هوك الذي أمعنَ النظر في مجهره البدائي، ورأى في شرائحَ رفيعةٍ من شجرة الفلين ما أسماه بـ «الخلايا»، وعلى يد اختصاصيِّ المجاهر الهولندي أنطوني فان ليفينهوك الذي ميَّز في قطراتٍ من مياه إحدى البِرَك ما أطلق عليه اسم «الحيوانات الدقيقة»، التي نعرفها الآن باسم الكائنات أحادية الخلية. إضافةً إلى ذلك، فحص ليفينهوك خلايا النباتات وخلايا الدم الحمراء وحتى الحيوانات المَنوية. فُهِم فيما بعدُ أن جميع الأنسجة الحية تنقسِم إلى تلك الوحدات الخَلوية، وأنَّ تلك الوحدات هي وحداتُ بناء أجسام الكائنات الحية. ففي عام ١٨٥٨، كتب الطبيب وعالمُ الأحياء الألماني رودولف فيرشو ما يلي:

> مثلما أنَّ الشجرة تُمثل كُلًّا مُرتَّبًا بطريقةٍ محددة، اكتشفنا في جميع أجزائه، سواء أكانت الأوراقَ أم الجذورَ أم الجذعَ أم الأزهار، أنَّ الخلايا هي العناصرُ الأوَّلية المُكوِّنة له، فإنَّ الأمر نفسَه ينطبق أيضًا على جميع أشكال الحياة الحيوانية. فكلُّ الحيوانات تتألف من مجموعةٍ من الوحدات الحيوية، وتتَّسِم كلٌّ من هذه الوحدات بجميع خصائص الحياة.

عندما دُرست الخلايا الحية بقدرٍ أكبر من التفاصيل باستخدام مَجاهرَ أقوى، تبيَّن أن بِنْيتها الداخلية معقَّدة للغاية؛ إذ تحتوي كلُّ خلية على نَواةٍ في المركز ممتلئةٍ بالكروموسومات ومحاطة بـ «السيتوبلازم» الذي يحتوي على وحداتٍ فرعية متخصصة تُسمى «العُضَيَّات»، وهي تؤدِّي مَهامَّ محددةً داخل الخلية، على غِرار أعضاء جسم الإنسان. فعلى سبيل المثال، تُوجَد عُضَيَّة تُسمى الميتوكوندريا تؤدِّي وظيفةَ التنفُّس داخل خلايا الإنسان، بينما تُوجَد عُضية أخرى تُسمى البلاستيدة الخضراء تؤدِّي وظيفة البناء الضوئي في الخلايا النباتية. وبوجهٍ عام، يمكن تشبيهُ الخلية بأنها مصنعٌ مصغَّر للغاية منشغلٌ بالتصنيع. ولكن ما الذي يُحافظ على استمرارها؟ ما الذي «يبثُّ الحياة» في الخلية؟ كان الاعتقاد السائد في بادئ الأمر أنَّ الخلية ممتلئةٌ بالقُوى «الحيوية»، وهو اعتقادٌ يتطابق في جوهره مع مفهوم أرسطو عن الروح، وقد ظلَّ هذا الاعتقاد بالمذهب الحيوي؛ أي: بأنَّ ما يبثُّ الحياةَ في الكائنات الحية هو قوةٌ لا تُوجَد في الجمادات، قائمًا

على مدار الجزء الأكبر من القرن التاسعَ عشر. فقد كان يُعتقد أنَّ الخلايا ممتلئةٌ بمادة غامضة تُسمى «البروتوبلازم» وُصِفت بمصطلحاتٍ مبهَمة باطنيةٍ للغاية.

غير أنَّ المذهب الحيوي قد ضعُف بسبب أعمال العديد من علماء القرن التاسعَ عشر الذين نجَحوا في عزل موادَّ كيميائية من الخلايا الحية، واتضَح أنها مُطابقة للمواد الكيميائية المصنَّعة في المختبَر. ففي عام ١٨٢٨ على سبيل المثال، نجح عالمُ الكيمياء الألماني فريدريش فولر في تصنيع اليوريا، وهي مادةٌ كيميائية حيوية كان يُعتقَد قبل ذلك أنها خاصةٌ بالخلايا الحية فحسب. علاوةً على ذلك، فباستخدام موادَّ مُستخلَصةٍ من الخلايا الحية (سُمِّيَت فيما بعدُ بالإنزيمات)، نجح لوي باستور في إعادة إنتاج تحولاتٍ كيميائية مثل التخمُّر، وكان يُعتقد سابقًا أن الكائنات الحية تتفردُ بهذه التحولات. وبدأ يتضح على نحوٍ متزايد أنَّ الكائنات الحية تتألَّف من الموادِّ الكيميائية نفسِها التي تتكوَّن منها مادةُ الجمادات؛ ومن ثمَّ فربما تخضع هي أيضًا للكيمياء نفسِها. وتدريجيًّا، راح المذهب الحيوي يُفسح المجالَ للمذهب الميكانيكي.

بنهاية القرن التاسع عشر، كان علماء الكيمياء الحيوية قد تغلَّبوا تقريبًا على أنصار المذهب الحيوي.[٤] وصارت الخلايا تُرى باعتبارها مجموعاتٍ من المواد الكيميائية الحيوية تعمل بعمليَّةٍ كيميائية معقَّدة، غير أنها تعتمد أيضًا على الحركة الجزيئية العشوائية الشبيهة بحركةِ كرات البلياردو كما وصفها بولتزمان. وبصفةٍ عامة، ساد الاعتقاد بأن الحياة ليست في حقيقة الأمر سوى نظامٍ معقَّد يخضع لقوانينِ الديناميكا الحرارية.

لكن هذا باستثناءِ وجهٍ واحدٍ منها، ويمكن القول إنه الأهمُّ على الإطلاق.

## الجينات

على مدار قرونٍ طويلة، ظلَّت قدرةُ الكائنات الحية على نقل التعليمات نقلًا دقيقًا من أجل استنساخ نفسِها، سواءٌ أكانت طيرًا مثل أبي الحناء أو نباتًا مثل الردندرة أو إنسانًا، لُغزًا مُحيرًا للغاية. في «التمرين التشريحي الحادي والخمسين» الذي ظهَر عام ١٦٥٣، كتب الجرَّاح الإنجليزي ويليام هارفي يقول:

> بالرغم من أنَّهُ من المعروف والمتفَق عليه أن الجنين يكتسب أصلَه وميلاده من الذكَر والأنثى، ومن ثَمَّ تنتج البيضة من الديكِ والدجاجة كِلَيهما، ثم يخرج

الفرخ من البيضة، فلم تكشف مدارسُ الأطباء أو عقلُ أرسطو الفَطِن عن الكيفية التي يُسهِم بها الديكُ وبذرتُه في تشكيل الفرخ داخل البيضة.

بعد ذلك بقرنَين، اتضح جزءٌ من الإجابة على يد الراهب وعالم النبات التِّشيكي جريجور مندل الذي كان يعمل في عام ١٨٥٠ تقريبًا على تهجين البازلَّاء في حديقة الدير الأغسطيني في برنو. قادته ملاحظاتُه إلى اقتراحِ أن السِّمات مثل لون الزهرة أو شكل حبَّة البازلاء تحكمُها «عوامل» وراثيةٌ يمكن أن تنتقل من جيلٍ إلى آخَر دونما تغيير. وبِناءً على هذا، قدَّمَت «عواملُ» مندل مستودَعًا من المعلومات الوراثية يُتيح للبازلاء أن تحتفظ بسِماتها عبر مئات الأجيال، أو يُتيح «للديك وبذرته تشكيلَ الفرخ داخل البيضة».

لم ينتبِه غالبيةُ مَن عاصروا مندل، بمن فيهم داروين، إلى أعماله التي لم يُعَدِ اكتشافُها حتى أوائلِ القرن العشرين. أُعيدَت تسمية هذه العوامل باسم «الجينات»، وسرعان ما وُظِّفَت فيما شهِدَه القرن العشرون من توافقٍ متزايدٍ في الآراء بشأن الرؤية الميكانيكية لِعلم الأحياء. وصحيحٌ أنَّ مندل قد أوضَح أنَّ تلك الكيانات تُوجَد داخل الخلايا الحية بالتأكيد، لكنها لم تُرَ قط ولم تُعرَف مكوناتها. غير أنَّ عالم الوراثة الأمريكي والتر ساتون لاحظ في عام ١٩٠٢ وجود بِنًى تقع داخل الخلايا تُسمى «الكروموسومات» غالبًا ما تتبع وراثةَ العوامل المندلية؛ ممَّا دفعه إلى القول بأن الجينات تُوجَد داخل الكروموسومات.

لكن الكروموسومات بِنًى كبيرةٌ (نسبيًّا) ومعقَّدة، تتكوَّن من البروتين والسكر ومادة كيميائية حيوية تُسمَّى بالحمض النووي (دي إن إيه). لم يكن واضحًا في البداية أيٌّ من تلك المكونات هو المسئول عن الوراثة. وبعد ذلك في عام ١٩٤٣، تمكن العالم الكندي أوزوالد إيفري من نقلِ جينٍ من خليةٍ بكتيرية إلى أخرى عن طريق استخراج الحمض النووي من الخلية المانحة وحقْنِه في الخلية المستقبِلة. وقد أوضحَت التجرِبةُ أنَّ الحمض النووي الموجود داخل الكروموسومات هو الذي يحمل كلَّ المعلومات الجينية الضرورية، وليس البروتينَ أو غيرَ ذلك من المواد الكيميائية الحيوية.[٥] وعلى الرغم من ذلك، لم يبدُ أنَّ الحمض النووي يتَّسم بأي خاصية مميزة؛ إذ كان يُعَد حينها مادةً كيميائية عادية فحسب.

غير أنَّ السؤال قد ظلَّ قائمًا: ما آليةُ عملِ ذلك كله؟ كيف تقوم مادةٌ كيميائية بتوصيل المعلومات اللازمة لتوفير «الكيفية التي يُسهِم بها الديكُ وبذرته في تشكيل الفرخ داخل البيضة؟» وكيف تُنسَخ الجيناتُ وتُضاعَف من جيلٍ إلى الجيل التالي؟ لم يبدُ أنَّ

الكيمياء التقليدية التي تقوم على أساسِ جزيئات بولتزمان الشبيهة بكرات البلياردو، تُوفر السبيلَ لتخزين المعلومات الجينية ونَسخِها ونقلِها بدقة.

ظهرَت إجابة هذا السؤال واشتهَرَت في عام ١٩٥٣ حين تمكَّن كلٌّ من جيمس واتسون وفرانسيس كريك — العاملان في مختبر كافندش بكامبريدج — من التوصُّل إلى بِنْيةٍ مميزة تتوافق مع البيانات التجريبيَّة التي استخلصَتها زميلتُهما روزاليند فرانكلين من الحمض النووي، وهي: اللولب المزدوج. تبيَّن أن كلَّ جَديلةٍ من جديلتَي الحمض النووي عبارةٌ عن نوعٍ سلسلة جزيئية تتكون من ذراتٍ من الفوسفور والأكسجين ونوعٍ من السكر يُسمى بالريبوز منقوص الأكسجين، وبها بِنًى كيميائيةٌ تُسمَّى «النكليوتيدات»[٦] وهي تصطفُّ على تلك السلسلة مثل حبَّات الخرَز. تأتي حبَّات النكليوتيد في أربعة أشكال وهي: الأدينين (A) والجوانين (G) والسيتوسين (C) والثايمين (T)؛ ومِن ثمَّ تترتَّب على جَديلةِ الحمض النووي في صورة تسلسُلٍ أحاديِّ البُعد من الحروف الجينية مثل GTCCATTGCCCGTATTACCG. كان فرانسيس كريك قد قضى سنواتِ الحرب وهو يعملُ لدى مكتب الأميرالية (وهي الهيئةُ المَنوطة بقيادة القوات البحرية الملكية)؛ لذا فمن المحتمَل أنه كان على درايةٍ بالشفرات، مثل تلك التي كانت تُنتجها آلاتُ «إنيجما» الألمانية، وكانت تُفكُّ في بلتشلي بارك. على أيِّ حال، حينما رأى كريك سلسلةَ الحمض النووي أدرَك على الفور أنها شفرة؛ أي: تسلسلٌ من المعلومات التي تُوفر التعليمات الوراثية البالغةَ الأهمية. ومثلما سنعرف في الفصل السابع، فإن التعرف على بِنْية الحمض النووي ذاتِ الشكل اللولبي المزدوج قد حلَّت مشكلةَ كيفيةِ نقل المعلومات الوراثية. وهكذا بضربةٍ واحدة، تمكن العلماءُ من حلِّ لُغزَين من أكبر الألغاز العلمية.

إنَّ اكتشاف بِنية الحمض النووي قدَّم وسيلةً ميكانيكية حلَّت ألغازَ الجينات. فالجينات موادُّ كيميائية، وليست الكيمياء سوى ديناميكا حرارية؛ فهل أدى اكتشافُ اللولب المزدوج أخيرًا إلى دخول الحياة بالكامل إلى مجال العلوم الكلاسيكية؟

## ابتسامةٌ غريبة من الحياة

في روايةِ لويس كارول «مغامرات أليس في بلاد العجائب»، كان من عادةِ القط تشيشاير أن يَختفيَ مُخلفًا وراءه ابتسامتَه فحَسْب؛ مما دفع أليس إلى التعليق بأنها «كثيرًا ما رأت قططًا من دون ابتسامة، لكنها لم ترَ ابتسامةً من دون قطٍّ مُطلقًا.» الحقُّ أنَّ العديد من

علماء الأحياء يختبرون شعورًا مماثلًا بالحيرة؛ إذ يُدركون آليةَ عمل الديناميكا الحرارية في الخلايا الحية ويعرفون كيفية تشفير الجينات لجميع المعلومات اللازمة من أجل تكوين الخلية، غير أنَّ اللغز المتمثِّل في ماهيَّة الحياة نفسها لا يَفْتأ عن الابتسام لهم.

تتمثَّل إحدى المشكلات في التعقيد الشديد للتفاعلات الكيميائية الحيوية التي تحدث داخلَ كلِّ خليةٍ حية. فعندما يُنتج علماءُ الكيمياء أحدَ الأحماض الأمينية أو السكريات اصطناعيًّا، غالبًا ما يُصنِّعون منتجًا واحدًا في المرة، وهم يتمكَّنون من ذلك عن طريق التحكُّم الدقيق في الظروف التجريبية بما يتلاءم مع التفاعل المحدَّد، مثل درجة الحرارة وتركيزات المُكوِّنات المختلفة من أجل تصنيع المركَّب المستهدف على الوجه الأمثل. ليست تلك بالمهمة السهلة، وهي تستلزم التحكُّم الدقيق في العديد من الظروف المختلفة داخل التقنيات المخصَّصة وأجهزة التكثيف وأعمدة العزل وأجهزة الترشيح وغيرها من الأجهزة الكيميائية المعقَّدة. غير أنَّ الخلية الحية في جسم الإنسان لا تتوقَّف عن تصنيع آلافِ الموادِّ الكيميائية الحيوية المحددة داخل غرفة تفاعلات لا تحتوي إلا على بضعة أجزاء من المليون من الميكرولتر من السائل.[٧] فكيف تجري كلُّ تلك التفاعلات المختلفة في الوقت نفسه؟ وكيف يُنسَّق كلُّ هذا النشاط الجزيئي داخل خليةٍ لا تُرى إلا تحت المجهر؟ يُمثل هذان السؤالان مِحورَ العلم الجديد المسمَّى «علم أحياء الأنظمة»، لكن يجدُر بنا القولُ إنَّ الإجابات لا تزال غيرَ معروفة!

الموت أيضًا معضلةٌ مُلغِزة من ألغاز الحياة. فتتمثَّل إحدى سِمات التفاعلات الكيميائية في أنها يُمكن عكسُها دومًا. يمكننا أن نكتب تفاعلًا كيميائيًّا بالاتجاه الآتي: الموادُّ المتفاعلة ← المواد الناتجة. غير أنَّ التفاعلَ العكسي: المواد الناتجة ← المواد المتفاعلة؛ دائمًا ما يحدث في اللحظة نفسِها في واقع الأمر. كلُّ ما هنالك أنَّ اتجاهًا واحدًا يُهيمن في العادة عند توفُّر ظروفٍ معيَّنة. بالرغم من ذلك، فمن الممكن دومًا أن تتوفر مجموعةٌ أخرى من الظروف التي تُعطي الأفضلية للتفاعل الكيميائيِّ العكسي. على سبيل المثال، عندما يحترق الوقودُ الحفريُّ في الهواء، فإن الموادَّ المتفاعلة هي الكربون والأكسجين، وتُصبح المادة الناتجة الوحيدة هي غاز الدفيئة ثاني أكسيد الكربون. عادةً ما يُعَد هذا التفاعل غيرَ قابلٍ للانعكاس، غير أنَّ بعض أشكال تقنية احتجاز الكربون تحاول عكس العملية باستخدام مصدرِ طاقةٍ يُوجِّه التفاعلَ الكيميائي إلى الاتجاه المعاكس. على سبيل المثال، أنشأ ريتش ميسل من جامعة إلينوي شركةً أسماها «ديوكسايد ماتريالز» يتمثَّل هدفُها في استخدام الكهرباء لتحويل غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى وَقودٍ للمَرْكبات.[1]

أما الحياة فهي تختلف عن ذلك. إنَّ أحدًا لم يكتشف من قبلُ ظرفًا يُعطي الأفضلية للاتجاه: خلية ميتة ← خلية حية. تلك الأُحْجية بالطبع هي ما دفع أسلافَنا إلى التوصُّل إلى فكرة الروح. إننا لم نَعُد نعتقد أنَّ الخلية تتمتع بروحٍ ما بأيِّ شكلٍ من الأشكال، لكن ما ذاك الذي يُفقَد إلى الأبد عندما تموت الخليةُ أو الإنسان؟

لعلَّك تتساءل إذن: ماذا عن علم الأحياء التخليقيِّ الحديثِ النشأة؟ لا بد أنَّ المشتغِلين بهذا العلم يمتلكون المِفتاحَ لحلِّ لغز الحياة. ربما يكون أشهرُ المشتغِلين بعلم الأحياء التخليقي هو كريج فينتر الرائد في أبحاث تحديدِ تسلسل الجينوم، والذي أثار عاصفةً عِلمية عام ٢٠١٠ عندما ادَّعى أنه أوجد «حياة اصطناعيَّة». تَصدَّر عملُه عناوينَ الصُّحف على مستوى العالم، وأشعل نيرانَ الخوف من أن تُهيمن على الكوكب كائناتٌ اصطناعيةُ المنشأ. غير أنَّ فينتر وفريقَه لم يتمكَّنوا إلا من تعديلِ شكلٍ موجود من أشكال الحياة، لا خَلْقَ حياةٍ جديدة في حقيقة الأمر. وقد قاموا بذلك عن طريق تخليقِ حمضٍ نووي يُشفر الجينوم الكامل لأحد أنواع البكتيريا المسبِّبة للأمراض في الماعز يُعرَف باسم «المفطورة الفطرانية». بعد ذلك، حقَن الفريقُ جينوم الحمض النووي المخلَّق في خليةٍ بكتيرية حية، وتَمكَّنوا على نحوٍ بارع من حثِّها على استبدال الكروموسوم المخلَّق بالكروموسوم الأصلي (الوحيد) فيها.

لا شك أنَّ هذا العمل كان نصرًا تقنيًّا مذهلًا. ذلك أنَّ الكروموسوم البكتيري يحتوي على ١,٨ مليون حرفٍ جيني يجب أن تُرتَّب جميعُها معًا بدقةٍ شديدة بالتسلسل الصحيح. غير أنَّ ما فعله العلماء في الأساس هو إجراء التحوُّل نفسِه الذي نفعله جميعُنا تلقائيًّا عندما نُحول الموادَّ الكيميائية الخاملة في طعامنا إلى لحمِنا الحي.

إنَّ النجاح الذي حقَّقه فينتر وفريقه في تخليق كروموسومٍ بكتيري بديل وحقنه؛ يفتح البابَ لمجال علم الأحياء التخليقيِّ الجديد تمامًا، وهو ما سنتناولُه مجددًا في الفصل الأخير. ثَمة احتمالٌ أن يُنتج هذا المجالُ العلميُّ طرقًا أكثرَ فعاليةً لصناعة العقاقير أو زراعة المحاصيل أو التخلُّص من المُلوثات. بالرغم من ذلك، ففي هذه التجارِب وغيرها من التجارِب العديدة المماثلة، لم يخلق العلماء حياةً جديدة. وصحيحٌ أنَّ فينتر قد حقَّق إنجازًا رائعًا، لكن لُغز الحياة الجوهري لم يزَلْ قائمًا. ويُنسَب إلى عالم الفيزياء الحائز على جائزة نوبل ريتشارد فاينمان أنه قال: «إنَّ ما لا نستطيع صُنعه، لا نستطيع فَهْمه». وبِناءً على هذه العبارة، فإننا لا نفهم الحياة لأننا لم نتمكَّن حتى الآن من صُنعها. يُمكننا مزجُ الموادِّ الكيميائية الحيوية أو تسخينُها أو تعريضها للإشعاع، يُمكننا حتى

استخدامُ الكهرباء لبثِّ الحياة بها، على غِرار شخصية فرانكشتاين للكاتبة ماري شيلي، لكنَّ الطريقة الوحيدة التي يُمكننا بها إنشاءُ حياةٍ هي حقنُ تلك الموادِّ الكيميائية الحيوية في خلايا حيةٍ بالفعل، أو أكلها؛ ومِن ثمَّ نجعلها جزءًا من أجسادنا.

فما السببُ إذن في عدم قدرتنا على تنفيذ حيلةٍ تُنفذها بكلِّ سلاسةٍ تريليوناتٌ من الميكروبات البدائية للغاية في كل ثانية؟ هل ينقصنا مكوِّنٌ ما؟ هذا هو السؤال الذي فكَّر فيه عالمُ الفيزياء الشهير إرفين شرودنجر منذ أكثرَ من سبعين سنة، والإجابة المفاجئة التي اقترحها تُعَد من المحاور الأساسية في هذا الكتاب. ولكي نفهم السبب في أنَّ إجابة شرودنجر عن أعمقِ ألغاز الحياة كانت ولا تزال ثوريةً للغاية؛ علينا الرجوع إلى بداية القرن العشرين، قبل اكتشاف تركيب اللولب المزدوج، حين انقلب عالمُ الفيزياء رأسًا على عَقِب.

## الثورة الكَميَّة

أدى التدفُّق الكبير للمعرفة العلمية خلال عصر التنوير في القرنَين الثامن عشر والتاسع عشر إلى ظهور الميكانيكا النيوتنية والفيزياء الكهرومغناطيسية والديناميكا الحرارية، وأثبت أنَّ دمج هذه المجالات الفيزيائية معًا قد نجح في وصفِ حركة جميع الأجسام والظواهر اليومية التي نراها بأعيُنِنا في عالمنا؛ بدايةً من قذائف المدفعيَّات إلى الساعات، ومِن العواصف إلى القطارات البُخارية، ومن البندولات إلى الكواكب، إضافةً إلى نجاحه في وصفِ سلوكياتها. بالرغم من ذلك، فحين حوَّل علماءُ الفيزياء، في نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين، اهتمامَهم إلى المُكونات المجهرية للمادة، وهي الذرَّات والجزيئات، اكتشَفوا أن القوانين المعروفة لم تَعُد تسري عليها. فاحتاجت الفيزياءُ إلى ثورة.

تحقق أولُ إنجاز كبير — مفهوم «الكم» — على يدِ عالم الفيزياء الألماني ماكس بلانك الذي قدَّم النتائج التي توصَّل إليها في ندوةٍ عقَدَتها الجمعيةُ الفيزيائية الألمانية في الرابعَ عشر من ديسمبر ١٩٠٠، وهو تاريخٌ يرى الكثيرون أنه شهد مولدَ نظرية الكم. كان الفَهمُ السائد حينَذاك أنَّ إشعاع الحرارة ينتقلُ عبر الفضاء في صورة موجات، على غِرار أشكال الطاقة الأخرى. وتمثَّلت المشكلةُ في عدم قدرة نظرية الموجات على شرح الكيفية التي تتبعها أجسامٌ ساخنة معيَّنة في إشعاع الطاقة. ولهذا، اقترح بلانك فكرةً جديدة مفادها أنَّ المادة في جُدران هذه الأجسام الساخنة تهتزُّ بتردُّداتٍ منفصلة معيَّنة؛ مما يؤدي إلى عدم إشعاع الطاقة إلا في صورةِ كتلٍ صغيرة منفصلة — أو «كموم» — لا

يمكن تقسيمها إلى أقلَّ من ذلك. حقَّقَت نظريتُه البسيطة نجاحًا كبيرًا، لكنها كانت تحولًا جذريًّا عن نظرية الإشعاع «الكلاسيكية»، التي ترى أنَّ إشعاع الطاقة يتدفَّق متواصلًا. فقد اقترحَت نظريةُ بلانك أن الطاقة لا تتدفَّق من المادة كما يسيل الماءُ من الصنبور دون توقف، بل تأتي في صورةِ مجموعة من الحُزَم المنفصلة التي لا يمكن تقسيمها — وكأنها مياهٌ تتساقط ببطءٍ من الصنبور في شكل قطَرات.

لم يطمئنَّ بلانك مطلقًا إلى فكرة أنَّ الطاقة عبارةٌ عن كتل، لكن بعد خمس سنوات من اقتراحِه لنظرية الكم، وسَّع ألبرت أينشتاين هذه الفكرةَ واقترح أنَّ الإشعاع الكهرومغناطيسي بكلِّ أشكاله — بما في ذلك الضوء — «مُكمم» لا مستمر، وهو يكون في صورةِ دفعاتٍ منفصلة أو جُسيمات نُسمِّيها اليوم بالفوتونات. اقترح أينشتاين أنَّ هذه الطريقة في التفكير بشأن الضوء يمكن أن تُفسر اللغزَ القديم المعروف باسم التأثير الكهروضوئي، وهي ظاهرةٌ يحدث فيها أن يتمكَّن الضوءُ من طرد الإلكترونات من المادة. لقد كان هذا العمل هو ما أدَّى إلى فوز أينشتاين بجائزة نوبل عام ١٩٢١، لا نظرياته الشهيرة أكثر عن النسبية.

غير أنَّ الأدلة كانت كثيرةً أيضًا على أنَّ الضوء يسلك سلوكَ الموجات المنتشرة والمتواصلة. فكيف يمكن للضوء إذن أن يكون كتلةً وموجةً في آنٍ واحد؟ لم يبدُ ذلك منطقيًّا حينها، لا سيَّما في نطاق العلوم الكلاسيكية على الأقل.

تحقَّقَت الخطوة الكبرى التالية على يدِ عالم الفيزياء الدانماركي نيلس بور الذي وصَل إلى مانشستر عام ١٩١٢ ليعملَ مع إرنست رذرفورد. كان رذرفورد قد اقترح للتوِّ نَموذجَه الكوكبيَّ الشهيرَ للذَّرة، الذي يتكون من نَواةٍ صغيرة كثيفة في المركز، وتُحيط بها إلكترونات أصغرُ تتحرك في مَدارات. لكنَّ أحدًا لم يفهم كيف أنَّ الذرات تبقى مستقرَّة. فطِبقًا للنظرية الكهرومغناطيسية القياسية، لن تتوقف الإلكتروناتُ السالبة الشحنة عن إصدار الطاقة الضوئية في أثناء دورانها حول النَّواة الموجبة الشحنة. وفي قيامها بتلك العملية، سوف تفقد الإلكترونات طاقةً وسرعان ما ستدور إلى الداخل باتجاهِ النواة (في غضونِ جزءٍ من ألف تريليون من الثانية)؛ مما سيؤدِّي إلى انهيار الذرة. لكن الإلكترونات لا تفعل ذلك. فما سرُّها إذن؟

لكي يشرح بور استقرارَ الذرات؛ اقترح أنَّ الإلكترونات لا تتمتع بالحرية في شَغْلِ أيِّ مدار حول النواة، وإنما تدور في مداراتٍ محدَّدة وثابتة («مكممة»). ولا يستطيع الإلكترون أن يهبط إلى المدار التالي الأدنى إلا بإصدارِ كتلة — أو كمٍّ — من الطاقة

الكهرومغناطيسية (الفوتون)، تتطابق قيمتها مع الفارق في قيمة الطاقة بين المَدارَين المَعنيَّين. وبالمثل أيضًا، لا يمكن للإلكترون أن يقفز إلى مدارٍ أعلى إلا بامتصاص فوتون يحتوي على القدر المناسب من الطاقة.

إحدى طرُق تَوضيح الفرق بين النظرية الكلاسيكية ونظرية الكم وشرح السبب في أنَّ الإلكترون لا يَشغل سوى مداراتٍ ثابتة ومحددة داخل الذرة؛ تتمثَّل في المقارنة بين كيفيَّة عزف النغمات الموسيقية على الجيتار وبين عزفِها على الكمان. إنَّ عازفَ الكمان يضغط بإصبعه على أيٍّ من الأوتار الموجودة بطول العنق لتقصير الوتر؛ ومن ثَم يحصل على النغمة المطلوبة عندما يمرُّ القوس على ذلك الوتر فيؤدِّي إلى اهتزازه. تهتزُّ الأوتارُ الأقصر بتردُّداتٍ أعلى (أي: عدد كبير من الاهتزازات في الثانية) لإصدار نغماتٍ عالية، بينما تهتزُّ الأوتار الأطولُ بترددات أقل (أي: عددٍ قليل من الاهتزازات في الثانية) لإصدار نغمات منخفضة.

قبل الاستمرار في مناقشةِ هذا المثال، ينبغي توضيحُ بعض الأمور عن إحدى السِّمات الأساسية في ميكانيكا الكم، وهي الارتباطُ الوثيق بين التردُّد والطاقة.[٧] رأينا في الفصل السابق أنَّ الجسيمات دون الذرِّية تتَّسم أيضًا بخصائصَ مَوجيَّة؛ مما يعني أنَّ لها طولًا مَوجيًّا وتردُّدًا للتذبذب، على غِرار أيِّ موجة. ودائمًا ما تتمتَّع الاهتزازات السريعة أو الذبذبات بطاقةٍ أكبر من تلك التي تتمتَّع بها الاهتزازاتُ البطيئة، ويمكنك أن تجد مثالًا على ذلك في المجفِّف الدوَّار الذي يجب أن يدور (يتذبذب) بتردُّدٍ عالٍ؛ من أجل أن يمتلك الطاقةَ الكافية لطردِ المياه من الملابس.

لِنُتابع الآن حديثَنا عن الكمان. يمكن لِحدَّة النغمة (تردُّدِها الاهتزازي) أن تتفاوتَ باستمرارٍ بِناءً على طول الوتَر بين طرَفِه الثابت وإصبع العازف. وهذا مُكافئٌ للموجة الكلاسيكية التي يمكن أن تتَّخذ أيَّ طولٍ مَوجي (وهو المسافة بين القِمَم المتتالية). ولهذا، سنُعرِّف الكمان بأنها «آلة كلاسيكية»، لكننا لا نعني ذلك من منظور «الموسيقى الكلاسيكية»، بل من منظور الفيزياء الكلاسيكية غير الكمية. ذلك بالطبع هو السببُ في صعوبةِ إجادة العزف على الكمان؛ إذ ينبغي على العازف أن يعرف تمامًا أين يضعُ إصبعه للحصول على النغمة الصحيحة.

أما الجيتار فعُنقه مختلفة؛ ذلك أنه يحتوي على «دساتين» تُوجَد على مسافاتٍ بطول العنق، وهي عبارةٌ عن ألْسِنة معدِنية توضع على مسافاتٍ محدَّدة بارتفاعٍ طفيف عن العُنق دون أن تلمس الأوتارَ الموجودة فوقها. لذا، عندما يضع عازفُ الجيتار إصبعَه على

وترٍ ما، فإنه يضغط على الدستان الموجودِ تحته، مما يجعل هذا الدستان هو طرَفَ الوتر مؤقتًا بدلًا من الإصبع. وعند نقْرِ الوتر، فإن حدَّة النغمة الناتجة تتشكَّل بفعلِ اهتزاز الوتر بين الدستان والجسر فحسب. إنَّ عدد الدساتين المحدودَ يعني أنه لا يمكن العزفُ سوى لِنَغمات معينةٍ ومحددة على الجيتار. ثم إنَّ وضع الإصبع بين اثنين من الدساتين لن يُغيِّر النغمة عند نقر الوتر. ومن ثَمَّ فإنَّ الجيتار أشبهُ بآلةٍ موسيقية «كَمية». ولهذا، فبِناءً على نظرية الكم، فإن التردُّد والطاقة مُرتبطان أحدُهما بالآخَر، ولا بد أن يكون لوتر الجيتار المهتزِّ طاقاتٌ منفصلة وليست مُستمرَّة. وبطريقةٍ مشابهة، لا بد للجسيمات الأساسية — مثل الإلكترونات — أن ترتبط بتردُّدات مَوجية لها سماتٌ مميزة ترتبط كلٌّ منها بمستوى طاقةٍ مُنفصل خاص بها. وعندما ينتقل الجُسيم من إحدى حالات الطاقة إلى أخرى، فيجب أن يمتصَّ من الإشعاع أو يصدر منه ما يتطابق مع الفرق في الطاقة بين المستوى الذي ينتقل منه إلى المستوى الذي يستقرُّ عليه.

بحلول منتصفِ عشرينيَّات القرن العشرين، عاد بور إلى كوبنهاجن، وكان من بين عددٍ من علماء الفيزياء الأوروبيين الذين يعملون بحماسٍ لإيجاد نظريةٍ رياضية أكثرَ اكتمالًا واتساقًا، تصفُ ما يحدث في العالم دونَ الذرِّي. وكان من بين ألمع العلماء في هذه المجموعة ألمانيٌّ عبقري شاب، يُدعى فيرنر هايزنبرج. بينما كان هايزنبرج يتعافى من حُمَّى القش في جزيرة هيلجولاند الألمانية في صيف عام ١٩٢٥، أحرَز تقدمًا كبيرًا في صياغة الرياضيات الجديدة اللازمة لوصف عالم الذرَّة. غير أنها كانت نوعًا غريبًا من الرياضيَّات، وما أخبرَتنا به عن الذرَّات كان أغرب. على سبيل المثال، لم يُحاجج هايزنبرج فحسبُ بأننا لا نستطيع معرفةَ مكان أحد إلكترونات الذرَّة على وجه التحديد إذا لم نكن نقيسه، وإنما أيضًا أن الإلكترون نفسَه ليس له موقعٌ محدد؛ لأنه ينتشِر بطريقةٍ غير واضحة وغيرِ معروفة.

اضطُرَّ هايزنبرج إلى استنتاج أن العالم الذريَّ مكانٌ طيفي هشٌّ لا يتبلور إلى كِيانٍ مُحدَّد إلا عندما نعدُّ جهازَ قياس للتفاعل معه. تلك هي عملية القياس الكمي التي ذكَرْناها باقتضابٍ في الفصل السابق. أوضح هايزنبرج أن هذه العملية لا تكشف إلا عن السِّمات التي صُمِّم الجهاز تحديدًا لقياسها — وذلك مثلما أنَّ الآلاتِ الموجودةَ في لوحةِ معلومات السيارة تُقدِّم كلٌّ منها معلوماتٍ عن جانبٍ واحد من جوانب عملية تشغيل السيارة مثل السرعة أو المسافة المقطوعة أو درجة حرارة المحرِّك. ومِن ثمَّ، يُمكننا إجراءُ تجرِبةٍ لتحديد المكان الدقيق لإلكترونٍ ما في وقتٍ محدَّد، وإجراءِ تَجرِبةٍ أُخرى لقياسِ سرعة الإلكترون

نفسِه. لقد أثبت هايزنبرج رياضيًّا استحالةَ إجراء تجربةٍ واحدةٍ يُمكننا أن نَقيس بها كلًّا من مكان الإلكترون وسرعة حركتِه في آنٍ واحد وبالدقَّة المرجوَّة. في عام ١٩٢٧، تجسَّد هذا المفهومُ في المبدأ الشهير، المعروفِ باسم مبدأ اللايقين لهايزنبرج، وقد ثبتَت صحتُه آلافَ المرات في المختبرات على مستوى العالم. الحقُّ أنه لا يزال أحدَ أهمِّ الأفكار في العلوم ككلٍّ، وأحدَ أساسياتِ علم ميكانيكا الكم.

في يناير عام ١٩٢٦؛ أي: في الوقت نفسِه تقريبًا الذي كان هايزنبرج يُشكِّل فيه أفكارَه، كتب عالمُ الفيزياء النمساوي إرفين شرودنجر بحثًا يُقدم فيه صورةً مختلفة للغاية عن الذرَّة. اقترح في هذا البحث مُعادلةً رياضية تُعرَف الآن باسم معادلة شرودنجر، وهي لا تُوضِّح الكيفيةَ التي يتحرَّك بها الجسيم، بل كيفية تَشكُّل الموجة. تقترح المعادلة أنَّ الإلكترون ليس جُسيمًا غامضًا لا يُعرَف موقعُه في أثناء دورانه حول النواة، بل هو موجةٌ تنتشِر في الذَّرة. وعلى خلاف هايزنبرج الذي كان يعتقد باستحالة التقاط أيِّ صورة للإلكترون ما لم نكن نقيسُه، رأى شرودنجر الإلكترون باعتباره موجةً فيزيائية حقيقية حين لا ننظر إليه، لكنه «ينهار»[٩] إلى جُسيمٍ مُحدد متى نظرنا إليه. عُرِفَت نسخته من النظرية الذرية باسم «ميكانيكا الموجة»، وتصف معادلته الشهيرة كيفيَّة تشكُّل تلك الموجات وطبيعة سلوكها على مدار الوقت. وفي الوقت الحالي، يُعَد وصفا هايزنبرج وشرودنجر كلاهما طريقتَين مختلفتَين في تأويل رياضياتِ ميكانيكا الكم، ويُعَد كِلاهما صحيحًا بطريقتِهِ الخاصة.

## دالة شرودنجر المَوجيَّة

عندما نرغب في وصفِ حركة الأجسام المعتادة في عالمنا سواءٌ أكانت قذائفَ مدفعية أو قطاراتٍ بُخارية، أو حتى كواكب، والتي كلٌّ منها يتكون من تريليونات الجسيمات، فإننا نحلُّ المشكلةَ باستخدام مجموعةٍ من المعادلات الرياضية التي تعود إلى إسحاق نيوتن. لكن إذا كان النظام الذي نريد وصْفَه ينتمي إلى العالم الكَمِّي، فسيتعيَّن علينا حينها استخدامُ معادلة شرودنجر. وهنا يكمنُ الفرْق الجوهريُّ بين النهجَين؛ ففي عالم نيوتن يأتي حلُّ المعادلة في صورةِ عددٍ أو مجموعةِ أعدادٍ تُحدد الموقعَ الدقيق للجسم في لحظةٍ معينة من الزمن. أما في العالم الكمي، فيأتي حلُّ معادلة شرودنجر في صورةٍ كَمية رياضية تُسمَّى

الدالَّة الموجية، وهي «لا» تُخبرنا بالموقع الدقيق لإلكترونٍ ما — على سبيل المثال — في لحظةٍ محدَّدة من الزمن، بل تُمدُّنا بمجموعةٍ كاملة من الأعداد التي تصفُ «احتماليةَ» وجودِ الإلكترون في مواقعَ مختلفةٍ في الفراغ «إن بحَثْنا عنه هناك».

لا شكَّ أنَّك سترى في بادئِ الأمر أنَّ هذه الإجابةَ ليست جيدةً بما فيه الكفاية؛ لأنَّ تحديد المكان «المحتمل» للإلكترون لا يبدو معلومةً ذاتَ فائدةٍ كبيرة. فأنت ترغب بالطبع في معرفةِ المكان الدقيق الذي «يُوجَد» فيه الجُسيم. غير أنَّ الإلكترون يختلف عن الجسم الكلاسيكيِّ الذي يَشغل دائمًا حيزًا محددًا في الفراغ؛ إذ يمكن له أن يُوجَد في عدةِ أماكنَ في آنٍ واحد حتى اللحظة التي يخضع فيها للقياس. ثم إنَّ الدالَّة المَوجية الكَمية موزَّعةٌ على الفراغ كلِّه؛ ومعنى هذا أنَّ أفضل ما يُمكننا التوصلُ إليه في حالةِ وصف الإلكترون، مثلًا، هو مجموعةٌ من الأعداد التي لا تُعطينا احتماليةَ العثور على الإلكترون في مكانٍ واحد، وإنما تُمدنا باحتمالية العثور عليه في كلِّ نقطة من الفراغ في آنٍ واحد. بالرغم من ذلك، تجدر الإشارةُ إلى أنَّ تلك الاحتمالاتِ الكميةَ لا تُمثل قصورًا في معرفتنا يمكن معالجتُه بالحصول على المزيد من المعلومات، بل هي سِمةٌ جوهرية في العالم الطبيعي على النطاق المِجهري هذا.

تخيَّلْ لِصًّ مجوهرات حصلَ على إخلاء سبيل مشروطٍ وخرج من السجن. وبدلًا من تقويم سلوكه، عاد من فوره إلى عادته القديمة وبدأ يسطو على المنازل في كلِّ أرجاء المدينة. وبدراسة الخريطة، تتمكَّن الشرطة من تعقُّبِ الأماكن التي ارتادَها على الأرجح منذ لحظةِ الإفراج عنه. وصحيحٌ أنَّ الشرطة لا تستطيع تحديدَ مكانه الدقيق في أيِّ زمن محدد، لكنها تستطيع تعيينَ احتمالاتٍ لأماكن عمليات السطو التي ارتكبها في مُختلِف الأحياء.

في البداية، ستكون المنازلُ القريبة من السجن هي الأكثرَ عرضةً للسرقة، لكن مساحة الأماكن المهدَّدة ستزدادُ بمرور الوقت. وبمعرفة المُمتلَكات التي كان يستهدفها في الماضي، تستطيع الشرطة أن تفترض بقدرٍ من الثقة أنَّ أحياء الأثرياء ممن يَحوزون مجوهراتٍ ثمينةً أكثرُ عرضةً للخطر من الأحياء الأفقر. يمكننا النظرُ إلى هذه الموجة التي تُعبِّر عن جريمة رجل واحد، والتي تنتشر في المدينة بأكملِها باعتبارها موجةَ احتمال. ليست تلك الموجةُ بالملموسة ولا الحقيقية، بل مجموعة أعداد مجردة يمكن تعيينُها لمختلِف الأنحاء في المدينة. وبطريقةٍ مُشابهة، تنتشر الدالَّة المَوجية من النقطة التي شوهد فيها الإلكترونُ

آخِرَ مرة. ويمكننا من خلال حساب قيمة هذه الدالَّة الموجية في مواضعَ وأوقاتٍ مختلفة تعيينُ احتمالاتٍ للمكان الذي سيظهر فيه تاليًا.

والآن، ماذا إن أخذَت الشرطة بمعلومةٍ من مصدر قريب من اللصِّ وتمكَّنَت من القبض على اللص، متلبسًا وهو يتسلَّل من نافذةٍ وعلى كتفه حقيبةُ «مسروقاته»؟ تنهار على الفور موجةُ توزيع الاحتمالات المنتشرة، التي تصفُ الأماكنَ التي يُحتمل أن يُوجَد فيها اللصُّ لتتلخَّص إلى مكانٍ واحد فحسب، ويصبح مؤكَّدًا أيضًا أنه لا يُوجَد في أي مكانٍ آخَر. وعلى المنوال نفسِه، إذا عُثر على الإلكترون في موقعٍ مُعيَّن، فإنَّ دالَّتَه الموجية تتغير على الفور. وفي لحظة تحديد موقع الإلكترون، تُصبح احتمالية العثور عليه في أي مكان آخر صفرًا.

بالرغم من ذلك، فحتى قبل القبض على اللص، لا تملك الشرطةُ إلا أن تُعين احتمالاتٍ للأماكن التي يمكن أن يُوجَد فيها، وهم يعرفون أن السبب في ذلك هو افتقارهم إلى المعلومات، وهنا لا يعود التشبيهُ بين الحالتين صالحًا. فاللصُّ لم ينتشر بالفعل في جميع أرجاء المدينة، وصحيحٌ أنه يجبُ على الشرطة أن تضعَ في اعتبارها أنه قد يُوجَد في أيِّ مكان، فالواقعُ أنه لا يمكن أن يُوجَد إلا في مكانٍ واحد في وقتٍ معيَّن. وعلى العكس من ذلك تمامًا، إذا كنا لا نتتبَّع حركةَ الإلكترون، فلا يمكن أن نفترض وجودَه في مكانٍ محدَّد في وقتٍ معين. ولا يمكننا وصفُه حينذاك إلا من خلال الدالة الموجية، التي تعني أنه موجودٌ في كل مكانٍ في آنٍ واحد. إنَّ فعل النظر إلى الإلكترون فقط (إجراء عملية قياس)، هي التي تُمكِّننا من «إجبار» الإلكترون على أن يُصبح جُسيمًا له موضعٌ محدَّد.

بحلول عام ١٩٢٧، وبفضل جهود هايزنبرج وشرودنجر وغيرِهما، اكتمَلَت الأسُس الرياضية لميكانيكا الكمِّ بصفةٍ مبدئية. واليوم، صارت تُشكل الأساسَ الذي يستند إليه قدرٌ كبير من الفيزياء والكيمياء، وهي تُمدُّنا بصورةٍ مكتملة إلى حدٍّ كبير لوحدات البناء الأساسية التي يتألَّف منها الكونُ بأكمله. الحقُّ أنه لولا ما تتَّسمُ به ميكانيكا الكم من قوةٍ تفسيرية هائلة في وصف توافُق عناصر العالم جميعها معًا، لَما صار قدرٌ كبير من التكنولوجيا الحديثة ممكنًا.

لذا، في أواخِر عشرينيَّات القرن العشرين، مبتهِجين بما حقَّقوه مؤخرًا من نجاحاتٍ في تطويع عالم الذرَّات، خرج العديدُ من روَّاد ميكانيكا الكم من مُختبرات الفيزياء لغزوِ مجالٍ مختلِف من العلوم، ألا وهو علم الأحياء.

## روَّاد علم الأحياء الكمي

في عِشرينيَّات القرن العشرين، كان كُنه الحياة ما يزال لُغزًا. فبالرغم مما حقَّقه علماء الكيمياء الحيوية في القرن التاسعَ عشر من تقدُّمٍ كبير في تأسيس فَهْمٍ ميكانيكي لكيمياء الحياة، ظل العديد منهم مُتمسِّكين بالمبدأ الحيوي القائل بأنه لا يمكن اختزالُ علم الأحياء في الكيمياء والفيزياء، بل يستلزم مجموعةَ قوانينَ خاصةً به. كان «البروتوبلازم» الموجودُ داخل الخلايا الحية لا يزال يُرى على أنه شكلٌ غامض من أشكال المادة التي تُحركها قُوًى غيرُ معروفة، وظل سرُّ الوراثة يُراوغ علم الوراثة المتنامي.

غير أنَّ ذلك العَقد شهد ظهورَ مجموعةٍ جديدة من العلماء عُرفوا باسم أنصار النظرية العضوية الذين رفَضوا المبادئ التي يقوم عليها المذهبُ الحيوي والمذهب الميكانيكي على حدٍّ سواء. وافق هؤلاء العلماءُ على أنَّه يوجد شيءٌ غامض بشأن الحياة، لكنهم زعَموا أنه من «الممكن» مَبدئيًّا تفسيرُ هذا اللغز من خلال قوانينَ فيزيائيةٍ وكيميائية لم تُكتشَف بعد. ومن أكبر مُناصري حركة المذهب العضوي عالم نمساوي آخر اسمه غريب وهو لودفيج فون بيرتالانفي، الذي كتب بعضًا من أوائل الأبحاث عن نظريات التطور البيولوجي، وركَّز في كتابه الصادر عام ١٩٢٨ بعُنوان «النظرية النقدية للتشكل» على ضرورةِ وجود مبدأ بيولوجي جديد لوصفِ جوهر الحياة. وقد أثَّرَت أفكارُه — لا سيما هذا الكتاب — في العديد من العلماء، من بينهم رائدٌ آخَرُ في فيزياء الكم وهو باسكوال يوردان.

وُلد باسكوال يوردان وتعلَّم في هانوفر ثم درس على يدِ واحدٍ من مؤسِّسي ميكانيكا الكم وهو ماكس بورن[١٠] في جوتنجن بألمانيا. وفي عام ١٩٢٥، نشَر يوردان وبورن الورقةَ البحثية الكلاسيكية: «عن ميكانيكا الكم». وبعد عام، نشر كلٌّ من يوردان وبورن وهايزنبرج «تتمَّة» لهذه الورقة البحثية بعنوان «عن ميكانيكا الكم ٢». عُرفت هذه الورقة البحثية باسم «البحث الثلاثي التأليف» وتُعتبر من كلاسيكيات ميكانيكا الكم؛ لأنها عالجَت التقدُّم الكبير الذي حقَّقه هايزنبرج وطوَّرتْهُ إلى طريقةٍ رياضية أنيقة لوصفِ سلوك عالم الذرَّات.

وفي العام التالي، فعل يوردان ما كان سيفعله أيُّ فيزيائي أوروبي كفءٍ من جيله إن واتَتْه الفرصة: قضى وقتًا في كوبنهاجن يعمل مع نيلس بور. وفي عام ١٩٢٩ تقريبًا، بدأ الرجلان في مناقشةِ ما إذا كان من الممكن تطبيقُ ميكانيكا الكمِّ في علم الأحياء بنحوٍ ما. عاد باسكوال يوردان إلى ألمانيا للعمل في جامعة روستوك، لكن المراسَلات ظلَّت مستمرةً بينه وبين بور على مدار العامين التاليَين بشأنِ علاقة الفيزياء بالأحياء. تمخَّضَت أفكارُهما

عمَّا يمكن اعتبارُه أولَ بحثٍ علمي عن علم الأحياء الكمي، والذي كتبه يوردان عام ١٩٣٢ لمجلة «دي ناتورفزينشافتن» الألمانية بعُنوان «ميكانيكا الكم والمشكلات الجوهرية في علم الأحياء وعلم النفس».[2]

تنطوي كتابات يوردان بالفعل على العديد من الأفكار المهمة بشأن ظاهرةِ الحياة، غير أنَّ النزعة السياسية في تكهُّناته البيولوجية بدأتْ تزداد بما يتَّسق مع الأفكار النازية، حتى إنه زعَم أنَّ مفهوم القائد المستبدِّ الأوحد أو المرشد (الفيورر) من المبادئ الأساسية في الحياة.

> نعلم أنه من بين عددِ الجزيئات الكبير الذي تتكوَّن منه البكتيريا، يُوجَد عددٌ ضئيل للغاية من الجزيئات الخاصة التي تتمتع بسُلطة مستبدَّة على الكائن الحي كله؛ فهي تُمثل مركزَ قيادةٍ للخلية الحية. إنَّ امتصاص كمٍّ من الضوء في أيِّ مكانٍ خارج «مركز القيادة» لن يقتلَ الخلية إلا بقدرِ ما يمكن أن تُبادَ أمةٌ عظيمة بقتلِ جندي واحد منها. غير أنَّ امتصاص كمٍّ من الضوء في مركز قيادة الخلية يمكن أن يودِيَ بحياة الكائن الحي كلِّه ويؤدِّيَ إلى تفكُّكِه، مثلما يمكن لتنفيذ هجومٍ ناجح على أحد قادة الدولة أن يؤديَ إلى تفكيك الدولة برُمَّتها من أعماقها.[3]

إنَّ هذه المحاولةَ لإقحام الأفكار النازية في علم الأحياء مذهلةٌ ومرعبة في آنٍ واحد. بالرغم من ذلك، فهي تنطوي على فكرةٍ وليدة مثيرة للاهتمام؛ وهي ما أسماه يوردان بنظرية التضخُّم. أوضحَ يوردان أن الجمادات يحكمها متوسطُ الحركة العشوائية لملايين الجسيمات؛ ومن ثمَّ لن يكون لحركةِ جزيء واحد أيُّ تأثير يُذكر على الجسم ككُل. غير أنه زعم أنَّ الحياة مختلفة عن ذلك؛ إذ يحكمها عددٌ ضئيل للغاية من الجزيئات يُوجَد داخل مركز القيادة وله تأثيرٌ طاغٍ؛ ولهذا فإن الأحداث التي تجري على المستوى الكمِّي وتحكم حركةَ هذه الجزيئات، مثل مبدأ اللايقين لهايزنبرج، تتضخَّم حتى تُؤثر في الكائن الحي ككل.

إنها فكرةٌ مثيرة للاهتمام وسنعود إليها لاحقًا، لكنها لم تتطوَّرْ حينذاك ولم يكن لها تأثيرٌ كبير لأن الأفكار النازية التي اعتنَقها يوردان أفقَدَته مِصداقيته بين مُعاصريه بعد هزيمة ألمانيا في الحرب عام ١٩٤٥؛ فأُهمِلَت أفكاره في مجال علم الأحياء الكَمِّي. تفرَّق الآخرون ممن حاولوا التوفيقَ بين علم الأحياء وفيزياء الكمِّ عقب الحرب، وزُلزِلت

أوساط علم الفيزياء بسبب استخدام القنبلة الذرية؛ ومِن ثَم تحوَّل الاهتمام إلى المسائل ذاتِ الصِّبغة التقليدية أكثر.

لم يكن أحدٌ ليُحافظ على اشتعال شعلة علم الأحياء الكمِّي سوى مخترعِ ميكانيكا الموجة الكمية إرفين شرودنجر. في عشيةِ الحرب العالمية الثانية، غادر يوردان النمسا إذ لم تكن زوجته من «العرق الآري» بموجب القوانين النازيَّة، واستقر في أيرلندا، وفي عام ١٩٤٤ نشر كتابًا يطرح عُنوانُه السؤالَ: «ما الحياة؟» وفيه صاغ فكرةً جديدة في علم الأحياء، لم تزَل فكرةً محورية في مجال علم الأحياء الكمي، وفي هذا الكتاب بالطبع. وسوف نستعرض هذه الفكرةَ بقليلٍ من العمق قبل أن ننتهيَ من هذا الفصل التاريخي.

## نظامٌ حتى النهاية

كانت المسألة التي أثارت اهتمامَ شرودنجر هي عملية الوراثة الغامضة. ربما تتذكر أنه في ذلك الوقت خلال النصف الأول من القرن العشرين عرَف العلماء أنَّ الجينات تنتقلُ بالوراثة من جيلٍ إلى جيل، لكنهم لم يكونوا يعرفون بعدُ ماهيَّة تلك الجينات ولا آليةَ عملِها. تساءل شرودنجر عمَّا تكون تلك القوانين التي تُزود الصفات الوراثية بذلك المستوى العالي من الدقَّة؟ بعبارةٍ أخرى، كيف تنتقل نُسَخ متطابقةٌ من الجينات من جيلٍ إلى جيل من دون أن يطرأ عليها تقريبًا أيُّ تغيُّر؟

أدرك شرودنجر أنَّ القوانين الدقيقة التي يمكن تَكرارُ إثبات صحتِها في الفيزياء الكلاسيكية والكيمياء، مثل قوانين الديناميكا الحرارية، التي تدفعها الحركةُ العشوائية للذرَّات والجزيئات، هي قوانينُ إحصائية في الواقع؛ مما يعني أنها لا تكون صحيحةً إلا «في المتوسط» ولا يُعتمَد عليها إلا لأنها تتضمَّن عددًا كبيرًا من الجسيمات المتفاعلة. بالعودة إلى مثال طاولة البلياردو، سنجد أن التنبُّؤ بحركةِ كرةٍ واحدة ليس ممكنًا على الإطلاق، لكن إذا أُلقيتَ عددًا كبيرًا من الكرات على الطاولة وضربتَها عشوائيًّا مدةَ ساعة تقريبًا، فسوف يمكنك التنبؤُ بأن معظم الكرات ستستقرُّ في النهاية في جيوب الطاولة. تلك هي آليَّة عمل الديناميكا الحرارية: متوسط سلوك عددٍ كبير من الجزيئات هو الذي يمكن التنبُّؤ به، لا سلوك الجزيئات الفردية. أشار شرودنجر إلى أن القوانين الإحصائية — مثل قوانين الديناميكا الحرارية — لا تصف الأنظمةَ التي تتكوَّن من عددٍ صغير من الجسيمات وصفًا دقيقًا.

لنضربْ مثالًا بقوانين المادة الغازيَّة التي ذكَرها روبرت بويل وجاك شارل منذ ثلاثِمائة سنة. تصف هذه القوانينُ كيف أن حجم الغاز في البالون يَزيد عند التعرُّض للحرارة ويتقلَّص عند التعرُّض للبرودة. يمكن وضعُ هذا السلوك في صيغةٍ رياضية بسيطة تُعرَف باسم قانون الغاز المثالي.[١١] يتبع البالون هذه القوانين المنتظمة؛ بمعنى أنه يتمدَّد بالحرارة وينكمش بالبرودة. وهو يتبع تلك القوانينَ على الرغم من أنه مملوءٌ بتريليونات الجزيئات التي تتصرَّف منفردةً مثلما تتصرَّف كُرات البلياردو غير المنظمة ذات الحركة العشوائية تمامًا، حيث إنها تتصادم بعضُها ببعض وتتدافع وترتدُّ عن الجدار الداخلي للبالون. فكيف للحركة الفوضوية أن تولِّد قوانينَ منتظمة؟

عندما يتعرَّض البالون للحرارة، تَزيد سرعةُ اهتزاز جزيئات الهواء ما يضمن تصادمها بعضها مع بعض، واصطدامها أيضًا بجدران البالون بقوةٍ أكبر قليلًا. يتولَّد عن هذه القوة الإضافية درجةٌ أكبر من الضغط على المادة المرنة للبالون (مثلما فعلت مع عصا طاولة البلياردو التي ضرب بها بولتزمان المثَل)؛ مما يؤدي إلى تمدُّده. تتوقَّف درجةُ التمدُّد على مقدار الحرارة التي يتعرَّض لها البالون، ويمكن التنبُّؤ بذلك بسهولةٍ تامة ووصفُه بدقةٍ باستخدام قوانينِ الغاز. ما يُهمنا من هذا المثال أنَّ الجسم الفرديَّ — وهو البالون — يتبع قانونَ الغاز بدقةٍ لأن الحركة المنظمة لسطحه الفردي الممتد المرن تَنتُج عن حركاتٍ غير منتظمة لعددٍ هائل من الجسيمات؛ ومن ثَم يتمخَّض النظام من اللانظام، على حدِّ قول شرودنجر.

حاجَج شرودنجر بأنَّ قوانينَ المادة الغازية ليست هي القوانينَ الوحيدة التي تستمدُّ دقَّتَها من الخصائص الإحصائية للأعداد الكبيرة، بل إنَّ «جميع» قوانين الفيزياء الكلاسيكية والكيمياء — بما في ذلك القوانين التي تحكم ديناميكا الموائع أو التفاعُلات الكيميائية — تعتمدُ على مبدأ «حساب متوسِّط الأعداد الكبيرة» أو «تُولِّد النظامَ من اللانظام».

بالرغم من ذلك، فبينما يتبع البالون ذو الحجم العادي المتلئُ بتريليونات الجُزَيئات من الهواء قوانينَ المادة الغازية، لا يتبعها بالونٌ مجهري بالغُ الصغر تكفي حَفنةٌ من جزيئات الهواء لِمَلئه. يرجع السبب في ذلك إلى أن تلك الحَفنة من الجزيئات سيبتعد بعضُها عن بعضٍ في بعض الأحيان وبطريقةٍ عشوائية تمامًا؛ مما سيؤدي إلى تمدُّد البالون حتى مع ثبات درجة الحرارة. وبالمثل، سينكمش البالون في بعض الأحيان دون

سببٍ سوى أنَّ الجزيئات تتحرَّك بطريقةٍ عشوائية نحو الداخل. وبناءً على هذا، سيتعذَّر التنبُّؤ بسلوك بالونٍ بالغ الصغر.

لا شك أنَّ اعتماد الانتظام وإمكانية التنبؤ على وجود أعداد كبيرة من الأمور التي نألفُها في شتَّى ضروب الحياة. فعلى سبيل المثال، يلعب الأمريكيون البيسبول أكثرَ من الكنديِّين، ويلعب الكنديُّون الهوكي الجليديَّ أكثرَ من الأمريكيين. وبناءً على هذا «القانون» الإحصائي، يمكن للمرء التوصلُ إلى مزيدٍ من التنبؤات بشأن كل بلد، فيمكن التنبؤ مثلًا بأن أمريكا ستستوردُ من كُرات البيسبول أكثرَ مما تستوردُه كندا، بينما ستستورد كندا من عِصِيِّ الهوكي أكثرَ مما تستورده أمريكا. وصحيحٌ أنَّ هذه القوانين الإحصائية تُوفر قيمًا تنبؤيَّة عند تطبيقها على بلدانٍ كاملة بها ملايينُ السكان، لكنها لا توفر تنبؤات دقيقة بشأن حجم التجارة في عِصي الهوكي أو كرات البيسبول في مدينةٍ صغيرة واحدة مثل مينيسوتا أو ساسكاتشوان.

لم يكتفِ شرودنجر بملاحظة أنَّ القوانين الإحصائية للفيزياء الكلاسيكية لا يمكن الاعتمادُ عليها حين يتعلَّق الأمر بالمستوى المجهري، وإنما عيَّن قيمةً كمية للتراجع في الدقة؛ إذ أشارت حساباتُه إلى أنَّ مقدار الانحرافات عن تلك القوانين يتناسب عكسيًّا مع الجذر التربيعي لعدد الجسيمات المتصادمة. وبِناءً على هذا، فإنَّ بالونًا ممتلئًا بتريليون (مليونِ مليون) جُسَيم ينحرف عن السلوك الصارم لقوانين المادة الغازيَّة بنسبةٍ لا تتجاوز واحدًا في المليون. لكنَّ بالونًا ممتلئًا بمائةِ جسيم فقط سينحرف عن السلوك المنتظم بنسبة واحدٍ في العشرة. وعلى الرغم من أن هذا البالون سيتمدَّد عادةً بالحرارة وينكمشُ بالبرودة، فلن يحدث ذلك على نحوٍ يمكن وصفُه بأيِّ قانونٍ حتمي. تخضع كلُّ القوانين الإحصائية للفيزياء الكلاسيكية إلى هذا القيد؛ بمعنى أنها تنطبق على الأجسام التي تتكوَّن من عددٍ كبير من الجسيمات، ولكنها لا تستطيع وصْفَ سلوك الأجسام التي تتكوَّن من عددٍ صغير من الجسيمات. ولهذا لا بد لأيِّ شيءٍ يعتمد على القوانين الكلاسيكية من أجل الموثوقية والانتظام أن يتكوَّن من عددٍ كبير من الجسيمات.

ماذا إذن عن الحياة؟ هل يمكن تفسيرُ سلوكها المنتظم — مثل قوانين الوراثة — بالقوانين الإحصائية؟ عندما فكَّر شرودنجر في هذا السؤال، توصَّل إلى أن مبدأ «تولُّد النظام من اللانظام» الذي يدعم الديناميكا الحراريةَ لا يمكن أن يحكم الحياة؛ إذ رأى أنَّ بعض الآلات البيولوجية الدقيقة للغاية على الأقلِّ أصغرُ كثيرًا من أن تَحكمها القوانينُ الكلاسيكية.

على سبيل المثال، في الوقت الذي كتب فيه شرودنجر عملَه «ما هي الحياة؟» — وقد كان من المعروف حينها أنَّ الجينات هي ما يحكم عمليةَ الوراثة، وإن كانت الجيناتُ نفسُها لم تزَل لُغزًا — طرح سؤالًا بسيطًا وهو: هل الجينات كبيرةٌ بما يكفي لأن تستمدَّ دقَّتها التكاثُرية من القوانين الإحصائية القائلة بـ «تولُّد النظام من اللانظام»؟ توصل إلى الحجم التقديري للجين الواحد، ووجد أنه يُساوي مكعبًا يبلغ طول ضلعه ٣٠٠ أنجستروم (والأنجستروم يساوي ٠,٠٠٠٠٠٠١ ميلليمتر). يسَعُ مثلُ هذا المكعب مليونَ ذرةٍ تقريبًا. قد يبدو هذا العددُ كبيرًا لكن الجذر التربيعي للمليون هو ألف؛ ومن ثَمَّ فإن مستوى عدم الدقة أو «التشويش» في الصفات الوراثية سيبلغ واحدًا في الألف تقريبًا، أو ٠,١ بالمائة. لذا، إذا كانت الوراثة تعتمد على القوانين الإحصائية؛ فإنها ستولِّد أخطاء (أي: انحرافات عن القوانين) بنسبةٍ واحد في الألف. لكنَّ المعروف أنَّ الجينات يمكن أن تنتقل بنُسَخ مطابقةٍ للأصل بمعدلاتِ طفراتٍ (أخطاء) أقلَّ من واحدٍ في المليار. وهذه الدرجة الاستثنائية من الدقة قد أقنعَت شرودنجر باستحالة أن تتأسَّس قوانينُ الوراثة على القوانين الكلاسيكية القائلة بـ «تولُّد النظام من اللانظام». واقترح بدلًا من ذلك أن الجينات أشبهُ على الأرجح بذرَّاتٍ أو جزيئات فردية لا تخضع إلى القواعد الكلاسيكية، بل إلى قواعد التنظيم الغريبة للعلم الذي أسهَم في تأسيسه، وهو ميكانيكا الكم. اقترح شرودنجر أن الوراثة تستندُ إلى مبدأٍ جديد وهو «تولُّد النظام من النظام».

في البداية، طرح شرودنجر نظريته في سلسلةٍ من المحاضرات بكلية ترينيتي في دبلن عام ١٩٤٣، ثم نشَر هذه المحاضرات في السنةِ التالية في كتاب «ما الحياة؟» الذي جاء فيه: «يبدو أن الكائن الحيَّ نظامٌ عيانيٌّ يقترب في جزءٍ من سلوكه من ذلك ... الذي تميل إليه الأنظمةُ جميعها كلَّما اقتربَت درجة الحرارة من الصفر المطلق، وزال اللانظامُ الجزيئي». فلأسبابٍ سنستعرضها قريبًا، تخضع كلُّ الأجسام إلى قوانين الكمِّ لا إلى قوانين الديناميكا الحرارية عندما تصل درجةُ الحرارة إلى الصفر المطلَق. كان شرودنجر يرى أنَّ الحياة ظاهرةٌ على المستوى الكَمِّي، قادرةٌ على التحليق في السماء، أو المشي على رِجلَين أو أربع، أو السباحة في المحيط، أو النموِّ في التُّربة، أو قراءة هذا الكتاب بالطبع.

## القطيعة

شهدَت السنواتُ التي تلَتْ نشرَ كتاب شرودنجر؛ اكتشافَ التركيب الحلزوني المزدوج للحمض النووي، والتقدُّمَ الصاروخي في علم الأحياء الجزيئي، وهو علمٌ تطوَّر بصورةٍ

مستقلَّة عن ظاهرة الكم إلى حدٍّ كبير. تطورَ استنساخُ الجينات والهندسة الوراثية والبصمة الجينية والتسلسل الجيني على يدِ علماء قنَعوا بوجهٍ عام بتجاهُل العالم الكمي الذي يتَّسم بصعوبته الرياضية، والحقُّ أنَّ لهم بعضَ العُذر في ذلك. كانت هناك محاولاتٌ من وقتٍ لآخر لغزوِ الحدود بين علم الأحياء وميكانيكا الكم. بالرغم من ذلك، نسي معظمُ العلماء دَعْوى شرودنجر الجريئةَ، بل إن العديد منهم جاهَر برفضه لفكرةِ أن ميكانيكا الكم ضروريةٌ لتفسير الحياة. ففي عام ١٩٦٢، على سبيل المثال، كتَب عالم الكيمياء والعلوم المعرفية البريطاني كريستوفر لونجيت–هيجنز:

> أتذكر مناقشةً جرَت منذ بضع سنواتٍ عن احتمالية وجود قُوًى ميكانيكيةٍ كَمية طويلة المدى بين الإنزيمات وركائزها. غير أنَّ العلماء قد أصابوا تمامًا في التعامُل مع هذه الفرضية بتحفُّظ، وليس ذلك لضعف الأدلة التجريبية فحسب، بل لما تطرحُه أيضًا من صعوبةٍ بالغة في التوفيق بين تلك الفكرة والنظرية العامة للقُوى بين الجزيئية.[4]

حتى في عام ١٩٩٣، حين نُشر كتابُ «ما الحياة؟ الخمسون عامًا التالية»،[5] الذي جمَع أبحاثًا كتَبها المشاركون في اجتماعٍ انعقد في دبلن بعد خمسين سنةً من طرحِ فكرة شرودنجر، لم تُذكَر ميكانيكا الكمِّ إلا قليلًا.

لقد تجذَّر قدرٌ كبير من الشك، الذي لازم دعوى شرودنجر حينذاك، على الاعتقاد السائدِ بأنه من غير الممكن للحالات الكميَّة الدقيقة أن تزدهرَ في البيئات الجزيئية داخل الكائنات الحية؛ لما تتَّسم به من دفءٍ ورطوبةٍ وازدحام. فمثلما اكتشفنا في الفصل السابق، هذا هو السبب الرئيسي في تشكُّك العديد من العلماء حينها (وحتى وقتِنا هذا) بشأنِ فكرة أنَّ ميكانيكا الكم هي ما تحكم بوصلة الطائر. ولعلك تتذكَّر ما قُلناه عن هذه القضية حين تناوَلْناها في الفصل الأول، من أنَّ الخصائص الكمِّية للمادة «تختفي» بفعل الترتيب العشوائيِّ للجزيئات داخل الأجسام الكبيرة. وإذا أخَذنا منظورَ الديناميكا الحرارية في الحُسبان، فسنرى مصدرَ هذا الاختفاء، وهو تدافُع الجزيئات الشبيه بتدافُع كُرات البلياردو، الذي وصَفه شرودنجر بأنه مصدرُ قوانين «تولُّد النظام من اللانظام» الإحصائية. يمكن للجسيمات المتناثرة أن تصطفَّ مرةً أخرى لتكشفَ عن أعماقها الكَميَّة، لكن هذا لا يحدث إلا في ظروفٍ خاصة، وعادةً ما يكون لمدةٍ وجيزة للغاية. فقد رأينا مثلًا كيف يمكن لأنوية الهيدروجين الدوَّارة المبعثرة في أجسامنا أن تصطفَّ كي تُولِّد من سمة

الدوران الكمية إشارةَ تصويرٍ بالرنين المغناطيسي تتَّسم بـ «الترابط»، لكن هذا لا يحدث إلا بتوفيرِ مجالٍ مغناطيسي قوي يُنتجه مغناطيسٌ كبير وقوي، ولا يستمرُّ إلا مدةَ استمرارِ تلك القوة المغناطيسية؛ ففورَ تعطيلِ هذا المجال المغناطيسي، تتوزَّع الجسيمات عشوائيًّا مرةً أخرى نتيجةً للتدافع الجزيئي؛ ومِن ثَم تتبعثر الإشارة الكمية ولا يمكن تحديدُها. تلك العملية التي تدفع الحركة العشوائية للجزيئات إلى الإخلال بالأنظمة الميكانيكية الكمية المصطفَّة بعنايةٍ تُسمى بـ «فك الترابط»، وهي سرعان ما تُزيل التأثيراتِ الكميةَ الغريبة في الجمادات الكبيرةِ الحجم.

إنَّ ارتفاع درجة حرارة الجسم يَزيد من طاقةِ تدافع الجزيئات وسرعتها؛ ومن ثَمَّ يقع فكُّ الترابط بسهولةٍ أكبر في درجات الحرارة المرتفعة. لكن لا تعتقد أنَّ «ارتفاع» درجة الحرارة يعني السخونة. واقعُ الأمر أنَّ فكَّ الترابط يحدث فوريًّا تقريبًا حتى في درجة حرارة الغرفة. وهذا هو السبب في استبعادِ فكرة إمكانية حفاظ أجسام الكائنات الحية الدافئة على حالاتٍ كميةٍ دقيقة، وإن كان ذلك في البداية على الأقل. فقط عندما تنخفض درجةُ حرارة الأجسام وتقترب من الصفر المطلق — أي ما يُكافئ ٢٧٣ درجةً مئوية تحت الصفر — تتوقف الحركة الجزيئية العشوائية تمامًا، وتَحول دون فكِّ الترابط؛ مما يُتيح لسماتِ ميكانيكا الكم أن تظهر بوضوح. حينئذٍ يتجلَّى معنى عبارة شرودنجر، المقتبَسة فيما سبق، بدرجةٍ أكبر. فقد كان الفيزيائيُّ يزعم أنَّ الحياة تتمكَّن بنحوٍ أو بآخَر من العمل حسَب قواعدَ لا تُفعَّل في المعتاد إلا في درجاتِ حرارة أبردَ من أيِّ كائنٍ حي بمقدار ٢٧٣ درجة مئوية.

بالرغم من هذا، ومثلما قال يوردان وشرودنجر، ومثلما ستكتشفُ إذا واصلتَ القراءة، فالحياة تختلف عن الجمادات لأن العددَ القليل نسبيًّا من الجسيمات ذات درجة التنظيم العالية، مثل الجسيمات الموجودة في جينٍ ما أو في بوصلةِ طائر، يمكن أن تُشكل فرقًا في كائنٍ حي بأكمله. ذلك ما أسماه يوردان التضخُّم وأسماه شرودنجر تولُّد النظام من النظام. إنَّ لون عينَيك وشكل أنفك وسِمات شخصيتك ومستوى ذكائك وحتى مدى قابليتك للإصابة بالأمراض، قد تحدَّدَت كلُّها بالفعل بستةٍ وأربعين بالضبط من الجسيمات الفائقة العالية التنظيم، وهي كروموسومات الحمض النووي التي ورثتَها من والديْك. ما من جمادٍ عياني معروف في هذا الكون يتَّسم بتلك الحساسية تجاه البِنْية التفصيلية للمادة في مستواها الأكثرِ جوهريةً، وهو المستوى الذي تسود فيه قوانينُ ميكانيكا الكم لا القوانين الكلاسيكية. لقد حاجَج شرودنجر بأنَّ هذا ما منح الحياةَ تميُّزَها. وفي عام

٢٠١٤؛ أي: بعد سبعين سنةً من نشر كتاب شرودنجر، بدأنا أخيرًا في تقديرِ تلك النتائج المذهلة التي تتمخَّض عن إجابته الاستثنائية للسؤال: ما الحياة؟

## هوامش

(١) في القرن التاسع عشر، أوضح عالم الفيزياء الاسكتلنديُّ جيمس كلِرك ماكسويل أنَّ القوة الكهربية والقوة المغناطيسية وَجْهان للقوة الكهرومغناطيسية نفسِها.

(٢) نتحدث هنا عن لعبة البلياردو الأمريكية.

(٣) «الطاقة الحرة» هي أحدُ المُصطلحات المهمَّة في علم الديناميكا الحرارية، وهو يتوافق إلى حدٍّ كبير مع الوصف المذكور في هذا الموضع.

(٤) على الرغم من ذلك، ينبغي توضيحُ أن بعض علماء الكيمياء الحيوية كانوا من أنصار المذهب الحيوي.

(٥) بالرغم من ذلك، لم تُعَدَّ تَجارِبُ إيفري حينها دليلًا قاطعًا على أنَّ الحمض النووي هو المادة الوراثية، بل ظلَّ هذا الجدال دائرًا في زمن كريك وواتسون.

(٦) تتكوَّن هذه البِنْيات الكيميائية من قواعدِ نكليوتيد تتكون من الكربون والنيتروجين والأكسجين والهيدروجين، إضافةً إلى مجموعةٍ واحدة على الأقل من الفوسفات، وتندمج تلك المكوناتُ كيميائيًّا في سلسلةِ الحمض النووي.

(٧) ميكرولتر واحدٌ من الماء يساوي ميلليمترًا مكعَّبًا واحدًا.

(٨) تتجسَّد هذه العلاقة بالفعل في المعادلة التي اقترحَها ماكس بلانك عام ١٩٠٠. كُتبت المعادلة بالصورة التالية: $E = h\nu$؛ حيث $E$ ترمز للطاقة، و$\nu$ للتردد، و$h$ لثابت بلانك. ونرى مِن هذه المعادلة أنَّ الطاقة تتناسب طرديًّا مع التردد.

(٩) تُسمى تلك العمليَّة في بعض الأحيان «انهيار الدالة المَوجيَّة»، وفي المراجع القياسية الحديثة، فإنها تُشير إلى تغيُّر الوصف الرياضي للإلكترون، وليس الانهيار الفيزيائي للموجة الحقيقية.

(١٠) كان ماكس بورن أولَ مَن ربط بين دالةِ شرودنجر الموجيَّة والاحتماليات في ميكانيكا الكم.

(١١) ضُمِّن القانون في المعادلة $PV = nRT$؛ حيث إن $n$ ترمز إلى كمية الغاز في العيِّنة، و$R$ إلى ثابت الغازات العام، و$P$ إلى الضغط، و$V$ إلى حجم الغاز، و$T$ إلى درجة الحرارة.

الفصل الثالث

# مُحرِّكات الحياة

يمكن فهمُ كلِّ ما تفعله الكائنات الحية في سياق اهتزاز الذرَّات وتذبذُبِها ...

ريتشارد فاينمان[1]

**هاملت:** كم يمكث الميتُ في القبر حتى يتعفَّن؟

**حفَّار القبور:** في الحقيقة، إذا لم يكن جسدُه قد فسَد قبل الموت — إذ ترِدُ إلينا هذه الأيامَ جثثٌ عديدة متقرِّحة بالجدري وغيرِه، ولن تصمدَ هذه بعد الدفن إلا قليلًا — فستمكث الجثةُ ثمانيَ سنواتٍ أو تسعًا، وتمكث جثةُ الدبَّاغ تسع سنوات.

**هاملت:** ولماذا هو دونَ غيرِه؟

**حفَّار القبور:** يا سيدي، هؤلاء الناس تتصبَّغ جلودُهم بموادِّ الدباغة وبسببها لا يصلُ الماء إلى الجسم مدةً طويلة، والماء أقوى ما يُسبب تعفُّنَ الجسم الميت.

ويليام شكسبير، «هاملت»،
الفصل الخامس، المشهد الأول، «جبانة»

منذ ثمانٍ وستين مليون سنة؛ أي: في الآونةِ التي نُطلق عليها العصر الطباشيري المتأخِّر، ثَمة تيرانوصور ريكس صغير كان يشقُّ طريقه عبر وادي نهرٍ يقطع غابةً شبهَ استوائيةٍ وقد تناثرَت فيه الأشجار. كان يبلغ التيرانوصور ثمانيةَ عشر عامًا تقريبًا وهو لم يصِل إلى

مرحلة البلوغ بعد، لكن طوله يمتدُّ إلى نحو خمسة أمتار. ومع كل خطوة ثقيلة، تتسارعُ أطنانٌ من لحم الديناصور بزخمٍ كفيل لأن يُسوي الأشجار أو أيَّ مخلوقات أصغرَ منه قادها سوءُ حظِّها إلى أن تأتيَ في طريقه. يستطيع جسم التيرانوصور الحفاظَ على سلامته برغم تلك القُوى التي يمكن أن تُمزق لحمه؛ لأنَّ كل عظمة ووتر وعضلة في جسمه مثبتةٌ بألياف مَرِنة من بروتين يُسمى «الكولاجين». يعمل هذا البروتين بمنزلة مادةٍ لاصقة تربط بين اللحم، وهو من المكوِّنات الأساسية في أجسام جميع الحيوانات، بما في ذلك الإنسان. ومثلما هو الحال مع جميع الجزيئات الحيوية، يُصنَّع هذا البروتينُ ويُفكَّك بفعل الآلات الأعجبِ في هذا الكون. وفي هذا الفصل، سنُركز على كيفية عملِ هذه الآلات النانَويَّة البيولوجية؛ وسنتناول بعد ذلك الاكتشافَ الحديث القائل[1] بأنَّ تُروس محركاتِ الحياة ورافعاته تنهلُ من العالم الكمي؛ للحفاظ على حياة الإنسان وجميع الكائنات الحية الأخرى.

لنَعُد — رغم ذلك — إلى الوادي القديم أولًا. ففي هذا اليوم بالتحديد، سيكون جسم الديناصور الذي يتألَّف من ملايينِ الآلات النانوية هو سببَ هلاكه؛ ذلك أنَّ أطرافه التي كانت فعَّالةً للغاية في مُطاردة فريسته وتمزيقِها ستُثبت فشلَها في استخراج الفريسة من الطين اللزج الموجود في قاع النهر الناعم الذي علق فيه. فبعدَ ساعاتٍ من الصراع غير المُثمر، امتلأ فكَّا التيرانوصور الضخمان بالماء المُوحل وغاص الحيوان المحتضَر في الطين. في معظم الظروف، كان جسمُ الحيوان سيتحلَّل سريعًا على غِرار «الجثامين» التي وصفها حفَّار القبور في مسرحية «هاملت»، لكن هذا الديناصور تحديدًا غاص بسرعةٍ شديدة وطُمِر جسدُه بالكامل بعد مدةٍ وجيزة في الرمل والطين الكثيف الذي يحفظ الجسم. وعلى مَرِّ السنين والقرون، تخلَّلَت المعادنُ ذاتُ الحبيبات الدقيقة ما في عظام الديناصور ولحمِهِ من تجاويفَ ومَسامَّ، فحلَّت الحجارةُ محلَّ أنسجة الحيوان؛ ومِن ثَم تحوَّلت جثةُ الديناصور إلى حَفريةِ ديناصور. وعلى السطح، استمرَّت الأنهار في الجريان فوق الأرض، مُرسِّبةً خلفها طبقاتٍ متتاليةً من الرمال والطين والطَّمْي، إلى أن استقرَّت الحفريةُ تحت عشَرات الأمتار من الحجارة الرملية والطَّفْل الصفحي.

بعد نحو أربعين مليونَ سنة، أصبح المُناخ دافئًا وجفَّت الأنهار وتعرَّضَت طبقاتُ الصخور التي تُغطي عظام الحيوان الميت منذ مدةٍ طويلة للتعرية بفعل رياح الصحراء الحارة. مرَّت ثمانيةٌ وعِشرون مليونَ سنةٍ أخرى قبل أن تدبَّ أقدامُ كائنٍ آخر يمشي على رِجلَين — «الإنسان العاقل» — في وادي النهر، لكن هذه الرئيسيات المنتصبة هرَبَت في الغالب من هذه الرُّقعة الجافة وبيئتها العدائية. عندما وصل السكَّان الأوروبيون في

العصور الحديثة إلى تلك المنطقة القاسية أطلقوا عليها اسمَ الأراضي الوَعْرة في مونتانا وأطلَقوا على وادي النهر اسم هيل كريك. في عام ٢٠٠٢، خيَّم فريقٌ من علماء الحفريات بقيادةِ أشهر صيَّاد حفريات وهو جاك هورنر في هذا المكان. كان أحدُ أفراد المجموعة وهو بوب هورمون يتناول غَداءه، ولاحظ حينَها عظمةً كبيرة ناتئة من صخرةٍ فوقه مباشرةً.

على مدار ثلاث سنوات، جرَت أعمالُ الحفر بعنايةٍ واستُخرج ما يقرب من نصفِ الهيكل العظمي للحيوان من الصخور المحيطة به، وهي مهمةٌ شارك فيها فيلقُ المهندسين بالجيش الأمريكي وطائرةٌ مروحية وعددٌ كبير من طلاب الدراسات العليا، ثم نُقل الهيكل إلى مُتحفِ جبال روكي في بوزمان بولاية مونتانا وسُمِّيَ هذا الهيكل بالعيِّنة MOR 1255. اضطُرَّ الفريق إلى قطعِ عظم الفخذ إلى جُزأَين لكي يُمكن رفعُه إلى المروحية، وتهشَّمَت جراءَ ذلك قطعةٌ من عظام الحفرية. أعطى جاك هورنر بعضًا من هذه الشظايا إلى زميلته عالمةِ الحفريات الدكتورة ماري شوايتسر الباحثةِ بجامعة ولاية نورث كارولينا؛ لِعلمه باهتمامها بالتكوين الكيميائيِّ للحفريات.

فوجئت شوايتسر حين فتَحَت الصندوق. فقد بدا أنَّ أول شظية نظرَت إليها تحتوي على نسيجٍ ذي مظهرٍ غريب للغاية في الجانب الداخلي من العظم (أي: تجويف نخاع العظام). وضعَت قطعةَ العظام في حمَّامٍ حِمضي كي تتحلَّل الطبقةُ الخارجية ذاتُ المعادن الحجرية لتكشفَ عن بِنَاها الأعمق. غير أنها في هذه المرة تركَت قطعةَ الحفرية في الحمام مدةً طويلة للغاية من دونِ قصد، وحين عادَت وجدَت أنَّ «جميع» المعادن قد تحلَّلَت. توقَّعَت شوايتسر أن تجد قطعةَ العظام قد تحلَّلَت بالكامل، لكنها ذُهِلت هي وزملاؤها حين اكتشَفوا أنَّ مادةً ليفيَّة مرِنة بقِيَت ولم تتحلَّل وقد بدا تحت المجهر أنها تُشبه نوعَ الأنسجة الرِّخوة الموجود في العظام الحديثة. وعلى غِرار العظام الحديثة أيضًا، اتَّضح أنَّ هذا النسيجَ مليءٌ بالأوعية الدموية وخلايا الدم وسلاسلَ طويلةٍ من ألياف الكولاجين، وهو الغِراء الأحيائي الذي حافَظ على تماسُك جسم الحيوان الضخم حينما كان حيًّا.

صحيحٌ أنَّ الحفريات التي تحتفظ ببِنْية أنسجتها الرِّخوة نادرة، لكنها موجودةٌ بالفعل. فحفريات بورجيس شيل، التي اكتُشِفَت بأعالي جبال روكي في مُقاطَعة بريتيش كولومبيا بكندا في الآونةِ من ١٩١٠ إلى ١٩٢٥، تحتفظ على نحوٍ مذهل بآثارٍ تفصيلية للُحوم الحيوانات التي سبَحَت في بحار العصر الكمبري قبل ما يقرب من سِتِّمائة مليون سنة، وينطبق الأمرُ نفسُه على حفريةِ طائر الأركيوبتركس الذي عُثر عليه في محجر سولنهوفن بألمانيا، وكان يعيش منذ ما يقرب من مائةٍ وخمسين مليون سنة. أما

الحفريات التقليدية ذاتُ الأنسجة الرخوة فلا تحفظ إلا «آثار» النسيج الحيوي، لا «مادته» الأساسية، ورغم ذلك، اتضح أنَّ المادة الرِّخوة التي لم تتحلَّل في الحمَّام الحمضي لدى ماري شوايتسر، هي ذاتها النسيج الرِّخو للديناصور. وفي عام ٢٠٠٧، نشرَت شوايتسر نتائجَ بحثها في مجلةِ «ساينس»،[2] وقد قوبل البحثُ في البداية بقدرٍ كبير من التشكُّك والدهشة. وعلى الرغم من أن بقاء الجزيئات الحيوية على قيدِ الحياة ملايينَ السنين أمرٌ مُذهل حقًّا، فإنَّ تركيزنا ينصبُّ على ما حدث بعد ذلك في هذه القصة. فلكي تُثبت شوايتسر أنَّ البِنَى الليفيةَ تتألَّف من الكولاجين بالفعل، أثبتَت أولًا أنَّ البروتين الذي يلتصقُ بالكولاجين في الكائنات الحديثة هو أيضًا ما التصَق بالألياف الموجودة في عظمتها العتيقة. ولاختبارِ فرضيَّتها مرةً أخيرة، مزَجَت نسيج الديناصور بإنزيمٍ يُسمى «الكولاجيناز»، وهو أحد الآلات الجزيئية البيولوجية العديدة التي تُكوِّن الأليافَ في أجساد الحيوانات وتُفكِّكها. وفي غضونِ دقائق، تَسبب هذا الإنزيم في تفكُّك سلاسل الكولاجين التي ظلَّت متماسكةً مدة ثمانيةِ وستين مليون سنة.

الإنزيمات هي محركاتُ الحياة. ولعلَّنا نعرف الإنزيمات التي تُستخدَم على نحوٍ معتاد في حياتنا اليومية، مثل إنزيم البروتياز الذي يُضاف إلى المنظِّفات «البيولوجية»، ويُساعد في إزالة البقع، أو إنزيم البكتين الذي يُضاف إلى المربَّى كي يُعطيَها القوام المُتماسك، أو إنزيم المنفحة الذي يُضاف إلى الحليب ليساعد في تَخثُّره ليُصبح جُبنًا. ربما نُدرك أيضًا ما تؤدِّيه الإنزيماتُ المختلفة الموجودة في المعدة والأمعاء من دورٍ في هضم الطعام. وليست هذه سوى أمثلةٍ بسيطة للغاية على ما تقوم به الآلاتُ النانَوية للطبيعة. إنَّ أشكال الحياة جميعها تعتمد — أو اعتمَدَت — على الإنزيمات، بدايةً من الميكروبات الأولى التي نضحَت من الحساء البدائي، وحتى الديناصورات التي دبَّت بأقدامها على غابات العصر الجوراسي، وحتى كل كائنٍ حي في عصرنا الحالي. فكل خليةٍ في جسمك ممتلئةٌ بالمئات أو حتى الآلاف من تلك الآلات الجزيئية التي تساعد في استمرارِ عملية تجميع الجزيئات الحيوية وإعادة تدويرها، وهي العملية التي نُطلق عليها الحياة.

في هذا المقام، يُعَد مصطلحُ «المساعدة» هو الكلمةَ الأساسية التي تُحدد وظيفة الإنزيمات؛ فوظيفتها هي تسريع (تحفيز) كافةِ أنواع التفاعلات الكيميائية الحيوية التي كانت ستحدثُ ببطءٍ شديد لولا الإنزيمات. معنى هذا أنَّ إنزيمات البروتياز التي تُضاف إلى المنظفات البيولوجية تُسرع من تكسير البروتينات الموجودة في البقع، وتُسرع إنزيمات البكتين من تكسير السكريدات المتعددة في الفاكهة، بينما تُسرع إنزيمات المنفحة من

تخثُّر الحليب. وبالمثل، تُسرع الإنزيمات الموجودة في خلايا جسمنا من عملية «الأَيْض»، وهي عمليةٌ لا تتوقَّف فيها تريليونات الجزيئات الحيوية داخل الخلايا عن التحوُّل إلى تريليونات الجزيئات الحيوية الأخرى؛ لكي نبقى على قيد الحياة.

ليس إنزيم الكولاجيناز الذي أضافته ماري شوايتسر إلى عظام الديناصور سوى إحدى الآلات الحيوية، ووظيفته المعتادة هي تَحلُّل ألياف الكولاجين في أجسام الحيوانات. يُمكن التوصُّل إلى قيمةٍ تقديرية لمعدَّل السرعة الذي توفِّرُه هذه الإنزيماتُ من خلال المقارنة بين الوقت المُستغرَق لتحلُّلِ ألياف الكولاجين في حالةِ عدم وجودها (ومن الواضح أنه أكثرُ من ثمانيةٍ وستِّين مليونَ سنة) والوقت المُستغرق عند توفُّر الإنزيم المناسب (نحو ثلاثين دقيقة)؛ أي: تريليون ضعف المُدة.

في هذا الفصل، سنستعرض الكيفية التي تُمكِّن إنزيماتٍ مثل الكولاجيناز من تحقيق تلك السرعة الفلَكية في التفاعلات الكيميائية. ومن الاكتشافات المذهلة في المدةِ الأخيرة أن ميكانيكا الكمِّ تؤدي دَورًا في عملِ بعض الإنزيمات على الأقل؛ ونظرًا إلى دور الإنزيمات المركزيِّ في الحياة، فستَكون أولَ ميناء نحطُّ عليه في رحلتنا عبر علم الأحياء الكمي.

## الإنزيمات: الشيء المُميِّز بين الأحياء والأموات

استُخدِمَت الإنزيمات قبل اكتشافها وتحديد سِماتها بآلاف السنين. فمنذ عدة آلافٍ من السنين، كان أسلافُنا يُحولون عصير العنب أو القمح إلى نبيذٍ أو جِعَةٍ بإضافة الخميرة، وهي في الأساس عبارةٌ عن حقيبةٍ ميكروبية من الإنزيمات.[1] أدرَكوا أيضًا أنَّ مُستخلصاتٍ من بطانة المعدة لدى العجول (المنفحة) تُسرع من عملية تحويل الحليب إلى جُبن. وعلى مدارِ قرونٍ عديدة، ساد اعتقادٌ بأن خصائص التحويل تلك تنبع عن قُوًى حيويةٍ مرتبطةٍ بالكائنات الحية؛ إذ تهَبُها الحيوية وسرعة التغيير، وهما ما يُميزان الأحياءَ عن الأموات.

في عام ١٧٥٢، ومُستلهِمًا من الفلسفة الميكانيكية لرينيه ديكارت، شرَع العالم الفَرنسي رينيه أنطوان فيرشو دي ريومور في دراسة أحد الأنشطة الحيوية، وهو الهضم، من خلال إجراء تجرِبة بارعة. كان الاعتقادُ الشائع حينذاك أنَّ الحيوانات تهضم طعامَها عن طريق عمليةٍ ميكانيكية ناتجة تتمثَّل في السَّحْق والخضِّ داخل جهازها الهضمي. بدَتْ تلك النظريةُ وثيقةَ الصلة بالطيور على وجه التحديد؛ لأن حَواصلها تحتوي على حصَواتٍ صغيرة كان يُعتقد أنها تهضم طعامها، وهي عمليةٌ ميكانيكية تتَّسق مع وجهة

نظر رينيه ديكارت (المذكورة في الفصل السابق) بأنَّ الحيوانات آلاتٌ فحسب. غير أنَّ هضم الطيور الجارحة لطعامها رغم أنَّ الحصوات الهضمية لا توجد في حَواصلها كان من الأمور التي أثارت حيرةَ دي ريومور. ولهذا، أطعم صقْرَه قِطعًا صغيرة من اللحم المغلَّف في كبسولاتٍ معدنية صغيرة بها ثقوبٌ صغيرة. وعندما استرجع الكبسولاتِ من حوصلة الطائر، اكتشف أن اللحم قد هُضم تمامًا على الرغم من أنه من المحال أنه خضَع لأيِّ عملية ميكانيكية؛ نظرًا إلى أنه مغلَّف داخل كبسولات معدنية. بدا جليًّا أنَّ التروس والرافعات والمطاحن التي قال عنها ديكارت، لا تكفي لتفسيرِ قوةٍ واحدة على الأقل من القُوى الحيويَّة في الحياة.

وبعد قرنٍ من تجرِبة دي ريومور، درَس فرنسيٌّ آخر وهو الكيميائي ومؤسس علم الأحياء الدقيقة لوي باستور عمليةَ تحوُّلٍ بيولوجي أخرى تُعزى إلى «القُوى الحيوية»، وهي تحوُّل عصير العنب إلى نبيذ. أثبَت باستور أنَّ مبدأ التحويل في التخمير يبدو وثيقَ الصلة بالخلايا الحية للخميرة التي تُوجَد في «الخمائر» المستخدَمة في صناعة الجِعَة أو في الخميرة التي تُستخدَم لعمل الخبز. وبناءً على هذا، ظهَر مصطلح «إنزيم» (معناه باليونانية: «في الخميرة») الذي صاغه عالمُ وظائفِ الأعضاء فيلهلم فريدريش كونيه عامَ ١٨٧٧ لوصفِ العناصر الفاعلة في هذه «الأنشطة الحيوية»، مثل تلك التي تقوم بها خلايا الخميرة الحية، أو في واقع الأمر أي عمليات تحويل تُحفزها موادُّ مستخلَصةٌ من الأنسجة الحية.

فما هي الإنزيمات وكيف تُسرع عمليات التحويل في الحياة؟ لِنَعُد إلى الإنزيم الذي افتتَحْنا به القصةَ في هذا الفصل وهو الكولاجيناز.

## لماذا نحتاج إلى الإنزيمات وكيف تفقد الشراغف ذيولها؟

الكولاجين هو البروتينُ الأكثر وفرةً في الحيوانات (بما في ذلك الإنسان). وهو بمنزلة خيطٍ جُزيئي محبوك داخل الأنسجة وفيما بينها؛ للحفاظ على اللَّحم متماسكًا. وعلى غِرار البروتينات جميعها، يتألَّف الكولاجين من لَبِناتِ بناءٍ كيميائية أساسية: وهي سلاسلُ من «الأحماض الأمينية» يُوجَد منها ما يقرب من عشرين نوعًا، وربما تُعرَف بعضها (مثل الجلايسين، والجلوتامين، واللايسين، والسيستين، والتيروسين) في شكلِ مُكمِّلات غذائية تُباع في متاجرِ الأغذية الصحية. يتكوَّن كلُّ جُزيءٍ من جزيئات الحمض الأميني من ذرَّات يتراوح عددُها من العشَرة إلى الخمسين ذرةً من الكربون والنيتروجين والأكسجين

والهيدروجين، والكبريت أيضًا في بعض الأحيان، وتتماسكُ تلك الذرَّات معًا بفعلِ روابطَ كيميائيةٍ بشكلها الثلاثيِّ الأبعاد المُميِّز لها على نحوٍ فريد.

بعد ذلك، تصطفُّ عدةُ مئات من هذه الأشكال الجزيئية الملتوية من الأحماض الأمينية، وتُكوِّن أحدَ البروتينات، وكأنها حبَّاتُ خرزٍ غريبة الشكل قد تراصَّت في سلسلة. ترتبط كلُّ حبةٍ من حبات هذا الخرَز بالتي تليها عن طريقِ «رابطةٍ ببتيديَّة» تربط ذرةَ كربونٍ في حمضٍ أميني بذرَّة نيتروجين في الحمض الأميني التالي. وهذه الروابطُ الببتيدية قويةٌ للغاية؛ فهي ما حافَظ على تماسُك أليافِ الكولاجين في حفريَّة التيرانوصور ريكس طيلةَ ثمانيةٍ وستين مليون سنة.

يمتاز بروتين الكولاجين على وجه التحديد بدرجةٍ كبيرة من القوة، وهو أمرٌ بالغ الأهمية؛ لدورِه في الحفاظ على شكلِ أنسجتنا وبِنْيتِها باعتباره بطانةً داخليةً لها. تتضافرُ البروتينات معًا في جدائلَ ثلاثيةٍ تتضافرُ بدورها معًا، فتُشكِّل حِبالًا سميكة هي «الألياف». تمتدُّ هذه الألياف عبر الأنسجة لِتَخيط خلايانا معًا، وهي تُوجَد أيضًا في الأوتار التي تربط العضلات بالعِظام، وفي الأربطة التي تربط العظامَ بعضَها ببعض. يُطلَق على تلك الشبَكة الكثيفة من الألياف «المصفوفة خارج الخلية»، وتتمثَّل وظيفتُها الأساسية في الحفاظ على تماسُك الجسم.

إنَّ أيَّ شخصٍ غيرِ نباتي يعرف بالفعل المصفوفةَ خارج الخلية في شكلِ الغضروف القويِّ الألياف الذي قد يجده في قطعةِ سجق عَسِرة الهضم، أو في أحدِ أنواع اللحوم الأرخص ثمنًا. سيُدرك الطُّهاة أيضًا ما تتَّسم به هذه المادة المليئة بالأوتار من عدمِ قابليةٍ للذوبان؛ ولهذا لا تلين في الطهي حتى بعد ساعاتٍ من غَلْيها في حساء. ورغم أنَّ المصفوفة خارج الخلية ربما لا تكون مُفضَّلة على طبق العشاء، فإنَّ وجودها في أجسام الأكَلة أمرٌ بالغ الأهمية. فمن دون الكولاجين، تتفكَّك عِظامنا وتسقط العضلاتُ عن العظام وتتحوَّل الأعضاء الداخلية إلى مادةٍ هُلامية.

بالرغم من ذلك، فليست أليافُ الكولاجين الموجودةِ في العظام أو العضلات أو الطعام بالمنيعة على أي حال. ذلك أنَّ غَلْيها في موادَّ قلويةٍ أو أحماض قوية سيُفتِّت الروابط الببتيدية الموجودة بين حبَّات الأحماض الأمينية في نهاية المطاف، وسيُحول تلك الألياف القوية إلى جيلاتين قابلٍ للذوَبان، وهو تلك المادة الهلامية التي تُستخدم في عمل المارشملُّو والجيلي. ربما يتذكر مُحبو الأفلام شخصيةَ رجلِ المارشملو ستاي بوفت في فيلم «صائدو الأشباح» (جوست باسترز) بأنه تلك الكتلةُ العملاقة من اللحم الأبيض المتأرجِح التي

أرهبَت نيويورك. غيرَ أنَّ رجل المارشملو كان يُهزَم بسهولة بتسييله في كريم مارشملو مُذاب. إنَّ الروابط الببتيدية بين حبَّات الحمض الأميني لألياف الكولاجين هي ما يُفرِّق بين رجل المارشملو والتيرانوصور ريكس. فأليافُ الكولاجين المتينة هي ما يمنح القوةَ للحيوانات الحقيقية.

ثمة مشكلةٌ رغم ذلك تنتج عن تدعيم جسم حيوانٍ ما بموادَّ قويةٍ ومتينة مثل الكولاجين. فكِّر فيما يحدُث عندما تتعرض لِجُرح أو كدمةٍ أو حتى كسرٍ في ذراعٍ أو ساق، حينها تتلفُ الأنسجة، ومن المحتمل أيضًا أن تتضرَّر المصفوفة خارج الخلية، تلك الشبكة الداخلية ذاتُ الألياف القوية، أو تتقطَّع. إذا تضرَّر منزلٌ بسبب عاصفة أو زلزال، فينبغي إزالةُ البِنَى المكسورة قبل الشروع في أعمال الإصلاح. وبالمثل أيضًا، تَستخدم أجسامُ الحيوانات إنزيمَ الكولاجيناز للتخلُّص ممَّا تضرَّر في المصفوفة خارج الخلية؛ كي يُمكن إصلاحُ النسيج من خلال مجموعةٍ أخرى من الإنزيمات.

والأهم من ذلك أنه ينبغي إعادةُ تشكيل المصفوفة خارج الخلية على الدوام بما يتلاءم مع نموِّ الحيوان؛ لأن البِنْية الداخلية التي دعمَت جسم الحيوان في مرحلة الطفولة لن تتمكَّن من دعم جسده البالغ الكبير. تُمثل هذه المشكلة خطورةً كبيرة في البرِّمائيات على وجه الخصوص؛ لأن تكوينها في مرحلةِ البلوغ مختلفٌ تمامًا عن تكوينها في مرحلة الطفولة؛ ولهذا فإنَّ حلَّها يُمِدُّنا بالكثير جدًّا من المعلومات. نجد المثال الأشهر على هذا في التحول البرمائي: تحوُّل الضِّفدع من بيضةٍ كروية إلى شرغوف يتلوَّى، ثم إلى ضفدع يقفز في مرحلة البلوغ. عُثر على حفرياتٍ لهذه البرمائيات البَتْراء الذيل ذاتِ الجسم القصير والأطراف الخلفية البالغةِ القوة في الصخور الجوراسية، التي يعود تاريخُها إلى منتصف حقبة الحياة الوُسطى منذ ٢٠٠ مليون سنة، التي تُعرف باسم عصر الزواحف. لكنها تُوجَد أيضًا في صخور العصر الطباشيري. لذا يبدو من المُحتمل أنَّ الضفادع سبَحَت عبر نهر مونتانا نفسِه الذي لقي فيه الديناصور MOR 1255 حتْفَه. لكن على خلاف الديناصورات، تمكَّنَت الضفادعُ من النجاة من الانقراض الجماعي الذي حدَث في العصر الطباشيري، وظلَّت منتشرةً في بِرَك العصر الحاليِّ وأنهاره ومستنقَعاته؛ مما أتاح الفرصةَ لطلَّاب المدارس والعلماء أن يدرسوا كيفيةَ تحوُّل الجسد من شكلٍ إلى شكل.

إنَّ عملية تحول الشرغوف إلى ضفدعٍ تتضمَّن مقدارًا كبيرًا من التفكيك وإعادة التشكيل، ومن ذلك تفكيكُ الذَّيل الذي يُمتَصُّ داخل الجسم تدريجيًّا ويُستَخدَم لحمُه من

جديدٍ في تشكيل الأطراف الجديدة للضفدع. كلُّ ذلك يستلزم السرعة في تفكيك المصفوفة خارج الخلية المكوَّنة من الكولاجين، قبل أن يُعاد تجميعها في صورة الأطراف التي ستتشكَّل. لكن تذكَّرْ تلك الثمانيةَ والستين مليونَ سنةٍ تحت صخور مونتانا؛ فألياف الكولاجين لا تتحلَّل بسهولة. وبناءً على هذا، فقد كان التحوُّل البرمائي سيستغرق زمنًا طويلًا للغاية إذا اعتمَد على التحلُّل الكيميائي للكولاجين عن طريق عملياتٍ غير عُضوية فقط. لا يستطيع الحيوان بالطبع أن يَغْليَ أوتارَه القوية في حمض ساخن؛ ولهذا يحتاج إلى وسيلةٍ أخفَّ تؤدي إلى تحلُّل ألياف الكولاجين.

وهنا يأتي دور إنزيم الكولاجيناز.

لكن ما آليةُ عمل ذلك الإنزيم هو وغيره من الإنزيمات؟ ظلَّ الاعتقاد المشتقُّ من المذهب الحيوي، بأنَّ نشاط الإنزيمات يحدث من خلال نوعٍ من القُوى الحيوية الغامضة، قائمًا حتى أواخِر القرن التاسع عشر. وفي ذلك الوقت، أوضح أحدُ زملاء كونيه، وهو عالم الكيمياء إدوارد بوخنر، أن المُستخلصاتِ غيرَ الحية من خلايا الخميرة يمكن أن تُحفز التحولاتِ الكيميائيةَ نفسَها التي تُحدِثُها الخلايا الحية. بعد ذلك، طرح بوخنر اقتراحَه الثوريَّ بأن تلك «القوة الحيوية» ليست سوى شكلٍ من أشكال «التحفيز» الكيميائي.

المحفزاتُ موادُّ تُسرع التفاعلاتِ الكيميائيةَ العادية، وقد عرَفها علماء الكيمياء في القرن التاسع عشر. واقع الأمر أنَّ العديد من العمليات الكيميائية التي أدَّت إلى الثورة الصناعية؛ اعتمدَت على المحفزات الكيميائية اعتمادًا جوهريًّا. فعلى سبيل المثال، كان حمض الكبريتيك مادةً كيميائية أساسية أشعَلَت الثورتَين الصناعية والزراعية؛ إذ يُستخدم في صناعة الحديد والفولاذ، وفي صناعة النسيج، وفي صناعة سماد الفوسفات. ويَنتج هذا الحمض عن تفاعلٍ كيميائي يبدأ بثاني أكسيد الكبريت ($SO_2$) والأكسجين (اللذَين يُمثلان الموادَّ المتفاعلة)، وتتفاعل المادتان كِلتاهما مع الماء لتكوين المادة الناتجة وهي حمض الكبريتيك ($H_2SO_4$). غير أنَّ هذا التفاعل بطيءٌ للغاية؛ ولذا تعذَّر استخدامه تِجاريًّا في البداية. غير أنه في عام ١٨٣١، اكتشف بيريجرين فيليبس — وهو أحدُ مُصنِّعي الخلِّ في بريستول بإنجلترا — طريقةً لتسريع التفاعل بتمرير ثاني أكسيد الكبريت والأكسجين فوق البلاتين الساخن الذي كان بمنزلة «مادة محفِّزة». ويجدُر بنا الإشارةُ إلى أنَّ الموادَّ المحفزة تختلف عن الموادِّ المتفاعلة (وهي المواد الأولية التي تُشارك في التفاعل)؛ فالموادُّ المحفزة تُساعد على تسريع التفاعل من دون أن تُشارك فيه أو تتغيَّر بسببه. وبناءً على

هذا، اقترح بوخنر أنَّ الإنزيمات لا تختلف من حيث المبدأُ عن نوع المُحفز غيرِ العضوي الذي اكتشفه فيليبس.

أدَّت الأبحاثُ الكيميائية التي أُجريَت على مدارِ عُقود إلى تأكيدِ رؤية بوخنر. وكان إنزيم المنفحة الذي يُستخرج من مَعِدة العُجول هو أولَ ما يُنقَّى من الإنزيمات. لقد خزن المِصريُّون القدماءُ الحليبَ في حقائبَ مصنوعةٍ من بطانة معدة العجول، وهم على الأرجح أولُ مَن اكتشفوا أنَّ تلك المادة الغريبة تُسرع من تحويل الحليب إلى جُبن يُحفظ بنحوٍ أفضل. استمرَّت تلك الممارسة حتى نهاية القرن التاسعَ عشر. حينذاك، كانت مَعِدات العجول نفسها تُجفَّف وتُباع في الصيدليات بوصفها «منفحة». وفي عام ١٨٧٤، كان الكيميائي الدانماركي كريستيان هانسن في مقابلةٍ للعمل بإحدى الصيدليات عندما سمع مصادفةً عن وصولِ طلَبيةٍ من المنافح، ولما استفسَر عن ماهيَّتها توصَّل إلى فكرةٍ يَستخدم فيها مهاراته الكيميائيةَ لتقديم مصدرٍ للمنفحة تقلُّ فيه الرائحةُ الكريهة. عاد إلى مُختبره حيث طوَّر طريقةً لتحويل السائل ذي الرائحة الكريهة الناتجِ عن عملية إماهةِ معدة العجل إلى مسحوقٍ جاف، وقد كوَّن ثروتَه من التسويق للمنتج الذي بِيع على مستوى العالم باسم مُستخلص المنفحة الخاص بدكتور هانسن.

تُعَد المنفحة في الواقع مَزيجًا من عدةِ إنزيمات مختلفة، وأنشطُ إنزيمٍ فيها لأغراض عمل الجبن هو الكيموسين، وهو نفسُه ينتمي إلى عائلةٍ ضخمة من الإنزيمات تُسمى البروتياز تُسرِّع انشقاق البروتينات. تتمثَّل وظيفةُ هذا الإنزيم في صناعة الجبن في أنه يؤدي إلى تَخثُّر الحليب؛ ومِن ثمَّ ينفصل إلى الحليب الرائب ومَصْل الحليب، أما وظيفته الطبيعية في جسد العجل فهي تخثير الحليب الذي يرضعه حتى يبقى مدةً أطولَ في القناة الهضميَّة؛ مما يسمح بأن تطول مدةُ امتصاصه. الكولاجيناز أيضًا إنزيمٌ آخَر من عائلة البروتياز، لكن طرق تنقيته لم تتطوَّر إلا بعد ذلك بخمسين عامًا في خمسينيَّات القرن العشرين، حين انشغل عقلُ جيروم جروس، العالم السريري في كلية الطب بجامعة هارفارد ببوسطن، بكيفيةِ امتصاص الشراغف لذيولها حتى تتحولَ إلى ضفادع.

كان جروس مُهتمًّا بدور ألياف الكولاجين؛ باعتبارها مثالًا على التجمُّع الجزيئي الذاتي، الذي اعتقد أنه «ينطوي على سرٍّ كبير من أسرار الحياة».[3] ولهذا قرَّر العمل على ذيلِ شرغوف ضفدع أمريكي كبير، وهو ذيلٌ كبير قد يبلغ طولُه عدةَ بوصات. أصاب جروس في تخمينه أن عمليةَ امتصاص الذيل يجب أن تتضمَّن مراتٍ كثيرةً من تجمع ألياف الكولاجين لدى الحيوان وتفكُّكِها. وللكشف عن نشاط الكولاجيناز، طوَّر اختبارًا

بسيطًا يتمثل في مَلء طبق بتري بطبقةٍ من هُلام الكولاجين اللَّبَنيِّ الشكل الملوءِ بألياف الكولاجين القوية والمتينة. وعندما وضَع شرائحَ من ذيل الشرغوف على سطح الهلام، لاحظ منطقةً تُحيط بذلك النسيج تتفتَّت فيها تلك الأليافُ القوية، وتحوَّلَت إلى جيلاتين قابلٍ للذوبان. عمل بعد ذلك على تنقية المادة الهاضمة للكولاجين ووجد أنها إنزيم الكولاجيناز.

يوجد الكولاجيناز في أنسجة الضفادع وغيرها من الحيوانات، ومنها الديناصور الذي وُجِدَت عظامه في هيل كريك. واليوم، يؤدي الإنزيمُ الوظيفةَ نفسَها التي كان يؤديها منذ ثمانية وستين مليون سنة، ألا وهي تَحلُّل ألياف الكولاجين، لكن الإنزيم قد تعطَّل حين مات الحيوان وسقط في المستنقع؛ ولذا ظلَّت أليافُ الكولاجين على حالها، إلى أن أضافت ماري شوايتسر قدرًا من الكولاجيناز النشِط إلى شظايا العظام.

ليس الكولاجيناز سوى إنزيم واحد من ملايين الإنزيمات التي تعتمد عليها الحيواناتُ والميكروبات والنباتات في إجراء الغالبية العظمى من الأنشطة الضرورية للحياة. فثمَّة إنزيماتٌ تُخلِّق أليافَ الكولاجين من المصفوفة خارج الخلية، وتُوجَد إنزيماتٌ أخرى تصنع الجزيئات الحيوية مثل البروتينات والحمض النووي والدهون والكربوهيدرات، بينما تُوجَد مجموعةٌ مختلفة تمامًا تُفتِّت تلك الجزيئات الحيوية وتُعيد تدويرها. فالإنزيمات مسئولة عن الهضم والتنفُّس وعملية البناء الضوئي وعملية الأيض. إنها مسئولة عن تكويننا جميعًا، وهي تُبقينا على قيد الحياة. وهي تُعَد محركات الحياة.

لكن هل يقتصر دور الإنزيمات على كونِها محفزاتٍ بيولوجيةً توفر نوعَ التفاعل الكيميائيِّ نفسِه المستخدَم لعمل حمض الكبريتيك وعشرات المواد الكيميائية الاصطناعية الأخرى؟ منذ عدةِ عقود، كان معظمُ علماء الأحياء سيتَّفقون مع رأي بوخنر القائلِ بأنَّ كيمياء الحياة لا تختلف عن نوع العمليات التي تحدُث داخل مصنعٍ للموادِّ الكيميائية أو حتى في عدة التجارِب الكيميائية للأطفال. غير أنَّ هذا الرأي قد تغيَّر جذريًّا في العَقدَين الأخيرين بعد أن قدَّم عددٌ من التجارِب المهمة أفكارًا جديدةً جديرةً بالاهتمام، بشأن آليةِ عمل الإنزيمات. يبدو أنَّ عمل محفزات الحياة لا يقتصر على مستوى الكيمياء الكلاسيكية المعتادة، بل هي قادرة على الوصول إلى مستوًى أعمقَ من الواقع، واستخدامِ بعض الخدع الكمية الحاذقة.

بالرغم من ذلك، فلِكي نفهم أهميةَ ميكانيكا الكم في تفسيرِ لغز الحياة؛ يجب علينا أولًا أن ندرس طريقةَ عمل المحفزات الصناعية المعتادة.

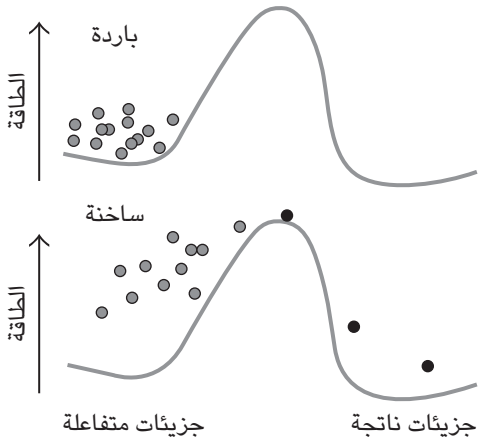
## تغيُّر المشهد

تعمل المحفِّزات من خلال عدةِ آليات مختلِفة، لكننا نستطيع فَهْم معظمها عن طريق فكرةٍ تُسمى «نظرية الحالة الانتقالية»؛[4] إذ تُقدم شرحًا مبسطًا لآلية المحفزات في تسريع التفاعلات. ولفهم نظرية الحالة الانتقالية؛ ربما سيُفيدنا أن ننظر إلى المسألة من زاويةٍ مختلفة، ونفكر أولًا في «سبب» الحاجة إلى المحفزات لتسريع التفاعلات. والإجابة هي أن معظم الموادِّ الكيميائية المعروفة في بيئتنا مستقرةٌ وغير تفاعلية. فهي لا تتحلَّل تلقائيًّا ولا تتفاعل بسهولة مع المواد الكيميائية الأخرى؛ الحقُّ أنها إذا كانت تتَّسم بأيٍّ من هاتَين السمَتَين، لَما صارت شائعةً الآن.

يرجع السبب في استقرار المواد الكيميائية الشائعة إلى أنَّ روابطها لا تتفكَّك في كثيرٍ من الأحيان؛ نتيجةً للاضطراب الحتمي بين الجزيئات، الذي لا يتوقَّف داخل المادة. يُمكننا تقريبُ الصورة بتخيُّلِ أنَّ الجزيئات المتفاعلة تحتاج إلى اجتيازِ مشهدٍ ما بالصعود إلى قمة التل الذي يحول دون تحوُّلِها إلى جزيئاتٍ ناتجة (انظر الشكل ٣-١). وغالبًا ما تحصل على الطاقة اللازمة لصعود «التل» من خلال الحرارة التي تَزيد سرعةَ الذرات والجزيئات مما يدفعها إلى الحركة أو الاهتزاز بسرعةٍ أكبر. وقد يؤدي هذا التدافعُ والتصادم بين الجزيئات إلى تفكيك الروابط التي تُمسك ذرات الجزيئات معًا، وتُتيح لها أيضًا تكوينَ روابطَ جديدة. غير أنَّ ذرات الجزيئات المستقرَّة، وهي الأكثرُ شيوعًا في بيئتنا، تلتحم معًا بفعل روابطَ قويةٍ بما يكفي لمقاومةِ ما يُحيط بها من اضطرابٍ جزيئي. ولهذا فإنَّ الموادَّ الكيميائية التي نجدها من حولنا شائعةٌ لأن جزيئاتها مستقرَّة[٣] بوجهٍ عام، رغم ما يحدُث في بيئتها من تدافُعٍ قويٍّ بين الجزيئات.

بالرغم من ذلك، فحتى الجزيئات المستقرَّة يمكن أن تتفكَّك روابطُها إذا توفَّر لديها القدرُ الكافي من الطاقة. ومن المصادر المحتملة للطاقة توفر قدرٌ أكبر من السخونة التي تُسرع من حركةِ الجزيئات. فتسخينُ مادةٍ كيميائية سيؤدي إلى تفكيك روابطها في نهاية المطاف. وهذا هو السبب في أننا نطهو الكثيرَ من مأكولاتنا؛ فالحرارة تُسرع التفاعلات الكيميائية المسئولة عن تحويل المكونات النِّيئة — المواد المتفاعلة — إلى موادَّ ناتجةٍ ألذَّ.

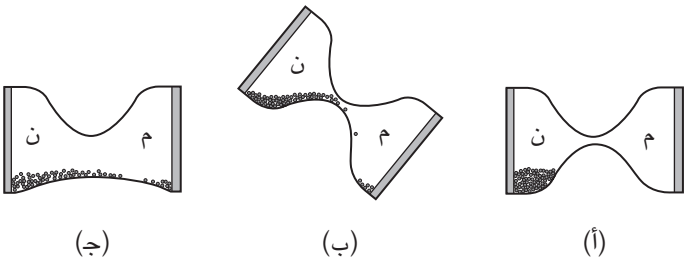
يُمكننا رسمُ صورة واضحة للكيفية التي تعمل بها الحرارة لتسريع التفاعلات الكيميائية؛ من خلال تخيُّلِ أن الجزيئات المتفاعلة حباتُ رمالٍ في الحجرة اليسرى من




شكل ٣-١: يُمكن تحويلُ الجزيئات المتفاعلة — الممثَّلة بالنقاط الرمادية — إلى جزيئاتٍ ناتجة — الممثَّلة بالنقاط السوداء — بشرط أن تتسلَّق تلَّ الطاقة أولًا. ونادرًا ما تمتلك الجزيئات الباردة الطاقة الكافية للصعود، بينما يسهل على الجزيئات الساخنة صعود القمة.

ساعةٍ رملية موضوعةٍ على جنبها (انظر الشكل ٣-٢أ). إذا تُرِكَت حبات الرمال وشأنَها، فستظلُّ في مكانها إلى الأبد لأنها لا تمتلكُ الطاقة الكافية كي تصلَ إلى عنق الساعة الرملية وتمرَّ إلى الحجرة اليُمنى التي تُمثل المواد النهائية الناتجة عن التفاعل. يمكن إمدادُ الجزيئات المتفاعلة في عملية كيميائية بقدرٍ أكبر من الطاقة من خلال تسخينها؛ مما سيؤدي إلى زيادةِ سرعة حركتها واهتزازها، ومن ثمَّ يتوفَّر لبعض الجزيئات طاقةٌ تكفي لأن تتحولَ إلى موادَّ ناتجة. يمكننا تصويرُ تلك العملية على أننا سنهزُّ الساعة الرملية هزةً قوية، بحيث تُقذف بعض حبات الرمال إلى الحجرة اليمنى وتتحولُ من موادَّ متفاعلة إلى موادَّ ناتجة (انظر الشكل ٣-٢ب).

لكن توجد طريقةٌ أخرى لتحويل الموادِّ المتفاعلة إلى موادَّ ناتجة؛ وذلك بخفض حاجز الطاقة الذي يجب أن تَعبُرَه. وهذا ما تفعله المحفِّزات. فالدور الذي تُؤديه يُكافئ توسيعَ عنق الساعة الرملية حتى يتدفق الرمل من الحجرة اليسرى إلى الحجرة اليمنى بأقلِّ قدرٍ من التحفيز الحراري (انظر الشكل ٣-٢ج). ونتيجةً لهذا تَزيد سرعة التفاعل كثيرًا

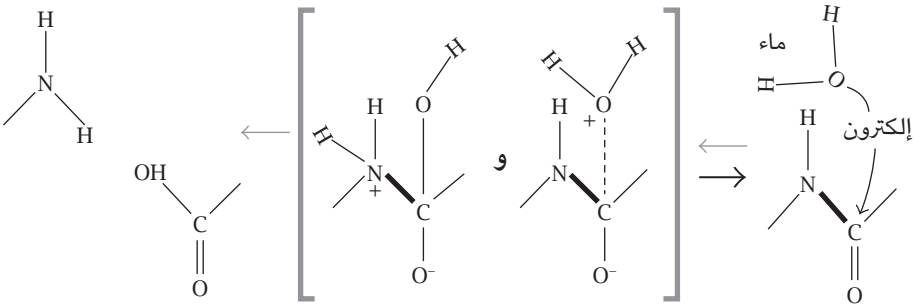



شكل ٣-٢: تغير مشهد الطاقة. (أ) يمكن أن تنتقل الجزيئات من حالة المادة المتفاعلة (م)، إلى حالة المادة الناتجة (ن)، لكن يجب أولًا أن تمتلك الطاقةَ الكافية لأن تجتازَ الحالة الانتقالية (عُنق الساعة الرملية). (ب) يؤدي قلب الساعة الرملي إلى وضع المادة المتفاعلة (الركيزة) في حالةٍ ذاتِ طاقة أعلى من طاقة المادة الناتجة؛ مما يجعلها تمر بسهولة. (جـ) تعمل الإنزيمات عن طريق استقرار الحالة الانتقالية؛ إذ تخفض مستوى الطاقة بفاعليَّة (عنق الساعة الرملية)؛ ممَّا يُتيح للركائز أن تتدفَّق إلى حالة المادة الناتجة بسهولة أكبر.

