1

أحجية شرودينجر

«الأفضل معرفة بعض الأسئلة من معرفة جميع الأجوبة».

جيمس ثوربر

في خريف سنة 1938، بدأ أدولف هتلر احتلاله لأوربا بضم جارته النمسا. كانت النازية قد غرست جذوراً عميقة في النمسا وهتف الجمهور بالتحية بينما كانت القوات الألمانية تتقدم نحو فيينا، لكن ما بقي من نخبة البلاد الثقافية والفكرية تبعثر في الفرار. كان من بين من ترك نجاته لآخر لحظة إيروين شرودينجر، أحد رواد ميكانيكا الكم وكبير علماء الفيزياء في النمسا. وجد شرودينجر نعيمه في معهد الدراسات المتقدمة في كلية الثالوث في دوبلن، حيث تطلب منه عقده أن يقدم سلسلة من المحاضرات العامة. اختار أن يتحدث عن نظرة عالم الفيزياء للحياة ونشر المحاضرات سنة 1944 على شكل مجلد مرح صغير عنوانه ما هي الحياة؟ (1). ثبت أن هذا الكتاب عمل ضخم مؤثر جذب الطلاب والعلماء الصغار إلى علم الأحياء الجديد. لقد قرأت الكتاب قبل تخرجي، وفهمت أسهل أقسامه وأتذكر إلى الآن تلك المواجهة التي مضى عليها حوالي نصف قرن من الزمن.

إن قراءة شرودينجر اليوم، مع ميزة معرفة ما الذي جاء بعده تجعلك تتساءل أين تكمن جاذبية الكتاب. علق ماكس بيروتس، الذي خيب أمله عجز المحتوى العلمي للكتاب، بحدة أن « معظم ما كان صحيحاً في هذا الكتاب لم يكن أصيلاً، ومعظم ما كان أصيلاً كان معلوماً أنه غير صحيح حتى عندما كتب»(1). ذلك صحيح فعلاً، لكن الكتاب موجه لعامة الجمهور، ولقد نجح بشكل مثير للإعجاب كبيان للعصر الجديد. لقد تمركز الكتاب حول موضوعين سيطرا على الأبحاث ثلاثين سنة لاحقة، طبيعة الجينة وعلم الطاقة في نظام الأحياء؛ لقد وضع شرودينجر برنامجاً لعلم الأحياء الجديد. إضافة إلى ذلك، فقد طرح عنوان الكتاب السؤال الحاسم. بالتأكيد، إن طبيعة الحياة ليست موضوعاً يستطيع العلم التجريبي أن يعالجه بشكل مباشر، لكنها موضوع شغل الفلاسفة الطبيعيين وحيرهم آلاف السنين. وضع شرودينجر طبيعة الجينة في صميم اللغز وجادل بأن الوراثة والتكاثر الحيوي، اللذين يبدوان بأنهما يتحديان قوانين الفيزياء المعروفة، يمكن احتواءهما ضمن إطار عمل أوسع. على عكس معظم المبادئ الفيزيائية، التي اشتقت من وسطي سلوك عدد كبير من الجسيمات الدقيقة، فإن الوراثة يجب أن تعكس الصفات الفريدة لجزيء أو جزيئين كبيرين منفردين. شبه شرودينجر هذه الجزيئات «بالبلورات اللادورية»، التي يمكنها أن تحتوي على «صك شفرة» لأن كل مجموعة من الذرات تلعب دوراً منفرداً لا يكافئ تماماً دور أية مجموعة أخرى. كانت الفكرة، لكن ليست اللغة، قد قدمت بالأساس من قبل عالم فيزياء شاب اسمه ماكس ديلبروك، وكان أحد أهداف شرودينجر هو أن يعطي بصيرة ديلبروك سماعاً أوسع. آذنت «البلورات اللادورية» و«صك الشيفرة» باكتشاف بنية وعمل الحمض الريبي النووي منقوص الأكسجين الـ «د.ن.أ DNA»، وهو الجزيء الذي يحمل رموز المعلومات الوراثية، التي لم يكن دورها المركزي قد عرف بعد. لكن الوقت كان جاهزاً. بانتهاء الحرب، شغف عدد من العلماء الصغار (ليس كلهم بأي

حال من الأحوال) بأن يحولوا مواهبهم لاستعمالات نبيلة، واستجابوا ببهجة إلى تحدي شرودينجر بإحضار دراسة العضويات الحية ضمن دائرة الفيزياء والكيمياء. ترسخت جذور المبدأ الأساسي بأن الحياة، مع أنها معقدة، شيء منطقي وقابل للفهم، ويؤكد ذلك بالنجاح الهائل لبرنامج شرودينجر.

كتب شرودينجر في بداية عصر غير اعتيادي في علوم الأحياء، عصر انفجار ضخم ألقى ضوءاً ساطعاً على الأسس