بفضل قدرة المُحفِّز على تغيير شكلِ مشهد الطاقة بطريقةٍ تُتيح للركائز[٤] أن تتحوَّل إلى موادَّ ناتجةٍ بسرعة أكبر مما يُمكنها في حالة غياب المحفز.

يُمكننا توضيحُ كيفية حدوث هذا على المستوى الجزيئي؛ بالنظر أولًا في التفاعل البطيء للغاية، المسئول عن تفكُّك جزيئات الكولاجين في غيابِ إنزيم الكولاجيناز[٥] (انظر الشكل ٣-٣). ربما تتذكَّر مما أوضحناه سابقًا أنَّ الكولاجين سلسلةٌ من الأحماض الأمينية التي يرتبط كلٌّ منها بما يليه من خلال «رابطةٍ ببتيدية» (موضَّحة في الشكل بخطٍّ سَميك) بين ذرةِ كربون وذرةِ نيتروجين. ليست الرابطةُ الببتيدية سوى نوعٍ واحدٍ ضمن أنواعٍ متعددة من الروابط التي تُحافظ على تماسُك الذرات داخل الجزيء. تتكون هذه الرابطةُ في الأساس من إلكترونَين مشتركَين بين ذرةِ نيتروجين وذرةِ كربون. يجذب الإلكترونان المشتركان السالبا الشحنةِ نَواتَي الذرَّتين الموجبَتَي الشحنة الموجودتَين على جانبَي الرابطة، فيُصبحان بمنزلةِ لاصقٍ إلكتروني يُمسك الذرَّتَين معًا في الرابطة الببتيدية.[٦]

تمتاز الروابط الببتيدية بدرجةِ استقرارٍ عالية؛ لأنَّ تفكيكها، بإجبار الإلكترونات المشتركة على الانفصال، يستلزم قدرًا كبيرًا من «طاقة تنشيط»؛ أي: إنَّ الرابطة عليها أن تتسلَّق تلَّ طاقةٍ شاهقًا قبل أن تصل إلى عُنق الساعة الرملية في التفاعل. وعمليًّا، لا تتفكَّك الرابطة في المعتاد من تلقاء نفسها، وتحتاج إلى مساعدةٍ من أحدِ جزيئات الماء




شكل ٣-٣: البروتينات مثل الكولاجين (أ) تتكون من سلاسل الأحماض الأمينية التي تتشكَّل من ذرَّاتِ كربون (C) ونيتروجين (N) وأكسجين (O) وهيدروجين (H) متصلةٍ بروابطَ ببتيدية. تُمثَّل إحدى هذه الروابط في الشكل بخطٍّ سميك. يمكن أن تتحلَّل الرابطة الببتيدية بجزيء الماء ($H_2O$)؛ لأنه يكسر الرابطةَ الببتيدية (جـ)، لكنها يجب أن تمرَّ أولًا بحالةٍ انتقالية غير مستقرَّة تتكون من بِنْيتَين مختلفتين على الأقل يجري التبادلُ فيما بينهما (ب).

المحيطة بها، في عمليةٍ تُسمى «التحلُّل المائي». ولكي تحدث هذه العملية؛ يجب أولًا أن يتحرك جزيءُ الماء على مسافةٍ قريبة من الرابطة الببتيدية تكفي لأن يمنح الجزيءُ أحدَ إلكتروناته إلى ذرةِ الكربون في الرابطة؛ مما يؤدِّي إلى تشكيلِ رابطة جديدة ضعيفة تُقيد جزيءَ الماء في مكانه، وهي الممثَّلةُ في الشكل ٣-٣ بالخطِّ المنقَّط. تُسمى تلك المرحلة المتوسطة بالحالة الانتقالية (ولهذا تُعرَف النظرية باسم «نظرية الحالة الانتقالية») وهي ذروةُ عدم الاستقرار في تلِّ الطاقة الذي يجب أن تتسلَّقه الرابطةُ كي تتفكَّك، ويُمثله عنقُ الساعة الرملية. نلاحظ من الشكل أن الإلكترون الذي منحه جزيءُ الماء قطَع المسافة حتى وصل إلى ذرة الأكسجين الملاصقةِ للرابطة الببتيدية، وقد صار الآن سالبَ الشحنة؛ إذ اكتسب إلكترونًا إضافيًّا. وفي هذه المرحلة الانتقالية، صارت الشحنةُ الكلية لجزيء الماء الذي منحَ الإلكترون موجبة.

عند هذه النقطة، يُصبح فهم العملية صعبًا بعضَ الشيء. فلنتخيَّلْ أنَّ الشحنة الموجبة في جزيء الماء ليست بسبب فقدانه لإلكترون، بل لأنه صار يحتوي على نواةِ هيدروجين

عارية؛ أي: بروتون يُمثله في الشكل الرمز +. لا يعود هذا البروتون موجبَ الشحنة ثابتًا بقوةٍ في مكانه داخلَ جزيء الماء، بل يُصبح «غير متمركِز» من منظور ميكانيكا الكمِّ كما أوضَحْنا في الفصل السابق. وعلى الرغم من أنه يبقى معظمَ الوقت مرتبطًا بجزيء الماء (التركيب الموضَّح على اليمين في الشكل ٣-٣ب)، فقد يبتعد عن جزيء الماء أحيانًا ويُصبح أقربَ من ذرة النيتروجين (التركيب الموضح على اليسار في وسط الشكل ٣-٣ب) حيث الطرَفُ الآخر من الرابطة الببتيدية. وفي هذا الموضع، يمكن للبروتون المتنقِل أن يطردَ أحد إلكترونات الرابطة الببتيدية من مكانه؛ ومِن ثمَّ يُفكِّك الرابطة.

غير أنَّ هذه العملية لن تحدث في المعتاد. ويعود السبب في هذا إلى أن الحالات الانتقالية — كتلك الموضَّحة في الشكل ٣-٣ب — قصيرةُ الأجل للغاية؛ فهي تتَّسم بدرجةٍ كبيرة من عدم الاستقرار حتى إنَّ أهون «هزة» قد تُزحزحها. فعلى سبيل المثال، يسهل استعادةُ الإلكترون السالبِ الشحنة الذي منَحه جزيءُ الماء؛ ومن ثمَّ يُعاد تشكيل المواد المتفاعلة الأولية (الموضَّحة بالسهم السميك في الشكل). واقع الأمر أنَّ احتمالية حدوث هذا السيناريو أكبرُ كثيرًا من احتمالية حدوث سيناريو التفاعل الذي يسير في الاتجاه الأمامي والذي تتفكَّك فيه الرابطة. ونتيجةً لهذا، لا تتفكَّك الروابط الببتيدية عادةً. الواقع أنَّ تفكُّك نصف الروابط الببتيدية في البروتينات الموجودة في مَحاليل محايدة؛ أي: ليست حمضية ولا قلوية، يستغرق أكثرَ من ٥٠٠ عام، وتُعرَّف تلك المرحلة الزمنية بأنها نصفُ عمر التفاعل.

كلُّ هذا يحدث بالطبع في حالة «غياب» الإنزيمات؛ فنحن لم نوضِّح بعدُ الآليةَ التي تساعد بها الإنزيمات في عملية التحلل المائي. ووَفقًا لنظرية الحالة الانتقالية، تُسرع المحفزات العمليات الكيميائية مثل تفكيك الرابطة الببتيدية برفع مستوى الاستقرارِ في المرحلة الانتقالية؛ ومِن ثمَّ تزيد فرصُ تشكيل الموادِّ الناتجة النهائية. تُوجَد عدةُ طرقٍ لرفع مستوى الاستقرار. على سبيل المثال، يمكن لوجودِ ذرةِ فِلزٍّ موجبةِ الشحنة بالقرب من الرابطة؛ أن تجعل ذرةَ الأكسجين ذاتَ الشحنة السالبة محايدةً في الحالة الانتقالية؛ كي تجعلها مستقرةً (وبهذا لا تُصبح في عجَلة لإعادة الإلكترون الذي منحه جزيءُ الماء). فمن خلال الإسهام في استقرار الحالات الانتقالية، تَمُدُّ المحفزات يدَ العون؛ إذ تصبح بمنزلة المُكافئ لتوسيع رقبة الساعة الرملية.

والآن، علينا البحثُ فيما إذا كانت نظرية الحالة الانتقالية — التي نتناولُها من خلال التشبيه بالساعة الرملية — يمكن أن تُفسر الكيفيةَ التي تُسرع بها الإنزيماتُ كلَّ التفاعلات الكيميائية الأخرى الضرورية للحياة.

## الاهتزاز والتذبذُب

كان إنزيم الكولاجيناز الذي استخدمَته ماري شوايتسر لتفتيتِ ألياف الكولاجين العتيقة التي تعود للتيرانوصور هو نفسه الإنزيم الذي اكتشَفه جيروم جروس في الضفادع. لعلك تتذكَّر أن هذا الإنزيم ضروريٌّ لتفكيك المصفوفة خارج الخلية للشرغوف، حتى يُمكنَ إعادةُ تشكيل أنسجته وخلاياه وجزيئاته البيولوجية في صورةِ ضفدع كبير. لقد أدى هذه الوظيفةَ نفسَها في جسم الديناصور، وهو لم يزَل يُؤديها في أجسامنا: تفكيك ألياف الكولاجين بما يُتيح نموَّ الأنسجة وإعادةَ تشكيلها خلال النمو، وبعد التعرُّض لجرح. لكي نتمكَّن من تخيُّل هذه العملية الإنزيمية؛ سنقتبس فكرةً من مُحاضرةٍ ثورية في العلم ألقاها ريتشارد فاينمان على جَمعٍ من الناس عام ١٩٥٥ في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، وكانت المحاضرة بعُنوان «هنالك متَّسع كبير في القاع». وتُعرَف هذه المحاضرة بوجهٍ عام بأنها وضَعَت الأساسَ الفكري لمجال تقنية النانو، وهي الهندسة على نطاقِ الذرَّات والجزيئات. يُقال أيضًا إنَّ أفكار فاينمان ألهمَت قصةَ فيلم «رحلة رائعة» (فانتاستيك فويدج) الصادرِ عام ١٩٦٦، الذي تحكي قصتُه عن تضاؤل غواصةٍ وطاقَمِها إلى حجمٍ بالغِ الصغر يكفي لِحَقنهم في جسدِ أحد العلماء للكشف عن جلطةٍ دموية في دماغه قد تودي بحياته وعلاجها. ولدراسة تلك العملية الإنزيمية، سننطلق في رحلةٍ بغوَّاصة نانوية خيالية. وستكون وِجهتُنا ذيلَ أحد الشراغف.

بداية، يتعيَّن علينا العثور على الشرغوف. نزور إحدى البِرَك القريبة فنجد مجموعةً من بَيض الضفادع، ونأخذ حَفْنةً من الكرات الهلامية ذاتِ النقاط السوداء، وننقلها إلى وعاءِ ماءٍ زجاجي. لن يستغرق الأمرُ طويلًا حتى نلاحظ اهتزازاتٍ داخل البيضة، ثم تظهر الشراغفُ الصغيرة من بيوضها في غضون أيام. نأخذ ملاحظاتٍ سريعة عن سِماتها الأساسية تحت عدسة مُكبرة فنجد رأسًا كبيرًا نسبيًّا وأنفًا قابعًا فوق فمٍ صغير وعينَين جانبيَّتين وخياشيمَ ريشيةً أمام زعنفة الذيل الطويلة القوية، ثم نُقدم للشراغف كميةً كافية من الطعام (الطحالب)، ونعود يوميًّا لتدوين الملاحظات. تمرُّ أسابيعُ ولا نلاحظ سوى تغييرٍ طفيف في شكل الحيوان، لكننا ندهش من السرعة في زيادةِ طوله ومُحيطه. بعد مرورِ ثمانية أسابيع تقريبًا، نُلاحظ انحسارَ خياشيم الحيوان داخل جسمه وظهور الأطراف الأمامية. يمرُّ أسبوعان آخَران وتظهر سيقانه الخلفية من قاعدةِ ذيله القوي. في تلك المرحلة، لا بد أن نَزيد من وتيرةِ رصد الملاحظات؛ إذ يبدو أنَّ معدل التحول في تزايُد. تختفي خياشيمُ الشرغوف والكيس الخيشومي تمامًا، وتنتقل عيناه إلى منطقةٍ أعلى

في رأسه. وبينما تطرأ هذه التغيراتُ الكبيرة في الطرَف الأمامي للشرغوف، يبدأ ذيله في التقلُّص. تلك هي الإشارة التي كنَّا بانتظارها؛ ومن ثَم نركب غوَّاصتَنا النانوية وننطلقُ بها في الوعاء الزجاجي لدراسةِ أحد أهمِّ التحولات في الطبيعة.

نظرًا إلى تقلص حجم الغواصة؛ يُمكننا رؤيةُ المزيد من تفاصيلِ عملية التحول التي يمرُّ بها الشرغوف، ومنها ما يحدُث على جلده من تغيراتٍ كبيرة؛ فقد زاد سُمكًا ومتانةً وأصبح مُزوَّدًا بالغُدد المخاطية التي ستُحافظ على رطوبته وليونته حينما يترك البركة ويمشي على اليابسة. نغوص في إحدى هذه الغدد التي ستقودنا في رحلةٍ عبر جلد الحيوان. بعد اجتيازِ عددٍ من الحواجز الخلَوية بسلام، نصِل إلى داخل الجهاز الدوري. نتجول في أوردةِ الشرغوف وشراييِنه، فنشهد العديدَ من التغيرات التي تحدث في جسم الحيوان من الداخل. تتشكَّل الرئتان من بداياتٍ تُشبه الكيس وتتمدَّدان وتمتلئان بالهواء. أما قناته الهضمية الحلزونية الطويلة، التي كانت مناسبةً لهضم الطحالب، فقد استقامت وأصبحت كالقناةِ الهضمية المعتادة لدى الحيوانات المفترسة. يُصبح هيكله الغضروفي شِبهُ الشفاف — بما في ذلك حبل الظهر (وهو شكلٌ بدائي من أشكال العمود الفقري يمتدُّ بطول الجسم) — مُعتِمًا وغيرَ شفاف، بينما تحلُّ العظام محلَّ الغضاريف. نستمر في رحلتنا ونتبع العمود الفقري الناميَ وصولًا إلى ذيل الشرغوف الذي بدأ للتوِّ في عملية الامتصاص داخل جسم الضفدع الآخذ في النمو. ولأننا على هذا المستوى النانوي؛ نتمكَّن من رؤية أليافٍ عضلية سَميكة ومخططة تكتظُّ بطول جسم الحيوان.

من خلال التقلُّص بدرجة أكبر، نرى أن كلَّ ليف عضلي يتكون من أعمدةٍ طويلة ذاتِ خلايا أسطوانية تُعَد تقلُّصاتها الدورية هي مصدرَ حركة الشرغوف. يحيط بتلك الأسطوانات العضلية شبكةٌ كثيفة من الحبال القوية: المصفوفة خارج الخلية التي هي موضوعُ استكشافنا. يبدو أنَّ المصفوفة نفسَها في حالةٍ مستمرَّة من التغيُّر؛ إذ تتفكَّك الألياف الفردية لتحرير الخلايا العضلية المحاصَرة كي تنضمَّ إلى عملية هجرة جماعية لعددٍ كبير من خلايا ذيل الشرغوف الآخِذ في الاختفاء لتنتقلَ إلى جسم الضفدع.

نتقلَّص بدرجةٍ أكبر، فنحطُّ على أحد تلك الحبال المتفكِّكة من المصفوفة خارج الخلية الآخِذة في التحلُّل. ومع تمدُّد محيطِه، نجد أنه منسوجٌ من آلاف فتائل البروتين، وكلٌّ فتيل منها هو في حد ذاته حُزمةٌ من ألياف الكولاجين. يتكون كلُّ ليف من ثلاثةِ خيوط من بروتين الكولاجين — وهي حبات الأحماض الأمينية المتراصَّة على سلسلة، التي تعرَّفنا عليها في مناقشتنا لعظام الديناصور — لكنها التفَّت بعضُها حول بعض لتكوينِ شريطٍ

حلزوني شبيهٍ بشريط الحمض النووي، لكنه يتكوَّن من ثلاثِ سلاسل لا سلسلتَين. وعند هذه النقطة، نصل أخيرًا إلى وجهتنا المُستهدَفة من تلك الرحلة، ألا وهي أحد جزيئات إنزيم الكولاجيناز. نجد أنه بِنْيةٌ شبيهة بالمحار تُمسك بأحد ألياف الكولاجين وتنزلق على الليف مفكِّكةً الشريطَ الحلزوني الثلاثي، وبكل سهولة تقطع الروابط الببتيدية التي تصل بين حبَّات الحمض الأميني. ها هي السلسلة التي يمكن أن تبقى سليمةً ملايينَ السنين تتفكَّك الآن في لحظة. سنقترب الآن أكثرَ كي نرى عملية القطع تلك.

تأخذنا المرحلةُ التالية من التقلُّص إلى المقياس الجزيئي الذي لا يتجاوز بضعةَ نانومترات (التي هي أجزاءٌ على مليونٍ من الميلليمتر). من الصعب جدًّا أن نتخيَّل مدى ضآلةِ هذا المقياس، ولكي تتصوَّر ضآلته على نحوٍ أوضح بعضَ الشيء، انظر إلى الحرفِ o في أي كتاب مكتوب بالإنجليزية؛ إذا قلَّصتَ من حجمك الطبيعيِّ إلى مقياس النانومتر، فسيظهر لك هذا الحرفُ وكأنه يُساوي مساحة الولايات المتحدة الأمريكية برُمَّتها تقريبًا. ببلوغ هذا المقياس، يُمكننا أن نرى أن الجزء الداخلي للخلية مكتنزٌ بجزيئات الماء وأيونات[٧] الفلزَّات، ومجموعةٍ كبيرة ومتنوعة من الجزيئات البيولوجية التي تتضمَّن الكثيرَ من تلك الأحماض الأمينية ذات الأشكال الغريبة. تسود في تلك البركة المزدحمةِ بالجزيئات حالةٌ مستمرة من الاضطراب والهياج؛ إذ تدور الجزيئات حول نفسها، وتهتزُّ وترتطم بعضها ببعض في تلك الحركة الجزيئية الشبيهةِ بحركة كرات البلياردو التي وصَفْناها في الفصل السابق.

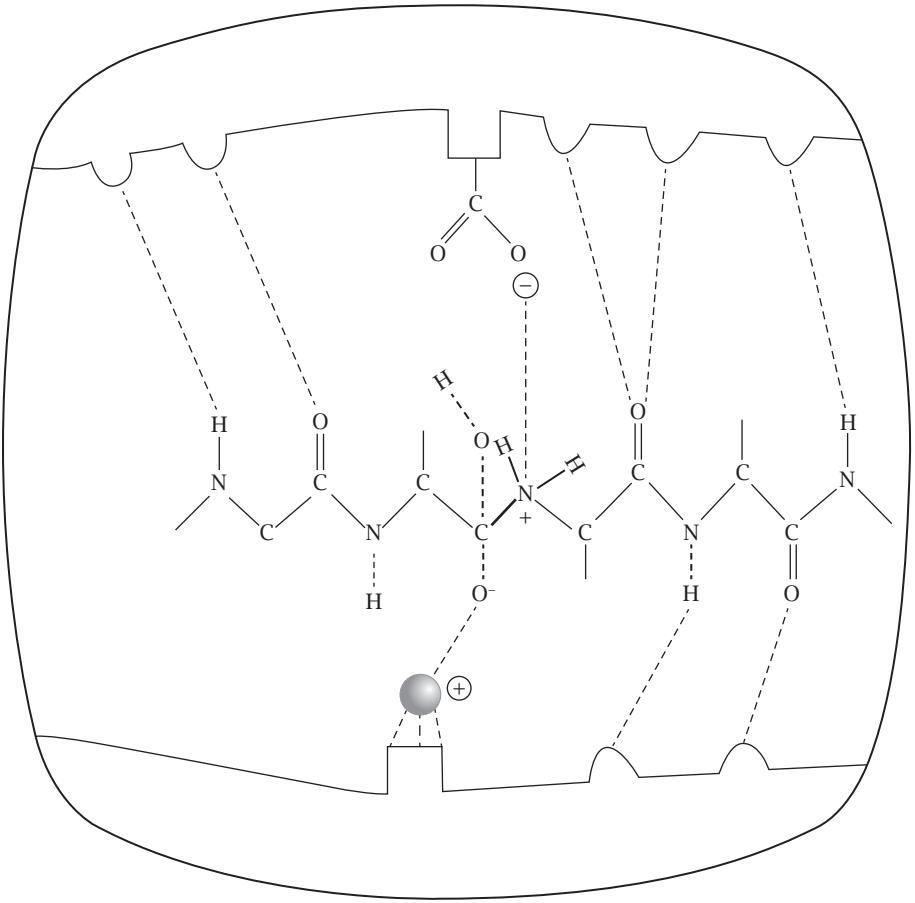
وهناك في وسطِ هذا النشاط المضطرِب والعشوائي بين الجزيئات، تنزلقُ تلك الإنزيمات الشبيهة بالمحار بطولِ ألياف الكولاجين، وتتحرك بطريقةٍ مختلفة تمامًا. على هذا المقياس، يمكننا تكبيرُ إنزيمٍ واحد وهو يشقُّ طريقه عبر سلسلةِ بروتين الكولاجين. للوهلة الأولى، يبدو الشكلُ العام لجزيء الإنزيم متكتلًا مبهَمَ المعالم، مما يُعطي انطباعًا خاطئًا بأنه بِنْيةٌ غيرُ منتظمة الأجزاء. بالرغم من ذلك، يمتاز الكولاجيناز، كغيرِه من الإنزيمات، ببِنْية محدَّدة تَشغل كلُّ ذرة فيها موقعًا معيَّنًا داخل الجزيء. وعلى النقيض من التدافع العشوائي للجزيئات المحيطة، فإن الإنزيم يؤدي رقصةً جزيئية رائعة ودقيقة؛ إذ يلتفُّ حول ألياف الكولاجين، مُفككًا الانعطافاتِ الحلزونيةَ في الألياف مع قصِّ الروابط الببتيدية التي تصلُ الأحماضَ الأمينية بعضَها ببعض داخل السلسلة، ثم يفكُّ نفسه ويمضي قُدمًا لقطع الرابطة الببتيدية التالية في السلسلة. ليست تلك بنُسَخٍ مصغَّرة من آلاتٍ صناعية تَسير عملياتُ تشغيلها — على مستوى الجزيئات — وفقًا لحركةِ تريليونات

الجزيئات على نحوٍ عشوائي شبيهٍ بحركة كرات البلياردو. فهذه الآلات النانوية الطبيعية تؤدي على المستوى الجزيئي رقصةً مصمَّمة بعناية، قد تطوَّرَت حركاتها بدقةٍ على مدار ملايينِ السنين من الانتقاء الطبيعي للتأثير في حركة الجسيمات الأساسية للمادة.

لإلقاءِ نظرةٍ فاحصة على عملية القطع؛ ننزل إلى فلقةِ الإنزيم الشبيهة بالفكِّ والتي تُثبت الركائزَ في مكانها: سلسلة بروتين الكولاجين وجُزيء ماءٍ واحد. هذا هو «الموقع النشط» للإنزيم، وهو أداته الفاعلة التي تُسرِّع تفكيكَ الروابط الببتيدية عن طريق ليِّ عنق الساعة الرملية للطاقة. إنَّ هذه الحركات المُصمَّمةَ بعنايةٍ التي تحدث داخل مركز القيادة الجزيئي تختلفُ للغاية عن كل التدافُع العشوائي الذي يحدث خارجَ الإنزيم وحوله، وهي تؤدي دورًا بالغَ الأهمية في حياة الضفدع بأكمله.

يوضح الشكل ٣-٤ الموقع النشط للإنزيم. ومن خلال مقارنة هذا الشكل بالشكل ٣-٣، يمكن رؤية أن الإنزيم يُعيق الرابطة الببتيدية في الحالة الانتقالية غير المستقرة التي ينبغي الوصولُ إليها قبل أن يُمكن تفكيكُ الرابطة. تُثبَّت الركائز في أماكنها بفعلِ روابطَ كيميائية ضعيفة، تُمثَّل في الشكل بخطوط منقَّطة، وهي تتألف في الأساس من إلكترونات مشتركة بين الركيزة والإنزيم. يحافظ هذا التثبيتُ على بقاء الركائز في تكوينٍ مُحدَّد جاهزٍ لعملية القطع التي يقوم بها الفكَّان الجزيئيَّان للإنزيم. حينما يُطبِق فكَّا الإنزيم، فإنهما يفعلان ما هو أدقُّ من مجردِ «قَضْم» الرابطة؛ فهما يوفران الوسائلَ التي يمكن أن يحدث بها التحفيز. نُلاحظ ذرةً كبيرة موجبة الشحنة تتدلَّى تحت الرابطة الببتيدية المستهدفة، وتتَّخذ وضع الاستعداد. تلك ذرةُ زنك ذاتُ شحنةٍ موجبة. إذا اعتبرنا أنَّ الموقع النشط للإنزيم هو فكَّاه، فستكون ذرةُ الزنك إحدى قواطعه. تقتلعُ الذرةُ ذاتُ الشحنة الموجبة إلكترونًا من ذرة الأكسجين التي تنتمي إلى الركائز كي تستقرَّ الحالة الانتقالية ومن ثمَّ تُغير مشهد الطاقة؛ أي: تُوسع عنق الساعة الرملية.

تُنفَّذ بقيةُ المهمة عن طريق القاطع الجزيئي الثاني للإنزيم. هذا القاطع هو أحدُ الأحماض الأمينية للإنزيم نفسِه ويُسمى الجلوتامات، وقد اتخذ وضعيةَ الاستعداد ليُعلِّق ما لدَيه من ذرة أكسجين سالبةِ الشحنة فوق الرابطة الببتيدية المستهدَفة. يتمثَّل دورُ هذا القاطع في أن يقوم أولًا باقتلاع بروتون مُوجب الشحنة من جُزيء الماء المقيَّد. بعد ذلك، يدفع هذا البروتون داخل ذرة النيتروجين في أحد طرَفَي الرابطة الببتيدية المستهدفة؛ ومِن ثم تُصبح الذرة موجبةَ الشحنة مما يطرد الإلكتروناتِ من الرابطة الببتيدية. لعلك تتذكَّر أن الإلكترونات بمنزلة صمغ يُثبت الروابط الكيميائية، ومن ثمَّ فإن إخراج الإلكترون




شكل ٣-٤: تفكك الرابطة الببتيدية (بالخط السميك) للكولاجين في الموقع النشط لإنزيم الكولاجيناز. تُمثَّل الحالة الانتقالية للركيزة بالخطوط المتقطعة. وتُمثِّل الكرة الموجودة على يسار المركز في الأسفل، أيونَ الزنك الموجَبَ الشحنة، وتُمثل مجموعةُ الكربوكسيل (COO) في الأعلى حمضَ جلوتامات أمينيًّا في الموقع النشط للإنزيم. تجدُر الإشارة إلى أنَّ المسافات بين الجزيئات ليست مرسومةً وفقًا لمقياسٍ محدد.

يُشبه إزالة الصمغ من مِفصل رابطة، مما سيُؤدي إلى ضَعفها وتفكيكِها.[5] وبعد إجراء بِضْع عمليات أخرى من إعادة تنظيم الإلكترونات، تُلفَظ الموادُّ الناتجة عن التفاعل، وهي السلاسل الببتيدية المفكَّكة، من الفكَّين الجزيئيَّين للإنزيم. ها هو تفاعلٌ ربما يستغرق إكمالُه ما يصل إلى ثمانية وستين مليون سنة، قد اكتمل في عددٍ قليل من النانوثواني.

لكن ما محلُّ ميكانيكا الكم في الصورة؟ لكي نتمكنَ من إدراك أهمية ميكانيكا الكمِّ في شرح التحفيز الإنزيمي، سنتوقَّف مؤقتًا لنُفكرَ مجددًا في الأفكار التي طرَحها روَّادُ ميكانيكا الكم. لقد ذكَرنا بالفعل الدور الخاصَّ الذي تؤديه تلك الجسيماتُ القليلة في الموقع النشط للإنزيم، ووصَفْنا حركاتِها المتنظمةَ التي تتناقضُ تمامًا مع حركة الجزيئات العشوائية التي تحدُث في الأماكن الأخرى بالبيئة الجزيئية. لدينا الآن جزيئاتٌ حيوية عاليةُ التنظيم، تتفاعل بطرقٍ مُحدَّدة مع جزيئات حيوية أخرى عاليةِ التنظيم. يمكن رؤيةُ هذا التفاعل من منظور التضخُّم المستبدِّ الذي أشار إليه يوردان، أو من منظور إرفين شرودنجر القائل بـ «تولد النظام من النظام» في كلِّ المراحل؛ بدايةً من الضفدع الذي يكبر بنموِّ أنسجته المنظمة وخلاياه، وحتى الألياف التي تُمسك تلك الأنسجة والخلايا معًا، وصولًا إلى الحركة المُنظِّمة للجسيمات الأساسية داخلَ الموقع النشط لإنزيم الكولاجيناز الذي يُعيد تشكيلَ تلك الألياف؛ ومِن ثمَّ يؤثر في نموِّ الضفدع بأكمله. وبصرف النظر عمَّا إذا كنا سنختار نموذج يوردان أم نموذج شرودنجر، فإنَّ ما يحدث هنا مختلفٌ تمامًا عن حركة الجزيئات الفوضوية التي تدفع القطارات إلى صعود التلال.

لكن هل يسمح هذا النظامُ الجزيئيُّ لمجموعةٍ مختلفة من القواعد أن تؤثر في الحياة مثلما زعَم شرودنجر؟ لمعرفة إجابة هذا السؤال، نحتاج إلى معرفةِ المزيد عن تلك المجموعة المختلفة من القواعد التي تعمل على نطاق الأجسام الصغيرة للغاية.

## هل تُفسر نظرية الحالة الانتقالية كل شيء؟

أيَلزم أن تنطويَ تلك الحركةُ الجزيئية المصمَّمة بعنايةٍ على ميكانيكا الكم؟ لقد عرَفنا أنَّ قدرة الكولاجيناز على تسريع تفكيك الروابط الببتيدية تتضمَّن عددًا من آليات التحفيز التي يستخدمها الكيميائيُّون عادةً لتسريع التفاعلات الكيميائية من دون اللجوء إلى ميكانيكا الكم. فعلى سبيل المثال، يبدو أن ذرةَ فلز الزنك في الموقع النشط للإنزيم تؤدِّي دورًا مُماثلًا لدور فلزِّ البلاتينيوم الساخن الذي استخدمه بيريجرين فيليبس في القرن التاسع عشر لتسريع تصنيع حمض الكبريتيك. ولتسريع التفاعلات الكيميائية، تعتمد هذه

المُحفزات غير العضوية في تقريب مجموعاتها التحفيزية من الركائز على الحركة الجزيئية العشوائية، لا الحركة الجزيئية المصمَّمة بعناية. فهل يقتصر التحفيز الإنزيمي على كونه مجموعةً من آليات التحفيز الكلاسيكية المباشرة التي تُوجَد بكَثْرةٍ في المواقع النشِطة، وهي بذلك تُوفر الشرارةَ الحيوية التي تُحرك الحياة؟

حتى وقتٍ قريب، كان كلُّ خبراء الإنزيمات تقريبًا سيُوافقون على ذلك؛ إذ كانت نظريةُ الحالة الانتقالية القياسية، بوصفها للعمليات المختلفة التي تساعد في إطالة مدةِ الحالة الانتقالية الوسيطة، تُعَد هي التفسيرَ الأفضل لكيفية عمل الإنزيمات. غير أنه بعد أخذِ كلِّ العوامل المساهمة المعروفة في الاعتبار، ظهرَت بعضُ الشكوك. فعلى سبيل المثال، يفهم العلماءُ الآلياتِ المحتمَلة المختلفة التي يمكن أن تُسرع تفاعل التفكُّك الببتيدي الذي تناوَلْناه سابقًا في هذا الفصل فَهمًا جيدًا، وتنتج كلٌّ منها على حدةٍ عواملَ زيادة سرعة تصل إلى مائة ضعفٍ تقريبًا. لكن حتى إذا ضرَبنا كلَّ هذه العوامل معًا، فإن أقصى ما يمكن تحقيقُه هو زيادة سرعة التفاعل بمليون ضعف تقريبًا. وهذا المقدار ضئيلٌ للغاية مقارنةً بعوامل زيادة السرعة التي نعرف أنَّ الإنزيمات تُحقِّقها بالفعل، ويبدو أنَّ هناك فجوةً شاسعة للغاية بين النظرية والواقع.

ثَمة لغزٌ آخر يكمن في كيفية تأثُّر النشاط الإنزيمي بالتغيرات المختلفة التي تطرأ على الإنزيمات نفسِها. فعلى سبيل المثال، يتكون الكولاجيناز في الأساس، كغيره من الإنزيمات، من هيكلٍ بروتيني على سلسلةٍ تدعم فكَّي الإنزيم وأسنانَه في موقعه النشط. وسوف نتوقَّع أن تغيير الأحماض الأمينية التي تُشكل فكَّي الإنزيم وأسنانَه سيُخلِّف تأثيرًا كبيرًا في كفاءة الإنزيم، وهذا ما يحدث بالفعل. وما يبعث على الدهشة بدرجةٍ أكبر هو اكتشافُ أنَّ تغيير الأحماض الأمينية في إنزيماتٍ بعيدة عن الموقع النشط قد يترك أيضًا تأثيرًا كبيرًا على كفاءة الإنزيم. إنَّ السبب الذي يجعل تلك التعديلاتِ الطفيفةَ في بِنْية الإنزيم تؤدي إلى اختلافٍ كبير لم يزَل لُغزًا في نظريةِ الحالة الانتقالية القياسية، لكننا نجد سببًا منطقيًّا لذلك إذا استدعَيْنا ميكانيكا الكمِّ إلى الصورة. وسنعود إلى هذا الاكتشافِ في الفصل الأخير من الكتاب.

بالرغم من ذلك، تُوجَد مشكلةٌ أخرى وهي أنَّ نظرية الحالة الانتقالية لم تنجح حتى الآن في توفيرِ إنزيماتٍ اصطناعية تعمل بكفاءةِ الإنزيمات الحقيقية. ربما تتذكر مقولةَ ريتشارد فاينمان الشهيرة: «ما لا أستطيع خَلْقه، لا أستطيع فهمَه». تنطبق هذه المقولةُ على الإنزيمات؛ لأنه بالرغم من هذا القدر الكبير الذي نعرفه عن آليات الإنزيمات، لم

يتمكن أحدٌ من تصميم إنزيم من البداية يُمكنه تحقيقُ ولو جزءٍ من معدل السرعة الذي تُوفره الإنزيمات الطبيعية.[6] وبناءً على معيار فاينمان، فإننا لا نفهم حتى الآن كيفيةَ عمل الإنزيمات.

لكن أعِد النظر إلى الشكل ٣-٤ واطرَح السؤال الآتيَ: ما الذي يفعله الإنزيم؟ ستجد الإجابةَ واضحةً تمامًا وهي: تُعدِّل الإنزيماتُ فُرادى الذرات والبروتونات والإلكترونات داخل الجزيئات وفيما بينها. حتى هذه النقطةِ من الفصل، ننظر إلى هذه الجسيمات على أنها تتصرَّف على نحوٍ شديد الشبه بكتلٍ صغيرة من الشحنة الكهربية، تتعرَّض للدفع والسحب من مكانٍ إلى آخَر في جزيئاتٍ شبيهة بنموذج الكرات والعصا. غير أننا رأينا في الفصل السابق أنَّ الإلكترونات والبروتونات وحتى الذرَّات الكاملة تختلف كثيرًا عن تلك الكرات الكلاسيكية؛ لأنها تتبع قواعدَ ميكانيكا الكم، بما في ذلك القواعد الغريبة التي تعتمد على الترابط، لكنها تختفي على المستوى العيانيِّ الذي تُوجَد فيه كراتُ البلياردو؛ وذلك بسبب عملية فكِّ الترابط. ليست كراتُ البلياردو على أي حال بالمثال الجيد على الجُسيمات الأساسية؛ ولكي نفهمَ ما يجري بالفعل داخل المواقع النشطة للإنزيمات، يجب أن نُنحِّيَ أفكارنا الكلاسيكية المُسبقة جانبًا، وندخل إلى عالم ميكانيكا الكمِّ الغريب؛ حيث تستطيع الأجسام فِعل شيئَين أو مئات الأشياء في وقتٍ واحد، تتمتَّع فيه الجسيماتُ باتصالاتٍ طيفية وبالقدرة على اختراقِ حواجزَ يبدو أنه لا يمكن اختراقُها. فتلك الخصائص المذهلة لم تتوفَّر قط لأيٍّ من كرات البلياردو.

## دفع الإلكترونات

من الأنشطة الأساسية للإنزيمات، كما عرَفنا، تحريكُ الإلكترونات داخل جزيئات الركائز، مثلما يحدُث مثلًا عندما يدفع إنزيم الكولاجيناز الإلكترونات ويسحبها داخل الجزيء الببتيدي. لكن تحريك الإلكترونات لا يتمُّ داخل الجزيئات فحسب، بل يمكن أيضًا نقلُها من جزيءٍ إلى آخَر.

ثَمة نوعٌ شهير جدًّا في الكيمياء من أنواع تفاعلات نقل الإلكترونات يحدث خلال عملية تُسمى «الأكسدة». تجري الأكسدة عند حرقِ أنواع الوقود الكربونية، مثل الفحم، في الهواء. وبصفةٍ أساسية، تتمثَّل هذه العمليةُ في انتقال الإلكترونات من جُزيءٍ مانح إلى جزيءٍ مُستقبِل. ففي حالةِ حرق كومةٍ من الفحم، تتحرَّك إلكتروناتٌ عاليةُ الطاقة من ذرَّات الكربون لتُشكِّل داخل ذرَّات الأكسجين روابطَ منخفضة الطاقة؛ مما يتسبَّب

في انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون. يتحرَّر الفائضُ من الطاقة في صورةِ حرارة نيران الفحم. ونحن نستغلُّ هذه الطاقة الحرارية لتدفئة المنازل وطهيِ الطعام، وتحويل المياه إلى بخارٍ يدفع أحدَ المحركات، أو يُشغل التوربينات لتوليد الكهرباء. بالرغم من ذلك، يُعَد حرقُ الفحم ومحركاتِ الاحتراق الداخلي وسائلَ أوَّليةً بدرجةٍ كبيرة وغيرِ فعالة في استخدام طاقة الإلكترونات. أما الطبيعة، فقد اكتشفَت منذ أمدٍ بعيد وسائلَ أكفأَ للاستفادة من هذه الطاقة عن طريق عملية التنفس.

عادةً ما نفكر في عملية التنفُّس على أنها شهيقٌ وزفير: نأخذ الأكسجين الذي نحتاج إليه داخل الرئتَين، ونُخرج ثانيَ أكسيد الكربون بصفتِه ناتجًا فائضًا. لكن التنفُّس في حقيقته يُعد خطوتَين تُمثلان الخطوةَ الأولى (استنشاق الأكسجين) والخطوةَ الأخيرة (طرد ثاني أكسيد الكربون) من عمليةٍ جزيئية أكثر تعقيدًا ونظامًا تجري داخل جميع خلايا الكائن الحي. وهي تحدث داخل عُضيَّاتٍ معقَّدة[٨] تُسمى الميتوكوندريا، وهي شبيهةٌ إلى حدٍّ ما بخلايا بكتيريةٍ حبيسة داخل خلايانا الحيوانية الأكبرِ منها؛ فهي تحتوي على بِنًى داخليةٍ كالأغشية، وعلى حمضٍ نووي أيضًا. الحقُّ أننا على يقينٍ تقريبًا من أنَّ الميتوكوندريا تطورَت من بكتيريا تكافلية استوطَنَت أسلافَ الخلايا الحيوانية والنباتية منذ مئات الملايين من السنين، ثم فقَدَت القدرةَ على العيش مستقلة. غير أنَّ النسل الذي تنحدِر منه بصفتها خلايا بكتيريةً حيَّة مستقلة يُفسر على الأرجح قُدرتَها على تنفيذِ عملية فائقة الصعوبة كالتنفُّس. الحقُّ أنَّ التنفس من حيث التعقيدُ الكيميائي يأتي في المَرتبة الثانية في الأهمية بعد عملية البناء الضوئي التي سنتناولُها في الفصل التالي.

لتسليط الضوء على الدور الذي تؤدِّيه ميكانيكا الكم في هذه العملية، سنحتاج أولًا إلى تبسيط آلية التنفُّس. وحتى مع تبسيطها، سنجد أنها تنطوي على سلسلةٍ من العمليات اللافتة للنظر التي تعكس أعجوبةَ هذه الآلات النانوية البيولوجية. يبدأ التنفُّس بحرق الوقود الكربوني، وهو في هذه الحالة العناصرُ الغذائية التي نحصل عليها من الطعام. فعلى سبيل المثال، تتكسَّر الكربوهيدرات داخل المعدة لإفراز السكريات، مثل الجلوكوز الذي ينطلق في مجرى الدم، ثم يصلُ إلى الخلايا التي هي بحاجةٍ إلى الطاقة. يصلُ الأكسجين اللازم لحرق هذا الوقود المتمثِّل في السكر إلى تلك الخلايا من الرئتين عن طريق الدم. ومثلما يحدث في حالة احتراق الفحم، تنتقل الإلكتروناتُ الموجودة في المدارات الخارجية لذرات الكربون داخلَ أحد الجزيئات إلى جزيءٍ يُسمى نيكوتيناميد الأدينين

الثنائي النكليوتيد المختزل (NADH). بالرغم من ذلك، لا تُستخدَم هذه الإلكترونات على الفور للارتباط بذرَّات الأكسجين، بل تُنقل من إنزيمٍ إلى آخَر على مدار «سلسلةٍ تنفُّسية» من الإنزيمات تُوجَد في خلايانا، فهي بذلك تُشبه العصا التي يُمررها كلُّ عدَّاءٍ إلى زميله في سباقات التتابُع. ومع كل خطوةٍ من خطوات النقل، تنخفض حالةُ طاقةِ الإلكترون إلى درجةٍ أدنى، ويُستخدَم الفرقُ في الطاقة لِتُزوَّد به الإنزيمات التي تطرد البروتونات خارج الميتوكوندريا. حينئذٍ يُستخدَم البروتون الناتجُ المنحدِر من خارج الميتوكوندريا إلى داخلها؛ لدفع إنزيمٍ آخَر يُسمى إنزيم الأدينوسين الثلاثيَّ الفوسفات إلى الدوران، وهو إنزيمٌ يُخلِّق جُزيئًا حيويًّا يُسمى الأدينوسين الثلاثي الفوسفات. ولهذا الجزيء الحيوي أهميةٌ كبيرة في الخلايا الحية؛ لأنه بمنزلة بطاريةِ طاقة يُمكن نقلُها بسهولة في أنحاء الخليةِ لتشغيل العديد من الأنشطة المحتاجة إلى الطاقة، مثل تحريك الأجسام أو بنائها.

تُعَد وظيفة الإنزيمات المسئولة عن ضخِّ البروتونات بفعل الإلكترونات شبيهةً إلى حدٍّ ما بتلك الخاصة بالمضخات الهيدروليكية التي تخزن الطاقة الفائضة عن طريق ضخِّ المياه إلى أعلى مُنحدرٍ تلِّي. وبعدها يُمكن تحريرُ الطاقة المُخزَّنة عن طريق السماح للمياه بالتدفُّق من أعلى التلِّ لتدوير المحرِّك التوربيني الذي يولِّد الطاقة الكهربية. وعلى هذا النحوِ أيضًا، تضخُّ إنزيمات التنفس البروتونات خارج الميتوكوندريا. عندما تعود هذه البروتونات مجددًا إلى الداخل، فإنها توفر الطاقةَ اللازمة لدوران إنزيم الأدينوسين الثلاثي الفوسفات، الذي يُشبه التوربين في هذه الحالة. يُحفز هذا الدورانُ مجموعةً أخرى من الحركات الجزيئية ذاتِ الإيقاع المنظَّم، التي تربط مجموعةً كيميائية ذاتَ طاقةٍ عالية من الفوسفات بجزيءٍ داخل الإنزيم لتخليقِ جزيء الأدينوسين الثلاثي الفوسفات.

من خلالِ تشبيه هذه العملية لاحتجاز الطاقة بسباق التتابُع؛ يُمكننا تخيُّلُ استبدال زجاجة المياه (التي تُمثل طاقةَ الإلكترون) بالعصا؛ إذ يأخذ كلُّ عدَّاء (إنزيم) رشفةَ ماءٍ ثم يُمرر الزجاجة إلى أن يُسكب الماء الفائض في النهاية في دلوٍ يُسمَّى الأكسجين. إنَّ احتجاز طاقة الإلكترونات في كتلٍ صغيرة يجعل العملية أكثرَ كفاءةً من تحويل الطاقة إلى الأكسجين مباشرةً؛ إذ لا يُفقد منها سوى قدرٍ ضئيل للغاية في صورةِ حرارة مهدَرة.

إذن، لا تتعلَّق الأحداث الرئيسية في التنفُّس بالشهيق والزفير إلا من بعيد، فهي تتكوَّن من عمليةِ نقل منظَّمة للإلكترونات عبر التتابع بين إنزيمات التنفُّس داخل خلايانا. يقع كلُّ حدث من أحداث نقل الإلكترونات بين أحد الإنزيمات والذي يليه في التتابُع في

فجوةٍ يبلغ طولها عدةَ عشَرات من وحدات الأنجستروم — وهي مسافةٌ تسع العديدَ من الذرَّات — أي أنها أكبرُ كثيرًا من التقدير المتوقَّع للمسافة التي تسمح بالقفز التقليدي للإلكترونات. ويتمثَّل لغز عملية التنفُّس في الكيفية التي تتمكَّن بها هذه الإنزيمات من نقل الإلكترونات بتلك السرعة والكفاءة عبر تلك الفجوات الواسعة بين الجزيئات.

طُرح هذا السؤال أولَ مرة في أوائل أربعينيَّات القرن العشرين على لسان عالم الكيمياء الحيوية الأمريكيِّ ذي الأصول المجَريَّة، ألبرت زينت-جيورجي، الذي حصَل على جائزة نوبل في الطب عام ١٩٣٧؛ لدوره في اكتشاف فيتامين سي. وفي عام ١٩٤١، ألقى زينت-جيورجي محاضرةً بعُنوان «نحو كيمياء حيوية جديدة» وقال فيها إنَّ طريقةَ تدفُّق الإلكترونات بسهولةٍ عبر الجزيئات الحيوية؛ شبيهةٌ بطريقة حركتها في أشباه الموصلات مثل كريستالات السيليكون المستخدَمة في الأجهزة الإلكترونية. لكن من سوء الحظ أنه اكتُشف بعد سنواتٍ قليلة أنَّ البروتينات من الموصلات السيئة للكهرباء؛ ولهذا لن تتدفَّق الإلكترونات بسهولةٍ عبر الإنزيمات بالطريقة التي تَصوَّرها زينت-جيورجي.

شهِدَت خمسينيَّات القرن العشرين تقدُّماتٍ كبيرةً في الكيمياء؛ لا سيما على يدِ العالم الكنَدي رودولف ماركوس الذي وضع نظريةً قوية سُميت على اسمه (نظرية ماركوس)، وهي تشرح السرعةَ التي يمكن للإلكترونات أن تتحرَّك بها أو تتنقل بين الذرَّات أو الجزيئات المختلفة. وقد حاز هو أيضًا في نهاية المطاف على جائزة نوبل في الكيمياء عام ١٩٩٢ على أبحاثه في هذا النطاق.

بالرغم من ذلك، فحتى قبل نصفِ قرن من الزمان، كانت مسألةُ قدرة إنزيمات التنفُّس تحديدًا على تحفيز مثلِ هذا النقل السريع للإلكترونات عبر مسافاتٍ طويلة نسبيًّا بين الجزيئات لم تزَل لُغزًا لم يُحلَّ بعد. ظهر اقتراحٌ بأن البروتينات ربما تدور بتسلسلٍ مثل ماكينات الساعات؛ مما يُقرِّب الجزيئات البعيدة بعضَها من بعض فيسهل على الإلكترونات أن تتحرَّك بين الجزيئات. ومن التنبُّؤات المهمة لِمثل هذه النماذج أن هذه الآلية تتباطأُ كثيرًا في درجات الحرارة المنخفضة؛ إذ تنخفض الطاقة الحرارية التي تدفع حركة الساعة. غير أنَّ أول طفرةٍ حقيقية في علم الأحياء الكمِّي قد ظهَرَت عام ١٩٦٦ على يد عالَمي الكيمياء الأمريكيَّين دون ديفولت وبريتون تشانس اللذَين أجْرَيا تجارِبَهما بجامعة بنسلفانيا، وأثبتا من خلالها أن سرعة قفز الإلكترونات في الإنزيمات التنفُّسية لا تنخفِض في درجات الحرارة المنخفضة، على عكس كلِّ التوقعات.[7]

وُلد دون ديفولت في ميشيجان عام ١٩١٥، ولكنه انتقل إلى الغرب مع عائلته في زمَن الكَساد. درَس في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا وجامعة بيركلي بكاليفورنيا وحصل على الدكتوراه في الكيمياء عام ١٩٤٠. كان ناشطًا حقوقيًّا ملتزمًا، وسُجِن مدةً خلال الحرب العالمية الثانية؛ لأنه طالَب بحقه في رفض أداء الخدمة العسكرية وَفقًا لما يُمليه عليه ضميره. وفي عام ١٩٥٨، استقال من وظيفته بصفته أستاذًا في الكيمياء بجامعة كاليفورنيا، وانتقل إلى جورجيا حتى يتمكَّن من المشاركة بنفسه في النِّضال من أجل تحقيق المساواة العِرقية في الجنوب وتطبيق الدَّمج العِرقي. عرَّضتْه قوةُ إيمانه بالقضية وإخلاصه لها والالتزام بالاحتجاج السلمي لخطر الإصابة الجسدية في أثناء المَسيرات مع النشطاء أصحاب البشرة السوداء. ولقد أُصيب بكسرٍ في الفكِّ في إحدى المسيرات عندما تعرَّضَت مجموعته من المتظاهرين ذَوي الأعراق المختلفة لهجومٍ من أحد الحشود. غير أنَّ هذا لم يردَعْه.

في عام ١٩٦٣، انتقل ديفولت للعمل لدى جامعة بنسلفانيا مع بريتون تشانس الذي كان يكبُره بعامَين والذي كان قد رسَّخ سُمعته على مستوى العالم بالفعل بصفتِه واحدًا من أبرز العلماء في مجاله. حصل تشانس على درجة الدكتوراه مرتَين لا مرةً واحدة؛ الأولى في الكيمياء الفيزيائية والثانية في علم الأحياء. ولهذا كان «مجال» خبرته واسعًا للغاية، وتنوَّعَت اهتماماتُه البحثية. وقضى قدرًا كبيرًا من حياته المهنية في العمل على بنية الإنزيمات ووظائفها، وفاز أيضًا في أثناء ذلك بميدالية ذهبية في الإبحار باسم الولايات المتحدة في دورة الألعاب الأوليمبية عام ١٩٥٢.

كان بريتون تشانس منشغلًا بالتفكير في آليةٍ يمكن للضوء من خلالها تحفيز نقل الإلكترونات من الإنزيم التنفُّسي، السيتوكروم، إلى الأكسجين. وبالتعاون مع ميتسو نيشيمورا، اكتشف تشانس أن هذا النقل يحدث في بكتيريا الكروماتيوم فينوسوم حتى عندما تبرد خلاياها إلى درجة حرارة النيتروجين السائل البارد التي تبلغ ١٩٠ درجةً مئوية تحت الصفر.[٩] غير أنَّ كيفية اختلاف تلك العملية مع تغيُّر درجة الحرارة، وهو ما قد يُوفر بعضَ التلميحات عن الآلية الجزيئية المعنيَّة، لم يكن معروفًا بعد. أدرك تشانس أنَّ المطلوب هو بدءُ التفاعل بسرعةٍ كبيرة للغاية باستخدام ومضةٍ قصيرة للغاية من الضوء، لكنها كثيفة. وهنا أتى دورُ خبرةِ دون ديفولت. ذلك أنه عمل بضعَ سنوات بصفته استشاريًّا كهربائيًّا لدى شركةٍ صغيرة تُطوِّر جهاز ليزر يمكن أن يُطلِق مثلَ تلك النبضات الضوئية القصيرة.

معًا، صمَّم كلٌّ من ديفولت وتشانس تجربةً تتضمَّن استخدام ليزر ياقوتي يُطلق ومضةً قصيرة من الضوء الأحمر الساطع لمدة ٣٠ نانوثانية فحسب (واحد على ٣٠ مليار من الثانية) وتسليطه على خلايا بكتيرية ممتلئة بإنزيمات التنفُّس. واكتشفا أنَّ خفض درجة الحرارة يؤدي إلى انخفاض سرعة نقل الإلكترونات، وحين بلغَت درجة الحرارة ١٠٠ درجة كلفن (أو ١٧٣ درجة مئوية تحت الصفر) تقريبًا صار زمنُ تفاعل نقل الإلكترونات أبطأَ بمقدار ألفِ مرة مما كان عليه في درجة حرارة الغرفة. كان هذا هو المتوقَّعَ إذا كانت عملية نقل الإلكترونات تعتمد في الأساس على كمية الطاقة الحرارية المُستخدَمة في التفاعل. غير أنَّ شيئًا غريبًا حدث عندما خفض ديفولت وتشانس درجةَ الحرارة إلى ما دون ١٠٠ درجة كلفن. فبدلًا من أن تنخفض سُرعة نقل الإلكترونات إلى قيمٍ أقل، بدا أنها وصَلَت إلى مستوًى من الثبات على الرغم من خفضِ درجة الحرارة أكثرَ فأكثر حتى وصلَت إلى ٣٥ درجةً فوق الصفر المطلق (٢٣٨ درجة مئوية تحت الصفر). أشار هذا إلى أنَّ آليةَ نقل الإلكترونات لا يمكن أن تقتصرَ على عمليةِ قفز الإلكترونات «الكلاسيكية» التي تناولناها مسبقًا. يبدو أن الإجابة تكمنُ في العالم الكمِّي؛ لا سيما في العملية الغريبة التي تُسمى النفَق الكمِّي التي تعرَّضنا لها في الفصل الأول.

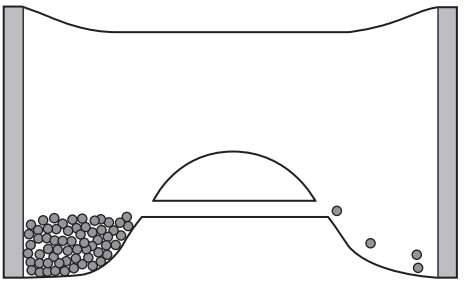
## النفَق الكمي

لعلَّك تتذكَّر من الفصل الأول أنَّ النفق الكمي هو تلك العملية الكمية الغريبة التي تُتيح للأجسام اختراقَ الحواجز المنيعة مثلما يخترق الصوتُ الجدران بسهولة. اكتُشف النفقُ الكمي للمرة الأولى في عام ١٩٢٦ على يد عالم الفيزياء الألماني فريدريش هوند وسرعان ما نجح جورج جاموف ورونالد جيرني وإدوارد كوندون في استخدامه لشرح مفهوم التحلُّل الإشعاعي، وكان جميعهم يستخدمون رياضياتِ ميكانيكا الكم الحديثة آنذاك. كان النفق الكميُّ قد صار من الخصائص الأساسية في الفيزياء النوويَّة، لكن العلماء أدرَكوا فيما بعدُ أنه ظاهرةٌ تنطبق على نطاقٍ أوسع في علوم الموادِّ والكيمياء. ومثلما رأينا بالفعل، فإنَّ ظاهرة النفق الكمي ضروريةٌ للحياة على الأرض؛ لأنها تسمح لأزواج من أنوية الهيدروجين الموجبة الشحنة الموجودة في باطن الشمس بالاندماج معًا؛ مما يُشكل الخطوة الأولى لتحويل الهيدروجين إلى هيليوم؛ ومن ثمَّ تنبعث طاقة الشمس الهائلة. بالرغم من ذلك، فلم يكن أحدٌ يعتَقد حتى وقتٍ قريب أنَّ هذه الظاهرة تدخل في أيِّ عملية من عمليات الحياة.

لتقريب مفهوم النفق الكمي؛ يُمكن تخيُّلُه على أنه وسيلةٌ تَعبُر بها الجسيماتُ من أحَد جانبَي حاجزٍ ما إلى الجانب الآخَر، على نحوٍ تُخبرنا البديهةُ أنه مُستحيل. ما نقصده بكلمة «حاجز» في هذا السياق منطقةٌ في الفراغ لا يمكن اختراقُها فيزيائيًّا (من دون طاقة كافية)، مثل مجالات القُوى التي تستخدمها قصصُ الخيال العلمي. قد تتمثَّل تلك المنطقة في مادةٍ عازلة ضيقة تفصل طرَفَين من الموصِّلات الكهربية أو حتى فضاء فارغ، مثل الفجوة بين إنزيمَين في سلسلة التنفُّس. قد تكون أيضًا أحدَ أنواع تِلال الطاقة التي تناوَلْناها سابقًا، والتي تحدُّ من سرعة التفاعلات الكيميائية (ارجع للشكل ١-١). تخيل كرةً تُركل إلى أعلى تلٍّ صغير. لكي تصلَ هذه الكرةُ إلى القمة وتتدحرجَ من الجانب الآخر من التل؛ ينبغي أن تتلقَّى ركلةً قوية بالدرجةِ الكافية. فمع صعود المنحدر، ستتباطأ سرعتُها تدريجيًّا، ومن دون القدر الكافي من الطاقة (الركلة القوية)، ستتوقَّف وتتدحرج مرةً أخرى إلى حيث أتت. طبقًا للميكانيكا النيوتنية الكلاسيكية، لا سبيل لأن تعبر الكرةُ الحاجزَ إلا بامتلاكِ ما يكفي من الطاقة لرفعها إلى أعلى تلِّ الطاقة. لكن إذا كانت هذه الكرةُ إلكترونًا، على سبيل المثال، وكان التلُّ حاجزَ طاقةٍ تنافريًّا، فسيضعف احتمالُ أن يخترق الإلكترونُ الحاجزَ في شكل موجة، بل سيخترق الحاجزَ من طريقٍ بديل ذي فاعليةٍ أكبر. وهذا الطريق البديل هو النفقُ الكمي (انظر الشكل ٣-٥).

من السمات المهمة في ميكانيكا الكم أنه كلما خفَّ وزنُ الجسيم، سهل عليه القيامُ بالنفق الكمي. لا غَرْو إذن أنه فورَ أن أدرك العلماء أنَّ تلك العملية سِمةٌ واسعةُ الانتشار في العالم دون الذرِّي، اتضح أنَّ نفق الإلكترونات هو الأكثرُ شيوعًا لأنها جسيماتٌ أولية خفيفةٌ للغاية. وفي أواخر عِشرينيَّات القرن العشرين، فُسِّر انبعاثُ الإلكترونات من المعادن بفعل مجال كهربائي على أنه من تأثيرات ظاهرة النفق. فسَّر النفقُ الكمي أيضًا كيفية حدوث التحلُّل الإشعاعي: عندما تلفظ أنويةُ ذرات معينة — مثل نواة اليورانيوم — جُسيمًا في بعض الأحيان. وقد صار هذا التفسيرُ أولَ تطبيق ناجح لميكانيكا الكم على مسائل الفيزياء النووية. أما في الكيمياء، فقد أصبح النفقُ الكميُّ للإلكترونات والبروتونات (أنوية الهيدروجين) وحتى الذرات الأثقل، من الظواهر المفهومة جيدًا في الوقت الحالي.

ومثلما هو الحال مع العديد من الظواهر الكمِّية الأخرى، فمن أهم سِمات النفق الكمي أنه يعتمد على طبيعة جسيمات المادة الشبيهة في انتشارها بالموجة. لكن كي يتمكنَ جسمٌ مكوَّن من جسيماتٍ عديدة من شَقِّ نفق كمي، ينبغي أن يحافظ على خصائص



شكل ٣-٥: اختراق النفق الكمي لمشهد الطاقة.

الموجة لجميع مكوناته وهي تتحرك بخُطًى متَّسقة تتزامن فيها قممُ الموجات وقيعانها، وهو ما نشير إليه باسم ترابط النظام، أو «تناغمه». أما فكُّ الترابط فهو العملية التي تَحيد فيها الموجات الكمية العديدة عن الترابط مع بعضِها البعض بسرعة وتلغي أيَّ سلوكٍ جماعي يتَّسم بالتناغم، مما يُدمر قدرة الجسم على تكوين نفقٍ كمي. فلِكي يُشكل الجسيم نفقًا كميًّا، لا بد أن يبقى في شكل موجةٍ كي يتسرَّب من خلال الحاجز. وهذا هو السببُ في أنَّ الأجسام الكبيرة مثل كرة القدم، لا تُشكل نفقًا كميًّا؛ إذ إنها تتألَّف من تريليونات الذرات التي لا يُمكن أن تتصرف على نحوٍ موجي متناسق ومترابط.

وفقًا للمعايير الكمية، تُعَد الخلايا الحية أيضًا أجسامًا كبيرة، ومن ثمَّ يبدو للوهلة الأولى من غير المُحتمل أن تحدث ظاهرةُ النفق الكمي داخل الخلايا الحية الحارة والرطبة التي تتحرك ذراتُها وجزيئاتها على الأرجح بطريقةٍ غير متَّسقة في معظم الأحيان. بالرغم من ذلك، فقد اكتشفنا أنَّ التكوين الداخلي للإنزيمات مختلف؛ فجسيماته تتبع حركةً منتظمةَ الإيقاع لا حركةً فوضوية. ولهذا سنستكشف ما قد يُشكله هذا الإيقاعُ المنتظم من فارقٍ في الحياة.

## النفق الكمي للإلكترونات في علم الأحياء

استغرق الأمر عدةَ سنوات حتى تُشرَح درجات الحرارة غيرُ المتوقَّعة في نتيجةِ تجربة ديفولت وتشانس عام ١٩٦٦ شرحًا وافيًا. ظهر عالمٌ أمريكي آخَر تخصَّص في عدة مجالات تتنوَّع بين علم الأحياء الجزيئي والفيزياء وعلوم الكمبيوتر، وهذا العالم الأمريكي

هو جون هوبفيلد. اشتهر هوبفيلد بعمله على تطوير الشبكات العصَبية في علم الحوسبة، لكنه كان مهتمًّا بشدةٍ بالعمليات الفيزيائية المتضمَّنة في علم الأحياء. وفي عام ١٩٧٤، نشر ورقة بحثية بعنوان «انتقال الإلكترونات بين الجزيئات الحيوية عن طريق الأنفاق المنشطة حراريًّا»[8] طور فيها نموذجًا نظريًّا يشرح النتيجة التي توصَّل إليها ديفولت وتشانس. أوضح هوبفيلد أنه في درجة الحرارة المرتفعة، تكون الطاقة الاهتزازية للجزيئات كافيةً بما يسمح للإلكترونات أن تثبَ الحاجزَ من دون شقِّ نفَق. ومع انخفاض درجة الحرارة، ستصبح الطاقةُ الاهتزازية غيرَ كافية لحدوث التفاعل بين الإنزيمات. غير أنَّ ديفولت وتشانس وجَدا أنَّ التفاعل يحدث بالفعل في درجات الحرارة المنخفضة. ولهذا اقترح هوبفيلد أنه في درجات الحرارة المنخفِضة يصبح الإلكترون في حالةٍ تصل به إلى منتصف المسافة على منحدر الطاقة؛ ومن ثمَّ تصبح المسافة التي يحتاج إلى قطعها أقصرَ ممَّا لو كان مستقرًّا عند سفح المنحدر، وهو ما يُعزز فرصَه في عمل نفقٍ كمي عبر الحاجز. وقد أصاب في اقتراحه بالفعل؛ ذلك أنَّ انتقال الإلكترونات عبر النفق الكمي يحدُث حتى في درجات الحرارة المنخفضة للغاية، مثلما وجد ديفولت وتشانس.

في الوقت الحالي، قلةٌ فقط من العلماء هم مَن يَشكُّون في أن الإلكترونات تنتقلُ على مدار السلاسل التنفُّسية عبر النفق الكمي. وهذا يُرسخ أهمَّ التفاعلات التي تستفيد من الطاقة في خلايا الميكروبات والحيوانات (التي لا تقوم بالبناء الضوئي) داخل مجالِ علم الأحياء الكمي، وسنتناولُ نوع التفاعلات التي يتضمَّنُها البناءُ الضوئي في الفصل التالي. غير أنَّ الإلكترونات خفيفةٌ للغاية حتى بمقاييسِ العالم الكمي، وسيُصبح سلوكها «شديد الشبَه بالموجات» حتمًا في نهاية المطاف. وبناءً على هذا، لا ينبغي التعامُل معها على أنها جسيماتٌ كلاسيكية صغيرة تتحرَّك وتقفز، وإن كانت لا تزال تُعامَل بتلك الطريقة في العديد من الكتابات القياسية في الكيمياء الحيوية التي لم تزَل تَستخدِم نموذجَ «المجموعة الشمسية» للذرَّة. سيكون من اللائق تشبيهُ الإلكترونات في الذرة بسحابةٍ موجية منتشرة من «الإلكترونات» تُحيط بنواةٍ صغيرة هي «سحابة الاحتمال» التي ناقَشْناها في الفصل الأول. وربما لا يكون من المُدهش للغاية إذن أنَّ موجات الإلكترونات يمكن أن تخترقَ حواجز الطاقة مثلما تخترقُ موجاتُ الصوت الجدرانَ — كما ذكرنا في الفصل الأول — حتى وإن كان ذلك في الأنظمة البيولوجية.

ماذا إذن بشأن الجسيماتِ الأكبر مثل البروتونات أو حتى الذرات ككل؟ هل تستطيع تلك الجسيمات شقَّ نفقٍ في الأنظمة البيولوجية؟ قد تظن للوهلة الأولى أن الإجابة هي لا.

فالبروتون الواحد أثقلُ من الإلكترون بمقدار ألْفَي مرة، ومن المعروف أنَّ النفق الكميَّ يمتاز بدرجةِ حساسيةٍ كبيرة تجاه مدى ضخامةِ جُسيم النفق؛ فالجسيمات الصغيرة تشقُّ النفق بسهولة، في حين تجد الجسيمات الثقيلة صعوبةً في شقِّ الأنفاق ما لم تكن المسافةُ المراد قطعُها قصيرةً للغاية. بالرغم من ذلك، توضح التجارِبُ الأخيرة أنه حتى هذه الجسيمات الضخمة نسبيًّا قادرةٌ على شق نفقٍ كمي في التفاعلات الإنزيمية.

## نقل البروتونات

لعلك تتذكَّر أنه من بين الأنشطة الأساسية لإنزيم الكولاجيناز (ارجع للشكل ٣-٤)، إلى جانب تحفيز نقل الإلكترونات، نقل البروتونات لتحفيزِ تفكيك سلسلة الكولاجين. وكما ذُكر سابقًا، هذا التفاعل من أشهَر خُدَع مناورات الجسيمات التي تُنفذها الإنزيمات. يتضمَّن نحو ثلثِ تفاعلات الإنزيمات نقل ذرَّة هيدروجين من مكانٍ إلى آخَر. لاحظ هنا أن «ذرة الهيدروجين» يمكن أن تعنيَ عدة أشياء: يمكن أن تكون ذرة هيدروجين محايدة H تتكوَّن من إلكترون حول نَواتها (بروتون)، أو أيون هيدروجين موجب الشحنة $H^+$، وهو عبارة عن نواة عارية؛ أي: بروتون من دون إلكترونِه، أو حتى أيون هيدريد سالب الشحنة؛ أي: ذرة هيدروجين بها إلكترونٌ إضافي $H^-$.

أيُّ عالم جاد في الكيمياء أو الكيمياء الحيوية سيقول من فوره إن نَقْل ذرات الهيدروجين (البروتونات) داخل الجزيئات وفيما بينها؛ لا يعني ضِمنًا بالضرورة وجودَ أيِّ تأثيرٍ كَمِّي، أو على الأقل لا ينطوي على تأثير كمي يتطلَّب منَّا أن نحتكم على نحوٍ مباشر إلى عمليات العالم الكميِّ الأكثرِ غرابةً مثل النفق الكمي. في واقع الأمر، بالنسبة إلى معظم التفاعلات الكيميائية التي تحدُث في درجات الحرارة التي تعمل فيها الحياة، يُعتقد أن البروتونات تتحرَّك في معظم الأحيان من جزيءٍ إلى آخَر بقفزاتٍ حرارية غير كمِّية. ولكن البروتونات تشقُّ نفقًا كَميًّا في التفاعلات الكيميائية القليلة التي يمكن تمييزُها من خلال عدم اعتمادها النسبي على درجة الحرارة، مثلما أوضح كلٌّ من ديفولت وتشانس بشأن النفق الكمِّي للإلكترونات.

تعمل الحياة في درجاتِ حرارة مرتفعة (بمقاييس العالم الكمي). لذا على مدار معظم تاريخ الكيمياء الحيوية، افترض العلماءُ أن النقل الإنزيمي للبروتونات يتمُّ بالكامل عن طريق آلية القفز (غير الكمية) من أعلى حاجز الطاقة.[١٠] لكن تغيرَت تلك الرؤية في عام ١٩٨٩ حينما قدَّمَت جوديث كلينمان وزملاؤها من جامعة بيركلي أول دليلٍ مباشر

على حدوث ظاهرة النفَق الكمي فيما يتعلَّق بالبروتونات في تفاعلات الإنزيمات.[9] كلينمان عالمةٌ كيمياء حيوية دافعَت كثيرًا عن أهميةِ ظاهرة النفق الكمي فيما يتعلق بالبروتونات في الآلية الجزيئية للحياة. وفي الحقيقة، لقد ذهبَت إلى حدِّ الادعاء بأنها من أهم الآليات وأكثرِها انتشارًا في علم الأحياء ككل. استند الاكتشافُ الذي توصَّلَت إليه في هذا المجال إلى دراسة إنزيمٍ مُعيَّن في الخميرة يُسمَّى نازعةَ هيدروجين الكحول (ADH)، ووظيفته نقل بروتون من جُزيءِ كحول إلى جزيءٍ آخَر صغير يُسمى نيكوتيناميد الأدينين الثنائي النكليوتيد المتأكسِد (NAD) لتكوين نيكوتيناميد الأدينين الثنائي النكليوتيد المختزل (وهو جُزيء قابلناه بالفعل وقُلنا عنه إنه الحاملُ الأساسي للإلكترونات في الخلية). تمكَّن الفريق من تأكيد حدوث ظاهرة النفَق الكمي فيما يتعلَّق بالبروتونات عن طريق استخدام أسلوبٍ عبقري يُسمى «تأثير النظائر الحركية». هذه الفكرة معروفةٌ جيدًا في الكيمياء وتستحقُّ شرحًا متأنِّيًا هنا، حيث إنها تُساعد في توفير أحدِ الأدلة الأساسية في علم الأحياء الكمي؛ ولذا سنتطرَّق إليها عدة مرات في هذا الكتاب.

## تأثير النظائر الحركية

هل سبق لك أن صعدت تلًّا شديد الانحدار بدرَّاجة ووجدت الصاعدين على أقدامهم هناك يجتازونك؟ على الأرض المسطَّحة، لا تُوجَد مشكلةٌ في ركوب الدراجة واجتياز أيِّ عدد من المُشاة، وحتى العدَّائين منهم، من دون جهد؛ إذن فلماذا ركوب الدراجة ليس فعالًا كثيرًا على التلال؟

تخيَّل أنك بدلًا من ركوب الدراجة ترجَّلتَ عنها وجعلتَها تمشي بجوارك سواء على الأرض المسطحة أو صعودًا على التل. الآن، تُصبح المسألة واضحة. على التل، يجب أن تدفع الدراجةَ وكذلك نفسَك لصعود المنحدَر. إن وزن الدراجة الذي ليس مُهمًّا في حركتها الأفقية بطول طريقٍ مسطح، يُصبح الآن عبئًا عليك عندما تُحاول صعودَ التل؛ حيث يجب رفعُ وزن الدرَّاجة عدة أمتار ضد جاذبية الأرض. وهذا ما يدفع جهات تصنيع دراجات السباق إلى إبراز أهمية خفَّة وزن درَّاجاتهم. من الواضح أن وزن الجسم يُحدث فرقًا كبيرًا فيما يتعلق بسهولةِ تحريكه، ولكن الدراجة في مثالنا توضح أن الفرقَ يعتمد على نوع الحركة التي نتحدَّث عنها.

والآن، تخيَّل أنك تريد اكتشافَ هل الأرض الممتدَّة بين مدينتَين — ولنقُل المدينة أ والمدينة ب — مسطَّحة أم منحدِرة، ولكنك لا تستطيع السفرَ بين المدينتَين بنفسك.

تطرأ على بالك إحدى الاستراتيجيات الممكنة عندما تكتشف أن هناك مكتبَ بريدٍ يقع بين المدينتَين ويعمل به سُعاة بريد يركبون إمَّا دراجات خفيفة أو ثقيلة. لاكتشاف هل الأرض الممتدَّة بين المدينتَين مسطحةٌ أم منحدرة، ما عليك إلا أن تُرسل مجموعةَ طرودٍ متماثلة بين المدينتَين، بحيث تُرسل نصفها مع سُعاة بريد يركبون دراجاتٍ خفيفةً، والنصف الآخر مع سُعاة يركبون دراجاتٍ أثقل. إذا اكتشفتَ أن توصيل الطرود جميعها استغرق الوقت نفسَه تقريبًا، فيمكنك استنتاجُ أن الأرض الممتدَّة بين المدينتين على الأرجح مسطحةٌ تمامًا؛ لكن إذا استغرق توصيلُ كل الطرود على الدراجات الثقيلة وقتًا أطولَ بكثير، فستستنتج أن الأرض الممتدَّة بين المدينة أ والمدينة ب على الأرجح منحدرة. ومن ثم يُصبح سُعاة البريد هؤلاء بمنزلة مِسْبارٍ لتحديد مدى تسطُّح إحدى الأراضي أو انحدارِها.

ومثل الدراجات، تكون الذرَّات في كل عنصرٍ كيميائي في شكل مجموعاتٍ ذاتِ أوزان مختلفة. لنضرب المثل بذرَّة الهيدروجين حيث إنها أبسطُ الذرات، وأكثرُ ما يُهمُّنا في هذا المقام. يتحدَّد العنصر بعدد البروتونات التي تُوجَد داخلَ نَواته (بالإضافة إلى العدد المُساوي المُناظر له من الإلكترونات التي تُحيط بالنواة). ومن ثم يحتوي الهيدروجين على بروتون واحد في نواته، والهيليوم على بروتونين، والليثيوم على ثلاثة، وهكذا. ولكن تحتوي أنويةُ الذرات أيضًا على نوعٍ آخرَ من الجسيمات؛ ألا وهو النيوترون الذي قابلناه في الفصل الأول حينما ناقَشْنا اندماجَ أنوية الهيدروجين داخل الشمس. إن إضافة النيوترونات إلى النواة يجعل الذرةَ أثقل، ومن ثم تُغير سِماتها الفيزيائية. إذا كانت ذرَّات عنصر معيَّن تحتوي على أعدادٍ مختلفة من النيوترونات، فسيُطلق عليها اسم «النظائر». النظير العادي لذرة الهيدروجين هو الأخف، حيث إنه لا يحتوي إلا على بروتونٍ واحد وإلكترونٍ واحد. يَشيع هذا الشكلُ من الهيدروجين بكثرة. ولكن يُوجَد نظيرا هيدروجين أندر وأثقل؛ وهما: الديوتيريوم ويحتوي على نيوترون واحد بالإضافة إلى البروتون في نواته، والتريتيوم ويحتوي على نيوترونَين.

بما أن الخصائص الكيميائية للعناصر يُحددها في الغالب عددُ الإلكترونات التي تحتوي عليها ذراتُها، فإن النظائر المختلفة للعنصر نفسِه — التي تختلف أعدادُ النيوترونات الموجودة في أنويتها — ستكون لها خصائصُ كيميائية مماثلةٌ للغاية، ولكنها ليست متطابقة. يتضمَّن تأثيرُ النظائر الحركية قياسَ مدى حساسيةِ التفاعل الكيميائي تجاه تغيُّر الذرات من نظائرَ خفيفةٍ إلى أخرى ثقيلة، ويُعرَف بأنه النسبة بين معدلات التفاعل المرصودة مع النظائر الثقيلة والخفيفة. على سبيل المثال، إذا دخَل الماء

في أحد التفاعلات، فإن ذرات الهيدروجين في جزيئات الماء يمكن أن تحلَّ محلَّها نظائرُ أثقلُ منها، وهي الديوتيريوم أو التريتيوم؛ لتكوين أكسيد الديوتيريوم أو أكسيد التريتيوم. ومثلما هو الحال مع مثال سُعاة البريد راكبي الدراجات، قد يكون التفاعل حساسًا تجاه تغيير وزن الذرات وقد لا يكون حساسًا تجاهه، ويعتمد ذلك على الطريق الذي تسلكه الموادُّ المتفاعلة كي تتحولَ إلى موادَّ ناتجة.

تُوجُد عدةُ آليات مسئولة عن تأثيرات النظائر الحركية الكبيرة، والنفق الكمِّي من تلك الآليات وهو يتَّسم، شأنه شأنُ الصعود بالدراجة، بدرجةِ حساسية قُصوى تجاه كتلة الجسيم الذي يُحاول شقَّ النفق. تؤدي زيادةُ كتلة الجسيم إلى جعل سلوكِه أقلَّ شبهًا بسلوك الموجة، ومن ثم يقلُّ احتمال أن ينفذَ الجسيمُ من خلال حاجز الطاقة. لذا، تؤدي مضاعفةُ كتلة الذرة، على سبيل المثال، بالتغيير من ذرةِ هيدروجين عادية إلى ذرةِ ديوتيريوم، إلى ضَعْف احتمالية عملِ نفقٍ كمي.

إذن، قد يدلُّ وجودُ تأثير نظائرَ حركية كبير على أن آلية التفاعل — أي: المسار بين الموادِّ المتفاعلة والمواد الناتجة — تتضمَّن نفَقًا كَميًّا. لكن قد لا يكون ذلك قاطعًا حيث إن التأثير قد يرجع إلى إحدى العمليات الكيميائية الكلاسيكية (غير الكَميَّة). لكن إذا كان النفقُ الكمي داخلًا في التفاعل، فمن المفترض أيضًا أن يُظهر التفاعلُ استجابةً غريبة تجاه درجة الحرارة؛ بمعنى أن معدَّله ينبغي أن يستقرَّ في درجات الحرارة المنخفِضة، تمامًا مثلما أوضح ديفولت وتشانس فيما يتعلَّق بالنفق الكميِّ للإلكترونات. وهذا بالضبط ما اكتشفَته كلينمان وفريقُها بشأن إنزيم نازعة هيدروجين الكحول؛ وطرحَت النتيجةُ دليلًا قويًّا على أن النفق الكمي كان له دورٌ في آلية التفاعل.

انطلق فريق كلينمان بعد ذلك ليجمع أدلة قوية على شيوع النفق الكمي للبروتونات في العديد من التفاعلات الإنزيمية في أنواع درجات الحرارة التي تدور فيها الحياة. وأجرت عدةُ فرق أخرى — مثل فريق نايجل سكروتون بجامعة مانشستر — تجاربَ مُشابهة باستخدام إنزيماتٍ أخرى وأثبتَت وجودَ تأثيراتِ نظائر حركية تُشير بقوةٍ إلى حدوث ظاهرة النفق الكمي.[10] لكن لا تزال الطريقةُ التي تُحافظ بها الإنزيمات على الترابط الكمِّي لتحفيز النفق الكمي موضوعًا مثيرًا للجدل. كان معروفًا بعضَ الوقت أن الإنزيمات ليست ساكنة، بل إنها لا تتوقَّف عن الاهتزاز في أثناء تفاعلاتها. على سبيل المثال، يُفتح «فكًّا» إنزيم الكولاجيناز ويُغلق كلما فَكَّكا رابطةَ كولاجين. اعتُقِدَ أن هذه الحركات إما أنها طارئةٌ على آلية التفاعل، أو أنها لها دورٌ في احتجاز الركائز وإدخالِ كلِّ الذرات المتفاعلة

ضمن النسق الصحيح. وعلى الرغم من ذلك، يزعم الآن الباحثون في علم الأحياء الكميِّ أن هذه الاهتزازات هي ما يُطلق عليها «الحركات القائدة» التي وظيفتها الأساسية هي التقريب بين الذرات والجزيئات بالقدرِ الذي يُتيح لجُسيماتها (الإلكترونات والبروتونات) القيامَ بعملية النفَق الكمي.[11] سنعود إلى هذا الموضوع في الفصل الأخير من الكتاب؛ حيث إنه من أمتع الموضوعات في علم الأحياء الكميِّ وأسرعها تطورًا.

## إذن، هل ما سبق يُرسخ الجانب الكميَّ في علم الأحياء الكمي؟

صنَعَت وفكَّكَت الإنزيماتُ كلَّ جزيء حيوي داخل كلِّ خلية حية؛ سواءٌ كانت حيةً الآن أم قبل ذلك. وهي تُعدُّ من العوامل الحيوية الأساسية للحياة. لذا، يطرح لنا اكتشاف أن بعض الإنزيمات — أو ربما جميعها — تعمل بتحفيز إزالة الطابَع المادي للجسيمات من نقطةٍ ما في الفراغ وإضفاءِ الطابَع الماديِّ الفوري عليها في نقطةٍ أخرى؛ رؤيةً جديدة بشأن لغز الحياة. وفي حين أنه لا تزال هناك العديدُ من المسائل العالقة بشأن الإنزيمات التي يجب فَهمُها فهمًا أفضلَ مثل دور حركات البروتينات، فلا شكَّ أن النفق الكميَّ له دورٌ في طريقة عملها.

وعلى الرغم من ذلك، تنبغي مواجهةُ نقدٍ طرَحه العديدُ من العلماء الذين يقبلون النتائج التي توصَّلَت إليها كلينمان وسكروتون وغيرُهما، لكنهم يزعمون أن دور التأثيرات الكمية في علم الأحياء يُشبه دورها في تشغيل القطارات البخاريَّة؛ فهي موجودةٌ على الدوام ولكنها ليست ذاتَ صلةٍ على نحوٍ كبير لفهم طريقة عمل أيٍّ من النظامَين. وكثيرًا ما تُذكر حُجتهم في النقاشات حول ما إذا كانت الإنزيمات «تطوَّرَت» للاستفادة من الظواهر الكمية مثل النفق الكمي أم لا. يقول النُّقاد إنه لا مفرَّ من ظهور الظواهر الكمية في العمليات البيولوجية في ضوء الأبعاد الذَّرية لمعظم التفاعلات الكيميائية الحيوية. وإنهم على حقٍّ إلى حدٍّ ما. فالنفق الكميُّ ليس سحرًا؛ إنه يحدث في الكون منذ نشأته. بالتأكيد إنه ليس خدعةً «اخترعتها» الحياة بطريقةٍ أو بأخرى. ولكننا نرى أن وجود تلك الظاهرة في نشاط الإنزيم ليس حتميًّا البتة في ضوء الحرارة والرطوبة والزحام داخل الخلايا الحية.

تذكَّر أن الخلايا الحية أماكنُ شديدة الزحام؛ فهي مكتظةٌ بجزيئات معقَّدة لا تتوقفُ عن الاهتياج والاضطراب، وذلك على نحوٍ مُماثل لحركة الجزيئات التي تُشبه كرات البلياردو التي أوضَحْناها في الفصل السابق، وقلنا إنها مسئولة عن دفع القطارات البخارية لصعود التلال. إذا كنتَ تتذكر، إنها تلك الحركة العشوائية التي تُبدد الترابط

الكميَّ الدقيق وتُربكه، وتجعلنا نرى العالَم من حولنا «طبيعيًّا». لم يكن متوقَّعًا أن يصمد الترابط الكمي في هذا الاضطراب الجزيئي، ولذا كانت مفاجأةً كبرى حين اكتُشف تمكُّنُ التأثيرات الكمية مثل النفَق الكمي من مقاومةِ اضطراب بحر الجزيئات الذي يُمثل الخلايا الحية. وفي النهاية، لم ينبذ معظمُ العلماء فكرةَ إمكانية حدوث النفق الكمي وغيره من الظواهر الكمية الدقيقة في علم الأحياء إلا منذ عَقْدٍ من الزمن أو نحو ذلك. وحقيقة وجودها في هذه البيئات تقترح أن الحياة تتَّخذ تدابيرَ خاصةً للاستفادة من المزايا التي يُوفرها العالم الكمي «كي تُحافظ على عمل خلاياها». ولكن ما تلك التدابير؟ كيف تمنع الحياةُ اقترابَ ذلك العدوِّ للسلوك الكمي، ألا وهو فكُّ الترابط؟ هذا من أكبر الألغاز في علم الأحياء الكمي، ولكن تُفكُّ شفراته رويدًا رويدًا، وذلك كما سنكتشف في الفصل الأخير.

لكن قبل أن ننتقل إلى موضوعٍ آخر، يجب أن نعود إلى حيث تركنا غواصتَنا النانوية؛ أي: إلى الموقع النشط لإنزيم الكولاجيناز داخل ذيل الشرغوف الآخذِ في الاختفاء. نُغادر الموقع النشط بسرعة مع انفتاح فكَّي الإنزيم مرةً أخرى؛ مما يُتيح تحرُّر سلسلةِ الكولاجين المفكَّكة (وكذلك نحن!) ومِن ثم نترك الإنزيم الذي يُشبه البلطينوس مستعدًّا للإطباق على الرابطة الببتيدية التالية في السلسلة. عندئذٍ، نأخذ جولةً قصيرة فيما بقي من جسم الشرغوف كي نَشهد الأنشطةَ المُنظمة التي تقوم بها بعضُ الإنزيمات الأخرى التي لا تقلُّ أهميةً في حياة الكائن الحي. عندما نُتابع الخلايا المهاجرة من الذيل الآخذِ في التقلُّص وتحوُّلها إلى أطرافٍ خلفية، سنشهد بناءَ ألياف كولاجين جديدة تُشبه خطوطَ سككٍ حديدية جديدة؛ كي تدعم بناء جسم الضفدع البالغ، حيث إنه يُبنى غالبًا من الخلايا المهاجرة من الذيلِ الآخذِ في الاختفاء. هذه الأليافُ الجديدة تبنيها إنزيماتٌ تحتجز وحدات الأحماض الأمينية الفرعية التي يُطلقها إنزيم الكولاجيناز، وتربطها ببعضها مرةً أخرى في ألياف كولاجين جديدة. وعلى الرغم من عدم توفر الوقت الكافي لدينا للتعمُّق داخل هذه الإنزيمات، فإنه يُوجَد داخل مواقعها النشطة النوعُ نفسه من الحركات ذاتِ الإيقاع المنظم الذي شهدناه داخل إنزيم الكولاجيناز، ولكنه يقوم بالتفاعل العكسي هذه المرة. وفي أماكنَ أُخرى، فإن كل الجزيئات الحيوية للحياة — الدهون والحمض النووي والأحماض الأمينية والبروتينات والسكريات — تصنعها وتُفككها إنزيماتٌ مختلفة. بالإضافة إلى ذلك، كلُّ حركة يقوم بها الضفدع النامي تتمُّ على نحوٍ مماثل بوساطة الإنزيمات. على سبيل المثال، عندما يرى الحيوان ذبابة، تنتقل الإشارات العصبية التي تحمل الرسالة

من العينَين إلى الدماغ عن طريق مجموعةٍ من إنزيمات الناقلات العصبية التي تكتظُّ بها الخلايا العصبية. وعندما يُخرِج الضفدع لسانه ليلتقطَ الذبابة، فإن الانقباضات العضلية التي تسحب الذبابةَ للداخل يُحركها إنزيمٌ آخرُ يُسمى الميوسين الذي تكتظُّ به الخلايا العضلية، وهذا الإنزيم يُسبب انقباض تلك الخلايا. وعندما تدخل الذبابة إلى معدة الضفدع، يُطلق حشدٌ من الإنزيمات لتسريع هضمها وإخراج العناصر الغذائية منها حتى يمكن امتصاصُها. وتُحوِّل المزيدُ من الإنزيمات تلك العناصرَ الغذائية إلى أنسجةٍ في الضفدع، أو تحتجز طاقتَها عبر إنزيمات التنفُّس داخل عضيات الميتوكوندريا.

كل نشاط «حيوي» يقوم به الضفدع والكائنات الحية الأخرى، وكل عملية تُحافظ على حياتها — وحياتنا — تُسرعها الإنزيمات التي هي محركات الحياة، والتي يرجع الفضلُ في قُدرتها الخارقة على التحفيز؛ إلى قدرتها على تنظيم إيقاع حركات الجسيمات الأساسية، ومِن ثَم الانغماس في العالم الكَمِّي للاستفادة من قوانينه الغريبة.

لكن النفق الكمِّي ليس الميزة المحتملة الوحيدة التي توفِّرها ميكانيكا الكم للحياة. ففي الفصل التالي، سنكتشف أن أهمَّ تفاعلٍ كيميائي في المحيط الحيوي يتضمَّن خدعةً أخرى من العالم الكمي.

## هوامش

(١) تشير كلمة «نانو» إلى البِنَى التي تُقاس بالنانومتر؛ أي: ما يساوي واحدًا على مليارِ جزءٍ من المتر.

(٢) الخميرة فِطرٌ أحاديُّ الخلية.

(٣) توجد بالطبع استثناءاتٌ مهمة للغاية، تحديدًا المواد الكيميائية مثل الأكسجين التي لا تتوقف عن التجدد، على الرغم من أنها تفاعلية؛ وذلك بفعل عملياتٍ تحدث على كوكبنا، أبرزُها تلك التي تقوم بها كائناتٌ حية كالنباتات التي تُخرج الأكسجينَ إلى الغلاف الجوي.

(٤) يُطلَق على المادة الكيميائية الأولية في التفاعل اسمُ المادة المتفاعلة، لكن عند تسريع التفاعل بتوفيرِ مُحفزٍ كأحد الإنزيمات؛ يُشار إلى تلك المادة الكيميائية الأوَّلية باسم الركيزة.

(٥) تبدأ معظم أسماء الإنزيمات بمقطعٍ أوَّل يُمثل الجزيء الأوَّلي المستهلك في التفاعل — الركيزة — وتنتهي بالمقطع: «از»، وبذلك نعرف أن الكولاجيناز هو الإنزيم الذي يعمل على الكولاجين.

(٦) يُعرف هذا النوع من الروابط باسم الرابطة التَّساهمية.

(٧) الأيون عبارةٌ عن ذرةٍ أو جزيء يحمل شحنةً كهربية نتيجةَ فقدان إلكترونات (وحينها يُصبح أيونًا موجبًا)، أو إضافة إلكترونات (وحينها يُصبح أيونًا سالبًا).

(٨) لعلَّك تتذكَّر من الفصل الثاني، العُضيات عبارةٌ عن «أعضاء» للخلايا؛ بمعنى أنها بِنًى داخل الخلايا تُنفِّذ وظائفَ معينةً مثل التنفس.

(٩) يستخدم معظم العلماء وحدة كلفن (K) في قياس درجة الحرارة. التغيير بمقدار ١ كلفن في درجة الحرارة يعني التغييرَ بمقدار درجةٍ مئوية واحدة. رغم ذلك، يبدأ مقياس كلفن بما يُطلَق عليه الصفر المُطلَق، وهو يُساوي ٢٧٣ درجة مئوية تحت الصفر. ومن ثم تبلغ درجة حرارة جسم الإنسان مثلًا ٣١٠ كلفن.

(١٠) لعلَّك تتساءل عن أهمية النفق الكمي في شرح عمليات الاندماج داخل الشمس. لكن في الشمس، حتى درجات الحرارة العالية للغاية وعمليات الضغط الشديدة جدًّا ليست كافيةً للتغلب على التنافر الكهربائي الذي يمنع اندماجَ بروتونَين موجبَي الشحنة، ومن هنا يلزم تدخلُ ميكانيكا الكم لتقديم يدِ المساعدة.

الفصل الرابع

# النبضة الكمية

المادة التي تتكوَّن منها الشجرة هي الكربون، ولكن من أين يأتي الكربون؟ يأتي من الهواء؛ إنه ثاني أكسيد الكربون الموجود في الهواء. ينظر الناس إلى الأشجار ويعتقدون أن [مادة الشجرة] تأتي من الأرض؛ نظرًا إلى نموِّ النباتات من الأرض. لكن إذا سألتَ نفسك: «من أين تأتي تلك المادة؟» ستكتشف أن ... الأشجار تأتي من الهواء ... يدخل ثاني أكسيد الكربون والهواءُ إلى الشجرة ويُغيِّرانها إذ يطردان الأكسجين ... نعرف أن الأكسجين والكربون [في ثاني أكسيد الكربون] شديدا الالتصاقِ ببعضهما ... فكيف تتمكَّن الشجرة من إنهاء ذلك بمنتهى السهولة؟ ... عند سقوط أشعة الشمس، يُفك ترابُط الأكسجين عن الكربون ... ومِن ثم يُترك الكربون، والماء، ليكونا مادةَ الشجرة!

ريتشارد فاينمان[1]

يُعد معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا واحدًا من أعرق الصروح العلمية في العالم. يفتخر هذا المعهد، الذي تأسَّس عام ١٨٦١ في كامبريدج بولاية ماساتشوستس، بوجود تسعةٍ من الحائزين على جائزة نوبل بين أعضاء هيئة التدريس لديه، البالغ عددهم ألفَ أستاذ جامعي (وذلك في عام ٢٠١٤). ويتضمَّن خريجوه روَّادَ فضاء (ثلث رحلات الفضاء التابعة لناسا قام بها خريجون في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا) وسياسيين (منهم كوفي عنان الأمين العام الأسبق للأمم المتحدة والحائز على جائزة نوبل للسلام عام ٢٠٠١)، وروادَ أعمال مثل ويليام ريدينجتون هيوليت، المؤسس المشارك لشركة هيوليت-باكارد، وبالطبع الكثير من العلماء، من بينهم ريتشارد فاينمان العالم الحائز على جائزة نوبل الذي يُعد رائدَ الديناميكا الكهربية الكمية. لكن يُوجَد شيءٌ آخر يشتهر به المعهد وهو

شجرة تفاح. تنحدرُ هذه الشجرة في حديقة الرئيس تحت ظل قُبة المعهد البانثيونية الأيقونية، من شجرةٍ أخرى موجودة في الحدائق النباتية الملَكية بإنجلترا، والتي هي الأخرى تنحدِر مباشرةً من الشجرة الأصلية التي يُقال إن السير إسحاق نيوتن كان يجلس تحتها حينما لاحظ سقوط تفاحتِه الشهيرة.

منذ ثلاثة قرون ونصف، كان نيوتن يجلس تحت شجرة في مزرعةِ والدته بلنكنشاير ويتأمَّل سؤالًا بسيطًا ولكنه عميق، وهو: «لماذا يسقط التفاح؟» ربما نُسيء الأدبَ إذا قُلنا إنه لم يُوفَّق في الإجابة بأي حال من الأحوال؛ على الرغم من أنها أحدثَت ثورةً بالفعل في الفيزياء وكلِّ فروع العلوم في واقع الأمر، لكن يُوجَد جانبٌ لم ينتبه إليه نيوتن في هذا المشهد الشهير، ولم يتحدَّث عنه أحدٌ مذ ذاك، إنه السؤال: ماذا كانت تفعل التفاحة على الشجرة في المقام الأول؟ إذا كان سقوط التفاحة السريعُ على الأرض لغزًا، فما مدى صعوبةِ تفسير اندماج الهواء والماء بعضِهما مع بعض في لنكنشاير لتكوين جسم كروي عالق في أغصان شجرة؟ لماذا تعجَّب نيوتن من مسألةٍ تافهة نسبيًّا وهي سحبُ التفاحة باتجاه الأرض بفعل جاذبية الأرض ولم يتنبَّه إلى لغزٍ غير مفهوم البتة بشأن تكوين ثمرة الفاكهة في المقام الأول؟

من العوامل التي ربما تُفسر غياب الفضول لدى إسحاق نيوتن بشأن تلك المسألة هو الرأيُ الذي كان سائدًا في القرن السابع عشر بأنه على الرغم من أن قوانين الفيزياء يمكن أن تُفسِّر الآليات العجماء لجميع الأجسام بما فيها الكائنات الحية، فإن الديناميكية الداخلية الغريبة (التي حدَّدت طريقةَ نموِّ التفاحة، وغيرها من الأشياء) تُوجِّهها قوةٌ حيوية أو «دافع حيوي» تنبع من مصدرٍ خارق لا يمكن لأيِّ معادلة رياضية من صُنع البشر أن تَسبُر أغوارَه. لكن، وكما اكتشفنا بالفعل، المذهب الحيوي نسفَه ما تحقَّق من تقدُّم بعد ذلك في علوم الأحياء والجينات والكيمياء الحيوية والأحياء الجزيئية. لا يوجد عالمٌ جادٌّ اليوم يُشكك في إمكانية تفسير الحياة من داخل نطاق العلم، لكن تظلُّ هناك علامةُ استفهام بشأن العلم الذي يُمكنه طرحُ هذا التفسير على أفضلِ نحو. وعلى الرغم من الادِّعاءات البديلة التي طرَحَها علماء مثل شرودنجر، فلا يزال معظم علماء الأحياء يعتقدون أن القوانين الكلاسيكية كافية، مع خضوع الجزيئات الحيوية التي تُشبه كرات البلياردو والعِصيَّ والتي تشبه في سلوكها سلوكَ تلك الكُرات والعِصيِّ لقُوى نيوتن. وحتى ريتشارد فاينمان الذي كان ممَّن خلف شرودنجر في فكره، وصف عملية البناء الضوئي

(في الفِقرة المُقتبَسة في مُستهَلِّ هذا الفصل) بمصطلحات كلاسيكية خالصة إذ قال: «عند سقوط أشعَّة الشمس، يُفكُّ ترابط الأكسجين عن الكربون»؛ إذ رأى أن الضوء أشبهُ بمضرب جولف قادرٍ على ضرب كرة الجولف (الأكسجين) وإخراجها من جزيء ثاني أكسيد الكربون.

نشأ علما الأحياء الجزيئية وميكانيكا الكم على نحوٍ مُتوازٍ وليس تعاونيًّا. فنادرًا ما يحضر علماء الأحياء محاضرات في الفيزياء ولا يهتمُّ علماء الفيزياء بعلم الأحياء إلا قليلًا. لكن في أبريل عام ٢٠٠٧، كانت مجموعةٌ من أساتذة الفيزياء والرياضيات من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، التي كانت تعمل في مجالٍ لا يعرفه كثيرون، يُسمَّى نظريةَ المعلومات الكمية، تحضر أحدَ النوادي البحثية الذي يعقدونه بانتظام (وفيه يأخذ كلُّ عضوٍ دورَه في تقديم ورقةٍ بحثية جديدة وجدَها ضِمن الأدبيات العِلمية)، حين وصل أحدُ أفراد المجموعة ومعه نسخةٌ من صحيفة «ذا نيويورك تايمز» فيها مقالٌ يقول إن النباتات عبارةٌ عن «أجهزة كمبيوتر كمِّية» (سنَرِد إلى ذكر المزيد عن هذه الأجهزة العجيبة في الفصل الثامن). انفجر الجمعُ في الضحك. تذكر أحدُ أفراد الفريق وهو سيث لويد تلك المرة التي كانت أولَ مرة يسمع فيها هذا «الدجَل الكمي». ويقول متذكرًا: «ظنَنَّا أن هذا أمرٌ مضحك للغاية حقًّا ... وبدا لي أن هذا أغربُ شيء سمعتُه في حياتي.»[2] السبب الذي دفعهم إلى عدم التصديق هو أن العديد من ألمع المجموعات البحثية وأوفَرِها تمويلًا على مستوى العالم قضَت عُقودًا وهي تُحاول أن تكتشف طريقةً لتصميم جهاز كمبيوتر كمي، وهو جهازٌ قادر على تنفيذ عملياتٍ حسابية مُعيَّنة بسرعةٍ وكفاءة أكبرَ بكثير من أقوى جهاز كمبيوتر متوفر في العالَم في ذلك الوقت (إذ بدلًا من أن يعتمد الجهاز على وحدات بث المعلومات التي هي عبارة عن ٠ أو ١، سيسمح لها بأن تكون ٠ و١ في آنٍ واحد، ومن ثَم يستطيع القيام بكل العمليات الحسابية الممكِنة في الوقت نفسِه — وتلك هي الغاية الأساسية من المعالجة المتوازية). ورد في مقال الصحيفة أنَّ نَصْلَ عُشبٍ بسيط استطاع أن يُجري نوعَ الخدعة الكمية الكامنَ في صُلب الحوسبة الكمية. لا عجَب إذن من تعجُّبِ باحثي المعهد هؤلاء. ربما لم يتمكَّن العلماء من بناء كمبيوتر كميٍّ بالفعل، ولكن إذا كان المقال على حق، فربما كان بإمكانهم أن يلتهموا أحدَها في طبَق السلَطة على الغداء!

في هذه الأثناء، وفي مكانٍ ليس ببعيدٍ عن القاعة التي كانت تضج بضحكاتِ مجموعة النادي البحثيِّ المنعقدِ في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، كان هناك فوتون ضوء يُسافر بسرعة ١٨٦ ألف ميل في الثانية يندفع نحو شجرةٍ أصلها شهير.

## اللغز الرئيسي لميكانيكا الكم

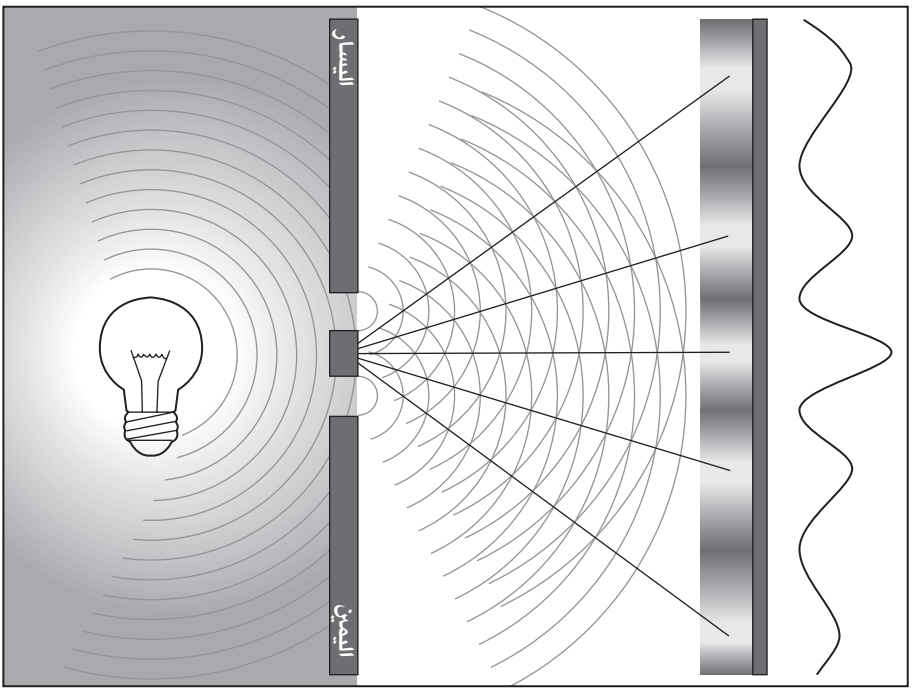
سنعود بعد قليل إلى ذلك الفوتون وتلك الشجرةِ وعلاقتهما المحتملة بالعالم الكَمِّي، ولكن أولًا ينبغي أن تتعرف على تجرِبةٍ بسيطة للغاية تُبرز حقًّا مدى غرابة العالم الكمي. وعلى الرغم من أننا سنبذل قصارى جهدنا لتقديم أفضلِ شرحٍ ممكن للمقصود بمفاهيمَ مثل «التراكب الكمي»، فلا شيء يُحقق فعلًا هذا القصدَ أفضل من تجرِبة الشقِّ المزدوج الشهيرة، والتي سنتناولها هنا.

ما تطرحه تجرِبةُ الشقِّ المزدوج أبسطُ وأقوى دليلٍ على أن «كل شيءٍ مختلف» في العالَم الكمي. يمكن أن يسلك الجسيمُ مسلكَ الموجة وينتشر عبر الفراغ ويمكن أن تسلك الموجةُ أحيانًا مسلك الجسيم الفردي ويُصبح لها موضعٌ مُحدد. سبق أن تَحدَّثنا عن ازدواجية الموجة والجسيم هذه في الفصل الأول وعلمت أنها سمةٌ غريبة وضرورية لتفسير كيف تُولِّد الشمس طاقتها، ثم عرَضْنا لها في الفصل الثالث لَمَّا رأينا كيف أن الخصائص الموجيَّة للإلكترونات والبروتونات تُتيح لها أن تتسرَّب من خلال حواجز الطاقة داخل الإنزيمات. في هذا الفصل، ستكتشف أن ازدواجية الموجة والجسيم هذه ضالعةٌ أيضًا في أهمِّ تفاعلٍ كيميائي حيوي في المحيط الحيوي، ألا وهو تحوُّل الهواء والماء والضوء إلى نباتاتٍ وميكروبات، وكذلك بقية المخلوقات الأخرى ولكن بطريقةٍ غير مباشرة. لكن يجب أولًا أن نكتشف كيف أن الفكرة الغريبة المتمثلة في أن الجسيمات يمكن أن تُوجَد في عدةِ أماكن في آنٍ واحد تدعمها تجرِبةٌ من أبسط التجارِب وألمعِها وأوسعها تأثيرًا، وهي التجرِبةُ التي «تقع في قلب ميكانيكا الكم» وذلك على حدِّ تعبير ريتشارد فاينمان.

لكنْ وجَب التنبيهُ إلى أن ما سيُذكر في هذا الصدد سيبدو مستحيلًا، وقد ينتابُك يقينٌ أنْ لا بد أنَّ هناك طريقةً عقلانية أكثرَ لتفسيرِ ما يجري. قد تجد نفسك تتساءل أين يَكمُن السرُّ الخفي فيما يبدو كخدعةٍ سحرية. أو ربما تفترض أن التجرِبة ليست سوى تكهُّناتٍ نظريةٍ يحلُم بها علماءُ لا يتوفر لديهم الخيالُ لِفَهم نواميس الطبيعة. ولكن ليس أيٌّ من هذين التفسيرَين صحيحًا. إن تجرِبة الشق المزدوج ليس لها أيُّ تفسير منطقي، ولكنها حقيقية وأُجريَت آلافَ المرات.

سنوضِّح التجرِبة على ثلاث مراحل: في أول مرحلتَين سنُمهد لمشهد التجرِبة بحيث يمكنك تقديرُ النتائج المحيرة في المرحلة الثالثة والأساسية.

في المرحلة الأولى، يُسلَّط شعاعُ ضوء أحاديُّ اللون (أي: يتكون من لونٍ، أو طولٍ موجي، واحد) على حاجزٍ ذي شقَّين ضيقين يسمحان بمرور الضوء إلى حاجزٍ آخَر (انظر الشكل ٤-١). بالتحكُّم الدقيق في عرض الشقَّين والمسافة بينهما والمسافة بين الحاجزَين، يمكننا إنشاءُ سلسلةٍ من الأشرطة المضيئة والمظلمة على الحاجز الثاني، وهو ما يُعرف بنمط التداخل.

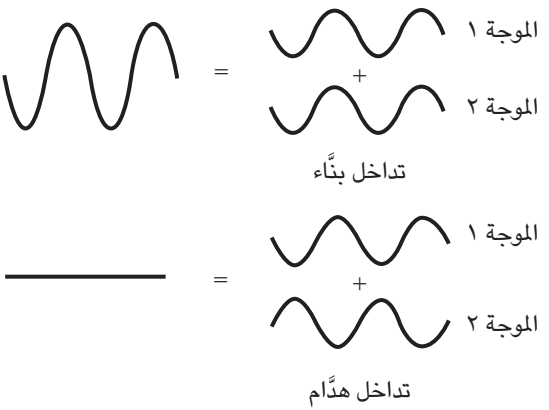



شكل ٤-١: تجربة الشق المزدوج، المرحلة الأولى. عند تسليط ضوءٍ أحادي اللون (أي: له طولٌ موَجي محدَّد) على الشقَّين، يصبح كلُّ شق بمنزلة مصدرِ ضوء جديد بالنسبة إلى الحاجز الثاني، ونظرًا إلى طبيعته الشبيهة بالموجة، ينتشر (يَحيد) الضوء لما ينعصر عبر كلِّ شق، ومن ثم تتداخل الموجات الدائرية بعضها مع بعض؛ مما يؤدي إلى ظهور أشرطةٍ مُضيئة ومُظلمة على الحاجز الخلفي.

أنماط التداخل سِمةٌ مُميِّزة للموجات وتَسهُل رؤيتها في أيِّ وسط موجي. ارْمِ حَصاةً في بِركة راكدة، وراقِبْ مجموعةَ الموجات الدائرية المتَّحدةِ المَركز، وهي تسير نحو الخارج من نقطةِ ارتطام الحصاة بالماء. ارمِ حَصاتَين في البِركة نفسِها وستُولِّد كلُّ حصاة موجاتها المتمددةَ المتحدةَ المركز، ولكن أينما تداخَلَت موجاتُ الحصاتَين فسترى نمط التداخل (انظر الشكل ٤-٢). وأينما تقابلَت قمةُ موجة مع قاعِ موجة أخرى، فستُلغي كلٌّ منهما الأخرى؛ مما يؤدي إلى اختفاء أيِّ موجة في تلك النقاط. وهذا النمط يُطلق عليه التداخل الهدَّام. وعلى العكس من ذلك، عندما تتقابل قمَّتان أو قاعان، فإنهما يُعزز بعضهما بعضًا؛ مما يُولد ضِعف السَّعَة الفردية للموجة، ويُطلَق على هذا النمطِ التداخُلُ البنَّاء. يمكن تكوينُ نمط إلغاء الموجات وتعزيزها هذا في أيِّ وسط موجي. في الحقيقة، إن إثبات عالم الفيزياء الإنجليزيِّ توماس يانج لتداخُل أشعَّة الضوء في نسخةٍ مبكرة من تجرِبة الشق المزدوج منذُ ما يَزيد على قرنَين هو ما أقنعه وأقنع معظمَ العلماء الآخرين بأن الضوء حقًّا عبارةٌ عن موجة.

التداخل الموضَّح في تجرِبة الشق المزدوج يرجع في المقام الأول إلى طريقةِ مُرور موجات الضوء من خلال الشقَّين، ثم انتشارها، وهي خاصيةٌ خاصة بالموجات تُعرف باسم الحيود، بحيث تتداخل الأشعَّة المارَّة من الشقين وتندمج — مثلما تفعل موجات الماء — قبل أن تصطدم بالحاجز الخلفي. وفي نقاطٍ معيَّنة على الحاجز الخلفي، ستصل موجاتُ الضوء المنبثقة من الشقَّين «متَّفقة الطَّوْر» حيث تَسير القممُ والقيعان بخُطًى متجانسةٍ؛ إما لأنها قطَعَت المسافة نفسَها حتى هذا الحاجز، أو لأن الفرق في المسافة المقطوعة من مضاعفات المسافة بين قِمَمها. أينما يحدث ذلك، تتَّحد قمم الموجات وقيعانُها بحيث تُكوِّن قممًا أعلى وقيعانًا أخفضَ وهو ما يُسمى بالتداخل البنَّاء. تُنشئ الموجات المندمجة ضوءًا عاليَ الشدة في تلك النقاط؛ مما يُنتج شريطًا مضيئًا على الحاجز. ولكن في نقاطٍ أخرى، يصل الضوءُ من الشقَّين «مختلِف الطور»، وعندئذٍ تتلاقى قمةُ موجة مع قاعِ موجة أخرى. تُلغي الموجاتُ بعضُها بعضًا في تلك النقاط؛ مما يؤدي إلى ظهور شريطٍ مظلم على الحاجز وهو ما يُسمى بالتداخل الهدَّام. وفيما بين هذين النقيضَين، لا تصل الموجاتُ «متَّفقةُ الطور» أو «مختلفةُ الطور» بالكامل؛ وبالتالي يبقى قدرٌ من الضوء. ولذا لا نرى تسلسلًا واضحًا من الأشرطة المضيئة والمظلمة على الحاجز، بل تباينًا سلسًا في الشدة بين ما يُعرَف باسم مَناطق الشدة العُظمى ومناطق الشدة الدنيا في نمَط التداخل. هذا التباين السلس في الشدة الذي يُشبه الموجةَ على نحوٍ ملائم من المؤشرات الأساسية

لظاهرة الموجة. وأحد الأمثلة المشهورة في هذا الصدد يُمكن أن نجدَه في موجات الصوت؛ يستمع الموسيقيُّ الذي يضبط إحدى الآلات الموسيقية إلى «النبضات»[1] التي تَنتُج عندما تكون نغمة قريبة جدًّا في التردُّد من نغمةٍ أخرى بحيث تصلان إلى أذنه مُتَّفِقتَي الطَّور أحيانًا ومختلفتَي الطَّور أحيانًا أخرى. هذا التباين في نمط اتحادِهما يُولِّد صوتًا إجماليًّا يعلو وينخفضُ بانتظام. ويرجع هذا التباينُ السلس في شدة الصوت إلى التداخل بين موجتَين منفصلتَين. لاحِظْ أن ضربَ المثل بهذه النبضات مثالٌ كلاسيكي تمامًا لا يتطلَّب شرحًا من منظورٍ كمي.




شكل ٤-٢: تداخل الموجات البنَّاء والهدَّام.

من العوامل الرئيسية في تجرِبة الشقِّ المزدوج أن شعاع الضوء المسلَّط على الحاجز الأول يجب أن يكون أحاديَّ اللون (أي: يتكون من طولٍ موجي واحد وفريد). على النقيض من ذلك، يتكون الضوءُ الأبيض، مثل ذلك المنبعِث من مصابيح الإضاءة العادية، من أطوالٍ موجية عديدة مختلفة (كل ألوان قوس قزح)، ومن ثم ستصلُ الموجات إلى الحاجز بنمطٍ مشوَّش. في تلك الحالة، وعلى الرغم من أن القممَ والقِيعان ستظلُّ تتداخَلُ بعضها مع بعض، فإن النمط الناتج سيكون مُعقدًا ومبعثرًا للغاية، ولن تتكوَّن أشرطةٌ ساطعة مميزة على الحاجز. وبالمثل، وعلى الرغم من سهولة تكوين نمطِ تداخلٍ عند رميٍ

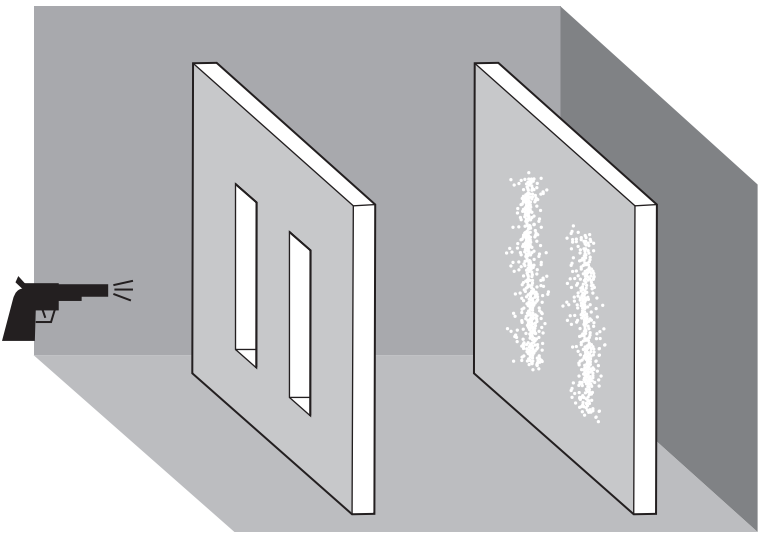
حَصاتين في بِركة، فإن شلَّال المياه الكبير المتدفِّق إلى البركة يولِّد موجاتٍ عديدةً للغاية يستحيل معها تكوينُ أيِّ نمطِ تداخلٍ متَّسق.

والآن لننتقلْ إلى المرحلة الثانية من تجرِبة الشق المزدوج التي سنُنفذها بإطلاقِ رصاصاتٍ على الحاجز بدلًا من تسليط الضوء عليه. المغزى من ذلك هو استخدامُ جُسيمات صُلبة بدلًا من موجات منتشرة. بالطبع لا بد أن تمرَّ كلُّ رصاصة من خلال أحدِ الشقَّين، وليس من كِلَيهما. وبمرور عددٍ كافٍ من الرَّصاصات، سنرى أن الحاجز الخلفي سيتكوَّن فيه شريطان مقابلان للشقَّين من ثقوب الرصاصات (انظر الشكل ٤-٣). من الواضح أننا لا نتعاملُ مع موجات. كل رصاصة عبارةٌ عن جُسَيم مُستقلٍّ وليس له علاقةٌ بأي رصاصةٍ أخرى، ومن ثم لا يُوجَد تداخل.

ننتقلُ الآن إلى المرحلة الثالثة وهي «الخدعة السحرية» الكمية. نُكرِّر التجرِبة باستخدام الذرَّات بدلًا من الرصاص. نستخدِم مصدرًا يمكن أن ينتج حُزمةً من الذرَّات ويُطلِقها على حاجزٍ له شقَّان ضيقان بالقدرِ المُلائم.[٢] لاكتشافِ وصول الذرات؛ يُغطَّى الحاجزُ الثاني بطِلاءٍ ضوئي، بحيث يُظهر بقعةً ساطعةً صغيرة حيثما تسقط عليه إحدى الذرات.

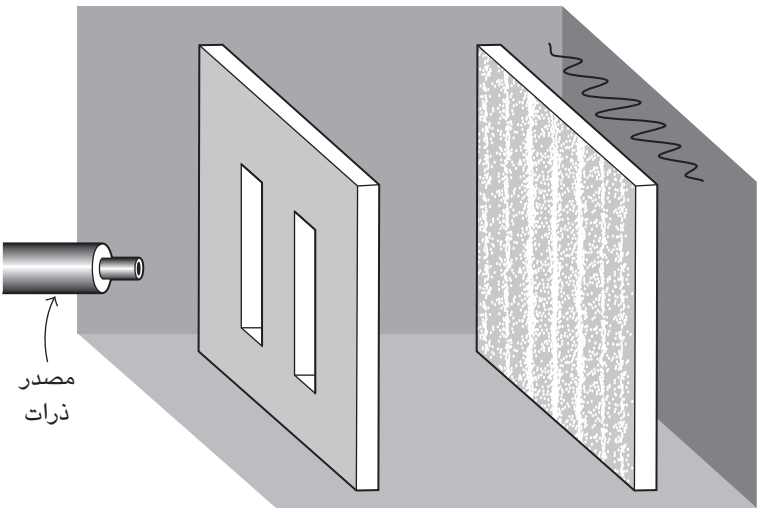
ومن منظور المنطق على المستوى المجهري، فلا بد أن تتصرف الذرات وكأنها رصاصاتٌ متناهية الصِّغر. نجري التجرِبة أولًا مع فتح الشقِّ الأيسر فقط وسنرى شريطًا من بُقَع الضوء على الحاجز الخلفي خلف الشقِّ المفتوح. كان هناك قدرٌ من انتشار البُقَع بحيث قد يُفترَض أنها ناتجةٌ عن ارتطام بعض الذرات بالحافَاتِ وحُيودها، بدلًا من المرور عبر الشق مرورًا منتظمًا. بعد ذلك، نفتح الشقَّ الثانيَ أيضًا وننتظر تكوُّنَ البقع الساطعة على الحاجز الخلفي.

إذا طُلب منك التنبُّؤ بتوزيع البقع الساطعة وأنت لا تعرف شيئًا عن ميكانيكا الكم، فمن الطبيعي أن تُخمن أنه سيُشبه كثيرًا النمطَ الذي نتَج عن الرصاصات؛ أي: سيتجمَّع شريطٌ من البقع خلف كلِّ شق مما يُنتج شريطَين ضوئيَّين منفصلَين، يَكونان في أقصى درجات السطوع عند المركز، ويتلاشى السطوع تدريجيًّا كلما تحرَّكْنا نحو الخارج — حيث تَزيد نُدرة «اصطدامات» الذرات. ستتوقَّع أيضًا أن الجزء الأوسط بين الشريطَين الساطعَين سيكون مظلمًا حيث إنه يُناظر منطقةً في الحاجز يصعب بشدةٍ أن تصل إليها الذرَّات؛ أيًّا كان الشقُّ الذي عبَرت من خلاله.



شكل ٤-٣: تجربة الشق المزدوج، المرحلة الثانية. على خلافِ سلوك الموجة الذي شَهِدناه مع الضوء، أظهَر إطلاقُ وابلٍ من الرصاص على الشقَّين سلوكًا يُشبه سلوكَ الجسيمات. كل رصاصة وصَلَت إلى الحاجز الخلفي لا بد أنها مرَّت عبر شقٍّ واحد وليس كِلا الشقَّين (وذلك باعتبار أن الحاجز الأول سَميكٌ بالقدر الكافي لدرجةٍ تحول دون مرورِ الرصاصات التي أخطأَت المرور من الشقَّين). وبدلًا من تكوين تداخلٍ مُتعدد الأشرطة، يُبين النمط المُتكوِّن على الحاجز الخلفي الآن آثارَ الرصاصات بطولِ شريطَين ضيقَين مُقابلَين لكلٍّ من الشقين.

لكن النتيجة ليست كذلك. بل إننا رأينا نمطَ تداخلٍ شديدَ الوضوح يتكوَّن من مناطقَ مضيئةٍ ومُظلمة، مثلما حدَث في حالة الضوء. من الغريب أن أكثر جزءٍ ساطع هو الذي يُوجَد في منتصَف الحاجز؛ وهو أكثرُ منطقةٍ لم نتوقَّع أن يكون بإمكان الكثير من الذرات الوصولُ إليها (انظر الشكل ٤-٤). في الحقيقة، بتحديد المسافة المناسبة بين الشقَّين والمسافة المناسبة بين الحاجزَين، يُمكننا أن نتأكَّد من أن المنطقة الساطعة في الحاجز الخلفي (المنطقة التي استطاعت أن تصل إليها الذراتُ مع فتح شقٍّ واحد فقط) ستُصبح مظلمة (أي: لا تصِل إليها ذرَّات) عندما نفتح الشقَّ الثاني. كيف لفتح شقٍّ آخر أن يمنع وصولَ الذرات إلى مناطقَ مُعينة على الحاجز، على الرغم من أن المفترض هو السماحُ بمرور مزيدٍ من الذرات؟




شكل ٤-٤: تجربة الشقِّ المزدوج، المرحلة الثالثة. عندما تُبدَّل بالرَّصاصات ذرَّاتٍ من مصدرٍ يمكن أن يُطلقها صوبَ الشقَّين (بالطبع، يُختارُ عرضُ الشقَّين والمسافةُ الفاصلة بينهما بما يتناسب مع كلِّ مرحلة)، رأينا نمط التداخل الذي يُشبه الموجة يظهر من جديد. وعلى الرغم من أن كل ذرة تصطدم بالحاجز الخلفي في نقطةٍ محددة؛ مما يدلُّ على طبيعتها الجسيمية، فإنها يتجمَّع بعضُها مع بعض في شكلِ أشرطة، تمامًا مثلما حدث في حالة الضوء. إذن، ما هذا الذي يحدث في الشقَّين في آنٍ واحد، وبدونِهِ لن نرى أشرطةَ التداخل المتعددة؟

لنرى هل بإمكاننا شرحُ ما يجري باستخدام المنطق البسيط وتجنُّب اللجوء إلى ميكانيكا الكمِّ في الوقت الحالي أم لا. لنفترض أن هذا العددَ الهائل من الذرات يتصادم ويتفاعل بعضُه مع بعض بطريقة منسَّقة معينة، تؤدي إلى نمطٍ يبدو في الظاهر أنه تداخُل، على الرغم من أن كلَّ ذرة عبارةٌ عن جسيم صغير له مكانٌ مُحدَّد؛ وفي النهاية سترتطم كلُّ ذرة بنقطةٍ منفردة في الحاجز. نعرف جميعًا أن موجات الماء في حقيقتها تتشكَّل من عددٍ كبير من جزيئات الماء التي ما كان يُتوقَّع أن تُصبح في شكلِ موجاتٍ من تلقاء نفسها. إن الحركة المنسقة لتريليونات جزيئات الماء هي ما تنتج عنها الخصائصُ الشبيهة بالموجة — وليس كل جزيءٍ بمفرده. ربما قذَف مسدسُ الذرات سيلًا منسَّقًا من الذرات وكأنه آلةُ أمواج في حمَّام سباحة.

لاختبارِ نظرية الذرات المنسقة؛ سنُكرر التجربة ولكننا سنُرسل ذرةً واحدة «في كل مرة». سنُطلق مسدسَ الذرات وننتظر ظهورَ بقعةٍ من الضوء على الحاجز الخلفي قبل إطلاقه مرةً أخرى، وهكذا دواليك. للوهلة الأولى، يبدو أن المنطق سيَسود. ستترك كلُّ ذرةٍ تمكَّنَت من المرور عبر الشقين بقعةَ ضوءٍ ضئيلةً واحدة في مكانٍ ما على الحاجز. يبدو أن الذرات تخرج من المسدس في صورة جُسيمات تُشبه طلقات الرصاص وتصل إلى الحاجز في صورةِ جسيمات. بالتأكيد يجب أن تسلك الذرات مسلك الجسيمات في المسافة بين المسدس والحاجز، أليس كذلك؟ ولكن الآن، يحدُث السحر الكمي. مع تراكم البقع، التي تُسجل كلٌّ منها وصولَ ذرةٍ واحدة تُشبه الرصاصة، تدريجيًّا على الحاجز، يظهر نمط التداخل بين المناطق المُضيئة والمُظلِمة تدريجيًّا مرةً أخرى. وبمرور ذرةٍ واحدة في المرة الواحدة عبر الحاجز الآن، لا يمكن المحاجَّة بأن هناك أيَّ سلوك جماعي لعددٍ كبير من الذرات التي تصطدم ويتفاعل بعضها مع بعض. هذه ليست كموجات الماء. هنا مرةً أخرى، نجد أنفسَنا في مواجهةٍ مع النتيجة غيرِ المتوقَّعة المتمثلة في وجودِ مواضع في الحاجز الخلفي يمكن أن تستقرَّ عليها الذرات عند فتح شقٍّ واحد فقط، ولكنها تُصبح مظلمةً تمامًا عند فتح الشقِّ الثاني على الرغم من أنَّ فتحه يجب أن يُوفر مسارًا إضافيًّا كي تصلَ الذراتُ إلى الحاجز. وكأن الذرَّة عندما تمرُّ من أحد الشقَّين لا بد أنها «تدرك» بطريقةٍ ما إن كان الشقُّ الثاني مفتوحًا أم غيرَ مفتوح، ومن ثمَّ تتصرَّف بناءً على ذلك!

باختصار، تُغادر كلُّ ذرة المسدسَ في صورة جسيم صغير له موضعٌ محدد، ويصل إلى الحاجز الثاني في صورةِ جُسيم أيضًا، كما يتَّضح من وميض الضوء الضئيل عند وصوله. ولكن في المسافة بين المسدس والحاجز ومع تلاقي الذرَّة مع الشقَّين، يَحدُث شيءٌ غامض يُشبه سلوكَ الموجة المنتشرة التي تنقسم إلى مُكوِّنَين ينبثق كلٌّ منهما من شقٍّ ويتداخَل مع الآخَر على الجانب البعيد. وإلا كيف يمكن لإحدى الذرَّات أن تُدرك حالة الشقَّين (هل هما مفتوحان أم مغلقان) في الوقت نفسِه؟

مع الشك في حدوث خدعةٍ سحرية في مكانٍ ما، لِنرَ إن كان بإمكاننا رصدُ الذرات بمراقبتها من خلف الشقَّين. يمكن تحقيقُ ذلك بوضع جهاز رصد خلف الشق الأيسر، على سبيل المثال، ومن ثَم يُسجل «إشارة» (ربما تكون صوتًا) متى تمرُّ الذرة من خلال ذلك الشق وهي تشقُّ طريقها إلى الحاجز.[٣] يُمكننا وضعُ جهاز رصدٍ آخر فوق الشق الأيمن لالتقاط الذرات التي تمرُّ من خلال ذلك الشق. والآن، إذا مرَّت الذرة من أحد الشقَّين،

فسنسمع صوتًا إمَّا من جهاز الرصد الأيمن أو الأيسر، ولكن إذا تمكَّنَت الذرة بطريقةٍ ما أن تنزع عنها طبيعتَها الشبيهةَ بطبيعة الرصاصة وتمرَّ من خلال الشقين، فسيُصدر جهازا الرصد صوتًا في آنٍ واحد.

ما نكتشفه الآن أنه مع كل عملية إطلاقٍ لذرَّةٍ من المسدس تكون مصحوبةً بظهورِ نقطةٍ مضيئة على الحاجز، يَصدُر صوتٌ إما من جهاز الرصد الأيسر أو الأيمن، ولكن لا يصدُر من كِلَيهما في آنٍ واحد. لقد أصبح لدينا الآن بالتأكيد دليلٌ على أن الذرات المتداخلة تمرُّ من أحد الشقَّين، وليس كِلَيهما في آنٍ واحد. لكن لِنَتحلَّ بالصبر ونستمرَّ في رصدِ الحاجز. مع تراكُم العديد من ومضات الضوء الفردية واندماجِها، نرى أن النمط الناتج لم يَعُد نمطَ تداخل. بل أصبح النمط مُجردَ شريطَين ساطعَين مما يدل على تجمُّع كومةٍ من الذرات خلف كلِّ شق، تمامًا مثلما رأينا في التجرِبة التي استُخدِمت فيها الرصاصات. إن الذرات أصبحَت تسلك الآن مسلكَ الجسيمات التقليدية طَوال التجرِبة. وكأنَّ كل ذرة تسلك مسلك الموجة عندما تُصادف الشقَّين «ما لم» تخضع لعملية رصد؛ إذ حينها تظلُّ كجسيم صغير.

ربما كان وجود جهاز الرصد يُسبب مشكلة؛ إذ يُحتمل أنه يُربك السلوكَ الغريب والدقيق للذرات التي تمرُّ من خلال الشقَّين. لنختبر ذلك بإزالة أحدِ جهازَي الرصد، لنَقُل الجهاز الموجود فوق الشقِّ الأيمن. لا يزال بإمكاننا الحصولُ على المعلومات نفسِها من ذلك الترتيب؛ لأننا عندما نُطلق المسدس ونسمع صافرةً ونرى نقطةً مُضيئة على الحاجز، فسنعرف أن الذرة لا بد أنها مرَّت من الشقِّ الأيسر؛ وعندما نطلق المسدَّس ولا نسمع صوتًا ولكن نرى نقطةً مضيئة، فسنعرف أن الذرات لا بد أنها وصَلَت إلى الحاجز عبر الشق الأيمن. يمكننا الآن أن نعرف هل الذراتُ مرَّت من خلال الشق الأيمن أم الأيسر، ولكننا فقط «سنُربك» أحدَ المسارَين. إذا كان جهاز الرصد نفسُه هو الذي يُسبب المشكلة، فعندئذٍ سنتوقَّع أن تسلك الذراتُ التي حفَّزَت صوتَ جهاز الرصد مسلك الرصاصات وأن تسلك الذراتُ التي لم تُحفز صوته (ومرت من الشق الأيمن) مسلكَ الموجة. والآن، ربما نرى مزيجًا من النمَط المُشابِه لنمط الرصاصات (من الذرات التي تمرُّ من خلال الشق الأيسر) ونمط التداخُل (من الذرات التي تمرُّ من خلال الشق الأيمن) على الحاجز.

لكننا لم نرَ ذلك المزيج. ما زلنا لا نرى نمَط التداخُل مع هذا الترتيب. لا نرى سوى النمطِ الشبيهِ بنمطِ الرَّصاصات خلف كلِّ شقٍّ على الحاجز. يبدو أن مجرد وجود جهاز

رصدٍ يُمكنه تسجيلُ مَوقع الذرات؛ كافٍ كي يُدمر السلوك الشبيهَ بالموجة، حتى إنْ كان هذا الجهازُ على مسافةٍ بعيدةٍ من مسار الذرة عبر الشقِّ الآخر!

ربما كان الوجود المادي لجهاز الرصد فوق الشق الأيسر كافيًا للتأثير في مسار الذرَّات التي تمرُّ عبرَه، وكأنَّهُ صخرةٌ كبيرة تُغير تدفُّق الماء في مَجرًى سريع الجريان. يُمكننا اختبارُ ذلك بإيقاف تشغيل جهاز الرصد الأيسر. لا يزال الجهاز في مكانه، ومن ثم نتوقَّع أن يظلَّ تأثيره كما هو. لكن الآن، مع بقاء جهاز الرصد في مكانه ولكنه متوقفٌ عن العمل، يتكون نمطُ التداخل على الحاجز مرةً أخرى! كل الذرات التي دخَلت في التجرِبة عادت إلى التصرف كموجات. كيف للذرَّات أن تتصرف وكأنها جسيماتٌ عند تشغيل جهاز الرصد الموجود فوق الشقِّ الأيسر، ولكن بمجرد إيقافِ تشغيله تتصرف وكأنها موجات؟ كيف «يعرف» الجسيم الذي يمرُّ من الشق الأيمن إن كان جهاز الرصد فوق الشقِّ الأيسر يعمل أم لا؟

في تلك المرحلة بالتحديد، عليك أن تُنحِّيَ المنطقَ جانبًا. لكن ينبغي الآن أن نتعرَّف على مفهوم ازدواجية الموجة والجسيم الخاصة بالأجسام الصغيرة مثل الذرات أو الإلكترونات أو الفوتونات التي تتصرَّف مثل الموجة عندما لا نعلم أي شق ستمرُّ من خلاله، ولكنها تتصرَّف مثل جسيم عندما نرصدُها. هذه هي عملية رصد الأجسام الكمية أو قياسها التي تعرَّضنا لها لأول مرة في الفصل الأول عندما تناولنا إثباتَ آلان أسبيه للتشابُك الكميِّ في الفوتونات المنفصلة. ستتذكر أن فريق أسبيه قاس فوتوناته بتمريرها من خلال عدسةٍ مُستقطِبة تُدمر حالةَ تشابكها — التي تُعد أحد جوانب طبيعتها الموجية — بإجبارها على «اختيار» اتجاه استقطابٍ كلاسيكي واحد. وبطريقةٍ مماثلة، فإن قياس الذرات التي تمر في تجرِبة الشق المزدوج يجبرها على اختيار المرور إما من الشقِّ الأيسر أو الأيمن.

في الحقيقة، تُقدم لنا ميكانيكا الكمِّ تفسيرًا منطقيًّا وافيًا لهذه الظاهرة؛ ولكن هذا ليس سوى تفسيرٍ لما نرصُده — أي: نتيجة التجرِبة — وليس لما يجري عندما نَحيد ببصرنا. ولأنه ما يُمكننا أن نراه أو نَقيسه هو ما يعنينا، فربما لا جدوى من طلب المزيد. فكيف يُمكننا تقييم منطقية أو حقيقةِ تفسير ظاهرةٍ لا يسَعُنا أن نتحقَّق منها ولو حتى نظريًّا؟ إذ بمجرد أن نُحاول، نُغير النتيجة.

التفسير الكميُّ لتجربة الشق المزدوج هو أنه يجب وصفُ كلِّ ذرة في أي لحظة محددة باستخدام مجموعة من الأرقام التي تُحدد موقعها الاحتمالي في الفراغ. هذه هي الكمية التي تَعرَّفنا عليها في الفصل الثاني باسم «الدالة الموجية». حينها، وصَفْنا تلك

الدالةَ بأنها شبيهةٌ بفكرةِ تتبُّع موجة إجرامية تنتشر عبر مدينةٍ عن طريق تعيين احتمالات لحدوث جرائم سطو في الأحياء المختلفة. وبطريقةٍ مُماثلة، فإن الدالة الموجية التي تصفُ ذرة تمرُّ من خلال الشقَّين تتتبَّع احتماليةَ إيجاد الذرة في أيِّ مكان على النظام في أيِّ وقتٍ مُحدد. ولكن، وكما أكَّدنا من قبل، بما أن السارق لا بد أن يُوجَد في موقعٍ واحد من حيث المكان والزمان، وبما أن موجة «احتمال ارتكاب الجريمة» لا تصف سوى عدمِ معرفتنا بالمكان الذي يُوجَد فيه السارقُ فِعليًّا، فإن الدالة الموجية للذرة في تجرِبة الشق المزدوج «حقيقية» من حيث إنها تمثل الحالة المادية للذرة نفسها، التي ليس لها موقعٌ مُحدَّد ما لم نقِسْها، وتُوجَد في كل مكانٍ في آنٍ واحد حتى وقتِ القياس، ولكن تتفاوت الاحتمالية، بالطبع، إذ لا يُحتمل أن نعثر على الذرَّة في أماكنَ تكون دالَّتُها الموجية فيها صغيرة.

لذا بدلًا من دراسة الذرَّات الفردية التي تمرُّ في تجربة الشق المزدوج، ينبغي أن ندرس الدالةَ الموجية التي تنتقل من المصدر إلى الحاجز الخلفي. عندما تتقابلُ الدالة الموجية مع الشقَّين، فإنها تنقسم إلى نصفَين بحيث يمرُّ كل نصفٍ من أحد الشقين. لاحظ أن ما نصفُه هنا هو طريقةُ تغير كمية «رياضية» مجردةٍ بمرور الوقت. لا جدوى من السؤال عما يجري «حقًّا» حيث سيتعيَّن علينا النظرُ لمعرفةِ ما يحدث. ولكن بمجرد أن نُحاول ذلك، نغير النتيجة. إن السؤال عمَّا يجري «حقًّا» بين عمليات الرصد يُشبه السؤال عمَّا إذا كان مِصباح الثلاجة يعمل أم لا قبل أن تفتح بابَ الثلاجة؛ فلن تعرف أبدًا الإجابةَ لأنه بمجرد أن تُلقي نظرةً خاطفة على الثلاجة من الداخل يتغير النظام.

عندئذٍ يُثار السؤال: متى «تُصبح» الدالة الموجية ذرةً لها موقعٌ محدد مرةً أخرى؟ الإجابة هي: عندما نحاول اكتشاف موقعِها. عند حدوث هذا القياس، «تنحسر» الدالةُ الموجية الكمية إلى احتمالٍ واحد. مرةً أخرى، هذا مختلفٌ تمامًا عن حالة السارق؛ حيث إن عدم اليقين بشأن الأماكن التي قد يُوجَد بها اللصُّ ينحسر فجأةً إلى مكانٍ مُحدَّد بعد أن تُلقي الشرطةُ القبض عليه. في تلك الحالة، لم يؤثر العثورُ على اللص إلا في معلوماتنا بشأن الأماكن المحتملة للسارق. فهو دائمًا في مكانٍ واحد في أي وقتٍ محدد. الأمر مختلفٌ بشأن الذرَّة حيث إنها تكون في كلِّ مكان في الحقيقة، عند غياب أي قياس.

إذن، الدالة الموجية الكمية تحسب احتمالَ وجود الذرة في موضعٍ محدَّد، «لو أجْرَينا قياسًا لموضعِها في ذلك الوقت». وحينما تكون الدالَّة الموجية كبيرةً قبل القياس، فإن الاحتمال الناتج لإيجاد الذرة في ذلك الموضع سيكون كبيرًا. ولكن حينما تكون صغيرة

— ربما بسبب التداخُل الموجي الهدَّام — فسيقلُّ بالتبعية احتمالُ إيجاد الذرة في ذلك الموضع عندما نُقرر النظر.

يمكننا أن نتخيَّل تتبُّعَ الدالة الموجية التي تصفُ ذرةً مفردة بعد خروجها من المصدر. إنها تتصرَّف مثل الموجة تمامًا وهي تتدفَّق نحو الشقَّين، ومن ثم ستتساوى سَعةُ احتمالها في كلٍّ شقٍّ على مستوى الحاجز الأول. إذا وضَعْنا جهازَ رصد عند أحد الشقَّين، عندئذٍ ينبغي أن نتوقَّع احتمالاتٍ مُتساوية: سنرصد الذرةَ عند الشق الأيسر في ٥٠ بالمائة من الوقت وعند الشقِّ الأيمن في ٥٠ بالمائة من الوقت. ولكن إذا لم نُحاول رصد الذرة على مستوى الحاجز الأول — وذلك أمرٌ مهم — فإن الدالة الموجية تتدفَّق من الشقين من دون أن تنهار. لذا، وباصطلاحات العالم الكمِّي، يمكن أن نقول إن الدالة الموجية تصفُ ذرةً مفردة في حالةِ تراكُب؛ بمعنى أنها تُوجَد في مكانَين في آنٍ واحد، وتُناظر دالَّتها الموجية التي تمرُّ من الشقَّين الأيسر والأيمن في آنٍ واحد.

على الجانب الآخر من الشقَّين، ينتشر كلُّ جزء منفصل من الدالة الموجية — جزءٌ من الشق الأيسر، وجزء من الشق الأيمن — مرةً أخرى، ويُشكل الجزءان مجموعاتٍ من الموجات الرياضية المتداخلة، التي يُعزِّز بعضها بعضًا في بعض النقاط، ويلغي بعضها بعضًا في نقاطٍ أخرى. الناتج الإجماليُّ لهذا هو اكتساب الدالة الموجية الآن للنمط الذي يُعد السمةَ الأساسية للظواهر الموجية الأخرى مثل الضوء. ولكن لنتذكَّر أن الدالة الموجية المعقَّدة هذه الآن لا تزال تصفُ ذرةً واحدةً فقط.

على الحاجز الثاني، حيث يُقاسُ موضع الذرة أخيرًا، تُتيح لنا الدالةُ الموجية أن نحسبَ احتمالَ رصد الجُسيم في مواضعَ متفرقةٍ بطول الحاجز. تُناظر الأشرطةُ الساطعة على الحاجز المواضع التي يُعزِّز فيها جزءا الدالة الموجية، الآتيان من الشقين، بعضُهما البعضَ، وتُناظر الأشرطة المُظلمة المواضعَ التي يُلغي فيها جزءا الدالة الموجية بعضهما؛ ممَّا يعني انعدامَ احتمالية رصد الذرات في تلك المواضع.

يجب أن نتذكر أن عملية التعزيز والإلغاء — التداخل الكمي — هذه تحدث حتى لو لم يكن هناك سوى جسيمٍ مفرد في التجربة. وتذكَّر أنه تُوجَد مناطقُ في الحاجز يمكن أن تصِل إليها الذرَّات — المطلقة بواقعِ ذرةٍ واحدة في المرة الواحدة — عند فتح شقٍّ واحد فقط، التي لا يُمكنها الوصولُ إليها عند فتح الشقَّين معًا. ولا يكون هذا مَنطقيًّا إلا إذا وُصفت كلُّ ذرة تنطلق من مسدس الذرات بدالَّةٍ موجية يمكن أن تستكشفَ المسارَين

كِلَيهما في آنٍ واحد. تُلغي الدالةُ الموجية المجمعة ذاتُ مناطقِ التداخل البنَّاء والهدَّام احتمالَ إيجاد الذرة في بعض المواضع بالحاجز التي لن تصلَ إليها إلا بفتح شقٍّ واحد فقط.

تُبدي كلُّ الكيانات الكمية — سواءٌ الجسيمات الأساسية أو الذرات والجزيئات التي تتكوَّن من تلك الجسيمات — سلوكًا متَّسقًا يُشبه الموجة بحيث يمكن أن تتداخل بعضها مع بعض. في تلك الحالة الكمية، يمكن أن يبدر منها كلُّ السلوكيات الكمية الغريبة مثل التواجُد في مكانَين في آنٍ واحد أو الدوران في اتجاهَين في آنٍ واحد أو شقِّ الأنفاق عبر الحواجز التي يستحيل اجتيازُها، أو امتلاك روابط مُتشابكة طيفية مع شريكٍ في مكان بعيد.

ولكن عندئذٍ لماذا لا يمكن أن توجد أنت أو أنا في مكانين في آنٍ واحد؛ حيث إننا في النهاية نتكوَّن من جسيماتٍ كَميَّة، الأمر الذي سيُفيدنا كثيرًا في يومٍ مزدحم بالأعمال؟ الإجابة المباشرة بسيطةٌ للغاية: كلما زاد حجم الجسم وكتلته، قلَّت طبيعته المشابهة لطبيعة الموجة، وجسم بحجم الإنسان وكتلته — أو في الحقيقة أيِّ جسم كبير بالقدْر الكافي بحيث يُرى بالعين المجرَّدة — سيكون له طولٌ موجي كمي مُتناهي الصغر، لدرجة أنه لن يكون له تأثيرٌ يمكن قياسُه. ولكن بالتعمُّق أكثر، قد ترى أن كلَّ ذرةٍ في جسمك ترصدها وتقيسها جميع الذرات الأخرى من حولها، ومن ثَم سرعان ما تتدمَّر أيُّ خصائص كمية دقيقة قد تتضمَّنُها.

إذن، ما الذي نَعنيه حقًّا بلفظةِ «قياس»؟ تناولنا هذا السؤالَ باقتضابٍ في الفصل الأول، ولكن يجب أن نبحثه عن كثَب الآن؛ حيث إنه محوريٌّ للسؤال عن مقدار «الجانب الكمي» في علم الأحياء الكمي.

## القياس الكمي

على الرغم من النجاح الذي حقَّقَته ميكانيكا الكم، فإنها لا توضِّح لنا كيف ننتقل من مرحلة المعادلات التي تصف كيف يتحرَّك إلكترون، على سبيل المثال، حول ذرةٍ ما إلى ما نراه عندما نُجري قياسًا محدَّدًا لذلك الإلكترون. لهذا السبب، توصَّل الروَّاد المؤسِّسون لميكانيكا الكم إلى مجموعةٍ من القواعد المخصصة التي أصبحَت مُلحقًا للمعادلات الرياضية. إنها معروفةٌ باسم «المُسلَّمات الكمية» وهي بمنزلةِ دليل تعليمات من نوعٍ ما، يُحدد طريقة

تحويل التنبؤات الرياضية للمعادلات إلى خصائصَ ملموسة يُمكننا رصدُها مثل مكان الذرة أو طاقتها في أيِّ وقت مُحدد.

بشأن العملية الفعلية نفسِها التي بمُقتضاها تتوقَّف فورًا الذرةُ عن الوجود «في أكثرَ من مكان» في آنٍ واحد وتُوجَد «في مكانٍ واحد» عندما نفحصها، فلا أحد يعلم حقًّا ما الذي يجري، وسعِدَ معظم علماء الفيزياء بتبنِّي الرأي البراجماتي القائل بأن هذا «ما يحدث وحَسْب». المشكلة أن هذا يتطلَّب تمييزًا تقديريًّا بين العالَم الكمي الذي تحدث فيه أشياءُ غريبة، وعالَمِنا العياني المنظور حيث تسلك الأجسام مسلكًا «عقلانيًّا». ينبغي أن يكون جهاز القياس الذي يكتشف الإلكترونات جزءًا من عالمنا العيانيِّ هذا. لكن لم يوضِّح مؤسِّسو ميكانيكا الكمِّ مطلقًا «كيف» و«لماذا» و«متى» تحدث عمليةُ القياس هذه.

في ثمانينيَّات القرن العشرين وتسعينيَّاته، أدرك علماء الفيزياء ما يحدث عندما يتفاعل نظامٌ كمي معزول — على سبيل المثال، الذرَّةُ المفردة في تجرِبة الشق المزدوج، ذاتُ الدالَّة الموجية التي هي في حالةِ تراكب، بمعنى الوجود في مكانَين في آنٍ واحد — مع جهازِ قياسٍ عياني مثل جهاز الرصد الموضوع عند الشقِّ الأيسر. اتضَح أن رصد الذرة (ولاحظ هنا أنه حتى عدم رصدها يعتبر قياسًا لأنه يعني ضرورةَ مرورها من الشقِّ الآخَر) يجعل الدالةَ الموجية للذرَّة تتفاعل مع تريليونات الذرَّات الموجودة في جهاز القياس. يؤدي هذا التفاعلُ المُعقَّد إلى تفكُّك الترابط الكميِّ الدقيق بسرعةٍ كبيرة وضياعه وسَط التشوُّش غير المترابط الصادر من الأشياء المحيطة به. تُسمى هذه العملية بفكِّ الترابط، وهي العملية التي قد تعرَّضنا لها في الفصل الثاني.

لكن فكَّ الترابُط لا يحتاج إلى جهاز قياسٍ كي يحدث. إنه لا يتوقَّف عن الحدوث داخل كلِّ جسم تقليدي مفرد؛ حيث إن مكوناته الكمية — الذرات والجزيئات — تخضع لاهتزازاتٍ حرارية، وتتصادم مع كل الذرات والجزيئات المحيطة بها، ومن ثَمَّ تفقد الترابُطَ الخاصَّ بها الذي يُشبه الموجة. وبهذه الطريقة، يُمكننا اعتبارُ فكِّ الترابط الوسيلة التي تستخدمها كلُّ المواد المحيطة بذرةٍ ما، على سبيل المثال — أو ما يُسمى بيئتها — في «القياس» المنتظِم لتلك الذرة وإجبارها على التصرُّف مثل الجسيمات التقليدية. في الحقيقة، فك الترابط من أسرع العمليات وأكثرِها فاعليةً في الفيزياء ككلٍّ. وبسبب هذه الفاعلية الكبيرة، ظلَّ غيرَ مكتشفٍ مدةً كبيرة. والآن فقط، أصبح علماء الفيزياء يتعلَّمون كيفيةَ التحكم فيه ودراسته.

بالعودة إلى مثال رمي الحصوات في الماء، عندما رميناها في بِركة راكدة كان سهلًا أن نرى تداخُل موجاتها مع بعضها البعض. لكن حاوِلْ رمي الحصوات نفسِها في قاع شلالاتِ نياجارا. الطبيعةُ ذاتُ التعقيدِ والفوضويةِ الشديدَين للماء تُزيل الآن أيَّ نمطِ تداخل تُولِّده الحصوات. هذه المياه المضطربة هي المقابل الكلاسيكي لحركة الجزيئات العشوائية التي تحيط بأي نظام كمي؛ مما يؤدِّي إلى فكِّ الترابط فورًا. وعلى مستوى الجزيئات، تكون معظم البيئات مضطربةً مثل الماء في قاع شلَّالات نياجارا. لا تتوقَّف الجسيماتُ داخل الموادِّ عن التدافع والتصادم مع بيئتها (الذرات الأخرى أو الجزيئات أو فوتونات الضوء).

هنا، ينبغي توضيحُ بعض المصطلحات التي نستخدمها في هذا الكتاب. نتحدث عن ذراتٍ تُوجَد في مكانَين في آنٍ واحد وتسلك مسلكَ الموجات المنتشرة، وتكون في حالةِ تراكُب من حالتَين مختلفتَين أو أكثر في آنٍ واحد. لتسهيل الأمور عليك؛ يُمكننا الاستقرارُ على مصطلحٍ واحد يضمُّ في معناه كلَّ هذه المفاهيم، ألا وهو «الترابط» الكمي. ومن ثم عندما نُشير إلى تأثيرات «الترابط»، فإننا نقصد شيئًا يتصرَّف بطريقةٍ ميكانيكية كَمية؛ حيث نرى منه سلوكًا مثل الموجة أو يقوم بأكثرَ من عملٍ في آنٍ واحد. ومن ثم «فك الترابط» عمليةٌ فيزيائية يُفقَد الترابط بموجبها، ويتحوَّل ما هو كميٌّ إلى تقليدي.

عادةً ما يُتوقَّع أن يكون الترابط الكمي قصيرَ الأجل جدًّا ما لم يكن بالإمكان عزلُ النظام الكمي عن الأشياء المُحيطة به (لتقليل عدد الجسيمات المتدافعة) و/أو خفضُ درجة حرارته إلى درجةٍ منخفضة جدًّا (لتقليل التدافع أكثر)؛ للحفاظ على الترابط الدقيق. في الحقيقة، لإثباتِ أنماط التداخُل فيما يتعلَّق بالذرات المفرَدة، يطرد العلماء كلَّ الهواء من النظام ككلٍّ ويُبرِّدوا معداتهم حتى تقترب درجةُ حرارتها من الصفر المطلَق. باتخاذ تلك الاحتياطات الشديدة، يستطيع العلماءُ إبقاءَ الذرات في حالة الترابط الكمي الهادئة مدةً طويلة بالقدْر الكافي لإثبات أنماطِ التداخل.

بالطبع مشكلة هشاشة الترابط الكمي (أي: الحفاظ على الدالَّة الموجية من الانهيار) هي التحدي الأساسي الذي واجهَ مجموعةَ أستاذةِ معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا الذين تقابلنا معهم في الفقرات الاستهلالية لهذا الفصل، وزملاءهم في جميع أنحاء العالم، في سعيِهم لبناء جهاز كمبيوتر كمي؛ وهذا سببُ ارتيابهم الكبير بشأنِ ما ورد في صحيفة «ذا نيويورك تايمز» بأن النباتات كانت أجهزةَ كمبيوتر كمِّية. يبتكرُ علماء الفيزياء كافة أنواع الاستراتيجيات الذكية والمُكلفة لحماية العالم الكمي داخل أجهزة الكمبيوتر الخاصة

بهم؛ من البيئة الخارجية المدمِّرة للترابط. لذا اعتُقد على نحوٍ مفهوم أن إمكانية الحفاظ على الترابط الكمِّي في البيئة الحارة والرطبة والمضطربة جزئيًّا الموجودة داخل نصل عُشب؛ فكرةً مجنونة.

ومع ذلك، نعلَم الآن أن العديد من العمليات البيولوجية المهمة على المستوى الجزيئيِّ يُمكن أن تكون بالفعل فائقةَ السرعة (بمقياسِ جزءٍ على تريليون من الثانية)، ويُمكن أيضًا قصرُها على مسافاتٍ ذرِّية قصيرة — الأطوال والمقاييس الزمنية التي يُمكن من خلالها أن يكون لعملياتٍ كمية مثل النفق الكمي تأثير. ومِن ثَمَّ، على الرغم من أنه لا يمكن أبدًا منعُ فكِّ الترابط بالكامل، فإنه يُمكن إرجاءُ حدوثه مدةً طويلة بالقدر الكافي حتى يُمكنَ تحقيقُ استفادة بيولوجية معينة.

## رحلة إلى مركز عملية البناء الضوئي

انظر إلى السماء مدةَ ثانية، وسينزل في عينك عمودٌ من الضوء بطول ١٨٦ ألف ميل. في تلك الثانية نفسِها، تمتصُّ النباتاتُ وميكروبات البناء الضوئي عمودَ ضوء الشمس لعمل ما يُقارب ١٦ ألفَ طنٍّ من المادة العضوية الجديدة في شكلِ شجرٍ وعُشب وطحالب وهندباء وشجر سيكويا ضخم وشجر تفاح. نهدفُ في هذا القسم إلى اكتشاف كيف تتمُّ تلك الخطوةُ الأولى في عملية تحويل الجمادات إلى كلِّ الكتلة الحيوية الموجودة على كوكبنا تقريبًا، وسيكون مثالُنا هنا على هذا التحويل هو تحوُّلَ هواءِ نيو إنجلاند إلى تفاحةٍ في شجرة نيوتن.

لرؤية هذه العملية عمَليًّا؛ سنقترضُ الغواصة النانوية التي استخدَمْناها لاستكشافِ عمل الإنزيمات في الفصل السابق مرةً أخرى. بمجرد الركوب على متن الغواصة والضغط على زرِّ تصغير الحجم، تنطلِق في رحلةٍ إلى الأعلى حتى تصلَ إلى أوراق الشجرة وترسُوَ على إحدى أوراقها المنبسطة. لا تفتأ الورقة تتمدَّد حتى تختفيَ حافاتُها البعيدةُ خلف الأفق ويُصبح سطحها الأملسُ في ظاهرِهِ ساحةً غيرَ منتظمة معبَّدة بقوالب القرميد الخضراء المُستطيلة المثقوبة بكتلٍ دائرية ذات لون أفتح، ويتخلَّل كلًّا منها ثقبٌ مركزي. يُطلَق على القرميد الأخضر خلايا البشرة ويُطلق على الكتل الدائرية الثغور، ووظيفتها السَّماح للهواء والماء (وهما ركيزتا عمليةِ البناء الضوئي) أن يمرَّا من سطح الورقة إلى أجزائها الداخلية. تتوجَّه بالمركبة صوب أقربِ ثغرٍ وعندما لا يتعدى طولُ السفينة ميكرونًا واحدًا

(أي: واحدًا على مليونٍ من المتر)، تخفض مقدمة السفينة للغوص في الثقب، وتمرق إلى الجزء الداخلي الأخضر والناضر للورقة.

بمجرد الدخول، تستقرُّ في المساحة الواسعة والهادئة إلى حدٍّ كبير الموجودة داخل الورقة، التي تتميز بأرضيةٍ مصفوفة بالخلايا الخضراء التي تُشبه الصخور، وبسقفٍ من الكابلات الأسطوانية السميكة. الكابلات هي «أوردة» الورقة، ووظيفتها إما توصيلُ الماء من الجذور إلى الورقة (الأوعية الخشبية) أو نقلُ السكَّر الحديثِ الصُّنع من الورقة إلى باقي النبات (الأوعية اللِّحائية). إذا قلَّصتَ حجم السفينة أكثر، فستجد أن وجه الخلية الشبيهَ بالصخور يتمدَّد في كل الاتجاهات حتى يُصبح بمساحةِ ملعب كرة قدم. ببلوغ هذا المقياس الذي يبلُغ طوله الآن نحو ١٠ نانومترات أو واحدًا على مائةِ ألف من الميلليمتر، يمكن أن ترى أن سطحها مكسوٌّ بشبَكةٍ مرِنة من الحبال، وكأنها بِساطُ جوت سَميك. هذه المادة التي تُشبه الحبال هي «جدار الخلية»، وهو بمنزلة هيكلٍ خارجي خلوي. الغواصة النانوية الخاصة بك مجهزةٌ بأدوات تستخدمها للمرور داخل ذلك البساط المرن؛ مما يكشف عن طبقةٍ سُفلية شمعية، هي غشاءُ الخلية، وهي تُعد الحاجزَ الأخير الواقيَ من نفاذ الماء الواقع بين الخلية وبيئتها الخارجية. بالفحص عن قربٍ أكثر، يتبيَّن أن تلك الطبقة ليست مَلْساءَ تمامًا، ولكنها مُثقلةٌ بحُفَر ممتلئةٍ بالماء. يُطلق على قنوات الغشاء هذه «البورينات» وهي بمنزلةِ نظام الصرف الخاص بالخلية؛ إذ تسمح بدخول العناصر الغذائية وخروج الفضلات. ولدخول الخلية، لن تحتاج سوى إلى الانتظار بطولِ أحد البورينات حتى يتمدَّد بالقدرِ الذي يسَعُك كي تغوصَ في الجزء الداخلي المائي للخلية.

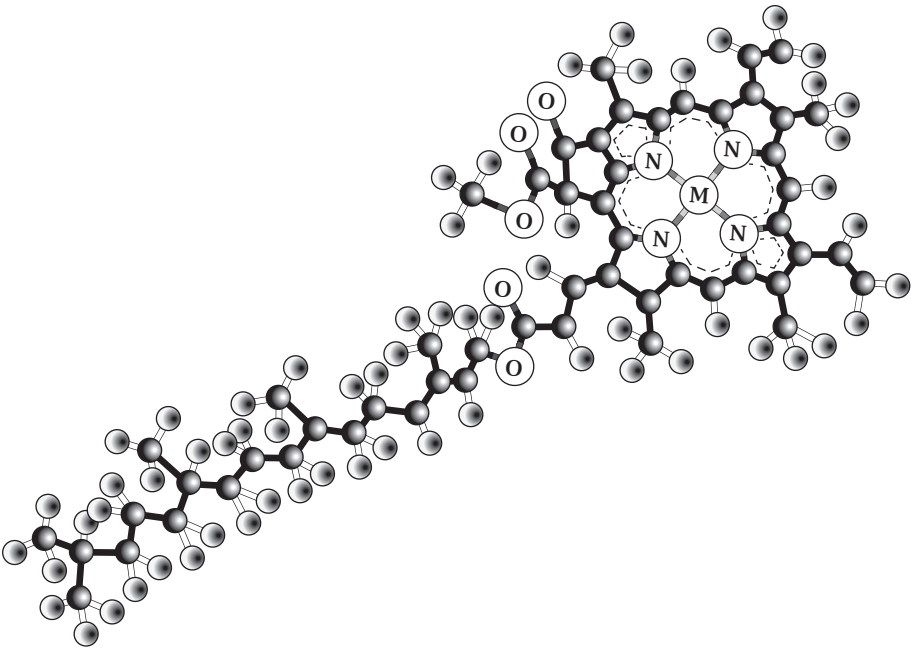
بمجرد الدخول إلى قناة البورين، يمكن أن تُدرك من فَورِك أن التكوين الداخلي للخلية مختلفٌ تمامًا عن تكوينها الخارجي. فبدلًا من الأعمدة العظيمة والمساحات الواسعة، التكوين الداخلي مزدحمٌ وفوضوي نوعًا ما. إنه يبدو وكأنه مكانٌ مليء بالحركة جدًّا! يُطلَق على السائل المائي الذي يملأ الخلية اسم السيتوبلازم، ومن صفاته أنه ثخينٌ ولزج؛ وفي بعض الأماكن يكون قوامه أقربَ إلى الهُلام منه إلى السائل. يُعلَّق في تلك المادةِ الهلامية آلافُ الأجسام الكروية غير المُنتظِمة ويبدو أنها في حالةِ حركة داخلية مستمرَّة. إنها إنزيماتُ البروتينات — وتُشبه تلك التي قابلناها في الفصل السابق — وهي مسئولةٌ عن تنفيذ عمليات الأيض في الخلايا، حيث إنها تكسر العناصرَ الغذائية، وتُكوِّن الجزيئاتِ الحيوية مثل الكربوهيدرات والحمض النووي والبروتينات والدهون. العديد من تلك الإنزيمات مُقيَّد في شبكةٍ من الكابلات («الهيكل الخلوي») التي يبدو أنها

تسحب عددًا هائلًا من الحمولات إلى العديد من الوجهات داخل الخلية، وكأنها كابلاتٌ لمصاعد المتزلِّجين. يبدو أن شبكة النقل تلك تنبثقُ من عدة محاور، حيث تُثبَّت الكابلات في كبسولاتٍ خضراء كبيرة. هذه الكبسولات هي «البلاستيدات الخضراء» الخاصة بالخلية، وبداخلها يحدُث الجزء المركزي من عملية البناء الضوئي.

تنطلق بالغواصة عبر السيتوبلازم اللزج. تتقدم ببطء ولكن في النهاية ترسو عند أقربِ بلاستيدةٍ خضراء. إنها تقبع تحتك وكأنها بالونٌ أخضرُ كبير. يمكن أن ترى أنها، شأن الخلية التي تضمُّها، محاطةٌ بغشاءٍ شفاف ترى من خلاله أكوامًا كبيرة من الأجسام التي تُشبه العملات المعدنية. يُطلق على تلك الأجسام اسم «الثايلاكويدات» وتتَّسم بأنها مكتظةٌ بجزيئات الكلوروفيل، وهي الصبغة التي تُعطي النباتَ اللونَ الأخضر. الثايلاكويدات هي محركاتُ عملية البناء الضوئي وعندما يتمُّ تزويدُها بوَقودِ فوتونات الضوء، فإنها يمكن أن تربط ذراتِ الكربون (المُمتصَّة من ثاني أكسيد الكربون الموجود في الهواء) مع بعضها البعض؛ لإفراز السكر الذي سيتخلَّل تفاحتنا. لإلقاء نظرةٍ أفضل على تلك الخطوة الأولى من عملية البناء الضوئي، تتَّجه بالغواصة إلى أحد الثقوب في غشاء البلاستيدات الخضراء بحيث تتجه إلى أعلى عملة خضراء في كومة الثايلاكويدات. عندما تصل إلى وجهتك، توقف تشغيل محرِّك غواصتك وتترك سفينتك تحوم فوق محطة الطاقة تلك الخاصة بعملية البناء الضوئي.

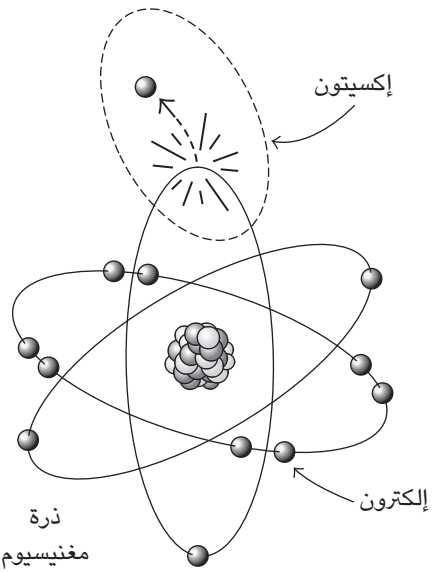
يقبع أسفل منك واحدةٌ من تريليونات آلات البناء الضوئي التي تُصنِّع الكتلة الحيوية في هذا العالم. من موقع المراقبة هذا، ترى، مثلما اكتشفنا لَمَّا درَسْنا آليةَ عمل الإنزيمات في الفصل السابق، أنه على الرغم من هذا الكمِّ الهائل من التصادُم بين الجزيئات الذي يُشبه تصادمَ كراتِ البلياردو من حولك، إلا أن هناك قدرًا هائلًا من النظام. السطح الغشائي للثايلاكويد مرصَّع بجزر خضراء وَعْرة مغطَّاة بهياكلَ تُشبه الأشجار تنتهي بوحدات خماسية الأضلاع تُشبه الهوائيات. هذه الوحدات عبارةٌ عن جزيئات تجمع الضوء وتُسمَّى «الكروموفورات» والتي من أشهر أمثلتها الكلوروفيل، وهذه الجزيئات هي التي تُنفذ أول خطوة مهمة في عملية البناء الضوئي ألا وهي امتصاص الضوء.

ربما يُعد الكلوروفيل ثانيَ أهم جُزيء على كوكبنا (بعد الحمض النووي) ولذا فهو جديرٌ بأن نُلقيَ عليه نظرةً أقربَ (انظر الشكل ٤-٥). الكلوروفيل عبارةٌ عن تركيب ثنائي الأبعاد يتألف من مصفوفاتٍ خماسية الأضلاع تتألف معظمها من ذرات الكربون (الكرات الرمادية) وذرات النيتروجين (N) التي تُحيط بذرَّة مغنيسيوم مركزية (M) بالإضافة




شكل ٤-٥: جزيء الكلوروفيل.

إلى ذيلٍ طويل من ذرَّات الكربون والأكسجين (O) والهيدروجين (التي باللون الأبيض). يرتبط الإلكترون الخارجي لذرة المغنيسيوم ارتباطًا غيرَ محكم بباقي الذرة ويمكن أن يدخل إلى قفص الكربون المحيط عن طريق امتصاص فوتون من الطاقة الشمسية، ومن ثم يترك فجوةً في ذرةٍ أصبحَت الآن ذاتَ شحنة موجبة. يمكن اعتبار تلك الفجوة — أو الثقب الإلكتروني — بطريقةٍ مجردة نوعًا ما أنه «شيء» قائمٌ بذاته؛ بمعنى أنه ثقبٌ ذو شحنة موجبة. الفكرة هي أننا نعتبر بقية ذرة المغنيسيوم محايدة غير أننا أنشأنا نظامًا عبر امتصاص الفوتون يتكوَّن من الإلكترون الهارب ذي الشحنة السالبة والثقب المُوجَب الذي خلفه. يُطلق على هذا النظام الثنائي اسمُ «إكسيتون» (انظر الشكل ٤-٦) ويمكن اعتبارُه بطاريةً صغيرة لها قطب سالب وقطب موجب ولديها إمكانية تخزين الطاقة لاستخدامها فيما بعد.




شكل ٤-٦: يتكون الإكسيتون من إلكترونٍ ترَك مَداره في إحدى الذرات، والثقب الذي خلَّفه.

الإكسيتونات غير مستقرَّة. يشعر الإلكترون والثقب الذي خلَّفه بقوةٍ جاذبة كهروستاتيكية تُقرب أحدَهما من الآخَر. إذا تجمَّعا مرةً أخرى، تُفقَد الطاقة الشمسية من الفوتون الأصلي في صورةِ حرارة مهدَرة. لذا فإذا كان النبات يريد استغلال الطاقة الشمسية التي امتصَّها، فينبغي أن يُنقل الإكسيتون بسرعةٍ شديدة إلى وحدةِ تصنيعٍ جزيئية تُعرف باسم «مركز التفاعل»؛ إذ في تلك الوحدة تحدث عمليةٌ تسمى فصل الشحنات. تتضمَّن تلك العمليةُ في جوهرها طرْدَ الإلكترون المشحون بالطاقة من ذرَّتِه تمامًا، ونقْلَه إلى جزيءٍ مُجاور، على نحوٍ مُشابِه لِما يحدث في حالة الإنزيمات التي تناولناها في الفصل السابق. تنشئ تلك العمليةُ بطاريةً كيميائية (تُسمى نيكوتيناميد أدينين الفوسفات الثنائي النكليوتيد المختزل (NADPH)) مستقرَّةً أكثرَ من الإكسيتون المستخدَم لتحفيز التفاعُلات الكيميائية المهمة بشدةٍ في عملية البناء الضوئي.

لكن عادةً ما تكون مراكزُ التفاعل بعيدةً للغاية عن جزيئاتِ الكلوروفيل المثارة (إذ تفصل بينهما مسافاتٌ نانومترية بلغةِ الجزيئات)، ومن ثم يجب نقلُ الطاقة من جزيءٍ

هوائي إلى آخَر داخل غابة الكلوروفيل من أجل الوصول إلى مركزِ التفاعل. قد يحدث هذا بفضل الطبيعة المكتظَّة بشدةٍ للكلوروفيل. قد تُثار الجزيئات نفسُها المتاخمة للجزيء الذي امتصَّ الفوتون، ومن ثم ترثُ بفاعلية طاقة الإلكترون الذي أُثيرَ في البداية، التي تنتقل حينئذٍ إلى إلكترونِ ذرة المغنيسيوم الخاصِّ بها.

بالطبع تكمنُ المشكلةُ في اختيار المَسار التي تتَّخذه عمليةُ نقل الطاقة هذه. إذا اتخذتَ اتجاهًا خاطئًا وأخذتَ تقفز على نحوٍ عشوائي من جُزيء إلى آخَر في غابة الكلوروفيل، فستفقدُ طاقتَها في النهاية بدلًا من أن تُوصلها إلى مركز التفاعل. إذن ما الطريق الذي ينبغي عليها اتباعُه؟ ليس هناك متَّسعٌ من الوقت أمامها كي تجدَ الطريق إلى وجهتها قبل أن تنتهيَ صلاحيةُ الإكسيتون.

حتى وقتٍ قريب، كان يُعتقَد أن عملية القفز هذه من جزيءٍ إلى آخَر في الكلوروفيل تجري بطريقة عشوائية؛ إذ تتبنَّى في الأساس استراتيجيةَ الملاذ الأخير، المعروفةَ باسم السَّير العشوائي. يُشار إلى تلك الاستراتيجية في بعض الأحيان باسم «سير الثَّمِل»؛ لأنها تُشبه المسار الذي يتخذه الإنسانُ الثَّمِل وهو يخرج من الحانة؛ إذ يظل يترنَّح بين الطرقات حتى يجد الطريقَ إلى منزله في النهاية. لكن السير العشوائي ليس وسيلةً فعالة جدًّا في الوصول إلى أي مكان؛ إذا كان منزل الثَّمِل بعيدًا، فربما يستيقظ في الصباح التالي ويجد نفسَه مُمدَّدًا في دَغْلٍ في الجانب الآخَر من المدينة. الجسم الذي يتَّخذ استراتيجيةَ السير العشوائي سيميلُ إلى الابتعاد عن نقطةِ الانطلاق بمسافةٍ تتناسب مع الجَذر التربيعي للوقت المستغرق. فإذا قطع الثملُ مسافةَ مترٍ في دقيقةٍ واحدة، فسيقطع مترَين في أربع دقائق وثلاثةَ أمتار في تسع دقائق. بناءً على هذا التقدُّم المُتثاقِل، فلا عجب من أن الحيوانات والميكروبات نادرًا ما تستخدِم السَّير العشوائي للعثور على الطعام أو الفريسة، ولا تلجأ إليه إلا في حالةِ غياب الخيارات الأخرى. أنزِلْ نملةً على أرضٍ لا تعرفها وبمجرد أن تشتمَّ رائحة، ستترك السَّير العشوائي وتتبع حاسةَ الشمِّ لديها.

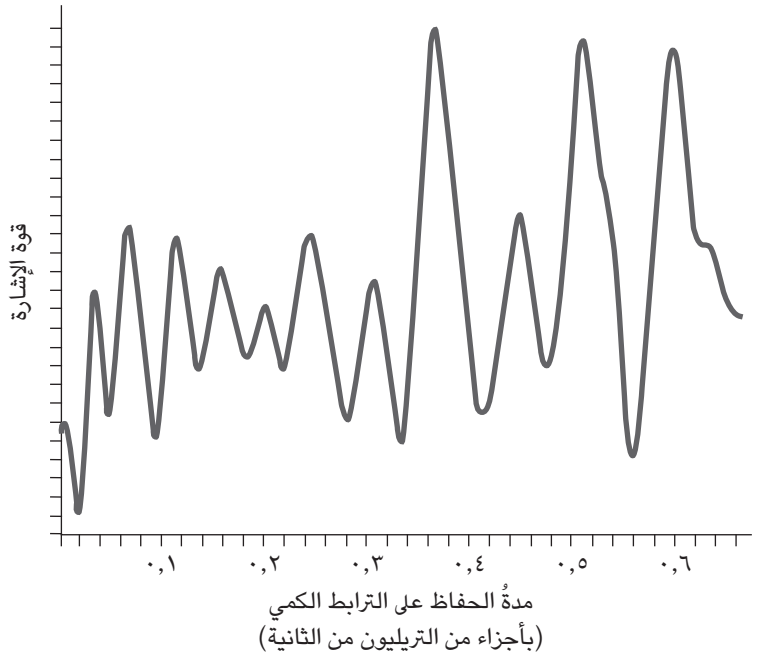
لعدم امتلاكِها حاسةِ شمٍّ أو مَهارات مِلاحة، كان يُعتقَد أن طاقة الإكسيتون تتقدَّم بين جَنبات غابة الكلوروفيل باستخدام استراتيجية سير الثِمل. ولكن تلك الصورة ليست منطقيةً كثيرًا حيث إن المعروف عن هذا الحدث الأول في عملية البناء الضوئي أنه يمتازُ بفاعليةٍ استثنائية. في الحقيقة، نقلُ طاقة الفوتون المُمتصَّة من جُزيءٍ هوائي الكلوروفيل إلى مركز التفاعل يمتاز بأقصى درجات الفاعلية مقارنةً بأي تفاعل معروفٍ آخَر سواءٌ كان طبيعيًّا أو اصطناعيًّا؛ إذ توشك نسبةُ فاعليته أن تبلغ ١٠٠ بالمائة. وفي أفضل الظروف،

يصل تقريبًا كلُّ جزء من الطاقة التي امتصَّها جزيءُ الكلوروفيل إلى مركز التفاعل. إذا كان المسار المسلوك متعرجًا، فستُفقد كل أجزاء الطاقة تقريبًا أو مُعظمها بالتأكيد. إن الطريقة التي تستطيع أن تعثر بها طاقةُ البناء الضوئي هذه على طريقها إلى وجهتها، وذلك على نحوٍ أفضل بكثير من مشية الثِمل أو النمل، أو في الحقيقة التكنولوجيا الخاصة بنا ذات الكفاءة العالية في استخدام الطاقة، كانت ولا تزال واحدةً من أكبر الألغاز في علم الأحياء.

## النبضة الكمية

الباحث الرئيسي للورقة البحثية[3] التي استند إليها المقالُ الذي أثار ضحكَ النادي البحثي لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا كما أوضَحْنا هو الأمريكي المتجنِّس جراهام فليمنج. وُلد جراهام فليمنج في بارو في شمال إنجلترا عام ١٩٤٩، وهو يترأَّس الآن مجموعةً في جامعة بيركلي بكاليفورنيا مشهودًا لها بأنها من الفِرَق البحثية الرائدة في العالَم في هذا المجال؛ إذ تستخدم تقنيةً مهمة تحمل اسمًا مثيرًا للإعجاب وهو «التحليل الطيفي الإلكتروني الثنائي الأبعاد المعتمد على تحويل فوريه» (2D-FTES). يمكن لهذه التقنية فحصُ البِنْية الداخلية لأصغرِ الأنظمة الجزيئية وديناميكيتها عن طريقِ توجيهها باستخدام نبضات ليزر قصيرةِ المدة وعالية التركيز. قام أغلبُ عمل المجموعة ليس على دراسةِ النباتات، ولكن على دراسة أحدِ مُركبات عملية البناء الضوئي وهو بروتين فينا-ماثيوز-أولسون الذي تُنشئه ميكروبات البناء الضوئي التي تُسمى بكتيريا الكبريت الخضراء، والتي تُوجَد في أعماق المسطحات المائية الغنية بالكبريتيد مثل البحر الأسود. لفحص عينةِ كلوروفيل، أطلق الباحثون ثلاثَ نبضاتٍ متتاليةٍ من ضوء الليزر باتجاه مركبات البناء الضوئي. تُطلِق تلك النبضاتُ طاقتَها في انفجاراتٍ بالغةِ السرعة ودقيقة التوقيت، وتولد إشارةً ضوئية من العينة تلتقِطها أجهزةُ الرصد.

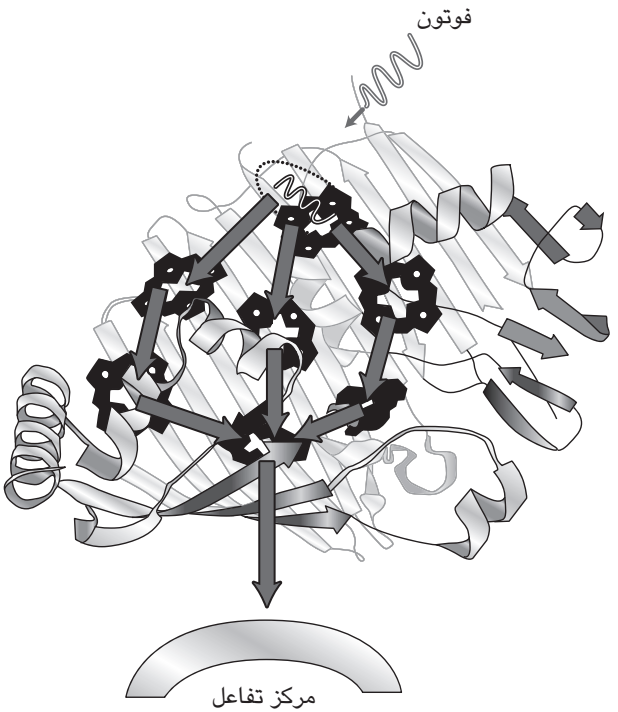
أمضى الباحث الرئيسي للورقة البحثية جريج إنجل الليلَ بأكمله في تجميع البيانات التي تُولِّدها الإشارات التي تستغرقُ وقتًا يتراوح ما بين خمسين إلى سِتِّمائة فيمتو ثانية[٣]؛ كي يخرج بمخطَّطٍ لنتائجها. ما اكتشفه هو ارتفاعُ وانخفاضُ الإشارة التي تذبذبت لمدة ستمائة فيمتو ثانية على الأقل (انظر الشكل ٤-٧). هذه التذبذبات شبيهةٌ بنمط التداخُل المكوَّن من مناطقَ مضيئةٍ ومظلمة في تجرِبة الشق المزدوج، أو إنها تعد المكافئَ الكمِّي لذبذبات الصوت النابضة التي تُسمع عند ضبطِ آلةٍ موسيقية. أظهرت تلك




شكل ٤-٧: النبضات الكمية التي رآها جراهام فليمنج وزملاؤه في تَجرِبتهم التي أُجريت عام ٢٠٠٧. ولا تكمن الأهميةُ في الشكل غير المنتظم للتذبذبات، بل في حقيقة وجود التذبذبات من الأساس.

«النبضة الكمية» أن الإكسيتون لم يكن يسلك مسارًا واحدًا في متاهة الكلوروفيل، ولكنه كان يتبع عدةَ مساراتٍ في آنٍ واحد (انظر الشكل ٤-٨). تلك المسارات البديلة تعمل على نحوٍ مُشابه قليلًا للنغمات النابضة للجيتار غير المضبوط؛ إنها تولِّد نبضاتٍ عندما يكون لها الطولُ نفسُه تقريبًا.

ولكن تذكَّر أن هذا الترابطَ الكميَّ حساسٌ للغاية ويكاد يستحيلُ الحفاظ عليه. هل كان من الممكن حقًّا أن يتفوَّق ميكروب أو نبات على الجهود الحثيثة التي بذلَها ألمعُ وأفضل الباحثين في مجالِ الحوسبة الكَميَّة من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا لمنع فكِّ الترابط؟ في الحقيقة، كان هذا بالفعل هو الزعمَ الجريءَ لورقة فليمنج البحثية وكان




شكل ٤-٨: يتحرك الإكسيتون عبر بروتين فينا-ماثيوز-أولسون متبعًا عدةَ مسارات في الوقتِ نفسه.

ذلك «الدجَل الكمي» — على حدِّ وصف سيث لويد — هو ما أثار انزعاجَ النادي البحثيِّ لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. اقترحَت مجموعةُ جامعة بيركلي أن مركَّب بروتين فينا-ماثيوز-أولسون كان يعمل ككمبيوتر كمِّي؛ إذ كان يبحث عن أسرعِ مسار إلى مركز التفاعل، وهي مسألةٌ صعبة تتعلق باختيار الأمثل، تُكافئ مسألة البائع المتجوِّل الشهيرة في الرياضيات، والتي لا تُحلُّ إلا باستخدام جهاز كمبيوتر ذي إمكانياتٍ عالية جدًّا؛ نظرًا إلى أن فيها خُططَ سفرٍ تتضمَّن الكثيرَ من الوجهات.[٥]

على الرغم من تشكُّك أعضاء النادي البحثي، فإنهم أوكَلوا إلى سيث لويد مهمةَ البحث في هذا الزعم. لدهشة الجميع في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا؛ توصَّلَت التحرياتُ

العِلمية التي أجراها لويد إلى وجودِ سندٍ حقيقي بالفعل لِمَزاعم مجموعة جامعة بيركلي. النبضات التي اكتشفتها مجموعةُ فليمنج في مركَّب فينا-ماثيوز-أولسون كانت بالفعل علامةً على الترابط الكمي، واستنتج لويد أن جُزيئات الكلوروفيل كانت تُنفذ استراتيجيةَ بحثٍ جديدةً تُعرف باسم «السَّير الكمي».

يمكن أن تتَّضح أفضليةُ السَّير الكميِّ على السير العشوائي الكلاسيكي بالعودة إلى مِثالنا الخاصِّ بالرجل الثمل المتثاقلِ الخُطى، وتخيُّلِ أن الحانة التي غادرها اندفع منها تسريبٌ للماء، والماءُ ينهمر من بابها. وعلى خلاف الرجل المخمور الذي لا بد أن يختار مَسارًا واحدًا، فإن موجات المياه التي تخرج من الحانة تتقدَّم في كل الاتجاهات الممكِنة. وعمَّا قريبٍ سيجد هذا السائرُ المخمور نفسَه وقد لحقَه الماء؛ لأن موجة الماء تتقدَّم عبر الشوارع بسرعةٍ تتناسب ببساطةٍ مع الوقت المُستغرَق وليس مع جَذْرِه التربيعي. ومن ثم إذا كانت المياه تتقدَّم بسرعةِ مترٍ واحد في الثانية، فستقطعُ مسافةَ مترَين بعد ثانيتَين، وثلاثةَ أمتار بعد ثلاثِ ثوانٍ، وهكذا دواليك. ليس لهذا السبب فحَسْب، بل لأنها، مِثلَ الذرة التي في حالة التراكب في تجربة الشق المزدوج، تسير في كل المسارات الممكِنة في آنٍ واحد، وبالتأكيد سيصِل جزءٌ من مقدمة الموجة إلى منزل السِّكير قبل أن يصلَ إليه هو.

أثارت الورقة البحثية التي طرحَها فليمنج موجةً من الدهشة والذعر تجاوزَت الناديَ البحثي في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. لكن هُرِع بعضُ المُعلقين إلى الإشارة بأن التجارِب أُجريت باستخدام مُركَّبات فينا-ماثيوز-أولسون معزولةً، جرى تبريدها حتى درجة ٧٧ كلفن (التي تساوي ١٩٦ درجةً مئوية تحت الصفر)؛ ومن الواضح أنها أبردُ بكثيرٍ من أيِّ درجة حرارة تتوافق مع عملية البناء الضوئي في النبات أو حتى مع الحياة، لكن انخفاض درجة الحرارة إلى هذا الحدِّ كفيلٌ بأن يمنع فكَّ الترابط. ما مدى ارتباط هذه البكتيريا التي خُفِّضَت درجةُ حرارتها بشدةٍ بأي شيء يحدث في الأجزاء الداخلية الحارة والفوضوية لخلايا النبات؟

لكن سرعان ما تبيَّنَ أن الترابط الكميَّ لم يكن مقتصرًا على تلك المركَّبات. ففي عام ٢٠٠٩، اكتشف إيان ميرسر من كلية دبلن الجامعية نبضًا كميًّا في نظامِ بناءٍ ضوئي (أو نظامٍ ضوئيٍّ للاختصار) بكتيريٍّ آخَر يُسمى مُركَّبَ جمعِ الضوء ٢ (LHC2)، وهو شديدُ الشبَه بالنظام الضوئي في النبات، ولكنه يعمل في درجاتِ الحرارة المحيطة العادية التي تقوم فيها النباتاتُ والميكروبات بعملية البناء الضوئي بصورةٍ طبيعية.[4] ثم في عام ٢٠١٠، أثبَت جريج سكولز من جامعة أونتاريو نبضًا كميًّا في النظام الضوئي لمجموعةٍ

من الطحالب المائية (التي تختلف عن النباتات العُليا في عدم امتلاك جذورٍ وسيقان وأوراق) وتُسمَّى المختفيات وهي متوفرةٌ بغزارة غير عادية، لدرجة أنها مسئولة عن تثبيتِ القدر نفسِه من الكربون في الجو (بمعنى امتصاص ثاني أكسيد الكربون من الجو) مثل النباتات العُليا.[5] وفي تلك الآونةِ تقريبًا، أثبتَ جريج إنجل نبضًا كميًّا في مركَّب فينا-ماثيوز-أولسون نفسه الذي دُرس في مختبر جراهام فليمنج، ولكن هذه المرةَ في درجاتِ حرارةٍ أعلى كثيرًا وتدعم الحياة.[6] وحتى لا تعتقد أن هذه الظاهرة الجديرة بالملاحظة مقتصرةٌ على البكتيريا والطحالب، فإن تيسا كالهون وزملاءها من مختبر فليمنج في بيركلي اكتشفوا مؤخرًا نبضًا كميًّا في نظامٍ آخر لمركَّب جمع الضوء ٢، ووجَدوه هذه المرةَ في السبانخ.[7] يُوجَد مُركب جمع الضوء ٢ في كل النباتات العليا ويحتوي على ٥٠ بالمائة من كل الكلوروفيل الموجودِ على الكوكب.

قبل أن نَمضي قدُمًا، سنصف باختصارٍ كيف تُستخدَم طاقة الإكسيتون المأخوذةُ من الشمس — بحسب تعبير فاينمان — لفكِّ ترابُط «الأكسجين عن الكربون ... ومِن ثَم يُترك الكربون، والماء، ليكونا مادةَ الشجرة»، أو التفاحة.

بعد وصول قدرٍ كافٍ من الطاقة إلى مركز التفاعل، فإنها تجعل زوجًا خاصًّا من جُزيئات الكلوروفيل (يُسمى بي ٦٨٠ (P680)) يطرد إلكترونات. سنتعرف على المزيد ممَّا يجري داخل مركز التفاعل في الفصل العاشر، حيث إن ذلك المركز مكانٌ مذهل قد يكون موطنًا لعمليةٍ كمية أخرى جديدة. مصدر هذه الإلكترونات هو الماء (والتي تتذكَّر أنها من مكوناتِ عملية البناء الضوئي كما ذكَر فاينمان). وكما اكتشفنا في الفصل السابق، يُطلَق على التقاط ذراتِ الكربون من أيِّ مادة اسمُ الأكسدة، وهي العملية نفسُها التي تحدث أثناء الاحتراق. على سبيل المثال، عندما يحترق الخشبُ في الهواء، تسحب ذراتُ الأكسجين الإلكتروناتِ من ذرات الكربون. الإلكترونات في المدار الخارجي للكربون غيرُ مُحكمةِ الارتباط، وهذا يُفسر سهولةَ احتراق الكربون. ولكنها في الماء مرتبطةٌ بإحكامٍ شديد؛ مما يعني أن أنظمة البناء الضوئي فريدةٌ حيث إنها المكان الوحيد في العالَم الطبيعي الذي «تحترق فيه المياه» لتوليد الإلكترونات.[٦]

يسير كلُّ شيءٍ على ما يرام حتى الآن؛ أصبح لدينا الآن إمدادٌ من الإلكترونات الحرة بفضل الطاقة التي تُوفِّرها الإكسيتونات في الكلوروفيل. بعد ذلك، يحتاج النبات إلى إرسالِ تلك الإلكترونات إلى المكان الذي يمكن أن يكون لها دورٌ فيه. أولًا: تُلتقَط الإلكترونات بناقلٍ مختص بالإلكترونات في الخلية وهو نيكوتيناميد أدينين الفوسفات

الثنائي النكليوتيد المختزَل. التقينا مع جُزيءٍ مُشابهٍ وهو نيكوتيناميد الأدينين الثنائي النكليوتيد المختزل على نحوٍ وجيز في الفصل السابق، وقُلنا إنه مشتركٌ في نقل الإلكترونات التي تُلتقَط من العناصر الغذائية مثل السُّكَّر إلى سلسلةِ إنزيمات تنفُّسية في عُضيَّات الطاقة الخاصة بالخلية، التي تُسمى بالميتوكوندريا. إذا كنتَ تتذكَّر، تتدفَّق الإلكترونات الملتقطة المنقولة إلى الميتوكوندريا من خلال جُزيء نيكوتيناميد الأدينين الثنائي النكليوتيد المختزل إلى سلسلةِ إنزيمات تنفُّسية في صورةِ تيارٍ كهربي يُستخدَم لضخِّ البروتونات عبر غشاء، ويُستخدَم التدفُّق العكسي لهذه البروتونات في تخليقِ حامل الطاقة في الخلية وهو الأدينوسين الثلاثي الفوسفات. تُستخدَم عمليةٌ مُماثلة جدًّا لإنتاج الأدينوسين الثلاثي الفوسفات في البلاستيدات الخضراء للنبات. إن نيكوتيناميد أدينين الفوسفات الثنائي النكليوتيد المختزل ينقل الإلكترونات التي يَحملها إلى سلسلةِ إنزيمات تضخُّ البروتونات بطريقةٍ مُماثلة خارجَ غشاء البلاستيدة الخضراء. يُستخدَم التدفُّق العكسي لتلك البروتونات لإنتاج جُزيئات الأدينوسين الثلاثي الفوسفات التي يمكن أن تستمرَّ بعد ذلك في توفير الطاقة اللازمة للكثير من العمليات المحتاجة إلى الطاقة في خلية النبات.

لكن عملية تثبيت الكربون الفعلية تحدُث خارج الثايلاكويد وإن كانت لا تزال داخل حدود البلاستيدة الخضراء، وعملية تثبيت الكربون عبارةٌ عن التقاط ذرَّات الكربون من ثاني أكسيد الكربون الموجود في الهواء واستخدامها لتخليق جزيئات عضوية غنيَّة بالطاقة مثل السكر. وتلك العملية يقوم بها إنزيمٌ ضخم يُسمَّى روبيسكو، الذي يكاد يكون أكثرَ بروتين موجود على الكوكب حيث إن عليه القيامَ بأكبرِ مهمة؛ ألا وهي تخليق كل الكتلة الحيوية في العالم تقريبًا. هذا الإنزيم يدمج ذرةَ الكربون المسحوبة من ثاني أكسيد الكربون في جزيءِ سكرٍ بسيط خماسي الكربون يُسمى ريبولوز-٥,١- مضاعف الفوسفات لتخليقِ سكر سداسيِّ الكربون. للقيام بهذا، فإنه يستخدم المكوِّنَين اللذين توفَّرا له، وهما الإلكترونات (التي يوفرها نيكوتيناميد أدينين الفوسفات الثنائي النكليوتيد المختزل)، ومصدر الطاقة (الأدينوسين الثلاثي الفوسفات). كِلا المُكونَين ناتجان عن العمليات المُحفَّزة بالضوء في عملية البناء الضوئي.

سرعان ما ينقسم السكر السداسيُّ الكربون الذي أنتجَه إنزيم روبيسكو إلى اثنين من السكر الثلاثي الكربون، يرتبط أحدُهما بالآخَر بعد ذلك بالعديد من الطرق المختلفة؛ لتخليق كلِّ الجزيئات الحيوية التي تُنتج شجرةَ التفاح، بما في ذلك ثِمارُها. وهكذا

بمساعدة الضوء وبعض آليات ميكانيكا الكم، تحوَّل هواء نيو إنجلاند وماؤها اللذان يُعدان من الجمادات إلى النسيج الحي لشجرة في نيو إنجلاند.

بالمقارنة بين عملية البناء الضوئي في النبات وعملية التنفُّس (حرق الطعام) التي تحدث في خلايانا، والتي تناولناها في الفصل السابق، تستطيع أن ترى أنه في الواقع لا يُوجَد اختلافٌ داخلي كبير بين الحيوان والنبات. يكمن الفرقُ الأساسي في المكان الذي يحصل منه كلٌّ منا على اللبنات الأساسية للحياة. كِلانا يحتاج إلى الكربون، ولكن النباتات تحصل عليه من الهواء ونحن نحصل عليه من المصادر العضوية مثل النباتات نفسِها. كلانا يحتاج إلى الإلكترونات لبناء الجزيئات الحيوية؛ نحن «نحرق» الجزيئات العضوية لالتقاط إلكتروناتها، ولكن النباتات تَستخدِم الضوء كي «تحرق» الماء لالتقاط إلكتروناتها. وكِلانا يحتاج إلى الطاقة: إننا نحصل عليها من الإلكترونات العالية الطاقة التي نحصل عليها من الطعام عن طريقِ إنزالها من على تِلال طاقة التنفُّس؛ وتلتقط النباتات طاقة الفوتونات الشمسية. وكل عملية من تلك العمليات تتضمَّن حركة الجسيمات الأساسية التي تحكمها القواعد الكمية. يبدو أن الحياة تستغلُّ العمليات الكمية كي تستمر.

إن اكتشاف الترابط الكمي في الأنظمة الحارة والرطبة والمضطربة مثل النباتات والميكروبات كان بمنزلة صدمةٍ كبيرة لعلماء فيزياء الكم، ومن ثم أصبح جزءٌ كبير من الأبحاث حاليًّا يركز على التحديد الدقيق لكيفية حماية الأنظمة الحية لحالات الترابط الكمي الحساسة الخاصة بها واستفادتها منها. سنعود إلى هذا اللغز في الفصل العا شر حيث سنعرض بعض الإجابات المحتملة المدهشة للغاية التي قد تساعد حتى علماء الفيزياء — مثل مُنظِّري الكم هؤلاء التابعين لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا الذين أشرنا إليهم — على بناء أجهزة كمبيوتر كمية عملية يُمكن أن تعمل على مكتبك بدلًا من أن تضعها في الديب فريزر. من المُحتمل أيضًا أن يؤديَ البحثُ إلى ظهور جيلٍ جديد من تقنيات البناء الضوئي الاصطناعي. تعتمد الخلايا الشمسية الحاليَّة بوجهٍ عامٍ على مبادئ البناء الضوئي، كما أنها تتنافس بالفعل مع الألواح الشمسية على حصةٍ في سوق الطاقة النظيفة، ولكن كفاءتها محدودةٌ بسبب ما يُهدَر في عملية نقل الطاقة (تبلغ الكفاءة في أفضل حالاتها ٧٠ بالمائة مقارنةً بكفاءةٍ تكاد تبلغ ١٠٠ بالمائة في خطوةِ التقاط طاقة الفوتونات في عملية البناء الضوئي). إن الجمع بين الترابط الكميِّ المُستوحى من علم الأحياء والخلايا الشمسية من شأنه أن يَزيد من كفاءة الطاقة الشمسية زيادةً كبيرة؛ ومن ثم يؤدي إلى بيئةٍ أقلَّ تلوثًا.

وأخيرًا، لنتوقَّف لحظةً للتفكُّر في أهمية ما أضفْناه إلى فهمنا عن الأشياء المميزة في الحياة. لنتفكر مرةً أخرى في تلك النبضات الكمية التي رآها جريج إنجل لأول مرةٍ في بياناتِ مركب فينا-ماثيوز-أولسون الخاصة به التي أظهرت أن الجسيمات تسير داخل الخلايا الحية في صورة موجات. هناك ميلٌ إلى اعتبار هذه النبضات ظواهرَ تظهر فقط داخلَ حدود المُختبرات وهي ليست ذاتَ أهميةٍ خارج نطاقِ التجارِب الكيميائية الحيوية. ولكن الأبحاث اللاحقة أظهرَت أنها موجودة بالفعل في العالَم الطبيعي أيضًا، وبداخل الأوراق والطحالب والميكروبات، وأن لها دورًا، قد يكون بالغ الأهمية، في بناء مُحيطنا الحيوي.

ومع ذلك، يبدو العالم الكميُّ غريبًا جدًّا في نظرنا، وغالبًا ما يُزعم أن هذه الغرابة أحدُ أعراض الانقسام الجوهري بين العالَم الذي نراه من حولنا وأُسُسهُ الكمية. لكن في حقيقة الأمر لا تُوجَد سوى مجموعةِ قوانينَ واحدة تحكم سلوكَ العالم؛ ألا وهي القوانين الكمية.[٧] وفي النهاية، فإن قوانين نيوتن وقوانين الإحصاء المألوفة ما هي إلا قوانينُ كميةٍ جرَت غربَلتُها من خلال عدسةِ فكِّ ترابطٍ تحجب الأشياء الغريبة (وهذا يُفسر لماذا نرى الظواهر الكمية غريبة). تعمَّقْ أكثرَ ولن تفتأَ تكتشفُ أن ميكانيكا الكم تكمن في قلب واقِعنا المألوف.

إضافةً إلى ذلك، بعض الأجسام العيانية حسَّاسة تجاه الظواهر الكمية، ومعظم هذه الأجسام حية. اكتشفنا في الفصل السابق كيف أن النفقَ الكمي داخل الإنزيمات يُمكن أن يُحدِثَ فرقًا في الخلايا ككُل، وفي هذا الفصل رأينا كيف أن حدث التقاط الفوتونات الأوَّلي المسئول عن تكوينِ معظم الكتلة الحيوية على الكوكب يبدو أنه يعتمِد على ترابطٍ كمِّي دقيق يمكن الحفاظُ عليه أوقاتًا زمنية ذاتَ صلةٍ بيولوجيًّا داخل الجزء الداخلي الدافئ، ولكن عالي التنظيم في الورقة أو الميكروب. مرةً أخرى، نرى أن مبدأ شرودنجر «تولُّد النظام من النظام» قادرٌ على توضيح الأحداث الكمية، وما أطلق عليه يوردان «تضخُّم» الظواهر الكمية في العالم العياني. يبدو أن الحياة تربط بين العالم الكمي والعالم الكلاسيكي، حيث إنها تجثو على الحافة الكمية.

في الفصل القادم، سنُوجِّه اهتمامنا إلى عملية جوهرية أخرى في محيطنا الحيوي. ما كان لشجرة تفاح نيوتن أن تُثمر أيَّ تفاحٍ إذا لم تُلقِّح زهرتَها أولًا الطيورُ والحشرات، لا سيما النحل. لكن كان على النحل أن يجد طريقَه إلى زهرة الشجرة، والنحل يفعل ذلك باستخدام إمكانيةٍ أخرى يعتقد الكثيرون أنها تتحفَّز بميكانيكا الكم؛ ألا وهي حاسة الشم.

## هوامش

(١) هذه تذبذباتٌ في مستوى الصوت — أي: نوع من الخفَقات — تنتج عن نغمتَين موسيقيتَين لهما التردُّد نفسُه تقريبًا، ومتناغمتَين تقريبًا. والمقابل الإنجليزي لمصطلح «نبضة» beat له استخدامٌ أكثرُ شيوعًا في الموسيقى؛ حيث يَعني الإيقاع.

(٢) يجب أن يكون الشقَّان رفيعَين بشدةٍ وقريبَين بعضهما من بعض للغاية. في التجارِب التي أُجريت في تسعينيَّات القرن العشرين، كان الحاجز عبارةً عن لوحٍ من الرقائق الذهبية وكان عرضُ كلِّ شق يساوي تقريبًا ميكرومترًا واحدًا (أي: واحدًا على ألفٍ من الميلليمتر).

(٣) نفترض هنا أن جهاز الرصد يمتاز بكفاءةٍ تامة، وسيُصدر صوتًا إذا مرَّت الذرَّة من خلال الشقِّ الذي يُراقبه، ولكنه لن يتداخل مع مَسار الذرة. بالطبع هذا غيرُ ممكن عَمليًّا؛ حيث إننا لا نستطيع تحاشيَ اعتراض مسار الذرة خلال عملية الرصد، كما سنرى بعد قليل.

(٤) الفيمتو ثانية تساوي واحدًا من مليون مليار من الثانية، أو $١٠^{-١٥}$ ثانية.

(٥) تدور مسألة البائع المُتجوِّل حول إيجاد أقصرِ طريق يمرُّ بعددٍ كبير من المدن. اصطلح علماءُ الرياضيات على وصفِ تلك المسألة بأنها «مسألةٌ كثيرة الحدود وغيرُ قطعيَّة»؛ بمعنى أنه لا تُوجَد فيها طريقةٌ مختصرةٌ لإيجاد الحلِّ ولو حتى نظريًّا، والطريقة الوحيدة لإيجاد الحل الأمثل هي البحث الكثيف والمُضْني باستخدام الكمبيوتر عبر كلِّ الطرق الممكنة.

(٦) عندما نقول «احتراق الماء»، فبالطبع لا نقصد أن الماء وقودٌ مثل الفحم، ولكننا نستخدم المصطلح على نحوٍ فضفاض للإشارة إلى عملية الأكسدة الجزيئية.

(٧) يجب أن نُضيف توضيحًا هنا؛ حيث إن ميكانيكا الكم لا تستطيع أن تُفسر حتى الآن قوة الجاذبية، حيث إن نظرية النسبية العامة (التي توضح كيف نفهم الجاذبية) يبدو أنها لا تتفق مع ميكانيكا الكم. ولذلك، فإن الجمع بين ميكانيكا الكم ونظرية النسبية العامة لبناء نظريةٍ كمية عن الجاذبية؛ لا يزال من أكبر التحديات التي تُواجِه الفيزياء.

الفصل الخامس

# البحث عن موطن نيمو

الأنف، على سبيل المثال، الذي لم يسبق أن تحدَّث عنه أيُّ فيلسوف بقدرٍ من التبجيل أو الامتنان، يُعَد، حتى الآن، أدقَّ الأدوات التي نمتلِكها. إنه أداةٌ قادرة على تسجيل أقلِّ التغييرات التي تتفلَّت حتى من عمليات الرصد الطيفية.

فريدريش نيتشه، «أفول الأصنام»، ١٨٨٩

يبدو أنها تُوصِّل لنا رسالةً مُعينة من واقع مادي.

جاستون باشلار، «تكوين العقل العلمي،
مساهمة في التحليل النفسي للمعرفة الموضوعية»، ١٩٣٨

بين أذرُع أحدِ حيوانات شقائق النعمان البحرية المُميتة، المغروزةِ في إحدى الشِّعاب المَرْجانية قُبالةَ ساحل جزيرة فيردي بالفلبين؛ يقبع زوجان من أسماكٍ صغيرة مُخططة باللونَين الأبيض والبرتقالي، تُعرف باسم أسماك المهرج الشائعة، أو أسماك شقائق النعمان، أو أمفيبيريون أوسيلاريس. عاش أحدُ هذين الزوجَين، ألا وهو الأنثى، حياةً مثيرة للاهتمام أكثرَ من معظم الفقاريات؛ لأنها لم تكن أنثى طَوال الوقت. فمثل كلِّ أنواع أسماك المهرج، تبدأ الأنثى حياتَها ذكرًا أصغرَ حجمًا يكون تابعًا للأنثى الوحيدة في جماعة الأسماك التي تسكن داخلَ حيوان شقائق النعمان هذا تحديدًا. تتمتَّع أسماك المهرج ببناءٍ اجتماعي قوي، وقد تنافَس هذا الذكرُ مع غيره من الذكور حتى أصبح المهيمنَ في النهاية ويتمتع بشرف التزاوُج مع الأنثى الوحيدة. ولكن عندما يمرُّ أحد أسماك الأنقليس ويلتهمُ الأنثى، ينضج المبيضان اللذان كانا خامِلَين في جسده عدةَ سنوات وتتوقَّف الخصيتان عن

العمل، ويتحول ذكَر السمك المهرج إلى الأنثى المَلكة المستعدَّة للتزاوج مع الذكَر التالي في ترتيب السيادة الهرمي.

معروفٌ أن أسماك المهرج تعيش في الشِّعاب المَرجانية التي تمتدُّ من المحيط الهندي وحتى غرب المحيط الهادئ، وتتغذَّى على النباتات والطحالب والعوالق والحيوانات مثل الرخويات والقشريات الصغيرة. ولأن حجمها صغيرٌ وألوانها برَّاقة ولا يُوجَد في تكوينها عمودٌ فقري أو زعانفُ أو بروزات أو أشواك حادَّة، فإنها تكون فريسةً سهلة لأسماك الأنقليس والقرش والمفترسات الأخرى التي تجوب الشِّعابَ المَرجانية. عندما تتعرَّض للتهديد، فإن وسيلتها الأساسية في الدفاع هي الاندفاعُ بين مِجسَّات مُضيفها من حيواناتِ شقائق النعمان؛ إذ تنعم من خلال لسعته السامَّة بطبقةٍ سميكة من المخاط تُغطي قشورَها وتَحميها من عدوِّها. وفي المقابل، تستفيد حيواناتُ شقائق النعمان من نُزلائها الملوَّنين حيث إنها تُطارد المتسلِّلين غير المرحَّب بهم مثل أسماك الفراشة التي تتغذَّى عليها.

كان هذا هو الإطار الذي تعرَّفنا فيه على سمكة المهرج في فيلم الرسوم المتحركة «البحث عن نيمو».[1] كان التحدِّي أمام مارلين، والد نيمو، هو العثورَ على ولده الذي اختُطف من موطنه في الحاجز المرجانيِّ العظيم وحُمل إلى سيدني. لكن التحدِّي الذي يُعكر صفو سمكة المهرج الحقيقية هو العثورُ على طريق العودة إلى الوطن.

كلُّ حيوان من حيوانات شقائق النعمان قد يستضيف جماعةً كاملة من أسماك المهرج تتضمَّن ذكرًا وأنثى يُهيمنان معًا على العديد من الذكور الصغار التي تتنافسُ بعضها مع بعض على دورِ زوج الملكة. إن قدرة ذكَر سمك المهرج غير العادية على تغييرِ جنسه عند موت السمكة الملكة وهي قدرةٌ تُسمى الخنوثة المُبكِّرة الذكورة، ربما تكون وسيلةً للتكيُّف مع الحياة في الشِّعاب المرجانية الخطيرة، حيث إنها تُتيح للجماعة أن تبقى على قيد الحياة بعد موت الأنثى الوحيدة القادرةِ على التكاثر من دون الاضطرار إلى تركِ حماية حيوانِ شقائق النعمان المُضيف. وعلى الرغم من احتماليةِ عيش جماعةٍ كاملة من أسماك المهرج عند أحد حيوانات شقائقِ النعمان لسنواتٍ عديدة، فإنه لا مَناص من أن ترحل ذريةُ تلك الأسماك عن موطنِها الآمن. وفي النهاية، ستُضطرُّ إلى البحث عن طريق العودة.

البدر يُعدُّ إشارةً على تفريخ معظم أسماك الشعاب المَرجانية.[2] وبمجرد أن يبدأ القمرُ في التضاؤل فوق المحيط، تَشغل الأنثى نفسها بوضع مجموعةٍ من البيض كي يُخصِّبها

الذكرُ المهيمن. وهنا تنتهي مهمتُها، وتَئول مهمةُ حراسة البَيض وطرد أسماك الشعاب المرجانية المفترسة إلى الذكر. وبعد نحوِ أسبوع من الرعاية، يفقس البيضُ وتنطلق مئات اليرقات في تيَّارات المياه.

إن طول سمكة المهرج في طَور اليرقة لا يتجاوز بِضعةَ ملليمترات وتكاد تكون شفافةً بالكامل. ولمدةِ أسبوع تقريبًا، تنجرف في تيارات المحيط تتغذَّى على العوالق الحيوانية. وكما يعلم كلُّ مَن غاص قبالة الشعاب المرجانية، فإن الانجرافَ في تيارات المحيط سرعان ما سيُبعدك عن النقطة التي انطلقتَ منها، ومن ثم يُمكن أن تُحمل يرقات أسماك المهرج عدةَ كيلومترات بعيدًا عن الشعبة المرجانية التي وُلِدَت فيها. تؤكَل معظم هذه اليرقات، ولكن يبقى بعضُها على قيد الحياة، وتسبح تلك اليرقاتُ القليلة المحظوظة بعد أسبوع تقريبًا إلى قاع المحيط، وتتحوَّل في غضون يوم (مثل الضفدع المذكور في الفصل الثالث) إلى شكلها اليافع، وهو نسخةٌ مصغَّرة من السمكة البالغة. وبالافتقار إلى الحماية التي توفِّرها حيواناتُ شقائق النعمان السامة، تُصبح الأسماك الصغيرة ذاتُ الألوان البراقة فريسةً سهلة جدًّا للمفترسات التي تجوب أعماقَ المحيط. وإذا كانت تودُّ البقاء على قيد الحياة، فيجب أن تعثر سريعًا على إحدى الشعاب المرجانية كي تحتمي بها.

كان يُعتقد أن يرقات أسماك الشعاب المرجانية انجرفَت مع تيارات المحيط، وأنها اعتمدَت على الصدفة كي تُلقى على مقربةٍ من الشعبة المرجانية المناسبة. ولكن هذا التفسير في واقع الأمر ليس منطقيًّا تمامًا؛ إذ كان من المعروف أن معظم اليرقات تُجيد السباحة، ولا جَدْوى من السباحة إذا لم تكن تعلم أين تذهب. ثم في عام ٢٠٠٦، حصَلَت جابرييل جيرلاك الباحثةُ من المختبر البيولوجي البحري الشهير بوودز هول بولاية ماساتشوستس؛ على البصمات الجينيَّة للأسماك التي تعيش على الشعاب المرجانية التي تفصل بينها مسافةٌ تتراوح بين ٣ إلى ٢٣ كيلومترًا داخل المجمع الذي يُشكل الحاجزَ المرجاني العظيم في أستراليا. اكتشفَت أن الأسماك التي تسكن الشعبة المرجانية نفسها أقربُ إلى بعضِها من تلك التي تسكن شعابًا مَرجانية أخرى على مسافةٍ أبعد. وبما أن كلَّ يرقات أسماك الشعاب المرجانية تتفرَّق عبر مسافات كبيرة، فإن النتيجة التي توصَّلَت إليها لن تكون منطقيةً إلا إذا عادت الأسماكُ البالِغة إلى الشعبة المرجانية التي وُلدت فيها. وبطريقةٍ ما، يَجب وسْمُ كلِّ يرقةٍ من يرقات أسماك الشعاب المرجانية ببصمةٍ تُحدِّد المنطقة التي فقسَت فيها.

لكن كيف لأسماك المهرج اليرقية أو اليافعة التي انجرفَت بعيدًا جدًّا عن موطنها أن تعرف الاتجاه الذي ينبغي أن تسبح فيه؟ لا يتوفر في قاع المحيط أيُّ إشاراتٍ بصرية

مفيدة. وتنعدمُ فيه النقاط المرجعية ومن ثم يبدو متشابهًا في جميع الاتجاهات؛ إذ يكون أشبهَ بصحراء رملية مُزيَّنة بالحصى المتناثر والصخور والمفصليَّات التي تتجوَّل من آنٍ لآخَر. كذلك لا يُحتمل أن تُرسل الشعبة المرجانية البعيدة أيَّ إشاراتٍ سمعية يُمكن أن تسافر عدةَ كيلومترات. التيارات في ذاتها مشكلةٌ أخرى؛ حيث إن اتجاه التدفق يختلف حسَب العمق، وقد يصعب جدًّا تحديدُ هل المسطح المائي جارٍ أم راكد. لا يُوجَد دليلٌ على أن أسماك المهرج تمتلك نوعَ البوصلة المغناطيسية الذي ساعد أنثى طائر أبي الحناء التي عرَضْنا لها على تحديد وِجهتها في هجرتها الشتوية. إذن، كيف تجد طريقها؟

تمتلك الأسماكُ حاسَّةَ شمٍّ قوية. من المعروف أن أسماك القرش التي يُخصَّص ثُلثا أدمغتها لحاسة الشمِّ تستطيع شمَّ نقطةِ دمٍ من مسافةٍ تَزيد على كيلومتر. هل يُحتمَل أن تتلمَّس أسماكُ الشعاب المرجانية طريقَ عودتها عبر حاسة الشم؟ لاختبار تلك النظرية؛ صمَّمَت جابرييل جيرلاك في عام ٢٠٠٧ «اختبارًا لاختيار أحدِ مَجْريَين عبر حاسَّة الشم»، وفيه وُضِعَت يرقاتُ أسماكِ شعابٍ مرجانية باتجاه التيار في مجرَيين مُمتلئَين بمياه البحر: أُخذ أحدُهما من مياه الشعبة المرجانية التي فقسَت عليها والآخَر من مياه شعبةٍ مرجانية بعيدة. ثم قامت بقياسِ أيِّ مَجرًى مائيٍّ ستُفضله اليرقات: هل ستُفضل موطنها أم المكان البعيد؟

دائمًا ما كانت اليرقات تتَّجه نحو المجرى المملوءِ بالمياه المأخوذة من الشعبة المرجانية التي فقسَت فيها. من الواضح أنه يمكنها التمييزُ بين مياه الشعاب المرجانية الغريبة والشعبة المرجانية التي ظهرَت فيها، ويُعتقد أنها تُميز بينهما من خلال رائحتهما المختلفة. استخدم مايكل إريفلاند — الباحث من جامعة جميس كوك في كوينزلاند بأستراليا — إعدادًا تجريبيًّا مشابهًا لإثباتِ أن أسماك المهرج يُمكن أن تشمَّ رائحةَ نوع حيواناتِ شقائق النعمان الذي يستضيفها وتُميزها عن الأنواع الأخرى التي لا تسكنها. والأدهى من ذلك، وجَدَت دانيلا ديكسون، من جامعة جيمس كوك أيضًا، أن أسماك المهرج يُمكنها التمييزُ بين المياه التي جُمِعَت من موطنها المفضَّل في الشعاب المرجانية التي تقع تحت الجزُر النباتية والموطن الأقلِّ تفضيلًا في مياه الشعاب المرجانية البعيدة عن الشاطئ. يبدو حقًّا أن نيمو وغيرَه من أسماك الشعاب المرجانية تشمُّ طريقها إلى موطنها.

إن قدرة الحيوانات على المِلاحة للعودة إلى مواطنها باستخدام حاسةِ الشم لديها معروفةٌ للجميع. ففي كل عام، تتجمَّع ملايينُ أسماك السلمون بطول سواحل المحيطات في جميع أنحاء العالم في أسرابٍ كبيرة عند مصبَّات الأنهار قبل أن تدخل في معركةٍ

مع تدفُّق التيارات ومُنحدرات الأنهار والشلالات والضفاف الرملية كي تصلَ إلى مناطقِ تكاثُرِها. وكما هو الحال مع أسماك المهرج، كان يُعتقَد أن اختيار أسماك السلمون للنهر المناسب نابعٌ من محض الصدفة. لكن في عام ١٩٣٩، وسَمَ العالِم الكندي ويلبرت إيه كليمنز ٤٦٩٣٢٦ سمكةَ سلمون صغيرةً اصطادها في رافدٍ مُعيَّن من روافد نهر فريزر. بعد سنوات، وجد أن ١٠٩٥٨ منها قد عادت إلى الرافد نفسِه. لم يجد أيَّ سمكة من التي وسَمها في أي رافدٍ آخَر من النهر. ولم تضلَّ أيُّ سمكة طريقَها في رحلتها من المحيط إلى موطنها. وظلت الكيفيةُ التي تتمكَّن بها تلك الأسماكُ من الإبحار عبر المحيطات والمجاري المائية إلى مواطنها؛ لغزًا لسنواتٍ عديدة. اقترح البروفسير آرثر هاسلر من جامعة ويسكونسن-ماديسون أن أسماك السلمون الصغيرة تتبع أثرَ رائحةٍ ما، واختبر نظريتَه عام ١٩٥٤ عن طريق اصطياد عدة مئات من الأسماك العائدة عكس التيار عند مُلتقى مَجْريَين في نهر إسكاوا بالقُرب من سياتل، ثم نقلها باتجاه التيار بعيدًا عن المُلتقى. دائمًا ما كانت أسماك السلمون تعود إلى فرع المُلتقى الذي اصطِيدَت منه. لكن عندما سدَّ فتحات أنوفها بسداداتٍ قُطنية قبل أن يُطلقها، سبَحَت حتى وصلَت إلى مُلتقى المجريَين في النهر وظلَّت تتردَّد بين المجْريَين ولم تستطع أن تُحدد هل تسير جهة اليمين أم جهة اليسار.

ربما تكون حاسةُ الشم حتى أقوى على الأرض لأن حجم الغلاف الجويِّ الذي تُخفَّف فيه الموادُّ ذاتُ الروائح؛ أوسعُ من ذلك الخاصِّ بالمحيط. الغلاف الجوي الأرضي أيضًا عُرضةٌ إلى درجةِ اضطرابٍ أعلى بسبب الطقس، ومن ثم فدرجة تشتُّت جزيئات المواد ذاتِ الروائح في الهواء أسرعُ منها في المياه. ومع ذلك، فإن حاسة الشم ضروريةٌ لبقاء معظم الحيوانات البرِّية، ولا تُستخدَم فقط للعثور على طريق عودتها إلى مواطنها، بل أيضًا لاصطياد الفرائس والهروب من الحيوانات المفترسة والعثور على وليفٍ للتزاوج وإصدارِ إشاراتِ إنذار وتحديد نطاق السيطرة وإطلاق التغييرات الفسيولوجية والتواصل. هذا النطاق الكامل من استخدام حاسَّة الشمِّ يكون أقلَّ وضوحًا لدى البشر، الذين عادةً ما يستعينون بحواسِّ الشمِّ الأقوى لدى الحيوانات المرافقة لهم لاكتشاف تلك الإشارات والعلامات. بالطبع تشتهر الكلاب بقوة حاسة الشم، والكلاب البوليسية التي ظهارة الشم (التي سنتحدث عنها أكثرَ لاحقًا) لديها أكبرُ من تلك الخاصة بالإنسان بأربعين مرة، تشتهر عن جدارةٍ بقدرتها على تتبُّع أثرِ رائحة فردٍ بعينه. شاهدنا جميعًا الأفلامَ التي تعرض كلبًا متتبِّعًا للأثر لا يحتاج إلا إلى أن يشَمَّ لحظاتٍ قميصًا خلَّفَه المُدان الهارب

حتى يستطيع تتبُّعَ هذا الشخص عبر الأراضي السبخة والغابات والجداول. وعلى الرغم من أن قصص الأفلام قد تكون خيالية، فإن تلك القدرة لدى الكلب البوليسي حقيقيةٌ تمامًا. فبإمكان الكلابِ أن تعرف المسار الذي كان يمشي فيه الشخصُ أو الحيوان وتتتبَّع أثرَ الرائحة التي مرَّ عليها عدة أيام.

يمكن تقديرُ حاسَّة الشم المذهلة لدى الحيوانات إذا فكَّرنا في الأشياء الفذَّة التي تقوم بها الكلابُ البوليسية أو أسماكُ المهرج على نحوٍ روتيني. لننظر أولًا إلى الكلاب البوليسية؛ إن حاسة الشم لديها مُصمَّمةٌ لتكتشفَ الكمياتِ الضئيلةَ من المواد الكيميائية العضوية مثل حمض البيوتيريك التي يُفرزها البشرُ والحيوانات، كما أن حساسية أنفِها غيرُ عادية. فإذا سُمح لجرامٍ واحد فقط من حمض البيوتيريك أن يتبخَّر في الغرفة، فسيكون الإنسانُ قادرًا حينها فقطَ على اكتشاف رائحته الزنخة، والحُلوة في الوقت نفسِه. لكن الكلب قادرٌ على أن يكتشفَ هذا الجرام نفسَه من تلك المادة الكيميائية إذا خُفِّفَت أبخِرتُه لتملأ الهواءَ فوق مدينةٍ بأكملها على ارتفاع ١٠٠ متر. فكر مرةً أخرى في أسماك المهرج أو السلمون التي تكتشف رائحةَ موطنها، الذي يبعد عنها عدةَ كيلومترات، والتي تُخفَّف وسط مياه المحيط.

لكن حاسة الشمِّ لدى الحيوانات ليست مميزةً لحساسيتها فحسب. إذ تتمتَّع أيضًا بقدرةٍ عالية التطور على التمييز بين الروائح. عادةً ما يستخدم ضباطُ الجمارك الكلابَ للكشف عن مجموعةٍ كبيرة من الموادِّ ذات الروائح، بدايةً من المخدِّرات مثل الماريجوانا والكوكايين وحتى المواد الكيميائية المستخدَمة في المتفجرات مثل مادة سي-٤، التي غالبًا ما تكون مندسَّةً داخل حقائبِ سفر وطبقاتِ تغليفٍ كثيفة. تستطيع الكلابُ أيضًا أن تُميز بين روائح الأفراد، حتى التوائم المتماثلة. السؤال هو: كيف تفعل ذلك؟ أليس حمض البيوتريك الذي يُفرزه أحدنا هو نفسه حمضَ البيوتريك الذي يُفرزه أيُّ شخص؟ بالطبع حمض البيوتريك واحد؛ لكن بالإضافة إلى هذا الحمض، كلٌّ منا يُفرز مزيجًا دقيقًا ومعقدًا من مئات الجزيئات العضوية التي تُوفر بصمةً تدلُّ على وجود كلِّ فردٍ منا على نحوٍ يُشبه بصمات الأصابع. بإمكان الكلاب أن «ترى» بصمةَ الأصابع الشمية الخاصة بنا بسهولةٍ مثلما بإمكاننا أن نرى ألوانَ قميص أحدنا. وبالمثل، لا بد أن أسماك المهرج والسلمون تعرف رائحةَ موطنها، تمامًا مثلما نعرف الشارع الذي نسكنُه أو لون الباب الأمامي لمنزلنا.

ولكن الكلاب أو أسماك السلمون أو أسماك المهرج ليست أقوى الحيوانات في حاسةِ الشم. تتفوَّق حساسيةُ حاسةِ الشمِّ لدى الدبِّ بسبعة أضعاف على تلك الخاصةِ بحاسة

الشم لدى الكلب البوليسي، ويُمكنها أن تشمَّ رائحةَ الجيفة على مسافة ٢٠ كيلومترًا. العثَّة يُمكنها أن تكتشفَ رفيقها من مسافة ١٠ كيلومترات تقريبًا، وتشم الفئران على نحوٍ منفصل بكلٍّ من فتحتَي أنفها، وتشم الثعابين بألسنتها. كل هذه المهارات في الشمِّ ضروريةٌ من أجل الحيوانات التي يجب أن تبحث عن الطعام، و/أو تبحث عن الرفيق، و/أو تتحاشى الحيوانات المفترِسة؛ لقد طوَّرَت حساسيةً تجاه الإشارات المفاجئة التي تُنبئ عن اقترابِ تلك الموارد أو المخاطر، سواءٌ في الهواء أو في الماء. حاسة الشم بالغةُ الأهمية لبقاء الحيوان؛ حيث يبدو أن الاستجاباتِ السلوكيةَ تجاه الروائح مُتوارَثةٌ في عددٍ من الأنواع. أثبتَت التجارِبُ على فئرانِ جزيرة أوركني أنها تجنَّبَت الفِخاخ المطعَّمة بإفرازات القواقم المفترسة، على الرغم من أن القواقم كانت غائبةً عن الجزيرة منذ خمسة آلاف عام!

يُقال إن حاسةَ الشم لدى الإنسان أضعفُ بكثيرٍ من تلك الخاصة بأسلافنا من البشر. فعندما ارتفع الجزءُ العُلوي من الإنسان المنتصِب (الهومو إريكتوس) عن أرضية الغابة كي يَمشيَ مُستقيمًا وذلك منذ عدةِ ملايينَ من السنين، ارتفعَ أنفُه أيضًا عن الأرض وابتعد عن مصدره الغنيِّ بالروائح. ومنذ ذلك الحين، أصبحَت حاسَّتا البصر والسمع، اللتان كانتا أكثرَ كفاءةً نظرًا إلى موقعِهما العاليَين، مَصدرَيه الأساسيَّين للمعلومات. لذا أصبح الأنف البشري أقصرَ وفتحتا أنفه أضيقَ وتراكمَت الطفراتُ في ألفٍ أو نحو ذلك من جينات أسلاف الثدييَّات التي تُشفر المُستقبِلات الشَّمية (وهو ما سنتحدَّث عنه بمزيدٍ من التفصيل فيما بعد). وفقدنا، وهو شيء ربما يكون مؤسفًا، حاسةَ شمٍّ إضافيةً موجودةً في الحيوانات الأخرى والتي يُوفِّرها العضو الميكعي الأنفي — أو عضو جاكوبسون — الذي تتمثَّل وظيفتُه في اكتشاف الفيرومونات الجنسية.

لكن على الرغم من ذخيرتنا الوراثية التي تضاءلت إلى نحو ثلاثمائة فقط من جينات المستقبِلات الشمِّية وتشريحنا الذي تغيَّر، فقد احتفظنا بحاسةِ شم جيدة بنحوٍ مُدهش. قد لا نستطيع أن نشَمَّ رائحة أزواجنا أو طعام العشاء من مسافةِ عدة أميال، ولكن يُمكننا التمييزُ بين ما يقرب من عشَرةِ آلاف رائحةٍ مختلفة، ويمكن لحاسَّة الشم لدينا — كما قال نيتشه — أن تتفوَّق على «عمليات الرصد الطيفية» للموادِّ الكيميائية ذاتِ الرائحة النفَّاذة. كانت قدرتُنا على التمييز بين الروائح مصدرًا لإلهام بعضٍ من أعظم الأشعار («الوَرد وإن تغير اسمُه لا يتغيَّر عبيره») كما أنه لها دورٌ حيوي في إحساسنا بالسعادة والرضا.

كان لحاسة الشم لدَينا أيضًا دورٌ فعال على نحوٍ مدهش في تاريخ الإنسان. تُسجل النصوص القديمة تقديسًا للروائح الطيبة واشمئزازًا من الروائح الكريهة. وكثيرًا ما كانت أماكنُ العبادة والتأمُّل تعطَّر بالعطور والأطياب. في الكتاب المقدَّس العبري، يأمر اللهُ موسى أن يَبنيَ مكانًا للعبادة ويقول له: «خذ لك أعطارًا: ميعة وأظفارًا وقِنِّينة عطرة ولبانًا نقيًّا، تكون أجزاء متساوية، فتصنعها بَخورًا عطرًا صنعة العطار مُملحًا نقيًّا مقدسًا.»[1] حتى إن المصريين القدماء كان لديهم إلهٌ للعطور وهو الإله نفرتوم، وقد كان إلهًا للشفاء أيضًا؛ إذ كان يُعالج باستخدام الروائح.

الارتباط بين الصحة والروائح الطيبة، وبالعكس، بين المرض والموت والروائح الكريهة، دفع الكثيرين إلى الاعتقاد بأن اتجاه العلاقة السببية يسير من الرائحة إلى الصحة أو المرض وليس العكس. على سبيل المثال، من تعاليم الطبيب الروماني العظيم جالينوس أن الملاءات والمراتبَ والأغطية ذاتَ الرائحة الكريهة يمكن أن تُسرع تلوُّثَ سوائل الجسم. وقد اعتُبرت الروائحُ المثيرة للغثيان (الأجواء الموبوءة) القادمة من المجاري وأقبية رُفات الموتى والمستنقعات؛ مصادرَ للعديد من الأمراض المُميتة. وعلى النقيض من ذلك، كان يُعتقد أن الروائح الطيبة تطرد المرض؛ ولذا كان الأطباء في أوروبا في العصور الوسطى يُصرون قبل أن يدخلوا منزلَ مريضٍ بالطاعون على تهويته جيدًا وتعطيرِه بإشعال نيران مُعطَّرة برائحةِ البخور والمرِّ والورود والقَرنفُل والأعشاب العطرية الأخرى. في الحقيقة، كانت مهنة تصنيع العطور مخصصةً في الأساس لتطهير المنازل وليس من أجل التزيُّن الشخصي.

بالطبع لا تقتصر أهميةُ حاسَّة الشمِّ على اكتشاف الموادِّ ذاتِ الروائح التي تشمُّها فتحاتُ أنوفنا. فمن اللافت للنظر أن حاسة «التذوق» لدينا بوجهٍ عام يُعتبر أنها تُمثل نحو ٩٠ بالمائة من حاسة الشم. فعندما نتذوَّق الطعام، تكتشف مُستقبِلاتُ التذوق في اللسان والحنَكِ الموادَّ الكيميائيةَ المتحللة في اللُّعاب، ولكن تلك المستقبلات موجودةٌ في خمسة أشكال، ولا تتمكَّن من تحديدِ أكثرَ من خمسة أنواع أساسية من المذاق وهي الحلو والحامض والمالح والمر والأومامي (وهي كلمة يابانية تعني «المذاق اللاذع اللطيف»). لكن المواد ذات الروائح المتطايرة المتبخِّرة من الطعام والشراب تدخل إلى تجويف الأنف من مؤخرة الحلق لتُنشِّط مجموعاتٍ من مئات مستقبلات الشمِّ المختلفة. ومقارنة بحاسة التذوق، توفر لنا تلك المستقبلاتُ قدرةً أكبر بكثيرٍ على التمييز بين آلاف الروائح المختلفة والاستمتاع بالنكهات (التي تكون روائحَ في أغلبها) الغنيةِ للنبيذ الفاخر، أو الأطعمة ذات

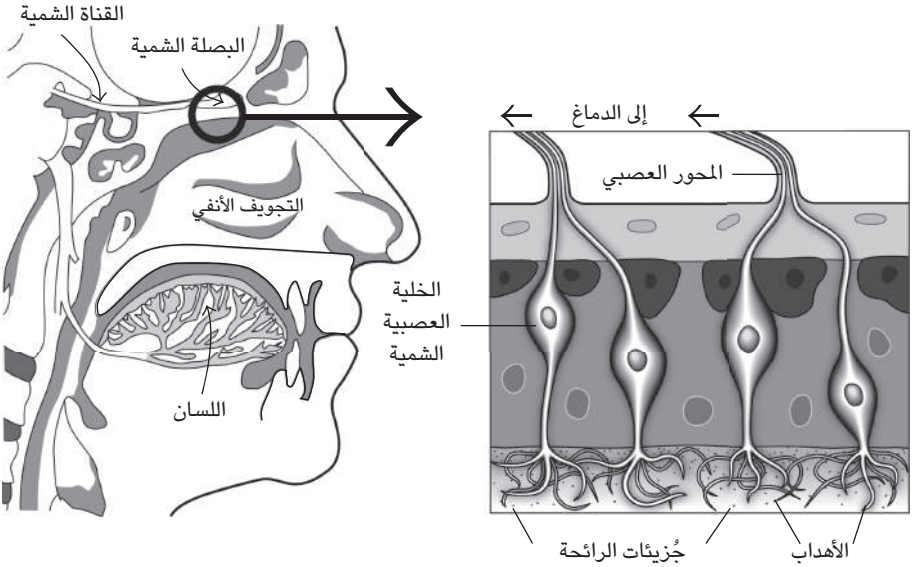
الروائح النفَّاذة أو التوابل أو الأعشاب أو القهوة. وعلى الرغم من أننا فقدْنا حاسةَ الشم التي يوفرها عضوُ الإحساس الميكعي الأنفي التي تتمتَّع بها معظمُ الثدييات، فإن ضخامة صنعة العطور دليلٌ على أن الروائح لا يزال لها دورٌ في المُغازَلة والعلاقة الجنسية لدى البشر. حتى إن فرويد رأى أن هناك علاقةً بين الكبت الجنسي وتَسامي حاسة الشمِّ لدى مُعظمنا، ولكنه زعم «أن هناك — حتى في أوروبا[٣] — أقوامًا يُقدِّرون كثيرًا الرائحةَ القوية للأعضاء التناسلية.»[2]

إذن، كيف يكتشف البشر أو الكلاب أو الدِّبَبة أو الثعابين أو حشرات العثة أو أسماك القرش أو الفئران أو أسماك المهرج تلك الرسائل التي تُبعث «من واقعٍ مادي»؟ كيف نُميز بين هذا التنوُّع الكبير من المواد ذات الروائح؟

## الحقيقة الفعلية للروائح

على خلاف حاستَي البصر والسمع لدَينا اللتَين تلتقطان المعلوماتِ بطريقةٍ غير مباشرة عبر الموجات الكهرومغناطيسية أو الموجات الصوتية التي تُحمل إلينا من الأجسام، فإن حاستَي التذوُّق والشم تتلقَّيان المعلومات مباشرةً بالاحتكاك بالجسم المُكتشَف (الجزيء) وتوصل رسائل «من واقع مادي». يبدو أن كِلتَيهما تعملان عبر مبادئَ متشابهةٍ إلى حدٍّ ما. فالجزيئات التي تكتشفها إما أنها مُتحللةٌ في اللعاب أو طافية في الهواء، وتلتقطها بعد ذلك المستقبلاتُ التي في اللسان (في حالة حاسَّة التذوق) أو التي في ظهارة الشم في سقف تجويف الأنف (في حالة حاسَّة الشم). تلك الحاجة إلى التطاير تعني أن معظم الموادِّ ذاتِ الروائح عبارةٌ عن جزيئات صغيرة نسبيًّا.

الأنف ليس له دورٌ مباشر في عملية الشم، غير تمرير الهواء تجاه الظهارة الشمية الموجودة في نهاية الأنف (انظر الشكل ٥-١). هذا النسيج صغيرٌ للغاية إذ لا يَزيد طوله عن ٣ سنتيمترات مربعة (أي: بحجم طابع البريد تقريبًا) في البشر، ولكنه مُبطَّن بغُددٍ مفرزة للمُخاط وملايين «الخلايا العصبية الشمية». هذه الخلايا هي نوعٌ من الخلايا العصبية يلعب الدور نفسَه في الأنف الذي تلعبه نبابيتُ الشبكية ومخاريطها في العين. يُشبه الجزء الأمامي للخلية العصبية الشمية قليلًا المكنسة؛ حيث إن له رأسًا متعددَ السنون، حيث يجري طيٌّ غشاء الخلية في «أهداب» كثيرة تُشبه الشعر. هذه المكنسة ذاتُ فرشاة الأهداب تبرز من طبقة الخلية حيث يُمكنها التقاطُ جزيئات الروائح المارَّة. أما الجزء الخلفي لتلك الخلية، فيُشبه يدَ المكنسة إذ يُشكِّل محورَ الخلية العصبي، أو العصب




شكل ٥-١: تشريح حاسَّة الشم.

الذي يمتدُّ عبر عظمةٍ صغيرة في نهاية تجويف الأنف حتى يدخل الدماغ، حيث يتَّصل بمنطقةٍ تُسمى «البصلة الشمية».

يُفضل أن تقرأ ما تبقَّى من هذا الفصل وأمامك برتقالة، ومن الأفضل أن تُقطعها إلى شرائحَ بحيث تتطاير منها الروائحُ المنعشة، وتدخل إلى أنفك لتصل إلى ظهارة الأنف. يُمكنك أيضًا أن تُلقيَ شريحةً منها في فمك، بحيث تُتيح لموادها ذاتِ الرائحة المتطايرة أن تجد طريقها عبر الجزء الخلفي من الأنف إلى ذلك النسيج نفسِه. ومثل كل الروائح الطبيعية، فرائحة البرتقال معقَّدةٌ للغاية، وتتركَّب من مئات المركَّبات المتطايرة، والتي من أقواها رائحة مركبٌ يُسمى الليمونين،[٤] والذي سنتتبَّع مساره الآن بدايةً من مرحلة الجزيء وحتى تحوُّلِه إلى رائحةٍ لاذعة.

يتوفر الليمونين بكثرة — كما يوحي اسمُه — في الفواكه الحمضية مثل البرتقال والليمون وهو المسئول بصورةٍ كبيرة عن نكهتها ورائحتها اللاذعة. تنتمي تلك المادةُ الكيميائية إلى فئة مُركَّباتٍ تُعرف باسم «التربينات»، وهي المكونات المسئولة عن الرائحة

في الزيوت الأساسية للعديد من النباتات والزهور، ما يُولِّد الروائحَ الغنية لأشجار الصَّنَوبر والزهور والعنب ونباتات الجُنْجُل. لذا، يمكنك تبديل البرتقالة بكأسٍ من الجِعَة أو النبيذ إذا أحببت. تُفرَز هذه المادةُ الكيميائية في العديد من أجزاء النبات الحمضي، بما في ذلك أوراقه، ولكنها تتوفَّر بكثرةٍ في قشرةِ ثمرته، التي يمكن عصرُها لاستخراج ليمونين نقي تقريبًا منها.

الليمونين سائلٌ متطاير يتبخَّر تدريجيًّا في درجة حرارة الغرفة، ومن ثم ستُطلق البرتقالة ملايينَ الجزيئات من الليمونين في هواء المكان. ستتطاير معظمُ تلك الجزيئات في الغرفة وستخرج من الباب والنوافذ، ولكن ستحمل تياراتِ الهواء القليل منها بالقرب من أنفك. في عملية الشهيق التالية، ستستنشق عدةَ لتراتٍ من هذا الهواء المحمَّل بجزيئات المواد ذاتِ الرائحة، التي ستمرُّ من فتحتَي الأنف إلى ظهارة الأنف المبطَّنة بما يُقارب عشَرةَ ملايينِ خليةٍ عصبية شمية.

عندما تمرُّ جزيئات الليمونين على فُرش الظهارة الشمِّية، يقع بعضها في شرَكِ الخلايا العصبية الشمية. إن التقاط جزيء ليمونين واحد كفيل بأن يُحفز فتح قناةٍ صغيرة في غشاء الخلية العصبية؛ مما يُتيح تدفُّق أيونات الكالسيوم الموجبة الشحنة إلى داخل الخلية. عند التقاطِ ما يقرب من خمسةٍ وثلاثين جُزيئًا من الليمونين، فإن التدفُّق اللاحِق للأيونات إلى الخلية يتحول إلى تيارٍ كهربي طفيف، بقوة نحو بيكوأمبير[٥] واحد إجمالًا. يكون هذا المستوى من التيار بمنزلة مِفتاحٍ لإطلاق إشارة كهربية تُسمى جهد الفعل (سنتطرق إلى هذه الإشارات بمزيدٍ من التفصيل في الفصل الثامن) في يدِ الخلية الشبيهة بالفرشاة، أي: محورها العصبي. تتحرك تلك الإشارة حتى تصل إلى البصلة الشمِّية في الدماغ. بعد المزيد من المعالجة العصبية، تصل إليك تلك الرسالة التي «من واقعٍ مادي» في صورةِ رائحة البرتقال اللاذعة.

بالطبع الحدث الرئيسي في تلك العملية برمَّتها هو التقاطُ جزيء الرائحة من خلال الخلية العصبية الشمية. إذن، كيف يجري ذلك؟ بالقياس مع حاسة البصر وخلايا المخاريط والنبابيت الحساسة تجاه الضوء الخاصة بالعين (التي تعد أيضًا أنواعًا من الخلايا العصبية)، كان من المتوقع أن تعمل حاسة الشم بالمثل من خلال نوعٍ من المستقبلات الشمية الموجودة على السطح. ولكن في سبعينيَّات القرن العشرين، لم تكن طبيعة المستقبلات الشمية وهُويتها معروفة تمامًا.

وُلد ريتشارد أكسل في بروكلين بنيويورك عام ١٩٤٨، وهو أول طفل لأبوين مهاجرَين فرًّا من بولندا قبل الغزو النازي. كانت طفولته عادية تُشبه طفولة أبناء منطقته السكنية؛ إذ كان يؤدي مَهامَّ لوالده الخياطِ بين مباريات كرة العصا (وهو نوع من البيسبول الذي يُلعَب في الشارع حيث تكون أغطيةُ غرف التفتيش بمنزلة القواعد، وعصا المكنسة بمنزلة المَضرِب) أو كرة السلة في طرقات الحي وساحاته. كانت أول وظيفة يعمل بها، لما بلغ الحادية عشرة من عمره، ساعيًا يوصل الأسنانَ الاصطناعية إلى أطباء الأسنان، وفي عمر الثانية عشرة، عمل في فَرْش السجَّاد، وفي عمر الثالثة عشرة، عمل في تقديم اللحم البقري المحفوظ والبسطرمة في متجرٍ مَحلي. كان الطاهي في المتجر روسيًّا، وكان يترنَّم بأعمال شكسبير وهو يقطع رءوس الكرنب، ومن ثَم قدَّم لريتشارد الشابِّ أولَ معرفة حقيقية بعالم الثقافة، بعيدًا عن ساحات أماكن تقديم الوجبات الجاهزة، ولعب كرة السلة، وكان مصدرَ إلهام لحبٍّ حقيقي ودائمٍ للأدب العظيم. مواهب أكسل الفكرية اكتشفها مُدرس ثانوي في منطقته، وشجعه للتقدم من أجل الحصول على منحةٍ بجامعة كولومبيا بنيويورك لدراسة الأدب، وهو الأمر الذي نجح فيه.

لما كان أكسل في السنة الأولى من الجامعة، ألقى بنفسه في الدوَّامة الفكرية للحياة الجامعية في ستينيَّات القرن العشرين. ولكن كي يدعم أسلوبَ حياته الصاخب، عمل في غَسْل الأواني في مُختبر لعلم الوراثة الجزيئي. وهناك، أصبح مفتونًا بهذا العلم الناشئ، لكنه ظلَّ غيرَ متمكِّن من إجادة غسل الأواني؛ لذلك فُصل من هذه الوظيفة وأعيد تعيينه مساعدَ باحث. ورغم أنه كان ممزقًا ما بين عالَمَي الأدب والعلم، فقد قرَّر في النهاية أن يُسجِّل في دورةٍ عن علم الوراثة، خاصةٍ بطلبة الدراسات العليا، لكنه تحوَّل إلى دراسة الطب كي يهرب من التجنيد في فيتنام. كان واضحًا فشلُه في الطب كما فشل في غسل الأواني. إذ لم يسمع خفقاتِ أيِّ قلب ولم يرَ أيَّ شبَكيةِ عينٍ مطلقًا؛ وسقطَت نظارته مرةً في شقٍّ في بطنِ مريض، وقد خاط حتى إصبعَ جراح في مريضه. في النهاية، لم يُسمح له بالتخرُّج إلا بشرطٍ واحد؛ وهو أن يقطع وعدًا بعدم ممارسة الطب على المرضى الأحياء. عاد إلى جامعة كولومبيا لدراسة علم الأمراض، ولكن بعد عامٍ من الدراسة أصرَّ رئيسُ القسم على أنه لا ينبغي له أن يُمارس الطب على الأموات أيضًا.

لَمَّا أدرك أكسل أن الطبَّ يفوق قدراته، عاد في النهاية إلى البحث في جامعة كولومبيا. بعد ذلك، أحرز تقدمًا سريعًا حتى إنه اخترع تقنيةً جديدة لغرس حمضٍ نووي غريب

داخل خلايا الثدييات، التي أصبحَت عمادَ ثورة الهندسة الوراثية/التكنولوجيا الحيوية في أواخر القرن العشرين، وأكسبَت جامعةَ كولومبيا دخلًا بمئات الملايين من الدولارات من اتفاقيَّات الترخيص؛ مما يُعد عائدًا كبيرًا على الاستثمار في المنحة التي قدَّمَتها له.

بحلول ثمانينيَّات القرن العشرين، كان يتساءل أكسل هل علمُ الأحياء الجزيئي بإمكانه أن يحلَّ أكبرَ لغز، وهو المتمثل في «طريقة عمل الدماغ» أم لا. فتحوَّل من دراسة سلوك الجينات إلى دراسة الجينات للتعرف على السلوك، ووضع هدفًا طويلَ المدى وهو «معرفة الطريقة التي تُدرك بها مراكزُ الدماغ العليا، على سبيل المثال، رائحةَ زهرةِ الليلك أو القهوة أو حيوان الظَّربان ...».[3] كانت أولى خطواته في علم الأعصاب هي دراسةَ سلوك وضع البَيض لدى الحلزون البحري. وفي غضونِ هذا الوقت تقريبًا، انضمَّت باحثةٌ موهوبة جدًّا، تُدعى ليندا باك، إلى مُختبره. كانت باك اختصاصيةَ مناعةٍ بجامعة دالاس قبل أن تنبهر بالمجال الناشئ لعلم الأعصاب الجزيئي، وتنتقل إلى مختبر أكسل لتكون في طليعة الباحثين في هذا المجال. ابتكر كلٌّ من أكسل وباك سلسلةَ تجارِبَ بارعة لاستكشاف الأساس الجزيئي لحاسة الشم. كان السؤالُ الأول الذي ناقَشاه هو هُوية جزيئات المستقبلات التي يُفترض أنها تُوجَد على سطح الخلايا العصبية الشمِّية وتلتقط جزيئات المواد ذات الرائحة المختلفة وتُميز بينها. واستنباطًا مما كان معروفًا عن الخلايا الحسِّية الأخرى؛ فقد خمَّنا أن المستقبِلات عبارةٌ عن نوعٍ من البروتينات يبرز من غشاء الخلية حيث يُمكنها ربطُ جزيئات الرائحة المارة، ولكن حينذاك، لم يكن أحدٌ قد عزل أيًّا من مستقبلات الرائحة هذه؛ لذا لم يكن لدى أحدٍ أدنى فكرةٍ عن شكلها أو كيف تعمل. كلُّ ما كان على الفريق أن يُتابعه هو فكرةُ أن المستقبلات المراوغة قد تنتمي إلى عائلةٍ من البروتينات تُسمى «المستقبلات المقترنة بالبروتين جي»، والتي كان يُعرف عنها أنها تُشارك في اكتشافِ أنواع أخرى من الإشارات الكيميائية، مثل الهرمونات.

تمكَّنَت ليندا باك من تحديدِ عائلة جديدة تمامًا من الجينات، تُشفر هذا النوع من المستقبلات، والمُعبَّر[٦] عنها فقط في الخلايا العصبية للمستقبِلات الشمية. واصلَت عملها حتى أثبتَت أن هذه الجينات بالفعل تُشفر المستقبلات المراوغة التي تلتقط الرائحة. وبمزيدٍ من التحليل، تبيَّن أن جينوم الفأر يُشفر ما يقرب من ألفِ مستقبل من تلك المستقبلات المكتشَفة حديثًا، والتي يختلف كلٌّ منها اختلافًا طفيفًا عن الآخر، ويُفترض أن كلًّا منها مُعَدٌّ لاكتشاف مادةٍ واحدة ذاتِ رائحة. يمتلك البشر عددًا مماثلًا من جينات

المستقبلات الشمية، ولكن وُجد أن ثُلثَيها تُعَد ما يُسمى بـ «الجينات الزائفة»، وهي نوعٌ من الأحافير الجينية التي راكمَت العديد من الطفرات، لدرجة أنها لم تعُد تعمل.

ولكن سواءٌ كان هناك ثلاثمائة أو ألف جينٍ مُستقبل، فهذا بعيدٌ جدًّا عن رقم عشَرة آلاف رائحة مختلفة التي يمكن للبشر التعرفُ عليها. من الواضح أنه لم يكن هناك تخطيطٌ فردي بين أنواعِ مستقبلات الرائحة وأنواع الروائح؛ لذا فإن كيفية تحويل الإشارات التي تتلقَّاها المستقبلات الشمِّية إلى روائحَ ظلَّت لغزًا. كما أنه لم يكن واضحًا كيف جرى تقاسمُ مهمة اكتشاف كلِّ أنواع جزيئات الرائحة المتنوعة بين الخلايا المختلفة. يحتوي جينوم كلِّ خلية على المجموعة الكاملة من جينات المستقبلات الشمية؛ ومن ثَم ربما يمكنه اكتشافُ كل أنواع الروائح. أم هل هناك نوعٌ من تقسيم العمل؟ للإجابة على هذا السؤال، اخترع فريقُ جامعة كولومبيا تجرِبةً مبتكَرة أكثر. عدَّلوا الفئران وراثيًّا بحيث أصبحَت جميعُ الخلايا العصبية الشمية التي تُعبِّر عن مستقبِلِ رائحةٍ معيَّنٍ مصبوغةً باللون الأزرق. إذا كانت كلُّ الخلايا مصبوغةً بالأزرق، فهذا سيُشير إلى أنها جميعًا تُعبر عن هذا المستقبِل. اتضحَت الإجابة عندما فحص الفريقُ الخلايا الشميةَ لدى الفئران المعدَّلة وراثيًّا: نحو واحدة من كلِّ ألف خلية كانت مصبوغةً باللون الأزرق. بدا أن كل خلية عصبية شمية لم تكن خليةً عامة، بل كانت خليةً متخصِّصة.

لم يمرَّ وقتٌ طويل حتى انتقلَت ليندا باك من جامعة كولومبيا كي تُجهز مختبَرها في جامعة هارفارد، واستمرَّت المجموعتان في العمل بالتوازي إحداهما مع الأخرى؛ لدراسة العديد مما تبقَّى من أسرار عملية الشم. وسرعان ما ابتكَرتا تقنياتٍ لعزل الخلايا العصبية الشمية الفردية والاستكشاف المباشر لحساسيتها تجاه موادَّ معينةٍ ذاتِ روائح؛ مثل ليمونين البرتقال. واكتشَفتا أن كلَّ مادة كيميائية ذات رائحة لم تُنشط خليةً عصبية واحدة، بل عدةَ خلايا عصبية، واكتشفتا أيضًا أن هذه الخلايا العصبية الفردية تستجيب لعدة موادَّ ذات رائحة مختلفة. بدا أن هذه النتائج تحلُّ اللغز الخاص بكيف لثلاثِمائة مستقبِلٍ شميٍّ فقط أن تتعرف على عشَرة آلاف رائحة مختلفة. ومثلما يمكن كتابةُ عددٍ لا حصر له من الكلمات باستخدام الحروف المتاحة في أي لغة، فإنه يمكن تنشيطُ بعض المستقبلات الشمية التي يصل عددُها إلى بِضع مئاتٍ بعدد لا حصر له من التوافيق المختلفة؛ مما يجعلها تُميز بين مجموعةٍ كبيرة من الروائح.

حصل ريتشارد أكسل وليندا باك على جائزة نوبل عام ٢٠٠٤ على اكتشافاتهما المبتكَرة عن «مستقبلات المواد ذات الرائحة وتنظيم جهاز الشم».

## محاولات حلِّ اللغز الرئيسي لعملية الشَّم

أصبح معروفًا الآن أن أولَ حدثٍ في اكتشاف رائحةٍ ما، مثل رائحة البرتقالة أو الشعبة المرجانية أو الوليف أو الحيوان المفترِس أو الفريسة، هو الربط بين جُزيءٍ واحد من المادة ذات الرائحة ومستقبِل شمِّي واحد على سطح نهاية الفرشاة لإحدى الخلايا العصبية الشمية التي تُشبه المكنسة. لكن كيف يتعرف كلُّ مستقبِلٍ على مجموعةِ جزيئات الموادِّ ذات الرائحة المنوطة به، مثل الليمونين، ولا يلتقط أيَّ جزيئات أخرى من هذا الكم الهائل من المواد الكيميائية ذات الروائح المحتملة الأخرى التي قد تمرُّ بالظهارة الشمية ويربطها بأحد المستقبِلات؟

هذا هو اللغز المركزي في عملية الشم.

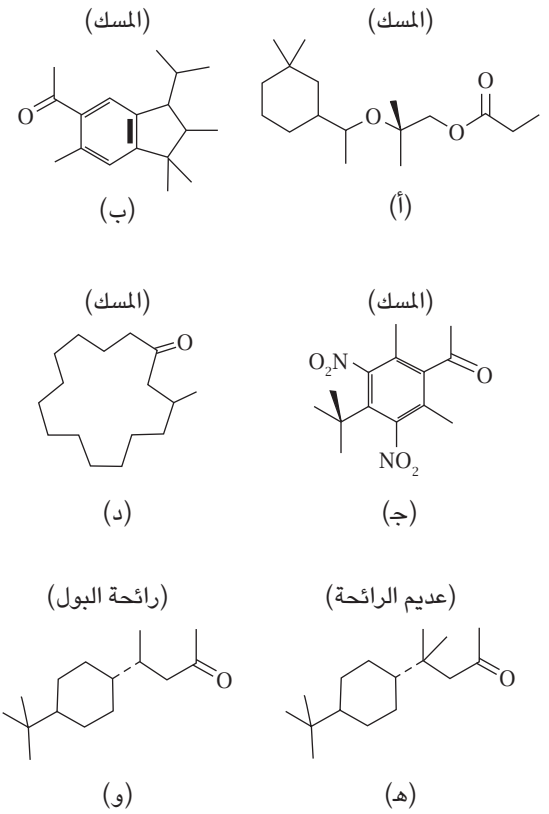
يعتمد التفسير التقليدي على ما يُعرف بآليَّة القُفل والمفتاح. يُعتقد أن جزيئات الروائح تتناسبُ مع مُستقبلات الشمِّ وكأنها مِفتاحٌ في فتحة قُفل. على سبيل المثال، يُعتقد أن جزيء الليمونين يرتبط بأريحيةٍ بمستقبِلٍ شمي متخصص خاصٍّ باستقباله. وبطريقةٍ ما، وبعملية لا تزال غيرَ واضحة، كان يُعتقد أن حدث الربط هذا يفتح قُفل المستقبل، ويُنشط إطلاقَ بروتين يُسمى بروتين جي، وهو عادةً ما يعْلَق بالسطح الداخلي للمستقبِل وكأنه قذيفةٌ مغروزة في جسم سفينة. وبمجرد أن يُطلَق البروتينُ إلى الخلية، فإنه يشقُّ طريقه إلى غشاء الخلية حيث يفتح قناةً تسمح للجزيئات المشحونة كهربيًّا أن تتدفَّق إلى داخل الخلية. هذا التيار الكهربي المُتدفِّق من الغشاء يُحفز تنشيط الخلية العصبية (وهو أمرٌ سنعرض المزيدَ من التفاصيل عنه في الفصل التاسع) ويرسل إشارةً عصبية تتحرك من الظهارة الشمية إلى الدماغ.

تقترح آليةُ القفل والمفتاح أن جزيئات المستقبِلات تتشابه في الشكل مع جزيئات الروائح التي ترتبط بها. لنضرب مثالًا بسيطًا بأحاجي تَطابق الأشكال التي يستمتع بها الأطفالُ الصغار، التي ينبغي فيها أن يتطابق كلُّ مكعبٍ يتخذ شكلًا معيَّنًا (ولنقُلْ دائرةً أو مربعًا أو مثلثًا) داخل لوح خشبي مع الشكل المكمِّل المقابِل له. يمكن أن ننظر إلى كل جزيء رائحة باعتباره أحدَ هذه المُكعبات — بحيث يمكن أن تتَّخِذ إحدى المواد التي لها رائحةُ البرتقال مثل الليمونين شكلَ الدائرة، والأخرى التي لها رائحة التفاح شكلَ المربع، والثالثة التي لها رائحة الموز شكلَ المثلث. عندئذٍ، يُمكننا أن نتخيَّل كلَّ مستقبِلٍ شمي وكأنه يمتلك «جيبًا لربط المادة ذات الرائحة» مُقولَبًا بالشكل المثاليِّ بحيث يتناسب داخلَه جزيءُ تلك المادةِ تناسبًا متقنًا.

بالطبع نادرًا ما تكون الجزيئات الحقيقية بتلك الأشكال المتقَنة، ومن ثم يُفترض أن بروتينات المستقبلات الحقيقية لها جيوبُ ربطٍ أكثرُ تعقيدًا بكثيرٍ، تتناسَبُ مع الأشكال الأعقد لجزيئات الموادِّ ذات الروائح الحقيقية. ربما يتَّخِذ معظمُها أشكالًا بالغةَ التعقيد تُشبه المواقع النشطة للإنزيمات التي — كما تتذكَّر من الفصل الثالث — تربط بين جزيئات الركائز. في الحقيقة، يُعتقَد أن جزيئات الموادِّ ذات الروائح تتفاعل مع جيوب الربط بطريقةٍ تُشبهُ الطريقةَ التي تُثبَّت بها ركائز الإنزيمات في المواقع النشطة للإنزيمات (ارجع للشكل ٣-٤)، أو حتى بالطريقة التي تتفاعل بها العقاقيرُ مع الإنزيمات. في الحقيقة، يُقال إن فهم الدور الذي تلعبه ميكانيكا الكم في التفاعُل بين الموادِّ ذات الروائح ومستقبلاتها يمكن أن يؤدِّيَ في النهاية إلى ابتكارِ عقاقيرَ ذاتِ فاعليةٍ أكبر.

وعلى أي حال، فالتوقُّع الواضح الخاص بنظرية الشكل هو أنه لا بد من وجود نوعٍ من التناسُب بين الشكل الجزيئي للمادة ذات الرائحة ورائحتها؛ بمعنى أن جزيئات الموادِّ المتماثِلة الشكل ينبغي أن تتشابهَ في رائحتها، وأن الجزيئات المختلفةَ الشكلِ للغاية من المُرجَّح أن تكون لها رائحةٌ مختلفة تمامًا.

من الروائح المُخيفة في تاريخ البشرية رائحةُ الخردل أو القش المتعفِّن في الخنادق في الحرب العالمية الأولى. كانت الغازاتُ الخفيَّة تتسرَّب عبر الأراضي المحرَّمة، وأقل نفحة من الخردل (غاز الخردل) أو القش المتعفِّن (غاز الفوسجين) قد تكفي كي تُعطي الجنديَّ بضع ثوانٍ ثمينة يرتدي فيها قناعَه قبل أن تمتلئَ رِئتاه بالمادة المُميتة. نجا الكيميائيُّ مالكولم دايسون من هجمة غاز خردل، وربما جعلتْه تلك الهجمة يُدرك أهمية امتلاك أنفٍ حساسٍ في البقاء على قيد الحياة؛ مما قاده إلى التفكُّر في طبيعة الروائح، حيث إنه استمرَّ بعد الحرب في تصنيع العديد من المُركَّبات الصناعية واستخدام أنفِه لشمِّ المواد الناتجة عن تفاعُلاته التخليقية. ولكن شعر دايسون بالحيرة إذ كان واضحًا أنه لا تُوجَد علاقةٌ واضحة بين شكل الجزيء ورائحته. على سبيل المثال، لا تختلف رائحةُ العديد من الجزيئات التي لها أشكالٌ مختلفة مثل المُركبات التي في الشكل ٥-٢ من «أ» إلى «د»، والتي لها جميعًا رائحةُ المسك.[٧] وعلى النقيض من ذلك، المركَّبات التي لها بِنْياتٌ متماثلة جدًّا (مثل المركَّب «هـ» والمركب «و» في الشكل) غالبًا ما تكون لها روائحُ مختلفة تمامًا؛ فالمركب «و» له رائحةٌ تُشبه رائحة البول في حين أن المركَّب «هـ» ليست له رائحةٌ على الإطلاق.[4]




شكل ٥-٢: الجزيئات من «أ» إلى «د» لها أشكالٌ مختلفة جدًّا ولكن رائحتها متشابهةٌ إلى حدٍّ كبير. أما الجزيئان «هـ» و«و» فلهما شكلان مُتطابقان تقريبًا ولكن لهما رائحة مختلفة تمامًا.

هذا البُعد عن العلاقة المباشرة بين شكل الجزيء ورائحته كان — ولا يزال — مشكلةً كبرى لجهات تصنيع العطور والنكهات والروائح. فبدلًا من أن يتمكن صانعو العطور من تصميم العطر بالطريقةِ التي قد يُصمِّمون بها شكل زجاجة العطر، فإنهم يُضطرُّون إلى الاعتماد على التخليق الكيميائي عن طريق اختبارات الشمِّ بالقوة الغاشمة، والتجرِبة والخطأ التي يُجريها علماءُ الكيمياء من أمثال دايسون. لكن لاحظ دايسون أن

مجموعات الروائح (أي: المواد الكيميائية التي لها الرائحة نفسُها) غالبًا ما تتكون من مركبات تتضمن المجموعاتِ الكيميائيةَ نفسَها؛ على سبيل المثال: ذرَّة الأكسجين المرتبطة بذرةِ كربون عن طريق رابطة C = O مزدوجة في المواد الكيميائية التي لها رائحةُ المسك في الشكل ٥-٢. هذه المجموعات الكيميائية هي الأجزاء التي يتكوَّن منها أيُّ جزيءٍ كبير وتُحدد العديد من خصائصه، التي من الواضح أنها تتضمَّن رائحته، كما لاحظ دايسون. هناك مجموعةٌ أخرى من المركَّبات ذات الرائحة المتماثلة وهي التي تتكوَّن من عددٍ كبير من المواد الكيميائية ذات الأشكال الجزيئية المتنوِّعة والتي تحتوي على مجموعة «كبريتيد هيدروجين» S – H، وفيها ترتبط ذرة هيدروجين مع ذرةِ كبريت، والتي لها رائحةٌ تُشبه رائحة البيض المتعفِّن. اقترح دايسون أن ما يكتشفه الأنفُ ليس شكلَ الجزيء بالكامل وإنما هي سِمةٌ فيزيائية مختلفة، وهي التردُّد الذي تهتزُّ به الروابط الجزيئية بين ذراته.

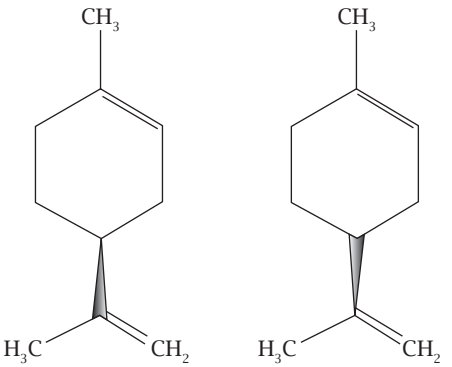
في عشرينيَّات القرن العشرين وقتَ أنْ طرح دايسون هذا الزعم لأول مرة، لم يكن لدى أحدٍ أيُّ فكرة عن طريقة اكتشاف الاهتزازات الجزيئية. لكن في رحلةٍ إلى أوروبا في أوائل عشرينيَّات القرن العشرين، انبهر عالمُ الفيزياء الهنديُّ تشاندراشيخارا فينكاتا رامان بـ «البريق الأزرق الرائع للبحر الأبيض المتوسط»، وتكهَّن بأن «الظاهرة في أصلها تعود إلى تشتُّت الضوء بفعل جزيئات المياه». غالبًا، عندما يرتدُّ الضوء عن ذرة أو جزيء، فعادةً ما يرتدُّ عنها «بطريقةٍ مَرنة»؛ أي: من دون أن يفقد أيَّ طاقة، مثلما ترتدُّ الكرة المطاطية عندما ترتطم بسطح صُلب. يقترح رامان أنه في حالاتٍ نادرة يمكن أن يتشتَّت الضوء «بطريقة غير مرنة»، وكأنه كرة صلبة ارتطمَت بمضربٍ خشبي ونقلَت قدرًا من طاقتها إلى المضرب وإلى ضارب الكرة (تخيَّل الأرنب باجز باني وهو يضرب كرة بيسبول سريعةً بقوة، لدرجة أن يهتزَّ هو والمضرب). في التشتت غير المرن، تفقد الفوتونات طاقتَها بالطريقة نفسِها لصالح الروابط الجزيئية التي ترتطم بها مما يُسبب اهتزازَها، وعندئذٍ يظهر الضوء المُشتَّت بطاقةٍ أقل. يؤدي انخفاضُ طاقة الضوء إلى انخفاض تردُّده ويُحول لونه تجاه الطرف الأزرق من الطيف، ما جعل رامان يستمتع بـ «البريق الأزرق الرائع».

يستخدم علماء الكيمياء هذا المبدأ لفحص البِنْية الجزيئية. على نحوٍ أساسي، يُسلَّط الضوء على عينةٍ كيميائية والاختلاف في اللون أو التردُّد (ومن ثم الطاقة) بين الضوء الداخل والضوء الخارج يُسجَّل باعتباره «طيف رامان» لمادة كيميائية معيَّنة، مما يوفر

نوعًا من البصمة لروابطها الكيميائية. يحمل الأسلوب اسمَ مخترعه — تحليل رامان الطيفي — وقد حاز جائزة نوبل لاختراعه إيَّاه. وعندما سمع دايسون عن عمل رامان، رأى أن هذا العمل يمكن أن يُوفِّر آليةً يمكن أن يستخدمها الأنفُ لاختبار الاهتزازات الجزيئية لجزيئات الرائحة. اقترح أن الأنف «يمكن أن يكون أداةَ تحليل طيفي» قادرةً على اكتشاف الترددات التي تهتزُّ عندها الروابطُ الكيميائية المختلفة. حتى إنه حدَّد الترددات الشائعة في أطياف رامان للمركبات التي ترتبط بروائحها. على سبيل المثال، كل «مركَّبات المِرْكَبْتان» (وهي مركبات تحتوي على رابطةٍ طرَفية من الكبريت والهيدروجين) تتشاركُ ذروةً محددة من أطياف رامان يتراوح تردُّدها بين ٢٥٦٧ و٢٥٨٠. وكلها رائحتها كرائحة البيض المتعفِّن.

على الأقل فسَّرَت نظريةُ دايسون الطبيعةَ التحليلية للروائح، ولكن ليس لدى أحدٍ أدنى فكرة عن كيف يمكن للأنف أن يستخدِم شيئًا مثلَ تحليل رامان الطيفي كي يشمَّ الروائح. ففي النهاية، لن يَلزم تجميعُ الضوء المشتَّت وتحليلُه باستخدام أداة تحليل طيفي بيولوجي فحسب، بل سيلزم أن يكون هناك مصدرُ ضوءٍ في المقام الأول.

هناك عيبٌ آخر أخطرُ في نظرية دايسون، وقد ظهر عندما اكتُشف أن الأنف يسهل عليه التمييزُ بين الجزيئات التي لها البِنْية الكيميائية نفسُها وأطياف رامان متطابقة، ولكنها صورٌ معكوسٌ بعضها من بعض. على سبيل المثال، يمكن وصف جُزيء الليمونين المسئول بدرجةٍ كبيرة عن رائحة البرتقال بأنه جزيءٌ يميني. لكن يُوجد جزيء يكاد يكون مطابقًا يُسمى الدايبنتين وهو الجزيء «اليساري» الذي يُعدُّ صورةً معكوسة منه (انظر الشكل ٥-٣؛ حيث إن المنطقة المدبَّبة المظللة في أسفل كلٍّ جزء تُمثل رابطةَ ذرة كربون بذرة كربونٍ تُشير إما إلى الأسفل (أ) أو الأعلى (ب) من الصفحة). الدايبنتين له الروابطُ الجزيئية نفسُها مثل الليمونين، ومن ثم يُعطي طيفَ رامان متطابقًا، ولكن رائحته مختلفة تمامًا؛ فرائحته تُشبه التربنتين. الجزيئات التي تأتي بالشكلَين اليميني واليساري توصف بأنها جزيئاتٌ «عديمة التناظر المرآتي»،[٨] وغالبًا ما تكون لها روائحُ مختلفة تمامًا. مركَّب آخرُ عديم التناظر المرآتي هو الكارفون، ويُوجَد في بذورٍ مثل الشبَت والكراوية، وهو مسئولٌ عن رائحة الكراوية، ولكن الجزيء الذي يُعد صورةً معكوسة منه رائحته تُشبه النَّعناع البستاني. لن يتمكَّن الاختصاصي في تحليل رامان الطيفي من التمييز بين هذه المركَّبات باستخدام أداة تحليل طيفي، لكن مجرد الشمِّ الخفيف يستطيع




شكل ٥-٣: الليمونين (أ) والدايبنتين (ب) جزيئان متطابقان، ولكن لهما رائحةٌ مختلفة. لا يختلف الجزيئان إلا في اتجاه المجموعة الكيميائية السُّفلى التي يُمثلها السهمُ الذي يشير إلى أسفل الصفحة (الرابطة التي تُشير إلى الأسفل) في الليمونين، والسهم الذي يُشير إلى أعلى الصفحة (الرابطة التي تُشير إلى الأعلى) في الدايبنتين. بالطبع يمكن قلبُ جزيء الدايبنتين بحيث تُشير مجموعته الكيميائية إلى أسفل الصفحة مثل الليمونين، ولكن حينَها ستلتفُّ رابطتُه المزدوجة إلى جهة اليسار بدلًا من جهة اليمين، ومن ثم ستظلُّ رائحته مختلفة. الجزيئان يُشبهان فردتي القفاز اليمنى واليسرى.

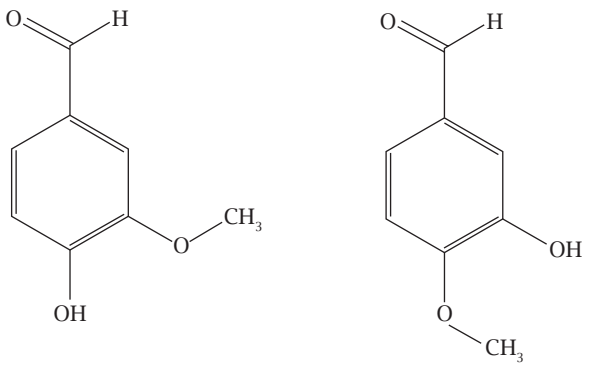
التمييزَ بينها بسهولة. من الواضح أن الشمَّ لا يمكن أن يعتمد على اكتشاف الاهتزازات الجزيئية، أو على الأقل ليس عليها وحدها.

أدَّت هذه العيوبُ التي تبدو قاتلةً في نظرية الاهتزازات الخاصة بالشم إلى الإطاحة بها من جانب نظرية القُفل والمفتاح؛ وذلك على مدار مدةٍ طويلة من النصف الثاني من القرن العشرين، على الرغم من الجهود الجبارة التي بذلَها قلةٌ من المتحمِّسين للاهتزاز الجزيئي، مثل الكيميائي الكَندي روبرت إتش رايت، الذي قدَّم حلًّا محتملًا لمشكلة الجزيئات اليمينية واليسارية التي تمتلك الروابط نفسَها ولكن لها روائح مختلفة. فقد أشار إلى أن المستقبلات الشمِّية نفسها من المُحتمَل أن تكون عديمة التناظر المرآتي (أي: تأتي بالشكلَين اليساري أو اليميني)، ومن ثَم تثبت جزيء المادة ذاتِ الرائحة بطريقةٍ

يمينية أو يسارية، وعندئذٍ تقدم روابطه إلى جهاز كشف الاهتزازات بطريقةٍ مختلفة. لنضرب مثالًا من عالم الموسيقى؛ كان الموسيقيُّ الأعسر جيمي هيندريكس (الذي يُمثل المُستقبِل الشَّمي) عادةً ما يُمسك الجيتار (جزيء المادة ذات الرائحة عديم التناظر المرآتي) ورقبته تُشير جهة اليمين، في حين كان إريك كلابتون أيمنَ وكان يُمسك الجيتار (الذي يُمثل الجزيءَ الذي يُعد الصورةَ المعكوسة) ورقبتُه تشير إلى جهة اليسار.[٩] عازفا الجيتار كلاهما يستطيعان عزفَ المقطوعة القصيرة المتكررةِ نفسِها (بحيث تتولَّد الاهتزازاتُ نفسُها) على الجيتارين اللذين يُعد كلٌّ منهما صورةً معكوسة من الآخَر، ولكن الصوت الذي يلتقطه الميكروفون المثبَّت (الذي يُمثل جزء جهاز كشف الاهتزازات في المستقبِل الشمِّي)، لنقُل، جهةَ اليسار من كل عازف؛ سيكون مختلفًا تمامًا لأن الأوتار (الروابط الجزيئية) في مواقعَ مختلفةٍ بالنسبة إلى الميكروفون. اقترح رايت أن المستقبِلات الشمية عديمةَ التناظر المرآتي تكتشف تردُّدات الاهتزازات للروابط الكيميائية، فقط إذا كانت الروابط في الموضع الصحيح؛ إذ زعم أن المستقبِلات إما أن تكون يمينيةً أو يسارية، مثل عازفَي الجيتار تمامًا. لكن ما زلنا لا نعرف الطريقة التي يعمل بها جهاز كشف الاهتزازات البيولوجي في الحقيقة؛ ومِن ثَمَّ بقِيَت نظريةُ الاهتزازات على الهامش في علم الشم.

لكن نظرية الشكل أيضًا بها مشاكل. فكما قُلنا من قبل، هي لا تستطيع تفسيرَ جزيئات الموادِّ ذات الرائحة التي لها أشكالٌ مختلفة للغاية ولكن لها الرائحة نفسها، والعكس صحيح. ولحلِّ هذه المشاكل؛ توصَّل جوردون شيبرد وكينساكو موري إلى ما يُطلَق عليه في بعض الأحيان نظرية «الشكل الضعيف» أو الأودوتوب عام ١٩٩٤.[5] الفرق الأساسي بين هذه النظرية ونظرية الشكل الكلاسيكية يَكمُن في أن شيبرد وموري اقترَحا أن المُستقبِلات الشميَّة لا تحتاج سوى إلى التعرف على شكل المجموعات الكيميائية المكونة بدلًا من شكل الجزيء بالكامل. على سبيل المثال، وكما أشرنا من قبل، كل المُركبات التي لها رائحةُ المسك في الشكل ٥-٢ تحتوي على ذرةِ أكسجين ترتبط بذرةِ كربون برابطةٍ مزدوجة. تقول نظرية الشكل الضعيف إن شكل البِنيات الكيميائية الفرعية هذه هو الذي تتعرَّف عليه المستقبلات الشمية وليس شكل الجزيء بالكامل. هذه النظرية توضِّح على نحوٍ أفضل الطبيعة التحليليَّة للرائحة، ولكن تتخلَّلها العديدُ من المشكلات نفسها التي تتخلَّل نظريةَ الاهتزاز عند التعامُل مع الجزيئات التي تحتوي على المجموعات الكيميائية نفسها، ولكن لها ترتيب مختلف. ومن ثم لا تستطيع نظريةُ الشكل الضعيف ولا نظريةُ الاهتزاز أن تشرح كيف لأزواجٍ من المواد الكيميائية أن تكون لها روائحُ مختلفة على الرغم

من أنها تمتلك المجموعاتِ الكيميائيةَ نفسَها، ولكن بتنظيمٍ مختلف على السقَّالة الجزيئية نفسِها. على سبيل المثال، يتكون كلٌّ من الفانيلين (الذي يُعد المُكوِّنَ الأساسي في الفانيلا الطبيعية) والأيزوفانيلين من حلقةٍ ذات ستِّ ذرات كربون، وترتبط بها ثلاثُ مجموعات كيميائية متطابقة في مواضعَ مختلفة (انظر الشكل ٥-٤). ستتنبَّأ نظرية الشكل الضعيف بأن المجموعات الكيميائية المتطابقة ينبغي أن تكون لها الرائحةُ نفسها. ولكن الفانيلين له رائحةُ الفانيلا، أما الأيزوفانيلين فله رائحةٌ فينولية كريهة (وهي رائحة دوائية حُلوة).




الفانيلين الأيزوفانيلين

شكل ٥-٤: الجزيئات المُكونة من الأجزاء الكيميائية الأساسية نفسها — مثل الفانيلين والأيزوفانيلين المذكورتَين هنا — يمكن أن تكون لها، مع ذلك، روائحُ مختلفة للغاية.

للتعامُل مع هذه المشكلات؛ اقترَح أصحابُ نظرية الشكل بوجهٍ عام المزجَ بين نظرية الشكل الضعيف وآليةٍ ما للتعرُّف على الشكل عديم التناظر المرآتي الإجمالي. وعلى الرغم من ذلك، لا يزال ذلك المزجُ غيرَ قادر على تفسير الحالة الشائعة بالقدْر نفسِه الخاصة بالجزيئات التي تُعد صورةً معكوسة بعضها من بعض، التي لها في واقع الأمر الرائحةُ نفسُها.[١٠] يشير هذا المزجُ إلى التعرُّف على تلك الجزيئات بالمستقبِل نفسه، وهو ما يُعَدُّ المقابلَ الجزيئي لامتلاكِ يدٍ يمكن أن تدخل في الفردتَين اليُسرى واليمنى لأحد القفازات. لذا، لا يبدو أن الأمر منطقيٌّ تمامًا.

## الشم بأنفٍ كمي

إن عملية التعرُّف على الشكل سهلةُ الفهم بنحوٍ بديهي؛ فكثيرًا ما نتعامل مع تكامليةِ الشكل في كل مرةٍ نرتدي فيها قُفازًا أو نلفُّ مِفتاحًا في قُفل، أو نستخدِم مِفتاحًا لربطِ صامولة. الإنزيمات (التي تناوَلْناها في الفصل الثالث) والأجسام المضادَّة ومستقبلات الهرمونات وغيرها من الجزيئات الحيوية معروف أيضًا أنها تتفاعل على نحوٍ أساسي عبر الترتيب الهندسي لذرَّاتها وجزيئاتها؛ إذن لا عجَب في أن تَلقى نظريةُ الشكل الخاصة بعملية الشم دعمًا كبيرًا من الكثير من علماء الأحياء، بما في ذلك العالمان الحاصلان على جائزة نوبل عن مُستقبلات الشمِّ ريتشارد أكسل وليندا باك.

الاتصال عبر الاهتزازات مألوفٌ بدرجةٍ أقلَّ بكثيرٍ لدى الإنسان، على الرغم من حقيقة أنه أساسيٌّ في حاستَين على الأقل وهما البصر والسمع. لكن في حين أن الجانب الفيزيائي للطريقة التي تكتشِف بها العينُ تردُّد الاهتزازات الخاص بالضوء وتُسجل بها الأذن تردُّدَ الاهتزازات الخاص بالهواء مفهومة تمامًا، فلم يكن لدى أحدٍ أيُّ فكرة — حتى وقت قريب — عن الطريقة التي يمكن أن يستخدمها الأنفُ لاكتشاف ترددِ أي اهتزازٍ جزيئي.

وُلد لوكا تورين في لبنان عام ١٩٥٣ ودرَس علم وظائف الأعضاء في كلية لندن الجامعية. بعد التخرُّج، انتقل إلى فرنسا للعمل في المركز الوطني للبحث العلمي، وفي مدينة نيس، خابر لحظة إلهام متعلقة بالشم وهو في زيارةٍ إلى المجمع التِّجاري جاليري لافاييت. ففي وسط المنطقة المخصصة للعطور كان هناك مكانٌ خاص بشركة شيسايدو اليابانية تَعرِض فيه عطرها الجديد نومبر نوار، والذي وصفه تورين قائلًا: «كان يجمع ما بين رائحة الورد والبنفسَج، ولكن من دون أيٍّ أثر لحلاوة أيٍّ منهما، بل إنه يمكن مقارنتُه بروائحَ بسيطةٍ وعبقة لأشجار الأرز الإسبانية التي تُستخدَم في صُنع علب السيجار. في الوقت نفسه، لم يكن كثيفًا، وبدا متلألئًا بنضارةٍ سائلة جعلَت ألوانه العميقة تتوهَّج كنافذةٍ ذات زجاج معشَّق.»[6] كانت تجرِبةُ تورين مع العطر الياباني مصدرَ إلهامٍ له جعله يدخل في مسعًى طويلِ الأمد لاكتشاف السرِّ الخاص بالكيفية التي تستطيع بها الجزيئات المتدفِّقة داخل الأنف أن تخلق مثلَ هذه التجارِب المثيرة.

وكما جرى مع دايسون من قبل، اقتنع تورين بأن الارتباطات بين الأطياف الاهتزازية والرائحة لا يمكن أن تكون محضَ صدفة. اقتنع بحُجة دايسون القائلة بأن المستقبلات

الشمية لا بد أنها تكتشف اهتزازاتٍ جزيئية بنحوٍ أو بآخَر. ولكن على خلاف دايسون، اقترح تورين آليةً جزيئية، تخمينية ولكنها معقولة، يمكن من خلالها أن تكتشف الجزيئات الحيوية اهتزازات الروابط الكيميائية عبر النفق الكمي للإلكترونات.[7]

لعلك تتذكَّر من الفصل الأول أنَّ النفق الكميَّ هو الخاصية الميكانيكية الكمية الغريبة التي تنشأ عن قدرة الجسيمات مثل الإلكترونات أو البروتونات على التصرف مثل موجات احتمال قادرة على التسرُّب عبر الحواجز التي لا يمكن اختراقُها عبر أي مسارٍ تقليدي. واكتشفْنا في الفصل الثالث كيف أن لها دورًا بالغَ الأهمية في العديد من التفاعلات الخاصة بالإنزيمات. وبينما كان تورين حائرًا بشأن سرِّ الرائحة، وقَعَت يدُه على ورقةٍ بحثية تصف تقنيةً كيميائية تحليلية جديدة تُسمَّى «التحليل الطيفي لنفَق الإلكترونات غير المرن». في هذه التقنية، يوضع لوحان معدِنيَّان على مسافةٍ قريبة بشدةٍ أحدهما من الآخَر، وتفصل بينهما فجوةٌ صغيرة. إذا وُصل جهدٌ كهربي بين اللوحَين، فستتجمَّع الإلكترونات على أحد اللوحَين، ومن ثم تُصبح شحنته سالبة (المانح) وسيُصادف قوةً جاذبة من اللوح الآخَر ذي الشحنة الموجبة (المستقبِل). عند النظر في الأمر على نحوٍ كلاسيكي، نجد أن الإلكترونات تفتقر إلى الطاقة كي تقفز وتعبُر الفجوة العازلة بين اللوحَين؛ ولكن الإلكترونات أجسامٌ كمية وإذا كانت الفجوة صغيرة بالدرجة الكافية، فيُمكنها عملُ نفقٍ كمي والعبور من اللوح المانح إلى اللوح المستقبِل. تُسمَّى هذه العملية بالنفق المرن؛ لأن الإلكترونات لا تكتسب أو تفقد طاقةً في أثنائها.

لكنَّ هناك شرطًا إضافيًّا بالغَ الأهمية وهو أن الإلكترون لا يستطيع أن يشقَّ نفقًا بطريقةٍ مرنةٍ مِن الموقع المانح إلى موقع المستقبِل إلا إذا كانت هناك فتحةٌ فارغة متوفرة له بالطاقة نفسِها بالضبط. فإذا كانت أقربُ فتحة متاحةٍ في الموقع المستقبِل ذاتَ طاقةٍ أقل، فلا بد للإلكترون أن يفقد قدرًا من طاقته للقفز. تُسمَّى هذه العملية النفَقَ غيرَ المرن. لكن ينبغي أن تنتقل الطاقةُ المفقودة إلى مكانٍ ما، وإلا فلن يتمكَّن الإلكترون من شقِّ النفق. إذا وُضعت مادة كيميائية في الفجوة بين اللوحَين، فبإمكان الإلكترون أن يشقَّ النفق طالما أن بإمكانه منْحَ طاقته الزائدة للمادة الكيميائية هذه، وهو الأمر الذي بإمكانه فِعله ما دامت الجزيئاتُ في الفجوة تحتوي على روابطَ قادرةٍ على الاهتزاز بالتردُّد المناسب، المُناظِر لذلك الخاص بالطاقة المفقودة. بمجرَّد تمرير الطاقة الزائدة بتلك الطريقة، تصلُ الإلكترونات المنتقلة عبر النفق «غير المَرِن» إلى اللوح المستقبل بطاقةٍ

أقلَّ قليلًا، وبتحليلِ فروق الطاقة بين الإلكترونات التي غادرَت الموقع المانح والإلكترونات التي وصلتْ إلى الموقع المستقبِل، تستكشف تقنيةُ التحليل الطيفي لنفق الإلكترونات غير المرن طبيعةَ الروابط الجزيئية لأيِّ مادة كيميائية.

وبالعودة إلى مثالنا الموسيقيِّ، إذا كنتَ قد جرَّبتَ في حياتك من قبلُ أن تعزف على آلةٍ موسيقية ذاتِ أوتار، فستعلم أنه يمكن الحصول على نغمةٍ من أحد الأوتار من دون حتى لمسِه؛ وذلك عن طريق الرنين. في الحقيقة، يمكن استخدام تلك الخدعة لضبط الجيتار. إذا طويتَ قصاصةً صغيرة من ورقٍ خفيف للغاية فوق أحد الأوتار، ثم ضربتَ النغمة التي تُريدها على وترٍ مجاور له، فربما تتسبَّب في إسقاط قصاصة الورق من دون حتى أن تلمس الوتر على الإطلاق. السبب في ذلك أنه بمجرد القيام بالضبط على النحو الصحيح، فإن الوتر المضروبَ يهزُّ الهواء، والهواء المُهتز يُمرر الاهتزاز إلى الوتر غير المضروب، ما يجعله يهتزُّ على نحوٍ يتوافق مع اهتزاز الوتر المضروب. في تقنية التحليل الطيفي لنفق الإلكترونات غير المرن، لا يندفع الإلكترون من الموقع المانح إلا إذا كانت المادة الكيميائية بين اللوحَين لها رابطةٌ مضبوطة على نحوٍ مُماثل على التردُّد الصحيح بحيث يُمكنه القيام بعملية القفز. وفعليًّا، يفقد الإلكترون الذي يقطع النفقَ بعضَ طاقته عن طريقِ فقدِ رابطةٍ جزيئية في رحلته الكمية عبر اللوحين.

اقترح تورين أن المُستقبِلات الشمِّية تعمل بطريقةٍ مماثلة، ولكن مع استبدال جزيءٍ واحد، ألا وهو المستقبِل الشمي، بلوحَي التقنية والفجوة. لقد تصوَّر إلكترونًا يُوجَد أولًا في «موقعٍ مانح» في الجزيء المستقبِل. وكما يحدُث في تقنية التحليل الطيفي لنفق الإلكترونات غيرِ المرن، يستطيع الإلكترونُ أن يشقَّ نفقًا إلى موقعٍ مُستقبِل في الجزيء نفسِه، ولكنه يرى أنه يُمنع من ذلك بسبب اختلاف الطاقة بين الموقعَين. لكن إذا التقَط المستقبِلُ جزيءَ مادةٍ ذات رائحة يحتوي على رابطةٍ مضبوطة على التردُّد الاهتزازي المناسب، فعندئذٍ يُمكن للإلكترون أن يقفزَ من الموقع المانح إلى الموقع المُستقبل عبر نفق، وفي الوقت نفسِه لا يُنقل سوى القدرِ الكافي من الطاقة إلى المادة ذات الرائحة، فعليًّا عن طريق فقد إحدى روابطه الجزيئية. اقترح تورين أن الإلكترون، الذي شقَّ النفق الذي يقبع الآن في الموقع المستقبل، تسبَّب في إطلاق القذيفة الجزيئية المثبتة المتمثلة في بروتين جي، مما يؤدي إلى تنشيط الخلية العصبية الشمِّية وجعلها تُرسل إشارة إلى الدماغ؛ مما يُتيح لنا أن نَشَمَّ رائحة البرتقال.

تمكَّن تورين من تجميع قِدرٍ كبير من الأدلة الظرفية لنظريته الاهتزازية الكَمية. على سبيل المثال، وكما ذكرنا، عادةً ما يكون لمُركَّبات الكبريت والهيدروجين رائحةٌ قوية تُشبه رائحةَ البيض المُتعفِّن، وتحتوي جميعُها على رابطةٍ جزيئية من الكبريت والهيدروجين تهتزُّ عند تردُّدٍ يصِل إلى ٧٦ تيرا هرتز (أي: ٧٦ تريليون ذبذبةٍ في الثانية). تطرح نظريتُه توقعًا قويًّا وهو أن أيَّ مركبٍ آخَر له رابطةٌ بتردُّدٍ اهتزازي يُساوي ٧٦ تيرا هرتز ينبغي أيضًا أن تكون له رائحةُ البَيض المتعفِّن، بغضِّ النظر عن شكله. لكن للأسف، قلةٌ قليلة من المركبات الأخرى لها نطاق التردُّد هذا في أطيافها. بحَث تورين في المؤلفات التي تتحدَّث عن التحليل الطيفي عن جزيءٍ له التردُّدُ نفسه. وفي النهاية، اكتشف أن روابط الهيدروجين والبورون الطرفية في المواد الكيميائية التي تُسمَّى البورانات لها اهتزازاتٌ تتمركز عند ٧٨ تيرا هرتز، وهي شديدةُ القرب من اهتزازات مركَّبات الكبريت والهيدروجين التي يبلغ تردُّدها ٧٦ تيرا هرتز. لكن كيف تبدو رائحةُ البورانات؟ لم تتوفَّر تلك المعلومة في المؤلَّفات الخاصة بالتحليل الطيفي، وكانت الموادُّ الكيميائية تلك غريبةً للغاية، لدرجة أنَّ تورين لم يتمكَّن من الحصول على أيٍّ منها كي يَشمَّه. لكنه عثَر على ورقةٍ بحثية قديمة تصفُ رائحتَها بأنها مُنفِّرة، وكثيرًا ما يُستخدَم هذا المصطلح لوصفِ رائحة الكبريت. في الحقيقة، تبيَّن أن البورانات هي الجزيئات «غير» الكبريتية الوحيدة التي لها رائحةُ البيض المتعفِّن نفسُها مثل كبريتيد الهيدروجين؛ ومن الأمثلة على ذلك مركَّب الديكابوران الذي يتكوَّن من ذرَّات بورون وهيدروجين فقط (وصيغته الكيميائية هي $B_{10}H_{14}$).

إن هذا الاكتشاف، المتمثلَ في أنَّهُ من بينِ آلاف الموادِّ الكيميائية التي شُمَّت رائحتها، فإن المادة الوحيدة التي تنبعثُ منها الرائحة الكريهة التي لكبريتيد الهيدروجين عبارةٌ عن جُزيءٍ له التردُّد الاهتزازي نفسُه، وفَّر دعمًا قويًّا لنظرية الاهتزاز الخاصة بالرائحة. تذكَّر أن صانعي العطور كانوا يُحاولون منذ عقودٍ التعرفَ على الجانب الجزيئي للرائحة. استطاع تورين فِعلَ ما لم يقدر عليه الكيميائيُّون الخاصون بهم؛ لقد توقَّع الرائحةَ من النظرية فقط. لقد كان هذا المكافئُ الكيميائي لتوقُّع عبق العطر من شكلِ زجاجته. كذلك قدَّمَت نظرية تورين آلية كمية معقولة بيولوجيًّا تسمح للجزيء الحيويِّ باكتشاف الاهتزاز الجزيئي. لكن وجود «آلية معقولة» ليس كافيًا. فهل كانت صحيحة؟

## معركة الأنوف

حقَّقَت نظريةُ الاهتزاز بعض النجاحات المشجِّعة، كما في حالة مُركَّب الديكابوران، ولكن كانت لا تزال تَشوبها بعضُ المشكلات المُماثلة للمشكلات الموجودة في نظرية الشكل، مثل الجزيئات التي تُعدُّ صورةً معكوسة من بعضها البعض (مثل الليمونين والدايبنتين)، والتي لها روائحُ مختلفةٌ للغاية على الرغم من تطابُق أطيافها الاهتزازية. قرَّر تورين أن يختبرَ توقُّعًا آخرَ لنظريته. لعلك تتذكَّر أن نظرية شقِّ الأنفاق فيما يتعلق بعمل الإنزيمات (ارجع للفصل الثالث) خضعَت للاختبار بتغيير الشكل الأشيع للهيدروجين بحيث يحلُّ محلَّه أحدُ نظائره الأثقل مثل الديوتيريوم؛ للاستفادة من تأثيرِ النظائر الحركية. جرَّب تورين خدعةً مُماثلة باستخدام مادةٍ ذات رائحة تُسمَّى «الأسيتوفينون» وتوصف بأنَّ لها «رائحة حُلوة لاذعة ... تُشبه تلك التي لزهرةِ البرتقال الخشنة أو الزعرور البرِّي». اشترى كميةً غالية الثمن للغاية من تلك المادة، التي استُبدل فيها الديوتيريوم بكلِّ ذرةٍ من ذرات الهيدروجين الثَّماني في روابط الكربون والهيدروجين الخاصة بها. الذرَّات الأثقل، مثل أوتار الجيتار الأكثر سُمكًا، ستهتزُّ بترددات أقل؛ إن رابطة الكربون والهيدروجين العادية تهتزُّ بتردد عالٍ يتراوح ما بين ٨٥ إلى ٩٣ تيرا هرتز، ولكن إذا حلَّ الديوتيريوم محل الهيدروجين فسينخفض ترددُ اهتزاز رابطة الكربون والديوتيريوم إلى نحو ٦٦ تيرا هرتز. عندئذٍ، سيكون لتلك المادة الكيميائية التي تحتوي على الديوتيريوم طيفٌ اهتزازيٌّ مختلف تمامًا عن ذلك الخاصِّ بالمادة التي تحتوي على الهيدروجين. لكن هل يُوجَد أيُّ اختلافٍ في الرائحة؟ أغلق تورين بابَ مُختبره قبل أن يشمَّ المُركبَين بحذرٍ شديد. اقتنع بأن «الرائحتَين مختلفتان، حيث إن المُركَّب المشتمل على الديوتيريوم تقلُّ فيه الرائحة الحلوة، ويُشبه المذيبَ أكثر».[8] حتى بعد أن نقَّى كل مركب بعناية، اقتنع بأن رائحة المركب المشتمل على الهيدروجين تختلف تمامًا عن رائحة المركب المشتمل على الديوتيريوم. عندئذٍ زعم أن نظريتَه قد أُثبِتَت.

أبحاث تورين جذبَت انتباه المُستثمرين إليه، ومن ثَم قدَّموا الدعم الماليَّ اللازمَ لإنشاء شركةٍ جديدة باسم «فليكسيترال» والتي كرسَت نشاطها للاستفادة من أفكاره عن الاهتزاز الكمِّي؛ من أجل تصنيع عطورٍ جديدة. وقد كتَب المؤلف تشانلدر بور كتابًا يصف فيه مَسعى تورين فيما يتعلَّق بالآليات الجزيئية المعنيَّة بالروائح،[9] وقد سجَّلَت هيئة الإذاعة البريطانية فيلمًا وثائقيًّا عن عمله.

لكن كان الكثيرون لا يزالون غيرَ مقتنعين، لا سيما المتحمسين لنظرية الشكل. كرَّرَت كلٌّ من ليزلي فوسول وأندرياس كيلر من جامعة روكفلر اختباراتِ الشم باستخدام الأسيتوفينون العادي، وذلك الذي يحتوي على الديوتيريوم، لكن بدلًا من الاعتماد على أنف تورين الخبير، فقد طلَبتا من أربعة وعشرين شخصًا ليست لهم خبرةٌ في العطور تحديدَ ما إن كان بإمكانهم التمييزُ بين المُركَّبَين أم لا. كانت النتائج قطعية: لا يُوجَد فرقٌ بين الرائحتَين. نُشرت ورقتهما البحثيةُ في مجلة «نيتشر نيوروساينس» عام ٢٠٠٤،[10] وقد صحِبَتها مقالةٌ افتتاحية تصفُ نظريةَ الاهتزاز الخاصةَ بالرائحة بأنها «ليست لها مصداقيةٌ في الأوساط العلمية».

لكن، وكما سيقول لك أيُّ باحثٍ طبي، التجارِب في البشر يمكن أن تتشوَّش بكل أنواع التعقيدات؛ مثل توقُّعات المبحوثين وخبراتهم السابقة على التجرِبة. لتجنُّب هذه المشكلات؛ قرَّر فريقٌ بقيادة إفثيميوس سكولاكيس من معهد ألكسندر فليمنج باليونان، الذي يتضمَّن باحثين من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، من بينهم لوكا تورين، التحوُّلَ إلى نوعٍ ذي سلوكٍ أفضل بكثير وهو ذباب الفاكهة المُولَّد في المختبر. ابتكر الفريقُ المكافئ الخاص بذباب الفاكهة لتجرِبة اختيار المجرى التي ابتكرَتها جابرييل جيرلاك المعنيَّة بأسماك الشعاب المرجانية والمذكورةُ سابقًا في هذا الفصل. أطلقوا على التجرِبة اسم «المتاهة تي» الخاصة بالذباب. أُدخل الذباب إلى متاهةٍ على شكل حرف تي من خلال الجذع وحُفِّز كي يطيرَ إلى مُفترَقِ طريق حيثُ يكون عليه أن يختار هل يتَّجه نحو اليمين أو اليسار. ضُخ هواءً معطرًا في كل ذراع، وعن طريق عدِّ عدد الذباب الذي ذهب في كل اتجاه، بإمكان الباحثين أن يعرفوا هل الذباب يستطيع التمييزَ بين الموادِّ ذات الرائحة التي ضُخَّت إلى المجْريَين الهوائيَّين الأيسرِ والأيمن على التوالي.

درسَت المجموعةُ أولًا هل الذباب بإمكانه أن يشَمَّ الأسيتوفينون أم لا. إنه كان يستطيع ذلك بالفعل؛ فمجرد قدرٍ ضئيل جدًّا من المادة الكيميائية في نهاية الذراع اليُمنى للمتاهة كان كافيًا لحثِّ جميع الذباب تقريبًا على التحليق باتجاه رائحته التي تُشبه رائحةَ الفواكه. عندئذٍ، استبدَلَت المجموعةُ بذرات الهيدروجين ذراتِ الديوتيريوم في الأسيتوفينون؛ ولكن اتَّبع أفرادُها طريقةً جديدة حيث كانت تستبدلُ إما ثلاثَ ذرات أو خمسَ ذرات أو الذرَّاتِ الثمانيةَ جميعَها من الهيدروجين بذراتٍ من الديوتيريوم، واختبَروا كلَّ نسخةٍ من المادة الكيميائية على حِدَةٍ، ولكن كان المركبُ الخالي من الديوتيريوم في الذراع الأخرى من المتاهة دومًا. كانت النتائجُ لافتةً للانتباه. في حالة المادة التي بها ثلاثُ ذرات ديوتيريوم

فقط، فقدَ الذبابُ تفضيلَهُ للاتجاه نحوَ يمين المفترق، وأصبح يتَّجه عشوائيًّا جهةَ اليمين أو جهة اليسار. ولكن عندما ضخَّ الباحثون في الذراع اليُمنى المادةَ الكيميائية التي استُبدل فيها بخمس ذراتٍ أو ثَمانٍ من الهيدروجين ما يُقابلها من ذراتِ الديوتيريوم، اتَّجه الذباب بعزمٍ إلى جهة اليسار بعيدًا عن المادة التي تحتوي على الديوتيريوم. بدا أن الذباب يستطيع التمييزَ بين الأسيتوفينون ذي نسبةِ الديوتيريوم العادية والثقيلة، ومن ثمَّ لم يُفضل رائحتَهما. اختبر الفريقُ مادَّتَين ذواتَيْ رائحتَين أُخرَيَين ووجد أنَّ الذباب يسهُل عليه التمييزُ بين شكل الأوكتانول المحتوي على ذرات الهيدروجين، وذلك المحتوي على ذرَّات الديوتيريوم، ولكن لا يستطيع التمييزَ بين الشكلَين المقابلَين لهما في البنزالدهيد. ولإثبات أن الذباب كان يستخدِم حاسةَ الشمِّ لتمييز روابط الديوتيريوم؛ اختبر الباحثون أيضًا سُلالةً مُتحوِّرة من الذباب تفتقر إلى المستقبِلات الشميَّة الوظيفية. وكما هو متوقَّع، لم تستطع هذه السُّلالات المتحوِّرة «الفاقدة لحاسة الشم»[١١] التمييز على الإطلاق بين الموادِّ ذات الروائح المحتوية على ذرَّات هيدروجين وتلك المحتوية على ذرات ديوتيريوم.

باستخدام إعدادٍ يعتمدُ على نظرية الاشتراط لبافلوف؛ تمكَّن الباحثون حتى من تدريب الذباب على ربطِ أشكالٍ مُعيَّنة من الموادِّ الكيميائية بالعقاب، والذي يتمثَّل في صدمةٍ كهربية خفيفة في أقدامه. حينها تمكَّن الفريق من إجراء اختبارٍ لافتٍ للانتباه أكثرَ لنظرية الاهتزاز. في البداية، درَّب الذبابَ على تجنُّب المركبات التي تحتوي على رابطة الكربون والديوتيريوم، والتي يصل تردُّد اهتزازاتها إلى ٦٦ تيرا هرتز. وأرادوا بعد ذلك اكتشافَ هل هذا التجنُّب يُمكن تعميمُه على كل المركبات المختلفة للغاية التي تَصادف امتلاكُها لاهتزازات روابط بالتردُّد نفسِه أم لا. وبالفعل كان هذا التعميم مُمكنًا. اكتشف الفريق أنَّ الذباب المدرَّب على تجنُّب المركبات التي تحتوي على رابطة الكربون والديوتيريوم تجنَّب أيضًا المركبات التي تُسمَّى النتريلات التي اهتزازُ رابطة الكربون والنيتروجين فيها له التردُ نفسُه، على الرغم من أنها مختلفةٌ كيميائيًّا بشدة. قدمَت الدراسة دعمًا قويًّا لدور الاهتزاز في عملية الشم، عند الذباب على الأقل، وقد نُشرت عام ٢٠١١ في مجلةٍ علمية مرموقة وهي «بروسيدنجز أوف ذا ناشونال أكاديمي أوف ساينس».[11]

في العام التالي، تعاون سكولاكيس وتورين مع باحثين من كلية لندن الجامعية؛ للإجابة على السؤال المُهم المتمثِّل فيما إذا كان الإنسانُ أيضًا بإمكانه الشمُّ عن طريق الاهتزازات أم لا. وبدلًا من الاعتماد فقط على حاسة الشم المُرهَفة عند تورين، استعان

الفريقُ بأحدَ عشَر مبحوثًا لهم حاسةُ شمٍّ مرهفة. لقد أكَّدوا أولًا النتيجةَ التي توصَّلَت إليها فوسول وكيلر؛ فلم يتمكَّن المشاركون في الاختبار من تمييزِ روابط الكربون والديوتيرون في الأسيتوفينون. ولكن قدَّر الفريقُ أنه فقط في حالة وجود ثماني روابط من الكربون والهيدروجين قد تكون الإشارةُ من شكل المادة الكيميائية الذي يحتوي على الديوتيريوم ضعيفةً لدرجة ألَّا يتمكن أنفُ الإنسان من تمييزها؛ ولذا قرَّروا أن يدرُسوا جُزيئاتٍ أكثرَ تعقيدًا لها رائحةُ المسك (مثل الجزيئات المعروضة في الشكل ٥-٢) التي تحتوي على ما يصلُ إلى ثمانٍ وعشرين ذرَّةَ هيدروجين، والتي يمكن في كلٍّ منها أن تحلَّ محلها ذرةُ ديوتيريوم. في هذه المرة وعلى خلاف تجرِبة الأسيتوفينون، استطاع المشاركون الأحدَ عشَر أن يُميزوا بسهولةٍ بين رائحة المسك العادية وتلك التي تحتوي بالكامل على الديوتيريوم. على كل حال، ربما يستطيع الإنسانُ في واقع الأمر أن يُميز الجزيئات التي لها تردُّداتٌ مختلفة.

## دور علماء الفيزياء في التعرُّف على عملية الشم

من الانتقادات التي وُجِّهَت إلى نظرية الاهتزاز الكميِّ الغموضُ الشديد الذي يكتنف أساسَها النظري. هذا الانتقاد عالجَه الآن فريقٌ من علماء الفيزياء من كلية لندن الجامعية عام ٢٠٠٧؛ حيث قام بالعمليات الحسابية الكمية المعقَّدة التي تقف وراء نظرية النفق الكمي، وتوصل إلى أنها كانت «متَّسقةً مع كلٍّ من القواعد الفيزيائية ذات الصِّلة والسمات المرصودة لعملية الشم، لكن بشرط أن يكون للمُستقبِل خصائصُ عامةٌ معينة».[12] وقد ذهب أحدُ أعضاء الفريق وهي جيني بروكس حتى إلى حدِّ اقتراح حلٍّ لتلك المشكلة المُزعجة الخاصة بالجزيئات التي تُعَد صورةً معكوسة من بعضها البعض مثل الليمونين والدايبنتين (ارجع للشكل ٥-٣) والتي لها الاهتزازات نفسُها ولكن رائحتها مختلفة.

في الحقيقة، كان مُشْرف جيني ومُعلِّمها البروفيسور الراحل مارشال ستونهام أولَ مَن توصَّل إلى ما يُطلق عليه في بعض الأحيان نموذج البطاقة المُغنطة. كان ستونهام من روَّاد علماء الفيزياء بالمملكة المتَّحدة في جيله وقد تراوحَت اهتماماتُه من السلامة النووية وحتى الحوسبة الكمية وعلم الأحياء وكذلك الموسيقى، وذاك الاهتمام الأخير هو ما يُهمنا في هذا الفصل؛ فقد كان يعزف على البوق الفرنسي. النظرية التي توصَّل إليها فريقُ بروكس عبارةٌ عن شرحٍ ميكانيكي كمِّي لفكرة روبرت إتش رايت بأن كلًّا من شكل المستقبِل

الشمي واهتزازات الروابط في جُزيء المادة ذات الرائحة له دورٌ في عملية الشم. اقترحا أن جيب الربطِ الخاصَّ بالمستقبِل الشمِّي يُعد بمنزلة ماكينة قراءة بطاقاتٍ مُمغنَطة. تحتوي البطاقات المُمغنطة على شريحةٍ مغناطيسية تُقرأ لتوليد تيارٍ كهربي في ماكينة قراءة البطاقات الممغنطة. لكن لا تتناسَب كلُّ البطاقات المُمغنطة مع تلك الماكينة؛ إذ يجب أن تكون البطاقة بالشكل والسُّمك المناسبَين وتكون الشريحة المغناطيسية في المكان المناسب، قبل حتى أنْ يكون بإمكانك استخدامُها والتحقُّق إن كانت الماكينة ستتعرَّف عليها أم لا. اقترحَت بروكس وزملاؤها أن المستقبِلات الشميةَ تعمل بالطريقة نفسِها. افترض الفريق أن جُزيء المادة ذاتِ الرائحة لا بد أن يتناسب أولًا مع جيب الربط عديم التناظُر المِرآتي اليميني أو اليساري، مثلما تتناسبُ البطاقة الائتمانية داخلَ ماكينة قراءة البطاقة. ومن ثم فالموادُّ ذات الروائح التي لها الروابط نفسُها ولكن لها أشكال مختلفة، مثل الشكل اليميني والشكل اليساري من الجزيء نفسِه، ستلتقطها مُستقبِلاتٌ مختلفة. وفقط بعد أن تتناسبَ المادة مع مستقبِلها المُكمل، تكون لديها القدرةُ على تحفيز حدَث النفَق الإلكتروني القائم على الاهتزاز من أجل تنشيط الخلية العصبية للمستقبل؛ ولكن لأن الجزيءَ اليساري سينشط المستقبل اليساري، فستختلف رائحتُه عن الجزيء اليميني الذي يُنشط المستقبِلَ اليميني.

إذا رجعنا إلى مثال الموسيقى مرةً أخرى أخيرة، حيث اعتبرنا الجيتار بمثابة جُزيء المادة ذاتِ الرائحة وأوتاره بمنزلة الروابط الجزيئية التي يجب أن تُفقَد؛ فسنجد أن المُستقبِلات إما مُمثَّلة في حالة إريك كلابتون، أو حالةِ جيمي هيندريكس. بإمكان كِليهما عزف النغمات الجزيئية نفسَها، ولكن الجزيئات اليمينة أو اليسارية ينبغي أن تلتقطها المستقبلات اليمينية أو اليسارية، تمامًا مثلما ينبغي أن يُعزَف على الجيتار اليمينيِّ بيدِ عازف أيمن. ومن ثَم فعلى الرغم من أن الليمونين والدايبنتين اهتزازاتهما واحدة، فينبغي أن تلتقطَهما مستقبلاتٌ شمِّية يمينية أو يسارية. ستتَّصل المستقبلات المختلفة بمناطقَ مختلفةٍ في الدماغ، ومن ثم ستولِّد روائحَ مختلفة. هذا الجمع بين الشكل وتمييز الاهتزاز الكميِّ يوفِّر في النهاية نموذجًا يكاد يتناسَب مع كلِّ البيانات التجريبية.

بالطبع حقيقة أنَّ هذا النموذج يتلاءمُ مع البيانات لا تُثبت بذاتِها أن هناك أساسًا كميًّا لعملية الشم. تُقدم البياناتُ التجريبية دليلًا قويًّا على أي نظريةٍ خاصة بالشم تتضمَّن كلًّا من الشكل والاهتزاز. لم تدرس حتى الآن على نحوٍ مباشر أيُّ تجربةٍ ما إذا كان النفقُ الكمِّي له دورٌ في عملية الشمِّ أم لا. لكن حتى الآن على الأقل، فالنفق الكمي

غير المرن للإلكترونات هو الآلية الوحيدة المعروف أنها تُقدِّم تفسيرًا مقبولًا للطريقة التي يمكن أن تَكتشف بها البروتيناتُ الاهتزازاتِ في جزيئات الرائحة.

الجزء الحيويُّ المفقود حتى الآن في أُحجية عملية الشم هو بِنْية المستقبلات الشمية. إن معرفة ذلك يُسهل العثور على إجابات الأسئلة الأساسية مثل كيف تتلاءم جيوبُ الربط بأريحية مع كلِّ جزيءٍ خاص بمادة ذاتِ رائحة، وهل الجزيئات التي تُعد صورةً معكوسة بعضها من بعض تُربَط بالمُستقبِلات نفسِها، وهل جزيئات المستقبِلات تمتلك مواقعَ مانحةً ومستقبِلةً خاصة بالإلكترونات موضوعة على نحوٍ ملائم لتحفيز عملية النفَق غير المرِن الخاصة بالإلكترونات. لكن على الرغم من الجهود الهائلة التي بُذِلَت على مدى سنواتٍ عديدة من قِبَل بعضٍ من المجموعات المرموقة في علم الأحياء البِنيوي حول العالم؛ لم يتمكَّن أحدٌ حتى الآن من عزل جزيئات المستقبلات الشمِّية التي يمكن دراستها بالطريقة نفسِها التي أتاحت إثباتَ دور آليات ميكانيكا الكم في الإنزيمات (ارجع إلى الفصل الثالث)، أو في بروتينات الصبغة الخاصة بعملية البناء الضوئي (ارجع إلى الفصل الرابع). تكمُن المشكلة في أن المستقبل الشميَّ في الحالة الطبيعية مُدمجٌ في غِشاء الخلية، على نحوٍ يُشبه إلى حدٍّ ما قنديلَ بحرٍ يطفو على سطح الماء. إن استخلاص بروتين المستقبِل من الغشاء يُشبِهُ إخراج قنديلِ بحرٍ من ماء المحيط؛ فهو لن يحتفظ بشكله في هذه الحالة. لم يتوصَّل أحدٌ حتى الآن إلى طريقةٍ لتحديد بِنْية البروتينات وهي لا تزال مدمجةً داخل أغشية الخلايا.

وهكذا، وعلى الرغم من وجودِ جدلٍ كبير حول الأمر، فإن النظرية الوحيدة التي تُقدِّم تفسيرًا للطريقة التي يمكن أن يُميز بها الذبابُ والبشرُ بين روائح المُركبات العادية وتلك التي تحتوي على الديوتيريوم؛ قائمةٌ على آليةِ ميكانيكا الكم التي تُسمَّى نفَق الإلكترونات غير المَرِن. ومؤخرًا، أوضحَت التجارِبُ أنه إلى جانب الذباب والإنسان هناك حشراتٌ أخرى وحتى أسماك قادرة على تَبيُّن الفروق بين روابط الهيدروجين والديوتيريوم. وإذا وُجد الشمُّ الكمي في مِثل هذا النطاق من المخلوقات، فمن المرجَّح أنه شائعٌ بدرجة كبيرة. من المُرجَّح أن البشر وذباب الفاكهة وأسماك المهرج ومجموعةً كبيرة من الحيوانات الأُخرى يُسخِّرون قدرة الإلكترون على الاختفاء من نقطةٍ ما في الفراغ والتجسُّد على الفور في نقطةٍ أخرى؛ حتى يتمكَّنوا من التقاط هذه الرسالة التي «من واقع مادي» والعثور على الطعام أو الوليف، أو طريقهم إلى موطنهم.

## هوامش

(١) للأسف، أدَّت تلك الشهرة إلى تهديد هذا الحيوان في موطنه؛ حيث أصبح مفضَّلًا لدى الصيادين الذين يُفرِّطون في صيدِه من أجل الوفاء بالتزاماتِ سوق أسماك المهرج الآخذِ في الازدهار. لذا، لا تحتفِظْ بسمكة نيمو في منزلك؛ لأن موطنها هو الشعاب المرجانية الحقيقية!

(٢) يُعتقد أن قوة المدِّ والجزر حينئذٍ هي العاملُ المساعد على الانتشار.

(٣) لاحظ العنصرية المضمَّنة هنا.

(٤) ١-ميثيل-٤-(١-ميثيل الإيثينيل)-سيكلوهيكسين.

(٥) وحدة البيكوأمبير تُساوي واحدًا على تريليون ($١٠^{-١٢}$) من الأمبير.

(٦) في هذا السياق، عبارة «المعبَّر عنها» تعني الجينَ النشط؛ بمعنى أن معلوماته تكون منسوخةً في الحمض النووي الريبوزي، وعندئذٍ يُغذي آلية تخليق البروتين لإفراز البروتين الذي يُشفِّره ذلك الجين، مثل أحد الإنزيمات أو مُستقبِل مُعين من المستقبلات الشمِّية.

(٧) تقليديًّا، كان يتمُّ الحصول على المسك من بعض المصادر الطبيعية، ومنها الغُدد الجنسية لدى غزال المسك، وغُدد الوجه لدى ثَور المسك، وروث حيوان خز الصَّنوبر وبول غرير الصخر. لكن اليوم تقريبًا كل المسك العطري صناعي.

(٨) الجزيء عديمُ التناظر المرآتي له صورةٌ معكوسة غير قابلة للتراكب.

(٩) في الحقيقة، كان يعزف هيندريكس في العموم على جيتاره اليمينيِّ وهو في وضعٍ معكوس، لكن كان يعكس الأوتار بحيث يُصبح الوتر الأقلُّ سُمكًا في الموضع نفسِه، كما لو كان يعزف على جيتارٍ يساري.

(١٠) على سبيل المثال، جزيء الجيوسمين (4S,4aS,8aR)-(K) والجزيء الذي يُعد صورةً معكوسة منه (4R,4aR,8aS)-(C) اللذان لهما رائحةٌ واحدة وهي «ترابية، عفنة».

(١١) فقدان حاسَّة الشم أو عدم القدرة على اكتشاف الروائح هي حالةٌ عادةً ما ترتبط، لدى البشر، بحدوثِ إصابة في ظهارة الأنف، على الرغم من أن الأشكال الوراثية النادرة معروفة.

الفصل السادس

# الفراشة وذبابة الفاكهة وطائر أبي الحناء الكمِّي

وُلد فريد أوركهارت في تورونتو بكندا عام ١٩١٢ والتحق بمدرسةٍ يحدُّها مُستنقعٌ مليءٌ بنباتات البوط. في تلك البقعة، قضى ساعاتٍ لا حصر لها يرصد الحشرات، لا سيما الفراشات التي تقطن أحواضَ القصب. كان الوقت المفضَّل لدَيه هو مطلعَ الصيف حينما يشهد المستنقعُ وصولَ آلافِ الفراشات الملكيَّة، تلك الفراشات الشهيرة في أمريكا الشمالية ذات نمط الأجنحة المألوف الذي يجمع بين اللونَين البرتقالي والأسود. تقضي الفراشاتُ الملكية مدةَ الصيف هناك كي تتغذَّى على نباتات الصقلاب التي تنمو في تلك البقعة قبل أن ترحل مرةً ثانية في فصل الخريف. كان فريد يتبادر إلى ذهنه سؤالٌ مُحدَّد وهو: إلى أين تذهب تلك الفراشات؟

كما يُنسب للقديس بولس، عادةً عندما نصير كبارًا نتجاهلُ ما كنا نهتمُّ به ونحن أطفال. لكن هذا لا ينطبق على فريد، الذي لَمَّا كَبِرَ لم يتوقَّف عن التفكير في المكان الذي تقضي فيه الفراشاتُ الملكية فصلَ الشتاء. وبعد دراسة علم الحيوان في جامعة تورونتو، وبعدما أصبح في النهاية أستاذًا في هذا المجال، عاد إلى سؤالِ طفولته. حينذاك، كان قد تزوَّج من نورا باترسون، وهي عالمةُ حيوان زميلةٌ ومُحبة أيضًا للفراشات.

باستخدام الأساليب الكلاسيكية في وَسْم الحيوانات، حاوَل فريد ونورا أن يكتشفا سرَّ اختفاء الفراشات الملكية. لم تكن المهمةُ سهلة. وعلى الرغم من فاعلية طريقة ربط الوسوم في أقدام طيور أبي الحناء أو تثبيتها في زعانف الحيتان، فإن تثبيت وسوم في أجنحة الفراشات الرقيقة الغشائية يفرض تحديًا مختلفًا تمامًا. جرَّب الزوجان تثبيتَ علاماتٍ لاصقةٍ ووسومٍ بها غِرَاء في أجنحة الحشرات؛ ولكن إما أن تسقط العلامات أو

الوسوم أو تُعاني الفراشات الموسومة مُشكِلةً في الطيران. لم يتوصَّلا إلى حلٍّ لهذه المشكلة إلا في عام ١٩٤٠ عندما استخدما علامةً لاصقة صغيرة تُشبه العلامات التي يصعب كشطُها من الأواني الزجاجية المُشتراة حديثًا. لمَّا تجهَّزا بتلك العلامات، بدَآ في وَسْم مئات الفراشات الملكية وإطلاقها، وبذلك أصبح لكلٍّ منها وسمٌ يحمل رقمًا تعريفيًّا وتعليمات تقول إنه إذا عُثر عليها، فعلى مَن يجدها أن يُخطِر قسم علم الحيوان بجامعة تورونتو.

لكن كانت هناك ملايينُ الفراشات الملكية في أمريكا، وليس هناك سوى اثنين راصدَين لها، وهما فريد ونورا أوركهارت. لذا بدأ الزوجان توظيفَ متطوِّعين، وبحلول خمسينيَّات القرن العشرين، حُشِدَت شبكةٌ تضمُّ آلاف المُحبين للفراشات، الذين وسَمُوا بدورهم مئاتِ الآلاف من الفراشات وأطلَقوها، ثم أعادوا إمساكها وتسجيلَها. ولما استمرَّ الزوجان في تحديثِ خريطة تتبع مواقع الإمساك بالفراشات وإطلاقها، ظهر نمطٌ تدريجيًّا. عادةً ما كان يُمسك بالفراشات التي انطلقَت من تورونتو على طول مسارِ طيران قُطري يتَّجه نحو الجنوب ويَعبر الولايات المتحدة من الشمال الشرقي إلى الجنوب الغربي، مارًّا بولاية تكساس. لكن على الرغم من الرحلات الميدانية الكثيرة، لم يتمكَّن الزوجان أوركهارت من تحديدِ الوجهة النهائية لهذه الفراشات التي تَقْضي فصل الشتاء في الولايات الجنوبية للولايات المتحدة.

في النهاية، وجَّه الزوجان أوركهارت أعيُنَهما نحو الجنوب أكثر، وفي عام ١٩٧٢، كتبَت نورا المحبَطة عن مشروعهما إلى الجرائد في المكسيك تطلُب مُتطوِّعين للإبلاغ عن أي فراشاتٍ يرَونها والمساعدة في وضع الوسوم. في فبراير ١٩٧٣، وصل خطابٌ من شخص يُدعى كينيث سي براجر من مدينة مكسيكو سيتي يعرض المساعدة. بدأ كينيث البحثَ بمساعدةِ كلبه كولا، وأخذ يقود شاحنةَ التخييم الصغيرةَ الخاصة به عبر الريف المكسيكي في وقتٍ متأخِّر من المساء بحثًا عن الفراشات. وبعد عام، في أبريل ١٩٧٤، أرسل خبرًا أنه رأى أعدادًا كبيرة من الفراشات الملكية في سلسلةِ جبال سييرا مادري بوسط المكسيك. ثم، في أواخر ذلك العام، أرسل يقول إنه رصَد أجسام العديد من الفراشات الممزقة والميتة على طول الطرق في جبال سييرا. كتب إليه الزوجان أنهما يعتقدان أن أسراب الطيور لا بد أنها تتغذَّى على أسرابٍ كبيرة من الفراشات الملكية المارَّة.

في مساء التاسع من يناير ١٩٧٥، اتصل كينيث هاتفيًّا بالزوجَين أوركهارت وهو يشعر ببعض الحماس كي ينقل لهما خبرًا مفاده أنه «وصَل إلى المستعمَرة! ... ملايين الفراشات الملكية، في منطقةٍ خضراء بجانب بقعةٍ جَرْداء جبَلية». أخبرهما كينيث أنه

تلقَّى معلومةً من حطَّابين مكسيكيِّين زعَموا أنهم رأَوا أسرابًا من الفراشات الحمراء وهم يسيرون عبر الجبل مع حَميرهم المحمَّلة. وبدعمٍ من الجمعية الجغرافية الوطنية، انطلق فريد ونورا في رحلةٍ استكشافية لإيجاد الموطن الشتويِّ المُراوغ للفراشات الملَكية وتسجيله، وقد وصَلا بالفعل إلى المكسيك في يناير ١٩٧٦. في اليوم التالي، ركبا سيارةً إلى إحدى القُرى والتي انطلقا منها كي يصعدا «جبل الفراشات» والذي كان على ارتفاع ١٠ آلاف قدم. لم يكن مِثلُ هذا التسلُّق الشاقِّ إلى هذا الارتفاع مهمةً سهلة على زوجَين بلَغا حينها سنَّ الشيخوخة (إذ كان فريد يبلغ أربعة وستين عامًا)، وخشيا كثيرًا ألا يُمكنهما الوصولُ إلى القمة. لكن مع وجود قلبَين نابضَين بالحماس وعقلَين انتعشَت فيهما ذكرياتُ الفراشات ذاتُ الألوان الزاهية التي تُرفرف في ضوء شمس تورنتو، وصَلا إلى القمة، وهي هضبةٌ متناثرة النبات تنمو فيها شجيراتُ العرعر والبهشية. لكن لم يجدا فراشات. أصابهما الإحباطُ والتعب، ومن ثَم نزلا إلى بقعةٍ جرداء مُمتلئةٍ بأشجار التنوب المقدَّس، وهو نوعٌ من أشجار التنوب موطنُه جبال وسط المكسيك، وهناك، وجَدا أخيرًا البُغيةَ التي انقضى في البحث عنها نصفُ عُمرَيهما: «أسرابٌ غفيرة من الفراشات في كل مكان. وفي هدوءٍ شِبه ساكن، زيَّنَت الفراشاتُ أغصان الأشجار وطوَّقَت جذوع أشجار التنوب المقدس، وغطَّت الأرض بحشودها الغفيرة». وبينما كانا واقفَين يُحدقان في المشهد المذهل، انكسر فرع شجرةٍ وهناك، بين بقايا الفراشات الميتة، وقعَت عينُ فريد على الوسم الأبيض الذي يَعرفه والذي يحمل تعليماته بضرورة إخطار قسم علم الحيوان بجامعة تورونتو في حالةِ إيجاد تلك الفراشات. هذه الفراشة بالذات وسَمَها متطوعٌ اسمه جيم جيلبرت في مدينة تشاسكا بولاية مينيسوتا، وذلك على بُعد ما يَزيد عن ألفَي ميل![1]

الآن، يُنظر إلى رحلة الفراشات الملكية باعتبارها واحدةً من أعظم هجرات الحيوانات في العالم. ففيما بين شهرَي سبتمبر ونوفمبر من كل عام، تتَّجه ملايين الفراشات الملَكية في جنوب شرق كندا إلى ناحية الشمال الشرقي، وتقطع مسافة تبلغ عدة آلاف من الأميال تَعبر فيها الصحاري والبراري والحقول والجبال، ثم تشقُّ طريقًا يمرُّ من عينِ إبرةٍ جغرافية بفجوةٍ عرضُها ٥٠ ميلًا في وديان النهر البارد بين مدينتَي إيجل باس وديل ريو بولاية تكساس، وفي النهاية تحطُّ على قِمَم دُزينة أو نحو ذلك من الجبال في وسط المكسيك. وبعد قضاءِ فصل الشتاء على قمم الجبال الباردة في المكسيك، تَقطع الفراشاتُ الملكية الرحلةَ العكسية في الربيع حتى تصِل إلى أراضيها الصيفية التي يتوفَّر فيها غذاؤها بكثرة. واللافتُ للنظر أنه لا تقطع أيُّ فراشةٍ الرحلةَ كاملة. بدلًا من ذلك، إنها تتكاثرُ

في الطريق وبذلك تكوِّن الفراشاتُ التي تعود إلى تورونتو نسل الفراشات الملكية التي غادرَت كندا في المرة الأولى.

كيف تعرفُ هذه الحشراتُ وجهتَها بتلك الدقَّة بحيث يمكن لها أن تصلَ إلى وجهةٍ صغيرة تبعُد عن موطنها الأصليِّ آلافَ الأميال، وهذه الوجهة لم يزُرْها من قبل غير أسلافها؟ هذا لغزٌ آخَر من الألغاز الكبرى في الطبيعة والذي لم يبدأ في التكشُّف إلا الآن. فمثل كلِّ الحيوانات المهاجرة، تستخدم الفَراشات مجموعةً متنوعة من الحواسِّ تتضمَّن البصر والشم، بما في ذلك بوصلة شمسية يمكن أن تُقدِّر الوضع المتحرك للشمس في ساعات النهار عبر «ساعتها البيولوجية»، وهي عمليةٌ كيميائية حيوية في كل الحيوانات والنباتات لا تهدأ عن الحركة على مدار ٢٤ ساعة؛ بحيث تتَتبَّع دورة الليل والنهار.

نعرف أن الساعات البيولوجية هي سببُ شعورنا بالتعب في الليل واليقظة في الصباح، وكذلك ما نُعانيه من اضطرابٍ عندما يحدُث خللٌ في إيقاعاتها بسبب الرحلات الجوية الطويلة. وقد شهد العَقْدان الأخيران أو نحو ذلك سلسلةً متوالية من الاكتشافات الرائعة حول كيفية عمل تلك الساعات. ومن أكثر الاكتشافات المذهِلة اكتشافُ أن المبحوثين الذين يُعزلون في بيئةٍ ذات إضاءةٍ مُستمرة يظلُّ بإمكانهم الحفاظُ على دورة النشاط والراحة لديهم على مدار ٢٤ ساعة تقريبًا، على الرغم من عدم وجود أيِّ إشارات خارجية. يبدو أن لدَينا ساعةً بيولوجية مدمجة في أجسامنا. تُوجَد هذه الساعة المدمجة — أو ما يمكن أن نطلق عليها «ضابطة إيقاع» الجسم أو الحاسة الخاصة بدورة اليوم — في غدة الوطاء المدفونة في الدماغ. وعلى الرغم من أن المبحوثين الذين يبقَوْن في ظروفِ إضاءةٍ مستمرَّة يُحافظون على دورة اليوم على مدار ٢٤ ساعة تقريبًا، فإن ساعتهم البيولوجية تنحرف تدريجيًّا عن الأوقات الفعلية لليوم، ومن ثم فأوقات اليقظة والنوم لديهم لن تتَزامن مع تلك الخاصة بالأشخاص الموجودين خارج الدراسة. ولكن بمجرد التعرضِ للضوء الطبيعي، فسرعان ما تُعيد ساعةُ الجسم مُعايرتَها حسَب دورةِ الضوء والظلام الفعلية في عمليةٍ تُعرف باسم «إعادة المزامنة».

تعمل البوصلة الشمسية لدى الفراشات الملكية عن طريق الربط بين ارتفاع الشمس والتوقيت، وتختلف تلك العلاقةُ باختلاف دوائرِ العرض وخطوط الطول. لا بد أن لها ساعةً بيولوجية تُعيد مُزامنة نفسِها تلقائيًّا مثل ساعتنا البيولوجية من خلال التعرُّض للضوء بحيث تعوض التوقيتات المتغيِّرة لشروق الشمس وغروبها في هجرتها الطويلة. لكن أين تُوجَد تلك الحاسةُ التي تَعرف بها الفراشاتُ الملكية دورة اليوم؟

حسبما اكتشف الزوجان أوركهارت، فإن الفراشات ليست من أسهل الحيوانات في التعامل؛ إن ذبابة الفاكهة، «الدروسوفيلا» — التي تناولناها في الفصل السابق وقُلنا إنها تشمُّ طريقها عبر متاهة — تُعد أسهلَ كثيرًا في التعامل معها داخل المختبر؛ حيث إنها تتكاثر بسرعة كبيرةٍ جدًّا ويمكن أن تتحوَّر بسهولة. ومثل الإنسان، تستطيع ذبابةُ الفاكهة أن تضبط إيقاعَ ساعتها البيولوجية حسَب دورات الضوء والظلام. في عام ١٩٩٨، وجد علماءُ الوراثة ذبابةَ فاكهة متحوِّرة لا يمكن أن يتأثر إيقاعُ ساعتها البيولوجية بالتعرُّض إلى الضوء.[2] واكتشفوا أن التحوُّر أصاب جينًا يُشفر أحد بروتينات العين ويُسمى الكريبتوكروم. ومثل سقَّالات البروتين في مركبات البناء الضوئي إذ تُجمَع جزيئات الكلوروفيل بعضها مع بعض (كما رأينا في الفصل الرابع)، يلتفُّ بروتين الكريبتوكروم حول جزيء صِبغة يُسمى «فلافين الأدنين الثنائي النكليوتيد»، الذي يمتصُّ الضوء الأزرق. ومثلما يحدث تمامًا في عملية البناء الضوئي، يطرد امتصاصُ الضوء إلكترونًا من الصبغة؛ مما يؤدي إلى توليد إشارة تنتقل إلى دماغ الحشرة للحفاظ على تزامُن ساعتها البيولوجية مع دورة الضوء والظلام اليومية. فقَدَت الذباباتُ المتحورة التي عُثر عليها عام ١٩٩٨ هذا البروتين، ومن ثَم لم تَعُد ساعات أجسامها متزامنةً مع التغيرات الدورية بين الضوء والظلام؛ لأنها فقدَت الحاسة التي تُحدِّد بها دورةَ اليوم.

بعد ذلك، اكتُشفت صبغاتُ كريبتوكروم مشابهة في عيون العديد من الحيوانات الأخرى، بما فيها الإنسان، وحتى في النباتات وميكروبات البناء الضوئي حيث تُساعد في التنبُّؤ بأفضلِ أوقات النهار المناسبة لعملية البناء الضوئي. ربما تمثل حاسَّة قديمة جدًّا لاكتشاف الضوء، وقد تطوَّرَت في الميكروبات منذ مليارات السنين، وكانت وظيفتها مُزامَنة أنشطة الخلية مع الإيقاعات النهارية.

يُوجَد الكريبتوكروم أيضًا في قرونِ استشعار الفراشات الملكية. كان هذا الاكتشاف مُحيرًا في البداية؛ ما الذي تفعله صبغةُ عين في قرون الاستشعار؟ لكن قرون الاستشعار في الحشرات أعضاء مُذهلة بحقٍّ؛ حيث إنها تضمُّ العديد من الحواس، بما في ذلك تلك الخاصة بالشمِّ والسمع واكتشاف ضغطِ الهواء وحتى الجاذبية. هل يمكن أن تضمَّ أيضًا الحاسةَ الخاصة بدورة اليوم لدى الحشرة؟ لاختبار تلك الفرضية، قام العلماء بطِلاء قرون الاستشعار لدى بعضِ الفراشات باللون الأسود بحيث يمنعونها من استقبالِ إشارات الضوء. ما اكتشَفوه هو أن الفراشات التي طُلِيَت قرونُ استشعارها باللون الأسود لم تَعُد قادرةً على إعادة مُزامنة بوصلتها الشمسية مع دورة الليل والنهار؛ لقد فقدَت

الحاسة الخاصة بدورة اليوم. إذن، بدا أن قرون الاستشعار لدى الفراشة تتضمَّن ساعتها البيولوجية. اللافتُ للنظر أن الساعة في قرون الاستشعار لدى الفراشات يمكن إعادةُ مُزامنتها عند التعرُّض للضوء حتى إنْ فُصِلَت عن باقي جسم الحشرة.

هل الكريبتوكروم مسئولٌ عن إعادة المزامنة عند التعرُّض للضوء لدى الفراشة الملكية؟ لسوء الحظِّ أن تحوير جينات الفراشات ليس سهلًا كما في ذبابة الفاكهة؛ لذا في عام ٢٠٠٨ لجأ ستيفن ريبيرت وزملاؤه من جامعة ماساتشوستس لأفضل خيار تالٍ مُتاح. استبدل الفريق بجين الكريبتوكروم المَعيب في ذبابة الفاكهة المتحورة الجينَ «الصحيَّ» من الفراشة الملكية، وأظهرَت النتائجُ استعادةَ الذبابة لقدرتها على إعادة مزامنة إيقاعاتِ ساعتها البيولوجية مع التعرُّض للضوء.[3] إذا استطاع الكريبتوكروم لدى الفراشة أن يحافظ على عمل الساعة البيولوجية لدى ذبابة الفاكهة، فمن المُرجَّح للغاية أنه يقوم بمهمةِ ضبط الساعة البيولوجية ذات الأهمية البالغة لدى الفراشة الملكية؛ ومِن ثَم يمكنها قطعُ المسافة الطويلة من تورونتو إلى المكسيك من دون أن تضلَّ الطريق.

لكن ما علاقة أيٍّ من ذلك بميكانيكا الكم؟ الإجابة لها علاقة بجانبٍ آخر من هجرة الحيوانات، وبالتحديد الحاسة التي نُسميها «الاستقبال المغناطيسي» وهي القدرة على اكتشاف المجال المغناطيسي للأرض. فكما شهدنا في الفصل الأول، كان معروفًا مدةً طويلة أنَّ العديد من المخلوقات ومنها ذبابة الفاكهة والفراشات تمتلك تلك القدرة، وأصبحَت حاسةُ الاستقبال المغناطيسي — لا سيما في طائر أبي الحناء — حديثَ الساعة في علم الأحياء الكمِّي. وبحلول عام ٢٠٠٨، بات واضحًا أن الحاسة المغناطيسية لدى طائر أبي الحناء تضمَّنَت الضوءَ (وهو أمرٌ سنتناوله بمزيدٍ من التفاصيل لاحقًا)، ولكن طبيعة مستقبِل الضوء كانت مُحيرة. تساءل ستيفن ريبيرت هل حاسة الاستقبال المغناطيسيِّ يمكن أن يدخل فيها أيضًا الكريبتوكروم الذي يُزوِّد الذباب بالحساسية تجاه الضوء التي تُساعده في إعادة مُزامنة إيقاعات الساعة البيولوجية لدَيه، أم لا. لاختبار الفرضية؛ أجرى تجرِبةً تُشبه تجربةَ اختيار القناة التي استخدمها جابرييل جيرلاك لإثبات الملاحة عبر حاسة الشمِّ لدى السمك المهرج (ارجع إلى الفصل الخامس)، التي فيها يُجبَر الحيوان الخاضع للاختبار على استخدام إشارات الحواس؛ للاختيار بين مسارَين كي يحصل على الغذاء.

وجد الباحثون أن الذباب كان يستطيع أن يتدرَّب على ربط مكافأةٍ في شكل سُكَّر بوجود المجال المغناطيسي. وعندما أُعطي الخيار أن يطير في ذراعٍ ممغنَطة أو غيرِ ممغنطة

داخلَ متاهة (من دون طعام، ومن ثم بدون إشارات شمية)، اختار المسار المُمغنَط. لذا، لا بد أن الذباب يحسُّ بالمجال المغناطيسي. السؤال هو: هل الكريبتوكروم متضمَّنٌ في ذلك؟ وجد الباحثون أن ذبابة الفاكهة المتحورة والمعدلة وراثيًّا بحيث تفقد الكريبتوكروم يتساوى عندها مَسارا المتاهة، مما يُثبت أن الكريبتوكروم ضروريٌّ من أجل الحساسية المغناطيسية لديها.

في ورقةٍ بحثية نشرها عام ٢٠١٠، أوضح فريق ريبيرت أن الذباب يُحافظ على حاسته المغناطيسية عندما يُستبدل بجين الكريبتوكروم الخاص بها الجين الذي يُشفر الكريبتوكروم في الفراشات الملكية،[4] مما يوضح أن الفراشات الملكية أيضًا يمكن أن تستخدم أيضًا الكريبتوكروم لاكتشاف المجال المغناطيسي للأرض. في الحقيقة، نشَر الفريقُ نفسه ورقةً بحثية عام ٢٠١٤ توضح أن الفراشات الملكية — مثل طائر أبي الحناء الأوروبي الذي قابلناه في الفصل الأول — تمتلك بوصلةَ مَيلٍ مغناطيسي تعتمد على الضوء، تستخدمها كي تعثرَ على طريقها من البُحيرات العُظمى إلى قمة جبل مكسيكية، ويبدو أنها موجودةٌ في قرون استشعارها وذلك كما هو متوقَّع.[5]

لكن كيف تتمكن صبغةٌ ضوء أيضًا من اكتشاف مجالٍ مغناطيسي غير مرئي؟ للإجابة عن هذا السؤال؛ يجب العودةُ إلى صديقنا أبي الحناء الأوروبي.

## بوصلة الطيور

كما أشرنا في الفصل الأول، كوكب الأرض عبارةٌ عن مغناطيسٍ ضخم له مجالٌ مغناطيسي يمتدُّ تأثيره من اللُّب الداخلي إلى مسافةِ عدة آلاف من الأميال في الفضاء. تُسمَّى هذه الفقاعة الممغنطة «الغلاف المغناطيسي»، وهي تحمي الحياةَ على الأرض، ولولاها لَتآكل الغلافُ الجوي منذ زمنٍ طويل بفعل الرياح الشمسية، وهي تيَّار من الجسيمات المحمَّلة بالطاقة والمنبعثة من الشمس. وعلى خلافِ مغناطيسية القضيب المغناطيسي العادي؛ يتغيَّر مجالُ الأرض بمرور الوقت؛ لأن أساسه كامنٌ في لُبِّ الأرض الحديدي المنصهِر. الأصل الدقيق لتلك المغناطيسية معقَّد، لكن يُعتقد أنها ناتجةٌ عما يُعرف بتأثير دينامو أرضي، وهو الذي بمُقتضاه تتولَّد تياراتٌ كهربية بفعل دوران المعادن السائلة في لبِّ الأرض؛ مما يُولِّد بدوره مجالًا مغناطيسيًّا.

لذا يعود الفضل في وجود الحياة على الأرض إلى الدرع المغناطيسي الواقي هذا. لكن لا تتوقَّفُ فائدته للكائنات الحية عند هذا الحد؛ فقد عرَف العلماء منذ ما يَزيد على قرنٍ أن

العديد من الأنواع طورت طُرقًا مبتكَرة للاستفادة منه. ومثلما استخدم البحَّارة من البشر المجالَ المغناطيسي للأرض منذ آلافِ السنين للملاحة في البحار؛ فإن العديد من مخلوقات الأرض الأخرى، ومنها الثدييَّات البحرية والبرية والطيور (مثل أبي الحناء) والحشرات، طوَّرَت حاسةً على مدار ملايين السنين لاكتشاف المجال المغناطيسي للأرض واستخدامه لأغراض الملاحة.

أقدمُ دليلٍ على تلك القدرة قدَّمه عالِمُ الحيوان الروسيُّ ألكسندر فون ميدندورف (١٨١٥–١٨٩٤) الذي سجَّل الأماكنَ والتواريخ الخاصة بوصول العديد من أنواع الطيور المهاجرة. وبناءً على هذه البيانات، رسَم عددًا من المُنحنيات على خريطةٍ سمَّاها «خطوط الوصول المتزامن». ومن هذه الخطوط التي تُبرز اتجاهات وصول الطيور، استنتج أنه يُوجَد «تقارُب عامٌّ باتجاه الشمال» تجاه القطب المغناطيسيِّ الشمالي. ولما نشَر نتائجه في خَمسينيَّات القرن التاسع عشر، اقترح أن الطيور المهاجرة تُحدِّد وجهتَها حسَب المجال المغناطيسي للأرض، وأطلق عليها اسم «بحَّارة الجو» الذين يُمكنهم الملاحةُ «على الرغم من الرياح أو الطقس أو ظُلمة الليل أو السحُب».[6]

ظلَّ معظم علماء القرن التاسع الآخرون في حالة رِيبة. ومن المُفارقات أنه حتى العلماء الذين كانوا على استعدادٍ لِقَبول الأفكار العِلمية الزائفة الأكثرِ غرابةً مثل النشاط الخارق — وقد كان هناك العديدُ من الأسماء العلمية البارزة في أواخر القرن التاسعَ عشر الذين فعَلوا ذلك — لم يستطيعوا تصديقَ أن المجالات المغناطيسية يُمكن أن تُؤثر في الحياة. ففي يوليو ١٨٨٦، على سبيل المثال، نشر عالمُ النفس والباحث النفسي الأمريكي جوزيف جاسترو رسالةً في مجلة «ساينس» بعُنوان «وجود حاسةٍ مغناطيسية». وذكر فيها التجارِبَ التي أجراها لاختبارِ ما إذا كان البشرُ يمكن أن يتأثَّروا بأيِّ مجالٍ مغناطيسي بأي حالٍ من الأحوال أم لا، ولكنه قال إنه لم يجد أيَّ حساسية تُذكر.

لكن إذا تقدَّمتَ بسرعةٍ من زمن جاسترو إلى القرن العشرين، فستقابل عملَ الفيزيائي الأمريكي هنري يجلي الذي أجرى أبحاثًا لصالح سلاح الإشارة التابع للجيش الأمريكي في أثناء الحرب العالمية الثانية. نالت مِلاحةُ الطيور اهتمامَ العسكريين لأن الحمام الزاجل كان لا يزال مُستخدَمًا في حمل الرسائل، وأمَلَ مهندسو الطيران أن يتعلَّموا من قُدراته الملاحية. ومع ذلك، لم يتوصل أحدٌ إلى كيف كانت الطيورُ تتمكن من العثور على طريقها إلى أعشاشها من دون خطأ. طرَح يجلي نظريةً تقول إن الحمام الزاجلَ يُمكنه أن يستشعر كلًّا من دوران الأرض ومَجالِها المغناطيسي. زعم أن هذا سيُكوِّن «شبَكة ملاحية» في دماغ

الطائر، مما يُعطيه إحداثياتِ خطوط الطول ودوائر العرض. وقد اختبر نظريته بتثبيتِ مَغانط صغيرةً في أجنحةِ عشَرة من الحمام الزاجل وأشرطةٍ نُحاسية غير مُمغنطة لها الوزنُ نفسُه في أجنحة عشَرة أخرى. عرَفَت ثماني حمامات من تلك المُثبَّت في أجنحتها أشرطة نحاسية طريقَها إلى أعشاشها، ولكن لم يصل إلى العُش سوى حمامةٍ واحدة من تلك المُثبَّت في أجنحتها المغانط. استنتج يجلي أنَّ الطيور تستخدِم حاسةً مِلاحية مغناطيسية في الملاحة، والتي يُمكن التشويشُ عليها بأشرطةٍ مغناطيسية.[7]

وعلى الرغم من أن النتائج التجريبية التي توصَّل إليها يجلي رُفِضَت في البداية باعتبار أنها بعيدةُ الاحتمال، فقد أثبتَ العديدُ من الباحثين منذ ذلك الوقت بما لا يدعُ مجالًا للشك أن مجموعةً كبيرة من الحيوانات لديها حساسيةٌ فطرية تجاه المجال المغناطيسي للأرض، مما يمنحها إحساسًا دقيقًا بالاتجاهات. السلاحف البحرية على سبيل المثال قادرةٌ على أن ترجع إلى شاطئِ تكاثُرِها الذي يبعد آلافَ الكيلومترات عن أراضي غِذائها في المحيط من دون أن تكون هناك أيُّ علامات مرجعية مرئيَّة، وقد أثبت الباحثون أن حاستها الملاحية تختلُّ إذا ثُبِّتَت مغانطُ قوية في رأسها. وفي عام ١٩٩٧، نشر فريقٌ من جامعة أوكلاند في نيوزيلندا بحثًا في مجلة «نيتشر» يقترحون فيه أن أسماك السلمون المرقَّط القزحي تَستخدِمُ خلايا مُستقبِلات مغناطيسية تُوجَد في أنوفها.[8] وإذا ثبتَت صحةُ هذا، فسيكون أولَ مثالٍ على الأنواع القادرة على «شم» اتجاهِ المجال المغناطيسي للأرض! تَستخدِم الميكروبات المجالَ المغناطيسي للأرض كي يُساعدها في الملاحة عبر المياه العكرة، وحتى الكائنات الحية التي لا تُهاجر مثل النباتات يبدو أنها تمتلكُ حاسةَ استقبال مغناطيسي.

لم يَعُد هناك شكٌّ في أن الحيوانات لديها القدرةُ على اكتشاف المجال المغناطيسي للأرض. يكمن اللغزُ في طريقة اكتشافها له، لا سيَّما أن المجال المغناطيسي للأرض ضعيفٌ إلى أقصى حدٍّ ولا يُتوقَّع في الغالب أن يؤثر في أيِّ تفاعلات كيميائية في الجسم. هناك نظريتان أساسيتان، ويُحتمل أن كِلتيهما تنطبقان على أنواع الحيوانات المختلفة. النظرية الأولى ترى أن الحاسةَ تعمل مثل البوصلة المغناطيسية التقليدية، في حينِ ترى الأخرى أن حاسةَ الاستقبال المغناطيسي توفِّرها بوصلةٌ كيميائية.

إن تلك النظرية الأولى التي ترى بوجودِ آليةٍ من آليات البوصلة التقليدية في مكانٍ ما في جسم الحيوان تعزَّزَت باكتشاف بِلَّورات صغيرة من المجنيتيت — وهو أكسيد الحديد المغناطيسي الطبيعي — في العديد من الحيوانات والميكروبات التي بدا أنها تمتلكُ حاسةً مغناطيسية. على سبيل المثال، البكتيريا التي تستخدِم حاسةً مغناطيسية لتوجيهِ نفسها

في الرواسب البحرية الطينيَّة غالبًا ما تكون ممتلئةً ببلورات من المجنيتيت تُشبه الرصاصة في الشكل.

بحلول أواخِر سبعينيَّات القرن العشرين، اكتُشف المجنيتيت في أجسام عدة أنواعٍ من الحيوانات، معروف أنها تقوم بالملاحة بمساعدة المجال المغناطيسي للأرض. الجدير بالذكر أنه بدا أن المجنيتيت موجودٌ داخل الخلايا العصبية في الجزء العُلوي من المنقار لأشهر ملَّاحي الطيور وهو الحمام الزاجل،[9] ما يجعلنا نقترح أن خلاياه العصبية كانت تستجيب للإشارات المغناطيسية التي تلتقطها بلورات المجنيتيت ثم تُرسل إشارةً إلى دماغه. أظهر بحثٌ أحدثُ أن الحمام لم يتعرَّف على الاتجاهات وفقَد قُدرَتَه على تتبُّع المجال المغناطيسي للأرض عندما ثُبِّتَت مغانطُ صغيرةٌ في الجزء العلوي من منقارها، حيث تُوجَد على ما يبدو الخلايا العصبية الممتلئة بالمجنيتيت هذه.[10] بدا أنه حُدِّد أخيرًا أصلُ حاسة الاستقبال المغناطيسي.

ومع ذلك، رجَعنا إلى نقطة البداية من جديد في عام ٢٠١٢ حينما نُشرت ورقة بحثية جديدة في مجلة «نيتشر» تصفُ دراسةً مفصَّلة ثلاثية الأبعاد لِمنقار الحمام الزاجل باستخدام التصوير بالرنين المغناطيسي، وقد خلَصَت إلى أن تلك الخلايا التي تحتوي على المجنيتيت في منقار الحمام تكاد لا تكون لها أيُّ علاقة بالاستقبال المغناطيسي على الإطلاق، بل كانت في الواقع خلايا غنيةً بالحديد تُسمى الخلايا البلعمية الكبيرة المعنيَّة بالمناعة ضد مُسببات الأمراض، وليس — حسبما كان معروفًا — الإدراك الحسي.[11]

هنا، يجب علينا أن نعود أدراجَنا إلى عالم الطيور الألماني الرائع فولفجانج فيلتشكو، الذي التقينا به أولَ مرة في الفصل الأول. بدأ اهتمام فيلتشكو بملاحة الطيور عام ١٩٥٨ حينما انضمَّ إلى مجموعةٍ بحثية في فرانكفورت يُديرها عالم الطيور فريتس ميركل. كان ميركل أحدَ العلماء القلائل حينذاك الذين يَدرُسون الحاسةَ المغناطيسية لدى الحيوانات. أحد طلَّابه، وهو هانس فروما، كان قد أثبتَ بالفعل أن بعض الطيور يمكن أن توجِّه نفسَها داخل غرفٍ مغلقة ليس لها معالم، مما يوضِّح أن قدرتها الملاحية لا تعتمد على الإشارات البصرية. اقترح فروما آليَّتَين محتملتَين؛ وهما إما أن الطيور تستقبل شيئًا يُشبه الإشارات اللاسلكية من النجوم، أو أنها تستطيع الإحساسَ بالمجال المغناطيسي للأرض. ظن فولفجانج فيلتشكو أن الآلية الثانية هي الآليةُ الصحيحة.

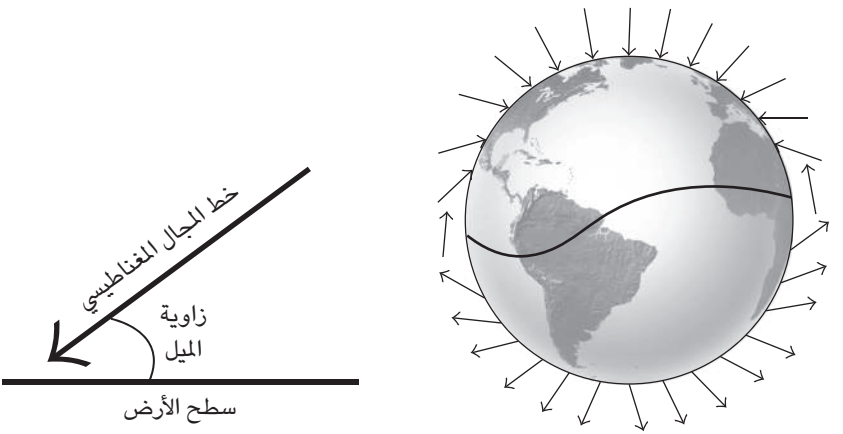
في خريف عام ١٩٦٣، بدأ فيلتشكو يقوم بتجارِبَ على طائر أبي الحناء الأوروبي، الذي لعلك تتذكر أنَّ من عاداته الهجرةَ من شمال أوروبا إلى شمال أفريقيا. اصطاد عددًا

من طيورِ أبي الحناء وهي في طريقِ هجرتها ووضَعها داخل غرفٍ محمية مِغناطيسيًّا ثم عرَّضها لمجالٍ مغناطيسي اصطناعيٍّ ثابت ضعيف يتولَّد من جهازٍ يُسمَّى ملف هلمهولتس الذي يُمكِنه أن يحاكيَ المجالَ المغناطيسي للأرض، ولكن يمكن تغييرُ قوَّته واتجاهه. اكتشف أن الطيور التي اصطِيدت في أثناء الهجرة في الخريف أو الربيع أصبحَت مضطربةً وأخذَت تتجمَّع عند جانب الغرفة الذي يتطابق مع اتجاه هجرتها بالنسبة إلى المجال الاصطناعي. وبعد عامَين من الجهود المُضنية، نشر نتائجه عام ١٩٦٥، التي أثبتَت أن الطيور كانت حساسةً لاتجاه المجال المُطبَّق، ومِن ثَم استخلص أنها يمكن أن تكتشف المجال المغناطيسي للأرض بالطريقة نفسِها.

أَضْفَت هذه التجارِبُ قدرًا من الاحترام على فكرة الاستقبال المغناطيسي لدى الطيور وحفزَت إجراءَ المزيد من الأبحاث. ولكن في ذلك الوقت لم يكن لدى أحدٍ أدنى فكرةٍ عن طريقة عمل هذه الحاسة؛ أي: كيف يمكن أن يؤثِّر المجالُ المغناطيسي الضعيف للغاية للأرض في أجسام الحيوانات. لم يستطع العلماء حتى الاتفاقَ على المكان الذي يُوجَد فيه العضو المسئول عن حاسة الاستقبال المغناطيسيِّ في جسم الحيوان. وحتى بعد اكتشاف بلورات المجنيتيت في العديد من أنواع الحيوانات؛ مما يَعني ضِمنًا أنه تُوجَد آليةٌ بوصلةٍ مغناطيسية تقليدية، ظلَّت القدرة الملاحية لدى طائر أبي الحناء لغزًا؛ لأنه لم يُكتشَف مجنيتيت في جسم الطائر. أظهرَت الحاسة لدى أبي الحناء أيضًا العديدَ من السِّمات المُحيرة التي لا تتناسب مع البوصلة المغناطيسية، لا سيما أن الطائر يفقد تلك القدرة عندما تُعصَب عيناه، مما يدل على أن الطائر يحتاج إلى «رؤية» المجال المغناطيسي للأرض. لكن كيف لأيِّ حيوانٍ أن «يرى» مجالًا مغناطيسيًّا؟

وفي عام ١٩٧٢، اكتشف الزوجان فيلتشكو (إذ حينها كوَّن فولفجانج فريقًا مع زوجته روزفيتا) أنَّ بوصلة أبي الحناء كانت تختلف عن أيِّ بوصلةٍ سبَقَت دراستُها. تحتوي البوصلة العادية على إبرةٍ مُمغنَطة، ينجذب أحدُ طرفَيها (قُطبُها الجنوبي) نحو القطب المغناطيسي الشمالي للأرض، بينما يُشير الطرَف الآخر إلى القطب الجنوبي. لكنَّ هناك نوعًا مختلفًا من البوصلات لا يُميز بين القطبَين المِغناطيسيين. لعلك تتذكَّر من الفصل الأول أن هذه البوصلة تُسمى «بوصلة الميل المغناطيسي»، والتي تُشير إلى أقربِ قُطب، ومن ثَم لا تُعطيك معلوماتٍ غير أنك تتَّجه نحو ذلك القطب أو تبتعد عنه، سواءٌ أكان الشماليَّ أو الجنوبي. ومن طرقِ توفير هذا النوع من المعلومات قياسُ زاوية خطوط المجال المغناطيسي للأرض بالنسبة إلى سطح الأرض (انظر الشكل ٦-١). تكون زاوية

الميل تلك (التي اشتُقَّ منها اسم البوصلة) شِبهَ رأسية (أي: تشير إلى الأرض) وقريبةً من القطبين، ولكنها تتوازى مع الأرض عند خطِّ الاستواء. وفيما بين خطِّ الاستواء والقُطبَين، خطوط المجال المغناطيسي تدخل إلى الأرض بزاويةٍ أقلَّ من ٩٠ درجة وتشير تلك الزاوية إلى أقربِ قطب. ومن ثم؛ فأيُّ جهاز يقيس تلك الزاويةَ يمكن أن يكون بمنزلة بوصلةِ ميل مغناطيسي، ويوفِّر معلومات عن الاتجاه.




شكل ٦-١: خطوط المجال المغناطيسي للأرض وزاوية الميل.

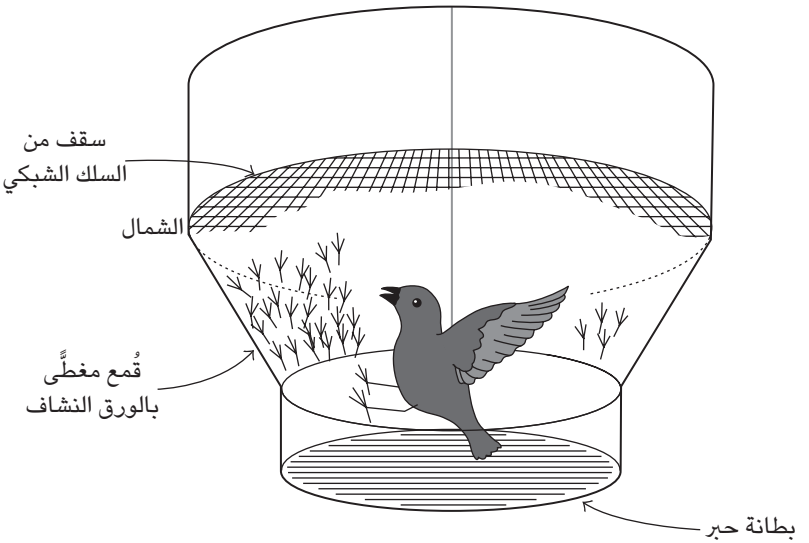
في تجارِب الزوجَين فيلتشكو عام ١٩٧٢، حبسا الطيور محل التجربة في غرفةٍ محمية وعرَّضاها لمجالٍ مغناطيسي اصطناعي. لم يتأثر سلوكُ الطيور بعكس اتجاهَي قُطبَي المجال بلفِّ المغناطيس بمقدار ١٨٠ درجة؛ مما يعني أن الطيور تُوجِّه نفسَها حسَب أقربِ قُطب مغناطيسي أيًّا كان، ومن ثم فهي لا تمتلك بوصلةً مغناطيسية تقليدية. أثبتَت تلك الورقةُ البحثية التي ظهرَت عام ١٩٧٢ أن المستقبِل المغناطيسي لدى طائر أبي الحناء عبارةٌ في واقع الأمر عن بوصلةِ ميلٍ مغناطيسي. ولكن طريقة عمل تلك البوصلة ظلَّت لغزًا.

ثُم في عام ١٩٧٤، وُجِّهت دعوةٌ إلى كلٍّ من فولفجانج وروزفيتا للقيام بدراسةٍ في جامعة كورنيل بالولايات المتحدة من خبيرِ هجرة الطيور الأمريكي ستيف إملن. في

ستينيَّات القرن العشرين، طوَّر إملن مع والده جون — الذي كان عالِمَ طيور معروفًا هو الآخَر — غرفةَ طيور خاصةً عُرِفَت بعد ذلك باسم قُمع إملن.[1] تتَّخذ الغرفة شكلَ المخروط المقلوب، وتحتوي في أسفلها على بطانةِ حبرٍ وورق نشَّاف على الجوانب الداخلية المنحدِرة (انظر الشكل ٦-٢). وعندما يقفز الطائر أو يُرفرف على الجدران المنحدرة، فإنه يترك آثارَ أقدامٍ دالةً تُعطي معلوماتٍ عن الاتجاه المفضَّل الذي سيقصده الطائرُ إذا تمكَّن من الهرب. نوع الطيور الذي درسه الزوجان فيلتشكو في جامعة كورنيل كان هو طيورَ الدُّرسة النيلية، وهي طيور مغرِّدة صغيرة موطنها أمريكا الشمالية، تُهاجر مستخدِمةً بوصلةً داخلية من نوعٍ ما مثل طيور أبي الحناء الأوروبي. نُشرت دراستهما التي استمرَّت عامًا عن سلوك هذا الطائر داخل قُمع إملن عام ١٩٧٦،[12] وأثبتَت بما لا يدعُ مجالًا للشك أن طيور الدُّرسة النيلية — مثل طيور أبي الحناء — قادرةٌ على اكتشاف المجال المغناطيسي للأرض. اعتبر فولفجانج فيلتشكو نشْرَ هذه الورقة البحثية الأولى الخاصة بجامعة كورنيل لحظةً فارقة بالنسبة إلى الفريق؛ حيث إنها أثبتَت بما لا يدعُ مجالًا للشك أن الطيور المهاجرة مخلوقةٌ ببوصلة مغناطيسية، ولفَتَت انتباهَ العديد من رُوَّاد علماء الطيور على مستوى العالم.

بالطبع لم يكن لدى أحدٍ في سبعينيَّات القرن العشرين فكرةٌ عن طريقة عمل البوصلة المغناطيسية الحيوية. لكن كما رأينا في الفصل الأول، ففي العام نفسِه الذي نشر فيه كلٌّ من الزوجَين فيلتشكو وستيفن إملن ورقتَه البحثية، اقترح عالم الكيمياء الألماني كلاوس شولتن آلية ميكانيكية تربط الضوء بالاستقبال المغناطيسي. كان شولتن قد حصل مؤخرًا على درجة الدكتوراه من جامعة هارفارد في الفيزياء الكيميائية ثم عاد إلى أوروبا، حيث حصل على وظيفةٍ في معهد ماكس بلانك للكيمياء الفيزيائية الحيوية بجوتنجن. وهناك أصبح مهتمًّا باحتمالية التشابك الكمِّي للإلكترونات المتولدة في تفاعل الحالة الثلاثية السريع عن طريق التعرُّض للضَّوء. اقترحت حساباته أنه إذا كان التشابك ضالعًا حقًّا في التفاعلات الكيميائية، فلا بد أن تتأثَّر سرعةُ هذه التفاعلات بمجالٍ مغناطيسي خارجي، وقد اقترح طريقةً لإثبات تلك النظرية.

لما تحدَّث شولتن بحُريةٍ عن فكرته، اكتسب سُمعة في معهد ماكس بلانك بأنه يُعتبر مجنونًا نوعًا ما. كانت مشكلته أنه مُنظِّر فيزيائي وتعامُله مع الورق والقلم وأجهزة الكمبيوتر، وأنه ليس عالِمَ كيمياء؛ وبالتأكيد هو ليس عالمَ كيمياء تجريبيًّا قادرًا على ارتداء معطف المختبر وإجراءِ نوع التجرِبة التي ستُثبت أفكاره. ومن ثم كان من ضمن




شكل ٦-٢: غرفة قُمع إملن.

العديد من المُنظِّرين ممن يتوصَّلون إلى فكرةٍ ذكية ولكن يكون عليهم بعد ذلك العثورُ على اختصاصيٍّ تجاربَ وَدودٍ يرغب في أن يقتطع من وقت جدولِ عمله المختبري المزدحِم؛ لاختبار نظريةٍ عادةً ما يثبت أنها خاطئة. شولتن لم يُحالفه الحظ في إقناع أي عالم كيمياء زميلٍ بأن يَختبر فكرته؛ لأنه لم يعتقد أيٌّ منهم بأن تجربته المقترَحة لديها أيُّ فرصة في النجاح.

اكتشف شولتن أن مصدر كلِّ هذا التشكيك هو مديرُ مختبر المعهد هوبرت شتيرك. في النهاية، استجمع شجاعته وواجهَ شتيرك في مكتبه وهناك عرَف أخيرًا سببَ تشكُّكه المترسِّخ هذا؛ وهو أن شتيرك سبق أن أجرى التجرِبة ووجد أنه لا يُوجَد تأثيرٌ للمجالات المغناطيسية. صُعق شولتن. بدا أن فرضيته ستُواجه المصيرَ الذي ذكَره عالمُ الأحياء التطوُّري توماس هكسلي، المتمثلَ في أنها «نظرية جميلة ... ولكن أماتَتْها حقيقةٌ قبيحة».

اغتمَّ شولتن ولكنه شكَر شتيرك على تنفيذ التجرِبة، ولما كاد أن يخرج من المكتب استدار وطلب أن يرى تلك البيانات المحبِطة. عندما أراه شتيرك الملف، ابتهج شولتن فجأة. لاحظ شيئًا غاب عن شتيرك؛ إنها لمحةٌ صغيرة، لكنها مهمة في البيانات، كان قد

توقَّعَها شولتن على نحوٍ صحيح. قال متذكرًا إنها «كانت تمامًا ما توقَّعتُه؛ ولذا كنتُ سعيدًا أنني رأيتُها. لقد تحولَت الكارثة إلى لحظةٍ سعيدة؛ لأنني عرَفت ما ينبغي أن أبحث عنه. ولكنه لم يعرفه.»[13]

بدأ شولتن من فوره يكتب ما كان متأكدًا أنه سيكون ورقةً بحثية رائدة، ولكن سرعان ما واجهَته صدمةٌ أخرى. لما كان يتشارك شرابًا في مؤتمر مع زميلةٍ اسمها ماريا-إليزابيث ميشيل-بايرل من جامعة ميونخ التقنية، اكتشف أنها نفَّذَت التجرِبة نفسَها تمامًا. هذا الموقف وضع شولتن في مأزقٍ أخلاقي. فيُمكنه الكشف عن اكتشافه وربما يُحفز ذلك ميشيل-بايرل أن تُسرع في العودة إلى ميونخ لكتابة ورقتها البحثية؛ ومِن ثم يمكن أن تسبقَه في النشر، أو يُمكنه أن يودِّعَها ويُسرع في عودته إلى جوتنجن لكتابة النتائج التي توصل إليها. لكن إذا هرب من دون أن يقول شيئًا ثم نشر نتائجه قبلها، فربما تتَّهمُه فيما بعد أنه سرَق فكرتها. تذكَّر الأفكار التي راوَدَته حينها قائلًا: «إذا لم أخبرها بما أعرفه، فقد تقول إنني ذهبتُ إلى المنزل كي أُجرِيَ التجرِبة.»[14] في النهاية، اعترف شولتن لميشيل-بايرل بأنه نفذ عملًا مشابهًا. بقي العالِمان حتى نهاية المؤتمر ثم عادا إلى منزليهما ليكتب كلٌّ واحد ورقته البحثية (حيث نجح شولتن في نشر ورقته قبل ميشيل-بايرل بقليل) التي تصفُ كلٌّ منها الاكتشافَ المتمثل في أن خاصية التشابك الكمي الغريبةَ يُمكن حقًّا أن تؤثر في التفاعلات الكيميائية.

اقترحَت الورقة البحثية التي نشرها شولتن عام ١٩٧٦[15] أن التشابك الكميَّ كان مسئولًا عن سرعة تفاعلات الحالة الثلاثية السريعة الغريبة التي دُرِسَت في مختبر ماكس بلانك، ولكن ورقته البحثية المبتكَرة قدَّمَت أيضًا بياناتِ شتيرك التجريبية التي أوضحَت أن التفاعل الكيميائي كان حساسًا تجاه المجالات المغناطيسية. بتوافر نتائجِ ورقتَين بحثيتَين رائدتَين «في الجعبة»، كان سيُقنع العديدَ من العلماء، ولكن لما لم يبلغ شولتن الثلاثين بعد، فكان لا يزال يمتلك حماسَ الشباب وكان على استعدادٍ أن يتطلَّع إلى ما هو أكثر. وبالاطلاع على عمل الزوجين فيلتشكو بشأنِ هجرة طائر أبي الحناء ومشكلة العثور على آليةٍ كيميائية معتبَرة للبوصلة الحيوية، أدرك أن الإلكترونات الدوَّارةَ الخاصة به يمكن أن توفِّر تلك الآلية؛ ومن ثم كتب ورقةً بحثية عام ١٩٧٨ اقترح فيها أن البوصلة لدى الطيور تعتمد على آليَّةِ الأزواج الجذرية ذات التشابك الكمِّي.

وقتَئذٍ، لم يأخذ أحدٌ تقريبًا تلك الفكرة على محمل الجد. إذ اعتبر زملاءُ شولتن في معهد ماكس بلانك أنها مجردُ فكرة أخرى من أفكاره المجنونة، وكذلك لم يتأثر

على نحوٍ مماثل مُحرِّرو مجلة «ساينس» وهي المجلة العلمية المرموقة التي أرسل إليها ورقتَه البحثية في البداية؛ إذ كتبوا إليه: «أيُّ عالم عنده ذرةُ جُرأة سيرمي هذه الفكرة في سلة المهملات».[16] وقد وصف شولتن ردَّ فعله حينها قائلًا: «لقد شحَذتُ عقلي وقلتُ في نفسي: «هذه الفكرة إما أنها فكرةٌ عظيمة أو حمقاءُ تمامًا.» وقد قرَّرتُ أنها فكرةٌ عظيمة ونشرتها على وجه السرعة في مجلةٍ ألمانية!»[17] ولكن في ذلك الوقت، معظم العلماء الذين سمعوا عن نظرية شولتن القائمةِ على التكهُّنات، هذا إن كان قد سمع بها أحد، نبَذوا تلك النظرية واعتبروها من التفسيرات العلمية الزائفة وغير الواقعية للاستقبال المغناطيسي.

قبل أن نرى كيف قد تُساعد جهود شولتن والزوجَين فيلتشكو في تفسير الطريقة التي تجدُ بها الطيورُ طريقها حول العالم، ينبغي أن نعود إلى العالَمِ الكميِّ الغامض، ونُلقيَ نظرة متعمقة على ظاهرة التشابك التي ذكَرناها باقتضابٍ في الفصل الأول من هذا الكتاب. لعلك تتذكر أن التشابُكَ ظاهرةٌ بالغةُ الغرابة، لدرجة أنه حتى أينشتاين أصرَّ على عدم إمكانية صحتها. لكن في البداية، يجب أن تتعرف على خاصيةٍ أخرى غريبة في العالم الكمي؛ ألا وهي «الدوران».

## الدوَران الكمي والفعل الطيفي

تستخدم العديد من كتب تبسيط العلوم التي عن ميكانيكا الكم مصطلحَ «الدوران الكمي» لتسليط الضوء على غرابة العالم دون الذرِّي. لم نختَر القيامَ بذلك هنا ببساطةٍ لأنه ربما الفكرةُ البعيدة كلَّ البعد عن أي شيء يمكن تصوُّرُها باستخدام اللغة العادية. لكن لا يمكننا أن نؤجِّل المهمة أكثرَ من ذلك؛ لذا لننطلِقْ إذن.

مثلما تدور الأرض حول محورها وهي تدور في مَدارها حول الشمس، فكذلك الإلكترونات والجسيمات الأخرى دون الذرِّية تمتلك تلك الخاصيةَ التي تُسمى «الدوران» وهي تختلف عن حركتها العادية. لكن، وكما أشرنا في الفصل الأول، هذا «الدوران الكمي» يختلف عن أيِّ شيء يُمكننا أن نتصوَّرَه بِناءً على تجرِبتنا اليومية مع دوران الأجسام مثل كُرات التنس أو الكواكب. في البداية، ليس من المنطقيِّ حقًّا أن نتحدث عن سرعة دوران الإلكترونات؛ حيث إن دورانها لا يمكن أن يأخذ سوى قيمةٍ من قيمتَين محتملتَين؛ إنه مُكمم، كما أن الطاقة مُكممة على المستوى الكمي. ليس بإمكان الإلكترونات أن تدور، بالمعنى العام للكلمة، إلا باتجاه عقارب الساعة أو عكس اتجاه عقارب الساعة، وهو ما يُقابل ما يُشار إليه عادةً بحالة الدوران «لأعلى» أو حالة الدوران «لأسفل». ولأن هذا

هو العالم الكمي؛ فالإلكترون يمكن أن «يدور في الاتجاهَين في آنٍ واحد» عندما لا يكون مرصودًا. نقول إن حالة دورانه تعدُّ تراكبًا (بمعنى مزيجٍ أو خليط) من حالتَي الدوران لأعلى وأسفل. على نحوٍ ما، قد يبدو هذا حتى أغربَ من قولِ إن الإلكترون يمكن أن يكون في موقعَين في آنٍ واحد؛ إذ كيف لإلكترون واحد أن يدور باتجاه عقارب الساعة وعكس عقارب الساعة في آنٍ واحد؟

وللتأكيد على مدى مُنافاة فكرة الدوران الكميِّ هذه للعقل، فإن ما نعتبره دورانًا بمقدار ٣٦٠ درجة لن يُعيد الإلكترون إلى حالته الأصلية؛ فلكي يعودَ إلى حالته الأصلية، ينبغي أن يدور دورتَين كاملتَين. يبدو هذا غريبًا لأننا لا نزال نميل للتفكير في الإلكترون وكأنه كرةٌ صغيرة، ربما شيء يُشبه كرة تنس صغيرة للغاية. لكن كرات التنس تُوجَد في العالم المشهود، والإلكترونات تعيش في عالمٍ كمِّي دون ذري، وفيه تختلف القواعد. في الحقيقة، الإلكترونات «ليست» كراتٍ صغيرةً فحسب، بل لا يمكن القول حتى إن لها حجمًا على الإطلاق. إذن، في حين أن الدوران الكمي «حقيقي» مثل دوران كرة التنس، فهو ليس له نظيرٌ في العالم الواقعي المألوف، ولا يمكن تصوُّرُه.

ومع ذلك، لا تعتقد إذن أن هذا مجردُ مفهوم رياضي مجرد، لا يُوجَد إلا في المراجع ومحاضرات الفيزياء الصعبة الفهم. كلُّ إلكترون في جسم الإنسان — وفي كل مكان في الكون — يدور بتلك الطريقة الغريبة. في الحقيقة، إن لم يكن يدور بتلك الطريقة، لَمَا وُجد العالم كما نعرفه، بما في ذلك الإنسان؛ لأن الدوران الكمي له دورٌ رئيسي في واحدةٍ من أهم الأفكار في العلم، والتي تتمثَّل في مبدأ باولي للاستبعاد الذي يُعد أساسَ الكيمياء بأسرها.

من تبعاتِ مبدأ باولي للاستبعاد أنه إذا اقترن إلكترونان في ذرةٍ أو جُزيء وكان لهما الطاقة نفسُها (تذكَّر من الفصل الثالث أن الروابط الكيميائية التي تربط الجزيئات معًا تتكوَّن من إلكتروناتٍ مشتركة بين الذرات)، فلا بدَّ أن يكون لكلٍّ منهما دورانٌ معاكس. يُمكننا إذن التفكيرُ في دورانهما على أنه يُلغي كلٌّ منهما الآخَر، ونُشير إليهما على أنهما في «حالةِ دوران منفردة»؛ حيث يمكنهما أن يستقرَّا في حالةٍ واحدة فقط. هذه هي الحالة الطبيعية لأزواج الإلكترونات في الذرَّات ومعظم الجزيئات. لكن عند عدم اقتران أحدِ الإلكترونين مع الآخَر في مستوى طاقةٍ واحد، فإنهما يمكن أن يَدورا في الاتجاه نفسِه، وتُسمى هذه الحالة «حالة دوران ثلاثية»،[٢] كما حدث في التفاعل الذي درسه شولتن.[٣]

ربما تكون على درايةٍ بالمزاعم المشكوكِ فيها بشدة، التي تقول بأن التوءمَين المتطابقَين قادران على أن يشعر كلٌّ منهما بالحالات العاطفية لدى الآخر، عندما تفصل بينهما مسافاتٌ شاسعة. تقول الفكرة إن التوءمان بنحوٍ أو بآخرَ مرتبطان نفسيًّا على نحوٍ لم يفهمه العلمُ بعد. أُطلقت مزاعمُ مماثلةٌ لتشرح كيف يحسُّ الكلب على ما يبدو بقدوم صاحبه إلى المنزل. ينبغي التوضيحُ أن هذين المثالين ليس لهما أيُّ أساس علمي، على الرغم من أن البعض حاول مخطئًا أن ينسبَهما إلى أساسٍ ميكانيكي كمي. لكن على الرغم من أن هذا «الفعل اللحظيَّ الذي يجري عن بُعد» (كما يُوصَف في كثير من الأحيان) غيرُ موجودٍ في عالمنا الكلاسيكي اليومي؛ فإنه سِمةٌ أساسية في العالم الكمِّي. الاسم الاصطلاحي له هو «اللاموضعية» أو «التشابك»، ويشير إلى فكرةِ أن شيئًا ما يحدث في «مكانٍ ما» يمكن أن يكون له تأثيرٌ «آنيٌّ» في «مكانٍ آخَر» مهما كانت المسافة بين المكانين.

لنضرب مثالًا بزوجَين من أحجار النرد. يسهل حسابُ الاحتمال الرياضي لظهور الرقم نفسِه عند إلقاء النردَين. فأيًّا ما كان الرقم الذي يستقرُّ عليه أحدُ النردين، فهناك فرصةٌ واحدة من ستٍّ فرص أن يستقرَّ النرد الآخَر على الرقم نفسِه. على سبيل المثال، احتمالية أن يستقر النرد الأول على الرقم ٤ تساوي ١ / ٦، وفرص أن يستقر النردُ الثاني على الرقم ٤ تساوي واحدًا على ستٍّ وثلاثين (حيث إن ١ / ٦ × ١ / ٦ = ١ / ٣٦). إذن، ففرصُ ظهور الرقم نفسِه عند إلقاء نرْدَين تساوي بالطبع واحدًا إلى ستة. وبضرب ١ / ٦ في ١ / ٦ عشر مرات، فما أسهلَ حسابَ أن احتمالية ظهور الرقم نفسِه عشْرَ مرات على التوالي (بغضِّ النظر عن الرقم، مثل ظهور الرقم ٤ مرتين ثم الرقم ١ مرتين وهكذا)؛ تساوي تقريبًا واحدًا إلى ٦٠ مليونًا! هذا يعني أنه إذا رمى كلُّ شخصٍ في بريطانيا حجَرَي النرد عشر مرات على التوالي، فمن الناحية الإحصائية، لن يستقرَّ الحجران على الرقمين ذاتِهما في كل مرة، إلا تقريبًا لرجلٍ واحد.

لكن تخيَّلْ أنه قُدم لك حجَرا نردٍ يستقران دومًا على الرقم نفسِه عند رميِهما معًا. الرقم الفعلي الذي يستقرُّ عليه النردان يبدو أنه عشوائي، وعادةً ما يتغير مع كلِّ رمية، ولكن دائمًا ما ينتهي الأمر برميِ النردين على الرقم نفسه. لا ريب أنك ستفترض وجودَ خدعةٍ ما. هل يمكن أن يحتويَ هذان النردان على آليةٍ داخلية معقَّدة تتحكم في حركتهما، بحيث يستقرَّان على أرقامٍ بتسلسُلٍ مُبرمَج واحد؟ لاختبار تلك النظرية، ارمِ أحد النردَين ثم ارمِ الآخَر، ولكن بعدها ارمِ النردَين معًا. الآن، سيختلُّ أي تسلسل مبرمَج، ومن ثم

يجب أن تبطل الخدعة. لكن على الرغم من تلك الحيلة، يستمرُّ النردان في الاستقرار على الرقم ذاتِه.

تفسيرٌ آخر مُحتمل؛ وهو أن النرد لا بد أنه قادرٌ على نحوٍ ما على إعادة المزامنة قبل كلِّ رمية عن طريقِ تبادل إشارةٍ عن بُعد. وعلى الرغم أن هذه الآلية تبدو معقدةً بعض الشيء، فهي على الأقل ممكنةٌ من حيث المبدأ. لكن أي آليةٍ كتلك ستكون عُرضةً لتقييدٍ فرضَتْه نظريةُ أينشتاين الخاصة بالنسبية، التي بمقتضاها لا تُوجَد إشارةٌ يمكن أن تنتقل على نحوٍ أسرع من سرعة الضوء. وهذا يوفر وسيلةً لاختبار هل هناك إشارة تمرُّ بين النردَين أم لا؛ كلُّ ما عليك فعله هو الحرص على التباعُد الكافي بين النردَين بحيث لا يُوجَد وقتٌ كافٍ لتبادل أيِّ إشارة مزامنة فيما بين الرميات. لنتخيل أنك حاولتَ الحيلة نفسَها كما هو موضَّح مسبقًا، ولكن بطريقةٍ ما رتبتَ أن يقع نردٌ على الأرض ونرد آخرُ على المريخِ في اللحظة نفسِها. حتى عندما يكون المريخ في أقربِ مسافة من الأرض، يستغرق الضوء أربعَ دقائق حتى يقطع المسافة بين الكوكبَين، ومن ثم تعلم أن أيَّ إشارة مزامنة يجب أن تُكابد التأخيرَ نفسه. للتغلُّب على ذلك؛ ما عليك سوى الترتيب لرمي النردين على أوقاتٍ متواترةٍ أكثرَ من ذلك. ينبغي أن يمنع هذا الإجراءُ مزامنةَ الإشارة بين رميات النردَين. إذا استمر النَّردان في الوقوع على الرقْمَين نفسِهما، فعندئذٍ سيبدو أن بينهما صلةً حميميَّة تتجاهل تقييدَ أينشتاين الشهير.

على الرغم من عدم تنفيذ التجربة السابقة بإلقاء نردَين على كوكبَين مختلفين، فقد نُفِّذت تَجاربُ مماثلةٌ باستخدام جسيماتٍ ذاتِ تشابك كمي على الأرض، وأظهرت النتائج أن الجسيمات المنفصلةَ يمكن أن تُنفذ الخدعةَ نفسَها التي تخيَّلناها بالنسبة إلى النردين؛ أي: يمكن أن تبقى حالتهما مترابطةً بغضِّ النظر عن المسافة بينهما. يبدو أن هذه السمة الغريبة في العالم الكمي لا تحترم حدَّ السرعة الكونية الذي وضعه أينشتاين، حيث إن الجسيم الموجود في مكانٍ ما يمكن أن يؤثِّر في جسيم آخَر «في اللحظة نفسها» مهما كانت المسافة بينهما. إن مصطلح «التشابك» الذي يصف هذه الظاهرةَ صاغه شرودنجر الذي لم يكن — إلى جانب أينشتاين — من المعجَبين بالفكرةِ التي صاغها أينشتاين وأطلق عليها اسمَ «الفعل الطيفي عن بُعد». ولكن على الرغم من تشكُّكِهما، فقد ثبَتَ التشابكُ الكمي في العديد من التجارِب، وأصبح واحدًا من أهم الأفكار في ميكانيكا الكم؛ حيث إن له تطبيقاتٍ وأمثلةً عديدة في الفيزياء والكيمياء، وربما في علم الأحياء كذلك، وذلك كما سنرى.

لِفَهم كيف أن التشابك الكمِّي له دورٌ في علم الأحياء؛ ينبغي أن نجمع بين فكرتَين. الفكرة الأولى هي الاتصال الآنيُّ بين جُسيمَين بينهما مسافة؛ أي: التشابك. الفكرة الثانية هي قدرة جُسيم كميٍّ واحد على أن يتراكب بين حالتَين مختلفتَين أو أكثرَ في آنٍ واحد؛ على سبيل المثال، يمكن أن يدور الإلكترون في الاتجاهَين في آنٍ واحد، ومن ثم يمكن القول إنه في حالةِ تراكُب تجمُّع بين «الدوران لأعلى» و«الدوران لأسفل». نجمع هاتَين الفكرتَين بأن يكون لدَينا إلكترونان متشابكان في ذرَّة، وكلٌّ منهما في حالة تراكب تجمع بين حالتَي دوران. على الرغم من أن الإلكترونَين ليس لهما اتجاهُ دوران محدَّد، فإنه أيًّا كان ما يفعله أحدُهما يؤثر ويتأثر بدوران شريكه. لكن تذكَّر أن أزواج الإلكترونات في الذرة الواحدة دائمًا ما تكون في حالةٍ منفردة، مما يعني أنه ينبغي أن يكون لها دورانٌ معاكس على الدوام؛ أي: يجب أن يدور إلكترونٌ لأعلى ويدور الآخَرُ لأسفل. وعلى الرغم من أن الإلكترونَين في حالةِ تراكبٍ حيث يدوران إلى الأعلى والأسفل في آنٍ واحد؛ فلا بد أن يدورا في الاتجاه المعاكس طَوال الوقت بطريقةٍ كمية غريبة.

والآن، دَعْنا نَفصل الإلكترونين المتشابكين بحيث لا يُصبحان في الذرة نفسِها. إذا قرَّرنا بعد ذلك قياسَ حالةِ دوران أحد الإلكترونَين، فسنُجبره على أن «يختار» اتجاه دوران واحدًا. لنقل إننا وجدناه يدور إلى الأعلى بعد القياس. ولأن الإلكترونَين كانا في حالةِ دوران منفردة متشابكة؛ فهذا يعني أن الإلكترون الثانيَ لا بد أنه يدور إلى الأسفل. لكن تذكَّر أنه قبل القياس كان الإلكترونان في حالةِ تراكب تجمع بين الدوران إلى الأعلى والأسفل. ولكن بعد القياس، يتَّخذ كل إلكترون حالةً محددة؛ إلكترونٌ يدور إلى الأعلى، والآخَر يدور إلى الأسفل. ومن ثم غيَّر الإلكترون الثاني حالتَه الفيزيائية على الفور وعن بُعد من حالة التراكب بالدوران في اتجاهين في آن واحد إلى الدوران إلى الأسفل، وذلك من تلقاء نفسه. كلُّ ما فعلناه هو قياسُ حالة شريكه. ومن حيث المبدأ، لا تهمُّ المسافة التي يبعدها الإلكترونُ الثاني؛ فقد يكون في الجانب الآخَر من الكون، ولكن يبقى التأثير كما هو؛ مما يعني أن قياس أحد الإلكترونَين المتشابكين يهدم «على الفور» حالةَ التراكب للإلكترون الآخَر، مهما كانت المسافة التي تفصل بينهما.

فيما يلي مثالٌ مفيد قد يساعد على الفهم (ولو قليلًا). لنضرب مثالًا بزوجَين من القفَّازات وُضع كلٌّ منهما في صندوقٍ مُحكَم القفل، وتفصل بينهما عدةُ أميال. أحد الصندوقَين في حوزتك، وقبل أن تفتحه أنت لا تعرف هل الصندوق الذي معك فيه

فردة القفاز اليُمنى أم اليسرى. بمجرد أن تفتح الصندوق وتعرف أنها الفردة اليمنى «ستعرف» على الفور أن الفردة الأخرى في الصندوق غيرِ المفتوح هي الفردةُ اليسرى، مهما كانت المسافة التي تفصلك عن الصندوق الآخر. لكن المهم هنا أن كلَّ ما تغير هو معرفتك. فالصندوق البعيد كان يحتوي على الفردة اليُسرى دومًا، بغضِّ النظر هل اخترتَ أن تفتح الصندوق الذي معك أم لا.

التشابُك الكمي مختلف. قبل القياس، لا يكون لأيٍّ من الإلكترونَين اتجاهُ دوران محدَّد. إنه القياس (لأيٍّ من الجُسيمَين المتشابكين) الذي يجبر كِلا الإلكترونين على تغيير حالتيهما من أن يكون كلٌّ إلكترون في حالةِ تراكب كمي — بحيث يدور في الاتجاهَين إلى الأعلى وإلى الأسفل — إلى حالةِ دورانٍ محددة؛ إما الدوران إلى أعلى أو إلى أسفل؛ أما في مثال زوجَي القفازات، فلم يتغير سِوى جهلك بالحالة المحدَّدة الموجودة مسبقًا. القياس الكمي لا يكتفي بإجبارِ أحدِ الإلكترونَين على «اختيار» الدوران إما إلى الأعلى أو الأسفل؛ بل إن «الاختيار» يجبر الإلكترون الآخَر من فوره على أن يتخذ الحالة المُكملة، بغض النظر عن المسافة التي بينهما.

هناك نقطةٌ أخرى صغيرة ينبغي إضافتها. كما قلنا لتونا، يكون الإلكترونان في حالةٍ منفردة مجمعة عندما يقترنان مع بعضهما ويدوران في اتجاهَين مُعاكسين، وفي حالةٍ ثلاثية عندما يدوران في الاتجاه ذاتِه. فإذا قفز أحدُ الإلكترونين الموجودين في الحالة المنفردة القابعين في الذرَّة ذاتِها إلى ذرةٍ مجاورة، ينعكس دورانه بحيث يدور في الاتجاه ذاتِه مثل الإلكترون الآخَر الذي تركه، مما يؤدي إلى حالةِ دوران ثلاثية. لكن على الرغم من أن الإلكترونين أصبحا الآن في ذرتَين مختلفتين، فلا يزالان يُحافظان على حالة التشابك الدقيق، ومن ثَم يبقيان مقترنَين على نحوٍ ميكانيكي كمي.

لكن هذا هو العالم الكمي، ولَّما كان بإمكان الإلكترون الذي يقفز خارجَ الذرَّة أن يعكس اتجاهَ دورانه، فهذا لا يعني أنه عكَسَه بالفعل. سيظلُّ الإلكترونان في حالةِ تراكبٍ من الدوران في كِلا الاتجاهين في الوقت نفسِه، ومن ثم فسيَبْقيان في حالةِ تراكب من حالة الدوران الأحادية والثلاثية في الوقت ذاتِه؛ بمعنى أنهما يدوران في الاتجاه ذاتِه وفي الاتجاهَين المعاكِسَين في الوقت ذاته!

بعد هذه المقدِّمة السريعة التي ربما جعلَتْك متحيرًا، فقد حان الوقتُ للتعرف على أغربِ — وفي الوقت نفسِه أشهَر — فكرةٍ في مجال علم الأحياء الكمي.

## معنًى جذريٌّ للاتجاه

في بداية هذا الفصل، تناولنا مسألةَ كيف لشيءٍ ضعيف مثل المجال المغناطيسي للأرض أن يوفِّر طاقةً تكفي لتغييرِ نتيجةِ تفاعلٍ كيميائي؛ ومن ثم تولِّد إشارةً بيولوجية تُخبر طائرَ أبي الحناء — على سبيل المثال — الاتجاه الذي ينبغي أن يطير فيه. يضرب عالمُ الكيمياء بيتر هور من جامعة أكسفورد مثلًا رائعًا للغاية على مدى احتمالية هذه الحساسية الشديدة:

> تخيَّلْ أن لدَينا كتلةً من الجرانيت تزِنُ كيلوجرامًا واحدًا ونتساءل هل بإمكانِ ذبابةٍ أن تقلبها أم لا. يقتضي التفكيرُ المنطقي أن تكون الإجابة «لا» بالتأكيد. لكن لنفترض أنَّني وضعتُ الحجر على أحد حافاته. من الواضح أنه لن يكون مستقرًّا في هذه الوضعية وسيَميل للسقوط على الجانب الأيمن أو الأيسر إذا تُرك حرًّا. لنفترض الآن أنه بينما يتمايل الحجر على هذا النحو أتَت ذبابةٌ وحطَّت على الجانب الأيمن. وعلى الرغم من أن الطاقة التي نقَلها الطائرُ ستكون ضئيلة، فإنها قد تكون كافيةً لجعل الحجر يسقط جهةَ اليمين بدلًا من جهة اليسار.[18]

الشاهد هنا أن مقاديرَ الطاقة الضئيلة قد يكون لها تأثيراتٌ كبيرة، ولكن فقط إذا كان النظام الذي تعمل عليه موزونًا بدقةٍ بالغةٍ بين نتيجتَين مختلفتَين. ومن ثم لاكتشافِ تأثير المجال المغناطيسي الضئيل جدًّا للأرض، فسنحتاج إلى المُكافئ الكيميائيِّ لحجر الجرانيت في حالةٍ موزونة بدقة، لدرجةِ أنه قد تحدث له تأثيراتٌ كبيرة بأهونِ المؤثرات الخارجية، مثل المجال المغناطيسي الضعيف.

نعود الآن إلى تفاعل الحالة الثلاثية السريع الذي اكتشفه كلاوس شولتن. لعلك تتذكَّر أن روابط الإلكترونات بين الذرَّات غالبًا ما تتكوَّن بمشاركة زوجين من الإلكترونات. دائمًا ما يتشابك هذان الزوجان من الإلكترونات، وغالبًا ما يكونان في حالة دوران منفردة؛ بمعنى أن الإلكترونَين لهما دوران معاكس. لكن من اللافت للنظر أن الإلكترونَين يمكن أن يبقَيا مُتشابكَين حتى بعد كسر الرابطة بين الذرات. يمكن أن تنجرف الذراتُ المنفصلة، التي تُسمى الآن «الجذور الحرة»، بعيدًا عن بعضها تدريجيًّا، ويُصبح من الممكن أن ينعكس دورانُ أحد الإلكترونَين بحيث يجد الإلكترونان المتشابكان — الموجودان الآن في ذراتٍ مختلفة — نفسَيهما في حالةِ تراكبٍ تجمع بين حالتَي الدوران المنفردة والثلاثية، كما يحدُث في تفاعل الحالة الثلاثية السريع الذي اكتشفه شولتن.

من السمات المهمَّة في هذا التراكب الكميِّ أنه لا يستلزم التوازن المتساوي؛ أي: لا تتساوى احتماليةُ رصد زوجَي الإلكترونات المتشابكَين في حالةِ الدوران المنفردة أو الثلاثية. والأهمُّ من ذلك أن التوازن بين هذين الاحتمالَين حساس تجاه أيِّ مجالٍ مغناطيسي خارجي. في الحقيقة، زاوية المجال المغناطيسي المتعلقة باتجاه الزوجين المنفصلين تؤثر تأثيرًا كبيرًا في احتمالية رصدهما في حالة الدوران المنفردة أو الثلاثية.

عادةً ما تكون الأزواج الجذرية غيرَ مستقرة إلى حدٍّ كبير، ومن ثم سيُعاد تجميع إلكتروناتها في أغلب الأحوال لتشكيل نواتج التفاعل الكيميائي. ولكن حينَها ستعتمد الطبيعة الكيميائية الدقيقة للنواتج على هذا التوازن بين الحالة المنفردة والحالة الثلاثية، بكل حساسيته تجاه المجالات المغناطيسية. ولفهم طريقةِ عمله، يُمكننا أن نستعير مثالَ كتلةِ الجرانيت الموزونة، ونُشبهها بالمرحلة الوسيطة للجذور الحرَّة الخاصة بحالة التفاعل. في هذه الحالة، يكون التفاعل متوازنًا بدقةٍ شديدة بحيث إنه حتى المجال المغناطيسي الضعيف — الذي يحلُّ هنا محلَّ الذبابة — يساوي أقلَّ من ١٠ ميكروتسلات مثل المجال المغناطيسي للأرض يكون كافيًا كي يؤثِّر في الطريقة التي تسقط بها العُملة المعدنية المُلقاة لتختارَ بين الحالة المنفردة والثلاثية لإنتاج نواتج التفاعل الكيميائي.[19] أخيرًا وُجدت آليةٌ يمكن أن تؤثر بها المجالات المغناطيسية في التفاعلات الكيميائية؛ ممَّا يوفر بوصلةً مغناطيسية للطيور وذلك على حدِّ زعم شولتن.

لكن شولتن لم تكن لدَيه فكرةٌ عن مكان حدوث تفاعلِ الزوجَين الجذريَّين المقترَحِ هذا في جسم الطائر، والذي من المفترض أن يكون، كما يقول المنطق، هو الدماغ. لكن كي يحدث هذا، فينبغي إنشاءُ الزوجين الجذريَّين أولًا (تمامًا مثلما ينبغي قلبُ كتلة الجرانيت على حافتها). قدم شولتن عمله في جامعة هارفارد عام ١٩٧٨، ووصف التجارِبَ التي نفذَتها مجموعتُه في جوتنجن حيث استُخدمت نبضةُ ليزر لإنشاء زوجين جذريَّين متشابكَين من الإلكترونات. من بين الجمهور، كان هناك عالمٌ بارز اسمه دادلي هيرشباك، والذي حصل لاحقًا على جائزة نوبل في الكيمياء. وفي نهاية المحاضرة، طرح هيرشباك سؤالًا ساخرًا بحُسنِ نية: «ولكن يا كلاوس، أين يقع الليزر في جسم الطائر؟» وتحت ضغط الحاجة إلى تقديم إجابةٍ منطقية على هذا البروفيسور الكبير، اقترح شولتن أنه إذا كان الضوءُ في واقع الأمر ضروريًّا لتنشيط الزوجين الجذريَّين، فربما تحدث تلك العملية داخل عين الطائر.

في عام ١٩٧٧؛ أي: قبل عامٍ من الورقة البحثية التي كتبها شولتن عن الزوجين الجذريَّين، نشر عالم فيزياء من جامعة أكسفورد اسمه مايك ليسك ورقةً بحثية في مجلة

«نيتشر»، تَكهَّن فيها بأن أساس الحاسة المغناطيسية ربما يُوجَد داخل مستقبِلات الضوء في العين.[20] حتى إنه اقترح أن جزيء الصبغة في العين — الرودوبسين — هو المسئول. عندما قرأ فولفجانج فيلتشكو الورقةَ البحثية التي نشَرها ليسك، حَظِيَت باهتمامه على الرغم من أنه ليس لديه دليلٌ تجريبي يقول إن الضوء له دورٌ في الاستقبال المغناطيسي لدى الطيور. ومن ثَم شرَع في اختبار فكرة ليسك.

حينَذاك، كان فيلتشكو يُجري تجارِبَ على الحمام الزاجل كي يرى هل جمعَت الطيورُ المعلومات الملاحية المغناطيسية في رحلتها الخارجية، ثم استخدمَتها للعثور على طريق عودتها إلى المنزل أم لا. توصل إلى أن تعريض الحمام إلى مجالٍ مغناطيسي مُشوَّش وقتما يكون بعيدًا عن موطنه؛ يُعطل قدرته على إيجاد طريق العودة عند إطلاق سراحه. ألهمته نظرية ليسك، ومن ثَم قرر أن ينفذ التجربة مرةً أخرى ولكن من دون التشويش على المجال المغناطيسي هذه المرة. بدلًا من ذلك، نقَل الحمام في ظلامٍ دامس داخل صندوق على سقفِ شاحنته التي هي من طِراز فولكس فاجن. عندئذٍ واجهَت الطيورُ صعوبةً في العثور على طريق العودة إلى موطنها، مما يدلُّ على أنها كانت بحاجةٍ إلى الضوء كي يُساعدها في رسم الخريطة المغناطيسية لرحلتها الخارجية، التي ستستخدمها بعد ذلك لتتبُّع طريق عودتها.

أخيرًا التقى الزوجان فيلتشكو بكلاوس شولتن في مؤتمرٍ عُقد في جبال الألب الفرنسية عام ١٩٨٦. حينذاك، كانا مقتنعَين أن الاستقبال المغناطيسي لدى طائر أبي الحناء يعتمد على الضوء الذي يدخل إلى العين، ولكن، تقريبًا مثل كلِّ المُهتمِّين بالتأثيرات الكيميائية الحيوية للمجالات المغناطيسية، لم يقتنعا حتى ذلك الوقت بأن فرضية الزوجَين الجذريَّين صحيحة. وفي الحقيقة، لم يكن أحدٌ يعلم أين قد يتكوَّن الزوجان الجذريَّان في العين. لكن في عام ١٩٩٨، اكتُشف بروتين الصبغة، الكريبتوكروم، في عيون ذبابة الفاكهة وكما أوضحنا مسبقًا في هذا الفصل، تبين أنه مسئول عن إعادة مُزامنة إيقاعات الساعة البيولوجية التي يُحفزها الضوء لديها. والأهم من ذلك، أصبح معروفًا أن الكريبتوكروم هو نوع البروتين القادرُ على تكوين الجذور الحرة في أثناء تفاعله مع الضوء. انتهز شولتن وزملاؤه هذا الاكتشاف واقترحوا أن الكريبتوكروم هو المستقبِلُ المُراوغ في البوصلة الكيميائية لدى الطيور. نُشر عملهم في ورقةٍ بحثية ظهرَت عام ٢٠٠٠، وأصبحَت تلك الورقة من الأوراق البحثية الكلاسيكية في علم الأحياء الكمي.[21] بالطبع المؤلِّف الأساسي لهذه الورقة البحثية هو ثورستن ريتز الذي قابلناه أيضًا في الفصل الأول، والذي كان

عندئذٍ عاكفًا على إعداد رسالة الدكتوراه الخاصة به مع كلاوس شولتن. والآن في قسم الفيزياء بجامعة كاليفورنيا بإرفاين، يُعتبر ثورستن اليوم من كِبار الخبراء في الاستقبال المغناطيسي على مستوى العالم.

الورقة البحثية التي ظهرَت عام ٢٠٠٠ مهمةٌ لسببين. السبب الأول هو اقتراحها أن الكريبتوكروم هو الجزيء المرشَّح للبوصلة الكيميائية، والسبب الثاني هو أنها ذكرَت بالتفصيل الدقيق — وإن كان تخمينيًّا — كيف أن اتجاه الطائر في المجال المغناطيسي للأرض قد يتأثَّر بما يراه.

الخطوة الأولى في مُخططهم هي امتصاص فوتونٍ من الضوء الأزرق عن طريق جزيء الصبغة الحساس للضوء، فلافين الأدنين الثنائي النكليوتيد، الموجود في بروتين الكريبتوكروم والذي قد تعرَّفنا عليه قبل ذلك في هذا الفصل. وكما ذكرنا، تُستخدَم طاقة هذا الفوتون لطردِ إلكترونٍ من إحدى الذرات داخل جزيء فلافين الأدنين الثنائي النكليوتيد، مما يترك مكان الإلكترون شاغرًا. وهذا المكان يمكن أن يَشغَله إلكترونٌ آخَرُ يمنحه إياه زوجا إلكتروناتٍ متشابكان في حمض أميني يُسمَّى التربتوفان داخل بروتين الكريبتوكروم. لكن الأهم من ذلك أن الإلكترونَ المانح يمكن أن يبقى متشابكًا مع شريكه. عندئذٍ يمكن أن يكون زوجا الإلكترونات المتشابكان في حالةِ تراكب من الحالتَين المنفردة/الثلاثية، وهو النظام الكيميائي الذي وجَد كلاوس شولتن أنه بالغُ الحساسية تجاه المجال المغناطيسي. ومرةً أخرى، التوازن الدقيق بين الحالتَين الأحادية/الثلاثية بالغُ الحساسية تجاه قوة المجال المغناطيسي للأرض وزاويته، ومن ثم يحدث الاتجاهُ الذي تطير فيه الطيورُ فرَقًا فيما يتعلق بتركيب النواتج الكيميائية النهائية التي يُولِّدُها التفاعل الكيميائي. وبطريقةٍ ما وباستخدام آليةٍ ليست واضحةً تمامًا حتى الآن، يُولِّد هذا الفرق — أي: طريقة سقوط كتلة الجرانيت — إشارةً تُرسَل إلى دماغ الطائر كي تُخبِرَه أين يقع أقربُ قطب مغناطيسي.

آلية الزوجَين الجذريَّين التي اقترحها ريتز وشولتن لا شك أنها كانت بالغةَ الروعة؛ ولكن هل هي حقيقية؟ حينذاك، لم يكن هناك حتى أيُّ دليلٍ على أن الكريبتوكروم يمكن أن يولِّد جذورًا حرةً عند تعرُّضه للضوء. لكن في عام ٢٠٠٧، استطاعت مجموعةٌ ألمانية أخرى — لكن هذه المرة من جامعة أولدنبورج وبقيادة هينرك موريتسن — عزْلَ جزيئات كريبتوكروم من شبكيَّةِ طائر القَرْقَفنَّة، وأثبتَت أن هذه الجزيئات تُنتج بالفعل أزواجًا جذريةً طويلةَ العمر عند تعرُّضها للضوء الأزرق.[22]

ليست لدَينا فكرةٌ عن ماهيَّة تلك «الرؤية» المغناطيسية لدى الطيور، لكن بما أن الكريبتوكروم عبارةٌ عن جُزيء صبغة في العين من المُحتمل أن يؤدِّي وظيفةً مماثلة لتلك التي يؤدِّيها جُزيئا الصبغة الأوبسين والرودوبسين إذ يوفِّران رؤية الألوان، فربما تكون رؤيةُ الطائر للسماء مُشبعةً بلونٍ إضافي لا تراه بقيةُ المخلوقات (تمامًا مثلما ترى بعضُ الحشرات الضوءَ الفوق البنفسجي) وله علاقةٌ مباشرة بالمجال المغناطيسي للأرض.

عندما اقترح ثورستن ريتز نظريته عام ٢٠٠٠، لم يكن هناك دليلٌ على أن الكريبتوكروم ضالعٌ في عملية الاستقبال المغناطيسي، لكن الآن وبفضل جهودِ ستيف ريبيرت وزملائه؛ بات معروفًا أن جُزيء الصبغة هذا له دورٌ في الطريقة التي يَكتشف بها ذبابُ الفاكهة والفراشاتُ الملَكية المجالاتِ المغناطيسيةَ الخارجية. في عام ٢٠٠٤، وجد الباحثون ثلاثةَ أنواع من جزيئات الكريبتوكروم في عيون طيور أبي الحناء، ثم في ورقةٍ بحثية نشَرها الزوجان فيلتشكو عام ٢٠١٣ (اللذان لا يزالان نشيطَين على الرغم من تقاعد فولفجانج)؛ اتَّضح أن الكريبتوكروم المستخلَص من عيون الدجاج[٤] قد امتصَّ ضوءًا له ترددٌات مثل الترددُات التي اكتُشف أنها مهمةٌ للاستقبال المغناطيسي.[23]

لكن هل من المؤكد أن العملية تعتمد على ميكانيكا الكمِّ من أجل أن تعمل؟ في عام ٢٠٠٤، ذهب ثورستن ريتز كي يتعاونَ مع الزوجَين فيلتشكو كي يُحاولوا التمييزَ بين البوصلة المغناطيسية التقليدية والبوصلة الكيميائية القائمة على آلية الجذور الحرة التي اقترَحوها. بالطبع يُمكن أن تتشوَّش البوصلات بأيِّ شيءٍ مغناطيسي؛ ثَبِّتْ بوصلةً على مقربةٍ من مغناطيس، وستُشير إلى القطب الشمالي للمغناطيس بدلًا من القطب الشمالي للأرض. يُنتج قضيب المغناطيس العادي ما يُسمَّى بالمجال المغناطيسي الثابت، مما يعني أنه لا يتغيَّر بمرور الوقت. لكن يمكن أيضًا توليدُ مجال مغناطيسي متذبذب — عن طريق لفِّ قضيب المغناطيس على سبيل المثال — وهذا ما يُثير الاهتمام. قد تظلُّ البوصلة التقليدية مشوَّشةً بالمجال المغناطيسي المتذبذب، ولكن في حالةِ أن التذبذب بطيءٌ بالدرجة التي تُتيح لإبرة البوصلة أن تتتبَّعه. أما إذا كانت التذبذباتُ بالغةَ السرعة، ولنقُل آلاف التذبذبات في الثانية، فلن تستطيع إبرةُ البوصلة أن تتتبَّعها بعد ذلك، ومن ثم يُصبح تأثيرها معدومًا. إذن، يمكن أن تتشوَّش البوصلة التقليدية بالمجالات المغناطيسية التي تتذبذبُ بترددات منخفضة وليس بترددات عالية.

لكن البوصلة الكيميائية ستكون لها استجابةٌ مختلفة تمامًا. تتذكر أن البوصلة الكيميائية اقتُرح أنها تعتمد على الأزواج الجذرية التي تكون في حالةِ تراكبٍ تجمعُ بين

الحالتين المنفردة والثلاثية. ونظرًا إلى اختلاف الحالتين من حيث الطاقةُ وارتباطُ الطاقة بالتردد؛ فسيرتبط النظام بالتردد الذي — مع مراعاةِ الطاقات المعنيَّة — من المتوقَّع أن يكون في نطاق ملايينِ التذبذبات في الثانية. إن طريقة التفكير الكلاسيكية بشأنِ ما يحدث والتي ربما تكون أسهلَ في التخيُّل (على الرغم من أنها ليست صحيحةً تمامًا)؛ هي أن زوجَي الإلكترونات المتشابكَين يتقلَّبان بين الحالتَين المنفردة والثلاثية عدةَ ملايينَ من المرات في الثانية. في هذه الحالة، يمكن أن يتفاعل النظام مع المجال المغناطيسي المتذبذب عن طريق عملية الرنين، لكنه لن يتفاعلَ إلا إذا كان المجال يتذبذبُ بالتردُّد ذاتِه الذي يتذبذبُ عنده الزوجان الجذريَّان؛ أي إنه لن يتفاعل إلا إذا كانا في حالة تناغم، إذا استخدَمْنا مثالَ الموسيقى الذي عرَضناه فيما سبق. عندئذٍ، سيضخُّ الرنينُ طاقةً في النظام؛ مما سيُغير ذلك التوازن المهمَّ بين الحالتَين المنفردة والثلاثية الذي تعتمد عليه البوصلة الكيميائية؛ مما يعني انقلابَ كتلة الجرانيت المجازية قبل أن يكون لديها الوقتُ لاكتشاف المجال المغناطيسي للأرض. إذن على خلاف البوصلة المغناطيسية التقليدية، ستتشوَّش بوصلة الزوجَين الجذريَّين بالمجالات المغناطيسية التي تتذبذبُ بترددات عالية للغاية.

أعدَّ فريقُ ريتز والزوجان فيلتشكو تجرِبةً لاختبار هذا التوقُّع البالغِ الوضوح من نظرية الزوجين الجذريين باستخدام طيور أبي الحناء الأوروبي؛ هل ستكون بوصلتها حساسةً تجاه المجالات المغناطيسية ذاتِ التذبذبات المنخفضة أم العالية؟ انتظرَ الفريق حتى فصْل الخريف حينما يبدأ صبرُ الطيور في النَّفاد وترغبُ في الهجرة نحو الجنوب، ثم وضَعوا الطيور في غرفِ قُمع إملن. طبَّقوا مجالاتٍ متذبذبةً من عدة اتجاهات وبتردُّدات متفاوتة، وانتظَروا كي يرَوا هل يمكن للمجالات أن تُعطل قدرةَ الطيور الطبيعية على توجيهِ نفسها أم لا.

كانت النتائج مذهلة؛ إن المجال المغناطيسي المضبوط على تردُّد ١,٣ ميجاهرتز (أي: الذي يتذبذبُ بمعدل ١,٣ مليون دورةٍ في الثانية) والذي هو أضعفُ آلافَ المرات حتى من المجال المغناطيسي للأرض، لم يُعطل مع ذلك قدرةَ الطيور على توجيه نفسها. لكن زيادة تردُّد المجال أو خفضه يُقلل من كفاءة تلك القدرة. لذا بدا أن المجال يتوافقُ مع شيءٍ يهتزُّ بترددات عالية جدًّا في بوصلة الطيور؛ من الواضح أنها ليست بوصلةً تقليدية قائمة على المجنيتيت، بل إنها شيء يتَّسق مع الزوجَين الجذريين المتشابكَين اللذَين هما في حالة تراكُب يجمعان بين الحالتين المنفردة والثلاثية. أوضحَت هذه النتيجة المثيرة للاهتمام

[24]أيضًا أن الزوجين المتشابكين — إن وُجدا — لا بد أن يكونا قادرَين على البقاء في وجه فكِّ الترابط لمدة ميكروثانية (واحدٍ على مليون من الثانية) على الأقل، وإلا سيكون عمرهما قصيرًا بحيث لا يكفي لتجرِبة تقلُّبات الزيادة والنقصان في المجال المغناطيسي المتذبذب المُطبَّق.

لكن شُكِّك في أهمية تلك النتيجة مؤخرًا. فقد أظهرَت مجموعة هينرك موريتسن بجامعة أولدنبورج أن الضوضاء الكهرومغناطيسية الاصطناعية — المنبعثةَ من مجموعةٍ كبيرة من الأجهزة الإلكترونية — التي تتسرَّب عبر جدران الأكواخ الخشبية غير المُحصنة التي تبيتُ فيها الطيورُ في حرَم الجامعة، تُشوش اتجاهاتِ البوصلة المغناطيسية الخاصة بتلك الطيور. لكن رجَعَت القدرةُ كما كانت بمجردِ وضع الطيور في أكواخٍ محصَّنة بألواح ألومنيوم، حيث إنها منَعَت نحو ٩٩ بالمائة من الضوضاء الكهرومغناطيسية الناتجة عن عوامل العمران. والأهم من ذلك، تُشير تلك النتائج إلى أن التأثير المعطلَ الناتج عن المجالات الكهرومغناطيسية ذاتِ التردد اللاسلكي؛ قد لا يقتصر على نطاقِ ترددات ضيقٍ في نهاية الأمر.[25]

إذن، لا تزال هناك جوانبُ غامضة في النظام؛ على سبيل المثال، السبب الذي يستدعي أن تكون بوصلةُ طائر أبي الحناء مفرِطةَ الحساسية تجاه المجالات المغناطيسية المتذبذبة، وكيف يمكن أن تبقى الجذورُ الحرة متشابكةً لمدة طويلة بالقدر الكافي لإحداث فرقٍ بيولوجي. لكن في عام ٢٠١١، طرَحَت ورقةٌ بحثية من مختبر فلاتكو فيدرال بجامعة أكسفورد حساباتِ نظريةٍ كمية بشأن بوصلة الزوجين الجذريين المقترَحة، وأوضحَت أنه ينبغي الإبقاءُ على التراكب والتشابك لمدةٍ تستمر عشرات الميكروثواني على الأقل، التي تُعد أكبرَ بكثيرٍ من المُدَد التي تتحقَّق في العديد من الأنظمة الجزيئية المُماثلة التي هي مِن صنع الإنسان، والتي ربما تكون طويلةً بالقدر الكافي كي تُخبر طائر أبي الحناء بالاتجاه الذي ينبغي أن يطيرَ فيه.[26]

زادَت هذه الدراسات الرائعة بشدةٍ من الاهتمام بالاستقبال المغناطيسي، الذي قد أُثبِت الآن في مجموعة كبيرة من الأنواع، ومنها مجموعةٌ كبيرة من أنواع الطيور والكَرْكَنْد الشوكيِّ وسمك الراي اللاسع، وأسماك القرش والحيتان الزعنفية، والدَّلافين والنحل، وحتى الميكروبات. في معظم الحالات، لم تُدرَس حتى الآن الآلياتُ ذات الصلة، ولكن الاستقبال المغناطيسي المرتبط بالكريبتوكروم اكتُشف الآن في مجموعةٍ كبيرة من المخلوقات بدايةً من طائرنا الباسل أبي الحناء وانتهاءً بالدجاج وذباب الفاكهة الذي تناوَلْناه من قبلُ،

والعديد من المخلوقات الأخرى، بما في ذلك النباتات.[27] أظهرت دراسةٌ نشرَتها مجموعةٌ تشيكية عام ٢٠٠٩ أن الصرصور الأمريكي يتمتَّع بالقدرة على الاستقبال المغناطيسي وأظهرَت أنها، شأنها شأنُ طائر أبي الحناء الأوروبي، تتشوَّش بالمجالات المغناطيسية ذاتِ التذبذبات العالية التردُّد.[28] وأظهرَت دراسة متابعة طُرحَت في مؤتمر في عام ٢٠١١ أن البوصلة لدى الصراصير احتاجَت إلى الكريبتوكروم الوظيفي.

يشير اكتشافُ قدرةٍ وآلية مشتركة على نطاقٍ واسع بين العديد من المخلوقات إلى أن تلك القدرةَ أو الآلية موروثةٌ من سلَفٍ مشترك. لكن السلف المشترك بين الدجاج وطيور أبي الحناء وذباب الفاكهة والنباتات والصراصير كان حيًّا منذ مدةٍ طويلة تزيد على ٥٠٠ مليون سنة. إذن، على الأرجح البوصلات الكمية قديمة، ومن المُحتمل أنها وفَّرَت المهارات الملاحية للزواحف والديناصورات التي جابت المستنقَعات في العصر الطباشيري جنبًا إلى جنبٍ مع حيوان التيرانوصور الذي تعرفنا عليه في الفصل الثالث (تذكر أن الطيور في العصر الحديث مثل أبي الحناء تنحدرُ من الديناصورات)، والأسماك التي سبَحَت في بحار العصر البرمي، ومفصليات الأرجل القديمة التي زحفَت فوق محيطات العصر الكمبري أو اتخذَت جُحورًا تحتها، وربما حتى الميكروبات في عصر ما قبل الكمبري التي كانت أسلافًا لكلِّ المخلوقات الخلَوية. يبدو أن الفعل الطيفيَّ عن بُعدٍ الذي أشار إليه أينشتاين ربما كان يُساعد المخلوقات على أن تعرف طريقَها حول العالم في معظم مراحلِ تاريخ كوكبنا.

## هوامش

(١) نرجو عدمَ الخلط بينه وبين إملن تونيل، لاعبِ كرة القدم الأمريكية الأمريكي المعروف في خمسينيَّات القرن العشرين.

(٢) لفظة «ثلاثية» هنا قد تكون محيرةً بالنسبة إلى غير الخبراء في ميكانيكا الكم؛ لا سيما أنها تُشير إلى زوج واحد فقط من الإلكترونات؛ لذا سأورد هنا تفسيرًا مختصرًا جدًّا: يقال إن الإلكترون له دوران بمقدار ١/٢. ومن ثم فعندما يكون هناك زوجان من الإلكترونات لهما دورانٌ معاكس، تلغي كلٌّ من هاتَين القيمتَين الأخرى: ١/٢ − ١/٢ = ٠. يُشار إلى تلك الحالة باسم حالةِ دورانٍ منفردة. لكن عندما يكون دورانهما يشير إلى الاتجاه نفسِه، فتُجمَع هاتان القيمتان: ١/٢ + ١/٢ = ١. يشير مصطلح «ثلاثي» إلى أن الدوَران المجمَّع الذي مجموعه ١ يمكن أن يشير إلى ثلاثة اتجاهات محتملة (أعلى وأسفل وجانبيًّا).

(٣) عادةً ما يكون الإلكترونان غيرُ المقترنين في جزيء الأكسجين اللذان يربطان ذرَّتَيه معًا؛ في حالة دوران ثلاثية.

(٤) بالطبع الدجاج ليس من الطيور المهاجرة، حتى عندما يعيش في البرِّية. لكن يبدو أنه يحتفظ بحاسةِ الاستقبال المغناطيسي.

الفصل السابع

# الجينات الكمية

أكثرُ مكانٍ برودةً على الأرض ليس القُطبَ الجنوبي كما قد تتصوَّر، ولكنه مكانٌ ما في وسط الغِطاء الجليدي في شرق قارة أنتاركتيكا، ويبعد عن القطب الجنوبي نحوَ ١٣٠٠ كيلومتر. في تلك البقعة، تنخفض درجاتُ الحرارة في الشتاء إلى عشرات الدرجات المئوية تحت الصفر. إن أبرد درجة حرارة قِيسَت من قبلُ على الأرض على الإطلاق كانت ٨٢٫٩ درجةً تحت الصفر، وقد سُجِّلَت في تلك البقعة في الحادي والعشرين من يوليو عام ١٩٨٣، مما أكسبَ المنطقةَ اسم «قُطب البرد الجنوبي». في درجات الحرارة المنخفضة إلى هذا الحد، يتهشَّم الفولاذ ويتحتَّم قطعُ وَقود الديزل بالمنشار الكهربائي.

درجاتُ البرودة القُصوى تُجمد أيَّ رطوبة في الهواء، الذي — إلى جانب الرياح القوية التي تهبُّ من دون توقفٍ عبر السهول المتجمدة — ربما يجعلان قارةَ أنتاركتيكا أقسى مكانٍ على الكوكب.

لكن تلك البقعة لم تكن بتلك القسوة على الدَّوام. إن كتلة اليابسة التي تُشكل قارةَ أنتاركتيكا كانت جزءًا من القارة العملاقة المعروفة باسم قارة جندوانا وكانت تقع بالقرب من خطِّ الاستواء في واقع الأمر. كانت مغطَّاةً بنباتات كثيفة من سرخس البذور وأشجار الجنكة والسيكاديات التي كانت تتغذَّى عليها الديناصورات والزواحف الآكِلة للعشب مثل الليستروصورس الشبيه بوحيد القرن. ولكن منذُ ما يقرب من ثمانينَ مليونَ سنة، بدأتْ كتلةُ اليابسة في الانقسام وانجرفَت قطعةٌ منها نحو الجنوب، واستقرَّت في النهاية فوق القطب الجنوبيِّ لتكون قارةَ أنتاركتيكا. ثم منذ ما يقرب من خمسةٍ وستين مليونَ سنة، ضرب كويكبٌ ضخم الأرضَ مما أباد كلَّ الديناصورات والزواحف العملاقة وخلَّف حيزًا بيئيًّا أصبحَت الثدييات ذواتُ الدم الحارِّ هي المُهيمِنةَ فيه. وعلى الرغم من بُعد قارة

أنتاركتيكا الشديد عن موقع الاصطدام، فقد تغيَّرَت الحياةُ النباتية والحيوانية فيها تغيرًا جَذْريًّا؛ حيث إن الغابات النفضية قد حلَّت محل نباتات السرخس والسيكاديات. سُكِنَت هذه الغابات بجرابيَّاتٍ وزواحفَ وطيورٍ أصبحَت الآن منقرضة، ومنها البطريق الضخم. وامتلأَت الوديان بالأنهار سريعةِ الجريان والبحيرات العميقة التي امتلأَت بمفصليات الأرجل والأسماك العظمية.

لكن مع انخفاض مستويات غازات الدفيئة، انخفضَت درجة الحرارة في قارة أنتاركتيكا. حفَّزَت تياراتُ المحيطات الدوَّارة انخفاضَ درجة الحرارة أكثر، ومنذ ما يقرب من أربعةٍ وثلاثين مليونَ سنةٍ بدأتْ أسطح الأنهار والبحيرات الداخلية تتجمَّد في الشتاء. ثم منذ ما يقرب من خمسة عشَر مليونَ سنة، لم يَذُب جليدُ الشتاء في الصيف، مما أدَّى إلى حجز البُحيرات والأنهار تحت سقفٍ متجمد صُلب. ولما استمرَّت درجة حرارة الأرض في البرودة، أخذَت أنهارٌ جليدية ضخمة تنساب فوق قارة أنتاركتيكا، ممَّا أدى إلى موت جميع الثدييات والزواحف والبرمائيات التي تعيش على يابستها ودفن اليابسة والبحيرات والأنهار تحت طبقاتٍ ثلجية يبلغ سُمكها عدةَ كيلومترات. بقيَت قارة أنتاركتيكا منحسرةً تحت هذه الثلوج مُذ ذلك الحين.

كان صائد الفقمات الأمريكي القبطان جون ديفيس أولَ شخص تطأ قدمُه تلك القارة، وذلك في القرن التاسع عشر، وفي عشرينيَّات القرن العشرين، بدأ الاستيطانُ الكامل حيث تسابقَت العديدُ من البلدان إلى الإعلان عن سيطرتها على أراضيها عن طريقِ بناء محطَّاتٍ بحثية فيها. أُقيمت أول محطة سوفييتيَّة على تلك القارة واسمها ميرني، بالقرب من الساحل في الثالث عشر من فبراير عام ١٩٥٦، وبدايةً من هنا وبعد عامَين، انطلقَت رحلةٌ استكشافية إلى داخل القارة؛ بهدف إقامةِ قاعدةٍ في قُطبها المغناطيسي الأرضي. تعرَّضَت البعثةُ الاستكشافية إلى العواصف الثلجية والانهيارات الجليدية والبرد القارس (٥٥ درجة تحت الصفر) ونقص الأكسجين، ولكنها وصلتْ في النهاية إلى القطب الجنوبي المغناطيسيِّ الأرضي في السادسَ عشر من ديسمبر، في صيف نصف الكرة الجنوبي وأقامت محطة فوستوك.

منذ ذلك الحين، لم يقلَّ عددُ العاملين في تلك القاعدة البحثية عن عشرين إلى خمسةٍ وعشرين عالمًا ومهندسًا تقريبًا، وهم الذين يُجْرون قياساتٍ لكلٍّ من المغناطيسية الأرضية والغلاف الجوي. من الأغراض الرئيسية للمحطة الحفرُ في النهر الجليدي الكامن تحتها للوقوف على السجلِّ المتجمِّد للظروف المناخية الماضية. في سبعينيَّات القرن العشرين،

استخرج المهندسون مجموعةً من العيِّنات عمقُها يصل إلى ٩٥٢ مترًا، وقد وصلوا إلى ثلوجٍ تراكمَت منذ العصر الجليدي الأخير؛ أي: منذ عشرات آلاف السنين. وصلتْ حفَّاراتٌ جديدة في ثمانينيَّات القرن العشرين مما أتاح للباحثين الوصولَ إلى عمقٍ يبلغ ٢٢٠٢ متر. وبحلول عام ١٩٩٦، تمكَّن الفريق من الوصول إلى عمق ٣٦٢٣ مترًا؛ أي: حفرة في الجليد يزيد عُمقها على ميلَين، وصَلَت إلى مستوًى كان بمنزلةِ جليد سطحي منذ ٤٢٠ ألف سنة.

لكن توقَّف الحفر حينذاك لأنهم اكتشَفوا شيئًا غريبًا يقبع على مسافةٍ قريبة تحت قاع الحفرة. في الحقيقة، إن اكتشاف أن شيئًا غيرَ عادي كان يقبع تحت محطةِ فوستوك كان قد تمَّ قبل ذلك بعَقْدَين — أي: في عام ١٩٧٤ — عندما كشف مسحٌ زلزاليٌّ بريطاني للمنطقة عن قراءاتٍ غريبة لمساحةٍ كبيرة تبلغ ١٠ آلاف كيلومتر مربَّع وتقبع على مسافة ٤ كيلومترات تقريبًا تحت الثلج. اقترح عالم الجغرافيا الروسيُّ آندري بيتروفيتش كابيتسا أن قراءات الرادار الغريبةَ سببها بُحيرة عظيمةٌ منحسرة تحت الجليد، بَقِيَت دافئةً بدرجةٍ تُبقيها سائلةً بسبب الضغط الشديد وبسبب الطاقة الحرارية الأرضية الكامنة. تأكد اقتراحُ كابيتسا في النهاية بقياسات القمر الصناعي للمنطقة عام ١٩٩٦، التي كشفَت عن بحيرةٍ تحت الجليد يبلغ عمقها نحو ٥٠٠ متر (من سطحها السائل إلى قاعها) ويساوي حجمُها حجمَ بحيرة أونتاريو. وقد أطلق الفريق عليها اسم بحيرة فوستوك.

مع وجودِ بحيرة قديمة مدفونة تحت الجليد، اكتسبَت عملياتُ الحفر في محطة فوستوك أهميةً مختلفة تمامًا مع اقتراب الحفر من بيئةٍ فريدة من نوعها. لقد انحسرَت بُحيرة فوستوك عن سطح الأرض منذ مئات الآلاف — إن لم يكن المَلايين — من السنين؛[١] إذ كانت تنتمي إلى عالَمٍ بات مفقودًا الآن. ما الذي حدث لكلِّ تلك الحيوانات والنباتات والطحالب والميكروبات التي كانت تعيش في البحيرة قبل أن تنحسر، موقعةً كلَّ الكائنات الموجودة بها في ظلامٍ دامس وبرد قارس؟ هل انتهت كلُّ صور الحياة بها، أم بقيَت بعضُ المخلوقات على قيد الحياة، حتى تكيَّفَت على الحياة على عمقِ عدة كيلومترات تحت سطح النهر الجليدي؟ ربما كان على هذه الكائنات القويةِ التحملِ التكيُّفُ مع ظروفٍ بيئية قاسية؛ بردٌ قارس وظلامٌ دامس، في مياهٍ مضغوطة بطبقةِ جليدٍ سميكة، وهذا الضغط أكبرُ بثلاثِمائة ضعفٍ من الضغط على أي بحيرة سطحية. ومع ذلك، تستطيع الحياةُ ذات التنوُّع المدهش أن تستمرَّ في أماكنَ أخرى غيرِ مُحتملة، مثل الحافات الكبريتية الحارقة للبراكين والبحيرات الحمضية وحتى الخنادق العميقة والمظلمة تحت سطح المحيطات

بآلاف الأمتار. ربما تمكنَت بحيرة فوستوك أيضًا من دعم نظامها البيئيِّ المكوَّن من الكائنات المحبة للظروف القاسية.[٢]

إن اكتشافَ بحيرةٍ تحت أعماق الجليد اكتسب أهميةً أكبر بفضل اكتشافٍ آخَر في عام ١٩٨٠ حدث على بُعدٍ يصل إلى نصف مليار ميل عندما صوَّرَت مركبةُ الفضاء «فوياجر ٢» سطحَ قمر كوكب المشتري يوروبا، وكشفَت عن سطحٍ جليدي به علاماتٌ شاهدة على وجود محيطٍ سائل تحته. إذا كان بإمكان الحياة أن تستمرَّ مئاتِ الآلاف من السنين في مياهٍ مدفونة على عمق كيلومترات أسفلَ نهر جليدي في قارة أنتاركتيكا، فربما تستطيع المحيطاتُ المغمورة في قمر يوروبا دعمَ حياةٍ خارج نطاق كوكب الأرض. أصبح البحث عن حياةٍ في بُحيرة فوستوك بمنزلةِ بروفة للبحث عن حياةٍ أكثرَ إثارةً خارج كوكبنا.

توقَّف الحفر عام ١٩٩٦، ولم يفصله عن سطح البُحيرة سوى ١٠٠ متر فقط؛ وذلك لمنع تلامُس مياهها النقية مع مِثقاب الحفر المشبع بالكيروسين، الذي ربما كان ملوثًا بالنباتات والحيوانات والميكروبات والموادِّ الكيميائية التي على السطح. ولكن سبق أن خضَعَت مياهُ بحيرة فوستوك للدراسة من خلال عيِّنات الجليد الجوفية التي استُخرِجَت من قبل. تدفع التياراتُ الحرارية المياهَ في البحيرة بحيث تمر بدورةٍ مستمرة من التجميد والذوبان تحت سقفها الجليدي مباشرة. استمرَّت تلك العملية منذ انحسار البحيرة؛ ومِن ثَم فإن سقفها لم يتكوَّن من جليد النهر الجليدي، وإنما من مياهِ بحيرةٍ متجمِّدة تُعرف باسم «الجليد المتراكم»، وتمتدُّ عشراتِ الأمتار فوق سطح البحيرة السائل. العيِّنات الجوفية المستخرَجة من عمليات الحفر السابقة قد توغَّلَت حتى هذا المستوى من الجليد ونُشرَت أولُ دراسة مفصَّلة لعينات الجليد المتراكم الجوفية الخاصة ببحيرة فوستوك عام ٢٠١٣.[1] توصلَت الدراسة إلى أن البحيرة المنحسرة بالجليد تحتوي على شبكةٍ معقَّدة من الكائنات الحية، ومنها فطرياتٌ وأوَّليات وبكتيريا أحادية الخلية، بالإضافة إلى حيوانات أعقد مثل الرخويات والديدان وحيوانات شقائق النعمان وحتى مفصليَّات الأرجل. تمكَّن العلماء حتى من تحديد أنواع عمليات الأيض التي استخدمَتها تلك المخلوقاتُ بالإضافة إلى بيئاتها ومواطنها المحتملة.

في هذا الفصل، نحن لا نريد التركيزَ على ظواهر الحياة الرائعة بلا شكٍّ في بحيرة فوستوك، بل على الوسائل التي يستطيع بها أيُّ نظامٍ بيئي الاستمرارَ وهو منحسرٌ بعيدًا منذ آلاف أو حتى ملايين السنين. في الحقيقة، يمكن اعتبارُ بحيرة فوستوك مثالًا مصغَّرًا من نوعٍ ما للأرض ذاتها، التي انحسرَت تقريبًا بعيدًا عن مدخلات الحياة، فيما عدا

فوتونات الشمس، منذ أربعة مليارات سنة وبالرغم من ذلك ظلَّت محتفظةً بنظامٍ بيئي ثري ومتنوِّع في وجه التحديات التي فرَضَتها الانفجاراتُ البركانية واصطداماتُ الكويكبات والتغيرات المناخية الهائلة. فكيف يصمد تعقيدُ الحياة الشاسع ويتحمَّل التغيرات القصوى في بيئته آلاف أو حتى ملايين السنين؟

يمكن العثور على أحد مفاتيح هذا اللغز في جزءٍ من المادة التي درَسها فريقُ علم الأحياء في بحيرة فوستوك؛ وهو عبارة عن بضعةِ ميكروجرامات من مادةٍ كيميائية مُستخرَجة من المياه المتجمِّدة في البحيرة. هذه المادة حيويةٌ لاستمرار كلِّ مظاهر الحياة وتنوُّعها على كوكب الأرض وتحتوي على أكثرِ جزيءٍ غيرِ عادي في الكون المشهود. إننا نُطلق عليها اسم الحمض النووي.

تتبع المجموعةُ التي نفَّذَت دراسة الحمض النووي الخاصة ببحيرة فوستوك جامعةَ بولينج جرين ستيت بالولايات المتحدة. لقراءة تسلسلٍ يتكوَّن من ملايين الأجزاء من جزيئات الحمض النووي المستعادة من مياه البحيرة؛ استخدَموا نوعَ تقنيات تحديد تسلسل الحمض النووي الذي سبق أن استُخدم لفكِّ شفرة الجينوم البشري. ثم قارَنوا الحمض النووي من بحيرة فوستوك بقواعدِ البيانات التي تحتوي على مجموعةٍ كاملة من تسلسلات الجينات المقروءة من جينومات آلاف الكائنات المجموعة من جميع أنحاء العالم. ما اكتشفوه هو أن العديد من التسلسلات الخاصة ببحيرة فوستوك مطابِقةٌ أو شديدةُ القرب من جينات البكتيريا والفطريات ومفصليات الأرجل والمخلوقات الأخرى التي تعيش فوق الثلج؛ لا سيما تلك التي تقطن البحيراتِ الباردةَ والخنادق البحرية العميقة والمظلمة؛ وهي بيئاتٌ على الأرجح تُشبه قليلًا بحيرةَ فوستوك. هذه التشابهات الجينية مكَّنَتهم من اقتراحِ تخميناتٍ مدروسة بشأن العادات والطبيعة المحتملة للكائنات التي تركَت بصمات حمضها النووي تحت الثلج.

لكن تذكَّر أن الكائنات في بحيرة فوستوك حُبسَت تحت الجليد منذ عدة مئات الآلاف من السنين. وتشابُه تسلسلات الحمض النووي الخاصة بها مع تلك الخاصة بالكائنات التي تعيش فوق الجليد؛ يُعد من ثمَّ نِتاجًا للانحدار من سلفٍ مشترك من الكائنات التي لا بد أنها كانت ضمنَ المملكة الحيوانية والنباتية في قارة أنتاركتيكا قبل أن تنحسر البحيرة وتُحبَس كائناتها التي تعيش فيها بعيدًا تحت الجليد. إذن، نُسخَت تسلسلات الجينات لتلك الكائنات السلفية فوق الجليد وتحته على نحوٍ مستقل منذ آلاف الأجيال. لكن على الرغم من هذه السلسلة الطويلة من أحداث النسخ، فإن النُّسخ المتطابقة للجينات نفسِها

ظلَّت شبه متطابقة. وبنحوٍ أو بآخَر، نُقلت المعلومات الجينية المعقَّدة التي تُحدد الشكل والسمات والوظيفة للكائنات التي تعيش فوق الجليد وتحته نقلًا تامًّا، على نحوٍ يكاد يخلو من الأخطاء، على مدار مئات الآلاف من السنين.

إن قدرة المعلومات الجينيَّة تلك على مضاعفة نفسها بدقةٍ من جيلٍ إلى جيلٍ تالٍ — وهو ما نُسمِّيه الوراثة — هي بالطبع عمليةٌ مركزية في الحياة. الجينات المكتوبة في الحمض النووي تُشفِّر البروتينات والإنزيمات التي تُكوِّن كلَّ جزيء حيوي في كل خلية حية عبر عملية الأيض، بدايةً من صبغات البناء الضوئي في النباتات والميكروبات وحتى المستقبلات الشمِّية في الحيوانات أو البوصلات المغناطيسية الغامضة لدى الطيور، وفي الحقيقة كلُّ سمةٍ في كل كائن حي. في واقع الأمر، سيُحاجِجُ العديد من علماء الأحياء بأن التضاعف الذاتي هو السِّمة المميزة للحياة. لكن الكائنات الحية لا تستطيع أن تُضاعف نفسها إلا إذا كانت قادرةً في المقام الأول على مضاعفة التعليمات الخاصة بتكوين نفسها. لذا فعمليةُ الوراثة — أي: نسخُ المعلومات الجينية بدقةٍ عالية — تجعل الحياة ممكِنة. لعلك تتذكر من الفصل الثاني أن غموض الوراثة — المتمثِّلَ في طريقة نقل المعلومات الجينية بدقةٍ من جيل إلى جيل تالٍ — كان اللغزَ الذي أقنع إرفين شرودنجر بأن الجينات عبارةٌ عن كياناتٍ ميكانيكية كمية. لكن هل أصاب في ذلك؟ هل نحتاج إلى ميكانيكا الكم لتفسير الوراثة؟ هذا هو السؤال الذي سنعود إليه الآن.

## الدقة

عادةً ما نعتبر قدرةَ الكائنات الحية على مُضاعفة جينوماتها بدقةٍ شيئًا مُسلَّمًا به، ولكنها في الحقيقة أبرزُ جوانب الحياة وأكثرُها ضرورة. إن معدَّل أخطاء تضاعف الحمض النووي — التي نُسمِّيها الطفرات — عادةً ما يكون أقلَّ من واحدٍ في المليار. لأخذِ فكرة عن هذا المستوى الاستثنائي من الدقة؛ تأمَّل الأحرفَ وعلامات الترقيم والمسافات المستخدَمة في كتابة هذا الكتاب. ثم تخيَّل أن هناك ألفَ كتاب بحجمٍ مُماثل في مكتبة، وتصوَّرْ أن مهمتك هي نَسخُ كلِّ حرف ومسافة بدقةٍ من هذا الكتاب إليها. كم عددُ الأخطاء التي تتوقَّع أن ترتكبَها؟ هذه بالضبط كانت مهمةَ الكُتَّاب في العصور الوسطى، وقد بذَلوا أقصى ما لديهم لِنَسخ الكتب بخطِّ اليد قبل اختراع الطباعة. لا عجبَ أن تمتلئ محاولاتُهم بالأخطاء كما يتَّضح من تنوُّع النُّسخ المتباينة لنصوص العصور الوسطى. بالطبع أجهزة الكمبيوتر قادرةٌ على نسخ المعلومات بدرجةٍ عالية من الدقة، ولكنها تمتاز بتلك الدقةِ

بفضل القواعد الصارمة للتقنيات الرقمية الإلكترونية الحديثة. تخيَّل إنشاء جهازِ نسخٍ من مادةٍ رَطْبة وإسفنجيَّة. كم عدد الأخطاء التي تعتقد أنه سيرتكبه في قراءة معلوماتها المنسوخة وكتابتها؟ لكن عندما تكون هذه المادةُ الرطبة الإسفنجية إحدى الخلايا في جسمك والمعلومات مُشفرة في الحمض النووي، فإن عدد الأخطاء يكون أقلَّ من واحدٍ في المليار.

النسخ عالي الدقةِ بالغُ الأهمية للحياة؛ لأن التعقيد الاستثنائي في الأنسجة الحية يتطلَّب مجموعةَ تعليماتٍ مساوية له في التعقيد، بحيث إن خطأً واحدًا فيها قد يكون مُميتًا. يتكون الجينوم في خلايانا من نحو ثلاثة مليارات حرفٍ جينيٍّ تُشفر نحو ١٥ ألف جين، ولكن حتى جينومات أبسطِ الميكروبات الذاتية التضاعف — مثل تلك التي تعيش تحت جليد فوستوك — تتكون من عدةِ آلاف من الجينات المكتوبة بعدة ملايين من الحروف الجينيَّة. وعلى الرغم من أن معظم الكائنات الحية تتحمل بضع طفرات في كل جيل، فإن السماح بأكثرَ من حفنةٍ من الطفرات في الجيل التالي يمكن أن يؤدي إلى مَشاكل خطيرة، نُعاني منها نحن البشرَ في صورةِ أمراض وراثية أو حتى ذرِّية غير قادرة على الحياة. وكذلك حينما تتضاعف الخلايا في أجسامنا مثل خلايا الدم وخلايا الجلد وغيرها، فلا بد أن تُضاعِف أيضًا حمضها النوويَّ لتدمجه في الخلايا الوليدة. وتؤدي الأخطاء في تلك العملية إلى الإصابة بالسرطان.[٣]

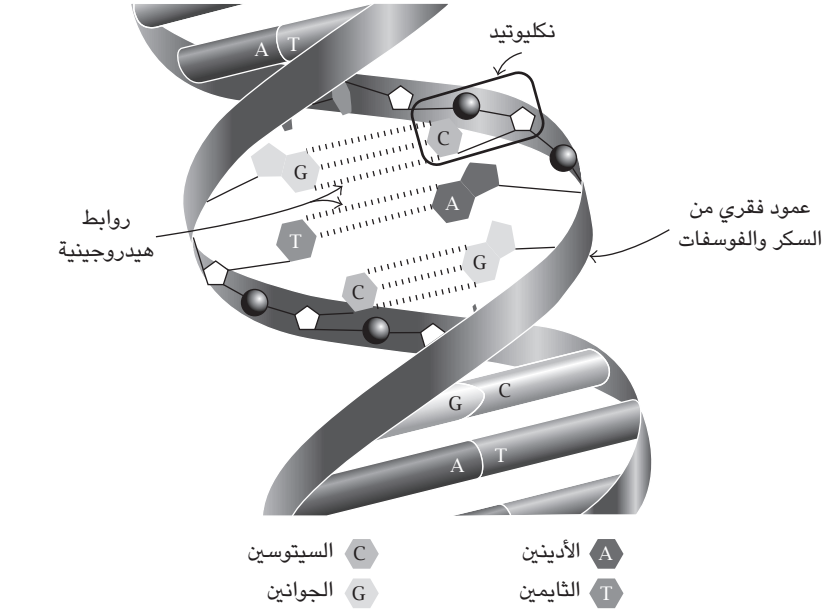
لكن لفهم مدى أهمية ميكانيكا الكم بالنسبة إلى عملية الوراثة، فيجب أولًا أن نعود إلى الثامن والعشرين من فبراير عام ١٩٥٣ ونزور كامبريدج حيث هُرع فرانسيس كريك إلى حانة إيجل وأعلن أنه هو وجيمس واتسون قد «اكتشفا سر الحياة». في أواخر ذلك العام، نشَرا ورقتهما البحثية البارزة،[2] التي قد كشفَت النقاب عن بِنْيةٍ ما وذكرَت مجموعةً من القواعد البسيطة التي قدَّمَت إجابةً على لُغزَين من أهم ألغاز الحياة وهما: طريقة تشفير المعلومات البيولوجية وطريقة توارُثها.

يمكن القول إن ما يُؤكَّد عليه عادةً في الروايات العديدة المتعلقة باكتشاف الشفرة الجينية، وهو أن الحمض النووي يتَّخذ بنيةً على هيئة لولب مزدوج، لهو سِمة ذات أهمية ثانوية. في الحقيقة، هذا أمرٌ لافت للنظر كما أن بِنْية الحمض النووي الرائعة أصبحَت عن استحقاقٍ من الصور الأيقونية في العلم التي طُبِعت على التيشرتات وظهرَت في مواقع الويب وحتى في الفنون المعمارية. ولكن اللولب المزدوج ما هو إلا سقالةٌ في حقيقته. يكمن السرُّ الحقيقي للحمض النووي فيما يدعمه اللولب.

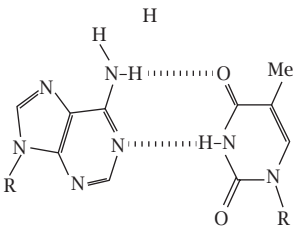
كما أوضحنا بإيجازٍ في الفصل الثاني، فإن البِنية اللولبية للحمض النووي (انظر الشكل ٧-١) يُكونها عمود فقري من السكَّر والفوسفات يحمل الرسالة الفعلية للحمض النووي وهي: سلاسلُ قواعد الحمض النووي، المتمثلة في الجوانين (G) والسيتوسين (C) والثايمين (T) والأدينين (A). أدرك واتسون وكريك أن هذا التسلسُل الخطيَّ قد كوَّن شفرة، واقترحا أن هذه الشفرة هي الشفرة الجينية.

في السطر الأخير من الورقة البحثية التاريخية التي كتبها واتسون وكريك، اقترحا أن بِنية الحمض النووي تُقدم أيضًا حلًّا لثاني أكبر لغزٍ من ألغاز الحياة: «لم يَغِب عنا أن الاقتران المحدَّد الذي افترضناه يقترح من فوره آليةَ نسخٍ محتملةً للمادة الجينية.» ما لم يَغِب عنهما هو سمةٌ أساسية للولب المزدوج، وهي أن المعلومات في إحدى جَديلتَيه — أي: تسلسل قواعده — تُوجَد أيضًا كنسخةٍ معكوسة في الجديلة الأخرى؛ القاعدة A في إحدى الجديلتين تقترن دومًا بالقاعدة T في الجديلة الأخرى والقاعدة G تقترن دومًا بالقاعدة C. في الواقع، الاقتران المحدَّد بين القواعد في الجديلتَين المعكوستَين (الزوجَين A:T أو الزوجين G:C) تُوفِّره في واقع الأمر روابطُ كيميائية ضعيفة تُسمى الروابطَ الهيدروجينية. هذا «الصمغ» الذي يُثبت جُزيئَين مع بعضهما هو في الأساس بروتون مشترك، كما أنه لبُّ موضوعنا؛ ولذا فسندرس طبيعته بمزيدٍ من التفاصيل بعد قليل. لكن الضعف في الربط بين جديلتي الحمض النووي المقترنتَين اقترَح آليةَ نسخ على الفور؛ وهي أنه يمكن الفصل بين الجديلتَين، ويمكن أن تكون كلٌّ منهما بمنزلة قالب تُبنى عليه شريكتها المكملة لعمل نسختَين من الجديلة المزدوجة الأصلية. وهذا ما يحدث بالتحديد عند نسخ الجينات في أثناء انقسام الخلية. تنفصل جَديلتا اللولب المزدوج بمعلوماتهما المكملتَين مما يُتيح لإنزيمٍ يُسمى «بوليميراز الحمض النووي» أن يصل إلى كل جديلة منفصلة. عندئذٍ يقترن الإنزيم بجديلة واحدة وينزلق بطول سلسلة النكليوتيدات، فيقرأ كلُّ حرف جيني ويُدرج، بدقةٍ تكاد لا تُخطئ، قاعدةً مكملة إلى الجديلة النامية؛ بمعنى أنه عندما يرى القاعدة A يُدرج القاعدة T، وعندما يرى القاعدة G يُدرج القاعدة C، وهكذا حتى يُتم نسخةً مُكملة كاملة. وتتكرَّر العملية ذاتُها في الجديلة الأخرى، مما يؤدي إلى عمل نُسختَين من اللولب المزدوج الأصلي؛ نسخةٍ لكلِّ خليةٍ وليدة.

هذه العملية التي تبدو بالغةَ البساطة تقف وراء انتشار كلِّ مظاهر الحياة على كوكب الأرض. لكن في عام ١٩٤٤، عندما أصرَّ شرودنجر على أن درجة الدقة الاستثنائية في عملية الوراثة لا يمكن أن تُفسَّر بالقوانين الكلاسيكية — فالجينات على حدِّ قوله بالغةُ

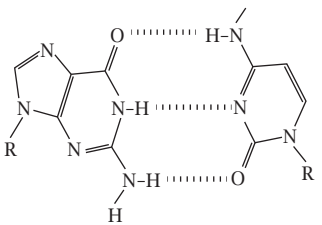



(أ)



زوجان قاعديان **A·T**

(ب)



زوجان قاعديان **G·C**

(جـ)

شكل ٧-١: بِنْية الحمض النووي: (أ) يُبين اللولب المزدوج الذي اكتشفه واتسون وكريك، (ب) يعرض صورةً مقربة للحرفَين الجينيَّين المقترنَين A وT؛ (جـ) يعرض صورة مقربةً للحرفين الجينيَّين المقترنين G وC. لقد رُسمت الروابط الهيدروجينية — وهي البروتونات المشتركة — التي تربط القاعدتَين بخطوطٍ متقطِّعة. في اقتران القواعد المعياري هذا الذي اقترحه واتسون وكريك، تكون القواعد في شكلها الطبيعي غير التاوتوميري.

الصغر، ولا يمكن أن يعتمد انتظامُها على قواعدِ «تولُّدِ النظام من اللانظام» — اقترح أن الجينات لا بد أنها نوعٌ من «البلورات غير الدورية». فهل الجينات بلورات غير دورية؟

عادةً ما يكون للبلورات، مثلِ حبيبات الملح، أشكالٌ مميزة. فبلورات كلوريد الصوديوم (مِلح المائدة) مكعَّبة الشكل، ولكن جُزيئات الماء في الثلج عبارةٌ عن مَناشيرَ سداسيةِ الأضلاع والتي تظلُّ تكبر حتى تُكوِّن الأشكال المتنوعة على نحوٍ رائع للندف الجليدية. تَنتج هذه الأشكالُ عن الطرق التي يمكن من خلالها أن تتجمع الجزيئات بعضها مع بعض داخل البلورة؛ ولذا في النهاية تحكمها القوانين الكمية التي تُحدِّد شكل الجزيئات. لكن البلورات العادية، على الرغم من أنها تتَّسِم بدرجةِ تنظيمٍ عالية، لا تُشفر قدرًا كبيرًا من المعلومات لأن كلَّ وحدة مكررة لا تختلف عن بقية الوحدات الأخرى — وهو أمرٌ يُشبه إلى حدٍّ ما ورقَ الحائط ذي نمطِ الفُسَيفساء — ومن ثم فبإمكانِ قاعدةٍ بسيطة أن تصف البلورة بكاملها. اقترح شرودنجر أن الجينات عبارةٌ عما أسماه بلورات غير دورية، بمعنى أنها بلورات ذات بِنْية جزيئية متكرِّرة مُماثلة للبلورات القياسية، ولكنها معدَّلة بطريقةٍ ما، على سبيل المثال، بوجودِ فتراتٍ أو مُددٍ مختلفة بين التَّكرارات أو بِنْيات مختلفة في التَّكرارات؛ إنها أشبهُ بنسيجٍ جداري منقوش معقَّد منها إلى ورق الحائط. اقترح أن هذه البِنيات المكرَّرة المعدَّلة تُشفر المعلومات الجينية، وأن ترتيبها، كما هو الحال في البلورات، سيُشفَّر على المستوى الكمي. تذكَّر أن هذا الاقتراح كان قبل عَقدٍ من عمل واتسون وكريك؛ أي: سنوات قبل معرفة بِنْية الجينات أو حتى تركيبها.

هل كان شرودنجر مُحقًّا؟ أولُ نقطة واضحة هي أن شفرة الحمض النووي تتكوَّن في الحقيقة من بِنيةٍ متكررة، وهي قواعد الحمض النووي، كما أنها غير دورية بمعنى أن كل وحدةٍ متكررة يمكن أن تَشغَلها قاعدةٌ من القواعد الأربعة المختلفة. الجينات في واقع الأمر بلوراتٌ غير دورية، تمامًا مثلما تنبَّأ شرودنجر. لكن ليس لِزامًا أن تُشفر البلورات غير الدورية المعلومات على المستوى الكمِّي؛ أي: إن الحبيبات غير المنتظمة على لوحٍ فوتوغرافي تتكوَّن من بلوراتِ ملح فضِّي، وهي ليست كمِّية. ولمعرفة هل شرودنجر كان مُحقًّا أيضًا بشأن ما إذا كانت الجينات عبارةً عن كياناتٍ كمية أم لا؛ فينبغي أن نتعمَّق أكثرَ في بِنية قواعد الحمض النووي، ولا سيما في طبيعةِ اقتران أزواج القواعد المكمِّل، اقتران القاعدة T بالقاعدة A والقاعدة C بالقاعدة G.

إن الاقتران في الحمض النووي الذي يحمل الشفرة الجينية متجذرٌ في الروابط الكيميائية التي تربط القواعد المكملة بعضها مع بعض. كما ذكرنا من قبل، تُسمى هذه الروابط بالروابط الهيدروجينية، وتتكوَّن من بروتونات أحادية، هي في الأساس أنويةُ ذرَّات هيدروجين تتشاركها ذرَّتان؛ حيث تكون ذرةٌ في كلٍّ من القواعد المكملة في الجديلتين، وهي التي تربط القواعد المقترنة بعضها ببعض (ارجع إلى الشكل ٧-١). ينبغي أن تقترن القاعدة A مع القاعدة T؛ لأن كل قاعدة A تحمل بروتونات في المواقع المناسبة تمامًا لتكوين روابطَ هيدروجينيةٍ مع القاعدة T. القاعدة A لا تقترن مع القاعدة C؛ لأن البروتونات لا تستقرُّ في الأماكن الصحيحة لعمل الروابط.

هذا الاقتران لقواعد النكليوتيد الذي تتوسَّطه البروتونات هو الشفرة الجينية التي تُضاعَفُ وتُمرَّر في كل جيل. لكن تلك ليست عمليةَ نقلٍ للمعلومات تتم مرةً واحدة، وكأنها رسالةٌ مشفرة تُكتَب على لوحة «تُستخدم مرةً واحدة» ثم تُدمَّر بعد الاستخدام. إذ ينبغي ألا تنقطع قراءةُ الشفرة الجينية طيلةَ حياة الخلية؛ من أجل توجيهِ آليةِ تصنيع البروتينات كي تُصنع محركاتُ الحياة، المتمثلةُ في الإنزيمات، ممَّا يؤدي إلى تناغُمِ كل الأنشطة الأخرى للخلية. هذه العملية يُنفذها إنزيمٌ يُسمى «بوليميراز الحمض النووي الريبوزي»، الذي، مثل بوليميراز الحمض النووي، يقرأ مواضع بروتونات التشفير تلك بطولِ سلسلة الحمض النووي. ومثلما يتحدَّد معنى رسالةٍ أو حبكةِ كتابٍ بمواضع الحروف في إحدى الصفحات؛ فإن مواضع البروتونات في اللولب المزدوج تُحدِّد قصة الحياة.

كان عالم الفيزياء السويدي بير–أولوف لوفدين أولَ مَن أشار إلى ما يبدو واضحًا عند تأمُّله الآن؛ وهو أن موضع البروتونات تُحدده قوانينُ كَمية وليست كلاسيكية. إذن، فالشفرة الجينية التي تجعل الحياةَ ممكنة هي شفرةٌ كمية لا محالة. كان شرودنجر مُحقًّا؛ تُكتب الجينات بحروفٍ كمية، ودقةُ عملية الوراثة توفِّرها قوانينُ كمية وليست كلاسيكية. ومثلما يتحدَّد شكلُ البلورة في النهاية بقوانين كمية؛ فإن شكل الأنف ولونَ العينين وجوانب الشخصية لدينا تُحددها قوانينُ كمية تعمل داخل بِنيةٍ تتكوَّن من جزيءٍ واحد من الحمض النووي يُورث من أحد الأبوَين. وكما تنبَّأ شرودنجر، فإن الحياة تعمل عبر نظام يمتدُّ بدايةً من بِنية وسلوك الكائنات الحية بكاملها وحتى موضع البروتونات بطول جديلتي الحمض النووي — أي: تولُّد النظام من النظام — وهذا النظام هو المسئول عن دقةِ عملية الوراثة.

لكن حتى المضاعفات الكمية ترتكب أخطاءً عرَضيَّة.

## عدم الدقة

ما كان للحياة أن تتطور على كوكب الأرض وتتكيَّف مع العديد من التحديات التي واجهَتْها؛ لو كانت عمليةُ نسخ الشفرة الجينية مثاليةً على الدوام. على سبيل المثال، كانت الميكروبات التي تسبح في بُحيرات قارة أنتاركتيكا المعتدلة منذ آلاف السنين ستتكيَّف على الحياة في بيئةٍ دافئة ومُشمسة نسبيًّا. وعندما حجَب السقف الجليدي عالَمها، كانت الميكروبات التي نسخَت جينوماتها بدقةٍ تامة ستَهلِكُ على نحوٍ شبه مؤكد. لكن العديد من الميكروبات أحدثَت بضعة أخطاء في عملية النسخ وولَّدَت خلايا وليدةً ذات طفراتٍ تختلف عنها قليلًا. كانت ستزدهرُ تلك الخلايا الوليدة ذات الاختلافات التي مكَّنَتها من أن تحيا في بيئةٍ أشدَّ برودةً وأكثرَ ظُلمة، وتدريجيًّا على مدار آلافِ أحداث النُّسخ غير المثالية تمامًا، كان نسلُ تلك الميكروبات المحاصرة سيتكيَّف جيدًا على الحياة في البحيرة المغمورة.

مرةً أخرى، إن عملية التكيُّف هذه التي تتمُّ عبر الطفرات (أي: أخطاء تضاعف الحمض النووي) داخل بحيرة فوستوك عبارةٌ عن نموذجٍ مصغَّر للعملية التي تحدث في الكون من حولنا منذ مليارات السنين. لقد مرَّت الأرض بالعديد من الكوارث الكبرى على طول تاريخها الطويل، بدايةً من الانفجارات البركانية العظمى إلى العصور الجليدية واصطدامات النيازك. وما كان للحياة أن تستمرَّ لو لم تتكيَّف مع التغيير عبر أخطاء النسخ. وما يتَّسم بالقدر نفسِه من الأهمية أن الطفرات كانت أيضًا المحفِّزَ على التغيُّرات الجينية التي حوَّلَت الميكروبات البسيطة التي تطورَت على كوكب الأرض في البداية إلى المحيط الحيوي الهائل التنوُّع الموجود اليوم. وهكذا يكون القليلُ من عدم الدقة مفيدًا، إذا مُنح الوقت الكافي.

بالإضافة إلى اقتراح أن ميكانيكا الكم كانت مصدرَ الدقة في عملية الوراثة، قدَّم إرفين شرودنجر اقتراحًا جريئًا آخرَ في كتابه الذي صدر عام ١٩٤٤ بعنوان «ما الحياة؟» افترض أن الطفرات قد تُمثل نوعًا من القفز الكمي داخل الجين. فهل هذا الاقتراح معقول؟ للإجابة على هذا السؤال، نحتاج أولًا إلى استعراضِ جدلٍ يتعلق بجوهر نظرية التطور.

## الزرافة والبازلاء وذبابة الفاكهة

كثيرًا ما يُقال إن التطوُّر «اكتشفه» تشارلز داروين، لكن حقيقة أن الكائنات الحية قد تغيَّرَت على مدار الأزمنة الجيولوجية كانت مألوفةً لدى علماء التاريخ الطبيعي لمدة قرنٍ

على الأقل قبل داروين عبر دراسة الحفريات. في الحقيقة، كان جَد تشارلز — إيرازموس داروين — من أشد أنصار فكرة التطور. لكن ربما أشهر نظرية عن التطور قبل داروين قد طرحَها أرستقراطيٌّ فرنسي يحمل اسمًا مثيرًا للإعجاب وهو جان–باتيست بيير أنطوان دو مونيه، شوفالييه دو لامارك.

وُلد لامارك عام ١٧٤٤، وقد تدرَّب ليكون كاهنًا يسوعيًّا، ولكن لما مات والده ورث مالًا مكَّنه بصعوبة من شراء حصانٍ امتطاه كي يكون جُنديًّا ويُقاتل في الحرب البوميرانية ضد بروسيا. لم تستمرَّ حياته العسكرية طويلًا بسبب إصابته، ومن ثَم عاد إلى باريس وعمل موظفًا في أحد البنوك، وأخذ يدرس علم النبات والطب في أوقات فراغه. في النهاية، وجد وظيفةً وأصبح مساعدًا نباتيًّا في قصر الملك، حتى أطاحت الثورة برأسِ ربِّ عمله. لكن ازدهر حالُ لامارك في فرنسا بعد الثورة وشغَل منصبًا في جامعة باريس، حيث حوَّل تركيز دراساته من النباتات إلى اللافقاريات.

يُعد لامارك من العلماء العظام الذين لم يَلْقَوا التقدير الذي يستحقُّونه، على الأقل في العالم الأنجلوسكسوني. فبالإضافة إلى صياغة مصطلح biology (علم الأحياء) (المشتق من الكلمة اليونانية bios وتعني الحياة)؛ فقد توصَّل إلى نظرية للتطوُّر قدمَت على الأقل آليةً معقولة للتغيير التطوري، وذلك قبل نصف قرنٍ من داروين. أشار لامارك إلى أن الكائنات الحية قادرةٌ على تعديل أجسامها استجابةً للبيئة على مدار حياتها. على سبيل المثال، عادةً ما يكتسب المزارعون الذين اعتادوا على الكدح الجسدي الشاقِّ أجسامًا قوية أكثرَ من العاملين في البنوك. زعم لامارك أن هذه التغيرات المكتسَبة يمكن أن ترِثَها الذريةُ والأحفاد؛ ومن ثم تُحفز التغير التطوري. أشهر الأمثلة وأكثرها تعرضًا للسخرية هو مثال الظبي الخيالي الذي مدَّ عنقه ليتغذَّى على أوراق الأشجار العالية. اقترح لامارك أن ذرية الظبي ورثَت تلك السمة المكتسبة المتمثلة في طول العنق، ومرَّ نسلها بالعملية ذاتِها حتى تطوَّر وأصبح في النهاية زرافات.

بوجهٍ عام، استُهزئ بنظرية لامارك عن التغيُّر التكيُّفي الموروث في العالم الأنجلو سكسوني، حيث توافرَت الأدلة على أن السِّمات التي يكتسبها الحيوان في عمره ليست موروثةً بوجهٍ عام. على سبيل المثال، سكان شمال أوروبا ذوو البشرة الفاتحة الذين هاجروا إلى أستراليا منذ مئات السنين تسمرُّ بشرتهم من التعرض للشمس بوجهٍ عام إذا قضَوا وقتًا طويلًا خارج المنزل، ولكن عند الاحتجاب عن الشمس سيكون أولادهم ذوي بشَرةٍ فاتحة مثل أسلافهم. من الواضح أن التغيُّر التكيفي استجابةً لأشعة الشمس القوية

— أو الاسمرار — لا يورَّث. لذا، فبعد إصدار كتاب «أصل الأنواع» عام ١٨٥٩، غطت نظريةُ الانتقاء الطبيعي الخاصةُ بداروين[٤] على نظرية لامارك التطورية.

النسخة المؤكَّدة اليوم من نظرية التطور هي نسخة داروين؛ إنها تلك التي تدور حول فكرة البقاء للأصلح، وأن الطبيعة التي لا ترحم تُفضل الأفراد القادرين على التكيُّف على نحوٍ جيد على الذرية الأقلِّ كفاءة. لكن الانتقاء الطبيعي لا يُمثل سوى نصفِ قصة التطور. فحتى ينجح التطور، فلا بد للانتقاء الطبيعي من مصدرٍ للتباين كي يبدأ به. كان هذا لغزًا كبيرًا أمام داروين لأن عملية الوراثة، حسبما اكتشفنا من قبل، تتَّسم بدرجةٍ عالية للغاية من الدقة. قد لا يتجلَّى هذا من فوره في الكائنات ذاتِ التكاثر الجنسي التي يبدو أنها تختلف عن آبائها، ولكن التكاثر الجنسي يُعيد فقط مزْجَ السِّمات الأبَوية الحاليَّة كي يولد الذرية. في الواقع، ساد اعتقادٌ عام في أوائل القرن التاسع عشر بأن امتزاج السمات في التكاثر الجنسي أشبهُ بمزج الدهانات. إذا أخذتَ عدة مئات من صفائح الدهان ذات ألوانٍ متنوعة، ومزجتَ نصف صفيحة مع نصفِ صفيحة أخرى، وكرَّرتَ تلك العملية آلافَ المرات، فسينتهي بك الأمر بعدة مئاتٍ من الصفائح ذات الدهان الرمادي؛ أي إن التبايُن الفردي سيتحول تدريجيًّا باتجاهِ المتوسط في الجماعة السكانية. لكن داروين احتاج إلى استمرار الحفاظ على التباين وفي واقع الأمر الزيادة عليه، إذا كان له أن يكون مصدرَ التغير التطوري.

اعتقد داروين أن التطوُّر قد سار على نحوٍ تدريجي جدًّا عن طريق الانتقاء الطبيعي الذي يعتمد على قدرٍ ضئيل من التباين الوراثي:

> يعمل الانتقاء الطبيعي بالاحتفاظ بالتعديلات الوراثية المتناهية الصِّغَر وتراكمها، التي يُعد كلٌّ منها مفيدًا للكائن الحي؛ ومثلما نبَذ تقريبًا علمُ الجيولوجيا الحديثُ أفكارًا مثل أن تحفر موجةٌ فيضيةٌ واحدة واديًا كبيرًا، فستَنبِذ نظريةُ الانتقاء الطبيعي، إذا تبيَّنَت أنه مبدأٌ صحيح، الاعتقادَ باستمرارِ خلقِ كائنات عضوية جديدة، أو أي تعديل كبير ومفاجئ في بِنيتها.[3]

لكن كان مصدر تلك المادة الخام للتطور — «التعديلات الوراثية المتناهية الصغر» — لغزًا كبيرًا. إن حالات الغرابة أو «الشذوذ» في السِّمات الوراثية كانت معروفةً جيدًا لدى علماء الأحياء في القرن التاسع عشر؛ على سبيل المثال، وُلد حمَلٌ بسيقانٍ قصيرة للغاية في مزرعة بنيو إنجلاند في أواخر القرن الثامنَ عشر وقد رُبِّي كي يُنتج سلالةً قصيرةَ

السيقان تُسمى «أنكون»، وهي تُعد أسهلَ في السيطرة عليها حيث إنها لا تستطيع قفز الأسوار. وعلى الرغم من ذلك، اعتقد داروين أن حالات الشذوذ هذه لا يمكن أن تكون العناصرَ المحفزة للتطور لأن التغييرات المَعنيَّة كانت كبيرةً للغاية؛ ومن ثَم تولَّدَت في الغالب مخلوقاتٌ غريبة لا يُحتمل أن تتحمَّل الحياة في البرِّية. اضطُرَّ داروين إلى أن يبحث عن مصدرٍ لتغييرات قابلةٍ للتوارث أصغر وأقلَّ دراميةً لتوفير التبايُنات المتناهية الصغر المطلوبة كي تكون نظريتُه صحيحة. لم يتمكَّن أبدًا من حلِّ هذه المشكلة طيلة حياته. وفي واقع الأمر، في الإصدارات اللاحقة من كتاب «أصل الأنواع»، لجأ حتى إلى شكلٍ من نظرية لامارك التطورية من أجل توليدِ تبايُنات طفيفة قابلة للتوارث.

اكتُشف بالفعل جزءٌ من الحل في حياة داروين على يد الراهب ومُربي النباتات التشيكي جريجور مندل الذي قابلناه في الفصل الثاني. أوضحت تجارِبُ مندل على البازلاء أن التباينات الصغيرة في شكل البازلاء أو لونها تُورَث في واقع الأمر على نحوٍ ثابت؛ وهذا يعني أن هذه السِّمات لم تمتزج بل تنتقل على نحوٍ نقي جيلًا بعد جيل، على الرغم من حدوث تَخطٍّ للأجيال في كثيرٍ من الأحيان إذا كانت السِّمة متنحيةً وليست مُهيمنة. اقترح مندل أن هناك «عواملَ» وراثية مميزة — وهي ما نُسميه الآن الجينات — تشفر السمات البيولوجية، وتُعد مصدرَ التبايُن البيولوجي. إذن، بدلًا من استخدام صفائحِ الدهان الممتزجة لتصوُّرِ التكاثر الجنسي، لنستخدِم أوعيةً مليئة بكرات البلي ذاتِ التنوُّع الكبير في الألوان والأنماط. يُبدِّل كل جيلٍ مختلط نصف كرات البلي من أحد الأوعية بنصف كرات البلي من وعاءٍ آخَر. الأهم من ذلك أنه حتى بعد آلاف الأجيال، فإن كُرات البلي الفردية تحتفظ بألوانها المميزة، تمامًا مثلما يمكن نقلُ السمات من دون تغييرٍ لمئات أو حتى آلاف الأجيال. ومن ثَم تُوفر الجينات مصدرًا ثابتًا للتبايُن يمكن أن يعمل على أساسه الانتقاءُ الطبيعي.

تعرَّض عمل مندل في الغالب إلى التجاهل في حياته، ونُسي من بعد موته؛ ومن ثم، وعلى حدٍّ علمي، فإن داروين لم يطَّلع على نظريةِ مندل بشأن «العوامل الوراثية» ولم يُدرك أنها حلٌّ مُحتمل لأُحجية المزج. وهكذا، أدَّت مشكلة البحث عن مصدرٍ للتغييرات الوراثية التي تُحفز التطورَ إلى خفض الدعم لنظرية داروين عن التطور قُبيل نهاية القرن التاسع عشر. ولكن مع بداية القرن الجديد، أفكار مندل أحياها العديدُ من علماء النبات ممَّن كانوا يدرسون تهجين النباتات والذين اكتشفوا قوانينَ تحكم توارث التباينات. ومثل كلِّ العلماء الجيدين الذين يعتقدون أنهم اكتشفوا شيئًا جديدًا، فقد بحَثوا في المؤلفات

الموجودة قبل أن يَنشروا نتائجَهم، وقد اندهشوا حينما اكتشفوا أن قوانينَ الوراثة التي توصَّلوا إليها كان قد وصَفها مندل قبل بضعة عقود.

اكتشاف عوامل مندل مرةً أخرى — التي تُسمى الآن «الجينات»[٥] — أوجد حلًّا لأحجية داروين الخاصةِ بالمزج، ولكنه لم يحلَّ على الفور مشكلةَ العثور على مصدر التباين الجيني الجديد اللازم لتحفيز التغيُّر التطوري على المدى الطويل، حيث بدا أن الجينات تُورَّث من دون تغيير. يمكن أن يعمل الانتقاءُ الطبيعي على تغيير مَزيج كُرات البلي الجينيَّة في كل جيل، ولكنه لا يصنع أيَّ كُرات جديدة من تلقاء نفسه. حُلَّت هذه المعضلة على يد أحد علماء النبات الذين أعادوا اكتشاف مبادئ الوراثة المندلية، وهو هوجو دي فريس الذي كان يمشي في حقل بطاطس ووقعَت عيناه على سلالةٍ جديدة تمامًا من زهرة الربيع المسائية، تُسمَّى «أخدرية لامارك»، وكانت أطولَ من السلالات المعتادة وكانت بَتلاتُها بيضاويةَ الشكل وليست على شكلِ قلبٍ كما هو معتاد. أدرك أن هذه الزهرة عبارةٌ عن «طفرة» والأهم من ذلك أنه بيَّن أن الصفات المتحوِّرة نُقلت إلى نسل النبات، ومن ثم جرى توارُثها.

أخذ عالم الوراثة توماس هانت مورجان دراسةَ دي فريس عن الطفرات إلى المختبر بجامعة كولومبيا في أوائل القرن العشرين، ونفَّذ عمله على ذبابة الفاكهة التي يسهل التعامل معها. عرَّض هو وفريقُه الذبابَ إلى أحماضٍ قوية وأشعَّة سينية وموادَّ سامة في محاولةٍ لتخليق طفرات. وفي نهاية المطاف، في عام ١٩٠٩، برَزَت ذبابةٌ من شرنقتها بعينَين بيضاوين، وأثبت الفريق أن السِّمة المتحورة تولدَت مثل الجين المندلي، كما كان الأمر مع زهور الربيع ذات الشكل الغريب التي اكتشفها دي فريس.

المزجُ بين الانتقاء الطبيعي الداروينيِ ونظريةِ الطفرات ومبادئ الوراثة لدى مندل؛ أدَّى في النهاية إلى ما يُعرف في الغالب باسم التوليف الداروينيِ الجديد. لقد فُهم أن الطفرات هي المصدرُ النهائي للتباينات الجينية الموروثة التي تكون في الغالب ذاتَ تأثيرٍ طفيف وفي بعض الأحيان حتى ضارَّة، ولكنها تجعل، من آنٍ لآخرَ، الطافراتِ أصلحَ من آبائها. بعد ذلك تتدخَّل عملية الانتقاء الطبيعي للتخلُّص من الطافرات الأقلِّ صلاحيةً في جماعةٍ سكَّانية ما، وفي الوقت ذاته تسمح للضروب الأنجح بالبقاء والتكاثر. في النهاية، تُصبح الطافرات الأصلحُ هي القاعدة، ويستمرُّ التطور عن طريق «الاحتفاظ بالتعديلات الموروثة المتناهية الصِّغر وتراكمها».

أحدُ المُكونات الأساسية في التوليف الداروِيني الجديد مبدأ أن الطفرات تحدث عشوائيًّا؛ أي إن التباين لا ينتج استجابةً لتغيير تطوري. ومن ثم عندما تتغير البيئة، تُضطرُّ الأنواع إلى انتظارِ حدوث الطفرة المناسبة — عبر عملياتٍ عشوائية — من أجل أن تتتبع هذا التغيير. وهذه الفكرة مناقضةٌ لفكرة لامارك عن التطور التي تُشير بدلًا من ذلك إلى أن التكيُّف الموروث — رقبة الزرافة الطويلة — ينتج عن الاستجابة إلى التحدِّيات البيئية ويُورث بعد ذلك.

في أوائل القرن العشرين، لم يكن واضحًا هل حدثَت الطفرات الموروثة عشوائيًّا — كما يعتقد الداروينيون الجدد — أم أنها نتجَت استجابةً إلى التحديات البيئية، حسبما يعتقد اللاماركيون. تذكَّرْ أن مورجان عرَّض الذباب لموادَّ كيميائية ضارةٍ أو إشعاع لتوليد طفرات. واستجابةً للتحديات البيئية، ربما أنتج الذبابُ ضروبًا جديدة ساعدَته على التصدي لتلك التحديات. وكما هو الحال مع زرافة لامارك، فربما «مدَّت عنقها» مَجازيًّا ثم نقلت تلك السِّمة التكيُّفية إلى ذرِّيتها في صورةِ طفرة موروثة.

سعَت التجارِبُ الكلاسيكية التي أجراها سلفادور لوريا — المشرف على رسالة الدكتوراه لجيمس واتسون — وماكس ديلبروك بجامعة إنديانا في عام ١٩٤٣ لاختبار النظريتَين المتنافستَين. حينذاك، كانت البكتيريا قد حلت محلَّ ذباب الفاكهة، وأصبحت الكائناتِ المفضَّلةَ في دراسات التطور؛ نظرًا إلى سهولة نموِّها في المختبر وسرعة تكاثرها. كان معروفًا أن البكتيريا يمكن أن تُصاب بالفيروسات، ولكن إذا تكرَّر تعرُّضها لها فسرعان ما تُطور مقاومةً لها عن طريق اكتساب الطفرات. وهذا وفَّر وضعًا مثاليًّا لاختبار النظريتين المتنافستَين عن الطفرات المتمثلتَين في الداروينية الجديدة واللاماركية. سعى لوريا وديلبروك لاكتشافِ ما إذا كانت الطافرات البكتيرية القادرة على مقاومة العدوى الفيروسية موجودةً بالفعل بين الجماعة البكتيرية، كما ترى النظرية الداروينية الجديدة، أم ستنشأ فقط استجابةً للتحدي البيئي المتمثل في الفيروس، كما ترى النظرية اللاماركية. وجد العالمان أن الطافرات ظهرَت بالمعدل ذاته تقريبًا؛ سواءٌ أكانت الفيروسات موجودة أم لا. بعبارة أخرى، لم يتأثر معدلُ التطفُّر بالضغط الانتقائي للبيئة. إن تَجارِبَهما جعلتهما يحوزان جائزةَ نوبل عام ١٩٦٩ وأرسَتْ مبدأ عشوائية الطفرات باعتباره حجرَ زاويةٍ في علم الأحياء التطوري الحديث.

لكن عندما كان لوريا وديلبروك يُجريان تجارِبَهما عام ١٩٤٣، لم يكن أحدٌ يعلم ممَّ كانت تتكون الجينات، ولا ما الآليات الفعلية المسئولة عن توليد الطفرات؛ أي: تحول

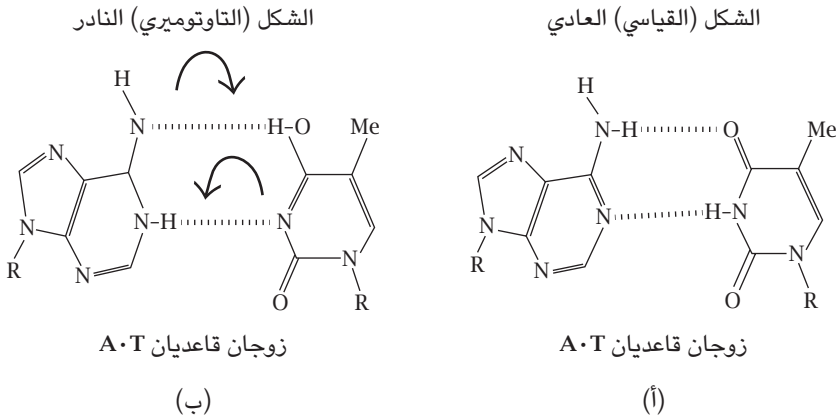
جين إلى جينٍ آخَر. كل هذا تغيَّر عام ١٩٥٣ حينما كشف واتسون وكريك النقاب عن اللولب المزدوج. تبيَّن أن الجينات تتكوَّن من الحمض النووي. وحينها بدا المبدأ القائل بأن الطفرات عشوائية منطقيًّا تمامًا، حيث إن الأسباب المعروفة لإحداث الطفرات مثل الإشعاع أو المواد الكيميائية المُسببة للطفرات عادةً ما تُتلف جزيء الحمض النووي بطريقةٍ عشوائية بطوله بالكامل، مما يسبب الطفرات في أيِّ جينات تتأثر بها، بغضِّ النظر ما إذا كان التغيير قد قدم ميزة أم لا.

في ورقتهما البحثية الثانية عن بنية الحمض النووي،[4] أشار واتسون وكريك إلى أن العملية التي تُسمى التشكُّل التاوتوميري، الذي يتضمَّن حركة البروتونات داخل الجزيء، قد تكون سببَ الطفرات. إننا على يقينٍ الآن من إدراك القارئ أن أيَّ عملية تتضمَّن حركة الجسيمات الأساسية مثل البروتونات يمكن أن تندرج تحت ميكانيكا الكم. إذن، هل كان شرودنجر مُحقًّا؟ هل الطفرات نوعٌ من القفز الكمي؟

## التشفير باستخدام البروتونات

انظر مرةً أخرى إلى النصف السفلي من الشكل ٧-١. سترى أننا رسمنا الرابطةَ الهيدروجينية، التي هي كما تتذكَّر عبارةٌ عن بروتونٍ مشترك، في صورةِ خطٍّ متقطع بين ذرتَين (الأكسجين والنيتروجين) في القواعد المقترنة. ولكن أليس البروتون جُسيمًا؟ لماذا إذن يُرسَم على هيئةِ خطٍّ متقطع بدلًا من نقطةٍ واحدة؟ السبب بالطبع هو أن البروتونات عبارةٌ عن كيانات كمية تمتلك خصائصَ الجسيمات والموجات في آنٍ واحد؛ لذا فإن البروتون غيرُ متمركز إذ يتصرف مثل كيانٍ منتشر أو موجة تتدفق عشوائيًّا بين القاعدتَين. موضع القاعدة H في الشكل ٧-١ الذي يُشير إلى أرجَحِ موضعٍ للبروتون هو ليس في المنتصف بين القاعدتين، بل إنه يميل لأحد الجانبين؛ أي: إنه أقربُ إلى إحدى الجديلتَين. عدم التماثل هذا مسئول عن سمةٍ شديدة الأهمية للحمض النووي.

لنتأمَّلْ زوجَين قاعديَّين مُحتملين مثل A–T، حيث تُصبح القاعدة A في جديلة، والقاعدة T في الجديلة الأخرى، وتربط بينهما اثنتان من الروابط الهيدروجينية (البروتونات) بحيث يُصبح بروتونٌ أقربَ إلى ذرة النتروجين في القاعدة A، والبروتونُ الآخَرُ أقربَ إلى ذرة الأكسجين في القاعدة T (انظر الشكل ٧-٢أ)، مما يُتيح تكوُّنَ الرابطة الهيدروجينية A:T. لكن تذكر أن كلمة «أقرب» مفهومٌ غامض في العالم الكمِّي الذي ليس للجسيمات فيه موضعٌ ثابت ولكن تكتنفُها عدةُ احتمالات بأن تكون في عدةِ أماكنَ




شكل ٧-٢: (أ) زوجان قاعديَّان A–T قياسيَّان بروتوناهما في موضعَيهما الطبيعيَّين، (ب) هنا قفز البروتونان المقترنان عبر اللولب المزدوج لتكوين شكلٍ تاوتوميري من القاعدتَين A وT.

مختلفةٍ في آنٍ واحد، بما في ذلك الأماكن التي لا يمكن الوصولُ إليها إلا عبر النفق الكمِّي. وإذا قفز كلٌّ من البروتونين الرابطين بين الحروف الجينية إلى الجانب الآخر من الروابط الهيدروجينية المَعنيَّة، فسينتهي بهما الأمرُ إلى أن يكونا أقربَ إلى القاعدة المقابلة. وهذا يؤدي إلى تكوُّنِ أشكالٍ بديلة من كل قاعدة تُسمَّى «الأشكال التاوتوميرية» (انظر الشكل ٧-٢ب). لذلك يمكن أن تُوجَد كلُّ قاعدة من قواعد الحمض النووي في شكلها القياسيِّ المعروف، كما هو واضحٌ في بِنية اللولب المزدوج الخاصة بواتسون وكريك، وكذلك في الشكل التاوتوميري الأشدِّ ندرةً مع نقل بروتونات التشفير الخاصة بها إلى مواضعَ جديدة.

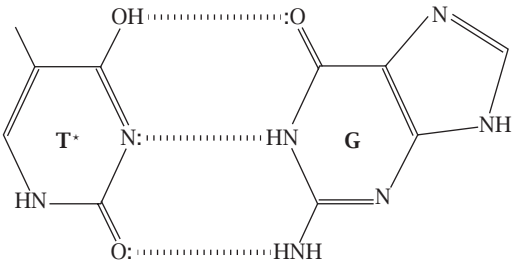
لكن تذكَّرْ أن البروتونات التي تُكوِّن الروابط الهيدروجينية في الحمض النووي هي المسئولة عن تحديدِ شكل اقتران القواعد المستخدَم في تضاعف الشفرة الجينية. ومن ثم إذا تحرَّك زوجا بروتوناتِ التشفير (في الاتجاهَين العكسيَّين)، فإنهما فِعليًّا يُعيدان كتابةَ الشفرة الجينية بنجاح. على سبيل المثال، إذا كان حرفٌ جيني في جديلة الحمض النووي هو T (الثايمين) وكان في شكله العادي، فإنه يقترن على نحوٍ صحيح بحرف A. لكن إذا حدث تبديلٌ لمكان البروتونين فإن كلًّا من الحرف T والحرف A سيتَّخذان شكلهما التاوتوميري. بالطبع قد تقفز البروتونات عائدةً مرةً أخرى، لكن إذا حدث وأصبحَت في أشكالها التاوتوميرية النادرة[٦] في وقتِ نسخ جديلة الحمض النووي، فإنه يمكن

دمجُ القواعد الخاطئة في جدائل الحمض النووي الجديدة. فيمكن أن تقترن القاعدة T التاوتوميرية مع القاعدة G بدلًا من القاعدة A، ومن ثم ستدمج القاعدة G في الجديلة الجديدة في المكان الذي كانت فيه القاعدة A. في الجديلة القديمة وبالمثل، إذا كانت القاعدة A في حالتها التاوتوميرية وقتَ تضاعُف الحمض النووي، فإنها ستقترن بالقاعدة C بدلًا من القاعدة T، ومن ثم ستحتوي الجديلة الجديدة على القاعدة C في المكان الذي كانت فيه القاعدة T في الجديلة القديمة (انظر الشكل ٧-٣). في أيٍّ من الحالتين، فإن جدائل الحمض النووي المكونة حديثًا ستحمل طفرات؛ أي: تغييرات في تسلسل الحمض النووي سترثُها الذُّرية.

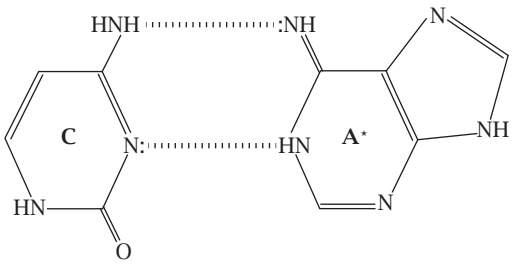
على الرغم من أن هذه الافتراضية منطقيةٌ تمامًا، فإنه لم يكن الحصول على دليلٍ مباشر عليها بالأمر السهل؛ لكن في عام ٢٠١١؛ أي بعد نحو ٦٠ سنةً من نشر واتسون وكريك لورقتهما البحثية، تمكَّنَت مجموعةٌ من المركز الطبي بجامعة ديوك بالولايات المتحدة من إثبات أن قواعد الحمض النووي المقترنةَ على نحوٍ غير صحيح ذاتَ البروتونات التي في الموضع التاوتوميري يمكن في واقع الأمر أن تدخل الموقعَ النشط لبوليميراز الحمض النووي (أي: الإنزيم الذي يُخلِّق حمضًا نوويًّا جديدًا)، ومن ثم يُحتمَل أن تُدمَج في الحمض النووي المتضاعف حديثًا بحيث تتسبَّب في طفرات.[5]

إذن، يبدو أن الأشكال التاوتوميرية — ذات مواضع البروتونات البديلة — هي التي تقف وراء الطفرات، ومن ثم التطور، لكن ما الذي يجعل البروتونات تنتقل إلى الموضع الخطأ؟ الاحتمال «الكلاسيكي» الواضحُ هو أنها «تهتز» من حينٍ لآخَر بسبب الاهتزازات الجزيئية المستمرَّة التي تحدث في كل مكان حولها. ولكن هذا يتطلب توفُّرَ قدرٍ كافٍ من الطاقة الحرارية لتوفير القوة الدافعة، أي: «الهزة». ولكن كما هو الحال مع التفاعلات المحفزة بالإنزيمات التي تناولناها في الفصل الثالث، فعلى البروتون أن يتغلَّب على حاجز طاقة يصعب اختراقه كي يتحرَّك. بدلًا من ذلك، قد تُدفع البروتونات عن طريق الاصطدام بجزيئاتِ ماء قريبة، لكن لا تُوجَد جزيئاتُ ماء كثيرة على مقربةٍ من بروتونات التشفير في الحمض النووي بحيث توفر لها تلك الدفعة.

لكنَّ هناك مسارًا آخَر، وُجد أنَّ له دورًا مُهمًّا في الطريقة التي تتبعها الإنزيماتُ لنقل الإلكترونات والبروتونات. إن إحدى تَبِعات الطبيعة الشبيهة بالموجة للجسيمات دون الذرية مثل الإلكترونات والبروتونات؛ هي احتمالية حدوث عملية النفق الكمي. فعدم تموضع أيِّ جُسيم يُتيح له أن «يتسرَّب» من خلال أيِّ حاجزِ طاقة. عرَفنا في الفصل الثالث




الجوانين (الكيتو) الثيامين (الإينول)




الأدينين (الإيمينو) السيتوسين (الأمينو)

شكل ٧-٣: حينما تكون القاعدة T في شكلها التاوتوميري (الإينول)، المشار إليها بـ T* في الشكل، فإنها يمكن أن تقترن على نحوٍ غير صحيح بالقاعدة G بدلًا من شريكتها المعتادة، A. وبالمثل، فإن الشكل التاوتوميري للقاعدة A (A*) يمكن أن يقترن على نحوٍ غيرِ صحيح بالقاعدة C بدلًا من القاعدة T. وإذا أُدمجت مثلُ هذه الأخطاء في أثناء تضاعف الحمض النووي، فستُنتج طفرة.

كيف أن الإنزيمات تستخدم النفقَ الكميَّ للإلكترونات والبروتونات عن طريقِ تقريب الجزيئات من بعضها البعض بالقدْر الكافي حتى تحدُث عملية النفق. بعد عقدٍ من نشر واتسون وكريك ورقتَهما البحثية المهمة، أشار عالم الفيزياء السويدي بير-أولوف لوفدين — الذي قابلناه من قبلُ في هذا الفصل — إلى أن النفق الكميَّ يمكن أن يوفِّر طريقةً بديلة حتى تتحركَ البروتونات عبر الروابط الهيدروجينية كي تولِّدَ الأشكال التاوتوميرية المسبِّبة للطفرات للنكليوتيدات.

ينبغي التأكيدُ على أن طفرات الحمض النووي تُسببها مجموعةٌ من الآليات المختلفة، منها تلفٌ تُسبِّبه الموادُّ الكيميائية والأشعة فوق البنفسجية وجسيمات التحلُّل الإشعاعي وحتى الأشعة الكونية. تحدث كلُّ تلك التغييرات على مستوى الجزيئات؛ ومن ثَم يمكن أن تتضمَّن عملياتٍ ميكانيكيةً كمية. لكن لا يُوجَد أيُّ دليل حتى الآن على أن الجوانب الغريبة لميكانيكا الكم لها دورٌ في مصادر الطفرات هذه. لكن إذا تبيَّن أن النفق الكميَّ مُتضمَّنٌ في تكوين أشكال تاوتوميرية لقواعد الحمض النووي، فربما يكون للغرابة الكمية دورٌ في الطفرات التي تُحفز التطور.

لكن الأشكال التاوتوميرية لقواعد الحمض النووي لا تُمثل أكثرَ من ١ بالمائة من كل قواعد الحمض النووي الطبيعية، وربما يعني ذلك أخطاءً بالنسبة ذاتها. وهذا معدلٌ أعلى بكثير من معدلِ واحدٍ في المليار أو نحو ذلك، وهو المعدل الخاصُّ بالطفرات التي نجدها في الطبيعة؛ لذلك فإذا كانت القواعد التاوتوميرية موجودةً بالفعل في اللولب المزدوج، فيجب إزالة معظم الأخطاء الناتجة عن طريق عمليات تصحيح الخطأ («التدقيق») المختلفة التي تساعد على ضمان الدقة العالية لتضاعف الحمض النووي. ومع ذلك، فإن تلك الأخطاء التي تنتج عن النفق الكمي، والتي تُفلِت من آلية التصحيح؛ قد تكون مصدرًا للطفرات التي تحدث بنحوٍ طبيعي والتي تقف وراء تطور الحياة على الأرض.

لا تكمن أهميةُ فَهم الآليات الكامنة وراء الطفرات في فَهمنا للتطور فحسب، بل إنها أيضًا قد تُسلط الضوء على كيف تتطور الأمراض الوراثية، أو كيف تصبح الخلايا سرطانية، حيث إن هذين النوعين من العمليات تُسببهما الطفرات. لكن المشكلة في اختبارِ ما إذا كان النفق الكمي ضالعًا في ذلك أم لا؛ هي أنه لا يمكن ببساطةٍ تنشيطُه أو عدم تنشيطه، وهذا على خلاف أسباب الطفرات الأخرى المعروفة؛ مثل مُسببات الطفرات الكيميائية أو الإشعاع. ومن ثم فليس سهلًا أن نَقيس معدلات الطفرات في وجود النفق الكمي وفي غيابه لنرى هل هناك اختلاف فيها أم لا.

لكن قد تكون هناك طريقةٌ بديلة لاكتشافِ أصلٍ ميكانيكي كمي للطفرات، وهي تعود إلى الفرق بين المعلومات الكلاسيكية والمعلومات الكمية. يمكن قراءةُ المعلومات الكلاسيكية ثم إعادة قراءتها مِرارًا وتَكرارًا من دون تغييرِ فحواها، لكن الأنظمة الكمِّية تضطرب دومًا بالقياس. ومن ثم فعندما يفحص إنزيم بوليميراز الحمض النووي إحدى قواعد الحمض النووي كي يُحدد موضع بروتونات التشفير، فإنه يجري قياسًا كَميًّا، لا يختلف من حيث المبدأُ عن القياس الذي يقوم به الفيزيائيُّ لتحديد موضع أحد البروتونات

في المختبر. في العمليتَين، يكون القياس مُضرًّا؛ فوَفقًا لميكانيكا الكم، أيُّ قياس لا بد أن يُغير حالة الجزيء الخاضع للقياس، بغضِّ النظر عمَّا إذا كان القياس أجراه إنزيمُ بوليميراز الحمض النووي داخل خلية، أم عدادُ جايجر في المختبر. إذا تناظرَت حالة هذا الجزيء مع حرفٍ في الشفرة الجينية، فيتوقَّع أن يتسبَّب القياس — لا سيما القياس المُتكرر — في تغيير تلك الشفرة، وربما في إحداث طفرة. فهل يُوجَد أيُّ دليل على ذلك؟

على الرغم من أن جينومنا بالكامل يُنسَخ في أثناء تضاعف الحمض النووي، فإن معظم «قراءات» جيناتنا لا تحدُث في أثناء تضاعُف الحمض النووي، بل في أثناء العمليتَين اللتَين تُستخدَم فيهما المعلومات الجينية لتوجيه تخليق البروتينات. يُطلق على أولى هاتَين العمليتَين اسمُ «التناسخ»، وتتضمَّن نسخ المعلومات المشفَّرة من قِبَل الحمض النووي إلى الحمض النووي الريبوزي، الذي هو القريب الكيميائي للحمض النووي. ثم ينتقل الحمض النووي الريبوزي إلى مصنع تخليق البروتينات لعمل البروتينات؛ وهذه هي العملية الثانية ويطلق عليها اسم «الترجمة». لتمييز هاتَين العمليتَين عن نسخ المعلومات الجينية في أثناء تضاعف الحمض النووي؛ سنُشير إليهما باسم «قراءة» الحمض النووي.

من السِّمات الأساسية في هذه العملية أن بعض الجينات تُقرأ أكثرَ بكثير من غيرها. إذا كانت قراءة الحمض النووي في أثناء عملية التناسخ تنطوي على قياسٍ كمي، فسيُتوقع أن تخضع الجينات التي تكثر قراءتها لمزيدٍ من الاضطرابات التي يُحفزها القياس، مما يؤدي إلى ارتفاع معدلات الطفرات. هذا بالفعل ما زُعم أنه تبيَّن في بعض الدراسات. على سبيل المثال، درَس أبيجيت داتا وسو جينكس-روبرتسون من جامعة إيموري بولاية أتلانتا الأمريكية، جينًا واحدًا في خلايا الخميرة بحيث قُرئ إما بِضعَ مراتٍ لتخليق كمياتٍ صغيرة من البروتين في الخلية أو مراتٍ عديدةً لتخليق كميات كبيرة من البروتين. اكتشفا أن معدل الطفرات في الجين كان أعلى بمقدار ثلاثين ضعفًا عندما قُرئ بمعدلات أكبر.[6] وقد توصلت دراسةٌ مماثلة على خلايا الفئران إلى الناتج ذاتِه،[7] وقد توصَّلَت دراسةٌ حديثة على الجينات البشرية إلى أن الجينات التي جرَت قراءتها بأعلى معدلاتٍ عادةً ما تتعرض لأعلى مقدارٍ من الطفرات.[8] وهذا على الأقل يتَّسق مع تأثير القياسات الميكانيكية الكمية، ولكن بالطبع لا «يُثبت» أن ميكانيكا الكم ضالعةٌ في العملية. تتضمَّن قراءة الحمض النووي تفاعلاتٍ كيميائيةً حيوية يمكن أن تُشوش أو تُتلف البِنية الجزيئية للجينات بطرقٍ مختلفة عديدة، مما يؤدي إلى الطفرات من دون أن يكون هناك أيُّ دخل لميكانيكا الكم.

لاختبارِ ما إذا كانت ميكانيكا الكم لها يدٌ في أي عملية بيولوجية أم لا؛ فإننا نحتاج إلى أدلةٍ يصعب أو يستحيل فَهمُها من دون ميكانيكا الكم. في الحقيقة، لغزٌ من تلك النوعية كان هو ما أثار اهتمامَنا نحن الاثنين بالدَّور الذي ربما تلعبه ميكانيكا الكم في علم الأحياء.

## الجينات والقفز الكمي

في سبتمبر ١٩٨٨، نشرَت مجلةُ «نيتشر»[9] ورقةً بحثية عن علم الوراثة البكتيري من تأليف عالم وراثة بارز جدًّا اسمه جون كيرنز، الذي يعمل لدى كلية الصحة العامة بجامعة هارفارد ببوسطن. بدا أن تلك الورقة تتناقضُ مع المبدأ الأساسي في النظرية التطورية الداروينية الجديدة، الذي يقول إن الطفرات — التي تُعد مصدرَ التباين الجيني — تحدث عشوائيًّا وإن اتجاه التطور يوفِّره الانتقاء الطبيعي؛ أي: مبدأ «البقاء للأصلح».

كيرنز، وهو عالم وفيزيائي بريطاني تلقَّى تعليمه في أكسفورد، عمل في أستراليا وأوغندا قبل أن يأخذ إجازةَ تفرغٍ علمي عام ١٩٦١ كي يعمل لدى مختبر كولد سبرينج هاربور المشهور عالميًّا بنيويورك. ومن عام ١٩٦٣ حتى ١٩٦٨، تقلَّد منصبَ المدير في المختبر الذي كان أرضًا خِصبة لعلم الأحياء الجزيئي الناشئ، لا سيَّما في ستينيَّات القرن العشرين وسبعينيَّاته حينما تتضمَّن العلماءَ العاملين هناك شخصيات مثل سلفادور لوريا وماكس ديلبروك وجيمس واتسون. في الحقيقة، كان كيرنز قد التقى مع واتسون منذ سنواتٍ عديدة، حينما كان يُلقي العالمُ الأشعث بعض الشيء — الذي كان سيحوز جائزةَ نوبل فيما بعدُ — عرضًا تقديميًّا غيرَ مترابط في اجتماعٍ بجامعة أكسفورد، لكنه لم يُعجب به كثيرًا؛ في الواقع، كان انطباعُ كيرنز العام عن أحد العلماء الخالدين كما يلي: «أعتقد أنه شخصٌ مجنون تمامًا.»[10]

في مختبر كولد سبرينج هاربور، قام كيرنز بالعديد من الدراسات البارزة. على سبيل المثال، أثبت كيف تبدأ عمليةُ تضاعف الحمض النووي عند نقطةٍ محددة، ثم تتحرك بطول الكروموسوم، وكأنها قطارٌ يسير على قضيبين. كذلك، لا بد أنه في النهاية قد حدَث تفاهمٌ بينه وبين جيمس واتسون؛ لأنهما في عام ١٩٦٦ اشتركا في تحرير كتاب عن دور الفيروسات البكتيرية في تطور علم الأحياء الجزيئي. وفي تسعينيات القرن العشرين، اهتمَّ بالدراسة السابقة التي حاز عليها لوريا وديلبروك جائزةَ نوبل، التي بدا أنها أثبتَت أن الطفرات تحدث عشوائيًّا، قبل أن يتعرض الكائن الحي إلى أي تحدٍّ بيئي. اعتقد كيرنز أن

تصميم تجرِبة لوريا وديلبروك كان فيه ضعف، ومِن خلاله أثبتا أن الطافرات البكتيرية المقاومة للفيروسات موجودةٌ على نحوٍ مسبق في البكتيريا، ولا تنشأ استجابةً للتعرض إلى الفيروسات.

أشار كيرنز إلى أن أيَّ بكتيريا لم تكن مقاوِمةً بالفعل للفيروس ما كان سيكون لديها الوقتُ لتطوير طفرات جديدة بطريقةٍ تكيفية استجابةً للتحدي؛ لأن الفيروس كان سيقضي عليها بسرعةٍ كبيرة. وتوصل إلى تصميم تجرِبة بديل أعطي البكتيريا فرصة أفضل لتطوير طفرات استجابةً للتحديات. فبدلًا من البحث عن الطفرات التي تمنح مقاومةً لفيروس مميت، قام بتجويع الخلايا وبحَث عن طفرات تُمكن البكتيريا من البقاء على قيد الحياة والنمو. ومثل لوريا وديلبروك، رأى أنه تمكنَت بِضعُ طافرات من النمو مباشرةً، مما أظهر أنها كانت موجودةً مسبقًا في الجماعة البكتيرية، ولكن على خلاف الدراسة السابقة، لاحظ ظهورَ العديد من الطافرات بعد مدة، على ما يبدو «استجابةً» للتجويع.

تعارضَت النتيجة التي توصل إليها كيرنز مع المبدأ الراسخ بأن الطفرات تحدث عشوائيًّا؛ إذ بدا أن تجارِبه تُثبت أن الطفرات عادةً ما تحدث عندما تمثل ميزة. بدا أن النتائج تدعم نظرية التطور اللاماركية السيِّئةَ السمعة؛ لم تكن البكتيريا الجائعةُ تنمو لديها رقبةٌ طويلة مثل الظبي الخيالي الذي ذكره لامارك، ولكن بدا أنها تستجيبُ إلى تحدٍّ بيئي عن طريق توليد تعديلات موروثة تتمثَّل في الطفرات.

سرعان ما أكَّد عدة علماء آخَرين النتائج التجريبية التي توصَّل إليها كيرنز. لكن الظاهرة لم يكن لها تفسيرٌ داخل نطاق علم الوراثة الحديث وعلم الأحياء الجزيئي. ببساطةٍ لم تكن هناك آليةٌ تُتيح للبكتيريا — أو في الواقع أي مخلوق — أن «يختار» الجينات التي يجب أن تحدث فيها طفرةٌ ومتى. بدا كذلك أن النتائج تتعارض مع ما يُطلَق عليه في بعض الأحيان المبدأ الأساسي في علم الأحياء الجزيئي الذي يقول إن المعلومات لا تتدفَّق إلا باتجاهٍ واحد في أثناء عملية التناسخ، من الحمض النووي إلى البروتينات ثم إلى بيئة الخلية أو الكائن الحي. وإذا صحَّت نتائجُ كيرنز، فلا بد أن الخلايا قادرةٌ أيضًا على عكس تدفُّق المعلومات الوراثية، مما يتيح للبيئة أن تؤثر على ما يُكتَب في الحمض النووي.

أثار نشر الورقة البحثية الخاصة بكيرنز عاصفةً من الجدل وانهالت الخطاباتُ على مجلة «نيتشر» في محاولةٍ لِفَهم تلك النتائج. ولما كان جونجو عالمًا في علم الوراثة

البكتيري، فقد أصابته حيرةٌ شديدة بشأن ظاهرة «الطفرات التكيفية»، كما أصبحَت تُعرف فيما بعد. حينذاك، كان يقرأ كتابًا عامًّا عن ميكانيكا الكم، وهو كتاب «البحث عن قطة شرودنجر» الشهير للكاتب جون جريبين،[11] ولم يستطع منع نفسِه من التساؤل عمَّا إذا كانت ميكانيكا الكم، لا سيما عملية القياس الكمي الغامضة، يمكن أن تقدِّم تفسيرًا لنتائج كيرنز. كان جونجو على دراية أيضًا بزعمِ لوفدين أن الشفرة الوراثية تُكتب بحروفٍ كمية، ومن ثم إذا كان لوفدين على صواب، فسيُعتبر جينوم بكتيريا كيرنز نظامًا كميًّا. وإذا صحَّ ذلك، فإن التساؤل عن الوجود المسبق للطفرات سيُعَد بمنزلةِ قياسٍ كمي. فهل يمكن أن يُقدم التأثير المُربِك للقياس الكميِّ تفسيرًا لنتائج كيرنز الغريبة؟ لاستعراض تلك الاحتمالية؛ ينبغي إلقاءُ نظرة أقرب على الإعداد التجريبي لدراسة كيرنز.

وضع كيرنز ملايين الخلايا من بكتيريا الإشريكية القولونية على سطح هُلام في أطباقٍ تحتوي على غذاءٍ متمثِّل في سكَّر اللاكتوز. سُلالة بكتيريا الإشريكية القولونية التي استخدمها كيرنز كان بها خطأٌ في أحد جيناتها؛ مما جعلها غيرَ قادرة على تناوُل اللاكتوز، ومن ثم تعرَّضَت البكتيريا إلى التجويع. لكن البكتيريا لم تَمُت، لكنها علقَت فقط على سطح الهلام. ما أثار دهشة كيرنز وتسبب في كل هذا الجدل هو أنها لم تظلَّ على هذه الحال مدةً طويلة. فبعد عدة أيام، لاحظ أن مُستعمراتٍ تظهر على سطح الهلام. كانت كلُّ مستعمرة تتكون من طافراتٍ منحدرة من خلية واحدة؛ حيث صحَّحَت طفرةَ الخطأ في شفرة الحمض النووي لجين أكل اللاكتوز المَعيب. استمرَّت المستعمرات الطافرة في الظهور على مدار عدة أيام، حتى جفَّت الأطباقُ في النهاية.

بِناءً على نظرية التطوُّر القياسية كما تجسَّدَت في تجرِبة لوريا وديلبروك، فلا بد أن تطوُّر خلية بكتيريا الإشريكية القولونية قد تطلَّب وجود طافرات سابقة الوجود في الجماعة البكتيرية. ظهرَت بعض هذه الطافرات بالفعل في مرحلةٍ مُبكرة من التجرِبة، ولكن لقلَّتها الشديدة لم تكن لتُفسر كثرةَ المستعمرات الآكلة للَّاكتوز التي ظهرَت سريعًا «بعد» عدة أيامٍ من وضع البكتيريا في بيئة اللاكتوز (حيث يمكن أن تُوفر الطفراتُ ميزةً تكيفية للخلايا، ومن هنا أتى مصطلح «الطفرات التكيفية»).

استبعد كيرنز التفسيرات التافهة لتلك الظاهرة، مثل ازدياد معدل الطفرات بوجهٍ عام. وأثبت أيضًا أن الطفرات التكيفية لا تحدث إلا في بيئاتٍ يُمثل التطفرُ فيها ميزة. لكن النتائج التي توصَّل إليها لا يمكن تفسيرُها بمبادئ علم الأحياء الجزيئي الكلاسيكي؛ بمعنى أنه ينبغي أن تحدث الطفرات بمعدلٍ واحد سواءٌ كان اللاكتوز موجودًا أم لا. ولكن

إذا كانت الجينات، كما زعم لوفدين، في الأساس أنظمةَ معلوماتٍ كمية، فإن وجود اللاكتوز سيُعدُّ على الأرجح بمنزلةِ قياسٍ كمي حيث إنه سيكشف هل تعرَّض الحمض النووي للخلية للتطفُّر أم لا؛ أي إنه حدَثٌ على المستوى الكمي يعتمد على مواضع البروتونات الفردية. فهل القياس الكمي يُفسر الاختلاف في معدلات الطفرات الذي لاحظه كيرنز؟

قرَّر جونجو أن يُخضِع أفكارَه للدراسة في قسم الفيزياء بجامعة سَري. كان جيم من بين المشاهدين، وعلى الرغم من تشكُّكه فإنه كان مُهتمًّا بالأمر. قرَّرنا التعاون معًا لدراسة هل ميكانيكا الكم لها دورٌ في ذلك أم لا، وفي النهاية توصلنا إلى نموذج «مُفرط التبسيط»[٦] اقترحنا أنه يمكن أن يُفسر الطفرات التكيفية، والذي نُشر في مجلة «بيوسيستمز» عام ١٩٩٩.[12]

ينطلق النموذج من افتراض أن البروتونات يمكن أن تتصرَّف على نحوٍ ميكانيكي كمي، ومن ثم ستشقُّ البروتونات الموجودة في الحمض النووي لخلايا بكتيريا الإشريكية القولونية الجائعة نفقًا من آنٍ لآخَر لتصلَ إلى الموقع التاوتوميري (المسبب للطفرات)، ويمكن أن تشقَّ نفقًا بالسهولة نفسِها عائدةً إلى مواضعِها الأصلية. من منظور ميكانيكا الكم، فلا بد أن النظام يعتبر في حالة تراكبٍ بين الحالتين — شق النفق وعدم شقه — مع وصف البروتونات بأنها دالةٌ موجيَّة تنتشر عبر الموقعَين، ولكنها تكون غيرَ متماثلة؛ مما يُعطي احتماليةً أكبر بكثير للعثور على البروتونات في المواضع غير المتطفِّرة. وهنا، لا توجد أداة أو جهاز قياس تجريبي لتسجيل مكان البروتون، ولكن عملية القياس التي تناوَلْناها في الفصل الرابع تُنفذها البيئة المحيطة. يحدث هذا طوالَ الوقت؛ على سبيل المثال، قراءة الحمض النووي بآلية تخليق البروتين يجبر البروتون على «اتخاذ قراره» بشأن أيِّ جانب في الرابطة سيقبع فيه؛ هل في الموضع الطبيعي (عدم النمو) أم في الموضع التاوتوميري (النمو)، وعلى الأرجح أنه سيُوجَد في الموضع الطبيعي.

لنتخيل طبق كيرنز المليء بخلايا الإشريكية القولونية وكأنه صندوقٌ من العملات المعدنية، وكل عملة تُمثل البروتون في قاعدة النكليوتيد الأساسية في جين أكل اللاكتوز.[٨] يمكن أن يوجَد هذا البروتون في حالةٍ من حالتين: حالة «النقش» التي تُمثل الموضع الطبيعي غير التاوتوميري، أو حالة «الكتابة» التي تُمثل الموضع التاوتوميري النادر. نبدأ بوضع كلِّ العملات المعدنية بحيث يكون النقشُ إلى أعلى؛ وذلك حتى تتطابق مع بداية التجرِبة التي يُوجَد فيها البروتون في الموضع غيرِ التاوتوميري. ولكن من منظور ميكانيكا الكم، لا ينفكُّ البروتون يكون في حالةِ تراكب من الموضعَين الطبيعي والتاوتوميري، ومن

ثم ستُصبح العملات الكمية الخاصة بنا على نحوٍ مماثل في حالةِ تراكب من النقش والكتابة، ولكن سيكون القدرُ الأكبر من الموجة الاحتمالية لصالح بقاء النقش إلى أعلى، وهي الحالة الطبيعية. ولكن موضع البروتون ستقيسه بيئتُه المحيطة به داخل الخلية في النهاية، مما يُجبره على «اختيار» الوجه الذي تستقرُّ عليه، وكأنه نوعٌ من رميٍ جُزيئيٍّ للعملة، ولكن الاحتمال الغالب هو أن تستقر على النقش. يمكن نسخ الحمض النووي من وقتٍ لآخر،[٩] ولكن أي جديلة جديدة لن تُشفر سوى المعلومات الوراثية الموجودة، التي تُشفِّر على نحوٍ شِبه دائمٍ الإنزيمَ المعيب، ومن ثم ستستمرُّ الخلية في الجوع.

لكن تذكَّر أن العملية المعدنية تُمثل جسيمًا كَميًّا، وهو بروتون في جديلة الحمض النووي؛ لذا حتى بعد القياس تكون لديها حريةُ العودة إلى العالم الكمي لإعادة إنشاء حالة التراكب الكمي الأصلية. ومن ثم بعد رمي العملة واستقرارها على النقش، فستُرمى مِرارًا وتَكرارًا. وفي النهاية ستستقرُّ على الكتابة. في هذه الحالة، يمكن نسخُ الحمض النووي مرةً أخرى، ولكنه الآن سيُخلِّق الإنزيم النشط. وفي غياب اللاكتوز، لن يُحدث هذا أيَّ فرق لأنه لا فائدة تُرجى من الجين من دون اللاكتوز. إذ ستستمرُّ الخلية في الجوع.

لكن إذا وُجد اللاكتوز، فسيتغيَّر الموقف تمامًا؛ لأن الجين المصحح الذي خلَّقته الخلية سيُتيح للخلية أن تستهلك اللاكتوز وتنموَ وتتضاعف. ومن ثم لن يكون ممكنًا العودةُ إلى حالة التراكب الكمِّي. وسيظل النظام إلى الأبد في العالم الكلاسيكي في صورة خليةٍ متطفرة. يمكننا تصويرُ ذلك — فقط في حالة وجود اللاكتوز — بإخراج العملات القليلة التي استقرَّت على الكتابة من الصندوق ووضعها في صندوقٍ آخرَ مكتوبٍ عليه «الطافرات». بالعودة إلى الصندوق الأصلي، ستستمرُّ عملية رمي العملات المتبقِّية (خلايا الإشريكية القولونية)، وعندما تستقر إحداها على الكتابة، تُخرَج من الصندوق وتُنقَل إلى صندوق الطافرات. وبالتدريج، سيتراكم المزيدُ والمزيد من العملات في صندوق الطافرات. وبإسقاط ذلك على التجرِبة، فإن الطافراتِ القادرةَ على النمو على اللاكتوز ستستمرُّ في الظهور في التجرِبة، تمامًا مثلما اكتشف كيرنز.

نشرنا نموذجَنا عام ١٩٩٩، ولكن لم يؤيِّده الكثيرون. لم يُبالِ جونجو بذلك، وانطلق يكتب كتابًا بعُنوان «التطوُّر الكمي»،[13] الذي زعم فيه أن ميكانيكا الكم لها دورٌ أكبر في علم الأحياء والتطور. لكن تذكر أن هذا كان قبل أن يَلقى دورُ النفق الكمي للبروتونات في الإنزيمات قَبولًا واسعًا، ولم يكن الترابط الكميُّ قد اكتُشف بعد في عملية البناء الضوئي، ومن ثم كان العلماء على حقٍّ في أن يتشكَّكوا بشأن فكرة ضلوع ظواهرَ كمية غريبة في

الطفرات، والحق أننا تغاضَينا عن العديد من الأمور.[14] وكذلك أصبحَت ظاهرةُ الطفرات التكيفية معقَّدة. فقد تبيَّن أن بكتيريا الإشريكية القولونية الجائعة في تجرِبة كيرنز كانت تقتاتُ على العناصر الغذائية الضئيلة التي خلفَتها الخلايا الميتة والمحتضرة، وكانت من آنٍ لآخَر تضاعف الحمض النووي وحتى تتبادله. بدأت التفسيراتُ التقليدية للطفرات التكيفية في الظهور، والتي زعمَت أنها تُفسر ارتفاع معدلات الطفرات المرتفعة من خلال الجمع بين عدة عمليات؛ وهي: الارتفاع العام في معدَّل تطفُّر جميع الجينات، وموت الخلايا وإطلاق الحمض النووي المتطفر من الخلايا الميتة، وأخيرًا الامتصاص والتضخيم الانتقائيَّين لجين اللاكتوز المتطفِّر من قِبل الخلايا الباقية على قيد الحياة التي تمكَّنَت من إدماجه في الجينوم الخاص بها.[15]

لم يتَّضح بعدُ ما إذا كانت هذه التفسيرات «التقليدية» يمكن أن تُفسر الطفرات التكيفية بالكامل أم لا. فبعد خمس وعشرين عامًا من نشر الورقة البحثية الأصلية لكيرنز، لا تزال الظاهرة يكتنفها الغموض، وهو ما شهد عليه توالي ظهور الأوراق البحثية التي تتناول آليَّتها،[16] ليس في بكتيريا الإشريكية القولونية فحسب، بل في العديد من الميكروبات الأخرى. وفي الوضع الحالي، لا نستبعد إمكانيةَ مشاركة النفق الكمي في الطفرات التكيفية، ولكن لا يسَعُنا حاليًّا أن نزعم أنه التفسير الوحيد.

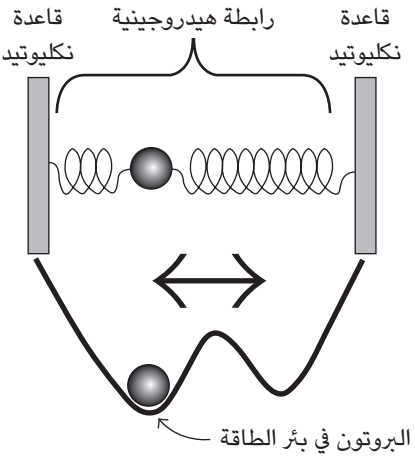
في ظل عدم وجود ضرورةٍ مُلحَّة في إقحام ميكانيكا الكم في الطفرات التكيفية، فقد قرَّرنا مؤخرًا أن نرجع خطوةً ونبحث في سؤالٍ جوهري أكثرَ وهو ما إذا كان النفق الكمي له دورٌ في الطفرات بأي نحوٍ أم لا. وكما ستتذكر، فإن فكرة ضلوع النفق الكمي في الطفرات طُرِحَت لأول مرة على أسسٍ نظرية من قبل لوفدين، ثم دعمَتها منذئذٍ العديدُ من الدراسات النظرية،[17] وكذلك الدراسات التجريبية لما يُطلق عليه «الأزواج القاعدية النموذجية»، وهي عبارةٌ عن موادَّ كيميائية مصمَّمة كي تكون لها خصائصُ اقترانِ القواعد ذاتُها مثل القواعد في الحمض النووي، ولكنها أسهل في التعامل معها في التجارِب. لكن لم يُثبت أحدٌ حتى الآن أن النفق الكمي للبروتونات يُسبب طفرات. المشكلة تكمن في اضطراره إلى المنافسة مع العديد من أسباب الطفرات الأخرى وآليات تصحيح الطفرات، مما يجعل سَبْر أغوار دورها — إن وُجد حتى — أصعب.

لحل تلك المشكلة؛ اقترض جونجو أفكارًا من تجارِب الإنزيمات التي تناولناها في الفصل الثالث، حيث لعلك تتذكَّر أن ضلوع النفق الكمي للبروتونات استُنتج بعدَ اكتشاف «تأثيرات النظائر الحركية». إذا كان للنفق الكمي يدٌ في تسريع تفاعلات الإنزيمات، فإن

استبدال نواة ديوتيريوم (تتكوَّن من بروتون ونيوترون) بنواة هيدروجين (تتكون من بروتونٍ واحد) ينبغي أن يُبطئ التفاعل؛ حيث إن النفق الكميَّ سيكون شديدَ الحساسية تجاه مضاعفةِ كتلة الجسيم الذي يحاول أن يشقَّ النفق. وفي الوقت الراهن، يُجرب جونجو نهجًا مماثلًا بالنسبة إلى الطفرات، إذ يبحث هل معدلات الطفرات مختلفةٌ في المياه التي تحتوي على الديوتيريوم أم لا: $D_2O$ بدلًا من $H_2O$. في وقت كتابة هذا الكتاب، يبدو أن المعدلات تتغيَّر بالفعل بسبب الاستبدال، ولكنَّ هناك عملًا أكثر بكثير ينبغي إنجازه للتأكُّد مما لو كان التأثير ناتجًا بالفعل عن النفق الكمي أم لا؛ حيث إن استبدال الديوتيريوم بالهيدروجين قد يؤثر في العديد من العمليات الجزيئيَّة الحيوية الأخرى، من دون الحاجة إلى أي تفسيرٍ ميكانيكي كمي.

ركَّز جيم على البحث فيما إذا كان النفقُ الكمي للبروتونات في اللولب المزدوج للحمض النووي ممكنًا من المنظور النظري. عندما يتعامل عالِم الفيزياء النظرية مع مشكلةٍ معقَّدة كهذه، فإنه يُحاول إنشاء نموذج مُبسَّط يمكن تتبُّعه رياضيًّا وفي الوقت ذاتِه يحتفظ بالسمات التي يعتقد أنها الأهمُّ في النظام أو العملية. يمكن أن تَزيد تلك النماذج من حيث التعقيدُ والتطور مع إضافة المزيد من التفاصيل؛ بُغية زيادة القرب من مُحاكاة الشيء الحقيقي.

يمكن تصوُّرُ النموذج المختار كي يكونَ نقطةَ الانطلاق للتحليل الرياضي في هذه الحالة على هيئة كرة (تُمثل البروتون) مُثبتة في مكانها من خلال زنبركَين مربوطين في جدارَين (انظر الشكل ٧-٤)، زنبرك في كل جانب بحيث يشدَّان الكرة في اتجاهَين معاكسَين. عادةً ما تستقرُّ الكرةُ في الموضع الذي تكون فيه قوةُ الشدِّ من الزنبركَين متساوية؛ ومن ثم إذا كان أحدُهما أصلب (أي: أقلَّ تمددًا) قليلًا من الآخَر، فإن الكرة ستكون أقربَ إلى الجدار المثبت فيه الزنبرك الأصلب. وعلى الرغم من ذلك، سيظلُّ هذا الزنبرك يحتفظ بقدرٍ من «التمدُّد»، بحيث يمكن أن تستقرَّ الكرة أيضًا في موضعٍ أقلَّ استقرارًا بالقُرب من الجدار الآخر. هذا يتطابق مع ما تُطلق عليه فيزياء الكم «بئر طاقة الوضع المزدوجة»، ويصور موقف بروتون التشفير في جديلة الحمض النووي؛ حيث إن البئر اليُسرى في الشكل تُمثل الموضع الطبيعي للبروتون، أما البئر اليمنى فتُمثل الموضع التاوتوميري الأشد ندرة. ومن المنظور الكلاسيكي، على الرغم من أن البروتون سيوجَد في الغالب في البئر اليسرى، فإنه إذا تلقى دفعةً ذات طاقةٍ كافية من مصدر خارجي، فيمكن أن يقفز من آنٍ لآخَر إلى الجانب الآخر (التاوتوميري). ولكنه سيوجَد دومًا في




شكل ٧-٤: يمكن اعتبار بروتون الرابطة الهيدروجينية الذي يربط موقعَي قواعد الحمض النووي أنه مرتبطٌ بزنبركين، بحيث يمكن أن يتأرجَح من جانبٍ إلى آخر. إن له مَوضعَين مُستقرَّين محتملَين، ممثَّلين هنا على هيئةِ بئر طاقة مزدوجة. البئر اليسرى (التي تُمثل الموضع غير المتطفِّر) أعمقُ قليلًا من البئر اليمنى (التي تُمثل الموضع التاوتوميري)، ومن ثم يُفضل البروتون الاستقرارَ في البئر اليسرى.

إحدى البئرين. وعلى الرغم من ذلك، تُتيح ميكانيكا الكم للبروتون أن يجتاز الحاجزَ عبر نفقٍ على الفور حتى إن لم توجَد طاقةٌ كافية كي يفعل ذلك؛ إنه لا يحتاج بالأساس إلى دفعة. ليس هذا فحسْب، بل إن البروتون يمكن أن يكون من ثم في حالةِ تراكبٍ من حالتَي التموضع (البئرَين اليمنى واليسرى) في آنٍ واحد.

بالطبع رسم صورة أسهلُ بكثير من كتابة نموذج رياضي يصفُ الموقف وصفًا دقيقًا. لفهم سلوك البروتون؛ نحتاج إلى تصوير شكل بئر طاقة الوضع — أو سطح الطاقة — تلك تصويرًا بالغَ الدقة. هذه ليست مسألةً تافهة، حيث إن شكلها الدقيق يعتمد على العديد من المتغيِّرات. فلا تكون الرابطة الهيدروجينية بالأساس جزءًا من بِنية حمضٍ نووي كبيرة ومعقَّدة تتكون من مئات أو حتى آلاف الذرات فحسب، بل إنها أيضًا تكون مغمورةً في حمَّام دافئ من جزيئات الماء وغيرها من المواد الكيميائية داخل الخلية. إضافةً إلى ذلك، يمكن أن تؤثر الاهتزازاتُ الجزيئية والتقلبات الحرارية والتفاعلات الكيميائية

التي تُنشطها الإنزيمات وحتى الأشعة فوق البنفسجية أو إشعاع التأيُّن في سلوك رابطة الحمض النووي؛ سواءٌ كان تأثيرًا مباشرًا أو غير مباشر.

أحد أساليب حلِّ هذا المستوى من التعقيد الذي تبنَّاه آدم جودبير، وهو طالب دكتوراه تحت إشراف جيم؛ يتضمَّن استخدامَ نهجٍ رياضي فعَّال، قد أصبح شائعًا حاليًّا في أوساط علماء الفيزياء والكيمياء فيما يتعلق بنَمْذجة البنيات المعقَّدة، ويُعرف باسم «نظرية الكثافة الوظيفية». هذا الأسلوب يُتيح حساب شكل بئر الطاقة الخاصة بالرابطة الهيدروجينية بدقةٍ شديدة وذلك بمراعاةِ أكبر قدرٍ ممكنٍ من الناحية الحاسوبية من المعلومات البنيوية لزوجَي قاعدةِ الحمض النووي. يمكن تخيلُ وظيفة نظرية الكثافة الوظيفية بأنها توفر خريطةً لكل القُوى التي تؤثر على الرابطة الهيدروجينية نتيجةً لجذب الذرات المحيطة الخاصة بالحمض النووي ودفعها وذبذبتها. عندئذٍ تُستخدَم تلك المعلومات لحساب الطريقة التي تجري بها عملية النفق الكمي للبروتونات بمرور الوقت. هناك تعقيدٌ آخر وهو أن وجود الذرَّات المحيطة في الحمض النووي وكذلك جزيئات الماء يؤثر باستمرارٍ في سلوك البروتون وقُدرته على المرور عبر نفقٍ كمي من جديلة في الحمض النووي إلى الجديلة الأخرى. ولكن هذا التأثير المُستمرَّ من جانب البيئة الخارجية يمكن إدراجُه أيضًا في المعادلات الميكانيكية الكمية. وفي وقتِ تأليف هذا الكتاب؛ أي: في صيف ٢٠١٤، تشير النتائج الأولية التي توصَّل إليها آدم إلى أنه على الرغم من قدرة البروتونين على عبور النفق إلى الموضعين التاوتوميريين الخاصَّين بهما في الرابطة A–T، فإن احتمالية حدوث ذلك ضئيلة جدًّا. لكن ما تُبينه النماذج النظرية هو أن البيئة المحيطة داخل الخلية تساعد، بدلًا من أن تعوق، بنشاطٍ، إتمامَ عملية النفق.

إذن، ما الذي يُمكننا استنتاجه في الوقت الحاضر بشأن الصلة بين ميكانيكا الكم وعلم الوراثة؟ رأينا أن ميكانيكا الكم أساسيةٌ لعلم الوراثة؛ حيث إن الشفرة الجينية تُكتَب بجسيمات كمية. وكما تنبَّأ تمامًا إرفين شرودنجر، فإن الجينات الكمية تُشفِّر البنية والوظيفة الكلاسيكية لكل ميكروب ونبات وحيوان دبَّت فيه الحياة. هذه المسألة ليست من قبيل الصدفة ولا غير ذاتِ صلة؛ لأن نَسْخ الجينات عاليَ الدقة ما كان ليتمَّ إذا كانت تلك الجينات عبارةً عن بنياتٍ كلاسيكية؛ فحجمُها مُتناهي الصغر ولا سبيل أمامها لعدم التأثُّر بالقواعد الكمية. إن الطبيعة الكمية للجينات أتاحَت للميكروبات في بحيرة فوستوك أن تُضاعف جينومها بدقةٍ شديدة على مدار آلاف السنين، تمامًا مثلما أتاحت لأسلافنا أن ينسَخوا جيناتهم على مدار ملايين — بل مليارات — السنين التي يرجع تاريخها إلى بزوغ

الحياة على كوكب الأرض. ما كان للحياة أن تستمرَّ وتتطوَّر على الأرض لو لم «تُكتشف» خدعة تشفير المعلومات في العالم الكمي منذ مليارات السنين.[١٠] وعلى الجانب الآخر، ما زال علينا أن نرى ما إذا كانت ميكانيكا الكمِّ تلعب دورًا مُهمًّا ومباشرًا في الطفرات الجينية؛ أي: «عدم الدقة» تلك في نَسْخ المعلومات الجينية التي تُعتبَر حيوية جدًّا للتطور.

## هوامش

(١) قاع النهر الجليدي الذي يقبع فوق البحيرة اليوم قد تراكَم منذ أكثرَ من ٤٠٠ ألف سنة، ولكن ربما تجمَّدَت البحيرة منذ مدة أطول. ليس معلومًا هل النهر الجليدي الحاليُّ حل محلَّ أنهار جليدية سابقة، أم هل مرَّت البُحيرة بأزمنةٍ من دون جليدٍ بين العصور الجليدية.

(٢) الكائنات التي تعيش في ظروفٍ بيئية قاسية (من وجهة نظرنا).

(٣) السرطانات تُسببها الطفرات في الجينات التي تتحكَّم في نموِّ الخلايا، مما يؤدي إلى نموٍّ غير مُتحكَّمٍ به في الخلايا؛ ومن ثم إلى تكون الأورام.

(٤) بالطبع يمكن تسميتُها نظرية الانتقاء الطبيعي الخاصة بوالاس؛ نسبةً إلى عالم التاريخ الطبيعي والجغرافي البريطاني العظيم ألفريد راسل والاس، الذي توصَّل إلى فكرة داروين ذاتِها تقريبًا، أثناء إصابته بنوبةٍ من حمَّى الملاريا في أثناء سفره في المناطق الاستوائية.

(٥) صِيغَ مصطلح «علم الوراثة» Genetics عام ١٩٠٥ على يد ويليام باتسون، وهو عالم وراثة إنجليزي مؤيدٌ لأفكار مندل، ومصطلح «جين» اقتُرح بعد ذلك بأربعة أعوام على يدِ عالم النبات الدانماركي فيلهلم يوهانسن؛ للتمييز بين المظهر الخارجي للفرد (نمَطُه الظاهري) وجيناته (نمطه الوراثي).

(٦) تُعرَف الأشكال التاوتوميرية البديلة لكلٍّ من الجوانين والثايمين باسم الإينول أو الكيتو، اعتمادًا على موضع بروتونات التشفير؛ في حينِ تُعرف تاوتوميرات السيتوسين والأدينين باسم الكيتو أو الأمينو.

(٧) نقصد بهذا افتقارَه إلى إطارٍ رياضي صارم.

(٨) في الحقيقة، ستكون هناك أكثرُ من رابطة هيدروجين تربط كلًّا من الزوجَين القاعديَّين بالآخَر، ولكن تظلُّ المحاجَّة قويةً بالقدر ذاتِه إذا بسَّطنا الصورة إلى رابطةٍ واحدة فقط.

(٩) قد تستمرُّ الخلايا الجائعة والمجهدة في محاولةِ نسخ حمضها النووي، ولكن على الأرجح ستفشلُ عملية التضاعف بسبب قلة الموارد المتاحة، ولا تنتج سوى امتداداتٍ قصيرة مقابلة لقلةٍ من الجينات.

(١٠) هذا الأمر محلُّ جدلٍ كبير الآن في علم الأحياء الكمي؛ أي: هل الحياة «اكتشفَت» مزاياها الكمية، أم أن ميكانيكا الكم شاركَت في الأمر وحسب؟

الفصل الثامن

# العقل

وُلد جون–ماري شوفيه في مقاطعة فرنسية قديمة اسمها أوفيرن، لكن عندما بلغ الخامسة من عمره انتقل والداه ناحيةَ الجنوب الشرقي إلى آرديش، وهي منطقةٌ بديعة المنظر مُزدانة بأنهارٍ ووديان ضيقة وأخاديدَ مشقوقة في الصخور الجيرية. ولما بلغ جون–ماري الثانية عشرة، اكتشف شغَف حياته حينما ارتدى هو وأصدقاؤه خوذاتِ الحرب العالمية الثانية واستكشَفوا المغارات والكهوف العديدة المشقوقة في جدران وادي آرديش بطول نهره العظيم. ترك المدرسة في عمر الرابعة عشرة، وكان أول عمل له قاطِعَ حجارة ثم عمل كاتبًا في متجر حدائد وفي النهاية عمل حارسًا. لكن استلهامًا من كتاب نوربير كاستريه «حياتي تحت الأرض»، كرَّس جون–ماري كلَّ عطلة نهاية أسبوع مُمكنة لشغفِ طفولته، وهو تسلُّق الأجراف الصخرية الشديدة التحدُّر أو الدخول إلى المغارات المظلمة؛ إذ كان يحلم أن يكون أولَ شخص تقَع عينه يومًا ما على كنزٍ مدفون في كهفٍ غير مستكشَف. يقول في هذا الشأن: «المجهول هو ما يقودنا دومًا. عندما تمشي في كهف، فأنت لا تعرف ما الذي ستعثر عليه. هل ستصِل إلى نهايته عند المنعطف التالي، أم ستكتشف شيئًا رائعًا؟»[1]

في يوم السبت الموافق الثامن عشر من ديسمبر ١٩٩٤، بدأ جون–ماري عطلةَ نهاية الأسبوع، هو — الذي كان حينها في الثانية والأربعين من عمره — وصديقاه اللذان كانا يهويان استكشافَ الكهوف إلييت برونيل–ديشامب وكريستيان هيلير، وأخذوا يتجوَّلون عبر الوديان الضيقة بحثًا عن شيءٍ جديد. لما بدأ وقتُ العصر في الانتهاء وبدأت برودة الهواء تَزيد، قرَّروا استكشاف منطقةٍ تُعرف باسم سيرك ديستر، التي تسقط عليها أشعةُ الشمس الخافتة في وقت العصر؛ ولذا عادةً ما تكون أدفأَ قليلًا من الأجزاء المغطَّاة في الوادي في أيام الشتاء الباردة. تتبَّع الأصدقاء مسارَ بغالٍ قديمًا يتعرَّج بطول الجرف بين

مصاطب من أشجار البلُّوط والبقس الدائمة الخُضرة والخَلَنْج، وتمكَّنوا من رؤية بون دارك بزاويةٍ جيدة عند مدخل الوادي الضيق. ولما كانوا يُجاهدون في السير عبر الشجيرات التحتية، لاحظوا تجويفًا صغيرًا في الصخور يبلغ تقريبًا عرضُه ٢٥ سنتيمترًا وارتفاعه ٧٥ سنتيمترًا.

كانت هذه — بالمعنى الحرفي — دعوةً مفتوحة لهواة استكشاف الكهوف الثلاثة للمرور، وسرعان ما حشروا أنفسهم عبر تلك الفتحة حتى وجَدوا أنفسهم في غرفةٍ صغيرة لا يتجاوز طولُها بضعةَ أمتار وتتَّسِع بصعوبة لهم بحيث يقفون فيها مُنتصِبي القامة. ولم يكد يمرُّ وقتٌ حتى لاحظوا تيارَ هواء ضعيفًا آتيًا من ظهر الغرفة. وأيُّ أحد سبق أن استكشف كهفًا سيكون معتادًا على الإحساس بتيارِ هواءٍ دافئ آتٍ من نفق غير مرئي. إن معظم الممرَّات الخفيَّة معروفة جيدًا لهواة استكشاف الكهوف المتمرِّسين؛ إنها تقبع خلف حُزمة الضوء الضيقة القادمة من المصابيح اليدوية التي يحملونها. لكن تيار الهواء في هذه الغرفة الصغيرة لم يكن آتيًا من أي كهفٍ معروف. تناوَب الفريقُ في إزالة الصخور من ظهر الغرفة حتى حدَّدوا مصدر الهواء؛ إنها قناةٌ تتَّجه عموديًّا إلى الأسفل. أصغرُ أعضاء الفريق، وهي إلييت، كانت أولَ من أُنزِلَت بحبلٍ في الظلام إلى ممرٍّ عمودي ضيق أمكَنها الزحفُ من خلاله. كان الممرُّ يتَّجه في البداية لأسفل ثم صعد مرةً أخرى قبل أن يتَّسع، وعند هذه النقطة استطاعت أن ترى أنها كانت معلَّقة على ارتفاع ١٠ أمتار فوق أرضية طينية. كان ضوء مصباحها اليدوي خافتًا جدًّا بحيث لا يُمكنه إضاءةُ الجدار البعيد، ولكن الصدى الذي عاد من صيحتها في الظلام أخبرها أنها كانت في كهفٍ كبير.

كان الفريق متحمسًا للغاية، ولكنهم اضطُرُّوا إلى الرجوع إلى شاحنتهم الواقفة عند سفح الجرف لإحضار سُلَّم. بعد العودة إلى التجويف، أنزَلوا السُّلم وكان جون–ماري أولَ شخص يصل إلى أرضية الكهف. كانت مغارةً كبيرة بالفعل إذ يبلغ على الأقل ارتفاعُها وعرضها ٥٠ مترًا، وكان بها أعمدة رائعة من الكالسيت الأبيض. توخَّى الثلاثة الحذرَ وهم يشقُّون طريقهم في الظلام، إذ كانوا يمشون على آثارِ خطوات بعضهم البعض كي لا يُكدروا البيئة الأصيلة؛ إذ كانوا يمرُّون بتياراتٍ مائية كبيرة وجدران من الصدف وكذلك وسط عظام وأسنان دببة ماتت منذ مدةٍ طويلة، وكانت مبعثرةً في مآوٍ قديمة للبيات الشتوي محفورةٍ في الأرضية الطينية.

عندما وصل ضوء المصباح اليدوي الذي مع إلييت إلى الحائط، أطلقَت صرخة. لقد وقعت عيناها على خطٍّ من مغرة حمراء يُشكل الهيئة العامة لماموث صغير. مشى الأصدقاء

بطول الحائط من دون كلام وتناوَبوا في تسليط الضوء على أشكال دبٍّ وأسد وطيور مفترسة وماموث آخَر وحتى وحيد قرن وأيادٍ بشرية منقوشة بالإستنسل. قال شوفيه متذكرًا: «ظللتُ أقول في نفسي: «إننا نحلم. إننا نحلم.»»[2]

كانت المصابيح اليدوية التي مع الفريق تفقد طاقتها، ومن ثم عادوا على إثرهم وزحَفوا خارجين من الكهف وقادوا شاحنتهم عائدين إلى منزل إلييت كي يتَناولوا العشاءَ مع ابنتها كارول. لكن رواياتهم العاطفية والمفكَّكة وغير المتماسكة إلى حدٍّ كبير عمَّا قد رأوه أثارت فضولَ كارول لدرجة أنها أصرت على قيامهم بأخذها في التوِّ إلى الكهف؛ حتى تتمكَّن من رؤية تلك الأشياء العجيبة بنفسها.

كان الظلام قد أرخى سُدوله حينما دخلوا إلى الكهف مرةً أخرى، ولكنهم أحضَروا في هذه المرة مصابيحَ يدوية أقوى كشفَت عن كاملِ روعة ما اكتشَفوه، كان هناك العديدُ من المغارات المزيَّنة بمجموعةٍ عجيبة من الحيوانات؛ إذ وجدوا خيولًا وبطًّا وبومةً وأسودًا وضِباعًا وفهودًا وأيائلَ وحيواناتِ ماموث ووعولًا وثيرانَ بيسون. معظم تلك الحيوانات كان مرسومًا بأسلوبٍ رائع وكأنها حيواناتٌ حقيقية، مع وجود تظليل بالفحم ورءوس متداخلة؛ مما يوحي بأنها مُجسَّمة، وبأوضاع ذات جاذبية عاطفية حقيقية. كان هناك صفٌّ من الخيل المتأمِّل على نحوٍ هادئ، وماموث صغير لطيف له أقدامٌ مستديرة كبيرة، وزوجان متشاحنان من وحيد القرن. يوجَد حتى وحيدُ قرنٍ توحي سيقانه السبعة بحركةِ ركض.

أصبح كهفُ شوفيه — كما يُطلق عليه اليوم — من أهم المواقع على مستوى العالم لفنونِ ما قبل التاريخ. ولأنه منطقةٌ أصيلة جدًّا — حيث توجَد حتى آثار الأقدام السليمة لسكانه القدامى — فإنه يبقى مغلقًا وخاضعًا للحراسة؛ للحفاظ على بيئته الرقيقة. يخضع الدخول إلى الكهف لرقابةٍ شديدة، ولا تدخله سوى قلةٍ محظوظة؛ ومن هؤلاء المحظوظين المخرجُ الألماني فيرنر هرتسوك حيث إن فيلمه الذي بعُنوان «كهف الأحلام المنسيَّة» الذي ظهر عام ٢٠١١ هو أحدثُ فيلم سيلجأ إليه معظمنا للاستمتاع بفنِّ الرسم الرائع على الصخور الذي مارَسه الصيادون في العصر الجليدي ممَّن احتمَوا في هذه الكهوف منذ ثلاثين ألف سنة.

ما نريد أن نتناوله في هذا الفصل ليس الصورَ المرسومة على الصخور في ذاتِها، بل اللغز الذي ربما أثاره على أفضلِ نحوٍ اسم فيلم هرتسوك. يتضح من أيِّ مشاهدة للرسومات أنها ليست مجردَ تمثيلات بسيطة لما رأته العين. وغالبًا ما تُجرَّد هذه الرسومات

لاستحضار انطباع الحركة، وهي تستخدِم الثنيات والانحناءات في الصخور كي تُضفِيَ على الحيوانات المرسومة وجودًا ثلاثيَّ الأبعاد تقريبًا.[١] إن هؤلاء الفنانين لم يُصوروا ببساطةٍ أشياءَ، بل رسَموا أفكارًا. إن البشر الذين رسَموا بالصبغات على جدرانِ كهف شوفيه كانوا مثلنا أناسًا يُفكرون في الكون ويتأمَّلون موقعهم منه؛ لقد كانوا واعين بما يدور حولهم.

لكن ما هو الوعي؟ هذا بالطبع سؤال أزعج الفلاسفة والفنانين وعلماء علم الأحياء العصبي، وعلى الأرجح بقية البشر؛ ما دُمنا واعين. في هذا الفصل، سنتخذ الطريق السهل بعدم محاولة تقديم أيِّ تعريف صارم. من وجهة نظرنا في الحقيقة إن السعي لفهمِ تلك الظاهرة البيولوجية التي تُعد هي الأغربَ غالبًا ما يعوقه الإصرارُ الشديد على إيجاد تعريفٍ لها. لا يستطيع علماء الأحياء حتى الاتفاقَ على تعريفٍ موحد للحياة نفسها، ولكن هذا لم يمنعهم من محاولة كشف جوانب الخلية واللولب المزدوج وعملية البناء الضوئي والإنزيمات، ومجموعةٍ من الظواهر الحياتية الأخرى، بما في ذلك قدرٌ كبير من الظواهر التي تُحفزها ميكانيكا الكم، التي قد كشفَت الكثير عما يَعنيه أن يكون الكائن على قيد الحياة.

لقد تناولنا العديدَ من هذه الاكتشافات في الفصول السابقة، ولكن كل ما تناولناه حتى الآن — بدايةً من البوصلات المغناطيسية وصولًا إلى الإنزيمات، ومن البناء الضوئي إلى الوراثة إلى حاسة الشم — يمكن مناقشته من منظور القوانين التقليدية في الكيمياء والفيزياء. ورغم أن ميكانيكا الكم غيرُ مألوفة، لا سيما من منظور العديد من علماء الأحياء؛ فإنها تتَّسق تمامًا مع إطار العلم الحديث. وعلى الرغم من أننا قد لا نفهم على نحوٍ حَدْسي أو منطقي ما يجري في تجربة الشقِّ المزدوج أو التشابك الكمي؛ فإن الأسس الرياضية التي تقوم عليها ميكانيكا الكم تتَّسم بالدقة والمنطق والفاعلية المتناهية.

لكن الوعي شيءٌ مختلف. لا أحد يعرف كيف وأين يتَّسق مع نوعية العلم التي تناولناها حتى الآن. لا توجَد معادلات رياضية (معتبرة) تتضمَّن مصطلح «الوعي»، وعلى خلاف التحفيز أو نقل الطاقة على سبيل المثال، لم يُكتشَف حتى الآن وجودُ وعي في أي شيءٍ غير حي. هل الوعي صفة في «كل» الكائنات الحية؟ لا تعتقد غالبية الناس ذلك، وسيُنيطون الوعي بالكائنات التي تمتلك أجهزة عصبية، ولكن كم من الجهاز العصبي ضروريٌّ من أجل وجود الوعي؟ هل السمك المهرج يشتاق إلى موطنه من الشعاب المرجانية؟ هل أنثى طائر أبي الحناء الأوروبي التي عرَضْنا لرحلتها تشعر حقًّا بضرورة

التحليق جنوبًا كي تقضيَ الشتاء، أم تُراها تمتلك بَرنامَجًا للطيران الآليِّ مثل الطائرة التي بدون طيار؟ معظم أصحاب الحيوانات الأليفة مقتنعون أن كلابهم أو قططهم أو خيولهم واعية؛ ومن ثم هل الوعي موجودٌ في الثدييات؟ كثير ممن يربُّون الببغاوات أو طيور الكناري هم على القدر نفسِه من اليقين بأن حيواناتهم الأليفة أيضًا لها شخصياتها وتتمتع بالوعي مثل القطط التي تُطاردها. لكن إذا كان الوعي شائعًا في كلٍّ من الطيور والثدييات، فربما ورث كِلاهما تلك الصفةَ من سلفٍ مشترك كان يتمتَّع بها، ربما من سلف مثل الزواحف البدائية التي تُسمَّى «السلويات» والتي كانت تعيش قبل أكثرَ من ثلاثمائة مليون سنة، ويبدو أنها أسلاف الطيور والثدييات والديناصورات. إذن، هل التيرانوصور ريكس الذي تعرَّفنا عليه في الفصل الثالث أحسَّ بالخوف حينما غاص في أحد المستنقعات الترياسية؟ وهل الحيوانات البدائية أكثرَ ليست واعيةً حقًّا؟ يُصِر العديد من أصحاب أحواض تربية السمك على أن الأسماك أو الرخويات مثل الأخطبوط واعية، ولكن للعثور على سلف لكل هذه المجموعات؛ علينا العودة إلى ظهور الفقاريات في العصر الكمبري قبل خَمسمائة مليون سنة. فهل الوعي بهذا القِدم حقًّا؟

بالطبع نحن لا نعلم. حتى أصحاب الحيوانات الأليفة لا يسَعُهم غير التخمين؛ فلا أحد يعلم على وجه اليقين كيف يُميز بين السلوك الشبيه بسلوك الإنسان والوعي الحقيقي. ومن دون معرفة «ماهيَّة» الوعي، فلا يمكننا أن نعرف أبدًا أشكالَ الحياة التي تمتلك تلك الصفة. إذن، فإن نهجنا البسيط هو تجنُّب هذه الحُجج والمناقشات، والبقاءُ على الحياد التام بشأن الأسئلة المتعلقة بوقتِ ظهور الوعي على كوكب الأرض، أو ماهيَّةِ أقربائنا في المملكة الحيوانية التي كانت لديها وعيٌ ذاتي. إننا ننطلِق من الإصرار على أن أسلافنا هؤلاء الذين رسَموا أفكار الدببة أو ثيران البيسون أو الخيل البري على جدران الكهف القديم؛ كانوا يتمتَّعون بالتأكيد بالوعي. ومن ثم في وقتٍ ما في آونةٍ خلَت تتراوحُ ما بين قرابة ثلاثة مليارات سنة، حينما خرَجَت الميكروبات لأول مرة من الطين البدائي، وبين عشَرات الآلاف من السنين، حينما زيَّن البشرُ الأوائل هؤلاء الكهوفَ برسومات الحيوانات؛ ظهرَت صفةٌ غريبة في المادة التي تتكون منها الكائنات الحية؛ إذ أصبح بعضُ هذه المادة واعيًا. إن هدفنا في هذا الفصل هو دراسة كيف حدث هذا ولماذا، وكذلك تناول الاقتراح المثير للجدل بأن ميكانيكا الكم كان لها دورٌ رئيسي في ظهور الوعي.

أولًا وانطلاقًا من طريقة عرضنا لموضوعات الفصول السابقة، سنتساءل هل «يلزمنا» اللجوء إلى ميكانيكا الكم كي نُفسر تلك الظاهرة البشرية الأكثر غموضًا أم لا. ومن المؤكد

أنه لا يكفي — كما يفعل البعض — تبنِّي وجهة النظر القائلة بأن الوعي غامضٌ ويصعب تفسيره، وأن ميكانيكا الكم غامضةٌ ويصعب تفسيرها، ومن ثم فلا مَناص من وجود صلةٍ بينهما بنحوٍ أو بآخر.

## ما مدى غرابة الوعي؟

ربما أغرب حقيقة نعرفها عن الكون هي أننا نعرف قدرًا كبيرًا عنه، والفضل في ذلك يعود إلى صفةٍ عجيبة تحوذها أجزاؤها الموجودة داخل جماجمنا؛ أي: عقولنا الواعية. هذا في واقع الأمر غريبٌ للغاية، لا سيما أن وظيفة تلك الصفة الغريبة ليست واضحةً على الإطلاق.

كثيرًا ما يحاول الفلاسفة تدبُّرَ تلك المسألة بتخيُّلِ وجود الزومبي. يُشبه هؤلاء البشرَ تمامًا من حيث ممارسةُ الأنشطة مثل الرسم على جدران الكهوف أو قراءة الكتب، ولكنهم يفتقرون إلى أيِّ حياة داخلية؛ فلا شيء يدور في عقولهم باستثناء الحسابات الميكانيكية التي توجِّه حركةَ أطرافهم، أو الوظائفِ الحركية التي تقف وراء لُغتهم. الزومبي عبارةٌ عن آلاتٍ ذاتية التشغيل، تفتقر إلى الوعي أو الإحساس بالتجرِبة. وكون هذه الكائنات محتملةَ الوجود على الأقل من الناحية النظرية يتَّضح من حقيقة أن الكثير من أفعالنا — مثل المشي، وركوب الدراجة، والحركات اللازمة للعزف على آلةٍ موسيقية مألوفة وغيرها من الأفعال — يُمكننا القيامُ بها من دون وعي (بمعنى أن عقلنا الواعيَ قد لا يكون حاضرًا عندما نقوم بتلك المهام) أو من دون إدراكِ التجارِب السابقة أو تذكُّرها. وفي الحقيقة، عندما نفكر في تلك الأنشطة، يُعاق أداؤنا فيها، وهو ما يُناقض المتوقَّع. يبدو أن الوعي غير ضروري، على الأقل فيما يتعلق بتلك الأنشطة. لكن إذا كانت هناك أنشطةٌ يمكن تنفيذها من دون وعي، فهل يُحتمَل على الأقل أن نتخيل مخلوقاتٍ تُنفذ كل أنشطة البشر بنحوٍ آلي؟

يبدو أن الإجابة هي لا؛ هناك بعض الأنشطة التي يبدو أنه لا غنى عن الوعي فيها، مثل اللغة الطبيعية. يصعب بشدةٍ تخيلُ إجراء محادثة بنحوٍ آلي. سيصعب أيضًا علينا إجراءُ عملياتٍ حسابية صعبة أو حلُّ الكلمات المتقاطعة بنحوٍ آلي. ولا يُمكننا أن نتخيَّل فنانة العصر الجليدي الخاصة بنا (سنتعمد هنا افتراضَ أن الرسام كان أنثى) قادرةً على رسم ثور بيسون من دون أن يكون أمامها شيءٌ سوى جدران الكهف، لو لم تكن واعية.

إن الشيء الذي تشترك فيه كلُّ هذه الأنشطة التي يجب أن تتمَّ بوعيٍ هو أنها مدفوعة بـ «أفكار»، مثل الفكرة التي تقف وراء كلمةٍ ما، أو الحل الخاص بمسألةٍ ما، أو فهم ماهية ثور البيسون ومعناه للإنسان في العصر الحجري. في الواقع، تطرح جدران كهف شوفيه الكثيرَ من الأدلة على أقوى استخدامٍ للأفكار وهو جمعُ العديد منها مع بعضها لتشكيل مفهومٍ جديد. على سبيل المثال، رُسم شكل مستحيل على صخرة معلَّقة، نصفه العُلوي يمثل الجزءَ العلوي لجسم ثور البيسون، ونصفه السفلي على هيئة الجزء السفلي لجسم الإنسان. وشكلٌ كهذا ما كان يمكن إنشاؤه إلا بعقل واعٍ.

إذن، ما هي الأفكار؟ تحقيقًا لأغراضنا؛ سنفترض أن الأفكار تُمثل معلوماتٍ معقَّدة ترتبط معًا في عقلنا الواعي من أجل تكوين مفاهيمَ لها معنى في منظورنا، مثل المعنى، أيًّا ما كان هو، الذي تحمله الصورة التي هي عبارةٌ عن نصف ثور ونصف إنسان، المرسومةُ على الجدار في كهف شوفيه بالنسبة إلى مَن عاشوا في تلك الكهوف. وهذا الضغط للمعلومات المعقدة في فكرةٍ واحدة أُشير إليه في وصفٍ منسوب لموتسارت عن: كيف لمقطوعة موسيقية كاملة أن «تكتمل في رأسي على الرغم من أنها قد تكون طويلة. حينها، يستوعبها عقلي كلمحةِ عين ... وحضورها إلى العقل لا يتم على نحوٍ تتابُعي، بمعنى أن تتحدَّد الأجزاء المتنوِّعة بالتفصيل، كما سيحدث فيما بعد، بل على نحوٍ مجمل.»[3] العقل الواعي قادرٌ على «استيعاب» المعلومات المعقدة ذات «الأجزاء المتنوعة» بحيث يمكن فهم معناها «على نحوٍ مجمل». يُتيح الوعي لعقلنا أن يكون مدفوعًا بالأفكار والمفاهيم، بدلًا من مجرد المثيرات.

لكن كيف تتجمع المعلومات العصبية المعقَّدة معًا في عقولنا الواعية لتكوين فكرة؟ هذا السؤال يُعد أحدَ جوانب اللغز الأول للوعي وهو ما يُطلق عليه في الغالب «مشكلة الربط»؛ كيف تتجمَّع المعلومات المشفرة في مناطقَ مختلفةٍ من الدماغ بعضها مع بعض في العقل الواعي؟ عادةً ما تُصاغ مشكلة الربط فيما يتعلق بالمعلومات المرئيَّة أو غيرها من المعلومات الحسِّية. تذكر على سبيل المثال وصف لوكا تورين المثير للذكريات لرائحة عطر نومبر نوار الذي أنتجته شركة شيسايدو الذي يقول فيه: «كان يجمع ما بين رائحة الورد والبنفسج، ولكن من دون أثرٍ لحلاوة أيٍّ منهما، بل إنه يمكن مقارنته بروائحَ بسيطةٍ وعبقة لأشجار الأرز الإسبانية التي تُستخدم في صنع علب السيجار.» لم يشَمَّ تورين العطر على أنه خليطٌ من الروائح المميزة التي كلٌّ منها مرتبطٌ بتنشيط الخلية العصبية المستقبلة الشمِّية الخاصة به، بل على أنه رائحةٌ واحدة لها نطاقٌ من الروائح والنكهات

المثيرة للذكريات الكامنة فيها، بما في ذلك معنى مجموعةٍ كاملة من المفاهيم المساعدة، مثل السيجار والبنفسج. وبالمثل، لا تُخبر المشاهدُ والأصوات على أنها نِسبٌ محدَّدة من الألوان أو التراكيب أو النغمات، بل باعتبارها ذكرياتٍ ومفاهيم وانطباعات حسِّية متكاملة عن، لنقُل، ثور بيسون أو شجرةٍ أو إنسان.

تخيل الفنانة التي من العصر الحجري القديم الخاصة بنا وهي ترصد ثور بيسون حقيقيًّا. ستجمع عيناها وأنفها وأذناها ومستقبلات اللمس في أصابعها — إذا كان الثور ميتًا — كمًّا هائلًا من الانطباعات الحسِّية عن الحيوان، بما في ذلك رائحتُه وشكله ولونه وملمسه وحركته وصوته. في الفصل الخامس، تناولنا كيف أن الروائح تلتقطها حاسةُ الشم لدينا. لعلك تتذكَّر أن جزيئات المواد ذاتِ الرائحة التي ترتبط بكل خلية عصبية شمية تتسبَّب في «تنشيط» العصب، مما يعني أنها تُرسل إشارةً كهربية بطول محورها العصبي (وهو طرَفُ يد المكنسة في الخلية)، وتسير من الظهارة الشمية في نهاية الأنف إلى البصلة الشمِّية في الدماغ. سنتناول تفاصيلَ عملية التنشيط تلك لاحقًا في هذا الفصل؛ لأنها أساسيةٌ لفهم الوظيفة المحتملة لميكانيكا الكم في أفكارنا. لكن في الوقت الحالي، سنتخيل أن جُزيء رائحةٍ بَقرية ينطلقُ من ثورنا ويدخل إلى أنف الفنانة؛ ومن ثَم يرتبط بمستقبلٍ شمي، ويحفز سلسلةً من النبضات الكهربية لتسير في المحور العصبي الذي يُشبه السلك، وكأنها إشارةُ تلغراف تتكوَّن فقط من نقاط أو إشارات نبضية، بدلًا من النقاط والشُّرط التي في البرقيات.

بمجرد أن وصلت الإشارة العصبية الشمية إلى دماغ الفنانة، حفزَت تنشيط (المزيد من الإشارات النبضية) للعديد من الأعصاب النازلة؛ إذ قفَزَت الإشارة النبضية من عصبٍ إلى آخَر وكان كلُّ عصب بمنزلة محطة ترحيل تلغراف. وقد التُقِطَت بياناتٌ حسِّية أخرى على نحوٍ مُماثل على هيئة إشارات نبضية. على سبيل المثال، كانت المخاريط والنبابيت (وهي خلايا عصبية متخصصة تُشبه الخلايا العصبية الشمية، ولكنها مسئولة عن الاستجابة للضوء وليس المواد ذات الرائحة) التي تُبطن شبَكية العين ستُرسل سلاسلَ من الإشارات النبضية عبر الأعصاب البصرية إلى القشرة البصرية في دماغها. ومثلما استجابت الخلايا العصبية الشمية إلى جزيئات الرائحة الفردية، فإن الخلايا البصرية لم تستجب إلا لسِماتٍ محددة من الصورة التي تقع عليها شبَكيَّتُها؛ بعضُها كان سيستجيب إلى لونٍ مُعين أو أحد ظلال اللون الرمادي، والبعض الآخر إلى حافاتٍ أو خطوطٍ أو تراكيبَ معيَّنة. وبالمثل، استجابت الأعصاب السمعية في أذنها الداخلية إلى الصوت، ربما الأنفاس

الثقيلة لثورٍ طُعن بالرمح، وملمس فروِه كانت ستُحسُّه الأعصاب «الحسَّاسة ميكانيكيًّا» في بشرتها. في كل هذه الحالات، ما كانت كل خلية عصبية حسية لتستجيب إلا لسِماتٍ معينة من المدخلات الحسية. على سبيل المثال، أي خلية عصبية سمعيَّة مُعينة ما كانت لتنشَط إلا إذا دخل صوتٌ له تردُّدٌ محدد إلى أذن الفنَّانة. ولكن، أيًّا كان مصدرها، ما كانت لتتغيَّر الإشارة التي يولِّدها كلُّ عصب؛ إذ تكون نبضةً من الإشارات الكهربية التي تسافر من عضو الحسِّ إلى مناطقَ متخصصةٍ في دماغ الفنانة. وهناك، ربما حفزَت تلك الإشاراتُ مخرجاتٍ حركيةً فورية، ولكن ربما عدلَت أيضًا الاتصال بين الخلايا العصبية كي ترسخ ذاكرة لملاحظاتها عبر مبدأ «الخلايا العصبية التي تنشط معًا ترتبط معًا» الذي يبدو أنه يقف وراء طريقةِ تشفير الذكريات في الدماغ.

النقطة المهمة هنا أنه لا يُوجَد مكانٌ في الخلايا العصبية التي يبلغ عددها ١٠٠ مليار أو نحو ذلك في دماغ الإنسان يتجمَّع فيه هذا التدفُّق الحسي الجارف للإشارات النبضية كي تُكوِّن الانطباع الواعيَ عن ثور البيسون. في الحقيقة، كلمة «تدفق» ليست الكلمةَ المناسبة هنا في واقع الأمر؛ لأنها تشير إلى تجمُّعٍ من نوعٍ ما للمعلومات ضمن ذلك التدفق، وهذا لا يحدث في الخلايا العصبية. بل إن الإشارة العصبية تظل منحسرةً داخل العصب الفردي. لذا، بدلًا من كلمة التدفق، يمكن تصور الأمر على أنه انتقالٌ للمعلومات عبر الدماغ في سلاسل من الإشارات النبضية … الإشارات التي تمر عبر تفرُّعاتٍ فردية لشبكة كبيرة تحتوي على تريليونات الخلايا العصبية. تتمثل مشكلةُ الربط في فهم كيف لكلِّ هذه المعلومات المنفصلة المشفَّرة على هيئة إشارات نبضية أن تُولِّد إدراكًا موحدًا لثور البيسون.

الانطباعات الحسية ليست الوحيدةَ التي تحتاج إلى ربط. المادة الخام للوعي ليست بياناتٍ حسيةً مجردة من سياقها، ولكنها مفاهيمُ ذات معنًى؛ ففي مثال ثور البيسون، نجد الكلمات «مُشعر» أو «كريه الرائحة» أو «مخيف» أو «رائع»، التي كلٌّ منها محمَّلةٌ بقدْر كبير من المعلومات المعقدة. لا بد أن كل هذه الأمور الإضافية قد رُبطت مع الانطباعات الحسِّية لتُكوِّن الانطباعَ عن ثور بيسون مُشعر، كريهِ الرائحة، مخيفٍ إلا أنه رائع، وربَّما تذكَّرتْه فنانتُنا التي من العصر الحجري لاحقًا عندما قدَّمَته في صورة رسومات بالصبغات.[4]

صياغة مشكلة الإطار في إطار الأفكار بدلًا من الانطباعات الحسية؛ يوصلنا إلى لُب مشكلة الوعي، وهو اللغز المتمثِّل في الطريقة التي تُحرك بها الأفكارُ العقول؛ ومِن ثم

الأجساد. نحن لن نعرف البتةَ ما الذي كان يدور على وجه التحديد في عقل فنانتنا من العصر الحجري، ودفَعها إلى الرسم بالصبغات على الصخور. ربما ظنَّت أن رسم ثور البيسون سيَزيد من جاذبية إحدى الزوايا المظلمة، أو ربما اعتقدَت أن رسم الحيوان سيُحسن من فرصِ نجاح زملائها في الصيد. لكن ما يُمكننا التيقنُ منه هو أن الفنانة اعتقدَت أن قرار رسم الثور كان «فكرتها».

لكن كيف لفكرةٍ أن تُحرك مادة؟ عند النظر إليه على أنه شيءٌ كلاسيكي تمامًا، يُعتقد أن الدماغ يتلقَّى المعلومات عبر أحدِ المدخلات الحسية، ثم يُعالج تلك المعلومات لتوليد المخرجات، تمامًا مثل جهاز الكمبيوتر (أو الزومبي). لكن أين يقعُ في تلك الشبكة الهائلة من الإشارات النبضية عقلنا الواعي؛ ذلك الإحساس «بالذات» الذي نحن مُقتنعون بأنه يقود أفعالنا الإرادية؟ ما هذا الذي يُسمَّى «الوعي» بالتحديد وكيف يتفاعل مع مادة الدماغ لتحريك الذراعَين أو الساقَين أو اللسان؟ ليس للوعي أو الإرادة الحرةِ أهميةٌ في كونٍ حتمي بالكامل؛ لأن قوانين السببية لا تسمح إلا بحدوث شيء واحدٍ تلو الآخر في سلسلةٍ لانهائية من الأسباب والنتائج، التي تمتدُّ من كهف شوفيه هذا، وحتى حدث الانفجار الكوني العظيم.

يصفُ جون–ماري اللحظة التي وقعَت عيناه هو وصديقاه فيها على الرسومات في كهف شوفيه قائلًا: «تملَّك منا شعورٌ أننا لم نكن وحدنا؛ فنُفوس الفنانين وأرواحهم كانت تُحيط بنا. اعتقدنا أن بإمكاننا الإحساسَ بوجودهم.»[5] من الواضح أن سكان الكهف كانوا يمرُّون بتجرِبةٍ عميقة، والتي ربما يصفها البعض بأنها روحية. عندما ننظر داخل جمجمة إنسان أو حيوان، فكل ما نجده هو نسيج إسفنجي رطب، لا يختلف كثيرًا عن المادة التي تتكون منها شريحةُ لحم ثور البيسون. ولكن عندما يكون هذا الشيء داخل جمجمة الإنسان، فإنه يعي ويمر بتجارِب ويُكوِّن مفاهيم لا يبدو أنها موجودة في العالم المادي. وبطريقةٍ ما يدفع هذا الشيءُ الأثيري الذي يتمتع بالوعي والتجارب — عقلنا الواعي — مادةَ الدماغ كي تُصدر أفعالنا (أو على الأقل هذا هو انطباعنا). لا ريب أن هذا اللغز، الذي يُطلق عليه في كثير من الأحيان «معضلة العقل والجسد» أو «المشكلة العويصة» للوعي، يُعد بالتأكيد أعمقَ لغز في وجودنا بالكامل.

في هذا الفصل، سنتناول السؤال الآتيَ: هل يمكن أن تُقدم ميكانيكا الكم أيَّ حلول لهذا اللغز العميق؟ في البداية، حريٌّ بنا أن نؤكد على أن أي أفكار عن الوعي تظلُّ تخمينيةً في طبيعتها إلى حدٍّ بعيد، حيث لا أحد يعلم حقًّا ما هو الوعي أو كيف يعمل. لا يُوجَد حتى

إجماع بين علماء الأعصاب وعلماء النفس وعلماء الكمبيوتر والباحثين في مجال الذكاء الاصطناعي على أنه يلزم وجود شيء غير التعقيد الهائل للدماغ البشري من أجل تفسير الوعي.

أولُ ما نبدأ به هو العمليات الدماغية التي أدَّت إلى رسم صورة ثور البيسون على الجدران الجيرية في وادي آرديش.

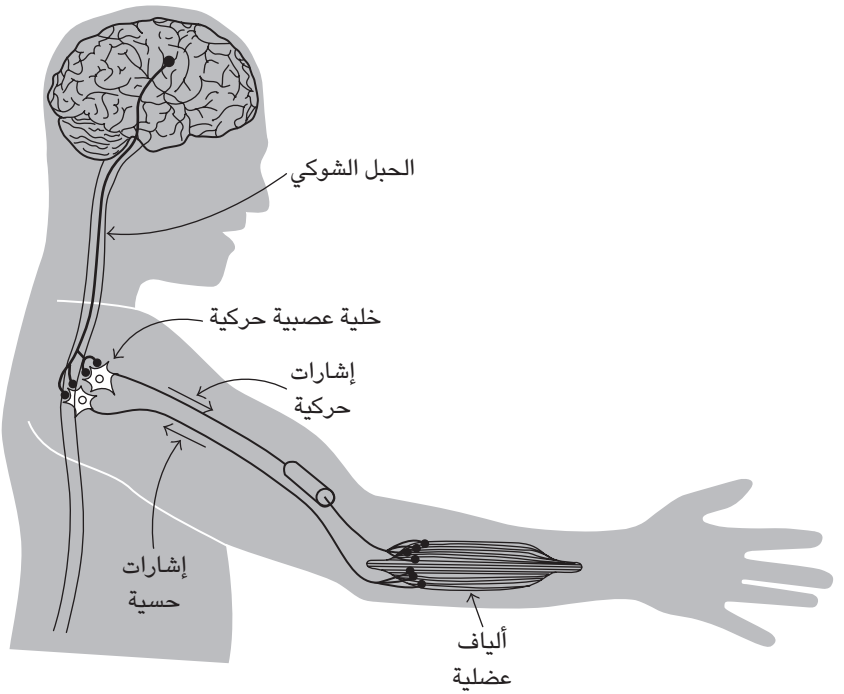
## آليات التفكير

في هذا القسم، سنتتبَّع السلسلة السببية منذ ظهور خط المغرة الحمراء على جدار الكهف قبل ثلاثين ألفَ سنة. هذا التتبُّع سيقودنا بدايةً من انقباض العضلات في ذراع الفنانة التي رسمت هذا الخط، وحتى النبضات العصبية التي تسبَّبَت في انقباض هذه العضلات، والنبضات الدماغية التي نشطَت تلك الأعصاب والمدخلات الحسية التي حرَّكَت سلسلةَ الأحداث تلك. هدفُنا محاولة وضع أيدينا على المكان الذي يُقدم فيه الوعيُ إسهامه في هذه السلسلة السببية، بحيث يُمكننا أن نبحث حينها هل ميكانيكا الكم لها دورٌ في ذلك الحدث أم لا.

يُمكننا أن نتخيَّل المشهد منذ آلاف السنين عندما كانت فنانةٌ غير معروفة، ربما ترتدي جلد دب، تُحدق في ظلمة كهف شوفيه. لقد اكتُشفت الرسومات في أعماق الكهف، ومن ثم ربما اضطُرَّت الفنانة إلى حمل شعلة، وكذلك أواني الصبغات، إلى داخل الكهف. ثم في وقتٍ ما، غمست إصبعَها في إناء الفحم الحجري الملوَّن ورسمَت بالصبغة على الجدار الشكل العام لثور البيسون.

بدأت حركةُ ذراع الفنانة عبر جدار الكهف بفضل بروتين عضلي يُسمى الميوسين. الميوسين عبارةٌ عن إنزيم يستخدم الطاقة الكيميائية لتنشيط انقباض العضلات، والآلية الأساسية لذلك هي أن يجعل الألياف تقترب بعضها من بعض. توصَّل مئاتُ العلماء على مدار عدة عقود إلى تفاصيلِ آليَّة الانقباض هذه، وهي مثالٌ رائع على الديناميكيات والهندسة البيولوجية النانوية. لكن في هذا الفصل سنغضُّ الطَّرْف عن التفاصيل الجزيئية الرائعة لانقباض العضلات؛ لنركز بدلًا من ذلك على كيف استطاع شيءٌ عابر مثل فكرةٍ أن يتسبَّب في انقباض العضلات (انظر الشكل ٨-١).

الإجابة الفورية هي أن الفكرة لم تفعل ذلك. وانقباض الألياف العضلية لدى الفنانة حفَّزَته بالفعل أيونات الصوديوم ذات الشحنة الموجبة التي تدافعَت إلى خلايا عضلاتها.

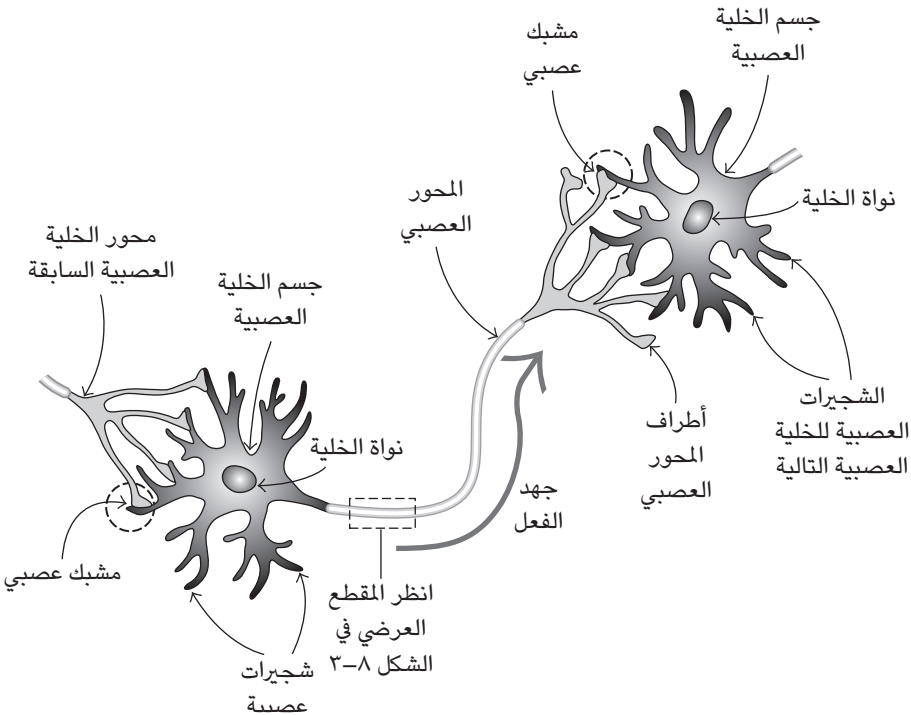



شكل ٨-١: تنتقل الإشارات العصبية من الدماغ إلى الحبل الشوكي كي تصلَ إلى الألياف العضلية؛ مما يتسبَّب في انقباض العضلة، ومن ثَم تحريك أحد الأطراف مثل إحدى الذراعَين.

هذا وتزيد أيونات الصوديوم على الجزء الخارجي من غشاء الخلايا العضلية مقارنةً بالجزء الداخلي منه، ممَّا يتسبَّب في وجود فرقِ جهدٍ كهربي عبر الغشاء، على نحوٍ أشبهَ بما يحدث في بطاريةٍ صغيرة. لكن توجَد ثقوبٌ في هذه الأغشية تُسمى «القنوات الأيونية»، وعند فتح هذه القنوات، فإنها تسمح بدخول أيونات الصوديوم إلى الخلية. إن عملية التفريغ الكهربي هذه هي ما حفَّز انقباض عضلات الفنانة.

الخطوة التالية التي سنستعرضها في السلسلة السببية هي السؤال: ما الذي تسبَّب في انفتاح القنوات الأيونية العضلية تلك في هذه اللحظة؟ الإجابة هي أن «الأعصاب الحركية» المرتبطةَ بالعضلات في ذراع الفنانة أفرزَت موادَّ كيميائية تُسمى الناقلات العصبية، التي تسببت في انفتاح القنوات الأيونية. لكن ما الذي جعل هذه الأعصاب الحركية تُفرز حزمةَ

الناقلات العصبية تلك؟ تفرز النهاياتُ العصبيةُ الناقلاتِ العصبيةَ عند وصول إشارة كهربية تُسمى «جهد الفعل» (انظر الشكل ٨-٢). جهود الفعل من المكونات الأساسية في كل الإشارات العصبية، ومن ثم نحتاج إلى أن نُلقي نظرةً أقربَ على طريقة عملها.




شكل ٨-٢: تُرسل الأعصاب إشاراتٍ كهربية من جسم الخلية بطول المحور العصبي إلى النهاية العصبية، حيث تتسبَّب في إطلاق الناقلات العصبية إلى مشبكٍ عصبي. يُلتقَط الناقل العصبي من جانبِ جسم الخلية في خليةٍ عصبية نازلة، مما يؤدي إلى تنشيطها ومن ثم نقل الإشارة العصبية من خليةٍ عصبية إلى التي تليها.

الخلية العصبية خلية طويلة للغاية ورفيعة وتُشبه الثعبان، وتتكوَّن من ثلاثة أجزاء. يقع «جسم الخلية» عند طرَفِها العُلوي وهو يُشبه العنكبوت، ومنه يبدأ جهدُ الفعل.

ثم ينتقل جهد الفعل بطول الجزء الأوسط الرفيع الذي يُسمى «المحور العصبي» («يد المكنسة» في الخلية العصبية الشمية)، إلى النهاية العصبية حيث تُفرز جزيئات الناقلات العصبية (ارجع للشكل ٨-٢). وعلى الرغم من أن المحور العصبي يُشبه إلى حدٍّ ما كابلًا كهربيًّا صغيرًا، فإن الطريقة التي ينقل بها إشاراته الكهربية أذكى بكثير من العملية التي يمرُّ بها دفقٌ بسيط من الإلكترونات ذات الشحنة السالبة عبر سلك نحاسي.

عادةً ما تكون أيونات الصوديوم ذاتُ الشحنة الموجبة أكثرَ في الجزء الخارجي من غشاء الخلية العصبية من الجزء الداخلي منه، وذلك كما هو الحال في الخلية العضليَّة. تُحافظ على هذا الفرق مضخَّات تدفع أيونات الصوديوم ذات الشحنة الموجبة خارج الخلية عبر غشاء الخلية العصبية. يوفر فائضُ الشحنات الموجبة الخارجية فرقًا في الجهد الكهربي عبر غشاء الخلية يبلغ نحو واحدٍ على مائة من الفولت. وعلى الرغم من أن هذه الشحنة لا تبدو كبيرة، فعليك تذكُّر أن أغشية الخلايا لا يتجاوز سُمكها بضعة نانومترات، ومن ثم فإنه جهد عبر مسافة قصيرة للغاية. وهذا يعني أن لدينا تدرجًا كهربيًّا (وهو ما يُمثله الجهد الكهربي بالفعل) عبر غشاء الخلية قدرُه مليون فولت في المتر. هذا يُعادل عشَرة آلاف فولت عبر فجوة طولها سنتيمتر واحد، ويكاد يكون كافيًا لإطلاق شرارة، كما هو مطلوبٌ في شمعة الإشعال بسيارتك لاشتعال الوقود.

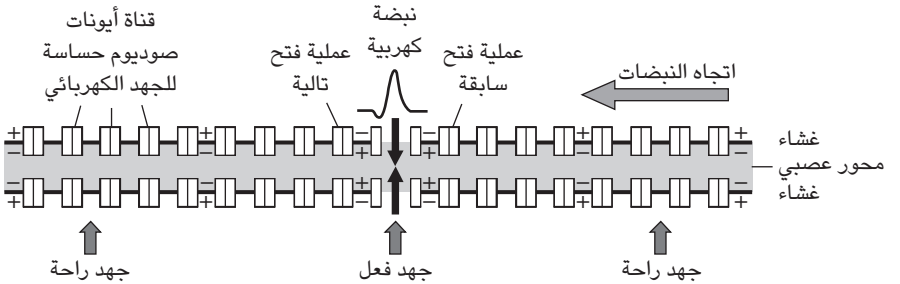
يتصل الطرَف العلوي للعصب الحركي لدى الفنانة — جسم الخلية العصبية — بمجموعةٍ من البِنيات تُسمى «المشابك العصبية» (ارجع للشكل ٨-٢)، وهي نوع من عُلب التوصيلات التي تصل الخلايا بعضها ببعض. تُطلق الأعصاب الصاعدة جزيئاتِ الناقلات العصبية في هذه التوصيلات؛ تمامًا كما تُطلق الناقلات العصبية في الرابط بين العصب والعضلة، وهذا يُحفز فتح القنوات الأيونية في الغشاء المُحيط بجسم الخلية العصبية، مما يُتيح اندفاع الأيونات ذاتِ الشحنة الموجبة إلى داخل الخلية، ويتسبَّب في انخفاض جهدها الكهربي انخفاضًا حادًّا.

معظم حالات الانخفاض في الجهد الكهربي الذي يُسببه فتحُ حفنةٍ من القنوات الأيونية في المشبك العصبي سيكون لها تأثيرٌ طفيف أو قد لا يكون لها أي تأثير. لكن إذا وصلَت مجموعةٌ كبيرة من الناقلات العصبية، فستُفتح مجموعةٌ كبيرة من القنوات الأيونية. الاندفاع الناتج للأيونات ذاتِ الشحنة الموجبة إلى داخل الخلية سيتسبَّب في انخفاض الجهد الكهربي في الغشاء إلى ما دون الحدِّ الحرج الذي يبلغ نحو -٠٫٠٤ فولت. وعندما يحدث ذلك، تُفتح مجموعةٌ أخرى من القنوات الأيونية العصبية. هذه

هي «القنوات الأيونية الحساسة لفرق الجهد الكهربي»، مما يعني أنها ليست حساسةً تجاه الناقلات العصبية، بل إلى فرق الجهد الكهربي عبر الغشاء. في مثال فنانتنا، عندما انخفض الجهد الكهربي في جسم الخلية إلى ما دون الحدِّ الحرج، فُتحت مجموعةٌ كاملة من هذه القنوات كي تسمح باندفاع المزيد من الأيونات إلى داخل العصب، مما يَزيد من قِصَر الدَّارة في رُقعتها من الغشاء. أدى الانخفاضُ الناتج في الجهد الكهربي إلى فتح المزيد من القنوات الأيونية الحساسة لفرق الجهد الكهربي، مما سمح باندفاع المزيد من الأيونات إلى داخل الخلية، وأدَّى إلى مزيدٍ من قِصَر الدارة في الغشاء. يُبطِّن الكابل الطويل للعصب — المحور العصبي — بهذه القنوات الحساسة لفرق الجهد الكهربي؛ ولذا، بمجرد أن انطلقت الدارة القصيرة في جسم الخلية، فإنها حفَّزَت نوعًا من تأثير الدومينو لقصر دارة الغشاء — جهد الفعل — الذي انتقل سريعًا عبر الخلية حتى وصل إلى النهاية العصبية (انظر الشكل ٨-٣). وهناك حفَّز إطلاق الناقل العصبي في «الموصل العصبي العضلي»، مما يؤدي إلى انقباض العضلة في ذراع الفنانة حتى ترسم خطَّ تحديد أبعاد ثور البيسون على جدار الكهف (ارجع للشكل ٨-١).

من هذا الوصف، يمكن أن تلاحظ كيف تختلف الإشارات العصبية عن الإشارات الكهربية التي تسير في الأسلاك. أولًا: لا يمرُّ التيار — حركة الشحنات — على نحوٍ مستقيم بطول الكابلات العصبية باتجاه الإشارة العصبية، بل إنه عموديٌّ على اتجاه جهد الفعل؛ بطنًا إلى ظهر عبر تلك القنوات الأيونية الموجودة في غشاء الخلية. ثانيًا: بعد بَدْء جهد الفعل بسبب فتح القنوات الأيونية مباشرةً، فإنها تُغلق مرةً أخرى وتبدأ مضخَّات الأيونات في العمل على إرجاع جهد البطارية الأصلي عبر الغشاء. إذن، هناك طريقةٌ أخرى للنظر إلى الإشارة العصبية، وتتمثَّل في اعتبارها موجةً من فتح أبواب أيونات الغشاء وغلقِها تنتقل من جسم الخلية إلى النهاية العصبية؛ أي: نبضة كهربية متحركة.

التوصيلات بين الخلايا في معظم الخلايا العصبية الحركية توجَد في الحبل الشوكي حيث تتلقَّى إشارات الناقلات العصبية من مئات أو حتى آلاف الأعصاب الصاعدة (ارجع للشكل ٨-١). تطلق بعض الأعصاب الصاعدة الناقلات العصبية في علبة التوصيلات (المشبك العصبي) مما يؤدي إلى فتح القنوات الأيونية في جسم الخلية من أجل زيادة احتمالية تنشيط العصب الحركي، في حينِ تميل أعصابٌ صاعدة أخرى إلى قفلها. بتلك الطريقة، يبدو أن جسم الخلية لكلِّ خلية عصبية يعمل بمنزلة بوابةٍ منطقية لجهاز كمبيوتر تولد المخرجات — تنشيطها أم عدم تنشيطها — بناءً على المدخلات. ومن ثم إذا




شكل ٨-٣: تنتقل جهود الفعل بطول المحاور العصبية بفعل القنوات الأيونية الحساسة لفرقِ الجهد الكهربي في أغشية الخلايا العصبية. وعندما يكون الغشاء في حالة الراحة، يكون لديه في جزئه الخارجي أيونات ذات شحنة موجبة أكثر من الجزء الداخلي منه. لكن التغيير في الجهد الكهربي بسبب جهد الفعل الصاعد سيُنشط فتح القنوات الأيونية واندفاع أيونات الصوديوم ذات الشحنة الموجبة — جهد الفعل — إلى الخلية، مما يؤدي إلى عكس الجهد الكهربي في الغشاء مؤقتًا. ستنشط تلك النبضة الكهربية فتحَ القنوات الأيونية النازلة بنوعٍ من تأثير الدومينو للنبضات الكهربية بحيث تنتقل عبر العصب حتى تصل إلى النهاية العصبية حيث تحفز إطلاق الناقلات العصبية. وبعد مرور جهد الفعل، تُعيد مضخات الأيونات الغشاء إلى حالة الراحة الطبيعية الخاصة به.

كانت الخلية العصبية تُشبه البوابة المنطقية، فإن الدماغ الذي يتركَّب من مليارات الخلايا العصبية يمكن تمثيله بجهاز كمبيوتر من نوعٍ ما؛ أو على الأقل هذا ما يفترضه معظمُ علماء علم الأعصاب المعرفي ممَّن يدعمون ما يُسمى بـ «النظرية الحاسوبية للعقل».

ولكننا هكذا نقفز بعيدًا جدًّا للأمام؛ إذ إننا لم نصل إلى العقل بعد. لا بد أن العصب الحركي لدى الفنانة تلقَّى الكثيرَ من الناقلات العصبية في عُلب التوصيلات العصبية الخاصة به، مما تسبب في تنشيطه. أتت هذه المدخلات من الأعصاب الصاعدة التي يوجَد معظمُها في الدماغ. بتتبُّع السلسلة السببية بطريقةٍ عكسية، فلربما اتخذَت الأطراف العلوية في تلك الأعصاب قراراتها بشأن تنشيطها من عدمِه على أساس مدخلاتها المتعددة، ومدخلات تلك المدخلات، وهكذا نسير بطريقةٍ عكسية مع السلسلة السببية حتى نصل إلى الأعصاب التي تلقَّت إشارات المدخلات من عينَي الفنانة وأذُنَيها وأنفها ومستقبلات اللمس لديها، ومراكزِ الذاكرة التي ربما تلقَّت المدخلات الحسِّية من ملاحظاتها السابقة عن ثيران البيسون الحية والميتة. وما بين المدخلات الحسية والمخرجات الحركية تقع

«الشبكة العصبية» للدماغ التي نفذَت العمليات الحاسوبية التي تُملي القرار بتوليد — أو عدم توليد — المخرجات الحركية الدقيقة اللازمة لرسم هيكل ثور البيسون.

إذن، هذا هو مجمل المسألة؛ سلسلة الأحداث الكاملة التي أدَّت إلى انقباض العضلات الذي حدَث في ذراع الفنانة وهي ترسم عبر الجدار. لكن هل فاتنا شيء؟ ما وصفناه حتى الآن هو السلسلةُ السببية الآلية بالكامل بدءًا من المدخلات الحسية وانتهاءً بالمخرجات الحركية، مع بعض المعلومات التي تُوجَّه عبر مراكز الذاكرة. هذا هو نوع الآلية التي كان يتحدث عنها ديكارت حينما طرَح زعمه (الذي تناولناه في الفصل الثاني) بأن الحيوانات ما هي إلا آلات؛ لكن كل ما فعلناه هو أننا أحلَلْنا الأعصاب والعضلات والبوابات المنطقية مكانَ الرافعات والبكرات.

لكن تذكَّر أن ديكارت احتفظ بدورٍ لكِيان روحي — ألا وهو الروح — باعتباره المحرِّكَ النهائي لأفعال البشر. السؤال الآن: أين تقعُ الروح في سلسلة الأحداث هذه، القائمةِ على المدخلات والمخرجات؟ حتى الآن، نحن تحدَّثنا فقط عن فنانة زومبي. ففي أي مكان دخل وعيها — فكرتها بضرورة تمثيل ثور بيسون ذي مغزًى على جدار الكهف — إلى سلسلة الأحداث فيما بين المدخلات والمخرجات؟ لا يزال هذا أصعبَ لغزٍ في علوم الدماغ.

## كيف يُحرك العقل المادة؟

بطريقةٍ أو بأخرى، يدعم على الأرجح معظمُ الناس فكرةَ «الثنائية»، وهي الاعتقاد بأن العقل أو الروح أو الوعي شيءٌ آخر غير الجسد المادي. لكن فكرة الثنائية أصبحَت غيرَ مقبولة في الأوساط العلمية في القرن العشرين، ويُفضل معظمُ علماء علم الأحياء العصبي في الوقت الحاليِّ فكرة «الفردية»؛ وهي الاعتقاد بأن العقل والجسم شيءٌ واحد. على سبيل المثال، قال عالِم الأعصاب مارسيل كينسبورن إن «الوعي يُشبه امتلاك دارةٍ عصبية في حالاتٍ وظيفية تفاعلية معيَّنة.»[6] لكن البوابات المنطقية لجهاز الكمبيوتر تُشبه الخلايا العصبية، كما سبق أن أشرنا، ومن ثم ليس من الواضح السببُ في عدم وجود أيِّ إشارة على الوعي لدى أجهزة الكمبيوتر المرتبطِ بعضها ببعض على نحوٍ شديد التعقيد مثل شبكة الويب العالمية التي تضمُّ مليار جهاز إنترنت مضيف، أو ما يُقارب ذلك (والتي رغم ذلك لا تزال قليلةً مقارنة بالخلايا العصبية في الدماغ التي يبلغ عددها مائة مليار خلية). لماذا أجهزة الكمبيوتر المصنوعة من السيليكون عبارةٌ عن زومبي أما أجهزة الكمبيوتر التي هي من لحم ودمٍ تتَّصف بالوعي؟ هل المسألة لها علاقةٌ بالتعقيد و«الترابط» الشديد

لخلايا الدماغ، اللذين لم تُضاهِهما حتى الآن شبكةُ الويب العالمية،[٢] أو هل الوعي نوعٌ مختلف تمامًا من الحوسبة؟

بالطبع يوجَد العديد من «التفسيرات» للوعي، وكلها ورَدَت في مجموعة الكتب الهائلة التي تناوَلَت الوعي. لكن تحقيقًا لأغراض هذا الفصل، سنُركز على زعمٍ أثار جدلًا واسعًا على الرغم من وجاهته، وهو الأقرب إلى موضوع الكتاب، والذي يقول إن الوعي أحدُ ظواهر ميكانيكا الكم. من المعروف أن تلك القضية أثارها عالمُ رياضيات بجامعة أكسفورد اسمه روجر بينروز حين قال في كتابه «العقل الجديد للإمبراطور» الصادر عام ١٩٨٩ إن عقل الإنسان عبارةٌ عن كمبيوتر كمي.

لعلك تتذكر فكرةَ أجهزة الكمبيوتر الكمية الواردة في الفصل الرابع، حيث ذكَرنا مقال صحيفة «ذا نيويورك تايمز» الذي ظهر عام ٢٠٠٧، والذي يقول إن النباتات كانت عبارةً عن أجهزة كمبيوتر كمِّية. في النهاية، توصل فريق معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا إلى فكرةٍ مفادها أن الميكروبات وأنظمة البناء الضوئي في النبات ربما تُنفذ بالفعل نوعًا من الحوسبة الكمية. ولكن هل يمكن أن تكون أدمغتها الذكية للغاية تعمل أيضًا على نحوٍ كمي؟ للإجابة عن هذا السؤال، نحتاج أولًا إلى إلقاء نظرةٍ أقربَ على ماهيَّة أجهزة الكمبيوتر الكمية وطريقة عملها.

## الحوسبة بوحدات الكيوبت

عندما نتحدث عن جهاز الكمبيوتر اليوم، فإننا نقصد أيَّ جهاز إلكتروني قادرٍ على تنفيذ تعليمات للتعامل مع المعلومات ومعالجتها عبر مجموعة من المفاتيح الكهربية التي يمكن أن تكون إما على وضع التشغيل أو وضع إيقاف التشغيل؛ فكل مفتاح قادرٌ على تشفير عدد ثنائي (أو بت) في صورة ١ أو ٠. يمكن تنظيم مجموعةٍ من تلك المفاتيح لبناء دارات تنفذ تعليمات منطقية، يمكن دمجُها واستخدامها لتنفيذ عمليات حسابية مثل الجمع والطرح، أو في واقع الأمر، فتح وقفل البوابات التي وصَفْناها فيما يتعلق بالخلايا العصبية. أكبر ميزة في هذا «الكمبيوتر الرقمي» الكهربي هي تفوُّقه الشديد في السرعة على أي طريقة يدوية لتنفيذ المهمة ذاتِها، سواءٌ أكانت العدَّ على الأصابع أو الحساب العقلي أو استخدام الورقة والقلم.

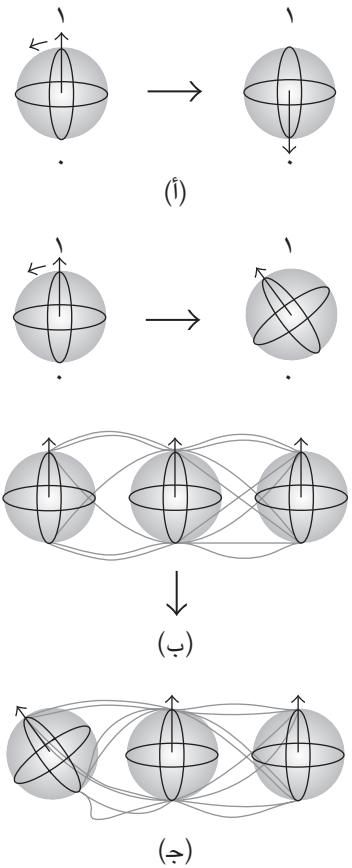
لكن على الرغم من أن أجهزة الكمبيوتر الإلكترونية قد تمتاز بسرعةٍ فائقة في عمليات الجمع، فإنها لا تستطيع تتبُّع تعقيد العالم الكميِّ باحتمالاته المتداخلة الهائلة. وللتغلُّب

على هذه المشكلة، توصل عالِم الفيزياء الحاصل على جائزة نوبل ريتشارد فاينمان إلى حلٍّ محتمل. اقترح تنفيذ العمليات الحسابية في العالم الكمي باستخدام جهاز كمبيوتر كمي.

لنرى كيف تعمل أجهزة الكمبيوتر الكمية؛ فحريٌّ بنا أولًا أن نُمثِّل «البت» في أجهزة الكمبيوتر الكلاسيكية بنوعٍ من البوصلة الكروية التي قد تُشير إبرتُها إلى ١ (القطب الشمالي) أو ٠ (القطب الجنوبي)، والتي تستطيع الدوران بمقدار ١٨٠ درجة للتبديل بين هاتَين الحالتَين (انظر الشكل ٨-٤أ). تتكون وحدة المعالجة المركزية في جهاز الكمبيوتر من عدة ملايين من المفاتيح الأحادية البت، ومن ثم يمكن تصوُّر العملية الحاسوبية بكاملها بأنها تطبيقٌ لمجموعةٍ معقَّدة من قواعد التبديل (الخوارزميات) التي يمكن أن تلفَّ الكثير والكثير من الكرات بمقدار ١٨٠ درجة.

في الحوسبة الكمية، الوحدة المكافئة للبت هي «الكيوبت أو البت الكمي». إنها مماثلةٌ للكرة الكلاسيكية،[٣] ولكن لا يقتصر دورانها على الدوران بمقدارِ ١٨٠ درجة. بل إن بإمكانها الدورانَ في أي زاوية اعتباطية في الفراغ، وبما أنها ميكانيكيةٌ كميَّة فيُمكنها أيضًا الإشارةُ إلى العديد من الاتجاهات في آنٍ واحد في حالة تراكُبٍ من الترابط الكمي (انظر الشكل ٨-٤ب). هذه المرونة الإضافية تُتيح للكيوبت أن يُشفر معلومات أكثرَ من البت الكلاسيكي. ولكن الدفعة الحقيقية للقوة الحوسبية تظهر عند الجمع بين وحدات الكيوبت معًا.

في حين أن حالة البت الكلاسيكي الفردي ليس لها تأثيرٌ في وحدات البت المجاورة له، فإن وحدات الكيوبت يمكن أيضًا أن «تتشابك كميًّا». لعلك تتذكَّر من الفصل السادس أن التشابك سِمة كمية أعقدُ من الترابط والتي بمُقتضاها تفقد الجسيمات الكمية فرديَّتَها، ومن ثم فما يحدث لجسيم يؤثر في الجسيمات الأخرى في اللحظة ذاتِها. ومن منظور الحوسبة الكمية، يمكن تصوير التشابك الكمي بربطِ كل كرة كيوبت باستخدام خيوطٍ مرنة[٤] بكُرات الكيوبت الأخرى (انظر الشكل ٨-٤ج). لنتخيَّل الآن أننا لفَفْنا كرةً واحدة فقط. من دون التشابك، فلن يؤثر الدورانُ في وحدات الكيوبت المجاورة. لكن إذا كان الكيوبت الخاص بنا متشابكًا مع وحدات الكيوبت الأخرى، فإن الدوران يُغير الشدَّ الممارَس على كل الخيوط المتصلة بين وحدات الكيوبت المرتبطة ببعضها. إن المصدر الحاسوبي لكل خيوط التشابك تلك ينمو «على نحوٍ أُمِّي» مع زيادة عدد وحدات الكيوبت، مما يعني أنه يَزيد بسرعةٍ بالغة في واقع الأمر.




شكل ٨-٤: (أ) بت كلاسيكي يبدل حالته من ١ إلى ٠ ممثل في صورة دوران كرة تقليدية بمقدار ١٨٠ درجة. (ب) يمكن تمثيل كيوبت في نفس الوضع في صورة دوران كرة عبر أيِّ زاوية اعتباطية. لكن الكيوبت المترابط يمكن أن يكون أيضًا في حالةِ تراكبٍ من عدة دورانات. (جـ) تظهر هنا ثلاث وحدات كيوبت مترابطة تبدو تفاعلاتها التشابكيةً في صورة خيوط تخيُّلية تربط سطحَ كل كرة. إن الشد المُمارَس على هذه الخيوط فيما يلي الدوراناتِ هو الذي يُمثل الحسابات الكمية.

لأخذ فكرةٍ عن المقصود بالنمو الأسي، فربما سمعتَ عن خرافة الامبراطور الصيني الذي سرَّه بشدةٍ ابتكارُ الشطرنج، ووعد أن يُكافئ مبتكره بجائزةٍ يختارها المبتكر. طلب المبتكر الماكر حبةَ أرز واحدةً للمربع الأول في رقعة الشطرنج، وحبَّتَين من الأرز للمربع الثاني، وأربعًا للمربع الثالث وهكذا؛ أي: يتضاعف عدد الحبوب مع كل مربع تالٍ حتى الوصول إلى المربع الرابع والستين. حسب الامبراطور أنه طلبٌ بسيط، ومن ثَم وافق بحماس، وأمر خدمه بإحضار الأرز. ولكن عند عدِّ حبات الأرز، سرعان ما اكتشف الخطأ الذي وقع فيه. لم يجمع الصفُّ الأول من المربعات أكثرَ من ١٢٨ حبة أرز (٧٢ زائد واحد؛ تذكر أن المربع الأول لا يوجد فيه أكثرُ من حبة واحدة)، وحتى لما بلغ نهايةَ الصف الثاني من المربعات لم يجمع أكثرَ من ٣٢٧٦٨ حبة؛ أي: أقل من كيلوجرام واحد من الأرز. لكن لما بدأت الكيلوجرامات تتضاعفُ في المربعات اللاحقة، فزع الإمبراطورُ لما اكتشف أنه بنهاية الصف الثالث كان عليه تسليمُ أكثرَ من مائتي طن من الأرز. ولما وصل حتى إلى نهاية الصف الرابع، كانت المملكة ستُفلس! في الحقيقة، للوصول إلى نهاية رقعة الشطرنج؛ سيتطلب الأمر ٩,٢٢٣,٣٧٢,٠٣٦,٨٥٤,٧٧٥,٨٠٨ حباتٍ من الأرز (أي: ٦٣٢ زائد واحد)، أو ٢٣٠,٥٨٤,٣٠٠,٩٢١ طن، وهو ما يُعادل تقريبًا محصولَ الأرز العالميَّ بأكمله على مدار تاريخ البشرية.

مشكلة الإمبراطور هي عدمُ إدراكه أن مضاعفة العدد مِرارًا وتَكرارًا تؤدي إلى النمو الأُسِّي، وهي طريقةٌ أخرى للقول بأن الزيادة من عددٍ إلى آخر تتناسب مع مقدار العدد السابق. النموُّ الأسي نموٌّ انفجاري، وهذا ما اكتشفه الإمبراطور لما أدرك خطأه. ومثلما زادت حبات الأرز في الخرافة على نحوٍ أسِّي مع زيادة عدد المربعات في رُقعة الشطرنج، فإن قوة أجهزة الكمبيوتر الكمية تَزيد على نحوٍ أسي مع زيادة عدد وحدات الكيوبت الخاصة به.

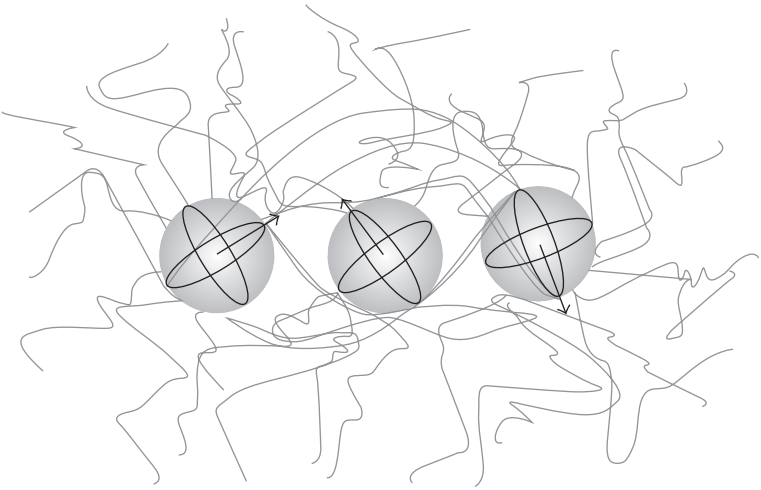
وهذا مختلفٌ تمامًا عن الوضع في أجهزة الكمبيوتر الكلاسيكية، التي تَزيد قوتُها «على نحوٍ خطي» مع زيادة عدد وحدات البت. على سبيل المثال، إضافة بت واحد آخَر إلى جهاز كمبيوتر كلاسيكي بقوة ٨ بت ستَزيد قوتَه بمقدار الثمن؛ ولمضاعفة قوته، سينبغي مضاعفةُ عدد وحدات البت. لكن إضافة كيوبت واحد فقط إلى جهاز الكمبيوتر الكميِّ ستُضاعف قوته، مما سيؤدي إلى النوع ذاتِه من النمو الأسِّي في القوة، الذي أدرك الإمبراطور أنه السببُ في ضياع مخزون الأرز لدَيه. في الحقيقة، إن كان بإمكان الكمبيوتر الكمي أن يحافظ على الترابط والتشابك في نطاق ٣٠٠ كيوبت فقط، وهو الأمر الذي من

المحتمل ألا يتضمَّن أكثرَ من ٣٠٠ ذرة؛ فيمكن أن يتفوَّق، في مهامَّ معينة، على كمبيوتر كلاسيكي بحجمٍ هائل للغاية!

ولكن — وضع خطوطًا تحت كلمة ولكن — كي يعملَ الكمبيوتر الكمي؛ فلا بد أن تتفاعلَ وحدات الكيوبت مع بعضها البعض فقط لإجراء العمليات الحسابية (عبر «خيوطها» المتشابكة غير المرئية). وهذا يعني أنه يجب عزلُها تمامًا عن بيئتها. تكمن المشكلة في أن أي تفاعل مع العالم الخارجي سيجعل وحداتِ الكيوبت تتشابكُ مع بيئتها، وهو ما نتصوره على أنه إضافةٌ للعديد من الخيوط الأخرى، التي تجذب جميعُها وحدات الكيوبت من اتجاهاتٍ مختلفة، وتتنافس مع الخيوط التي تربط بين وحدات الكيوبت مما يؤدي إلى التداخُل مع العملية الحسابية التي تُجريها. هذه بالأساس هي عملية فك الترابط (انظر الشكل ٨-٥). وحتى مع أضعف تفاعل، تُلقي البيئة هذا التشوُّش المتمثل في خيوط التشابك على وحدات الكيوبت؛ مما يجعلها تتوقَّف عن التصرف بطريقةٍ مترابطةٍ مع بعضها البعض، ستُقطع الخيوط الكمية فعليًّا؛ ومن ثَم ستتصرف وحدات الكيوبت باعتبارها وحداتِ بت كلاسيكية مستقلة.

يبذل علماءُ فيزياء الكمِّ قُصارى جهدهم للحفاظ على الترابط بين وحدات الكيوبت المتشابكة عن طريق استخدام أنظمة فيزيائية منتقاةٍ بعناية ومضبوطة بدقة، وتشفير وحدات الكيوبت في حفنة من الذرات وتبريد النظام إلى جزءٍ من الصفر المطلق وإحاطة الجهاز بغلافٍ عازل قوي؛ لإبعاده عن أي مؤثرات بيئية. باستخدام هذه النُّهج، تمكَّنوا من تحقيق بعض الإنجازات البارزة. ففي عام ٢٠٠١، تمكن علماء من شركة آي بي إم وجامعة ستانفورد من تطوير «كمبيوتر كمي في أنبوب اختبار» بعددِ سبع وحدات كيوبت، يُمكنه تنفيذُ شفرة برمجية ماهرة تُسمى خوارزمية شور، المُسمَّاة على اسم عالم الرياضيات بيتر شور الذي ابتكَرها عام ١٩٩٤ خصوصًا كي تُنفَّذ على جهاز كمبيوتر كمي. تُشفِّر خوارزميةُ شور طريقةً فعالة للغاية لتحليل الأعداد إلى عواملها الأولية (أي: تحديد الأعداد الأولية التي يجب ضربها معًا لإعطاء العدد المطلوب). كان هذا إنجازًا كبيرًا وتصدَّر صفحات الصحف والمجلات العلمية على مستوى العالم، لكن المحاولة الأولى لهذا الكمبيوتر الكمي الوليد لم تتمكَّن إلا من حساب العوامل الأولية للعدد ١٥ (أي: العددين ٣ و٥، إن كنت لا تعلم).

على مدار العَقد الماضي، اجتهدَت مجموعةٌ من أفضل علماء الفيزياء والرياضيات والمهندسين لتطوير أجهزة كمبيوتر كمية أكبر وأفضل، ولكن كان التقدم متواضعًا. ففي




شكل ٨-٥: يمكن تصورُ أن سبب فك الترابط في الكمبيوتر الكمي هو تشابك وحدات الكيوبت مع مجموعةٍ من الخيوط البيئية. تجذب تلك الخطوط وحدات الكيوبت وتدفعها بطريقةٍ أو بأخرى بحيث لا يَعود بإمكانها الاستجابةُ إلى الروابط التشابكية فيما بينها.

عام ٢٠١١، تمكن باحثون صينيون من تحليل العدد ١٤٣ إلى عوامله الأوَّلية (١٣ و١١) باستخدام أربع وحدات كيوبت فقط. ومثلما فعل الفريق الأمريكي من قبل، استخدَم الفريق الصيني نظامًا تُشفَّر فيه وحدات الكيوبت في حالات الدوران الخاصة بالذرات. ظهر نهجٌ مختلف تمامًا كانت الرائدة فيه الشركة الكندية دي–ويف، وهو نهجٌ يُشفر وحدات الكيوبت في أثناء حركة الإلكترونات في الدوائر الكهربية. في عام ٢٠٠٧، زعمَت الشركة أنها طوَّرَت أول كمبيوتر كمي تِجاري بقوة ١٦ كيوبت، بإمكانه حلُّ لغز سودوكو وغيره من مسائلِ مطابقة النمط والتحسين. وفي عام ٢٠١٣، تعاونَت وكالة ناسا وشركة جوجل والرابطة الجامعية للأبحاث الفضائية لشراء جهاز بقوة ٥١٢ كيوبت (مقابل مبلغ غير مُعلن) من تطوير شركة دي-ويف الذي كانت وكالة ناسا تنوي استخدامه للبحث عن الكواكب غير الشمسية؛ وهي الكواكب التي لا تدور حول شمسِنا بل حول نجوم بعيدة. ومع ذلك، كانت كلُّ المشكلات التي حلَّتها الشركة حتى ذلك الوقت في نطاق قدرات الكمبيوتر التقليدي، وظلَّ العديد من خبراء الحوسبة الكمية غيرَ مُقتنِعين بأن تقنية شركة

دي–ويف عبارةٌ عن حوسبة كميةٍ من الأساس، أو إن كانت كذلك، فقد كانوا مُتشكِّكين بشأنِ ما إذا كان تصميمُها سيجعلها أسرعَ من الكمبيوتر الكلاسيكي أم لا.

أيًّا ما كان النهج الذي سيختار العلماءُ اتِّباعَه، فلا تزال هناك تحدياتٌ هائلة تُواجههم في تحويل الجيل الحاليِّ من أجهزة الكمبيوتر الكمية الوليدة إلى أجهزةٍ مفيدة. المشكلة الأكبر هي زيادة القوة. إن مضاعفة وحدات الكيوبت تُضاعف قوة الحوسبة الكمية، ولكنها تُضاعف كذلك صعوبةَ الحفاظ على الترابط والتشابك الكميَّين. فينبغي أن تكون حرارة الذرات أبردَ وينبغي أن يكون الغلاف أكثرَ فاعلية، كما أنه تزيد الصعوبة أكثرَ وأكثر في الحفاظ على الترابط لأكثرَ من بضعةِ أجزاء من الترليون في الثانية. وسرعان ما يبدأ فكُّ الترابط قبل أن يتمكن الكمبيوتر من إكمال حتى أبسط عملية حسابية. (هذا على الرغم من أنه في وقت كتابة هذا الكتاب وصل أعلى وقتٍ للحفاظ على الترابط الكمي لحالات الدوران النووي في درجة حرارة الغرفة إلى ٣٩ دقيقة كاملة.)[7] ولكن، كما اكتشفنا، فإن الخلايا الحية تتمكَّن بالفعل من تجنُّبِ فكِّ الترابط لمدة طويلة تكفي لنقل الإكسيتونات في مركبات البناء الضوئي، أو الإلكترونات والبروتونات في الإنزيمات. فهل يمكن أن يُتجنب فكُّ الترابط على نحوٍ مماثل في الجهاز العصبي المركزي من أجل إتاحة تنفيذ الحوسبة الكمية في الدماغ؟

## الحوسبة في الأنيبوبات الدقيقة

أتت محاجَّة بينروز الأساسية بأن الدماغ عبارةٌ عن كمبيوتر كمي من مصدرٍ مفاجئ بعضَ الشيء وهو مُبرهنتا عدمِ الاكتمال الشهيرتان (على الأقل في الأوساط الرياضية) اللتان طرحهما عالم الرياضيات النمساوي كورت جودل. هذه المبرهنات صدمَت بشدة علماءَ الرياضيات في ثلاثينيَّات القرن العشرين ممَّن سعَوا بثقةٍ للوصول إلى مجموعةٍ قوية من المسلَّمات الرياضية يمكن أن تُثبت صحة العبارات الصحيحة وخطأَ العبارات الخطأ؛ في الأساس فإن العمليات الرياضية كانت داخليًّا متسقةً وخالية من أي تناقضات ذاتية. يبدو أن ذلك من الأشياء التي لا يهتمُّ بشأنها سوى علماء الرياضيات والفلاسفة، ولكنه كان ولا يزال يعدُّ أمرًا مهمًّا في مجال المنطق. لقد أوضحَت مبرهنتا عدم الاكتمال اللتان طرحَهما جودل أن هذا المسعى كان محكومًا عليه بالفشل.

تقول أولى مبرهنتَيه إن الأنظمة المنطقية مثل اللغة الطبيعية أو الرياضيات يُمكن أن تنتج عباراتٍ صحيحة، لكن لا يمكنها إثباتُها. قد تبدو هذه المبرهنة افتراضًا بسيطًا،

ولكن تبعاته بعيدةُ المدى للغاية. لنفكر في نظامٍ منطقي مألوف مثل اللغة، التي بإمكانها التفكيرُ على نحوٍ منطقي باستخدام عبارات مثل «كل البشر فانون. سقراط بشر» كي تستنتج أن «سقراط فانٍ». من السهل أن نرى وكذلك أن نُثبت صوريًّا أن العبارة الأخيرة نتيجة منطقية للعبارتين الأُوليين، وذلك بناءً على مجموعة بسيطة من القواعد الجبرية (إذا كانت أ = ب، وكانت ب = ج، فإن أ = ج). لكن أوضح جودل أن أي نظامٍ منطقي معقَّد بالدرجة الكافية لإثبات صحة المبرهنات الرياضية ينطوي على قصورٍ جوهري وهو أن تطبيق قواعده يمكن أن يُنتج عبارات صحيحة، ولكن لا يُمكن إثبات صحة هذه العبارات بالأدوات ذاتِها التي استُخدمت في إنتاجها في المقام الأول.

يبدو هذا غريبًا إلى حدٍّ ما، ولكن هذا هو الحال. مع ذلك، وهذا شيء مهم، لا تقصد مبرهنة جودل أن بعض العبارات الصحيحة لا يمكن إثبات صحتها. بل تعني أن مجموعةً من القواعد ربما يكون بإمكانها إثباتُ صحة عبارات أنتجتها مجموعةُ قواعد أخرى، ومن ثم لا يمكنها إثباتُ صحتها. على سبيل المثال، العبارات اللُّغوية الصحيحة غير القابلة للإثبات يمكن إثباتُ صحتها ضمن قواعد الجبر، والعكس صحيح.

هذا بالطبع مبالغة في التبسيط لا تُنصف التفاصيل الدقيقة الخاصة بالموضوع. ربما يرغب القارئ المهتمُّ بمعرفة المزيد بشأن هذا الموضوع وغيره من المواضيع ذات الصلة في الرجوع إلى كتاب دوجلاس هوفستاتر، أستاذ العلوم المعرفية الأمريكي الذي ظهر في عام ١٩٧٩.[8] النقطة المهمة هنا أن بينروز في كتابه «العقل الجديد للإمبراطور» يأخذ مُبرهنتي عدم الاكتمال اللتَين طرحَهما جودل باعتبارهما نقطةَ انطلاقٍ لمحاجَّته؛ وذلك بالإشارة أولًا إلى أن أجهزة الكمبيوتر الكلاسيكية تستخدِم أنظمةً منطقية صورية (خوارزميات الكمبيوتر) لإنتاج عباراتها. ويستتبع ذلك أن تلك الأنظمة يجب أن تكون قادرةً أيضًا على إنتاج عبارات صحيحة لا يُمكنها إثباتُ صحتها. ولكن يُحاجج بينروز بأن البشر (أو على الأقل علماء الرياضيات) يمكنهم إثباتُ صحة هذه العبارات الحاسوبية الصحيحة غيرِ القابلة للإثبات. ومن هنا يقول إن العقل البشري ليس مجردَ كمبيوتر كلاسيكي؛ حيث إنه قادرٌ على معالجة العمليات التي يُطلَق عليها العمليات غير القابلة للحساب. ثم افترض أن عدم القابلية للحساب هذه تتطلَّب شيئًا إضافيًا، شيئًا لا يمكن توفيره إلا من قِبَل ميكانيكا الكم. إن الوعي، كما يرى، يتطلب جهازَ كمبيوتر كَمِّي.

بالطبع، إن اعتمادَ زعمه على القابلية للإثبات من عدمها لعبارةٍ رياضية صعبة لهو جُرأة شديدة من جانبه، وهي نقطةٌ سنعود إليها لاحقًا. لكن في كتاب بينروز

التالي «ظلال العقل»، ذهب إلى حدٍّ أن اقترَح آليةً فيزيائية ربما يستخدمها الدماغُ في حساب العمليات الرياضية الخاصة به في العالم الكمي.[9] كوَّن فريقًا مع ستيوارت هاميروف،[٥] أستاذ التخدير وعلم النفس بجامعة أريزونا، وزعَما أن هناك بِنياتٍ تُسمى «الأنيبوبات الدقيقة» في الخلايا العصبية، تُعد هذه البنيات وحدات الكيوبت الخاصة بالأدمغة الكمية.[10]

الأنيبوبات الدقيقة عبارةٌ عن خيوط طويلة من بروتينٍ يُسمى التوبولين. أشار هاميروف وبينروز إلى أن بروتينات التوبولين — الخرز الموجود على الخيط — قادرةٌ على التبديل بين شكلَين مختلفين على الأقل، الشكل المتمدِّد والمنكمش، والأهم أنها قادرةٌ على التصرف مثل الأجسام الكمية التي تُوجَد في حالة تراكبٍ من شكلَين في آنٍ واحد لتكوين شيءٍ يُشبه وحدات الكيوبت. ليس هذا فحسب، افترضا أن بروتينات التوبولين الموجودةَ في خليةٍ عصبية ما تتشابكُ مع بروتينات التوبولين في الكثير من الخلايا العصبية الأخرى. ستتذكر أن التشابك هو ذلك «الفعل الطيفي البعيد» الذي يمكن أن يربطَ بين الأجسام التي يبعد بعضها عن بعضٍ بمسافات كبيرة للغاية. إذا كانت الروابط الطيفية بين كل الخلايا العصبية في الدماغ البشري التي يبلغ عددها عدة تريليونات ممكنة، فربما تربط جميع المعلومات المشفرة في الأعصاب المنفصلة، ومن ثم تحلُّ مشكلة الربط. يمكنها أيضًا أن تُمِدَّ العقل الواعيَ بالقدرات الفائقة المراوغة وغير العادية لجهاز الكمبيوتر الكمي.

هناك جوانبُ أخرى كثيرة في نظرية بينروز-هاميروف بشأن الوعي، بما في ذلك الاقتراح، الذي ربما ينطوي على ما يُثير الجدل أكثر، والمتعلِّق باحتمالية ضلوع الجاذبية فيه.[٦] لكن هل يُعقل هذا؟ نحن، إلى جانب كل علماء علم الأحياء العصبي وفيزياء الكم، غيرُ مُقتنعين بذلك تمامًا. وأحدُ أبرز مواطن الاعتراض ربما يتَّضح من الوصف السابق لطريقة انتقال المعلومات من الدماغ وصولًا إلى الأعصاب. لعلك لاحظتَ أننا لم نذكر الأنيبوبات الدقيقة في هذا الوصف. السبب في ذلك هو أنه لم يلزم ذكرها؛ حيث إنه ليس لها — على حدِّ ما هو معروف — أيُّ دور مباشر في معالجة المعلومات العصبية. تدعم الأنيبوبات الدقيقة بنية كلِّ خلية عصبية وتنقل الناقلات العصبية صعودًا ونزولًا بطولها، ولكن لا يُعتقد أن لها دورًا في معالجة المعلومات القائمة على الشبكة والمسئولة عن العمليات الحوسبية في الدماغ. ومن ثم فالأنيبوبات الدقيقة ليست ركائزَ محتملة لأفكارنا.

لكن ربما يُوجد اعتراضٌ أهم وهو أن الأنيبوبات الدقيقة في الدماغ من المستبعَد إلى حدٍّ كبير أن تكون وحدات كيوبت كمية مترابطة لأنها ببساطة كبيرةُ الحجم للغاية

وبالغة التعقيد. في الفصول السابقة، أثبتنا وجودَ ظواهر الترابط والتشابك والنفق في مجموعة متنوعة من الأنظمة البيولوجية بدايةً من أنظمة البناء الضوئي وحتى الإنزيمات والمستقبلات الشمية والحمض النووي والعضو المراوغ المسئول عن الاستقبال المغناطيسي لدى الطيور. ولكن السمة الأساسية في كل هذه الأنظمة هي بساطة الجزء «الكمي» للنظام (الإكسيتون أو الإلكترون أو البروتون أو الجذر الحر). إنه يتكون من جسيمٍ واحد أو عددٍ ضئيل من الجسيمات التي تفعل ما تفعله عبر مسافاتٍ تُقاس بالمقياس الذري. وبالطبع هذا يتطابق مع رؤية شرودنجر التي يبلغ عمرها سبعين سنة بأن أنواع الأنظمة الحية التي يُحتمل أن تدعم القواعد الكمية ستتضمَّن عددًا ضئيلًا من الجسيمات.

لكن تقترح نظريةُ بينروز-هاميروف أن كل جزيئات البروتينات التي تتكوَّن من ملايين الجسيمات لا تكون في حالةِ تراكبٍ وتشابك كمي مع الجزيئات داخل الأنيبوب الدقيق ذاته فحسب، بل مع الأنيبوبات الدقيقة، التي تتكون من ملايين الجسيمات كذلك، في مليارات الخلايا العصبية عبر الدماغ بأكمله. وهذا بعيدٌ كلَّ البعد على أن يكون معقولًا. فعلى الرغم من أنه لم يتمكَّن أحدٌ من قياس الترابط بين الأنيبوبات الدقيقة في الدماغ، تشير الحسابات إلى أن الترابط الكمي في الأنيبوبات الدقيقة الفردية لا يمكن الإبقاءُ عليه نطاقاتٍ زمنيةً أطولَ من بضع بيكوثواني،[11] وهذه المدة قصيرةٌ للغاية ولا تكفي أن يكون هناك أيُّ تأثير لها في الحوسبة الدماغية.[٧]

لكن ربما المشكلة الأكثر جوهرية في نظرية بينروز-هاميروف الخاصة بالوعي هي زعم بينروز الأصلي الذي يقول إن الدماغ كمبيوتر كمي. ستتذكر أن بينروز استند في زعمه على ادِّعائه بأن البشر بإمكانهم إثباتُ صحة عبارات جودل في حين أن أجهزة الكمبيوتر لا تستطيع ذلك. ولكن هذا يعني ضِمنيًّا وجود حوسبةٍ كميةٍ في الدماغ فقط إذا كانت أجهزة الكمبيوتر الكمية تستطيع إثبات صحة عبارات جودل على نحو أفضل من أجهزة الكمبيوتر الكلاسيكية؛ المشكلة هنا لا تتمثَّل فحسب في عدم وجود دليلٍ على الإطلاق على هذا الافتراض، بل أيضًا في أن معظم الباحثين يعتقدون عكسَ ذلك.[12]

نقطةٌ أخرى وهي أنه ليس من الواضح على الإطلاق أن الدماغ البشري «يمكنه» فعلًا تقديمُ أداء أفضلَ من الكمبيوتر الكلاسيكي في إثبات صحةِ عبارات جودل. وعلى الرغم من أن البشر ربما يكون بإمكانهم إثباتُ صحة عبارة من عبارات جودل غير القابلة للإثبات المنتجة من قبل الكمبيوتر، فإنه من الممكن على نحوٍ متساوٍ أن تكون أجهزة الكمبيوتر قادرةً على إثبات صحة عبارةٍ من عبارات جودل غير القابلة للإثبات المنتجة من قِبَل عقل

بشري. مبرهنة جودل لا تشير سوى إلى عدم قدرة أيٍّ من الأنظمة المنطقية على إثبات كلِّ العبارات التي يولدها؛ إنها لا تشير إلى عدم قدرة نظام منطقي على إثبات عبارات جودل التي يولدها نظامُ منطقٍ آخر.

لكن هل يعني هذا أنه لا يُوجَد دورٌ لميكانيكا الكم في الدماغ؟ هل يُحتمل أن تتولد أفكارنا بالكامل عن العمليات التقليدية للعالم الكلاسيكي، على الرغم من العمليات الكمية الكثيرة التي تتمُّ في أجزاء أخرى من أجسامنا؟ على الأرجح، لا. تقترح أبحاثٌ حديثة أن ميكانيكا الكمِّ ربما يكون لها دورٌ بالغ الأهمية بالفعل في طريقة عمل العقل.

## هل القنوات الأيونية كمية؟

من المواقع المحتملة لظواهر ميكانيكا الكم في الدماغ: القنواتُ الأيونية في أغشية الخلايا العصبية. وكما ذكرنا من قبل، هذه القنوات مسئولة عن توليد جهود الفعل — الإشارات العصبية — التي تنقل المعلومات في الدماغ، ومن ثم فهي لها دورٌ مركزي في معالجة المعلومات العصبية. طول القنوات لا يتجاوز واحدًا على مليارٍ من المتر (١,٢ نانومتر) وعرضها يقلُّ عن نصف ذلك الطول، ومن ثم ينبغي أن تمرَّ الأيونات عبرها الواحدَ تلو الآخَر. لكنها تفعل ذلك بمعدلٍ عالٍ على نحوٍ غير عادي؛ إذ يبلغ نحو مائة مليون في الثانية. وتمتاز القنوات أيضًا بدرجةٍ عالية من الانتقائية. على سبيل المثال، القناة المسئولة عن إدخال أيونات البوتاسيوم إلى الخلية تُدخل نحو أيون صوديوم واحدٍ لكل عشَرة آلاف أيون بوتاسيوم، على الرغم من حقيقة أن أيونات الصوديوم أصغرُ قليلًا من أيونات البوتاسيوم، ومن ثم قد تتوقَّع على نحوٍ ساذج أنه يسهل عليها التسللُ عبر أي شيء كبير بما يكفي بحيث يسع أيونات البوتاسيوم.

إن معدلات النقل المرتفعة للغاية هذه، إلى جانب الدرجة الاستثنائية من الانتقائية الممارَسة، تقفان وراء سرعة جهود الفعل، ومن ثم قدرتها على نقل أفكارنا عبر الدماغ. لكن لا تزال الطريقةُ التي تنتقل بها الأيونات بهذه الدرجة من السرعة والانتقائية لغزًا. السؤال الآن: هل يمكن لميكانيكا الكم أن تساعد في هذا الشأن؟ اكتشفنا بالفعل (في الفصل الرابع) أن ميكانيكا الكم يمكن أن تُعزِّز نقل الطاقة في عملية البناء الضوئي. فهل يمكن أن تُعزز أيضًا نقْلَ الأيونات في الدماغ؟ في عام ٢٠١٢، كوَّن عالمُ الأعصاب جوستاف برنرويدر من جامعة سالزبورج مع يوهان سامهامر من معهد الذرة بجامعة فيينا للتكنولوجيا لإجراء محاكاة ميكانيكية كمية لمرور أيون من قناة أيونية حساسة

لفرق الجهد الكهربي واكتشفا أن الأيون يصبح غيرَ متمركز (أي: منتشرًا) عندما يسير عبر القناة؛ أي: إنه موجة مترابطة أكثرَ منه جسيمًا. إضافةً إلى ذلك، تتذبذب موجةُ الأيون هذه عند ترددات عالية للغاية وتنقل الطاقة إلى البروتين المجاور عن طريق عملية رنينٍ من نوعٍ ما، ومن ثم تُصبح القناة فعليًّا بمنزلة «ثلاجة أيونات» تُقلل الطاقة الحركية للأيون بمقدار النصف تقريبًا. هذا التبريد الفعال للأيون يساعد في الحفاظ على حالته الكمية غير المتمركزة عن طريق منع فكِّ الترابط؛ ممَّا يُعزز النقل الكمي السريع عبر القناة. إنه يُسهِم في درجة الانتقائية كذلك؛ حيث إن درجة التبريد ستختلف كثيرًا إذا بدَّلنا الصوديوم مكان البوتاسيوم؛ حيث إن التداخل البنَّاء يمكن أن يُعزز نقل أيونات البوتاسيوم في حين يمكن للتداخُل الهدَّام أن يُثبِّط نقل أيونات الصوديوم. استنتج الفريق أن الترابط الكميَّ له دورٌ «لا غِنى عنه» في مرور الأيونات عبر القنوات الأيونية العصبية، ومن ثم يُمثل جزءًا أساسيًّا من عملية التفكير لدى الإنسان.[13]

حريٌّ بنا التأكيدُ على أن هذين الباحثين لم يُشيرا إلى أن الأيونات المترابطة كميًّا قادرةٌ على أن تكون بمنزلة أيِّ نوع من أنواع وحدات الكيوبت العصبية، وكذلك لم يُشيرا إلى أنها قد يكون لها دورٌ في الوعي؛ وللوهلة الأولى يصعب إدراكُ مدى إسهامها في حلِّ بعض مشاكل الوعي مثل مشكلة الربط. لكن، وعلى خلاف الأنيبوبات الدقيقة في فرضية بينروز–هاميروف، القنوات الأيونية على الأقل لها دورٌ واضح في الحوسبة العصبية — فهي تولِّد جهود الفعل — ومن ثم فإن حالتها ستعكس حالة الخلية العصبية؛ فعندما ينشط العصب، فستتدفَّق الأيونات (تذكر أنها تتحرَّك في صورة موجات كمية) بسرعةٍ من خلال القنوات، لكن ستسكن أيُّ أيونات موجودة في القنوات إذا سكن العصب. وبما أن مجموع الخلايا العصبية النشطة وغير النشطة في الدماغ لا بد أنه يُشفر أفكارَنا بطريقةٍ ما؛ فإن هذه الأفكار أيضًا تنعكس— أي: تشفَّر — في مجموع كلِّ ذلك التدفق الكمي للأيونات إلى داخل خلايا الأعصاب وخارجها.

لكن كيف لعمليات الأفكار الفردية أن تتجمع لتُولد أفكارًا واعية مترابطة؟ ليس من المحتمل أن قناةً أيونية مترابطة واحدة — سواء كمية أو كلاسيكية — يمكن أن تُشفر كلَّ المعلومات المحصورة في عمليات التفكير التي تُسفر عن تصوُّر كائنٍ معقَّد مثل ثور البيسون. كي يكون للقنوات الأيونية دورٌ في الوعي، يجب أن تكون مرتبطةً ببعضها البعض بطريقةٍ ما. هل يمكن لميكانيكا الكم أن تُساعد هنا؟ هل يمكن على سبيل المثال ألا تكون الأيونات في أي قناة مترابطةً بطول القناة فحسب، بل مترابطة أو حتى متشابكة

أيضًا مع الأيونات في القنوات المجاورة، أو حتى الخلايا العصبية القريبة؟ يكاد يكون من المؤكَّد لا. ستُواجه القنوات الأيونية والأيونات بداخلها المشكلةَ ذاتَها مثل فكرة الأنيبوبات الدقيقة التي طرحها بينروز وهاميروف. وعلى الرغم من إمكانيةِ تصور وجود تشابك بين قناةٍ أيونية واحدة وقناةٍ مجاورة لها داخل الخلية العصبية ذاتِها، فإن التشابك بين القنوات الأيونية في الأعصاب المختلفة — الضروري لحلِّ مشكلة الربط — ليس ممكنًا البتةَ في بيئة الدماغ الحي؛ حيث إنها بيئةٌ دافئة ورطبة، ومحفِّزة على فكِّ الترابط، وديناميكيةٌ بدرجةٍ عالية.

ومن هنا فإذا كان التشابك لا يمكنه ربطُ المعلومات على المستوى الكمي في القنوات الأيونية، فهل يُوجَد أي شيءٍ آخر يمكنه إنجازُ هذه المهمة؟ ربما يوجد. بالطبع القنوات الأيونية الحسَّاسة للجهد الكهربي حساسةٌ تجاه الجهد الكهربي؛ فالجهد الكهربي هو الذي يفتح ويغلق القنوات. والجهد الكهربي مجردُ قياس لتدرُّج المجال الكهربي. لكن حجم الدماغ بالكامل ممتلئٌ بمجاله الكهرومغناطيسي، الذي يولِّده النشاط الكهربي لكلِّ الخلايا العصبية في الدماغ. وهذا المجال هو ما تكتشفه تقنياتُ فحص الدماغ عادةً مثل مخطط كهربية الدماغ أو الرسم المغناطيسي للدماغ، ونظرةٌ واحدة على واحدةٍ من هذه الفحوصات ستُنبئك بمقدار التعقيد والثروة المعلوماتية لهذا المجال. تجاهل معظمُ علماء الأعصاب الدور المحتمل للمجال الكهرومغناطيسي في الحوسبة الدماغية؛ لأنهم اعتبروه مثل صافرة القطار البخارية؛ أي: إنه من نِتاج نشاط الدماغ ولكنه لا يؤثر في ذلك النشاط. لكن رأى العديدُ من العلماء مؤخرًا — ومنهم جونجو — أن فكرة نقلِ الوعي من جسيمات المادة المنفصلة في الدماغ إلى المجال الكهرومغناطيسي المترابط ربما تحلُّ مشكلة الربط وتُفسح المجال للوعي.[14]

لفهم كيفيَّة إجراء تلك العملية؛ فربما نحتاج إلى التحدُّث قليلًا عن المقصود بكلمة «المجال». المصطلح مشتقٌّ من استخدامه الشائع ويعني شيئًا يمتدُّ في الفراغ، مثل حقل الذرة أو ملعب كرة القدم. في الفيزياء، مصطلح «المجال» له المعنى الأساسيُّ ذاتُه، ولكن عادةً ما يُشير إلى مجالات الطاقة القادرة على تحريك الأجسام. فمجالاتُ الجاذبية تُحرك أيَّ شيء له كتلة، في حين أنَّ المجالات الكهربية أو المغناطيسية تُحرك الجسيمات ذاتَ الشحنات الكهربية أو الجسيمات المغناطيسية مثل الأيونات في القنوات الأيونية العصبية. في القرن التاسعَ عشر، اكتشف جيمس كليرك ماكسويل أن الكهرباء والمغناطيسية وجهان لظاهرةٍ واحدة، وهي الكهرومغناطيسية، ومن ثم نُشير إلى كليهما بالمجالات الكهرومغناطيسية.

إن معادلة أينشتاين $E = mc^2$، التي تضع الطاقة في حدٍّ والكتلةَ في الحدِّ الآخر، أثبتَت على نحوٍ شهير أن الطاقة والمادة قابلتان للتبادل. ومن ثم فمجال الطاقة الكهرومغناطيسية للدماغ — الحد الأيسر في معادلة أينشتاين — حقيقيٌّ بقدر المادة التي تتكوَّن منها خلاياه العصبية، ولأنه يتولَّد بتنشيط الخلايا العصبية، فإنه يُشفر المعلومات ذاتَها بالضبط مثل المعلومات الخاصة بأنماط التنشيط العصبي للدماغ. لكن بينما تنحسرُ هذه المعلومات الخاصة بالخلايا العصبية في الخلايا العصبية النابضة تلك، فإن النشاط الكهربي الذي تولِّده كلُّ النبضات يُوحِّد كلَّ المعلومات داخل المجال الكهرومغناطيسي للدماغ. ربما يحلُّ هذا مشكلةَ الربط.[15] وبفتح القنوات الأيونية الحساسة للجهد الكهربي وقفلِها، يقترن المجال الكهرومغناطيسي مع تلك الأيونات ذات الترابط الكمي التي تسير عبر القنوات.

حينما طُرِحَت نظرياتُ المجال المغناطيسي الخاصة بالوعي للمرة الأولى في بداية القرن الحادي والعشرين، لم يكن هناك دليلٌ مباشر على أن المجال الكهرومغناطيسي للدماغ يمكن أن يؤثِّر في أنماط التنشيط العصبي بحيث تدفع أفكارَنا وأفعالنا. لكن أثبتَت مؤخرًا التجارِبُ التي أُجرِيَت في العديد من المختبرات أن المجالات الكهرومغناطيسية الخارجية — التي لها قوةٌ وبِنية مماثلة للمجالات التي يولدها الدماغُ نفسُه — تؤثر بالفعل في التنشيط العصبي.[16] في الحقيقة، يبدو أن ما يفعله المجالُ هو تنسيق التنشيط العصبي؛ بمعنى توفير التزامن للكثير من الخلايا العصبية بحيث تنشط جميعُها دَفعةً واحدة. تشير النتائج إلى أن المجال الكهرومغناطيسي للدماغ — الذي يولده التنشيط العصبي — يؤثر كذلك في التنشيط العصبي، مما يوفر نوعًا من الحلقات ذات المرجعية الذاتية، التي يقول العديد من المُنظرين إنها من المكونات الأساسية للوعي.[17]

إن مزامنة التنشيط العصبي بفعل المجال الكهرومغناطيسي للدماغ أيضًا؛ بالغةُ الأهمية في سياقِ لغز الوعي؛ لأنها من السمات القليلة للغاية للنشاط العصبي المعروفِ أنها ترتبط بالوعي. على سبيل المثال، مرَرنا جميعًا بظاهرة البحث عن شيءٍ يمكن أن نراه بسهولة — مثل النظارة — ثم رؤيته بين مجموعةٍ من الأشياء الأخرى. بينما كنا نبحث عنه وسطَ تلك المجموعة، كانت المعلومات البصرية التي تُشفر ذلك الشيءَ تسير في دماغنا، عبر العينين، لكننا بنحوٍ أو بآخر لم نُلاحظ الشيء الذي كنا نبحث عنه؛ إننا لم نكن «واعين» به. لكننا بعد ذلك نراه بالفعل. ما الذي تغيَّر في دماغنا بين الوقت الذي لم نكن واعينَ فيه بالشيء في البداية والوقتِ الذي أصبحنا واعين به داخل المجال البصري ذاتِه؟ اللافتُ للنظر أن التنشيط العصبي ذاته يبدو أنه لم يتغير؛ فالخلايا العصبية ذاتها

تنشط سواءٌ كنا «نرى» النظَّارة أم لا. لكن عندما لا نرى النظارة، فلا يتزامن التنشيط العصبي؛ أما عندما نراها فإنه يتزامن.[18] إن المجال الكهرومغناطيسي الذي يربط كلَّ تلك القنوات الأيونية المترابطة في الأجزاء المنفصلة في الدماغ لتوليد تنشيطٍ متزامن، يمكن أن يكون له دورٌ في هذا الانتقال من الأفكار غيرِ الواعية إلى الأفكار الواعية.

يجدُر بنا التأكيدُ على أن استخدام أفكارٍ مثل المجال الكهرومغناطيسي للدماغ أو بالطبع القنوات الأيونية ذات الترابط الكمِّي بهدف تفسير الوعي لا يوفر دعمًا بأيِّ حالٍ من الأحوال لما يُطلق عليه «الظواهر الخارقة» مثل التخاطر، حيث إن المفهومَين قادران فقط على التأثير في العمليات العصبية التي تجري «داخل» الدماغ الواحد؛ إنها لا توفر وسيلةَ اتصالٍ بين أدمغة مختلفة! وكما أشرنا لَمَّا تناولنا محاجَّة جودل التي ذكرها بينروز، ففي الحقيقة لا يُوجَد دليلٌ على أن ميكانيكا الكم ضروريةٌ على الإطلاق لتفسير الوعي؛ وهذا على خلاف الظواهر البيولوجية الأخرى التي تناولناها في هذا الكتاب مثل عمل الإنزيمات أو البناء الضوئي. لكن هل السمات الغريبة في ميكانيكا الكم التي اكتشفنا أنَّ لها يدًا في العديد من الظواهر المهمة للحياة يُحتمل أن تُستبعَد من أكبر ألغازها، ألا وهو الوعي؟ سنترك القرارَ للقارئ. إن العرض الذي قدَّمناه فيما سبق، والذي يتضمن القنوات الأيونية ذات الترابط الكمي والمجالات الكهرومغناطيسية، تخمينيٌّ بالتأكيد، ولكنه على الأقل يوفر رابطًا معقولًا بين العالم الكمي والعالم الكلاسيكي في الدماغ.

مع وضع هذا في الاعتبار، لنعد مرة أخرى إلى ذلك الكهف المظلم في جنوب فرنسا كي نُكمل سلسلة الأحداث التي بدأتْ من الدماغ وانتهت عند اليد حيث تقف الفنانة رابطةَ الجأش أمام الجدار تُراقب شعلتها وهي تومض وتتأرجحُ فوق حدوده الرمادية. إن حركة الضوء على الصخور تستحضر صورة ثور البيسون إلى عقلها الواعي. هذا كافٍ لتكوين الفكرة في رأسها، التي ربما تجسدَت في صورة تذبذبٍ للمجال الكهرومغناطيسي في دماغها الذي يفتح مجموعات من القنوات الأيونية المترابطة في عددٍ كبير من الخلايا العصبية المنفصلة؛ مما أدى إلى تنشيطها بنحوٍ مُتزامن. تنشط الإشارات العصبية المتزامنة جهود الفعل في أنحاء دماغها، ومن خلال الارتباطات المشبكية، تبدأ تيارًا من الإشارات الذي يسير نزولًا إلى عمودها الفقري ثم — عبر التوصيلات بين الأعصاب — إلى الأعصاب الحركية التي تُفرغ الناقلات العصبية الخاصة بها في التوصيلات العصبية العضلية الموجودة في عضلات ذراعها. تنقبض تلك العضلاتُ لتوليد الحركة المتناسقة ليدِها التي

تمشي على جدار الكهف وتترك خطًّا من الفحم على الصخرة يُحدِّد هيكل ثور بيسون. وربما الأهم من ذلك هو إدراكها أنها بدأت الفعل «بسبب» فكرةٍ في عقلها الواعي. إنها ليست زومبي.

بعد ثلاثين ألفَ سنة، يُضيء جون–ماري شوفيه مصباحَه على جدار هذا الكهف ذاته والفكرة التي انتعشَت في دماغ تلك الفنانة التي قضت نحبها منذ أمدٍ بعيد تومض مرةً أخرى عبر الخلايا العصبية لعقل شخصٍ واعٍ.

## هوامش

(١) لصدمة العديد من هواة السينما؛ فقد كان فيلم هرتسوك ثلاثيَّ الأبعاد.

(٢) ليس من السهل تقديرُ حجم شبكة الإنترنت، ولكن كل صفحة ويب حاليًّا مرتبطةٌ في المتوسط بأقلَّ من مائة صفحة أخرى، في حين أن الخلايا العصبية لها روابطُ مشبكية مع آلاف الخلايا العصبية الأخرى. ومن ثم من حيث الروابط، فهناك ما يقرب من تريليون رابطٍ بين صفحات الويب، ويوجَد نحوُ مائة ضعف هذا العدد بين الخلايا العصبية في دماغ الإنسان. ولكن شبكة الويب يتضاعف حجمها كلَّ بِضْع سنوات؛ ولذا يُتوقَّع أن تُباري الدماغَ البشري من حيث التعقيدُ في غضونِ عقدٍ من الزمان. فهل ستصبح الإنترنت واعيةً حينئذٍ؟

(٣) إذا كنتَ من علماء الفيزياء، فإن ما نصفُه هنا هو كرة بلوخ.

(٤) في الواقع، تمثل الخيوطُ العلاقةَ الرياضية بين الطَّور والسَّعة لوحدات الكيوبت المتشابكة المعبَّر عنها بمعادلة شرودنجر.

(٥) يودُّ جونجو أن ينتهز هذه الفرصة كي يعتذرَ إلى ستيوارت هاميروف على كتابة اسمِه خطأً في كتابه «التطور الكمي».

(٦) هذا مفهومٌ صعب آخر، ولكن بينروز اقترح تفسيرًا متفردًا تمامًا لمسألة القياس في ميكانيكا الكم بافتراض أن تأثير الجاذبية الخاصَّ بالأنظمة الكمية المعقدة بالقدر الكافي (ومن ثم الأكبر حجمًا)، على الزمكان؛ يؤدي إلى تشوُّشٍ يهدم الدالةَ الموجية، ويُحول الأنظمة الكمية إلى أنظمةٍ كلاسيكية، وأن تلك هي العملية التي تولِّد أفكارنا. المزيد من التفاصيل عن هذه النظرية الاستثنائية تناولَتها على نحوٍ جيد كتبُ بينروز، ولكن من

الإنصاف أن نقول إن اقتراحه — حتى الآن — اكتسب عددًا قليلًا من المؤيِّدين في مجتمع فيزياء الكم.

(٧) البيكوثانية تساوي واحدًا على مليون من واحدٍ على مليون جزء (أو $١٠^{-١٢}$) من الثانية.

الفصل التاسع

# كيف بدأت الحياة؟

... إذا (أوه! ما أعظمها من «إذا»!) كان بوسعنا أن نتصوَّر بِركةً صغيرة دافئة، تحتوي على كافة أنواع النشادر وأملاح الفوسفوريك والضوء والحرارة والكهرباء وغير ذلك، حيث تَشكَّل مركبُ بروتين كيميائيًّا بحيث يكون مستعدًّا للمرور بتغيراتٍ أخرى أشدَّ تعقيدًا ...

تشارلز داروين، في خطاب له إلى جوزيف هوكر، ١٨٧١

لم تسمَّ جزيرة جرينلاند بهذا الاسم لأنها أرضٌ خضراء. في وقتٍ ما في نحو عام ٩٨٢ ميلاديًّا، أحد الفايكنج الدنماركيين المعروف باسم إريك الأحمر فرَّ من اتهامٍ بالقتل بالإبحار جهةَ الغرب من أيسلندا واكتشف تلك الجزيرة. لم يكن أول المكتشفين للجزيرة؛ فقد اكتُشِفَت بالفعل عدةَ مرات على يدِ أناسٍ من العصر الحجري ممن وصَلوا من شرق كندا منذ عام ٢٥٠٠ قبل الميلاد. لكن البيئة في جرينلاند قاسيةٌ ولا ترحم، وقد اختفَت تلك الثقافات السابقة ولم تُخلف وراءها سوى النذر اليسير من الآثار. رجا إريك أن يُحقق نجاحًا أفضل؛ فقد وصل في الآونةِ التي يُطلَق عليها الحقبة العصرأوسطية الدافئة، حيث كانت الظروف المناخية أكثرَ اعتدالًا وقتئذٍ؛ ومن ثم أُطلق على الجزيرة الاسم الحالي، وكان واثقًا من أن ما يُبشر به الاسمُ من مَراعٍ خضراء سيُغري مُواطنيه بالاتجاه غربًا. من الواضح أن الحيلة نجحَت لأنه سرعان ما أُقيمت مستعمرةٌ تضم عدةَ آلاف من الأشخاص، وبدا — على الأقل في البداية — أن الحياة ستزدهر بالنسبة إليهم هناك. ولكن مع زوال الحقبة الدافئة، عادت جرينلاند إلى الظروف المناخية المعروفة في شمال المحيط الأطلسي، وزاد الغطاء الجليدي المركزي حتى غطَّي ٨٠ بالمائة من كتلة اليابسة في الجزيرة. ومع

زيادة قسوة الطقس، كافح سكانُ الجزيرة للحفاظ على نظام الزراعة الاسكندنافي الخاص بهم في التربة الضحلة للشريط الساحلي الرفيع، وتضاءلت المحاصيل ونقص عدد الماشية.

من المُفارقات أنه في الوقت نفسِه تقريبًا الذي كانت مستعمرة الفايكنج تنهار فيه، كانت هناك موجةٌ أخرى من مهاجري شعب الإنويت (الإسكيمو) تكسب عيشها في شمال الجزيرة باستخدام تقنيات صيدٍ برِّية وبحرية متطورة، تتلاءم جيدًا مع الظروف المحلية. ربما كانت مستعمرةُ الفايكنج ستتمكَّن من إنقاذ نفسِها لو استعارت استراتيجيات البقاء من شعب الإنويت، لكن السِّجل الوحيد الذي لدينا لوجودِ صلةٍ بين الشعبَين ملاحظةٌ من أحد المستوطنين الفايكنج بأن الإنويت ينزفون كثيرًا عند طعنِهم؛ وتلك ملاحظةٌ لا تشير إلى رغبةٍ في التعلُّم من جيرانهم الشماليين. وكانت النتيجة هي انهيار مستعمرة الفايكنج في وقتٍ ما في أواخر القرن الخامس عشر، ومن الواضح أن القلَّة المتبقية منهم لجأتْ إلى أكل لحوم البشر.

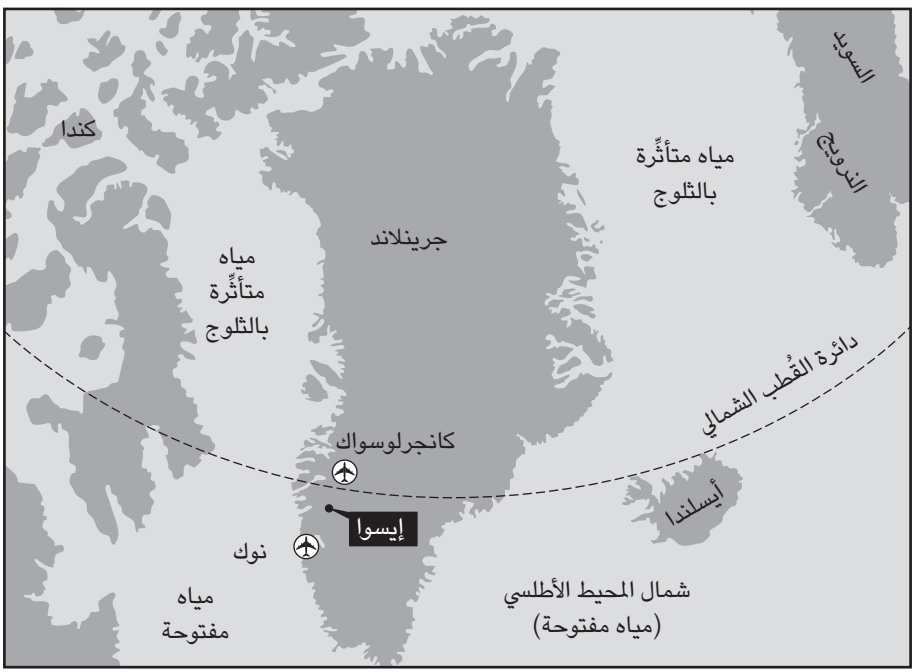
وعلى الرغم من ذلك، لم ينسَ أبدًا الدانماركيون مستعمرتَهم الموجودة جهة الغرب، وفي أوائل القرن الثامن عشر، أُرسلت بعثةٌ استكشافية لتجديد العلاقات مع المستوطنين. لم تجد البعثة غيرَ مقابر ومنازلَ مهجورة، ولكن أدَّت الزيارة بالفعل إلى إقامة مستعمرة أنجح، تعايشَت مع السكان الأصليين من شعب الإنويت لتُكوِّن في النهاية ما أصبح دولةَ جرينلاند الحديثة. نما اقتصاد جرينلاند اليوم من جذوره الخاصة بالإنويت، المعتمدةِ على صيد الأسماك على نحوٍ كبير، ولكن بدأ التركيز على نحوٍ متزايد على الثروة المعدنية المحتملة للجزيرة. في ستينيَّات القرن العشرين، وظَّفَت هيئةُ المسح الجيولوجي الدانماركية عالِمَ جيولوجيا شابًّا من أصولٍ نيوزيلندية، اسمه فيك مكجريجور، لإجراء دراسة جيولوجية على الركن الجنوبي الغربي للجزيرة بالقُرب من العاصمة، جودهوب (التي اسمها الحالي نوك).

قضى مكجريجور عدة سنوات يُسافر عبر المنطقة التي يشقُّها فيورد في قاربٍ صغير مفتوح جزئيًّا، بصعوبة يسَعُه ومعه طاقَمٌ محلي مكوَّن من شخصَين وأيِّ ضيف طارئ، بحيث يُحشرون جميعًا بين أدوات التخييم والصيد — التي لم تختلف عن المُعِدات التي كان يستخدمها شعبُ الإنويت الأوائل — بالإضافة إلى المعدَّات الجيولوجية. وباستخدام الأساليب القياسية لعلم دراسة الطبقات الجيولوجية، توصَّل إلى أن الصخور في المنطقة تراصَّت في عشر طبقات متتالية، ومن المحتمَل أن تكون الأقدم والأعمق منها «قديمة للغاية حقًّا»؛ إذ ربما يعود تاريخها إلى أكثرَ من ثلاثة مليارات سنة.

وفي أوائل سبعينيَّات القرن العشرين، أرسل مكجريجور عينةً من صخوره القديمة إلى مختبر ستيفن موربات بأكسفورد، وستيفن هذا هو عالمٌ معروف بخبرته في تحديدِ عمر الصخور بالقياس الإشعاعي. تعتمد الطريقة المستخدَمة على قياسِ نسبة النظائر المشعَّة ونواتج تحلُّلها. على سبيل المثال، يتحلَّل اليورانيوم ٢٣٨ بعمر نصفي يبلغ ٤,٥ مليار سنة (إذ يمرُّ بسلسلةٍ من النكليدات، ويتحول في النهاية إلى نظير رصاص مستقر)؛ لذا، وبما أن عمر الأرض يبلغ نحو أربع مليارات سنة، فإن تركيز اليورانيوم الطبيعي في أي صخرة سيستغرق عمر الأرض بالكامل حتى ينخفضَ إلى النصف. وبقياس نسبة هذه النظائر في أيِّ عينة من الصخور، يتمكن العلماء بناءً عليه من قياس المدة المنقضِية منذ ظهور تلك الصخور؛ وهذه التقنيات هي التي استخدمها ستيفن موربات عام ١٩٧٠ لتحليل عينة من نوعٍ من الصخور يُسمى «النايس»، التي قطعها مكجريجور من المنطقة الساحلية التي تُسمى أميتسوك التي تقع جهة الجنوب الغربي بجرينلاند. المثير للدهشة أنه اكتشف أن حجر النايس احتوي على نسبة رصاص أكثر نسبيًّا من أي معدنٍ خام أو صخرةٍ أرضية كُشِف عنها حتى الآن. إن العثور على نسبٍ عالية جدًّا من الرصاص يعني أن صخرة النايس المقتطَعة من منطقة أميتسوك «قديمة للغاية حقًّا» كما خمَّن مكجريجور؛ إذ يبلغ عمرها ٣,٧ مليار سنة على الأقل، وهي أقدمُ من أي صخرةٍ سبق العثور عليها في الأرض.

اندهش موربات بشدةٍ من الاكتشاف مما جعله ينضمُّ بعد ذلك إلى مكجريجور في العديد من الرحلات الاستكشافية إلى جرينلاند. وفي عام ١٩٧١، قرَّرا أن يزورا منطقة إيسوا النائية وغيرَ المكتشفة تقريبًا، التي تقع على حافة الغطاء الجليدي الداخلي (انظر الشكل ٩-١). اضطُرَّا أولًا إلى الإبحار في قارب مكجريجور الصغير حتى منبع الفيورد المكتظِّ بالجليد في جودهوب حيث كان مستوطنو الفايكنج يعيشون حياتهم المحفوفةَ بالمخاطر في العصور الوسطى. بعد ذلك نقلتهما مروحيةٌ تابعة لشركة تعدين محلية كانت مهتمةً أيضًا هي الأخرى بالمنطقة، التي قد أشارت عملياتُ المسح المغناطيسية الجوية إلى احتمالِ أنها غنيةٌ بخام الحديد. اكتشف العالمان أنه داخل الصخر الأخضر بمنطقة إيسوا يُوجَد العديدُ من الكتل الصخرية التي تُشبه الوسادات، والتي تُعرف باسم الحمم الوسادية البازلتية، والتي قد كوَّنَتها الحممُ البركانية التي تنبثق في مياه البحر مباشرةً، والتي تُسمى «البراكين الطينية». مرةً أخرى، عمر هذه الصخور هو ٣,٧ مليار سنة على الأقل. أظهر الاكتشاف بوضوحٍ أن الأرض كانت بها محيطاتٌ دافئة سائلة بعد

مدةٍ ليست بطويلةٍ من تكوينها،[1] وكانت بها براكينُ طينية (انظر الشكل ٩-١) خرجَت من مَنافِسَ حراريةٍ مائية في قاعِ بحرٍ ضحل.




شكل ٩-١: خريطة جرينلاند توضح موقع منطقة إيسوا.

لكن المفاجأة الحقيقية برزت حينما قاس مينيك روزينج — الباحثُ من المتحف الجيولوجي بكوبنهاجن — نسبةَ نظائرِ الكربون في الصخر الأخضر بإيسوا. تحتوي الصخور على ما يقرب من ٠٫٤ بالمائة من الكربون، وعند قياس نسبتَي النظيرَين $^{13}C$ و$^{12}C$، وُجد أن كمية النظير الأثقل والأشدِّ ندرةً $^{13}C$ في الصخور أقلُّ بكثير من المتوقَّع. تحتوي المصادر غير العضوية للكربون مثل ثاني أكسيد الكربون الجوي على نحوِ واحدٍ بالمائة من النظير $^{13}C$، ولكن تُفضل عملية البناء الضوئي أن تدمج النظير $^{12}C$ الأخفَّ في النبات والكتلة الحيوية الميكروبية، ومن ثم يُشير انخفاضُ مستوى النظير $^{13}C$ إلى وجود

مادةٍ عضوية. أشارت هذه النتائجُ إلى أنه قد عاشت كائناتٌ حية منذ ٣,٧ مليار سنة بداخل هذه المياهِ الدافئة التي تُحيط بالبراكين الطينية في إيسوا، وكانت تمتصُّ الكربون — مثل النباتات الحاليَّة — من ثاني أكسيد الكربون الموجود في الهواء أو المذاب في المياه، وكانت تستخدمه لبناء كلِّ المركبات المعتمدة على الكربون التي تُكوِّن خلاياها.

شكل ٩-٢: بركانٌ طيني حديث في ترينيداد. هل انبثقَت الحياة الأولى على الأرض من بركانٍ طيني مماثل، مخلِّفةً آثارها في الصخر الأخضر بإيسوا؟ مصدر الصورة: مايكل سي ريجل عبر ويكيبيديا كومنز.

لا تزال النظرية الخاصة بصخور إيسوا محلَّ جدل، ولا يقتنع كثيرٌ من العلماء بأن انخفاض مستويات النظير $^{13}C$ الموجودة هناك يعني ضمنًا بالضرورة أنه كانت هناك كائناتٌ حية في هذه الحقبة المبكِّرة للغاية. ينبع كثيرٌ من الشك من حقيقة أن الأرض منذ ٣,٨ مليار سنة كانت في خِضمِّ ما يُعرف باسم «القصف الشديد المتأخر»؛ إذ كانت الأرض تُواجه اصطداماتٍ منتظمةً من الكويكبات والمذنَّبات ذات الطاقات الكافية لتبخير

أيِّ مياه سطحية، وعلى الأرجح أيضًا قتل أي حياةٍ في المحيطات. بالطبع اكتشاف حفرياتٍ لأي كائنات قديمة تنمو بالبناء الضوئي سيحسم القضية، ولكن تعرَّضَت صخور إيسوا إلى تشوُّهاتٍ شديدة على مدار آلاف السنين؛ ومن ثم لن يُمكن التعرفُ على أي حفريات من هذا القبيل. علينا أن نتخطَّى على الأقل عدةَ مئاتٍ من ملايين السنين قبل أن يُوجَد دليلٌ واضح على وجود حياة في شكل حفريات ميكروبات قديمة يمكن التعرفُ عليها.

وعلى الرغم من عدم وجود أدلةٍ قاطعة على ذلك، يعتقد كثيرون أن بيانات النظائر في إيسوا توفِّر أقدمَ مؤشرات على الحياة في الأرض، وبالتأكيد كانت ستوفر البراكين الطينية في إيسوا بيئة مثالية لقيام الحياة بفضل مياهها القلوية الدافئة التي تنبع من مَنافس حرارية. لقد كانت ستكون غنيةً بالكربونات غير العضوية المذابة، وكانت ستمتلئ الصخور الثعبانية الملتوية المقذوفة، العالية المساميَّة، بمليارات التجاويف الصغيرة، التي كان من الممكن أن يكون كلٌّ منها بمنزلة بيئةٍ دقيقة قادرة على توفير التركيز والاستقرار لكميات ضئيلة من المركبات العضوية. وربما أصبحَت الحياة خضراءَ بالفعل لأول مرةٍ في طين جرينلاند. ولكن السؤال هو: كيف؟

## مشكلة المادة اللزجة

تدور أكبرُ ثلاثة ألغاز في العلم بوجهٍ عام حول أصل الكون وأصل الحياة وأصل الوعي. ميكانيكا الكم ضالعةٌ بشدة في صُلب اللغز الأول، وقد تناولنا من قبلُ ارتباطَها المحتمل باللغز الثالث؛ وكما سنكتشف قريبًا، فقد تساعد أيضًا في تفسير اللغز الثاني. لكن ينبغي أن ندرس أولًا ما إذا كانت التفسيرات غيرُ الكمية قادرةً على تقديم تفسير وافٍ بشأن أصل الحياة أم لا.

توصَّل العلماء والفلاسفة وعلماء اللاهوت الذين ظلُّوا يتفكرون بشأن أصل الحياة على مدار قرون إلى مجموعة متنوعة وغنيَّة من النظريات لتفسيره، تتراوح ما بين الخلق الإلهيِّ وحتى بزوغ الأرض من الفضاء فيما يُسمى بنظرية «التبذُّر الشامل». ظهر نهجٌ علمي أكثر في القرن التاسع عشر على يد علماء أمثال تشارلز داروين الذي قال إن العمليات الكيميائية التي حدثَت في «بركة صغيرة دافئة»؛ مما ربما أدَّى إلى إنشاء مادة حية. النظرية العلمية الرسمية التي استندَت إلى تكهناتِ داروين؛ طرحها الروسي إلكسندر أوبارين والإنجليزي جيه بي إس هولدين، بنحوٍ منفصل ومستقل، في مطلع القرن العشرين، وتُعرف الآن بوجهٍ عام باسم فرضية أوبارين–هولدين. اقترح كلاهما أن

الغلاف الجويَّ في بدايةِ تكوُّن الأرض كان غنيًّا بالهيدروجين والميثان وبخار الماء، وقد امتزجَت هذه المواد — عندما تعرضَت إلى البرق أو الإشعاع الشمسي أو حرارة البراكين — وكوَّنَت خليطًا من المركبات العضوية البسيطة. ثم اقترَحا أن هذه المركبات ظلَّت تتراكمُ في المحيط الأولي حتى شكَّلَت حساءً عضويًّا دافئًا ومخففًا، تدفَّق مع الماء على مدار ملايين السنوات، وربما تدفَّق فوق براكين إيسوا الطينية، حتى أسفر مزيجٌ من مُكوناته تكوَّن مصادفةً في النهاية إلى جزيءٍ جديد يمتاز بخاصية غير عادية؛ ألا وهي القدرة على التضاعف الذاتي.

اقترح هولدين وأوبارين أن ظهور هذا «المضاعف البدائي» كان الحدثَ الرئيسي الذي أدَّى إلى نشوء الحياة كما نعرفها. وربما أصبح نجاحُه اللاحق خاضعًا لما نصَّت عليه نظريةُ الانتقاء الطبيعي لداروين. وبما أن المضاعف كيانٌ غاية في البساطة؛ فقد ولَّد العديد من الأخطاء أو الطفرات في أثناء عملية تضاعُفِه. وربما تنافسَت هذه المضاعفات الطافرة بعد ذلك مع الأشكال غير الطافرة للحصول على الموادِّ الكيميائية التي يمكن من خلالها بناءُ المزيد من المضاعفات. كذلك ربما خلفت المضاعفات الأنجحُ أكبرَ عددٍ من الذرية، وربما بدأتْ عمليةٌ جزيئية من الانتقاء الطبيعي الداروييني في دفعِ سربِ المضاعفات نحو فاعليةٍ أكبر وتعقيدٍ أكبر. ربما حظيَت المضاعفاتُ التي حصَلتْ على جزيئاتٍ إضافية — مثل الببتيدات — التي حفزت إنزيميًّا عمليةَ تضاعفها، بميزة، وربما بطريقةٍ ما أصبح البعضُ منها محبوسًا في حويصلات (أي: أكياس صغيرة ممتلئة بالسوائل أو الهواء) يحيط بها أغشيةٌ دهنية — مثل الخلايا الحية اليوم — وفَّرت لها الحمايةَ من تقلُّبات بيئتها الخارجية. بمجرد أن حُبست، ربما استطاع الجزء الداخلي في الخلية دعم التحولات البيوكيميائية — عملية الأيض الخاصة بها — من أجل صُنع جزيئاتها الحيوية ومنعها من التسرُّب. وبفضل قدرتها على الحفاظ على حالتها الداخلية والانعزال عن بيئتها، ربما وُلدت الخلية الحية الأولى.

قدمَت فرضية أوبارين–هولدين إطارًا عِلميًّا يمكن أن يُفهم منه كيف يمكن أن تكون قد نشأَت الحياة على الأرض. لكن لم تخضع النظرية إلى الاختبار لعدةِ عقود إلى أن اهتمَّ بها اثنان من علماء الكيمياء الأمريكيين.

بحلول خمسينيَّات القرن العشرين، كان هارولد يوري عالمًا متميزًا لكنه مثيرٌ للجدل. لقد حصل على جائزة نوبل في الكيمياء عام ١٩٣٤ على اكتشاف الديوتيريوم، وهو نظير الهيدروجين الذي، كما تتذكَّر من الفصل الثالث، قد استُخدم في دراسة تأثيرِ النظائر

الحركية في الإنزيمات، ومن ثم إثبات أن نشاطها يتضمَّن النفق الكمي. خبرة يوري في تنقية النظائر أهَّلتْه في عام ١٩٤١ لتولِّي رئاسة جزءِ تخصيب اليورانيوم من مشروع مانهاتن، الذي كان يحاول تطويرَ القنبلة الذرية. لكن شعر يوري بخيبة الأمل عندما أدرك أهدافَ مشروع مانهاتن والدوافع وراء التكتُّم عليه، وحاول أن يَثْنِيَ الرئيسَ الأمريكي هاري إس ترومان عن قرارِ رمي القنبلة الذرية على اليابان. وبعد حادثة هيروشيما وناجازاكي، كتب يوري مقالًا في مجلة «كوليرز» الشهيرة بعنوان «أنا خائف» يُحذِّر فيه من المخاطر التي تفرضها الأسلحة الذرية. ومن موقعه في جامعة شيكاغو، جدَّ أيضًا في مُعارضة الحملة المناهضة للشيوعية التي أطلقها مكارثي في خمسينيَّات القرن العشرين، وكتب خطابات إلى الرئيس ترومان دعمًا لقضية يوليوس وإيثيل روزنبرج اللذين حوكما بتهمة التجسُّس، وأُعدِما في النهاية بتهمة نقل معلوماتٍ سرية ذرِّية إلى الاتحاد السوفييتي.

كان ستانلي ميلر هو عالِم الكيمياء الأمريكي الآخر الذي اشترك في اختبار فرضية أوبارين–هولدين، وقد التحق بجامعة شيكاغو بصفته طالبَ دكتوراه عامَ ١٩٥١، وعمل في البداية على مسألة التخليق النووي للعناصر داخل النجوم، وذلك تحت إشراف العالم المعروف باسم «أبو القنبلة الهيدروجينية»، إدوارد تيلر. في أكتوبر ١٩٥١، تغيرَت حياة ميلر حينما حضر محاضرةً ألقاها هارولد يوري عن أصل الحياة، وناقش خلالها معقوليةَ سيناريو أوبارين–هولدين واقترح أنه ينبغي لأحدٍ أن يختبر ذلك السيناريو. أُعجب ميلر بالأمر كثيرًا، ومن ثم انتقل من مختبر تيلر إلى مختبر يوري وبدأ يسعى لإقناع يوري بأن يُصبح المشرفَ على رسالته للدكتوراه، وأن يُتيح له تنفيذَ التجارِب. تشكَّك يوري في البداية بشأن خطط الطالب الحماسية لاختبار نظرية أوبارين–هولدين؛ إذ حسب أن التفاعُلات الكيميائية غيرَ العضوية قد تستغرق ملايينَ السنين حتى تولِّد عددًا كافيًا من الجزيئات العضوية التي يمكن اكتشافها، في حين أن ميلر كان أمامه ثلاثُ سنوات فقط كي يحصل على درجة الدكتوراه! وعلى الرغم من ذلك، كان يوري مُستعدًّا أن يُعطيه المكانَ والموارد التي يحتاج إليهما لمدةٍ تتراوح من ستة شهور إلى سنة. وبهذه الطريقة، إن لم تُحقق التجارِبُ أيَّ تقدم، فكان سيكون أمام ميلر الوقتُ الكافي كي يتحول إلى مشروع بحثي أكثر أمانًا.

في محاولة ميلر لاستنساخ الظروف التي نشأتْ فيها الحياة على الأرض في أول تكوينها، حاكى الغلافَ الجوي البدائي عن طريقِ ملء زجاجة بالمياه، كي تُحاكِيَ المحيط، والمضاف إليها الغازات التي اعتقد أنها كانت ستكون موجودةً في الغلاف الجوي

وهي: الميثان والهيدروجين والنشادر وبخار الماء. ثم حاكى البرقَ بتعريض الخليط للشَّرر الكهربائي. فوجئ ميلر واندهش المجتمع العلميُّ بوجهٍ عام لما اكتشف أنه بعد أسبوع واحد فقط من تسليط الشرر على الغلاف الجوي البدائي الخاص به، احتوَت الزجاجة على كمياتٍ كافية من الأحماض الأمينية، وهي اللبنات التي تُبنى منها البروتينات. نُشرت الورقة البحثية التي تصف هذه التجرِبةَ في مجلة «ساينس» عام ١٩٥٣،[1] وقد اعتُبر هو المؤلفَ الوحيد لها؛ إذ اتخذ هارولد يوري موقفًا شديدَ الغرابة لما أصرَّ على أن طالب الدكتوراه الخاص به يستحقُّ أن يُنسب له هذا الاكتشاف بالكامل.

تُعرف التجرِبة اليوم بوجهٍ عام باسم تجربة ميلر-يوري على الرغم من لفتةِ يوري غير الأنانية، وقد أُشيد بها باعتبارها أولَ خطوة لإنشاء حياةٍ داخل المختبر، وظلت علامةً بارزة في علم الأحياء. وعلى الرغم من عدم توليد جزيئات ذاتية التضاعف، كان يُعتقد بوجهٍ عام أن حساء ميلر «البدائي» من الأحماض الأمينية سيَتَبلْمرُ ليُكوِّن الببتيدات والبروتينات المعقَّدة، وستنتج عنه في النهاية المضاعفاتُ حسب فرضية أوبارين-هولدين، وذلك إذا توفَّر له الوقتُ الكافي ومساحة المياه الكبيرة بالقدر الكافي.

منذ خمسينيَّات القرن العشرين، كرَّرت مجموعةٌ كبيرة من العلماء تجرِبةَ ميلر-يوري بعدة طرق مختلفة، وباستخدام أخلاطٍ مختلفة من المواد الكيميائية والغازات ومصادر الطاقة؛ لتوليد الأحماض الأمينية، وكذلك السكريات، وحتى كميات صغيرة من الأحماض النووية. وها نحن بعدَ أكثرَ من نصف قرن، ولم يتمكَّن حساءٌ بدائي مُنشأ في المختبر حتى الآن من توليد مضاعف بدائي على حدِّ فرضية أوبارين-هولدين. ولفهم السبب، علينا أن نُلقي نظرةً أقرب على تجارب ميلر.

المشكلة الأساسية هي تعقيد الخليط الكيميائي الذي ولَّده ميلر. معظم المادة العضوية المنتجة كان في شكل قَطِران معقَّد، من النوع المألوف لدى علماء الكيمياء العضوية ممَّن يرَون مثلَ هذه المواد كثيرًا عندما لا يُتَحكَّم تحكمًا صارمًا في إجراءات تخليق المواد الكيميائية المعقدة الخاصة بهم، ومن ثم تنشأ الكثير من المواد الناتجة الخاطئة. في الحقيقة، يسهل إنتاج قَطِران مُشابه وأنت مستريحٌ في مطبخك فقط بحرق العشاء، تلك المادة اللزجة ذات اللون البُني الضارب إلى الأسود التي تصعب جدًّا إزالتُها من قعر المقلاة؛ مماثلةٌ إلى حدٍّ ما لتركيب القطران الذي ولَّده ميلر. تكمن مشكلة مثل هذه الأخلاط الكيميائية في صعوبةِ إنتاج أي شيء أكثرَ من هذه المادة اللزجة التي تُشبه القطران منها. من الناحية الكيميائية، فهذه الأخلاط لا تُعد «مُنتجة»؛ لأنها بالغةُ التعقيد

لدرجة أن أي مادة كيميائية محدَّدة — مثل الأحماض الأمينية — عادةً ما تتفاعل مع العديد من المركبات المختلفة الأخرى لدرجة أنها تَضيع في غابةٍ من التفاعلات الكيميائية غير المهمة. إن ملايين الطهاة، وآلاف الطلاب الجامعيِّين، يُنتجون هذه المادةَ اللزجة العضوية على مدار قرون، ولم يخرجوا بنتيجةٍ سوى مهمة غسل صعبة.

## من المادة اللزجة إلى الخلايا

تخيَّل أنك تُحاول عمل حساء بدائي عن طريق كشطِ كل المادة اللزجة من قعرِ كل القدور المحترقة في العالم بالكامل، ثم إذابة كلِّ هذه الترليونات من الجزيئات العضوية المعقدة في مُسطَّح مائي بحجم محيط. الآن، أضِف بضعةَ براكين طينية من جرينلاند باعتبارها مصدرَ الطاقة، وربما شرارة برق، وقلِّب. كم عدد السنوات المطلوبة أن تُقلب فيها حساءك قبل أن تخلق الحياة؟ مليون سنة؟ مائة مليون سنة؟ مائة «مليار» سنة؟

حتى أبسط صور الحياة، على نحوٍ مشابه كثيرًا لهذه المادة اللزجة الكيميائية، معقدةٌ تعقيدًا غيرَ عادي. لكن على خلاف المادة اللزجة، فإنها أيضًا بالغةُ التنظيم. تكمن مشكلةُ استخدام المادة اللزجة باعتبارها مادةَ البداية لتوليد حياة منظمة في أن القُوى الديناميكية الحرارية العشوائية التي كانت متاحةً في الأرض البدائية — حركات الجزيئات التي تُشبه كرات البلياردو التي تناولناها في الفصل الثاني — عادةً ما تُدمر النظام ولا تخلقه. إنك ترمي دجاجةً في القِدْر وتُشعل النار تحتها وتُقلبها وتصنع حساء دجاج. لم يسبق أن رمى أحدٌ علبة حساء في قِدر ثم صنع دجاجة.

بالطبع لم تبدأ الحياةُ بالدجاج (أو البيض). أبسط الكائنات الذاتية التضاعف الموجودة في الوقت الحاليِّ هي البكتيريا، وهي أبسطُ بكثيرٍ من أي طائر.[٢] أبسط هذه الكائنات يُسمى المفطورة (وهي البكتيريا التي كانت موضوعَ تجربة الحياة التخليقية التي ابتكرها كريج فينتر)، ولكن حتى هذه المخلوقات تُعد من أشكال الحياة البالغة التعقيد. إذ يُشفر جينومها ما يقرب من خَمسِمائة جين، وتنتج عددًا مماثلًا من البروتينات البالغة التعقيد التي تصنع — مثل الإنزيمات — الليبيداتِ والسكريات والحمضَ النووي والحمض النووي الريبوزي وغشاء الخلية والكروموسوم وغيرَها من البنيات الأخرى، والتي كلٌّ منها أعقدُ بكثيرٍ من محرك سيارتك. في الواقع، المفطورة بكتيريا ضعيفة ولا تستطيع البقاءَ على قيد الحياة بمفردها، ولا بد أن تحصل على الكثير من جُزيئاتها الحيوية من مضيفها؛ إنها طفيليةٌ، ومن ثم لن تستطيع البقاءَ على قيد الحياة في أي

حساء بدائي حقيقي. هناك بكتيريا أخرى أكثرُ احتمالًا تندرج ضمن الكائنات الأحادية الخلية وتُسمى البكتيريا الزرقاء، وهي تستطيع القيام بعملية البناء الضوئي كي تحصل على كلِّ موادِّها الكيميائية الحيوية. لو كانت تلك البكتيريا موجودةً في الأرض بعد نشأتها، لأصبحَت مصدرًا محتملًا لتلك المستويات المنخفضة من النظير $^{13}C$ المكتشفة في صخور إيسوا بجرينلاند التي يعود تاريخها إلى ٣,٧ مليار سنة. لكن هذه البكتيريا أشدُّ تعقيدًا بكثيرٍ من المفطورة، حيث إن الجينوم لديها يُشفر ما يقرب من «ألفَي» جين. فكم تحتاج من الوقت في تقليب محيط الحساء البدائي الخاص بك لتخليق البكتيريا الزرقاء؟

كان السير فريد هويل، وهو عالم الفلَك البريطاني الذي صاغ مصطلح «الانفجار العظيم»، مهتمًّا بمعرفة أصل الحياة وظل معه هذا الاهتمامُ طيلة حياته. قال إن احتمالية عمل العمليات الكيميائية العشوائية معًا من أجل توليد الحياة تُشبه هبوبَ إعصار في ساحة خردة، وتجميعَه لطائرةٍ نفاثة جامبو بالصدفة. النقطة التي كان يُثيرها بوضوحٍ هي أن الحياة القائمة على الخلايا — كما نعرفها اليوم — بالغةُ التعقيد والتنظيم بحيث لا يمكن أن تنشأ من الصدفة وحدها؛ لا بد أنه سبقَتها مضاعفاتٌ ذاتية أبسط.

## عالم الحمض النووي الريبوزي

إذن، كيف كان شكلُ تلك المضاعفات الذاتية الأولية؟ وكيف كانت تعيش؟ لَمَّا لم يبقَ أيٌّ منها على قيد الحياة اليوم، ربما بسبب الانقراض بسبب تفوُّق السلالات المنحدرة منها الأكثر نجاحًا عليها، فغالبًا ما ستبنى معرفتنا لطبيعتها على تخميناتٍ ذات أُسُس علمية. يتمثَّل أحدُ المناهج في هذا الإطار في الاستقراء العكسي من أبسط أشكال الحياة الباقية اليوم لتخيُّل مضاعفٍ ذاتي أبسط بكثير، وهو نوعٌ من البكتيريا الأكثر بساطة التي ربما كانت مقدمةً لكل أشكال الحياة في الأرض منذ مليارات السنين.

تكمن المشكلة في عدم إمكانية استخلاص مضاعفاتٍ ذاتية أبسط من الخلايا الحية؛ لأنه لا شيء من مُكونات الخلايا قادرٌ على التضاعف الذاتي من تلقاءِ نفسه. جينات الحمض النووي لا تُضاعف نفسها؛ فهذه وظيفةُ إنزيمات البوليميراز في الحمض النووي. وبدورها، لا تُضاعف هذه الإنزيمات نفسَها لأنها تحتاج إلى أن تُشفَّر أولًا داخل جدائل الحمض النووي والحمض النووي الريبوزي.

سيكون للحمض النووي الريبوزي دورٌ مهم في هذا الفصل، ومن ثم قد يُفيد أن نتذكر ما هو وما يفعله. الحمض النووي الريبوزي هو القريبُ الكيميائي الأبسط للحمض

النووي، ويتكوَّن من لولب أحادي الجديلة على خلاف اللولب المزدوج في الحمض النووي. وعلى الرغم من هذا الاختلاف، فإن الحمض النووي الريبوزي بنحوٍ أو بآخَر له سَعةُ تشفير المعلومات الجينية ذاتُها التي لقريبه الشهير؛ الفرق الوحيد أنه لا يمتلك النسخةَ المُكملة من تلك المعلومات. وتمامًا مثل الحمض النووي، فإن المعلومات الجينية للحمض النووي الريبوزي تُكتب بأربعة حروفٍ جينية مختلفة؛ ومن ثم يمكن تشفير الجينات في الحمض النووي الريبوزي مثلما يُمكن أن تشفَّر في الحمض النووي. في الحقيقة، العديد من الفيروسات — مثل فيروس الأنفلونزا — تمتلك جينومات حمض نووي ريبوزي بدلًا من جينومات حمض نووي. لكن في الخلايا الحية مثل خلايا البكتيريا أو الحيوانات أو النباتات، يؤدي الحمضُ النووي الريبوزي دورًا مختلفًا عن دور الحمض النووي؛ المعلومات الجينية التي تُكتَب في الحمض النووي تُنسخ أولًا في الحمض النووي الريبوزي في عملية قراءة الجينات التي تناولناها في الفصل السابع. وعلى خلاف كروموسوم الحمض النووي غير القابل للتحرك والكبير نسبيًّا، تمتلك سلاسلُ الحمض النووي الريبوزي الأقصر الحريةَ في التحرك في جنبات الخلية، ومن ثم يُمكن أن تحمل الرسالةَ الوراثية للجينات من الكروموسوم إلى آلية تخليق البروتينات. وهناك يُقرأ تسلسل الحمض النووي الريبوزي ويُترجَم إلى تسلسلات الأحماض الأمينية التي تنتقل إلى البروتينات، مثل الإنزيمات. لذا، في الخلايا الحديثة على الأقل، الحمض النووي الريبوزي وسيطٌ رئيسي بين الشفرة الجينية المكتوبة في الحمض النووي والبروتينات التي تصنع جميع المكوِّنات الأخرى في الخلايا.

بالعودة إلى مشكلة أصل الحياة التي نُناقشها، نقول إنه على الرغم من أن الخلية الحية بكاملها تُعتبر كِيانًا ذاتيَّ التضاعف، فإن مكوناتها الفردية ليست كذلك؛ إنها مثل المرأة التي تلدُ طفلًا من جنسها (ببعض «المساعدة») ولكن قلبها أو كبدها لا يفعل ذلك. وهذا يخلق مشكلةً عند محاولة الاستقراء العكسي من الحياة الخلوية المعقَّدة الموجودة اليوم إلى سلَفِها الأبسط بكثيرٍ غير الخلوي. وإذا غيَّرنا صيغة الأمر، فسيصبح السؤال هو: ما الذي أتى أولًا؛ هل جين الحمض النووي أم الحمض النووي الريبوزي أم الإنزيم؟ وإذا أتى الحمض النووي أو الحمض النووي الريبوزي أولًا، فما الذي صنعهما؟ وإذا أتى الإنزيم أولًا، فكيف شُفِّر؟

يوجد حلٌّ محتمل قدَّمه عالمُ الكيمياء الحيوية الأمريكيُّ توماس سيك، الذي في عام ١٩٨٢ اكتشف أن بعض جزيئات الحمض النووي الريبوزي تُشفر المعلومات الجينية وفي الوقت ذاته يمكن أن تقوم بدور الإنزيمات في تحفيز التفاعلات (وهذا العمل أهَّله

لمشاركة جائزة نوبل عام ١٩٨٩ في الكيمياء مع العالم سيدني ألتمان). الأمثلة الأولى على هذه «الريبوزيمات» — كما تُعرف — وُجدت في جينات كائنات صغيرة أحادية الخلية تُسمى «رباعيات الغشاء» وهي نوعٌ من الأوليات الموجودة في بِرَك المياه العذبة، ولكن منذ ذلك الحين وُجد أن الريبوزيمات لها دورٌ في كل الخلايا الحية. وسرعان ما اتُّخذت بعد اكتشافها على أنها حلٌّ محتمل للخروج من مُعضلة نشأة الحياة. تقترح «فرضية عالم الحمض النووي الريبوزي»، كما أصبحَت تُعرف، أن التخليق الكيميائي الأوَّلي نتج عنه توليدُ جزيءٍ من الحمض النووي الريبوزي يمكن أن يأخذ دور الجين والإنزيم في آنٍ واحد، ومن ثَم يمكنه تشفير بنيته (مثل الحمض النووي)، وعملُ نُسخٍ من نفسه (مثل الإنزيمات) من المواد الكيميائية الحيوية المتاحة في الحساء البدائي. كانت عملية النسخ هذه في البداية عشوائية بشدة، مما أدى إلى ظهور الكثير من الصور الطافرة التي ظلَّت تتنافس مع بعضها البعض في المنافسة الداروينية الجزيئية التي تناولناها سابقًا. وبمرور الوقت، قامت مضاعفاتُ الحمض النووي الريبوزي هذه بتوظيف البروتينات لتحسين فاعلية التضاعف لدَيها مما أدى إلى تكوُّن الحمض النووي وفي النهاية أول خلية حية.

أصبحت فكرةُ أن عالَمًا من جزيئات الحمض النووي الريبوزي الذاتية التضاعف سبقَ ظهورَ الحمض النووي والخلايا؛ فكرةً شبهَ راسخةٍ في الأبحاث الخاصة بأصل الحياة. ثبَتَ أن الريبوزيمات قادرةٌ على تنفيذ كل التفاعلات الأساسية المتوقَّعة من أي جزيءٍ ذاتي التضاعف. على سبيل المثال، يمكن لفئةٍ من الريبوزيمات أن تجمع جزيئين من الحمض النووي الريبوزي معًا، وتستطيع فئة أخرى فصلهما عن بعضهما البعض. ويمكن لشكلٍ آخَر منها أن يصنع نسخًا من سلاسلَ قصيرةٍ من قواعد الحمض النووي الريبوزي (التي لا يتجاوز طولها حفنةً من القواعد). من هذه الأنشطة البسيطة، يُمكننا أن نتخيَّل ريبوزيمًا أشدَّ تعقيدًا؛ قادرًا على تحفيز المجموعة الكاملة للتفاعلات اللازمة للتضاعف الذاتي. وبمجرد أن تبدأ عملية التضاعف الذاتي، تبدأ عملية الانتقاء الطبيعي؛ ومن ثم يكون عالم الحمض النووي الريبوزي قد وُضع على مسارٍ تنافسي أدى في النهاية، أو هكذا يُقال، إلى أول خلية حية.

لكن هذا السيناريو يتخلَّله العديدُ من المشاكل. فعلى الرغم من أن التفاعلات الكيميائية الحيوية البسيطة يُمكن أن تُحفِّزها الريبوزيمات، فإن التضاعف الذاتي للريبوزيم عمليةٌ معقَّدة إلى أبعدِ الحدود؛ حيث تتضمَّن تعرُّفَ الريبوزيم على تسلسلِ قواعده، وتحديدَ المواد الكيميائية المماثلة في بيئة الريبوزيم، وتجميعَ تلك المواد الكيميائية في التسلسل الصحيح

لصُنع نسخةٍ من ذاته. هذه مهمةٌ صعبة حتى على البروتينات التي تحظى بالعيش داخل الخلايا الزاخرة بالمواد الكيميائية الحيوية الصحيحة، ومن ثم تَزيد صعوبةُ تصور كيف يتحقق ذلك للريبوزيمات التي تحيا في الحساء البدائي الفوضوي واللزج. وحتى اليوم، لم يكتشف أحدٌ أو ينجح في صُنع ريبوزيم باستطاعته تنفيذُ هذه المهمة المعقَّدة، حتى في المختبر.

تُوجَد أيضًا المشكلةُ الأكثر جوهريةً والمتعلقة بطريقةِ صنع جزيئات الحمض النووي الريبوزي ذاتها في الحساء البدائي. يتكوَّن الجزيء من ثلاثة أجزاء وهي: قاعدة الحمض النووي الريبوزي التي تُشفِّر معلوماتُه الجينية (مثلما تشفر قواعد الحمض النووي معلومات الحمض النووي الجينية)، ومجموعة فوسفات، وسكر يُسمَّى الريبوز. وعلى الرغم من تحقيق قدرٍ من النجاح في تصميم تفاعلاتٍ كيميائية معقولة بإمكانها توليدُ قواعد الحمض النووي الريبوزي ومكونات الفوسفات في الحساء البدائي، فإن التفاعل الأكثر معقولية الذي يُنتج الريبوز يُنتج أيضًا مجموعةً كبيرة من أنواع السكر الأخرى. لا تُوجَد آليةٌ غير بيولوجية معروف أنها يمكن أن تُولِّد سكر الريبوز من تلقاء نفسها. وحتى إن جرى توليد سكر الريبوز، فإن تجميع المكونات الثلاثة مع بعضها البعض بالطريقة الصحيحة لَهو في ذاتِه مهمةٌ صعبة. فعند تجميع الأشكال المعقولة من مكونات الحمض النووي الريبوزي الثلاثة بعضها مع بعض، فإنها تُجمَّع بطرق اعتباطية لتُشكل المادة اللزجة البدائية الحتمية. يتجنَّب علماء الكيمياء هذه المشكلةَ باستخدام أشكالٍ خاصة من القواعد عُدِّلَت مجموعاتها الكيميائية بحيث تتحاشى هذه التفاعلاتِ الجانبيةَ غيرَ المرغوب فيها، لكن هذا تحايل؛ وعلى أي حال، من غير المُحتمَل أن تكون القواعد «المنشِّطة» قد تشكَّلَت في ظروفٍ بدائية مقارنةً بقواعد الحمض النووي الريبوزي الأصلية.

على الرغم من ذلك، فإن بإمكان علماء الكيمياء تخليقَ قواعدِ الحمض النووي الريبوزي من موادَّ كيميائية بسيطة؛ عن طريق المرور بسلسلةٍ بالغةِ التعقيد من التفاعلات المحكومة بعناية، التي تُعزَل فيها كل مادة ناتجة يُرجى الحصولُ عليها من التفاعل الواحد، وتنقيتها قبل أن تدخل التفاعل التالي. قدَّر عالم الكيمياء الاسكتلندي جراهام كيرنز–سميث أنه يُوجَد نحو ١٤٠ خطوةً ضرورية لتخليق قاعدةٍ واحدة من الحمض النووي الريبوزي من مركَّبات عضوية بسيطة يُحتمل أنها كانت موجودةً في الحساء البدائي.[2] وفي كل خطوة يوجد على الأقل نحوُ ستة تفاعلات بديلة ينبغي تجنبُها. هذا يُسهل تصور عملية تخليق المادة الكيميائية حيث يمكن تصورُ كل جزيء باعتباره

نوعًا من النَّرد الجزيئي، بحيث تكون كلُّ خطوة تُناظر رميةً يُمثل فيها الرقمُ ستة توليدَ المادة الناتجة الصحيحة، وأيُّ رقم آخر توليدَ المادة الناتجة الخطأ. وبذلك، فإن احتمالات تحويل أيِّ جزيءٍ أوَّلي إلى حمضٍ نووي ريبوزي في النهاية تُعادل رمي الرقم ستة ١٤٠ مرةً على التوالي.

بالطبع يُحسِّن علماءُ الكيمياء من هذه الاحتمالات الصعبة بالتحكُّم الجيد في كل خطوة، ولكن العالم البدائي كان سيُضطرُّ إلى الاعتماد على الصدفة وحدها. هل تُراها الشمس قد ظهرت في الوقت المناسب كي تبخر بِركة صغيرة من الموادِّ الكيميائية تُحيط ببركانٍ طيني؟ أم تُراه البركان الطيني ثار لإضافة ماءٍ وقليل من الكبريت لإنشاء مجموعةٍ أخرى من المركبات؟ أم هل تُراها العاصفة البرقية قد قلَّبَت الخليط وسرَّعت من بعضِ التغييرات الكيميائية بإضافة الطاقة الكهربية؟ ربما تستمرُّ الأسئلة، ولكن لا صعوبة البتة في تقديرِ احتمالية أن تُسفر كلُّ خطوة من الـ ١٤٠ خطوةً الضرورية — بالاعتماد على الصدفة وحدَها — عن المادة الناتجة المناسبة من بين ستِّ موادَّ ناتجة ممكنة: إنها تُساوي واحدًا في $^{١٤٠٦}$ (أي تقريبًا: $^{١٠٩١٠}$). للحصول على فرصةٍ إحصائية لتوليد الحمض النووي الريبوزي من خلال عملياتٍ عشوائية بحتة، ستحتاج على الأقل إلى هذا العدد من الجزيئات البدائية في حسائك البدائي. لكن العدد $^{١٠٩١٠}$ أكبرُ بكثير من حتى عدد الجسيمات الأساسية في الكون المشهود بأكمله (حيث إنها تساوي تقريبًا $^{٨٠١٠}$). ببساطة، لم يكن لدى الأرض الجزيئاتُ الكافية، ولا الوقتُ الكافي، لتوليد هذه الكميات المَهولة من الحمض النووي الريبوزي في هذه الملايين من السنين؛ ما بين تكوينها وظهور الحياة في الوقت الذي اقترَحَته صخورُ إيسوا.

على الرغم من ذلك، هَبْ أن تخليق كمياتٍ هائلة من الحمض النووي الريبوزي حدث بالفعل من خلال بعض العمليات الكيميائية غير المكتشفة حتى الآن. علينا الآن التغلُّب على المشكلة المستعصية بالقدر نفسِه وهي ترتيبُ القواعد الأربع المختلفة للحمض النووي الريبوزي (المكافئة — كما ستتذكَّر — للحروف الأربعة لشفرة الحمض النووي وهي A وG وC وT) معًا في التسلسل الصحيح لتخليق ريبوزيم قادر على التضاعف الذاتي. معظم الريبوزيمات عبارةٌ عن سلاسلِ حمض نووي ريبوزي بطولِ مائة قاعدة على الأقل. في كل موضع في السلسلة، يجب أن تكون هناك قاعدةٌ من القواعد الأربعة، ومن ثم يوجد $^{١٠٠٤}$ (أو $^{٦٠١٠}$) طريقة مختلفة لتجميع سلسلةٍ من الحمض النووي الريبوزي بطول ١٠٠ قاعدة. ما مدى احتمالية أن يؤديَ الارتباط العشوائي لقواعد الحمض النووي الريبوزي إلى التسلسل الصحيح بطولِ السلسلة؛ لتكوين ريبوزيم ذاتيِّ التضاعف؟

بما أنه يبدو أننا نستمتع بالأعداد الكبيرة، فيُمكننا حسابُ ذلك. يتبيَّن أن ١٠٠٤ من السلاسل الفردية من الحمض النووي الريبوزي بطول ١٠٠ قاعدةٍ ستكون لها كتلةٌ مُجمَّعة بمقدار ١٠٥٠ كيلوجرام. إذن هذا هو المقدار الذي سنحتاج إليه من أجل الحصول على نسخةٍ واحدة من معظم السلاسل، ومن ثم على فرصةٍ معقولة بأن تحتويَ إحدى السلاسل على الترتيب الصحيح لكل قواعدها بحيث تُصبح مضاعفًا ذاتيًّا. ولكن الكتلة الكلية لمجرة درب التبانة تُقدَّر بنحو ١٠٤٢.

من الواضح أنه لا يمكننا الاعتمادُ على الصدفة المحضة فقط.

بالطبع، قد لا يكون هناك ترتيبٌ واحد فقط من بين الـ ١٠٠٤ سلسلةٍ محتملة من سلاسل الحمض النووي الريبوزي التي يبلغ طولها ١٠٠ قاعدة، والذي من شأنه أن يكون بمنزلة مضاعفٍ ذاتي. قد يكون هناك الكثير. قد يكون هناك حتى تريليوناتُ المضاعفات المحتملة التي يمكن أن تتولَّد من سلاسل الحمض النووي الريبوزي التي هي بطول ١٠٠ قاعدة. ربما يكون الحمض النووي الريبوزي الذاتيُّ التضاعفِ أمرًا شائعًا بالفعل، ونحن بحاجةٍ فقط إلى مليونِ جُزيء للحصول على فرصةٍ لتشكيل مضاعف ذاتي. المشكلة مع هذه المحاجَّة أنها ليست سوى مُحاجة. وعلى الرغم من المحاولات العديدة، فلم يتمكَّن أحدٌ من تخليق حمض نووي ريبوزي (أو حمض نووي أو بروتين) ذاتيِّ التضاعف أو لم يُرصَد واحدٌ منها في الطبيعة. تنجلي الدهشةُ عند التفكير في مدى صعوبةِ مهمة التضاعف الذاتي. في عالم اليوم، يتطلَّب الأمرُ خليةً حية كاملة لتحقيق هذا العمل الفذِّ. فهل يُحتمل أنه قد تَحقَّق بنظامٍ أبسط بكثيرٍ منذ مليارات السنين؟ لا ريب أنه تحقَّق على هذا النحو، وإلا ما كنا هنا اليوم نتفكَّر في المسألة. لكن الكيفية التي تَحقَّق بها هذا قبل أن تتطوَّر الخلايا غيرُ واضحةٍ البتة.

في ضوء الصعوبات في تحديد المضاعفات الذاتية البيولوجية، فربما تتكوَّن لدينا فكرةٌ أفضلُ عن طريق طرح سؤالٍ عام أكثر، وهو: ما مدى سهولة التضاعف الذاتي في أي نظام؟ وفَّرَت لنا التكنولوجيا الحديثةُ الكثيرَ من الأجهزة التي يمكن أن تُضاعف الأشياء، بدايةً من ماكينات تصوير المستندات وحتى أجهزة الكمبيوتر الإلكترونية والطابعات الثلاثية الأبعاد. فهل بإمكان أيٍّ من هذه الأجهزة أن تصنع نسخةً من نفسها؟ ربما الجهاز الأقرب هو الطابعة الثلاثية الأبعاد مثل إحدى طابعات الرِّب راب (التي يعني مقابِلُها الإنجليزي «الاستنساخ السريع للنماذج الأولية») والتي تُعَد من بناتِ أفكار أدريان

بوير من جامعة باث بالمملكة المتحدة. بإمكان هذه الطابعات طباعةُ مكوناتها التي يمكن بعد ذلك تجميعُها لعمل طابعة رِب راب ثلاثية الأبعاد جديدة.

هذا رائع، لكنه ليس كذلك تمامًا. إذ ستكون الآلةُ المطبوعة مصنوعةً من مادة البلاستيك فقط، ولكن هيكلها سيكون مصنوعًا من المعدن مثل معظم مكوناتها الكهربية. ومن ثَم لا يُمكنها استنساخُ غيرِ الأجزاء البلاستيكية، وينبغي تجميعُ هذه الأجزاء يدويًّا مع الأجزاء الأخرى لعمل طابعة جديدة. تتمثَّل رؤية المصمِّمين في إتاحة طابعات رِب راب ذاتيةِ التضاعف (إذ يوجَد العديد من التصميمات البديلة) مجانًا؛ كي ينتفع بها الجميع. ولكن في وقت تأليف هذا الكتاب، نحن ما زلنا بعيدين جدًّا عن بناءِ آلة ذاتية التضاعف بحق.

إذن، إذا كان البحث عن آلات ذاتية التضاعف لا يُساعد حقًّا في سعينا لاكتشاف مدى سهولة التضاعف الذاتي أو صعوبته، فهل يُمكننا أن نتجنبَ العالم الماديَّ تمامًا ونستكشفَ هذا السؤال داخل جهاز كمبيوتر، حيث يمكن أن نستبدل بتلك المواد الكيميائية الفوضوية والصعبة التخليق لبناتِ البناء البسيطةَ للعالم الرقمي؛ نقصد وحدات البِت التي لا تحتوي إلا على القيمة ١ أو ٠؟ «البايت» الواحد من البيانات، الذي يتكون من ثماني وحداتِ بت، يُمثل رمزًا واحدًا من النصِّ في شفرة الكمبيوتر ويمكن مقارنتُها مع وحدة الشفرة الجينية؛ أي: قاعدة الحمض النووي أو الحمض النووي الريبوزي. يمكننا الآن طرحُ السؤال الآتي: من بينِ كل السلاسل المحتملة من وحدات البايت، ما مدى شيوع تلك التي يُمكن أن تتضاعف ذاتيًّا في جهاز الكمبيوتر؟

هنا، لدينا ميزةٌ كبيرة لأن سلاسل البايت الذاتيةَ التضاعف شائعةٌ جدًّا في الحقيقة؛ إننا نعرفها باسم فيروسات الكمبيوتر. هذه الفيروسات عبارةٌ عن برامج كمبيوتر قصيرة نسبيًّا، ويمكن أن تصيب أجهزةَ الكمبيوتر الخاصة بنا عن طريق حثِّ وحدة المعالجة المركزية الخاصة بها على إنشاءِ عددٍ هائل من النسخ. عندئذٍ تُهاجم فيروسات الكمبيوتر هذه البريدَ الإلكتروني الخاص بنا كي تُصيب أجهزة كمبيوتر أصدقائنا وزملائنا. ومن ثم إذا اعتبرنا ذاكرةَ الكمبيوتر نوعًا من الحساء البدائي الرقمي، فإن فيروسات الكمبيوتر يمكن اعتبارها معادلًا رقميًّا للمضاعفات الذاتية البدائية.

يُعد فيروس تينبا من أبسط فيروسات الكمبيوتر حيث لا يتجاوز طوله ٢٠ كيلوبايت؛ وهو قصيرٌ جدًّا مقارنةً بمعظم برامج الكمبيوتر. وعلى الرغم من ذلك، نجح في مُهاجمة أجهزة الكمبيوتر الخاصة ببنوكٍ كبرى في عام ٢٠١٢، حيث تسلَّل إلى متصفِّحاتها وسرق

بيانات تسجيل الدخول؛ لذلك كان من الواضح أنه كيانٌ كبير ذاتيُّ التضاعف. وعلى الرغم من أن ٢٠ كيلوبايت قد تكون قصيرةً جدًّا بالنسبة إلى برنامج كمبيوتر، فإنها تحتوي على سلسلةٍ طويلة نسبيًّا من المعلومات الرقمية، تبلغ ١٦٠ ألف بت من المعلومات، وذلك في ضوء أن البايت الواحد يساوي ٨ وحدات بت. وبما أن كلَّ بت يمكن أن يكون في حالةٍ من حالتين (٠ أو ١)، فيُمكننا بسهولةٍ حسابُ احتمال توليدِ سلاسل معيَّنة من الأرقام الثنائية بنحوٍ عشوائي. على سبيل المثال، فرصُ إنشاء سلسلةٍ معينة تتكون من ثلاث وحدات بت — ولنقل ١١١ — تساوي ١/٢ × ١/٢ × ١/٢، أو فرصة واحدة من بين كل ٣٢ فرص. وباتباع المنطق الرياضي ذاتِه، نستنتج أن الوصول إلى سلسلةٍ محددة بطول ١٦٠ ألف وحدة بت — وهو طول فيروس تينبا — عن طريق الصدفة يساوي فرصةً واحدة من بين كل ٢١٢٠٠٠٠٠ فرصة. وهذا رقمٌ صغير جدًّا على نحوٍ مُحير، ويُخبرنا أن فيروس تينبا لا يمكن أن يكون قد ظهر بمحضِ الصدفة وحدها.

ربما توجَد، مثلما توقَّعنا بشأن جزيئات الحمض النووي الريبوزي، العديدُ والعديد من الشفرات البرمجية الذاتية التضاعف الأبسط بكثيرٍ من فيروس تينبا والتي ربما نشأت عن طريق الصدفة. لكن إذا كان الأمر كذلك، فسيكون قد نشأ بالتأكيد فيروس كمبيوتر — بحلول الوقت الحالي — تلقائيًّا من هذا الكم الهائل من وحدات الجيجابايت الخاصة بشفرات الكمبيوتر التي تتدفَّق عبر الإنترنت كل ثانية. ففي النهاية، معظم هذه الشفرات عبارةٌ عن تسلسلاتٍ من الواحد والصفر (فكر في كل الصور والأفلام التي تُنزَّل كل ثانية). هذه الشفرات جميعها على الأرجح فعالةٌ من حيث إصدارُ تعليمات لوحدات المعالجة المركزية الخاصة بنا لتنفيذ العمليات الأساسية مثل النَّسخ أو الحذف، لكن كل فيروسات الكمبيوتر التي أصابت جهازَ أي شخصٍ تُظهِر بصمةً لا لبس في أنها من تصميمٍ بشَري. وعلى حدِّ علمنا، فإن هذا التيار الهائل من المعلومات الرقمية الذي يتدفق حول العالم كلَّ يوم لم يولِّد أبدًا فيروسات كمبيوتر بنحوٍ تلقائي. إذن، حتى في البيئة المواتية للتضاعف في أجهزة الكمبيوتر، فإن التضاعف الذاتي صعب، وعلى حدِّ عِلمنا، فإنه لم يحدُث أبدًا بنحوٍ تلقائي.

## إذن، هل يمكن لميكانيكا الكمِّ أن تُساعد هنا؟

تكشف هذه الرحلةُ إلى العالم الرقمي عن المشكلة الأساسية في البحث عن أصل الحياة، التي تتلخَّص في طبيعة محرك البحث المستخدَم لتجميع مكوناتها الضرورية معًا في

التكوين الصحيح لتوليد مضاعفٍ ذاتي. أيًّا ما كانت الموادُّ الكيميائية التي كانت متوفرةً في الحساء البدائي، فكان عليها أن تستكشف كَمًّا هائلًا من الاحتمالات حتى تصلَ عن طريق الصدفة إلى مُضاعف ذاتي نادر على نحوٍ غير عادي. هل يمكن أن تكون المشكلة في أننا نحصر روتين البحث في قواعد العالم الكلاسيكي؟ لعلك تتذكر من الفصل الرابع أن المنظِّرين الكميِّين بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا كانوا متشكِّكين للغاية في البداية إزاء تقرير صحيفة «ذا نيويورك تايمز» بأن النباتات والميكروبات كانت تنفذ روتين بحثٍ كمي. ولكنهم اقتنعوا في النهاية بفكرة أن أنظمة البناء الضوئي كانت بالفعل تُنفذ استراتيجية بحثٍ كمي تُسمى السير الكمي. استكشف العديد من الباحثين — بما فيهم نحن[3] — فكرةَ أن مسألة أصل الحياة هي الأخرى ربما تضمَّنَت نوعًا من سيناريو البحث الكمي.

تخيَّل بِركةً بدائية صغيرة منحسرة داخل أحد مسامِّ الصخور الملتوية المنبثقة من بركانٍ طيني تحت بحر إيسوا القديم منذ ثلاثة مليارات سنةٍ ونصفِ المليار، حينما كانت طبقات صخور جرينلاند الأصلية في طَور التكوين. هنا ربما تكوَّنَت البِركة التي وصفها داروين بأنها: «بِركة صغيرة دافئة، تحتوي على كافة أنواع النشادر وأملاح الفوسفوريك والضوء والحرارة والكهرباء وغير ذلك، حيث تَشكل مركب بروتين كيميائيًّا بحيث يكون مستعدًّا للمرور بتغيراتٍ أخرى أشد تعقيدًا». والآن، تخيل أيضًا أن «مركب بروتين» ما (يمكن أن يكون جزيءَ حمضٍ نووي ريبوزي) — ولَّده نوعٌ العمليات الكيميائية التي اكتشفها ستانلي ميلر — عبارةٌ عن نوعٍ من الإنزيمات الأولية (أو الريبوزيمات) له بعضُ النشاط الإنزيمي، ولكنه لم يصبح جزيئًا ذاتيَّ التضاعف بعد. تخيَّل كذلك أن بعض الجسيمات في هذا الإنزيم يمكن أن تنتقل إلى مواضعَ مختلفة ولكن تمنعها حواجزُ الطاقة الكلاسيكية. لكن، كما تناولنا في الفصل الثالث، بإمكانِ كلٍّ من الإلكترونات والبروتونات أن يعبرا عبر حواجز الطاقة التي تمنع نقلها الكلاسيكيَّ من خلال ظاهرةِ النفق الكمِّي، وهي سمةٌ بالغة الأهمية في عمل الإنزيمات. وفعليًّا، يوجَد الإلكترون أو البروتون على جانبي الحاجز في آنٍ واحد. إذا تخيلنا أن هذا يحدث داخل الإنزيمات الأولية الخاصة بنا، فسنتوقَّع ارتباطَ تكويناتٍ مختلفة — العثور على الجسيم على أيٍّ من جانبَي حاجز الطاقة — بأنشطة إنزيماتٍ مختلفة، بمعنى القدرة على تسريع أنواعٍ مختلفة من التفاعلات الكيميائية، التي ربما يدخل فيها تفاعلُ التضاعف الذاتي.

ولتسهيل التعامل مع الأرقام؛ لنتخيَّل أنه يوجَد في المجمل ٦٤ من البروتونات والإلكترونات داخل الإنزيم الأوَّلي التخيُّلي الخاص بنا، كلٌّ منها قادرٌ على القيام بعملية النفق الكمي إلى أيٍّ من الموضعَين المختلفَين. لا يزال المقدار الإجمالي للتباين البنيوي المتاحِ للإنزيم الأولي التخيلي الخاص بنا؛ هائلًا: ٦٤٢، وهو عددٌ كبير من التكوينات المحتملة. تخيل الآن أن تكوينًا واحدًا فقط من هذه التكوينات لدَيه ما يلزم ليُصبح إنزيمًا ذاتيَّ التضاعف. السؤال هو: ما مدى سهولة العثور على التكوين المحدَّد الذي يمكن أن يُؤدِّيَ إلى نشوء الحياة؟ هل سيتحقَّق المضاعف الذاتي في البركة الدافئة الصغيرة الخاصة بنا؟

لنفترض أولًا أن الإنزيم الأوَّلي عبارةٌ عن جُزيء كلاسيكي تمامًا غيرِ قادر على القيام بأيِّ حيلٍ كَمِّية، مثل التراكب أو النفق الكمي. لا بد أن هذا الجزيء — في أيِّ لحظة — يكون في واحدٍ من التكوينات الـ ٦٤٢ المحتملة المختلفة، ومن ثم فإن احتماليةَ أن يكون هذا الإنزيم الأولي مضاعفًا ذاتيًّا تساوي ١ على ٦٤٢؛ وهذه فرصةٌ ضئيلة للغاية حقًّا. ومع وجود احتمالاتٍ هائلة، سيَعلق الإنزيم الأولي الكلاسيكي في أحد التكوينات المُملَّة التي لا تستطيع أن تتضاعف ذاتيًّا.

بالطبع الجزيئات تتغيَّر نتيجةً لخاصية الإهلاك وفقًا لقواعد الديناميكا الحرارية العامة، ولكن في العالم الكلاسيكي يكون هذا التغييرُ بطيئًا نسبيًّا. وحتى يتغير جزيءٌ واحد؛ يجب تفكيك الترتيب الأصلي للذرات وإعادةُ ترتيب الجسيمات المكونة له لتشكيل تكوين جزيئي جديد. وكما اكتشفنا في الفصل الثالث بشأن كولاجين الديناصور الذي عاش طويلًا، فيمكن أن تحدث تغييراتٍ كيميائية في بعض الأحيان على مدار عددٍ أزمنةٍ جيولوجية. من المنظور الكلاسيكي، سيستغرق الإنزيم الأوَّلي الخاص بنا زمنًا طويلًا للغاية حتى يستكشف جزءًا صغيرًا للغاية من التكوينات الكيميائية البالغِ عددها ٦٤٢.

ومع ذلك، سيختلف الوضع على نحوٍ جذري إذا اعتبرنا أن الجسيماتِ الرئيسيةَ البالغَ عددُها ٦٤ في الإنزيم الأولي هي إلكترونات وبروتونات يمكنها شقُّ نفقٍ بين مواقعها البديلة. وباعتبار أنه نظامٌ كمي، فإن الإنزيم الأوَّلي يمكن أن يُوجَد في كلِّ التكوينات المحتملة الخاصة به في آنٍ واحد في صورة تراكب كمِّي. يتَّضح الآن السببُ وراء اختيار العدد ٦٤؛ إنه العددُ ذاته الذي استعرضناه لمَّا ضربنا المثَل على الخطأ الفادح الذي ارتكبه إمبراطور الصين في مسألةِ رقعة الشطرنج كي نُوضح قوةَ الحوسبة الكمية في الفصل الثامن، لكن هنا تحلُّ جسيمات النفق محلَّ المربعات على الرقعة أو وحدات الكيوبت. ويعتبر المضاعف الذاتي الأولي الخاص بنا — إذا عاش مدةً كافية — بمنزلة كمبيوتر كمِّي

بقوة ٦٤ كيوبت، وقد اكتشفنا للتو مدى قوةِ مِثل هذا الجهاز. ربما بإمكانه استخدامُ موارده الحوسبية الكمية الهائلة للإجابة على السؤال التالي: ما التكوين الجزيئي الصحيح للمضاعف الذاتي؟ في هذا الإطار، تتَّضح المشكلة وحلُّها المحتملُ أكثر. لنعتبر أن الإنزيم الأوَّلي في حالة تراكب كمي، وستُصبح مشكلةُ البحث عن البنية التي ستكون مضاعفًا ذاتيًّا من بين الـ $٦٤^{٢}$ بنية محتملة؛ قابلةً للحل.

لكن هناك عقَبة. ستتذكَّر أن وحدات الكيوبت يجب أن تبقى مترابطةً ومتشابكة؛ كي تُنفذ عملية الحوسبة الكمية. إذ بمجرد أن يبدأ فكُّ الترابط، تنهار حالة التراكب للحالات الـ $٦٤^{٢}$ المختلفة، ولا تبقى سوى حالةٍ واحدة. فهل هذا يفيد؟ في ظاهر الأمر، لا؛ لأن فرصة انهيار التراكب الكمِّي إلى الحالة الذاتية التضاعف الواحدة لم تتغيَّر عن ذي قبل؛ أي: ١ على $٦٤^{٢}$، وهذا العدد يساوي فُرصَ رمي العملة واستقرارِها على الصورة ٦٤ مرةً على التوالي. لكن ما سيحدث بعد ذلك هو ما سيختلف فيه الوصف الكمي عن نظيره الكلاسيكي.

إذا لم يكن الجزيء يتبع سلوكًا ميكانيكيًّا كميًّا ووجد نفسه — كما سيحدث على نحوٍ شبهِ مؤكَّد — مع الترتيب الخطأ للذرات غير القادر على التضاعف الذاتي، فستتضمن تجرِبةُ تكوينٍ مختلف عمليةً بطيئة جيولوجيًّا خاصة بتفكيك الروابط بين الجزيئات وإعادة ترتيبها. ولكن بعد فكِّ ترابط الجزيء الكمي المكافئ، فإن كل الإلكترونات والبروتونات البالغ عددها ٦٤ في الإنزيم الأولي الخاص بنا ستكون جاهزةً — في آنٍ واحد تقريبًا — لأن تشقَّ النفق مرةً أخرى وتدخل في حالةِ تراكب من مواضعها المحتملة كي تُعيد إقامة حالة التراكب الكمي الأصلية المتضمِّنة $٦٤^{٢}$ تكوينًا مختلفًا. وعندما يكون جزيء المضاعف الأولي الكمي في حالة ٦٤ كيوبت، فيمكنه تَكرارُ البحث عن التضاعف الذاتي في العالم الكمي دون توقف.

فك الترابط سيهدم حالةَ التراكب بسرعة مرةً أخرى، ولكن هذه المرة سيجد الجزيءُ نفسَه في تكوينٍ آخر من التكوينات الكلاسيكية المتنوعة الخاصة به، البالغِ عددها $٦٤^{٢}$ تكوينًا. ومرةً أخرى، سيهدم فكُّ الترابط حالةَ التراكب، وسيجد النظام نفسه مرةً أخرى في تكوينٍ آخر، وستستمرُّ هذه العملية إلى ما لا نهاية. بالأساس، وفي بيئةٍ محميَّة نسبيًّا كتلك، فإن تكوين حالة التراكب الكمي وهدمها عمليةٌ قابلة للانعكاس، لا تنفكُّ العملة الكمية عن الرمي من خلال عمليتَي التراكب وفكِّ الترابط، وهما عمليتان أسرعُ بكثيرٍ من عمليتَي تكوين الروابط الكيميائية وتفكيكها في العالم الكلاسيكي.

لكنَّ هناك حدثًا واحدًا سيُنهي عملية رمي العملة الكمية. إن توصلَ جزيء المُضاعف الأوَّلي الكمي في النهاية إلى حالة مضاعف ذاتي، فسيبدأ في عملية التضاعف، وعملية التضاعف ستُجبر النظام على الانتقال على نحوٍ لا رجعةَ فيه إلى العالَم الكلاسيكي، وذلك كما هو الحال مع الخلايا الإشريكية القولونية الجائعة التي تناوَلْناها في الفصل السابع. ستكون العملة الكمية قد رُمِيَت بنحوٍ لا رجعة فيه، وسيكون أولَ مضاعف ذاتي قد وُلد في العالم الكلاسيكي. بالطبع لن تخلوَ عملية التضاعف هذه من نوعٍ من العمليات الكيميائية الحيوية داخل الجزيء، أو بينه وبين البيئة المحيطة به، التي تكون مختلفةً عن العمليات التي حدثت قبل العثور على ترتيب المضاعف الأولي. بعبارةٍ أخرى، لا بد من آليةٍ تُثبت هذا التكوين الخاص داخل العالَم الكلاسيكي قبل أن يُفقَد وينتقلَ الجزيءُ إلى الترتيب الكميِّ التالي.

## كيف كان يبدو المضاعف الذاتي الأول؟

الاقتراح الذي أوضحناه فيما سبق تخمينيٌّ بالطبع. لكن إذا كان البحث عن المضاعف الذاتي الأول قد جرى في العالم الكمي دون العالم الكلاسيكي، فإنه على الأقل سيحلُّ على الأرجح مشكلةَ البحث عن المضاعف الذاتي.

وحتى يُصبح هذا السيناريو صالحًا؛ فلا بد أن الجزيء الحيوي الأوَّلي — المضاعف الذاتي الأولي — كان قادرًا على اكتشاف الكثير من البنيات المتنوِّعة عبر النفق الكمِّي لجسيماته إلى المواضع المختلفة. فهل نعرف نوعَ الجزيئات القادرة على تنفيذ تلك الخدعة؟ حسنًا، إننا نعرف ذلك إلى حدٍّ ما. فحسبما اكتشفنا حتى الآن، تتماسكُ الإلكترونات والبروتونات في الإنزيمات على نحوٍ غير مُحكم نسبيًّا، مما يُمكِّنها من شقِّ أنفاق إلى مواضعَ مختلفةٍ بسهولة. البروتونات في الحمض النووي والحمض النووي الريبوزي أيضًا قادرةٌ على شقِّ الأنفاق، على الأقل عبر الرابطة الهيدروجينية. ومن ثم يُمكننا تخيلُ مضاعفنا الذاتي الأوَّلي وكأنه شيءٌ مثل بروتين أو جزيء حمض نووي ريبوزي كان متماسكًا على نحوٍ غير مُحكم من خلال الروابط الهيدروجينية وكذلك الروابط الإلكترونية الضعيفة التي سمحَت لجسيماته — البروتونات والإلكترونات — أن تنتقل بحريةٍ عبر بِنْيته لتكوين حالة تراكب من تكويناته المختلفة التي يبلغ عددها عدة تريليونات.

هل يوجَد أيُّ دليل على هذا السيناريو؟ يُعد أبورفا دي باتل، وهو فيزيائيٌّ يعمل في مركز فيزياء الطاقة العالية التابع للمعهد الهندي للعلوم ببنجالور، واحدًا من الخبراء

العالَميِّين في الخوارزميات الكمية؛ أي: برمجيات أجهزة الكمبيوتر الكمية. يقترح أبورفا أن جوانبَ من الشفرة الجينية (أي: تسلسلات قواعد الحمض النووي التي تُشفر الأحماض الأمينية) تشي بأصلها باعتبارها شفرةً كمية.[4] ولا يتَّسع المقام هنا لعرض أي تفاصيل فنية (حيث إن ذلك سيأخذنا إلى أعماق الجوانب الرياضية لنظرية المعلومات الكمية)، ولكن فكرته لا ينبغي أن تكون مفاجئة. في الفصل الرابع، رأينا كيف أنَّه في البناء الضوئي تنتقل طاقة الفوتون إلى مركز التفاعل باتباعِ عدةِ مسارات في آنٍ واحد؛ أي: السير العشوائي الكمي. ثم في الفصل الثامن تناولنا فكرة الحوسبة الكمية، وهل يمكن أن تكون قد استفادت الحياةُ من الخوارزميات الكمية لتحسين فاعلية بعض العمليات البيولوجية أم لا. وبالمثل، إن سيناريوهات أصل الحياة التي تتضمَّن ميكانيكا الكم، رغم أنها تخمينية، ليست سوى امتدادٍ لهذه الأفكار؛ أي: احتمالية أن الترابط الكمي في علم الأحياء لعب في نشأة الحياة الدور نفسَه الذي يلعبه حاليًّا في الخلايا الحية.

بالطبع أيُّ سيناريو يتضمن ميكانيكا الكمِّ لتفسير نشأة الحياة منذ ثلاثة مليارات سنةٍ يبقى تخمينيًّا إلى حدٍّ بعيد. ولكن، كما ذكرنا، حتى التفسيرات الكلاسيكية بشأن نشأة الحياة لا تخلو من المشاكل؛ فليس من السهل إنشاءُ حياةٍ من العدم! وبتوفيرها استراتيجياتِ بحثٍ أكثر فاعلية، ربما سهَّلَت قليلًا ميكانيكا الكمِّ من مهمة بناءِ مضاعفٍ ذاتي. إنها على نحوٍ شبه مؤكد لا تُمثل سوى جزءٍ من القصة الكاملة، ولكنها ربما زادت كثيرًا من احتمالية ظهور الحياة في تلك الصخور القديمة في جرينلاند.

## هوامش

(١) يُعتقد أن الأرض قد تكثَّفَت من بقايا شمسية منذ نحوِ ٤٫٥ مليار سنة، لكنها شكَّلَت قشرةً صُلبة بعد ذلك بنحو نصف مليار سنة.

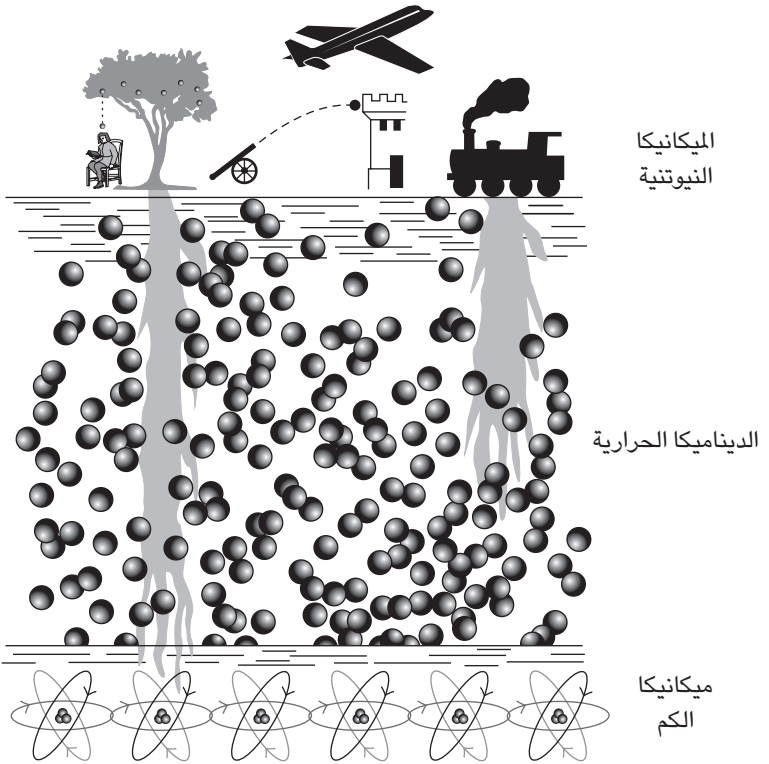
(٢) هذا باستثناء الفيروسات التي لا تتضاعف إلا بمساعدة خلية حية.

الفصل العاشر

# علم الأحياء الكمي: الحياة على حافةِ عاصفة

إن صفة «غريب» هي الأكثرُ استخدامًا في وصف مجال ميكانيكا الكم. وإنه مجالٌ غريب بالفعل. وأيُّ نظرية تقول إن الأجسام يمكن أن تعبر من خلالِ حواجزَ لا يمكن اجتيازُها، أو تُوجَد في مكانَين في آنٍ واحد، أو تمتلك «اتصالات طيفية»؛ لا يمكن أن يُقال إنها نظريةٌ عادية. ولكن، في الحقيقة، إطار تلك النظريات الرياضي منطقيٌّ ومترابط تمامًا، كما أنه يصف بدقةٍ الشكلَ الذي عليه العالَم على مستوى القوى والجسيمات الأساسية. ومن ثم تُعد ميكانيكا الكم حجرَ الأساس للواقع الفيزيائي. إن مستويات الطاقة المنفصلة وازدواجية الموجة والجسيم والترابط والتشابك والنفق الكمي؛ ليست مجردَ أفكارٍ مثيرة للاهتمام ذاتِ صلة فقط بالعلماء الذين يعملون في مختبرات فيزياء منعزلة. إنها حقيقيةٌ وطبيعية مثل فطيرة التفاح التي تُحضرها جدتنا، وهي في الحقيقة تتمُّ داخل تلك الفطيرة. إن ميكانيكا الكم مجالٌ عادي. لكن العالم هو الذي يصفه بأنه مجال غريب.

ولكن، وحسبما اكتشفنا، معظم السمات الغريبة للمادة على المستوى الكمي تختفي في الأجزاء الداخلية الديناميكية الحرارية المضطربة للأجسام الكبيرة بفعلِ العملية التي نُسمِّيها فكَّ الترابط، والتي لا تُخلف سوى العالم الكلاسيكي الذي نعرفه. ومن ثم يُمكننا تصورُ الواقع الفيزيائي على أنه يتكون من ثلاثة مستويات (انظر الشكل ١٠-١). على السطح، توجَد الأجسام العيانية اليومية مثل كرات القدم والقطارات والكواكب، التي يتَّسق سلوكُها الكليُّ مع قوانين الحركة الميكانيكية التي وضعها نيوتن والتي تتضمَّن مفاهيمَ معتادةً مثل السرعة والتسارع والزَّخم والقُوى. الطبقة الوسطى هي الطبقة الديناميكية الحرارية التي تصف سلوك السوائل والغازات. هنا تنطبق قواعد نيوتن الكلاسيكية نفسها، ولكن كما أشار شرودنجر وكما ذكرنا في الفصل الثاني، تعتمد هذه القوانين الديناميكية الحرارية الأساسية — التي تصف على سبيل المثال كيف تتمدَّد




شكل ١٠-١: الطبقات الثلاث للواقع. الطبقة العليا هي العالم المرئي، المتلئ بالأجسام مثل التفاح الساقط وقذائف المدافع والقطارات البخارية والطائرات، والتي تصِف حركتها الميكانيكا النيوتنية. الطبقة الثانية هي الطبقة الديناميكية الحرارية التي تحتوي على الجسيمات التي تُشبه كراتِ البلياردو، والتي تكاد تكون حركتها بالكامل عشوائية. هذه الطبقة مسئولةٌ عن توليدِ قوانين «النظام من اللانظام» التي تحكم سلوك الأجسام مثل المحركات البخارية. الطبقة الثالثة هي طبقة الجُسيمات الأساسية التي تحكمها القوانينُ الكمية المنظمة. السِّمات المرئية لمعظم الأجسام التي نراها من حولنا تبدو متأصلةً في الطبقة النيوتونية أو الطبقة الديناميكية الحرارية، ولكن الكائنات الحية لها جذورٌ متوغِّلة في أساس الواقع الكمي.

الغازات عند التسخين أو كيف يدفع المحركُ البخاري القطارَ كي يصعد التل — على مبدأ «تولد النظام من اللانظام» الذي ينبع من التصادم العشوائي لتريليونات الذرات

والجزيئات على غِرار ما يحدث لكرات البلياردو. المستوى الثالث والأعمق هو حجرُ أساس الواقع؛ وهو العالم الكمي. في هذا المستوى يخضع سلوك الذرات والجزيئات، والجسيمات التي تتكون منها؛ للقواعد الدقيقة والمنظمة لميكانيكا الكم وليس الميكانيكا الكلاسيكية. ومع ذلك، فإن معظم الظواهر الكمية الغريبة تكون غيرَ مرئية بنحوٍ عام بالنسبة إلينا. ونحن لا نرى القوانينَ الكمية الأعمق إلا عندما نرصد بدقةٍ الجزيئات الفردية، مثلما هو الحال على سبيل المثال في تجرِبة الشق المزدوج. يبدو السلوك الذي يصِفها غيرَ معتاد لنا؛ لأننا عادةً ما نرى الواقع من خلال فلتر فكِّ ترابطٍ يزيل كلَّ الغرابة من الأجسام الأكبر.

معظم الكائنات الحية عبارةٌ عن أجسام كبيرة نسبيًّا. وكما هو الحال مع القطارات وكرات القدم وقذائف المدافع، فإن حركتها الكلية تلتزم بشدةٍ بقوانين نيوتن؛ فالرجل المقذوفُ من مدفع سيكون له مسارٌ مشابه لذلك الخاصِّ بالقذيفة العادية. وعلى مستوًى أعمق، فإن الجانب الفسيولوجي للأنسجة والخلايا تصفُه أيضًا على نحوٍ جيد قوانينُ الديناميكا الحرارية؛ فلا يختلف كثيرًا تمددُ الرئة وانقباضها عن تمددِ البالون وانقباضه. ومن ثم، للوهلة الأولى، فستميل — مثلَ معظم العلماء — إلى افتراضِ أن السلوك الكميَّ يختفي في طيور أبي الحناء والسمك والديناصورات وأشجار التفاح والفراشات وكذلك نحن البشر، كما يختفي في الأجسام الكلاسيكيَّة الأخرى. ولكننا رأينا أن هذا ليس صحيحًا على الدوام بشأنِ الحياة؛ فجذوره تمتدُّ من السطح النيوتوني عبر الطبقة الديناميكية الحرارية المضطربة كي تتخلَّل الأساسَ الكمي، مما يُتيح للحياة أن تستفيد من ظواهرَ مثلِ الترابط أو التراكب أو النفق الكمي أو التشابك (ارجع للشكل ١٠-١). السؤال الذي نريد أن نتناوله في هذا الفصل الأخير هو: كيف ذلك؟

تناولنا جزءًا من الإجابة بالفعل. أشار إرفين شرودنجر منذ أكثرَ من ستين سنةً إلى أن الحياة مختلفةٌ عن العالم غير العضوي لأنها منظمة ومرتبة حتى على المستوى الجزيئي. هذا النظام يمنح الحياةَ ميزةً قوية تجعلها تربط العالمَ الجزيئي بالعالم المشهود، بحيث يمكن أن تكون للأحداث الكمية التي تحدث داخل الجزيئات الحيوية الفردية تَبِعاتٌ على الكائن بأكمله؛ وهو نوع التضخيم من العالم الكميِّ إلى العالم المشهود الذي أكده عالمٌ رائد آخَر في ميكانيكا الكم؛ هو باسكوال يوردان.

بالطبع، عندما كان شرودنجر ويوردان يكتبان عن علم الأحياء، لم يكن أحد يعلم شيئًا عن تكوين الجينات ولا عن طريقة عمل الإنزيمات أو عملية البناء الضوئي. ولكن بعد نصف قرن من الأبحاث المكثفة في مجال علم الأحياء الجزيئي، توفرت لنا خريطة

ذات تفاصيل مبهرة عن بنية الجزيئات الحيوية على مستوى الذرات الفردية في الحمض النووي أو البروتينات. وحسبما اكتشفنا، ثبتت صحة رؤى رائدي ميكانيكا الكم المتبصرة، وإن كان بعد فترة طويلة نوعًا ما. لقد جرى تحديد بنية الأنظمة الضوئية والإنزيمات والسلاسل التنفسية والجينات وصولًا إلى موضع الجسيمات الفردية، كما أن حركاتها الكمية تُحدث فرقًا بالفعل في عملية التنفس التي تُبقينا على قيد الحياة، وفي الإنزيمات التي تبني أجسامنا، وفي عملية البناء الضوئي التي تنتج عنها كل الكتلة الحيوية على الأرض تقريبًا.

وعلى الرغم من ذلك، لا تزال هناك العديد من الأسئلة، التي تتعلَّق في الأساس بالطريقة التي تتمكَّن بها الحياة من الحفاظ على الترابط الكميِّ في بحر الجزيئات الحيوية الدافئ والرطب داخل الخلية الحية. إن البروتينات أو الحمض النووي ليست آلاتٍ مصنوعةً من الفولاذ لها أجزاءٌ صُلبة مثل الآلات المستخدمة في اكتشاف الآثار الكمية في مختبرات الفيزياء، بل هي بِنْيات إسفنجية مرنة، تتعرَّض بانتظامٍ إلى اهتزازاتها الحرارية وتتأثر باستمرارٍ بتصادم كراتِ البلياردو الجزيئية المحيطة بها، وذلك في وابلٍ منتظم من «الضوضاء الجزيئية».[1] كان من المتوقَّع أن تؤديَ هذه الاهتزازات والاصطدامات العشوائية إلى تحطيم الترتيب الدقيق للذرَّات والجزيئات الذي تحتاج إليه تلك الجسيماتُ للحفاظ على سلوكها الكمِّي. لا تزال الكيفية التي يجري بها الحفاظ على هذا الترابط في علم الأحياء لغزًا، ولكن، كما سنكتشف، إنه لغزٌ يبدأ في الانكشاف ليُزيح الستار عن رؤًى رائعةٍ بشأن الكيفية التي تعمل بها الحياة، وهي رؤًى يمكن حتى الاستفادةُ منها في تطوير التقنيات الكمية المستقبلية.

## كيف تتكيَّف الحياة مع الاهتزازات الجزيئية؟

يحتاج القليل من كتب تبسيط العلوم إلى المراجَعة في أثناء كتابتها، ولكننا في هذا الفصل الأخير سنسرد النتائجَ التي تظهر في وقتِ كتابته. في الحقيقة، يتقدَّم علم الأحياء الكمي بخطًى واسعة، وعلى العديد من الجبهات المختلفة، وحتمًا سيكون هذا الكتاب قد أصبح قديمًا بعضَ الشيء حينما يحلُّ وقت نشره. المفاجَآت الأكبر المُزمَع ظهورها من الدراسات الحديثة هي عبارة عن رؤًى جديدة بشأن تكيُّف الحياة مع الاهتزازاتِ أو الضوضاء الجزيئية.

تظهر بعضٌ من النتائج الجديدة الأكثر إثارة في هذا المجال من الدراسات الخاصة بعملية البناء الضوئي. ستتذكر من الفصل الرابع أن الميكروبات وأوراقَ النباتات مليئةٌ بالبلاستيدات الخضراء التي تعجُّ بغاباتٍ من جزيئات صبغة الكلوروفيل، وأن الخطوة الأولى في عملية البناء الضوئي تتضمَّن أن يُلتقط فوتونُ ضوءٍ من قِبل جزيء صبغة ويُحوَّل إلى إكسيتون متذبذب يتنقل عبر غابة الكلوروفيل حتى يصلَ إلى مركز التفاعل. ستتذكَّر أيضًا أن بصمة الترابط — النبض الكمي — اكتُشفت في عملية نقل الطاقة هذه؛ وهذا دليلٌ على أن فاعليتها التي تكاد تصلُ إلى حدِّ الكمال تعود إلى السَّير الكمي للإكسيتونات إلى مركز التفاعل. ولكن الكيفية التي تحافظ بها الإكسيتونات على سلوكها المترابط الذي يُشبه الموجة وهي تسير في البيئة ذاتِ الضوضاء الجزيئية للخلية الحية؛ كانت لغزًا حتى وقتٍ قريب. لقد اكتشفنا الآن أن الإجابة يبدو أنها تكمن في أن الأنظمة الحيَّة لا تُحاول تجنُّبَ الاهتزازات الجزيئية، بل إنها ترقص على إيقاعها.

في الفصل الرابع، رأينا الترابط الكمِّي في عملية البناء الضوئي على هيئة أوركسترا جزيئية في حالة «تناغم» و«تزامن» بحيث تعزف كلُّ جزيئات الصبغة المترابطة على الإيقاع ذاته. لكن المشكلة التي ينبغي أن يتغلب عليها النظامُ هي أن الجزء الداخلي في الخلية مليءٌ بالضوضاء. لا تعزف تلك الأوركسترا الجزيئية في قاعةٍ موسيقية هادئة، بل في شيء يُشبه مركزَ مدينةٍ مزدحمًا، وسط نشازٍ من الضوضاء الجزيئية التي تزعج كلَّ واحد من الموسيقيين، لدرجة أنه يمكن أن تنشز تذبذبات الإكسيتونات، مما يؤدي إلى فقدان ترابطها الكمي الدقيق.

هذا التحدي مألوفٌ لدى علماء الفيزياء والمهندسين الذين يحاولون بناء أجهزةٍ مثل أجهزة الكمبيوتر الكمية. إنهم يميلون لاستخدام استراتيجيتين رئيسيتين لتجنبِ الضوضاء. تتمثل الأولى في تبريد أنظمتهم إلى درجاتٍ تكاد تصل إلى الصفر المطلَق، متى أمكَنَهم ذلك. وفي درجات الحرارة المنخفضة جدًّا هذه، تخمد الاهتزازات الجزيئية؛ مما يؤدي بدروه إلى وقف الضوضاء الجزيئية. وتتمثَّل الثانية في حماية معداتهم داخل المكافئ الجزيئي للاستوديو الصوتي، مما يمنع أي ضوضاء بيئية. لا توجَد استوديوهات صوتية داخل الخلايا الحية، والنباتات والميكروبات تعيش في بيئاتٍ حارة، فكيف تحافظ الأنظمة الضوئية على ترابطها الكميِّ المتناغِم مدةً طويلة؟

يبدو أن الإجابة هي أن مراكز تفاعل البناء الضوئي تستغلُّ نوعَين مختلفَين من الضوضاء الجزيئية للحفاظ على الترابط بدلًا من فكِّه. النوع الأول عبارة عن ضوضاء

ضعيفة ومنخفضة المستوى نسبيًّا، تُسمَّى أحيانًا «الضوضاء البيضاء» وهي تشبه إلى حدٍّ ما شواش التلفزيون أو الراديو الذي ينتشر عبر جميع الترددات.[٢] تنتج الضوضاء البيضاء تلك عن التصادم الجزيئي الحراري لكلِّ الجزيئات المحيطة — مثل المياه أو الأيونات المعدنية — المكدَّسة داخل الخلايا الحية. أما النوع الثاني الذي يُطلق عليه «الضوضاء الملونة» في بعض الأحيان، فهو أعلى ومقتصرٌ على ترددات معينة مثلما يقتصر الضوء الملون (المرئي) على نطاقٍ ضئيل من الترددات في الطيف الكهرومغناطيسي. إن مصدر الضوضاء الملونة هو اهتزازات البنيات الجزيئية الأكبر داخل البلاستيدات الخضراء، مثل جزيئات الصبغة (الكلوروفيل) وسقالات البروتين التي تثبتها في مكانها، والتي تتكون من سلاسلَ من حبات الأحماض الأمينية تنثني وتلتوي في أشكالٍ مناسبة لاستضافة جزيئات الصبغة. تمتاز انثناءاتها والتواءاتها بالمرونة ويمكنها الاهتزاز، ولكنها لا تفعل ذلك إلا عند ترددات معيَّنة؛ وذلك على غِرار أوتار الجيتار. جزيئات الصبغة نفسها أيضًا لها تردُّداتها الاهتزازية الخاصة بها. تُولِّد هذه الاهتزازاتُ الضوضاء الملونة التي، مثل التآلف الموسيقي، تتكوَّن من بِضع نغمات فحسب. يبدو أن كلًّا من الضوضاء البيضاء والملونة يُستخدَم من قِبَل أنظمة التفاعل الخاصة بالبناء الضوئي كي تساعد في توجيه الإكسيتون المترابط إلى مركز التفاعل.

اكتشفت مجموعتان بحثيتان على نحوٍ مستقل مفتاحًا لحلِّ اللغز الخاص؛ بطريقة استخدام الحياة لهذا النوع من الاهتزاز الجزيئي في عامَي ٢٠٠٨ و٢٠٠٩. تكون الفريق الأول من زوج وزوجة كانا يعيشان في بريطانيا آنذاك، وهما مارتن بلينيو وسوزانا هيولجا اللذان كانا مُهتمَّين منذ مدةٍ طويلة بتأثيرات «الضوضاء» الخارجية على ديناميكيات الأنظمة الكمية، ومن ثَم لم يُفاجَآ لَمَّا سمِعا عن تجرِبة جراهام فليمنج عام ٢٠٠٧ عن عملية البناء الضوئي، التي تناولناها في الفصل الرابع. وسرعان ما نشَرا العديد من الأوراق البحثية — التي يُستشهَد بها على نطاقٍ واسع الآن — التي تُقدم نموذجًا لما اعتقدا أنه كان يحدث.[1] اقترحا أن الجزء الداخليَّ الصاخب من الخلايا الحية قد يتحرك لدفع الديناميكيات الكمية والحفاظِ على الترابط الكمي في مركَّبات البناء الضوئي وغيرها من الأنظمة البيولوجية بدلًا من تدميره.

الفريق الثاني كان فريقَ المعلومات الكمية التابع لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، والذي كان يقوده سيث لويد الذي اعتقد في البداية أن إقحام ميكانيكا الكمِّ في عمل النباتات فكرةٌ مجنونة. وبالتعاون مع زملاء من جامعة هارفارد القريبة، ألقى لويد

نظرةً أقرب على مركَّب البناء الضوئي في الطحالب الذي اكتشف فيه كلٌّ من فليمنج وإنجل النبضَ الكمي.[2] وقد أثبَتوا أن نقل الإكسيتون المترابط الكميِّ يمكن أن تؤجِّلَه أو تُساعده الضوضاءُ البيئية، ويعتمد ذلك على قدر الضوضاء. إذا كان النظام بالغَ البرودة والهدوء، فيميل الإكسيتون إلى التذبذب من دون هدف ومن دون الوصول في واقع الأمر إلى مكانٍ مُعيَّن؛ لكن في البيئة البالغة الحرارة والضوضاء، يبدأ شيءٌ يُسمى «تأثير زينو الكمي»؛ مما يؤجِّل النقل الكمي. وفيما بين هذين النقيضين يقع «النطاق الأوسط» حيث تكون الاهتزازاتُ مناسبةً تمامًا للنقل الكمي.

سُمي تأثير زينو الكمِّي نسبةً إلى الفيلسوف الإغريقي زينو من مدينة إيليا، الذي طرح مسائلَ فلسفيةً في شكل مجموعةٍ من المفارقات، التي تُسمى إحداها مفارقةَ السهم. نظر زينو إلى السهم المنطلق، وحاجَج بأنه لا بد أن يَشغل موضعًا معيَّنًا في الفراغ في كل لحظةٍ من الزمن. وإذا أمكن لمحُ السهم في هذه اللحظة، فلن يُمكن تمييزُه عن سهمٍ آخَر ساكنٍ ومعلق في الموضع ذاتِه. المفارقة هي أن انطلاق السهم يتكون من سلسلةٍ من هذه الأجزاء الزمنية الجامدة، مع وجود سهمٍ ثابت عند كل نقطةٍ بطول مساره. لكن عندما تجمع كل الأجزاء بعضها مع بعض، يتحرك السهم. إذن، كيف يمكن لسلسلةٍ من هذه الحركات الصفرية أن تتجمع لتُولد حركة حقيقية؟ بِتْنا نعلم أن الإجابة هي أن أيَّ مدة محدودة من الوقت لا تتكون من سلسلةِ وحدات غير قابلة للتقسيم من اللازمن. ولكن لزم أن ينتظر هذا الحلُّ حتى ابتكار التفاضل والتكامل في القرن السابع عشر؛ أي: بعد ما يَزيد على ألفَي عام بعدما طرح زينو لغزه. وعلى الرغم من ذلك، بقيَت مفارقة زينو — أو على الأقل اسمُها — في واحدةٍ من أغرب سمات ميكانيكا الكم. إذ يمكن حقًّا للأسهم الكمومية أن تتجمد زمنيًّا بفعل الرصد.

في عام ١٩٧٧، نشر علماء فيزياء من جامعة تكساس ورقةً بحثية توضح كيف يمكن أن يحدث شيءٌ يُشبه مفارقة السهم الخاصة بزينو في العالم الكمي.[3] يوضح تأثيرُ زينو الكمي — كما هو معروف — كيف أن استمرار عمليات الرصد يمكن أن تمنع الأحداث الكمية من الحدوث. على سبيل المثال، إذا استمرَّ رصدُ ذرة إشعاعية عن كثب، فلن تتحلَّل، وهو تأثيرٌ غالبًا ما يوصف بالقول المأثور القديم «القِدْر المراقَب لا يَغلي أبدًا». بالطبع القُدور الحقيقية تغلي في النهاية، ولكن يبدو فقط أن الوقت يتباطأ عندما تريد كوبًا من الشاي بشدة. ولكن حسبما أشار هايزنبرج، في العالم الكمي، يؤدي الرصدُ (القياس) حتمًا إلى تغييرِ حالة الشيء المرصود.

لمعرفةِ إلى أيِّ مدًى ترتبط مفارقة زينو بالحياة؛ فسنعود إلى خطوةِ نقل الطاقة في عملية البناء الضوئي. لنفترض أن ورقة التقطتْ لتوها فوتونًا شمسيًّا وحوَّلَت طاقته إلى إكسيتون. من المنظور الكلاسيكي، الإكسيتون جسيمٌ له حيِّز في المكان والزمان. ولكن حسبما كشفت تجربة الشق المزدوج، تمتلك الجسيمات الكمية أيضًا خاصية الانتشار الموجي مما يُمكِّنها من الوجود في أماكنَ عدةٍ في آنٍ واحد في صورةِ تراكبٍ كمي. إن الصفات الموجية للإكسيتون ضروريةٌ للنقل الكمِّي الفعال، حيث إنها تُمكنه، مثل موجة المياه، من استكشاف مساراتٍ عدة في آنٍ واحد. ولكن إذا تحطمَت صفاته الموجية الكمية على صخور فكِّ الترابط الذي تُسببه الضوضاء الجزيئية داخل الورقة، فستُفقد صفاته الموجية وسيتحول إلى جسيم متموضع يوجَد في مكانٍ واحد. بالأساس، تعتبر الضوضاء بمنزلة نوعٍ من القياس المستمر، وسيحدث فكُّ الترابط بسرعة جدًّا إذا كانت الضوضاء شديدة؛ أي: قبل أن يتمكن الترابط الكمي من مساعدةِ موجة الإكسيتون في الوصول إلى وجهتها. هذا هو تأثير زينو الكمي الذي يهدم باستمرارٍ الموجةَ الكمية ويُحولها إلى العالَم الكلاسيكي.

عندما قدَّر فريق معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا تأثيرَ الضوضاء/الاهتزازات الجزيئية في مُركب البناء الضوئي للبكتيريا، اكتشف أن النقل الكميَّ كان مثاليًّا في درجات الحرارة التي تقترب من تلك التي تنفذ الميكروبات والنباتات عملية البناء الضوئي عندها. هذا الارتباط التامُّ بين فاعلية النقل الأمثل ونوع درجات الحرارة الذي تعيش فيه الكائناتُ الحية لافتٌ للنظر، ويزعم الفريق أنه يقترح أن ثلاثة مليارات سنة من الانتقاء الطبيعي قد ضبطَت الهندسة التطورية على المستوى الكمي لنقل الإكسيتون لتحسين أهمِّ تفاعلٍ كيميائي حيوي في المحيط الحيوي. وعلى حدِّ قولهم في ورقةٍ بحثية لاحقة، «يميل الانتقاء الطبيعي إلى دفع الأنظمة الكمية إلى درجة الترابط الكمي «المناسبة تمامًا» للوصول إلى أقصى درجات الفاعلية».[4]

على الرغم من ذلك، لا تقتصر الاهتزازات الجزيئية الجيدة على نوع الضوضاء البيضاء. بل يُعتقد أيضًا الآن أن الضوضاء «الملونة» — التي تولِّدُها مجموعة صغيرة من اهتزازات جزيئات الكلوروفيل نفسها أو حتى البروتينات المحيطة — لها دورٌ أساسي في منع فكِّ الترابط. إذا تخيلنا الضوضاءَ الحرارية البيضاء وكأنها نسخةٌ جزيئية من الشواش في راديو سيِّئ الموالفة، فإن الاهتزازات الجيدة للضوضاء الملونة تشبه نبضةً بسيطة مثل «بوب بوب» في أغنية فرقة «ذا بيتش بويز» التي تُسمى «اهتزازات جيدة»

(جود فايبريشنز). لكن تذكر أن الإكسيتون يتصرَّف أيضًا مثل الموجة لتوليد تلك النبضات الكمية المترابطة التي اكتشفتها مجموعةُ جراهام فليمنج. أثبتت ورقتان بحثيتان لمجموعة مارتن بلينيو بجامعة أولم بألمانيا في عامَي ٢٠١٢ و٢٠١٣ أنه إذا كان تذبذب الإكسيتون وتذبذبات البروتينات المحيطة — أي: الضوضاء الملونة — لهما النبض نفسُه، فعند نشوز الإكسيتون المترابط عن التناغم بفعل الضوضاء البيضاء، فيمكن لتذبذبات البروتينات أن تُعيده إلى حالة التناغم ثانيةً.[5] وفي الواقع، أثبتَت ورقةٌ بحثية نُشرت في مجلة «نيتشر» عام ٢٠١٤ من تأليف ألكسندرا أولايا–كاسترو من كلية لندن الجامعية، وقد عرَضَت لدراسةٍ نظريةٍ رائعة أن الإكسيتون والاهتزازات الجزيئية — الضوضاء الملونة — يشتركان في كَمٍّ واحد من الطاقة بطريقةٍ لا يمكن تفسيرها ببساطةٍ من دون الرجوع إلى ميكانيكا الكم.[6]

لتقدير إسهام كِلا النوعَين من الضوضاء الجزيئية في نقل الإكسيتون تقديرًا وافيًا؛ لنعُد إلى التشبيه الموسيقيِّ مرةً أخرى ونتخيَّل النظام الضوئي وكأنه أوركسترا، كل آلة موسيقية فيها تؤدِّي دورَ جزيئات الصبغة في حين أن الإكسيتون هو اللحن الموسيقي. لنتخيَّل أن الموسيقى تبدأ بعزفٍ منفردٍ لكمان، يمثل جزيء الصبغة الذي يلتقط الفوتون ويحول طاقته إلى إكسيتون يهتز. بعد ذلك، تلتقط الآلات الوترية الأخرى، وبعدها آلات النفخ، موسيقى الإكسيتون التي تصل في النهاية إلى الآلات الإيقاعية التي يؤدي إيقاعُها دورَ مركزِ التفاعل. سنتخيَّل أيضًا أن هذه الموسيقى تُعزف في مسرحٍ مليء بجمهور سيُصدر ضوضاء بيضاء ناتجةً من فتح عبوات المأكولات وتحريك الكراسي والسعال والعطس. وسيكون قائدُ الأوركسترا هو الضوضاءَ الملوَّنة.

لنتخيل أولًا أننا وصلنا في ليلة صاخبة جدًّا يُحدث فيها الجمهورُ ضجة كبيرة لدرجة أن الموسيقيين لا يستطيعون سماع أنفسهم ولا زملائهم. في وسط هذا الصخب، يبدأ الكمان الأول عزف المقطوعة ولكن لا يسمعها الموسيقيون الآخرون ومن ثم، لا يتمكَّنون من التقاط اللحن. هذا سيناريو زينو الكمي، الذي فيه يمنع القَدر الكبير من الضوضاء النقلَ الكمي. وعلى الرغم من ذلك، وفي مستويات منخفضة جدًّا من الضوضاء، ولنقُل مسرحًا فارغًا لا يوجَد فيه أيُّ جمهور، لا يستمع الموسيقيون إلا إلى بعضهم البعض، ومن ثم يلتقطون جميعًا الجزءَ الأول من اللحن، مثل لحنٍ لا تستطيع أن تُخرجه من رأسك، ولا يتوقفون عن عزفه. هذا هو السيناريو المعاكس الخاص بقدر الترابط الكمِّي الكبير للغاية، حيث يظل الإكسيتون يتذبذبُ عبر النظام بأكمله، ولكنه لا ينتهي في أي مكانٍ محدد.

في النطاق الأوسط، ومع المقدار المناسب تمامًا من الضوضاء الصادرة عن جمهورٍ يتحكم في نفسه، يكون الإزعاج كافيًا لإخراج الموسيقيين من تَكرارهم الرتيب لعزف النوتة الكاملة بكل الديناميكيات الخاصة بها. لا تزال بعضُ الآلات تُطرق بنبضٍ مختلف عندما يفتح مشاهدٌ صاخبٌ كيسَ مأكولات من حينٍ لآخر، ولكن بإشارةٍ من عَصاه، يتمكَّن قائد الأوركسترا من إعادة الفرقة إلى التناغم؛ لإنتاج موسيقى البناء الضوئي.

## تأمُّلات حول القوة الدافعة للحياة

في الفصل الثاني، ألقينا نظرةً على ما يحدث داخل المُحرك البخاري، واكتشفنا أن قوته الدافعة تنطوي على التقاطِ الحركة العشوائية لبحر الجزيئات التي تُشبه كرات البلياردو، وتوجيه الاضطراب الجزيئي نحو دفع المكبس داخل الأسطوانة. حينذاك، تساءلنا هل يمكن تفسيرُ لغز الحياة بالكامل بالمبدأ الديناميكي الحراري ذاتِه المُتمثِّل في «تولُّد النظام من اللانظام» الذي يدفع المحركاتِ البخارية. هل الحياة مجردُ محركٍ بخاري معقَّد؟

العديد من العلماء مقتنعون بذلك، ولكن بطريقةٍ معقَّدة تحتاج إلى قليلٍ من التوضيح. تدرس نظرية التعقيد ميلَ أشكالٍ مُعينة من الحركة العشوائية الفوضوية لتوليد النظام عبر ظاهرة «التنظيم الذاتي». على سبيل المثال، وكما ناقشنا بالفعل، حركة الجزيئات داخل السوائل فوضوية بالكامل، ولكن عند تصريف المياه من حوض الاستحمام، فإن المياه تتدفَّق تلقائيًّا حول فتحة التصريف بطريقةٍ منظمة باتجاه عقارب الساعة أو عكس اتجاهها. يمكن رؤية هذا النظام العياني في أنماطِ تدفُّق الحمل في قِدر ماء يتعرَّض للتسخين، وفي الزوابع والأعاصير والبقعة الحمراء على كوكب المشتري، والعديد من الظواهر الطبيعية الأخرى. التنظيم الذاتي ضالعٌ أيضًا في العديد من الظواهر البيولوجية، مثل سلوك السرب لدى الطيور أو الأسماك أو الحشرات، أو في نمط خطوط الحمار الوحشي، أو في البِنية الكسيرية المعقَّدة في بعض أوراق الشجر.

اللافت للنظر في كلٍّ هذه الأنظمة هو عدمُ انعكاس هذا النظام العياني الذي يمكن أن نراه على المستوى الجزيئي. إذا كان لديك مجهرٌ قوي جدًّا يمكن أن يكشف عن الجزيئات الفردية التي تتدفَّق من فتحة التصريف، فقد تُفاجأ عندما ترى أن حركتها تكاد تكون عشوائيةً بالكامل، لكن مع انحيازٍ طفيف جدًّا من العشوائية في اتجاه عقارب الساعة أو عكس اتجاه عقارب الساعة. على مستوى الجزيئات، لا يوجَد غير الفوضى — ولكنها

فوضى بها انحيازٌ طفيف — التي يمكن أن تولِّد النظام على المستوى العياني: تولد النظامَ من الفوضى، حسبما يُشار إلى هذا المبدأ في بعض الأحيان.[7]

تَولُّد النظام من الفوضى مشابهٌ من حيث المفهومُ لمبدأ إرفين شرودنجر «تولُّد النظام من اللانظام» الذي يقف وراء القوة الدافعة للمحركات البخارية، كما ذكرنا من قبل. ولكن، كما اكتشفنا، الحياة مختلفة. فعلى الرغم من وجود كمٍّ كبير من الحركة المضطربة للجزيئات داخل الخلايا الحية، فإن الحياة تقوم بالأساس على حركةٍ محكَمة التنسيق للجسيمات الأساسية داخل الإنزيمات وأنظمة البناء الضوئي والحمض النووي وغيرها. وتنطوي الحياةُ على نظامٍ مُدمج على المستوى المجهري؛ ومن ثم مبدأ «تَولُّد النظام من الفوضى» لا يمكن أن يكون التفسيرَ الوحيد للسمات الأساسية التي تُميز الحياة. إذن، الحياة لا تُشبه على الإطلاق القطارَ البخاري.

ومع ذلك، تشير أبحاثٌ حديثة إلى أن الحياة قد تعمل على غرارِ نسخةٍ كمية من المحرك البخاري.

المبدأ الذي تتبعُه المحركات البخارية في عملها توصَّل إليه الفرنسيُّ سعدي كارنو للمرة الأولى في القرن التاسع عشر. كان ابن لازار كارنو وزيرَ الحرب في عهد نابليون، وتولى وظيفةً في سلاح المهندسين في جيش لويس السادس عشر. بعد خلع الملك، لم يهرب لازار كارنو مثل العديد من زملائه الأرستقراطيين، بل انضمَّ إلى الثورة، وبصفته وزيرًا للحرب، كان مسئولًا إلى حدٍّ كبير عن تكوين جيش ثوري فرنسي لصدِّ الغزو البروسي. لكن مثلما كان لازار واضعَ استراتيجيات عسكرية بارزًا، كان أيضًا عالِمَ رياضيات ومُحبًّا للموسيقى والشعر (وقد سمَّى ولده تيمنًا بالشاعر الفارسي الذي ينتمي إلى العصور الوسطى سعدي الشيرازي) ومهندسًا؛ فقد ألف كتابًا عن كيف تُحول الآلاتُ شكلًا من أشكال الطاقة إلى شكلٍ آخر.

أظهر سعدي بعض الحماسة الثورية والقومية التي ورثها عن والده، وشارك في الدفاع عن باريس لَمَّا كان طالبًا في عام ١٨١٤ عندما حاصر البروسيون المدينة مرةً أخرى. كما أثبتَ بعضًا من أفكار والده الهندسية، وألَّف كتابًا بارزًا بعنوان «تأمُّلات حول القوة الدافعة للنار» (١٨٢٣) غالبًا ما يُعتبر بدايةَ علم الديناميكا الحرارية.

كان تصميم المحرِّكات البخارية مصدرَ إلهام لسعدي كارنو. كان يعتقد أن هزيمة فرنسا في الحروب النابليونية سببها عدم تسخير القوة البخارية لبناء صناعاتٍ ثقيلة بالطريقة التي اتبعَتها إنجلترا. ولكن على الرغم من اختراع المحرك البخاريِّ وتسويقه

تِجاريًّا بنجاحٍ في إنجلترا؛ فإن تصميمه كان يعتمد في الغالب على التجرِبة والخطأ وحَدْس المهندسين، مثل المخترع الاسكتلندي جيمس وات. إذ افتقر إلى أيِّ أساس نظري. حاول كارنو أن يُصحح هذا الوضع بالوصف الرياضي لكيف يمكن أن تُستخدَم المحركات الحرارية — مثل تلك التي تدفع القطارات البخارية — لإنجاز العمل عبر عمليةٍ دورية تُعرف حتى الآن باسم «دورة كارنو».

تصفُ دورة كارنو كيف تنقل المحركات الحرارية الطاقةَ من مكانٍ حارٍّ إلى مكانٍ بارد، وتُسخِّر قدرًا من هذه الطاقة للقيام بعملٍ مفيد قبل أن تعود إلى حالتها الأولية. على سبيل المثال، ينقل المحرك البخاري الحرارةَ من المرجل الساخن إلى المكثف حيث تتعرَّض للتبريد، وفي تلك العملية يستخدِم قدرًا من الطاقة الحرارية في صورة بخار لتحريك المكبس؛ ومن ثم تحريك عجلات القطار. بعد ذلك، يعود الماء المبرَّد إلى المرجل لتسخينه مرةً أخرى؛ للدخول في دورة جديدة من دورات كارنو.

ينطبق مبدأ عمل دورة كارنو على كل أنواع المحركات التي تستخدم الحرارةَ للقيام بأي عمل؛ بدايةً من المحركات البخارية التي أطلقَت الثورة الصناعية، وحتى محركات البنزين التي تحرك السيارة، أو المِضخة الكهربية التي تُبرد الثلاجة. أوضح كارنو أن كفاءة أيٍّ من هذه المحركات — في الواقع، أي «محرك حراريٍّ يمكن تخيُّله»، بحسب قوله — تعتمد على عددٍ من المبادئ الأساسية. إضافة إلى ذلك، أثبتَ أن كفاءة أي محركٍ حراري كلاسيكي لا يمكن أن تتخطى حدًّا أقصى نظريًّا، والمعروف الآن باسم «حد كارنو». على سبيل المثال، المحرك الكهربي الذي يستخدم ١٠٠ واط من الطاقة الكهربية لتوفير ٢٥ واط من الطاقة الميكانيكية كفاءتُه تساوي ٢٥ بالمائة؛ وبذلك يفقد ٧٥ بالمائة من الطاقة التي يحصل عليها في صورة حرارة. إن المحركات الحرارية الكلاسيكية ليست ذاتَ كفاءة عالية.

مبادئ المحركات الحرارية الخاصة بكارنو وحدودها لها تطبيقاتٌ كثيرة للغاية، حتى إنها يمكن أن تنطبقَ على الخلايا الضوئية، مثل تلك التي تُوجَد على أسطُح بعض المباني والتي تلتقط الطاقةَ الضوئية وتُحولها إلى كهرباء. ينطبق الأمر ذاتُه على الخلايا الضوئية البيولوجية في البلاستيدات الخضراء لأوراق النبات التي تناولناها في هذا الكتاب. إن «المحرك الحراري الكمِّي» هذا يقوم بوظيفةٍ مُماثلة لتلك التي يقوم بها المحرك الحراري الكلاسيكي، ولكن الإلكترونات تحلُّ محلَّ البخار، وفوتونات الضوء تحل محلَّ مصدر الحرارة. تمتصُّ في البداية الإلكترونات الفوتونات وتُثار إلى مستوى طاقةٍ أعلى. بعد ذلك،

يمكنها التخلِّي عن هذه الطاقة — إذا لزم الأمر — للقيام بعملٍ كيميائي مفيد. تعود هذه الفكرة إلى عمل ألبرت أينشتاين، وقد أصبحَت أساسَ مبادئ عمل الليزر فيما بعد. تكمن المشكلةُ في أن العديد من هذه الإلكترونات سيفقد طاقتَه في صورةِ حرارةٍ مُهدَرة قبل أن تسنح له الفرصة ويستخدمها. وهذا يحدُّ من كفاءة مثل هذا المحرك الحراري الكمي.

ستتذكر أن مركز التفاعل هو الوجهة النهائية لكل هذه الإكسيتونات المتذبذبة في مركَّبات البناء الضوئي. وحتى الآن، نحن ركَّزنا على عملية نقل الطاقة، ولكن العمل الحقيقي لعملية البناء الضوئي يحدث في مركز التفاعل ذاتِه. هنا، تتحول الطاقة الضعيفة للإكسيتونات إلى الطاقة الكيميائية المستقرة للجزيء الحامل للإلكترونات، الذي تستخدمه النباتاتُ أو الميكروبات للقيام بالعديد من الأعمال المفيدة؛ مثل بناء المزيدِ من النباتات أو الميكروبات.

ما يحدث في مركز التفاعل لافتٌ للنظر؛ مثل خطوة نقل الإكسيتون، بل إنه حتى أكثرُ غموضًا. الأكسدة هي العملية الكيميائية التي تنتقل بها الإلكترونات بين الذرات. في العديد من عمليات الأكسدة، تقفز الإلكترونات بنشاطٍ من ذرةٍ (وتُصبح حينَها مؤكسَدة) إلى ذرةٍ أخرى. لكن في عملياتِ أكسدةٍ أخرى مثل حرق الفحم أو الخشب أو أيِّ وقودٍ آخر قائم على الكربون؛ فإن الإلكترونات التي تكون مملوكةً لذرةٍ واحدة في البداية ينتهي بها الأمر إلى أن تتشاركها ذراتٌ أخرى؛ أي: خسارة صافية للإلكترونات للذرة المانحة للإلكترونات (مثلما تقودك مشاركةُ الشوكولاتة الخاصة بك إلى خَسارتها بالكامل). ومن ثم عندما يحترق الكربون في الهواء، ينتهي الأمر بالإلكترونات في مَداراته الخارجية إلى أن تجري مشاركتها مع الأكسجين لتكوين الروابط الجزيئية لثاني أكسيد الكربون. في تفاعلات الاحتراق تلك، تكون الإلكترونات الخارجية للكربون غيرَ محكمة الارتباط نسبيًّا؛ لذا تسهل مشاركتها نسبيًّا. لكن في مركز تفاعل البناء الضوئي لدى النباتات أو الميكروبات، تُستخدم الطاقة لانتزاع الإلكترونات مباشرةً من جزيئات الماء التي ترتبط فيها الإلكتروناتُ بإحكامٍ أكبرَ بكثير. بالأساس، ينقسم زوجان من جزيئات $HO_2$ لإنتاج جزيء $O_2$ واحدٍ وأربعةِ إلكترونات وأربعةِ أيوناتِ هيدروجين ذات شحنة موجبة. ومن ثم فما دامت جزيئاتُ المياه «تفقد» إلكتروناتها، فمركز التفاعل هو المكان الطبيعيُّ الوحيد الذي يتأكسد فيه الماء.

في عام ٢٠١١، وصف عالِم الفيزياء الأمريكي مارلان سكالي — الذي هو حاليًّا بروفسير في جامعة تكساس إيه آند إم وجامعة برينستون — بالتعاون مع زملائه من

العديد من الجامعات الأمريكية؛ طريقةً ذكية لتصميم محركٍ حراري كمي افتراضي، يتجاوز حدودَ كفاءة المحرك الحراري الكمي القياسي.[8] للقيام بذلك؛ تُستخدَم الضوضاء الجزيئية لدفع الإلكترون إلى التراكب بين حالتَين من الطاقة في آنٍ واحد. وعندما يمتصُّ هذا الإلكترونُ الطاقة من فوتون بعد ذلك ويُصبح «مثارًا»، فسيظلُّ في حالة تراكب من طاقتَين (وإن كانتا أعلى الآن) في آنٍ واحد. والآن، يمكن أن تقلَّ احتماليةُ أن يرجع الإلكترون إلى حالته الأصلية ويفقد طاقته في صورةِ حرارةٍ مهدرة، ويعود الفضل في ذلك إلى الترابط الكمي بين حالتَي الطاقة الخاصة به، وهذا مُشابهٌ لِمثال نمط التداخل الناتج عن تجرِبة الشقِّ المزدوج المذكورة في الفصل الرابع. فهناك، عند فتح الشقين في تلك التجرِبة وبسبب خاصية التداخل الهدَّام؛ لا تتمكَّن الذرةُ من الوصول إلى مواضعَ معينةٍ على الحاجز الخلفي كان يُمكنها الوصولُ إليها عند فتح شقٍّ واحد. وهنا، التعاون الدقيق بين الضوضاء الجزيئية والترابط الكمي يضبط المحرك الحراري الكمي لتقليل الإهدار غير الفعال للطاقة الحرارية؛ ومن ثم زيادة كفاءة المحرك بحيث تتخطى حد كارنو الكمي.

لكن هل هذا الضبط الدقيق ممكنٌ على المستوى الكمي؟ على المستوى دون الذري، ستحتاج إلى تدبرِ أمر مواضع الإلكترونات الفردية وطاقاتها لعدم توصيلِ أكثرَ من القَدر المطلوب من التداخُل؛ بهدف زيادةِ تدفُّق الطاقة بطول المسارات الفعالة، ومنعِ التدفق في المسارات المهدرة للطاقة. ستحتاج أيضًا إلى ضبط الضوضاء البيضاء الجزيئية المحيطة بحيث تُعيد الإلكترونات الناشزة إلى النبض ذاته، ولكن من دون قوة مفرطة، وإلا فستُدفع إلى نبضات مختلفة، ويُفقَد الترابط. هل يوجَد أيُّ مكان في الكون يحتمل أن نجد فيه هذه الدرجةَ المضبوطة بدقةٍ من النظام الجزيئي القادرة على استغلال التأثيرات الكمية الدقيقة في العالم دون الذري؟

الورقة البحثية التي كتبَها سكالي عام ٢٠١١ كانت نظريةً بالكامل. لم يَبْنِ أحدٌ حتى الآن محركًا حراريًّا كميًّا يمكن أن يلتقط فائضَ الطاقة المتوقَّع الزائدَ عن حد كارنو. لكن في عام ٢٠١٣، أشارت ورقةٌ بحثية أخرى من الفريق ذاتِه إلى حقيقةٍ بالغة الأهمية بشأن مراكز التفاعل الخاصة بالبناء الضوئي.[9] إنها ليست مجهَّزةً جميعًا بجزيء كلوروفيل واحد يمكن أن يكون قادرًا على تشغيلِ محرك حراري كمي بسيط، بل مُجهزة بزوجين من جزيئات الكلوروفيل والمعروف باسم «الزوج الخاص».

على الرغم من تطابق جزيئَي الكلوروفيل في الزوج الخاص، فإنهما مدمجان في بيئتَين مختلفتَين داخل سقالة البروتين؛ مما يجعلهما يهتزان بترددات مختلفة قليلًا،

إنهما ناشزان عن الإيقاع قليلًا. وفي ورقة بحثية لاحقة، أشار سكالي وزملاؤه إلى أن هذا التركيب يُزوِّد مراكز التفاعل الخاصة بالبناء الضوئي بالبِنية الجزيئية الدقيقة اللازمة لها كي تكون بمنزلة محركاتٍ حرارية كمية. بيَّن الباحثون أن زوج الكلوروفيل الخاص يبدو مضبوطًا بحيث يستغلُّ التداخل الكمي كي يوقف المسارات غيرَ الفعالة المهدرة للطاقة؛ ومن ثم يوصل الطاقة إلى الجزيء المستقبل بكفاءةٍ تتجاوز الحدَّ الذي اكتشفه كارنو منذ ٢٠٠ عام تقريبًا بهامشٍ يتراوح ما بين ١٨ و٢٧ بالمائة. قد لا يبدو هذا قدرًا هائلًا حتى نُفكر في التقدير الحاليِّ بأن استهلاك الطاقة العالميَّ سيَزيد بنحوِ ٥٦ بالمائة بين عام ٢٠١٠ وعام ٢٠٤٠؛ ومن ثم فإن تطوير تقنية قادرة على تعزيز الطاقة بهامشٍ مقارب لهذا الهامش؛ يبدو بالغَ الأهمية.

تُقدِّم هذه النتيجةُ غيرُ العادية مثالًا آخر رائعًا على مدى تجذُّر الكائنات الحية في العالم الكمي وكيف يبدو أنها تمتلك قدراتٍ لا تعرفها الآلاتُ العيانية غيرُ الحية. بالطبع يلزم توفرُ الترابط الكمي كي يصحَّ هذا السيناريو، ولكن في نتيجةٍ أخرى مُثيرة للاهتمام نُشرت عام ٢٠١٤، اكتشف فريقٌ من الباحثين من هولندا والسويد وروسيا نبضًا كميًّا في مركز التفاعل الخاص بالنظام الضوئي الثاني[٣] للنبات، وقالوا إن هذه المراكز تُعد «فِخاخًا ضوئية ذاتَ تصميمٍ كمِّي».[10] وتذكَّر أن مراكز التفاعل الخاصةَ بعملية البناء الضوئي تطورَت منذ ما يتراوح بين مليارَين وثلاثةِ مليارات سنة. ومن ثم على مدار تاريخ كوكب الأرض بأكمله تقريبًا، يبدو أن النباتات والميكروبات تستخدم محركاتٍ حراريةً معزَّزة بالكم — وهي عمليةٌ بالغةُ التعقيد والبراعة، لدرجة أننا لم نتوصَّل بعدُ إلى كيفية إعادة إنتاجها اصطناعيًّا — لضخ الطاقة في الكربون؛ ومن ثم تكوين كلِّ الكتلة الحيوية التي شكَّلَت الميكروبات والنباتات والديناصورات، وبالطبع الإنسان. في الواقع، نحن لا نزال نَجْني طاقةً كمية قديمة في شكلِ وقود حفري يُدفئ منازلنا ويُشغِّل سياراتنا ويقود معظم القطاع الصناعي في الوقت الراهن. ويُتوقَّع تحقيق فوائدَ جمةٍ من تعلُّم تكنولوجيا الإنسان الحديثة من التكنولوجيا الكمية الطبيعية القديمة.

إذن، ففي عملية البناء الضوئي، يبدو أن الضوضاء تُستخدَم لتعزيز كفاءة توصيل الإكسيتونات إلى مركز التفاعل، ولالتقاط تلك الطاقة التي توفرها الشمسُ بمجرد وصولها إلى مركز التفاعل. لكن تلك القدرة على صُنع فضيلة كمية من رذيلةٍ جزيئية — الضوضاء — لا تقتصر على عملية البناء الضوئي. ففي عام ٢٠١٣، استبدلت مجموعة نايجل سكروتون بجامعة مانشستر — وهي الفريق الذي درَس نفق البروتونات في

الإنزيمات في التجارِب التي تناولناها في الفصل الثالث — بالذرات العادية في الإنزيمات؛ نظائرَ أثقل. استخدامُ تلك النظائر أعطى وزنًا إضافيًّا للزنبركات الجزيئية للبروتين بحيث اهتزَّت — الضوضاء الملونة الخاصة به — بترددات مختلفة. وجد الباحثون أن نفق البروتون ونشاطَ الإنزيم كانا مُضطربَين في الإنزيم الأثقل؛[11] مما يشير إلى أنه في الحالة الطبيعية مع وجود النظائر الطبيعية الأخف، فإن التذبذبات التي تُشبه بندول الإيقاع لعموده الفقري من البروتين تُسهِم في النفق الكميِّ ونشاط الإنزيم. وقد توصَّلَت مجموعةُ جوديث كلينمان بجامعة كاليفورنيا إلى نتائجَ مماثلةٍ، ولكن باستخدام إنزيماتٍ أخرى.[12] ومن ثم يبدو أن الضوضاء لها أيضًا يدٌ في تعزيز عمل الإنزيمات، بالإضافة إلى توجيه عملية البناء الضوئي. وتذكر أن الإنزيمات هي محركاتُ الحياة التي كوَّنَت كلَّ جزيءٍ فردي داخل كل خلية من كل كائن حيٍّ على الأرض. ربما كان للاهتزازات الجيدة دورٌ بالغ الأهمية في الحفاظ على حياةِ كل الكائنات.

## الحياة على الحافة الكمية لعاصفةٍ كلاسيكية

على متن سفينةٍ في البحر: صخب عاصفة.

ويليام شكسبير، مسرحية «العاصفة»،
الفصل الأول، المشهد الأول، توجيه بفتح خشبة المسرح

هل تقدم أيٌّ من هذه الرُّؤى إجابةً على السؤال الذي طرَحه شرودنجر منذ عقودٍ عن طبيعة الحياة؟ تناولنا بالفعل فكرتَه بأن الحياة عبارةٌ عن منظومةٍ يُهيمن عليها نظامٌ يشمل كلَّ شيء؛ بدايةً من الكائنات الكاملة العالية التنظيم، مرورًا بالمحيط الديناميكي الحراري العاصف وحتى الأساس الكمي (ارجع للشكل ١٠-١). والأهم من ذلك أن ديناميكيات الحياة مستقرةٌ ومتوازنة بدقة، لدرجة أن الأحداث على المستوى الكمي يمكن أن تُحدِثَ فرقًا في العالم العياني، تمامًا كما تنبَّأ باسكوال يوردان في ثلاثينيَّات القرن العشرين. هذه الحساسية من جانب العالم العيانيِّ تجاه العالم الكمي سِمةٌ تتفرد بها الحياة، وتُتيح لها على الأرجح أن تستخدم الظواهر التي على المستوى الكمي، مثل النفق الكمي والترابط والتشابك، مما يُحدث فرقًا بالنسبة إلينا جميعًا.

ولكن — ولنُركز على لكن هذه — لا يحدث هذا الاستخدام للعالم الكمي إلا إذا مُنع فكُّ الترابط. وإذا لم يُمنع، فستفقد تلك المنظومةُ طابَعَها الكمي، وتتصرف بالكامل

على نحوٍ كلاسيكي أو ديناميكي حراري؛ اعتمادًا على قواعد «تولد النظام من اللانظام». تجنَّب العلماء فكَّ الترابط عن طريق حماية التفاعلات الكمية الخاصة بهم من «الضوضاء» الدَّخيلة. لقد بيَّن هذا الفصلُ أن الحياة يبدو أنها قد اتخذَت استراتيجيةً مختلفة تمامًا. فبدلًا من أن تسمح للضوضاء بأن تفكَّ الترابط، فإنها تستخدِمها للحفاظ على ارتباطها بالعالم الكمي. في الفصل السادس، تخيلنا الحياة وكأنها كتلةُ جرانيت متوازنةٌ بدقةٍ بحيث تكون عُرضة للأحداث الكمية. ولأسباب ستتَّضح بعد لحظات، سنقوم بتغييرٍ في هذا التشبيه بأن نستخدِم سفينةً شراعية طويلة بدلًا من كتلة الجرانيت.

ستكون سفينتنا الشراعية التخيلية في البداية في حوضٍ جاف، وستكون العارضة الخاصة بها الرفيعة المتوازنة بنحوٍ رائع على خطٍّ واحد من الذرات المتراصَّة بعناية. في هذه الحالة من التعرُّض للخطر، تكون السفينة — مثل الخلية الحية — حساسةً تجاه الأحداث على المستوى الكمِّي التي تحدث في العارضة الذرِّية الخاصة بها. يمكن لحدثٍ مثل نفق بروتون أو إثارةِ إلكترون أو تشابُك ذرة أن يؤثِّر في السفينة بكاملها، ربما بالتأثير في توازنها الدقيق في الحوض الجاف. وعلى الرغم من ذلك، سنتخيَّل أيضًا أن قبطان السفينة توصل إلى طرقٍ ذكية ومُدهشة للاستفادة من تلك الظواهر الكمية الدقيقة مثل الترابط أو النفق أو التراكب أو التشابك كي تُساعده في الإبحار بمجرد أن تنزل السفينةُ إلى المياه.

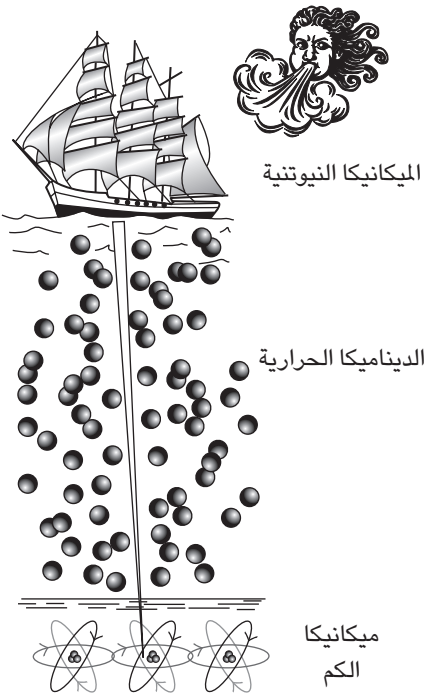
لكن تذكر أن السفينة لا تزال في حوضٍ جاف؛ ومن ثم فهي لم تذهب إلى أي مكان حتى الآن. وعلى الرغم من أنها في حالةٍ من التوازن الدقيق، فإنه يُحتمل أن تستفيد من الظواهر التي هي على المستوى الكمي، فجثومها المتزعزع يجعلها عرضةً لأضعف نسمة هواء يمكن تخيلها — إذ ربما يلمسها جزيء هواء واحد فقط — ممَّا قد يؤدي إلى انقلابها. إن طريقة المهندس في التعامل مع مشكلة الحفاظ على السفينة قائمة؛ ومن ثم الحفاظ على حساسيتها تجاه الأحداث الكمية في عارضتها ستتمثَّل في وضع السفينة في صندوق واقٍ وطرد كل الهواء لمنع أيِّ جزيء شارد يُشبه كرة البلياردو من أن يتسبَّب في اضطراب السفينة. كذلك سيخفض المهندس درجةَ حرارة النظام بأكمله حتى يكاد يصلُ إلى الصفر المطلق، بحيث لا يتمكَّن أيُّ اهتزاز جزيئي من إحداث اضطراب في توازنها الدقيق. لكن قباطنة البحر المخضرمين يعرفون أن هناك طريقةً أخرى للحفاظ على السفينة قائمة؛ إذ لا بد أولًا من إنزالها إلى المياه الديناميكية الحرارية المضطربة.

من المسلَّمات أن اعتدال السفينة في المياه أسهلُ منه في اليابسة، ولكن بالتفكير على المستوى الجزيئي، نجد أن السبب في زيادةِ استقرار السفينة ليس واضحًا على نحوٍ مباشر. لقد قلنا لتوِّنا إن طريقة المهندس في الحفاظ على اعتدال السفينة ذات العارضة الرفيعة في حوض جافٍّ هي حمايتها من أي اضطرابٍ محتمل تُسبِّبه الذرات أو الجزيئات الشاردة. لكن أليس البحر مليئًا بالذرَّات والجزيئات الشاردة التي تتصادم عشوائيًّا بعضها مع بعض، ومع عارضة أيِّ سفينة على النحو الذي يوجَد مع كرات البلياردو الذي استكشَفْناه في الفصل الثاني؟ كيف يمكن أن تنقلب تلك السفينةُ المتوازنة المعرَّضة للخطر بفعل تصادماتٍ طفيفة على اليابسة، ولكنها تتصدَّى لهذه التصادمات عندما تكون في المياه؟

تكمن الإجابة في قواعد «تولُّد النظام من اللانظام» التي ذكرها شرودنجر. ستُقصَف السفينة بالفعل بتريليونات التصادمات الجزيئية من على جانبَيها الأيمن والأيسر. بالطبع إنها لم تَعُد تتوازنُ الآن على عارضةٍ رفيعة للغاية، بل إنها تطفو على المياه بفضل إمكانية الطفو، وبوجود هذه التصادمات الكثيرة على جانبَي السفينة، فلن يتغيرَ متوسطُ قوة الدفع على مقدمة السفينة ومؤخرتها أو على جانبَيها الأيمن والأيسر. لذا لا تنقلب السفن الطافية لأنها مثبتة بتريليونات قذائف القصف الجزيئية العشوائية؛ سيتولد النظام (الاتجاه الرأسي للسفينة) من اللانظام (تريليونات التصادمات الجزيئية العشوائية التي تشبه تصادم كرات البلياردو).

لكن بالطبع يمكن أن تنقلب السفينة حتى إن كانت في عُرض البحر. تخيَّلْ أن قبطانًا أنزل سفينته إلى بحرٍ عاصف، ولكنه لم يبسُط شراعها بعد. لم تَعُد الأمواج التي تضرب السفينة عشوائية، وقد تندفع الأمواج العاتية من أحد الجانبين؛ مما يؤدي إلى انقلاب سفينة غيرِ مستقرة بسهولة. لكن قبطاننا المخضرم يعرف كيف يَزيد من استقرار السفينة؛ فهو يبسط الشراعَ بحيث يُمكنه تسخيرُ قوة الرياح لإبقاء السفينة مستقرَّة على العارضة (انظر الشكل ١٠-٢).

مرةً أخرى، قد تبدو هذه الحيلة متناقضةً للوهلة الأولى. نتوقع أن الرياح العرَضية وغير المتوقَّعة ستعمل على قلبِ سفينةٍ غير مستقرة بالفعل، بدلًا من زيادة استقرارها، لا سيما أنها لن تكون عشوائية، ولكنها ستميل إلى أن تضرب أحد جانبَي السفينة بقوةٍ أكبر. ولكن القبطان يعرف كيف يضبط زاويةَ الشراع وذراع الدفة بحيث ينقلب فعلُ الرياح والتيارات ضد العواصف والأعاصير؛ بهدفِ تصحيح أيِّ ميل إلى أحد الجانبين. بتلك الطريقة، يستطيع القبطان تسخيرَ العاصفة المحيطة للحفاظ على استقرار سفينته.




شكل ١٠-٢: تُبحر الحياة على الحافة بين العالم الكمي والعالم الكلاسيكي. الخلية الحية تُشبه سفينةً لها عارضةٌ رفيعة تخترق حتى تصل إلى طبقة الواقع الكمية؛ ومن ثم يمكنها التقاطُ ظاهرةٍ مثل النفق الكمي أو التشابك للحفاظ على حياتها. يجب الحفاظ على تلك الصلة بالعالَم الكمي بنشاط؛ وذلك بتسخير الخلايا الحية للعواصف الديناميكية الحرارية — الضوضاء الجزيئية — للحفاظ على الترابط الكمي بدلًا من تدميره.

يبدو أن الحياة تُشبه تلك السفينة التخيلية التي تُبحر في مياه كلاسيكية عاصفة، وعلى متنها قبطان مخضرم؛ البرنامج الوراثي — الذي ظل يتحسَّن طيلةَ ما يقرب من أربعة مليارات سنة من التطور — قادرٌ على الإبحار عبر أعماقٍ متنوعة من العالم الكمي والعالم الكلاسيكي. وبدلًا من الاختباء من العواصف، تحتضن الحياةُ هذه العواصفَ وتُرتب أعاصيرها ونواتها الجزيئية؛ كي تملأ أشرعتَها وتُحافظ على اعتدال السفينة بحيث تخترق عارضتها الرفيعة المياه الديناميكية الحرارية كي تكونَ على اتصالٍ بالعالم الكمي

(ارجع للشكل ١٠-٢). إن جذور الحياة العميقة تُتيح لها أن تُسخر هذه الظواهر الغريبة التي تطوف خلسةً في حافة العالم الكمي.

فهل هذا يُقدم لنا رؤيةً جديدة بشأن كينونة الحياة الحقيقية؟ حسنًا، هناك افتراضٌ آخر، ونؤكد على أنه افتراضٌ بالفعل، ولكنه افتراض لا يسَعُنا صدُّه بعد أن قطعنا هذا الحدَّ في هذه الرحلة. هل تتذكر السؤال الذي طرحناه في الفصل الثاني الذي يتعلق بالفرق بين الكائن الحي والجماد؛ ذلك الفرق الذي وصَفه القدماءُ باسم الروح؟ كانوا يعتقدون أن الموت يُصيب الكائن عندما تُغادر الروحُ الجسد. استبعَدَت فلسفةُ ديكارت الميكانيكيةُ المذهبَ الحيويَّ ونبذَت فكرة الروح، على الأقل من النباتات والحيوانات، لكن ظلَّ الفرق بين الأحياء والأموات غامضًا. هل بإمكان فهمنا الجديد للحياة أن يَستبدل بالروح شرارةً حيوية كمية؟ سيعتبر الكثيرون مجرد طرح هذا السؤال على أنه أمرٌ مثير للجدل؛ إذ يدفع بحدود العلم التقليدي إلى ما هو أبعدُ من الاحترام وإلى عوالم العلوم الزائفة أو حتى نوعٍ من الروحانيات. وهذا ليس ما نقترحه هنا. بدلًا من ذلك، نريد أن نُقدم ما نأمُل أن يكون فكرةً قد تستبدل على الأقل البذرةَ الخاصة بنظريةٍ علمية بالتكهُّنات الصوفية والميتافيزيقية.

في الفصل الثاني، شبَّهنا قدرة الحياة على الحفاظ على حالتها العالية التنظيم بأداةِ طاولة البلياردو الغريبة التي يمكن أن تحافظ على مثلثٍ من الكرات في وسط الطاولة عن طريق اكتشاف واستبدال أيِّ كرات خرَجَت من مكانها بسبب الاصطدامات من الكرات الأخرى في نظام يُشبه النظام الديناميكي الحراري. بما أنك الآن اكتشفتَ المزيد عن الطريقة التي تعمل بها الحياة، فأنت بإمكانك أن ترى أن تلك الاستدامة الذاتية تُحافظ عليها آليةُ جزيئاتٍ معقَّدة تضمُّ الإنزيمات والصبغات والحمض النووي والحمض النووي الريبوزي وغيرها من الجزيئات الحيوية، التي تعتمد بعضُ خصائصها على ظواهر ميكانيكا الكم مثل النفق الكمي والترابط والتشابك.

تُشير الأدلة الحديثة الذي تناولناها في هذا الفصل إلى أن بعض أو كل هذه الأنشطة المتنوعة المعزَّزة بالكم — والتي يمكن أن نتخيَّلها على أنها الأنشطةُ التي تجري على سطح سفينتنا المزدحم — إنما يُحافَظ عليها من خلال قدرة الحياة الرائعة على تسخير العواصف والأعاصير الديناميكية الحرارية؛ للإبقاء على ارتباطها بالعالَم الكمِّي الأعمق. ولكن ماذا يحدث إذا هبَّت عاصفةٌ ديناميكية حرارية عاتية وحطمَت — مجازيًّا — صاريَ السفينة؟ لن تُصبح الخلية التي بدون شراع قادرةً على تسخير العواصف والرياح الديناميكية

الحرارية — الضوضاء البيضاء والملونة — للحفاظ على اعتدالِ عارضتها، وستضربها الأمواج والتورُّمات الموجودة بداخلها، مما سيتسبَّب في تأرجُح سفينتنا المجازية، وفي النهاية ستنقطع صلتُها بالعالم الكمي المنظم (انظر الشكل ١٠-٣). ومن دون هذه الصلة، لن يُؤثر الترابطُ أو التشابك أو النفق الكمي أو التراكب في السلوك العياني للخلية، ومن ثم ستغرق الخلية التي انقطع اتصالها بالعالم الكمي تحت المياه المضطربة الديناميكية الحرارية، وستتحوَّل إلى جسمٍ كلاسيكي بالكامل. وبمجرد أن تغرق السفينة، فلن تتسبب أيُّ عاصفة في طفْوِها مرةً أخرى؛ وعلى الأرجح، بمجرد أن يَعْلق الكائن الحي في المحيط العاصف للحركة الجزيئية، لا يمكن لأي عاصفةٍ أن تُعيد صلته بالعالم الكمي.

شكل ١٠-٣: ربما يُمثل الموت انقطاعَ صلةِ الكائن الحي بالعالم الكمي المنظم، وتركه مغلوبًا على أمره يُقاوم قُوى الديناميكا الحرارية العشوائية.

## هل يُمكننا استغلالُ علم الأحياء الكمي لإنشاء تكنولوجيا حية جديدة؟

قد لا تستطيع العواصف أن تُعيد السفينة الغارقة إلى سطح المياه، ولكن البشر يستطيعون ذلك. يمكن للإبداع البشري أن يُحقق أكثرَ ممَّا تُحققه القُوى العشوائية بكثير. وكما أوضحنا في الفصل التاسع، فإن احتمال هبوب إعصارٍ على نحوٍ عشوائي في ساحة خردة وتجميعه لطائرةٍ نفاثة جامبو عبر الصدفة البحتة؛ احتمالٌ ضعيف للغاية. لكن بإمكان مهندسي الطيران بناء طيَّارات. فهل بإمكاننا أيضًا تجميعُ حياة؟ كما أشرنا في العديد من المواضع في هذا الكتاب، لم ينجح أحدٌ حتى الآن في خلقِ حياةٍ من موادَّ كيميائية خاملة، مما يعني — على حدِّ القول الشهير المأثور عن ريتشارد فاينمان — أننا لم نفهم ظاهرةَ الحياة فهمًا تامًّا بعد. ولكن ربما يُزودنا فهمنا الجديد لعلم الأحياء الكمي بالوسائل اللازمة لخلق حياة جديدة وحتى بناء شكل ثوري من «التكنولوجيا الحية».

التكنولوجيا الحية معروفةٌ بالطبع. إننا نعتمد عليها اعتمادًا كاملًا — في مجال الزراعة — لإنتاج الطعام. إننا نعتمد أيضًا على منتجات التكنولوجيا الحية مثل الخبز والجبن والجِعَة والنبيذ التي تحوَّلت من الدقيق واللبن والحبوب وعصير الفواكه باستخدام الخميرة والبكتيريا. يستفيد عالَمُنا الحديث بالمثل من حصاده للمنتجات غير الحية للخلايا التي كانت حيةً في السابق، مثل الإنزيمات التي استخدمتها ماري شوايتسر لتفكيك عظمة الديناصور. وتُستخدَم إنزيمات مماثلةٌ لتفكيك الألياف الطبيعية لعمل أقمشة الملابس، أو تُضاف إلى المنظفات البيولوجية التي تغسل تلك الملابس. إن صناعات التكنولوجيا الحيوية والأدوية التي تُقدر أرباحها بملايين الدولارات تُنتج المئات من المنتجات الطبيعية مثل المضادات الحيوية التي تحمينا من العدوى. تستغلُّ صناعة الطاقة قدرةَ الميكروبات على تحويل الكتلة الحيوية الزائدة إلى وَقود حيوي، كما أن العديد من الموادِّ التي تدعم الحياةَ الحديثة، مثل الأخشاب والورق، كانت حيةً من قبلُ مثلما كان الوقود الحفري الذي يُدفئ منازلنا ويشغِّل سياراتنا. إذن حتى في القرن الحادي والعشرين، نحن لا نزال نعتمدُ اعتمادًا غيرَ عادي على التكنولوجيا الحية التي تعود إلى آلافِ السنين. إذا كانت لديك أيُّ شكوك في هذا الشأن، فحاول أن تقرأ رواية «الطريق» لكورماك مكارثي، وهي رواية ديستوبية تصف العالم الكئيب الذي سيُترك لنا إذا تدمَّرت التكنولوجيا الحية من دون مبالاة.

لكن التكنولوجيا الحية الموجودة في الوقت الحاليِّ لها حدود. على سبيل المثال، على الرغم من أن بعض الخطوات في عملية البناء الضوئي فعالةٌ إلى أقصى حدٍّ وذلك كما

اكتشفنا، فإن معظمها ليس كذلك، وكفاءة الطاقة الكلية لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقةٍ كيميائية يُمكننا الحصول عليها من خلال الزراعة كفاءة ضئيلة للغاية. والسبب هو أن النباتات والميكروبات لها أجندةٌ مختلفة عن أجندتنا؛ فهي تقوم بأعمالٍ غيرِ مهمة بالنسبة إلينا مثل صنع الزهور والبذور التي ليست ضروريةً حقًّا لالتقاط الطاقة، ولكنها مع ذلك ضرورية لبقائها على قيد الحياة. وبالمثل، فإن الميكروبات التي تصنع المضادات الحيوية أو الإنزيمات أو المستحضرات الصيدلانية تقوم بذلك على نحوٍ مفرط للغاية؛ لأن أجندتها التطورية تُجبرها على صُنع الكثير من الأشياء غير الضرورية، مثل المزيد من الخلايا الميكروبية.

هل يُمكننا هندسة حياةٍ تتَّسق مع أجندتنا؟ بالطبع يمكننا ذلك، وإننا بالفعل نُحقق استفادةً كبيرة من نجاح البشر في تحويل النباتات والحيوانات البرِّية إلى التكنولوجيا الحية للغلال والماشية المدجَّنة، المُعدَّة للاستخدام البشري. ولكن توجَد حدود لعملية الانتقاء الاصطناعي التي أعطتنا نباتاتٍ ذاتَ بذور أكبر أو حيوانات مستأنَسة تنفع للحرث، على الرغم من النجاح الكبير لتلك العملية. فلا يُمكننا انتقاءُ ما لم تصنعه الطبيعة. على سبيل المثال، تُنفق مليارات الدولارات كلَّ عام على الأسمدة التي تُغذي التربة بالنيتروجين الذي يُفقَد بسبب الزراعة المكثَّفة. لا تحتاج البقوليات مثل البازلاء إلى الأسمدة النيتروجينية؛ لأنها تُئوي البكتيريا في جذورها التي تلتقط هذا الغازَ مباشرة من الهواء. يمكن أن تكون الزراعة أكثرَ كفاءةً بكثير إذا تمكَّنَّا من هندسة الحبوب البقولية التي تُثبت النيتروجين الخاص بها، كما تفعل البازلاء. لكن هذه القدرة لم تتطوَّر في أيِّ نوع من أنواع الحبوب.

لكن حتى هذا القيد يمكن التغلبُ عليه جزئيًّا على الأقل. فقد بدأ التلاعب في جينات النباتات والميكروبات وحتى الحيوانات (أو ما يُعرف بالهندسة الوراثية) في أواخر القرن العشرين. واليوم، نحصل على قدرٍ كبير من غِلالنا الأساسية مثل فول الصويا من نباتات معدَّلة وراثيًّا مُقاوِمة للأمراض أو مبيدات الأعشاب الضارَّة، ولا تزال الجهودُ جاريةً، على سبيل المثال، لإدخال جيناتٍ تلتقط النيتروجين في الحبوب. وبالمثل، تعتمد صناعةُ التكنولوجيا الحيوية اعتمادًا كبيرًا على الميكروبات المعدَّلة وراثيًّا لإنتاج المنتجات الدوائية والمضادات الحيوية.

وعلى الرغم من ذلك، توجَد مرةً أخرى حدود. غالبًا ما تنقل فقط الهندسة الوراثية الجينات من نوعٍ إلى آخر. على سبيل المثال، يصنع نبات الأرز فيتامين إيه (البيتا كاروتين)

في أوراقه وليس في بذوره، ومن ثم نادرًا ما يوجد أيٌّ منه في المحصول الأساسي للأرز الذي تتغذَّى عليه معظمُ البلدان النامية. فيتامين إيه ضروري لجهاز المناعة وقوة الإبصار، ومن ثم يؤدي نقصُه في أفقرِ مناطق العالم التي تعتمِد على الأرز إلى وفاة ملايين الأطفال بسبب العدوى، أو فقدانِهم البصرَ كلَّ عام. في التسعينيَّات من القرن الماضي، أدخل بيتر باير من جامعة فرايبرج وإنجو بوتريكوس من المعهد الفيدرالي السويسري للتكنولوجيا في زيورخ؛ جينَين ضروريَّين لصنع فيتامين إيه — استخلص أحدهما من أزهار النرجس والآخَر من ميكروب — في جينوم الأرز لإنتاج أرزٍّ ذي مستويات عالية من فيتامين إيه في بذوره. «الأرز الذهبي»، كما أسماه باير نسبةً إلى لونِ بذوره الصفراء، بإمكانه توفيرُ معظم الاحتياج اليومي من فيتامين إيه للأطفال. لكن على الرغم من النجاح الباهر لتكنولوجيا الهندسة الوراثية، فإنها مجردُ تلاعبٍ بالحياة. يهدف العلم الجديد الذي يُسمى «علم الأحياء التخليقي» إلى إنشاء تكنولوجيا حية ثورية بحقٍّ عن طريق هندسة أشكالٍ جديدة بالكامل من الحياة.

يوجَد نهجان يكمل أحدُهما الآخَر في علم الأحياء التخليقي. يتمثل النهجُ الأول في ذلك الذي قابلناه بالفعل في سياقِ مناقشة كيف بنى رائدُ تحديد تسلسل الجينوم كريج فينتر ما يُسمَّى «بالحياة التخليقية»؛ عن طريق استبدال نسخةٍ مُخلَّقة كيميائيًّا من جينوم بكتيريا تُسمَّى المفطورة الفطرانية بجينومها الأصلي. أتاح استبدالُ الجينوم هذا لفريقه إجراءَ تعديلات طفيفةٍ نسبيًّا على جينوم تلك البكتيريا بأكمله. وعلى الرغم من ذلك، لا تزال تلك البكتيريا هي المفطورةَ الفطرانية؛ إذ لم يُدخِل الفريق أيَّ تغييرات جذرية في سماتها البيولوجية. وعلى مدار السنوات القادمة، يُخطط فريق فينتر لإدخال المزيد من التعديلات الجذرية، ولكن بالتدريج في هذا النهج الخاص بعلم الأحياء التخليقي. وهنا، لم يخلق الفريق حياةً جديدة، بل عدَّل حياةً قائمة.

النهج الثاني جذريٌّ بقدرٍ أكبرَ بكثير؛ فبدلًا من تعديل كائن حي موجود، فإنه يهدف إلى هندسةِ أشكالِ حياة جديدة بالكامل من موادَّ كيميائية خاملة. سيعتبر الكثيرون هذا المسعى خطيرًا، بل إنه حتى متجاوزٌ للحدود. لكن هل هو مُجْدٍ؟ حسنًا، الكائنات الحية مثل البشر آلات دقيقة إلى أبعدِ الحدود. ومثل أيِّ آلة، فإنه يمكن هندستُها بطريقةٍ عكسية لاكتشافِ مبادئ تصميمها، وعندئذٍ يمكن استخدام مبادئ التصميم تلك لبناء آلاتٍ أفضل.

## بناء حياة من البداية

يحلم المُتحمِّسون لنهج إنشاء حياة جديدة الخاص بعلم الأحياء التخليقي ببناء أشكالٍ حياة جديدة تمامًا يمكن أن تُعدِّل عالمنا. على سبيل المثال، ينشغل المهندسون المعماريون اليوم عن حقٍّ بمفهوم الاستدامة: بناء منازل ومكاتب ومصانع ومدن مستدامة. ولكن على الرغم من أن المبانيَ أو المدن الحديثة عادةً ما توصف بأنها ذاتيةُ الاستدامة، فإنها تعتمد في أغلب الأحيان على جهود ومهارات كائناتٍ ذاتية الاستدامة بحقٍّ — وهم البشر — للحفاظ على هيئتها؛ فعندما تنخلع بلاطاتُ السقف بسبب عاصفة، نستأجر بنَّاءً للصعود واستبدالها، وعندما يحدث تسريبٌ من المواسير، نستدعي سباكًا، وعندما تتعطل السيارة، نذهب بها إلى الميكانيكي. على نحوٍ أساسي، كل هذه الصيانة اليدوية ضروريةٌ لإصلاح الأضرار التي لحقَت بمنازلنا أو آلاتنا من جراء كل ذلك التصادم بين الجزيئات، الذي يُشبه تصادم كرات البلياردو، الناجم عن الرياح والأمطار والأضرار البيئية الأخرى.

الحياة مختلفة؛ فأجسامنا قادرة على صيانة نفسها باستمرارٍ عن طريق تجديد الأنسجة المتضررة أو المتهالكة واستبدالها وإصلاحها. ولأننا أحياء؛ فإننا نتمتَّع بالاستدامة الذاتية حقًّا. حاولت الهندسة المعمارية الحديثة محاكاةَ سماتٍ معينة للحياة في العديد من المباني المميزة في السنوات الأخيرة. على سبيل المثال، يمتلك برج «سويس ري» الذي صمَّمه نورمان فوستر والذي أضيف إلى أفقِ لندن عام ٢٠٠٣، تصميمًا سُداسيَّ الشكل مستوحًى من إسفنج سلةِ زهور فينوس (وهو عبارة عن إسفنج وليس زهرة)، وهذا التصميم فعالٌ في توزيع الضغوط التي على المبنى. إن مركز إيستجيت في هراري بزيمبابوي، الذي صمَّمه المهندس المعماري مايك بيرس، يُحاكي نظام تكييف الهواء لبيوت النمل الأبيض؛ ليوفِّر التهوية والتبريد. لكن المديرة المشاركة لمجموعة الأبحاث المعمارية أفاتار بجامعة جرينتش، ريتشيل آرمسترونج، لها رؤيةٌ أكثر جُرأة، وهي المباني الذاتية الاستدامة حقًّا؛ أي: الهندسة المعمارية البيومترية. فهي تحلم، إلى جانب العديد من الحالمين المِعماريِّين الآخرين، بهندسةِ مَبانٍ من الخلايا الحية الاصطناعية التي تمتلك القدرة على الاستدامة والإصلاح الذاتي وحتى التضاعف الذاتي.[13] وإذا تضرَّرَت هذه المباني الحية بسبب الرياح أو الأمطار أو الفيضانات، فإنها ستشعر، مثل الكائنات الحية، بالضرر وتُصلح نفسها تمامًا مثل الكائنات الحية.

يمكن تطوير أفكار آرمسترونج لتعزيز سِماتٍ تخليقية أخرى لحياتنا. فيمكن استخدام المادة الحية كذلك لتصميم أعضاء تعويضية مثل المفاصل أو الأطراف

الاصطناعية، التي تتَّسم بإمكانية إصلاح ذاتها وحماية نفسها من هجمات الميكروبات، مثل الأنسجة الحية تمامًا. ويمكن حتى حقنُ أشكال الحياة الاصطناعية في جسم الإنسان؛ على سبيل المثال من أجل البحث عن الخلايا السرطانية وتدميرها. ويمكن تصنيع كلِّ أنواع المنتجات الدوائية والوقود والغذاء من خلال أشكال الحياة التخليقية المهندَسة على نحوٍ خاص؛ بحيث لا يُثقلها أيُّ تاريخ تطوري. وبالتعمُّق في المستقبل، توجد رؤية الخيال العلمي للروبوتات الحية، أو التي تمتلك صفاتٍ بشَرية، والتي يمكن أن تنفذ مهامَّ العمل التقليدية، أو حتى «تعزز ظروف الحياة» على المريخ كي تجعلَه صالحًا لسُكنى البشر، أو تبنيَ سفنًا فضائية حية يمكن أن تستكشف المجرَّة.

يمكن تتبُّع فكرة إنشاء حياة تخليقية جديدة إلى أوائل القرن العشرين، عندما كتب عالم الأحياء الفرنسيُّ ستيفان لودوك ما يلي: «مثلما بدأت الكيمياء التخليقية بالتشكيل الاصطناعي لأبسط المنتجات العضوية؛ فلا بد أن يكتفيَ التخليقُ البيولوجي في البداية بتخليقِ أشكالٍ تُشبه أشكال الكائنات الحية الأدنى.»[14] وكما تناولنا في الفصل التاسع، حتى «الكائنات الحية الأدنى» التي تعيش اليوم هي في الواقع بكتيريا بالغةُ التعقيد إلى أقصى الحدود، تتكوَّن من آلاف الأجزاء التي لا يمكن تخليقها حاليًّا بأي نهجٍ يمكن تصوره خاصٍّ بإنشاء حياة جديدة. لا بد أن الحياة بدأت من شيءٍ أبسط بكثيرٍ من البكتيريا. وكما اقترحنا في هذا الفصل، فإن أفضل التخمينات الحاليَّة بشأن سلَفِنا النهائي هو جزيئات الحمض النووي الريبوزي الإنزيمي ذاتيِّ التضاعف (الريبوسومات) أو البروتين الذي أصبح محاطًا بنوعٍ من الحويصلة الصغيرة لتشكيل بِنيةٍ خَلوية بسيطة ذاتيةِ التضاعف، وهي «الخلية الأولية». طبيعة الخلايا الأولية الأولى — إن وُجدت حقًّا — ليست واضحةً البتة. يعتقد العديدُ من العلماء أنها احتَمَت داخل المسامِّ المجهرية في الصخور مثل صخور إيسوا التي تناولناها في الفصل التاسع، والتي امتلأَت بالموادِّ الكيميائية الحيوية البسيطة القادرةِ على دعم الحياة. ويعتقد آخَرون أنها كانت فقاعاتٍ أو قُطيرات من الموادِّ الكيميائية الحيوية المنحسرة داخل نوعٍ من الغشاء العائم في المحيط البدائي.

يستمدُّ معظم المتحمِّسين لفكرة إنشاء حياة تخليقية جديدة؛ الإلهامَ من نظريات أصل الحياة عن طريق محاولةِ بناء خلايا أوَّلية حية اصطناعية، قادرة على السباحة في بحرٍ بدائي مصمَّم داخل مختبر. ولعل أبسطَها هي الأنواع المختلفة من قطيرات أو حويصلات الزيت في الماء أو الماء في الزيت. هذه الأشكال سهلةُ الصنع، وفي الحقيقة يُمكنك عملُ الملايين منها كلما أعددتَ تتبيلةَ سَلطة. معروفٌ أن الزيت لا يختلط بالماء؛

ومن ثم فسينفصل أحدهما عن الآخَر بسرعة، ولكن إذا أدخلتَ مادةً تدخل جزيئاتُها بين الماء والزيت — «مادة خافضة للتوتُّر السطحي» مثل المستردة — وقلَّبتَ الخليط جيدًا، فستصنع تتبيلةَ سلطة. وعلى الرغم من أن هذه التتبيلة قد تبدو سلسةً ومتجانسة، فإنها في الواقع مليئةٌ بتريليونات قطرات الزيت الصغيرة المستقرة.

صنع مارتن هانسيك من جامعة جنوب الدانمارك خلايا أوَّليةً تُشبه الخلايا الحيةَ بنحوٍ ملحوظ من قطرات الزيت في الماء التي يُثبتها أحدُ المنظفات. الخلايا الأولية التي صنعها بسيطةٌ للغاية، وغالبًا ما تتركب من خمس موادَّ كيميائية فقط. وحينما تُخلط بالنِّسَب المضبوطة، فإنها تُعيد تجميع نفسِها في شكلِ قطراتٍ زيتية. البِنية الداخلية للقطرات لها كيمياء بسيطة تجعل الخليةَ الأولية تتحرك في بيئتها، مدفوعةً بالحمل الحراري (الدوران الحراري) والنوع نفسُه من القُوى الكيميائية التي تتسبَّب في تجمُّع قطرات الزيت في المقام الأول. إنها حتى قادرةٌ على أن تمرَّ بشكلٍ بسيط من النمو والتضاعف الذاتي عن طريق امتصاص المواد الخام من بيئتها، مما يؤدي في النهاية إلى انقسامها إلى اثنين.[15]

الخلايا الأولية التي صنعها هانسيك وضعُها مقلوبٌ مقارنةً بالخلايا الحية، حيث إن تكوينها الداخلي من الزيت، والخارجي من الماء. يُفضل معظم الباحثين الآخرين صُنعَ خلايا أوليةٍ ذات بِنية داخلية مائية. وهذا يُتيح لهم أيضًا مَلْأَها بجزيئاتٍ حيوية جاهزة قابلة للذوبان في الماء. في عام ٢٠٠٥، على سبيل المثال، ملأ عالم الوراثة جاك شوستاك خلايا أوليةً بريبوزيمات حمض نووي ريبوزي.[16] تذكَّر (من الفصل التاسع) أن الريبوزيمات هي جزيئاتُ الحمض النووي الريبوزي التي يمكن أن تُشفِّر المعلومات الجينية، مثل الحمض النووي تمامًا، ولكن يمكن أن تستضيفَ نشاط الإنزيمات أيضًا. أثبت الفريقُ أن الخلايا الأوَّلية الممتلئةَ بالريبوزيمات كانت قادرةً على شكلٍ بسيط من الوراثة، لا سيما الانقسام إلى اثنين مثل الخلية الأوَّلية التي صنعها هانسيك. وفي عام ٢٠١٤، صنع فريقٌ بقيادة سيباستيان لوكوماندو من جامعة رادبود في هولندا نوعًا آخَر من الخلايا الأولية تمتلئ حجراتُه المتعددة بالإنزيمات التي يمكن أن تدعم، مثل الخلايا الحية، عمليةَ أيضٍ بسيطةً تتدرج من حجرةٍ إلى أخرى.[17]

هذه الخلايا الأولية الديناميكية والنشطة كيميائيًّا بلا شك بِنْياتٌ مثيرةٌ للإعجاب والاهتمام، ولكن هل هي حية؟ للإجابة عن هذا السؤال؛ حريٌّ بنا أن نتفق على تعريفٍ عملي للحياة. التعريف الواضح — وهو التضاعف الذاتي — مقبولٌ لعدة أسباب، ولكنه

أيضًا يُثير الكثير من الأسئلة. فمعظم الخلايا في الجسم البالِغ مثل خلايا الدم الحمراء والخلايا العصبية لا تتضاعف، ولكن لا شك أنها حية. حتى بعض البشر — مثل الكهَنة البوذيِّين أو الكاثوليك — لا يهتمون (عادةً) بالعملية الفوضوية المتمثِّلة في التضاعف الذاتي، ومع ذلك يعدُّون بلا شكٍّ أحياء. إذن، على الرغم من أن التضاعف الذاتي ضروريٌّ بالطبع لبقاء أي نوع على المدى الطويل، فإنه ليس خاصيةً إلزامية للحياة.

هناك خاصيةٌ في الحياة تُعتبر جوهريةً حتى أكثر من التضاعف الذاتي، وهي تلك التي قد تناولناها بالفعل، والتي يسعى اختصاصيُّو الهندسة المعمارية البيومترية إلى محاكاتها، وهي المتمثلة في الاستدامة الذاتية. الحياة قادرةٌ على استدامة حالتها الحيَّة. ومن ثم فإن أقلَّ المتطلبات التي يجب توفرُها حتى تكتسبَ خلايانا الأوليةُ تلك صفةَ الحياة هي القدرة على الحفاظ على نفسها في البحار الديناميكية الحرارية المضطربة.

لكن للأسف استخدام هذا التعريف الأكثر تحديدًا للحياة لا يجعل أيًّا من الجيل الحاليِّ من الخلايا الأولية يُصنَّف على أنه حي. حتى الخلايا القادرة على تنفيذ بعض الخدع، مثل القيام بشكلٍ بسيط من التضاعف (الانقسام إلى اثنين)، تنتج خلايا وليدةً ليست في واقع الأمر مثل الخلايا الأصلية؛ فهي تحتوي على القليل من المُكونات البادئة مثل الريبوزيمات أو الإنزيمات، ومن ثم تُستنفَد تلك المكونات في النهاية مع تقدمِ عملية التضاعف. وبالمثل، على الرغم من أن الخلايا الأولية التي صنعتها مجموعةُ لوكوماندو قادرةٌ على دعم عمليةِ أيضٍ تشبه تلك التي تقوم بها الكائنات الحية البسيطة، فإنها بحاجةٍ إلى أن تُملأ بجزيئاتٍ حيوية نشطة، وهو أمرٌ لا يمكنها فعله بنفسها. الجيل الحاليُّ من الخلايا الأولية يُشبه الساعاتِ التي تُملأ يدويًّا؛ حيث إنها يُمكنها الحفاظ على حالتها المبدئية الكيميائية المدعومة بالإنزيمات والركائز المسبقة الصُّنع إلى أن تفقد طاقتها. بعد ذلك، يؤدي التصادمُ المستمر الذي يُتَلَقَّى من حركة الجزيئات المحيطة إلى تآكلِ تنظيم هذه الخلايا الأولية؛ بحيث تصبح أكثرَ فوضويةً وعشوائيةً تدريجيًّا، إلى أن تتلاشى الفروق بينها وبين بيئتها في النهاية. وعلى خلاف الحياة، فإن الخلايا الأولية الاصطناعية غيرُ قادرة على مَلءِ نفسها.

هل ينقص تلك الخلايا مُكوِّنٌ ما؟ بالطبع لا يزال المجال في بداياته، ومن المحتمل أن تُقطع أشواطٌ كبيرة في العقود القادمة. الفكرة التي نريد استعراضها في هذا القسم الأخير من الكتاب هي أن ميكانيكا الكم يمكن أن تُعطينا الشرارة المفقودة الضرورية لجعل الحياة الاصطناعية مفعمةً بالحيوية وإنشاء حياة تخليقيةٍ بحق. وبالإضافة إلى إطلاق

تكنولوجيا ثورية، فإن هذا التقدم قد يُزودنا أيضًا، أخيرًا، بالوسائل التي تُتيح لنا الإجابة عن هذا السؤال القديم الذي طرحناه في الفصل الثاني، وهو: ما الحياة؟

حاجَجْنا — ومعنا آخَرون — بأن الوصف الديناميكي الحراري للحياة غيرُ كافٍ؛ حيث إنه لا يتضمَّن قدرة الحياة على تسخير العالم الكمي. فالحياة، كما نعتقد، تعتمد على ميكانيكا الكم. لكن هل نحن على حقٍّ في ذلك؟ كما تناولنا بالفعل من قبل، يصعب إثباتُ ذلك باستخدام التكنولوجيا المتوفرة في الوقت الراهن، والسبب أننا لا نستطيع تشغيل ميكانيكا الكم في الخلية الحية وإيقافَها. وعلى الرغم من ذلك، نحن نرى أن الحياة — سواءٌ كانت طبيعيةً أو اصطناعية — مستحيلةٌ من دون السمات الغريبة للعالَم الكمِّي التي تناولناها في هذا الكتاب. والطريقة الوحيدة لمعرفة ما إذا كنا على حقٍّ أوْ لا هي إنشاء حياةٍ تخليقية بها السمات الغريبة للعالم الكمي، وأخرى بدونها (إن كان ذلك ممكنًا)، ومعرفةُ أيُّ نسخةٍ منهما ستعمل على نحوٍ أفضل.

## إطلاق الخلية الأولية الكمية الأولى

لنتخيَّلْ أننا نبني خليةً حية بسيطة من مادة جامدة بالكامل؛ ربما واحدة قادرة على تنفيذ مهامَّ بسيطة مثل البحث عن طعامها داخل بحرٍ بدائي محفوظ في مختبَرٍ من نوعٍ ما. سيتمثَّل هدفنا في بناء مثلِ هذا الشيء بطريقتَين. ستسعى الأولى للاستفادة من السمات الغريبة لميكانيكا الكم؛ وسنُطلق عليها «الخلية الأولية الكمية». أما الثانية، فلن تفعل ذلك، وستُسمى «الخلية الأولية الكلاسيكية».

ستكون نقطةَ انطلاقٍ جيدةً لكِلا الشكلَين الخلايا الأوليةُ المتعددةُ الحجراتِ المحاطةُ بأغشية، التي صنَعها سيباستيان لوكوماندو، والتي تُتيح لنا أقسامُها المختلفة أن نفصل الوظائفَ المختلفة للحياة داخل الحجرات الفردية. بعد ذلك، سنحتاج إلى تزويدِ وعاء الخلية الأولية بمصدرٍ للطاقة؛ لنستخدمَ ذلك المصدرَ الوفير بالفوتونات العالية الطاقة، المتمثلَ في ضوء الشمس. سنُحمل إحدى حجراتها بغابةٍ من جزيئات الصبغة وسقَّالات البروتينات، بحيث نصنع شكلًا من أشكال اللوح الشمسي القادر على التقاط الفوتونات وتحويل طاقتها إلى إكسيتونات، وكأنها بلاستيدةٌ خضراء اصطناعية. ومع ذلك، لا يُحتمَل أن توفِّر جزيئاتُ الصبغة المختلطة إمكانيةَ نقل الطاقة العالية الكفاءة التي تتميز بها عمليةُ البناء الضوئي؛ نظرًا إلى أن الحالة الفوضوية للجزيئات لن تكون قادرةً على

الحفاظ على الترابط الكمي اللازم لنقل الطاقة بكفاءة. ولالتقاط النبضة الكمية، سنحتاج إلى توجيه جزيئات الصبغة بحيث تستطيع أن تتدفَّق الموجة المترابطة عبر النظام.

في عام ٢٠١٣، حُلَّت هذه المشكلة على يد مجموعةٍ من جامعة شيكاغو بقيادة رائد التخليق الضوئي الكمِّي جريج إنجل؛ وذلك عن طريق ربط جزيئات الصبغة كيميائيًّا في ترتيبٍ ثابت. ومثل مركب فينا-ماثيوز-أولسون في الطحالب الذي اكتشف فيه إنجل لأول مرة الترابطَ الكمي (ارجع للفصل الرابع)؛ فقد أظهر نظامُ الصبغة الاصطناعي الخاصُّ به نبضات كمية مترابطة استمرَّت عشرات الفيمتوثوانٍ، حتى في درجة حرارة الغرفة.[18] ومن ثم حتى نوفر للَّوح الشمسي الخاص بالخلية الأولية الكمية الخاصة بنا إكسيتونات معززةً بالترابط؛ فسنملؤها بغابةٍ من جزيئات الصبغة المرتبطة معًا الخاصة بإنجل. ستحتوي الخلية الأولية الكلاسيكية على جزيئات الصبغة ذاتِها، ولكن ستُنظَّم بطريقةٍ عشوائية بحيث يُضطرُّ الإكسيتون إلى التعرج في طريقه عبر النظام. عندئذٍ يُمكننا اختبار هل الترابط الكمي ضروريٌّ أم يمكن الاستغناء عنه لنقل الإكسيتونات في عملية البناء الضوئي.

لكن وكما اكتشَفْنا من قبل، فإن التقاط الضوء ليس سوى الخطوةِ الأولى في عملية البناء الضوئي؛ فبعد ذلك نحتاج إلى تحويلِ طاقة الإكسيتونات غير المستقرة إلى شكلٍ كيميائي مستقر. مرةً أخرى، لقد أُحرز هنا بالفعل بعضُ التقدم. فعندما أثبتَت مجموعة سكالي في الورقة البحثية التي نُشرت عام ٢٠١٣ أن مركز التفاعل في البناء الضوئي يبدو كأنه محركٌ حراري كمِّي، أضافت أنه يمكن استلهام تصميم خلايا أولية أكثرَ فاعليةً من المحركات الحرارية الكمية البيولوجية.[19] وفي وقتٍ لاحق من العام ذاته، آمَن فريقٌ من جامعة كامبريدج بكلام تلك المجموعة، ووضع مخططًا تفصيليًّا لتلك الخلية الأولية الاصطناعية التي ستكون بمنزلة محركٍ حراري كمي.[20] صنعت المجموعة نموذجًا لمركز التفاعل الاصطناعي من جزيئات الصبغة المرتبطة معًا التي صُنعت في مختبر إنجل، وأوضحَت أنه ينبغي أن ينقل إلكترونًا نشطًا إلى جزيء مُستقبِل بكفاءة مماثلة تتجاوز حدَّ كارنو؛ وذلك مثلما اكتشفَت مجموعة سكالي في عملية البناء الضوئي الطبيعية.

لذلك دعُونا نتخيَّل أن خليتنا الشمسية الكمية مثبتةٌ في مركزِ تفاعل اصطناعي مستوحًى من نموذج فريق كامبريدج، وقادرٍ على التقاط الإلكترونات النشطة باعتبارها طاقةً كيميائية مستقرَّة. مرةً أخرى، سنُصمم نظامًا منافسًا للخلية الأولية الكلاسيكية يحاول تنفيذَ عمليةٍ مماثلة لنقل الطاقة، ولكن من دون الكفاءة الكمية التي تتجاوز

حدَّ كارنو. بمجرد التقاط الطاقة الضوئية، فإنه يمكن استخدامها لبناء جزيئات حيوية معقَّدة مثل جزيئات الصبغة الخاصة بالخلية.

لكن كما هو الحال مع الإلكترونات، تحتاج التفاعلات التخليقية الحيوية إلى مُعززِ طاقة إضافي توفِّره، في خلايانا، عمليةُ التنفس الخلوي (ارجع للفصل الثالث). سنستمدُّ الإلهام من عملية التنفُّس ونُحول بعض الإلكترونات العالية الطاقة التي توفِّرها عملية البناء الضوئي إلى حُجرة «محطة طاقة»، حيث ستنتقل عبر نفقٍ من إنزيمٍ إلى آخَر — كما هو الحال في السلاسل التنفُّسية الطبيعية — لتكوين الأدينوسين الثلاثي الفوسفات، الذي يُعد حامل الطاقة الجزيئيَّ في الخلية. ومرة أخرى، سنستهدف تصميم الحجرة التنفسية واستكشاف دور ميكانيكا الكم في هذه العملية البيولوجية الحيوية.

بتوفر مصدرٍ للإلكترونات والطاقة، أصبحت الخلية الأولية الكمية جاهزةً الآن لتكوين كلِّ المواد الكيميائية الحيوية الخاصة بها، ولكنها تحتاج إلى مصدرٍ للمادة الخام؛ نقصد الطعام. ومن ثم فسنُزودها بمصدر طعام متمثلٍ في سكر بسيط؛ وهو الجلوكوز المذاب في البحر البدائي الموجود في المختبر. سنُضطر إلى إدخال ناقلاتِ سكر تعمل بالأدينوسين الثلاثي الفوسفات تكون قادرةً على ضخِّ الجلوكوز داخل الخلية، هذا إلى جانب مجموعةٍ أخرى من الإنزيمات القادرة على مُناورة ذراتها — الهندسة على المستوى الكمي — لبناء المزيد من الجزيئات الحيوية المعقَّدة. عادةً ما تستخدِم العديد من هذه الإنزيمات نفق الإلكترون والبروتون كما أوضحنا في الفصل الثالث، ولكن هدفنا سيكون هو تصميمَ نسختَين؛ إحداهما تمتلك القدرة على الانغماس في العالَم الكمي لاكتشاف ما إذا كانت ميكانيكا الكم توفِّر حقًّا مادةَ تشحيم أساسيةً لمحركات الحياة هذه.

ميزة أخرى نودُّ تصميمها في الخلية الأولية المدعومة بالعالم الكمِّي؛ هي القدرة على تسخير عاصفة الضوضاء الجزيئية للحفاظ على الترابط الكمي. في الوقت الحاضر، لا يُعرف سوى القليل عن كيف تقوم الحياة بهذه الخدعة لدرجة أنه لا يُوجَد لدَينا أيُّ قدرٍ من الثقة بشأن طريقة تصميمها. قد تدخل العديدُ من العوامل؛ على سبيل المثال، من المعروف أن البيئة الجزيئية الشديدةَ الازدحام الخاصة بالخلايا الحية تعدل العديد من التفاعلات الكيميائية الحيوية،[21] وقد تساعد في الحدِّ من التأثير العشوائي للضوضاء. ومن ثم فسنغطي الخليتَين الأوليتَين بإحكامٍ بجزيئاتٍ حيوية؛ لمحاكاة تلك البيئة الحية المزدحمة، على أملِ أن تساعد في تسخير تلك الأعاصير والعواصف الديناميكية الحرارية؛ للحفاظ على الترابط الكمي.

لكن تظلُّ الخلية الأولية الكمية وعاءً شديدَ الاحتياج، حيث يجب تحميل كل الإنزيمات مسبقًا على متنه. وحتى تكون ذاتيةَ الاكتفاء؛ يجب تجهيز حجرةٍ أخرى — حجرة التحكم الخاصة بها — بجينوم اصطناعي قائم على الحمض النووي قادر على تشفيرِ أي شيءٍ تحتاج إليه الخلية، بالإضافة إلى الآليَّة اللازمة لتحويل شفرة البروتونات التي على مستوى الكمِّ الخاصة بها إلى بروتينات. هذا مماثلٌ للنهج القائم على تعديل حياة قائمة الذي استخدمه كريج فينتر؛ فقط سيجري حقن الجينوم في خلية أولية «غير حية». وأخيرًا، يُمكننا حتى أن نمنح الخلية الأولية نظامًا مِلاحيًّا — ربما أنفًا جُزيئيًّا لتمكينها من تحديد موقع طعامها من خلال استخدام مبدأ مستقبِلات الشمِّ ذات التشابك الكمي الذي استكشفناه في الفصل الخامس — ومحركًا جزيئيًّا لدفع نفسها عبر بحرها البدائي. يُمكننا أيضًا أن نُمدَّ الخلية بنظامٍ ملاحي كمي، مثل النظام الملاحي لدى طائر أبي الحناء، الذي قد يُساعدها على توجيه نفسها في المحيط البدائي الموجود في المختبر.

ما وصفناه هنا يعدُّ أكثر قليلًا من مجردِ فكرة خيالية بيولوجية؛ إنها ليست أكثرَ واقعيةً من شخصية أرييل في مسرحية «العاصفة» لشكسبير. لقد أسقطنا قدرًا كبيرًا من التفاصيل، وبهدف التبسيط وسهولة الفهم؛ لم نذكر التحدِّيات الهائلة التي ستقف أمام أيِّ مشروع حقيقي في علم الأحياء التخليقي يقوم على نهجِ إنشاءِ حياة جديدة. وحتى لو حدثَت محاولةٌ لتنفيذ مثلِ هذا المشروع، فمن المؤكد ألا تتمَّ محاولة استنساخ كلِّ هذه العمليات في خطوةٍ واحدة، مثلما هو الحال في الوصفة التخيلية التي ذكرناها هنا، ولكن ستتم أولًا محاولةُ دمج أبسط أو أفضل عملية مفهومة لنا — ربما البناء الضوئي — في الخلية الأوَّلية. بالطبع سيكون هذا إنجازًا كبيرًا في حدِّ ذاته، وسيكون أفضلَ نظامٍ نموذجي يمكن استخدامه في دراسة دور الترابط الكمي في عملية البناء الضوئي. وإذا كان هذا العمل الفذُّ ممكنًا بالفعل، فستكون الخطوات التالية هي تضمينَ مكوِّناتٍ إضافية لتنفيذ تعقيدٍ أكبر وأكبر؛ ممَّا قد يؤدي في النهاية ربما إلى خلية حية اصطناعية حقًّا. لكن نتوقَّع ألا يحدثَ هذا إلا على المسار الكميِّ للحياة؛ إذ نعتقد أن الحياة لن تنشأ من دون أن يكون لها صلةٌ بالعالَم الكمي.

إذا جرى بالفعل تنفيذ مثل هذا المشروع، فقد يكون من الممكن في النهاية إنشاءُ حياة جديدة. ومن الممكن أن يُطلِق هذا التقدمُ تكنولوجيا حيةً ثورية بحق؛ حياةً اصطناعية قادرة على التنقُّل بين حافة العالم الكمي والعالم الكلاسيكي. يمكن هندسة الخلايا الحية الاصطناعية لتكون بمنزلة لَبِناتٍ للمباني الحية المستدامة حقًّا؛ يمكن إنشاء جرَّاحين

مِجهريِّين لإصلاح أنسجتنا المتضرِّرة والمتآكلة واستبدالها. إن السمات الرائعة لعلم الأحياء الكمي التي اكتشفناها في هذا الكتاب، بدايةً من البناء الضوئي إلى عمل الإنزيمات، ومن الأنوف الكمية إلى الجينومات الكمية، والبوصلات الكمية، وربما حتى العقول الكمية، يمكن الاستفادة منها جميعًا لبناء عالَم جديد شجاع من الكائنات الحية المُخلَّقة الكمية التي يمكن أن تُحرر أقاربها الطبيعية من المهمة الشاقة المتمثلةِ في تزويد الإنسانية بمعظم احتياجاتها.

ولكن ربما الأهم من ذلك بكثيرٍ هو أن القدرة على إنشاء حياة جديدة من الصفر ستُمكن علم الأحياء أخيرًا من تحقيق مقولة فاينمان الشهيرة التي تقول: «ما لا أستطيع خلقه، لا أستطيع فهمه». إذا نجح هذا المشروع حقًّا، فيُمكننا أن نزعم في النهاية أننا أخيرًا فهمنا الحياةَ وقدرتها العجيبة على تسخير قُوى الفوضى كي تُبحر على هذه الحافة الضيقة بين العالم الكلاسيكي والعالم الكمي.

> ... أخذَت شمسُ الضحى تتباطأ، وأنا أذكر اتجاه الرياح المزعجة التي تُقيم أمواج البحر الهائج ولا تُقعدها حتى تبلغ الأُفُق الأزوردي، وأنتم تقرعون طبولَ الحرب بدون أن تستعدُّوا لها، فيما أنا أتبع الرعود التي تصمُّ الآذان ...
>
> ويليام شكسبير، مسرحية «العاصفة»،
> الفصل الخامس، المشهد الأول [ترجمة أ. ر. مشاطي]

## هوامش

(١) غالبًا ما يُستخدم هذا المصطلح لوصفِ الاهتزازات الجزيئية غيرِ المترابطة.
(٢) سَعة الاهتزازات صغيرةٌ للغاية، ومن ثم لا ينتج عنها قدرٌ كبير من الطاقة.
(٣) النباتات لها نظامان ضوئيَّان، وهما الأول والثاني.

# خاتمة: الحياة الكمية

نجحَت أنثى طائر أبي الحناء الأوروبي التي قابلناها في الفصل الأول في قضاءِ فصل الشتاء، تحت شمس البحر الأبيض المتوسط الساطعة، وهي الآن تتنقلُ بين الغابة غيرِ الكثيفة والأحجار القديمة في قَرْطاج بتونُس، وتُغذي نفسها على الذباب والخنافس والديدان والبذور، والتي كلها عبارة عن كتلٍ حيوية انبثقَت من الهواء والضوء عبر آلات البناء الضوئي الكمية التي نُطلق عليها النباتات والميكروبات. ولكن الشمس الآن ترتفع في سماء الظهيرة وحرارتها الملتهبة جفَّفت التيارات الضحلةَ التي تمتدُّ في مساراتٍ متعرجة عبر الغابة. وتبدأ الغابة في الجفاف وتُصبح غيرَ موائمة لأنثى أبي الحناء الأوروبية الخاصة بنا. يَحين الآن وقتُ رحيلها.

الوقت الآن آخر النهار، وتطير أنثانا الصغيرة لأعلى لتجثم على غُصن عالٍ من شجرة أرز. ثم تُهندم نفسها بعناية، مثلما فعلتْ منذ عدة شهور، بينما تستمع إلى نداءات طيور أبي الحناء الأخرى التي شعَرَت مثلها بالرغبة في الاستعداد لرحلة طويلة. ومع انخفاضِ آخِر أشعة الشمس تحت الأفق، تُدير منقارَها نحو الشمال وتنشر جَناحَيها وتنطلق في سماء المساء.

تُحلق أنثى طائر أبي الحناء تجاه الساحل الشمال أفريقي، وتستمرُّ في الطيران بطول البحر الأبيض المتوسط، وتسلك الطريقَ ذاتَه ولكن في الاتجاه المعاكس، مثلما فعلتْ منذ ستة أشهُر، تُوجهها مرةً أخرى في ذلك بوصلتُه ذاتُ التشابُك الكمِّي. كل خفقةٍ من جَناحيها يدفعها انقباضُ الألياف العضلية، التي تستمدُّ طاقتها من النفق الكمي للإلكترونات والبروتونات عبر إنزيمات التنفُّس. بعد عدة ساعات، تصل أنثانا إلى ساحل إسبانيا، وتنزل في وادي أندلسيا الذي تُوجَد به أشجارٌ ونهر، حيث تحطُّ وسط غطاءٍ نباتي وفير، يتضمن أشجارَ الصَّفصاف والقيقب والدَّرْدار والألدر وأشجار الفاكهة وشجيرات

الزهور مثل الدِّفْلَى، والتي كلها نتاجٌ لعملية بناءٍ ضوئي قائمة على العالم الكمي. تنطلِق جزيئاتُ الرائحة في تجاويف أنفها، محتجِزةً جزيئات مستقبلات الرائحة، ومطلِقةً أحداث النفق الكمي التي تُرسل إشاراتٍ عصبية — عبر القنوات الأيونية ذات الترابط الكمي — إلى دماغها كي تُخبرها أنها على مقربةٍ من زهور الحمضيات، التي يحطُّ عليها النحلُ والحشرات الملقِّحة الأخرى اللذيذة التي ستوفر لها قوتًا إضافيًّا للمرحلة التالية من الرحلة.

بعد عدة أيامٍ من الطيران، تصل أنثى طائر أبي الحناء أخيرًا إلى غابة التنوب الاسكندنافية التي انطلقَت منها قبل عدة أشهر. المهمة الأولى لها هي البحث عن وليف. وصلتْ ذكورُ أبي الحناء قبل عدة أيام، ومعظمها عثر على مواقعَ مناسبة لإقامة أعشاشها التي تُروِّج لها للإناث عبر تغريدها. تنجذب أنثى أبي الحناء إلى طائرٍ يُغرد بألحان شجية خاصة، وتستمتع بالعديد من اليرقات اللذيذة التي جمعها الذَّكر؛ إذ يعتبر ذلك جزءًا من طقس المغازلة. بعد تزاوجٍ سريع، يتَّحد مَنيُّ الذكَر مع بويضة الأنثى وتُنسخ المعلومات الجينية الكمية التي تُشفر الشكلَ والبنية والسمات الكيميائية الحيوية والخاصة بوظائف الأعضاء، وحتى التغريد للزوجين، بنحوٍ لا تشوبه شائبةٌ تقريبًا في جيلٍ جديد من طيور أبي الحناء. ستُوفر الأخطاء القليلة القائمة على النفق الكمي المادة الخام للتطوُّر المستقبلي للنوع.

بالطبع، وكما أكَّدنا في الفصول السابقة، لا يمكننا القطعُ بعدُ بأن كل السمات التي ذكرناها لتوِّنا تندرِج ضمن ميكانيكا الكم. لكن لا شك أن الكثير من الأشياء الرائعة والفريدة عن طيور أبي الحناء، والسمك المهرج، والبكتيريا التي تعيش تحت جليد قارة أنتاركتيكا، والديناصورات التي جابت الغابات الجوراسية، والفراشات الملكية وذباب الفاكهة والنباتات والميكروبات؛ مستمدةٌ من حقيقة أنها، مثلنا، متجذرةٌ في العالم الكمي. لا يزال هناك الكثيرُ الذي يجب اكتشافه، ولكن جمال أيِّ مجال بحثيٍّ جديد يكمُن في الأشياء المجهولة تمامًا. وكما قال إسحاق نيوتن:

> لا أعرف كيف أبدو أمام العالم، لكني أرى أنني أبدو كأنني مجردُ صبي يلعب على شاطئ البحر، يُسلِّي نفسه بين الحين والآخَر بالعثور على حَصاة أنعم، أو صَدَفةٍ أجمل من المعتاد، بينما يمتدُّ محيط الحقيقة العظيم غيرَ مكتشَف أمامه.

# ملاحظات

## الفصل الأول: مقدمة

(1) P. W. Atkins,'Magnetic field effects', *Chemistry in Britain*, vol. 12 (1976), p. 214.

(2) S. Emlen, W. Wiltschko, N. Demong and R. Wiltschko, 'Magnetic direction finding: evidence for its use in migratory indigo buntings', *Science*, vol. 193 (1976), pp. 505–8.

## الفصل الثاني: ما الحياة؟

(1) S. Harris, 'Chemical potential: turning carbon dioxide into fuel', *The Engineer*, 9 August 2012, http://www.theengineer.co.uk/energy-and-environment/in-depth/chemical-potential-turning-carbon-dioxide-into-fuel/1013459.article#ixzz2upriFA00.

(2) *Die Naturwissenschaften*, vol. 20 (1932), pp. 815–21.

(3) Pascual Jordan, 1938, quoted in P. Galison, M. Gordin and D. Kaiser, eds, *Quantum Mechanics: Science and Society* (London: Routledge, 2002), p. 346.

(4) H. C. Longuet-Higgins, 'Quantum mechanics and biology', *Biophysical Journal*, vol. 2 (1962), pp. 207–15.

(5) M. P. Murphy and L. A. J. O' Neil, eds, *What is Life? The Next Fifty Years: Speculations on the Future of Biology* (Cambridge: Cambridge University Press, 1995).

## الفصل الثالث: مُحرِّكات الحياة

(1) R. P. Feynman, R. B. Leighton and M. L. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, MA: Addison–Wesley, 1964), vol. 1, pp. 3–6.

(2) M. H. Schweitzer, Z. Suo, R. Avci, J. M. Asara, M. A. Allen, F. T. Arce and J. R. Horner, 'Analyses of soft tissue from Tyrannosaurus rexsuggest the presence of protein', *Science*, vol. 316: 5822 (2007), pp. 277–80.

(3) J. Gross, 'How tadpoles lose their tails: path to discovery of the first matrix metalloproteinase', *Matrix Biology*, vol. 23: 1 (2004), pp. 3–13.

(4) G. E. Lienhard, 'Enzymatic catalysis and transition–state theory', *Science*, vol. 180: 4082 (1973), pp. 149–54.

(5) C. Tallant, A. Marrero and F. X. Gomis–Ruth, 'Matrix metalloproteinases: fold and function of their catalytic domains', *Biochimica et Biophysica Acta (Molecular Cell Research)*, vol. 1803: 1 (2010), pp. 20–8.

(6) A. J. Kirby, 'The potential of catalytic antibodies,' *Acta Chemica Scandinavica*, vol. 50: 3 (1996), pp. 203–10.

(7) Don DeVault and Britton Chance, 'Studies of photosynthesis using a pulsed laser: I. Temperature dependence of cytochrome oxidation rate in chromatium. Evidence for tunneling', *BioPhysics*, vol. 6 (1966), p. 825.

(8) J. J. Hopfield, 'Electron transfer between biological molecules by thermally activated tunneling', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 71 (1974), pp. 3640–4.

(9) Yuan Cha, Christopher J. Murray and Judith Klinman, 'Hydrogen tunnelling in enzyme reactions', *Science*, vol. 243: 3896 (1989), pp. 1325–30.

(10) L. Masgrau, J. Basran, P. Hothi, M. J. Sutcliffe and N. S. Scrutton, 'Hydrogen tunneling in quinoproteins', *Archives of Biochemistry and Biophysics*, vol. 428: 1 (2004), pp. 41–51; L. Masgrau, A. Roujeinikova, L. O. Johannissen, P. Hothi, J. Basran, K. E. Ranaghan, A. J. Mulholland, M. J. Sutcliffe, N. S. Scrutton and D. Leys,'Atomic description of an enzyme reaction dominated by proton tunneling', *Science*, vol. 312: 5771 (2006), pp. 237–41.

(11) David R. Glowacki, Jeremy N. Harvey and Adrian J. Mulholland, 'Taking Ockham's razor to enzyme dynamics and catalysis', *Nature Chemistry*, vol. 4 (2012), pp. 169–76.

## الفصل الرابع: النبضة الكمية

(1) From the BBC TV series *Fun to Imagine 2: Fire* (1983), available on YouTube: http://www.youtube.com/watch?v=ITpDrdtGAmo.

(2) Interview with CBC News, available at: http://www.cbc.ca/news/technology/quantum-weirdness-used-by-plants-animals-1.912061.

(3) G. S. Engel, T. R. Calhoun, E. L. Read, T-K. Ahn, T. Mančal, Y-C. Cheng, R. E. Blankenship and G. R. Fleming, 'Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems', *Nature*, vol. 446 (2007), pp. 782–6.

(4) I. P. Mercer, Y. C. El-Taha, N. Kajumba, J. P. Marangos, J. W. G. Tisch, M. Gabrielsen, R. J. Cogdell, E. Springate and E. Turcu, 'Instantaneous mapping of coherently coupled electronic transitions and energy transfers in a photosynthetic complex using angle-resolved coherent optical wave-mixing', *Physical Review Letters*, vol. 102: 5 (2009), pp. 057402.

(5) E. Collini, C. Y. Wong, K. E. Wilk, P. M. Curmi, P. Brumer and G. D. Scholes, 'Coherently wired light-harvesting in photosynthetic marine algae at ambient temperature', *Nature*, vol. 463: 7281 (2010), pp. 644–7.

(6) G. Panitchayangkoon, D. Hayes, K. A. Fransted, J. R. Caram, E. Harel, J. Wen, R. E. Blankenship and G. S. Engel, 'Long–lived quantum coher–ence in photosynthetic complexes at physiological temperature', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107: 29 (2010), pp. 12766–70.

(7) T. R. Calhoun, N. S. Ginsberg, G. S. Schlau–Cohen, Y. C. Cheng, M. Ballottari, R. Bassi and G. R. Fleming, 'Quantum coherence enabled determination of the energy landscape in light–harvesting complex II', *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 113: 51 (2009), pp. 16291–5.

## الفصل الخامس: البحث عن موطن نيمو

(1) Exodus 30: 34–5.

(2) Quoted in A. Le Guerer, *Scent: The Mysterious and Essential Power of Smell* (New York: Kodadsha America Inc., 1994), p. 12.

(3) R. Eisner, 'Richard Axel: one of the nobility in science', *P&S Columbia University College of Physicians and Surgeons*, vol. 25: 1 (2005).

(4) C. S. Sell, 'On the unpredictability of odor', *Angewandte Chemie, International Edition* (English), 45: 38 (2006), pp. 6254–61.

(5) K. Mori and G. M. Shepherd, 'Emerging principles of molecular sig–nal processing by mitral/tufted cells in the olfactory bulb', *Seminars in Cell Biology*, vol. 5: 1 (1994), pp. 65–74.

(6) L. Turin, *The Secret of Scent: Adventures in Perfume and the Science of Smell* (London: Faber & Faber, 2006), p. 4.

(7) L. Turin, 'A spectroscopic mechanism for primary olfactory recep–tion', *Chemical Senses*, vol. 21: 6 (1996), pp. 773–91.

(8) Turin, *The Secret of Scent*, p. 176.

(9) C. Burr, *The Emperor of Scent: A True Story of Perfume and Obsession* (New York: Random House, 2003).

(10) A. Keller and L. B. Vosshall, 'A psychophysical test of the vibration theory of olfaction', *Nature Neuroscience*, vol. 7: 4 (2004), pp. 337–8.

(11) M. I. Franco, L. Turin, A. Mershin and E. M. Skoulakis, 'Molecular vibration–sensing component in *Drosophila melanogaster* olfaction', *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 108: 9 (2011), pp. 3797–802.

(12) J. C. Brookes, F. Hartoutsiou, A. P. Horsfield and A. M. Stoneham, 'Could humans recognize odor by phonon assisted tunneling?', *Physical Review Letters*, vol. 98: 3 (2007), p. 038101.

## الفصل السادس: الفراشة وذبابة الفاكهة وطائر أبي الحناء الكمِّي

(1) F. A. Urquhart, 'Found at last: the monarch's winter home', *National Geographic*, Aug. 1976.

(2) R. Stanewsky, M. Kaneko, P. Emery, B. Beretta, K. Wager–Smith, S. A. Kay, M. Rosbash and J. C. Hall, 'The cryb mutation identifies cryptochrome as a circadian photoreceptor in *Drosophila*', *Cell*, vol. 95: 5 (1998), pp. 681–92.

(3) H. Zhu, I. Sauman, Q. Yuan, A. Casselman, M. Emery–Le, P. Emery and S. M. Reppert, 'Cryptochromes define a novel circadian clock mechanism in monarch butterflies that may underlie sun compass navigation', *PLOS Biology*, vol. 6: 1 (2008), e4.

(4) D. M. Reppert, R. J. Gegear and C. Merlin, 'Navigational mechanisms of migrating monarch butterflies', *Trends in Neurosciences*, vol. 33: 9 (2010), pp. 399–406.

(5) P. A. Guerra, R. J. Gegear and S. M. Reppert, 'A magnetic compass aids monarch butterfly migration', *Nature Communications*, vol. 5: 4164 (2014), pp. 1–8.

(6) A. T. von Middendorf, *Die Isepiptesen Russlands Grundlagen zur Erforschung der Zugzeiten und Zugrichtungen der Vögel Russlands* (St Petersburg, 1853).

(7) H. L. Yeagley and F. C. Whitmore, ‘A preliminary study of a physical basis of bird navigation’, *Journal of Applied Physics*, vol. 18: 1035 (1947).

(8) M. M. Walker, C. E. Diebel, C. V. Haugh, P. M. Pankhurst, J. C. Montgomery and C. R. Green, ‘Structure and function of the vertebrate magnetic sense’, *Nature*, vol. 390: 6658 (1997), pp. 371 6.

(9) M. Hanzlik, C. Heunemann, E. Holtkamp–Rotzler, M. Winklhofer, N. Petersen and G. Fleissner, ‘Superparamagnetic magnetite in the upper beak tissue of homing pigeons’, *Biometals*, vol. 13: 4 (2000), pp. 325–31.

(10) C. V. Mora, M. Davison, J. M. Wild and M. M. Walker, ‘Magneto reception and its trigeminal mediation in the homing pigeon’, *Nature*, vol. 432 (2004), pp. 508–11.

(11) C. Treiber, M. Salzer, J. Riegler, N. Edelman, C. Sugar, M. Breuss, P. Pichler, H. Cadiou, M. Saunders, M. Lythgoe, J. Shaw and D. A. Keays, ‘Clusters of iron–rich cells in the upper beak of pigeons are macrophages not magnetosensitive neurons’, *Nature*, vol. 484 (2012), pp. 367–70.

(12) S. T. Emlen, W. Wiltschko, N. J. Demong, R. Wiltschko and S. Berg man, ‘Magnetic direction finding: evidence for its use in migratory indigo buntings’, *Science*, vol. 193: 4252 (1976), pp. 505–8.

(13) L. Pollack, ‘That nest of wires we call the imagination: a history of some key scientists behind the bird compass sense’, May 2012, p. 5: http://www.ks.uiuc.edu/History/magnetoreception.

(14) Ibid., p. 6.

(15) K. Schulten, H. Staerk, A. Weller, H–J. Werner and B. Nickel, ‘Magnetic field dependence of the geminate recombination of radical ion pairs in polar solvents’, *Zeitschrift für Physikale Chemie*, n. s., vol. 101 (1976), pp. 371–90.

(16) Pollack, ‘That nest of wires we call the imagination’, p. 11.

(17) K. Schulten, C. E. Swenberg and A. Weller, ‘A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field modulated coherent electron spin motion’, *Zeitschrift für Physikale Chemie*, n.s., vol. 111 (1978), pp. 1–5.

(18) From P. Hore, ‘The quantum robin’, *Navigation News*, Oct. 2011.

(19) N. Lambert, ‘Quantum biology’, *Nature Physics*, vol. 9: 10 (2013), and references therein.

(20) M. J. M. Leask, ‘A physicochemical mechanism for magnetic field detection by migratory birds and homing pigeons’, *Nature*, vol. 267 (1977), pp. 144–5.

(21) T. Ritz, S. Adem and K. Schulten, ‘A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds’, *Biophysical Journal*, vol. 78: 2 (2000), pp. 707–18.

(22) M. Liedvogel, K. Maeda, K. Henbest, E. Schleicher, T. Simon, C. R. Timmel, P. J. Hore and H. Mouritsen, ‘Chemical magnetoreception: bird cryptochrome 1a is excited by blue light and forms long-lived radical-pairs’, *PLOS One*, vol. 2: 10 (2007), e1106.

(23) C. Nießner, S. Denzau, K. Stapput, M. Ahmad, L. Peichl, W. Wiltschko and R. Wiltschko, ‘Magnetoreception: activated cryptochrome 1a concurs with magnetic orientation in birds’, *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 10: 88 (6 Nov. 2013), 20130638.

(24) T. Ritz, P. Thalau, J. B. Phillips, R. Wiltschko and W. Wiltschko, ‘Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass’, *Nature*, vol. 429 (2004), pp. 177–80.

(25) S. Engels, N-L. Schneider, N. Lefeldt, C. M. Hein, M. Zapka, A. Mi chalik, D. Elbers, A. Kittel, P. J. Hore and H. Mouritsen, ‘Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird’, *Nature*, vol. 509 (2014), pp. 353–6.

(26) E. M. Gauger, E. Rieper, J. J. Morton, S. C. Benjamin and V. Vedral, 'Sustained quantum coherence and entanglement in the avian compass', *Physical Review Letters*, vol. 106: 4 (2011), 040503.

(27) M. Ahmad, P. Galland, T. Ritz, R. Wiltschko and W. Wiltschko, 'Mag netic intensity affects cryptochrome–dependent responses in *Arabidopsis thaliana*', *Planta*, vol. 225: 3 (2007), pp. 615–24.

(28) M. Vacha, T. Puzova and M. Kvicalova, 'Radio frequency mag–netic fields disrupt magnetoreception in American cockroach', *Journal of Experimental Biology*, vol. 212: 21 (2009), pp. 3473–7.

## الفصل السابع: الجينات الكمية

(1) Y. M. Shtarkman, Z. A. Kocer, R. Edgar, R. S. Veerapaneni, T. D'Elia, P. F. Morris and S. O. Rogers, 'Subglacial Lake Vostok (Antarctica) accretion ice contains a diverse set of sequences from aquatic, marine and sediment–inhabiting bacteria and eukarya', *PLOS One*, vol. 8: 7 (2013), e67221.

(2) J. D. Watson and F. H. C. Crick, 'Molecular structure of nucleic acids: a structure for deoxyribose nucleic acid', *Nature*, vol. 171 (1953), pp. 737–8.

(3) C. Darwin, *On the Origin of Species*, ch. 4.

(4) J. D. Watson and F. H. C. Crick, 'Genetic implications of the structure of deoxyribonucleic acid', *Nature*, vol. 171 (1953), pp. 964–9.

(5) W. Wang, H. W. Hellinga and L. S. Beese, 'Structural evidence for the rare tautomer hypothesis of spontaneous mutagenesis', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108: 43 (2011), pp. 17644–8.

(6) A. Datta and S. Jinks–Robertson, 'Association of increased spon–taneous mutation rates with high levels of transcription in yeast', *Science*, vol. 268: 5217 (1995), pp. 1616–19.

(7) J. Bachl, C. Carlson, V. Gray–Schopfer, M. Dessing and C. Olsson, 'Increased transcription levels induce higher mutation rates in a hypermutating cell line', *Journal of Immunology*, vol. 166: 8 (2001), pp. 5051–7.

(8) P. Cui, F. Ding, Q. Lin, L. Zhang, A. Li, Z. Zhang, S. Hu and J. Yu, 'Distinct contributions of replication and transcription to mutation rate variation of human genomes', *Genomics, Proteomics and Bioinformatics*, vol. 10: 1 (2012), pp. 4–10.

(9) J. Cairns, J. Overbaugh and S. Millar, 'The origin of mutants', *Nature*, vol. 335 (1988), pp. 142–5.

(10) John Cairns on Jim Watson, Cold Spring Harbor Oral History Collection. Interview available at: http://library.cshl.edu/oralhistory/interview/james–d–watson/meeting–jim–watson/watson/.

(11) J. Gribbin, *In Search of Schrödinger's Cat* (London: Wildwood House, 1984; repr. Black Swan, 2012).

(12) J. McFadden and J. Al–Khalili, 'A quantum mechanical model of adaptive mutation', *Biosystems*, vol. 50: 3 (1999), pp. 203–11.

(13) J. McFadden, *Quantum Evolution* (London: HarperCollins, 2000).

(14) A critical review is published here: http://arxiv.org/abs/quant–ph/0101019 and our response can be found here: http://arxiv.org/abs/quant–ph/0110083.

(15) H. Hendrickson, E. S. Slechta, U. Bergthorsson, D. I. Andersson and J. R. Roth, 'Amplification–mutagenesis: evidence that "directed" adaptive mutation and general hypermutability result from growth with a selected gene amplification', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99: 4 (2002), pp. 2164–9.

(16) e.g. J. D. Stumpf, A. R. Poteete and P. L. Foster, 'Amplification of *lac* cannot account for adaptive mutation to Lac+ in *Escherichia coli*', *Journal of Bacteriology*, vol. 189: 6 (2007), pp. 2291–9.

(17) e.g. E. S. Kryachko, 'The origin of spontaneous point mutations in DNA via Löwdin mechanism of proton tunneling in DNA base pairs: cure with covalent base pairing', *International Journal Of Quantum Chemistry*, vol. 90: 2 (2002), pp. 910–23; Zhen Min Zhao, Qi Ren Zhang, Chun Yuan Gao and Yi Zhong Zhuo, 'Motion of the hydrogen bond proton in cytosine and the transition between its normal and imino states', *Physics Letters A*, vol. 359: 1 (2006), pp. 10–13.

## الفصل الثامن: العقل

(1) Interview for the *Los Angeles Times*, 14 Feb. 1995.

(2) J–M. Chauvet, E. Brunel–Deschamps, C. Hillaire and J. Clottes, *Dawn of Art. The Chauvet Cave: The Oldest Known Paintings in the World* (New York: Harry N. Abrams, 1996).

(3) Quoted in J. Hadamard, *Essay on the Psychology of Invention in the Mathematical Field* (Princeton: Princeton University Press, 1945). However, according to Daniel Dennett in 'Memes and the exploitation of imagination', *Journal of Aesthetics and Art Criticism*, vol. 48 (1990), pp. 127–35 (available at http://ase.tufts.edu/cogstud/dennett/papers/memeimag.htm#5), this oft–quoted passage is probably not from Mozart and is of uncertain origin. We have nevertheless decided to retain it because its author, whoever that is, managed to describe a familiar but remarkable phenomenon very nicely.

(4) J. McFadden, 'The CEMI field theory gestalt information and the meaning of meaning', *Journal of Consciousness Studies*, vol. 20: 3–4 (2013), pp. 152–82.

(5) Chauvet et al., *Dawn of Art*.

(6) M. Kinsbourne, 'Integrated cortical field model of consciousness', in *Experimental and Theoretica Studies of Consciousness*, CIBA Foundation Symposium No. 174 (Chichester: Wiley, 2008).

(7) K. Saeedi, S. Simmons, J. Z. Salvail, P. Dluhy, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.–J. Pohl, J. J. L. Morton and M. L. W. Thewalt, 'Room–temperature quantum bit storage exceeding 29 minutes using ionized donors in silicon–28', *Science*, vol. 342: 6160 (2013), ppp. 830–33.

(8) D. Hofstadter, *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (New York: Basic Books, 1999; first publ. 1979).

(9) R. Penrose, *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness* (Oxford: Oxford University Press, 1994).

(10) S. Hameroff, 'Quantum computation in brain microtubules? The Penrose–Hameroff "Orch OR" model of consciousness', *Philosophical Transactions of the Royal Society Series A*, vol. 356: 1743 (1998), pp. 1869–95; S. Hameroff and R. Penrose, 'Consciousness in the universe: a review of the "Orch OR" theory', *Physics of Life Reviews*, vol. 11 (2014), pp. 39–78.

(11) M. Tegmark, 'Importance of quantum decoherence in brain processes', *Physical Review E*, vol. 61 (2000), pp. 4194–206.

(12) See e.g. A. Litt, C. Eliasmith, F. W. Kroon, S. Weinstein and P. Thagard, 'Is the brain a quantum computer?', *Cognitive Science*, vol. 30: 3 (2006), pp. 593–603.

(13) G. Bernroider and J. Summhammer, 'Can quantum entanglement between ion transition states effect action potential initiation?', *Cognitive Computation*, vol. 4 (2012), pp. 29–37.

(14) McFadden, *Quantum Evolution*; J. McFadden, 'Synchronous firing and its influence on the brain's electromagnetic field: evidence for an electromagnetic theory of consciousness', *Journal of Consciousness Studies*, vol. 9 (2002), pp. 23–50; S. Pockett, *The Nature of Consciousness: A Hypothesis* (Lincoln, NE: Writers Club Press, 2000); E. R. John, 'A field theory of consciousness', *Consciousness and Cognition*, vol. 10: 2 (2001), pp. 184–213; J. McFadden, 'The CEMI field theory closing the loop', *Journal of Consciousness Studies*, vol. 20: 1–2 (2013), pp. 153–68.

(15) McFadden, 'The CEMI field theory gestalt information and the meaning of meaning'.

(16) C. A. Anastassiou, R. Perin, H. Markram and C. Koch, 'Ephaptic coupling of cortical neurons', *Nature Neuroscience*, vol. 14: 2 (2011), pp. 217–23; F. Frohlich and D. A. McCormick, 'Endogenous electric fields may guide neocortical network activity', *Neuron*, vol. 67: 1 (2010), pp. 129–43.

(17) McFadden, 'The CEMI field theory closing the loop'.

(18) W. Singer, 'Consciousness and the structure of neuronal representations', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 353: 1377 (1998), pp. 1829–40.

## الفصل التاسع: كيف بدأت الحياة؟

(1) S. L. Miller, 'A production of amino acids under possible primitive earth conditions', *Science*, vol. 117: 3046 (1953), pp. 528–9.

(2) G. Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life: A Scientific Detective Story* (Cambridge: Cambridge University Press, 1985; new edn 1990).

(3) McFadden, *Quantum Evolution*; J. McFadden and J. Al-Khalili, 'Quan- tum coherence and the search for the first replicator', in D. Abbott, P. C. Davies and A. K. Patki, eds, *Quantum Aspects of Life* (London: Imperial College Press, 2008).

(4) A. Patel, 'Quantum algorithms and the genetic code', *Pram ana Journal of Physics*, vol. 56 (2001), pp. 367–81; available at http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0002037.pdf.

## الفصل العاشر: علم الأحياء الكمي: الحياة على حافةِ عاصفة

(1) M. B. Plenio and S. F. Huelga, 'Dephasing-assisted transport: quantum networks and biomolecules', *New Journal of Physics*, vol. 10 (2008),

113019; F. Caruso, A. W. Chin, A. Datta, S. F. Huelga and M. B. Plenio, 'Highly efficient energy excitation transfer in light–harvesting complexes: the fundamental role of noise–assisted transport', *Journal of Chemical Physics*, vol. 131 (2009), 105106–21.

(2) M. Mohseni, P. Rebentrost, S. Lloyd and A. Aspuru–Guzik, 'Environment–assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer', *Journal of Chemical Physics*, vol. 129: 17 (2008), 174106.

(3) B. Misra and G. Sudarshan, 'The Zeno paradox in quantum theory', *Journal of Mathematical Physics*, vol. 18 (1977), p. 746: http://dx.doi.org/10.1063/1.523304.

(4) S. Lloyd, M. Mohseni, A. Shabani and H. Rabitz, 'The quantum Goldilocks effect: on the convergence of timescales in quantum transport', arXiv preprint, arXiv:1111.4982, 2011.

(5) A. W. Chin, S. F. Huelga and M. B. Plenio, 'Coherence and decoherence in biological systems: principles of noise–assisted transport and the origin of long–lived coherences', *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 370 (2012), pp. 3658–71; A. W. Chin, J. Prior, R. Rosenbach, F. Caycedo–Soler, S. F. Huelga and M. B. Plenio, 'The role of non–equilibrium vibrational structures in electronic coherence and recoherence in pigment–protein complexes', *Nature Physics*, vol. 9: 2 (2013), pp. 113–18.

(6) E. J. O'Reilly and A. Olaya–Castro, 'Non–classicality of molecular vibrations activating electronic dynamics at room temperature', *Nature Communications*, vol. 5 (2014), article no. 3012.

(7) I. Stewart, *Does God Play Dice?: The New Mathematics of Chaos* (Harmondsworth: Penguin UK, 1997); S. Kauffman. *The Origins of Order: Self–Organization and Selection in Evolution* (New York: Oxford University Press, 1993); J. Gleick, *Chaos: Making a New Science* (New York: Random House, 1997).

(8) M. O. Scully, K. R. Chapin, K. E. Dorfman, M. B. Kim and A. Svidzinsky, 'Quantum heat engine power can be increased by noise–induced coherence', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108: 37 (2011), pp. 15097–100.

(9) K. E. Dorfman, D. V. Voronine, S. Mukamel and M. O. Scully, 'Photosynthetic reaction center as a quantum heat engine', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110: 8 (2013), pp. 2746–51.

(10) M. Ferretti, V. I. Novoderezhkin, E. Romero, R. Augulis, A. Pandit, D. Zigmantas and R. Van Grondelle, 'The nature of coherences in the B820 bacteriochlorophyll dimer revealed by two–dimensional electronic spectroscopy', *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 16 (2014), pp. 9930–9.

(11) C. R. Pudney, A. Guerriero, N. J. Baxter, L. O. Johannissen, J. P. Waltho, Hay and N. S. Scrutton, 'Fast protein motions are coupled to enzyme H–transfer reactions', *Journal of the American Chemical Society*, vol. 135 (2013), pp. 2512–17.

(12) J. P. Klinman and A. Kohen,'Hydrogen tunnelling links protein dynam– ics to enzyme catalysis', *Annual Review of Biochemistry*, vol. 82 (2013), pp. 471–96.

(13) R. Armstrong and N. Spiller, 'Living quarters', *Nature*, vol. 467 (2010), pp. 916–19.

(14) S. Ludec, *The Mechanism of Life* (London: William Heinemann, 1914).

(15) T. Toyota, N. Maru, M. M. Hanczyc, T. Ikegami and T. Sugawara, 'Self–propelled oil droplets consuming "fuel" surfactant', *Journal of the American Chemical Society*, vol. 131: 14 (2009), pp. 5012–13.

(16) I. A. Chen, K. Salehi–Ashtiani and J. W. Szostak, 'RNA catalysis in model protocell vesicles', *Journal of the American Chemical Society*, vol. 127: 38 (2005), pp. 13213–19.

(17) R. J. Peters, M. Marguet, S. Marais, M. W. Fraaije, J. C. van Hest and Lecommandoux, 'Cascade reactions in multicompartmentalized polymersomes'. *Angewandte Chemie International Edition* (English), vol. 53: 1 (2014), pp. 146–50.

(18) D. Hayes, G. B. Griffin and G. S. Engel, 'Engineering coherence among excited states in synthetic heterodimer systems', *Science*, vol. 340: 6139 (2013), pp. 1431–4.

(19) Dorfman et al.,'Photosynthetic reaction center as a quantum heat engine'.

(20) C. Creatore, M. A. Parker, S. Emmott and A. W. Chin, 'An efficient biologically-inspired photocell enhanced by quantum coherence', arXiv preprint, arXiv:1307.5093, 2013.

(21) C. Tan, S. Saurabh, M. P. Bruchez, R. Schwartz and P. Leduc, 'Molecular crowding shapes gene expression in synthetic cellular nanosystems', *Nature Nanotechnology*, vol. 8: 8 (2013), pp. 602–8; M. S. Cheung, D. Klimov and D. Thirumalai, 'Molecular crowding enhances native state stability and refolding rates of globular proteins', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102: 13 (2005), pp. 4753–8.

هنـــداوي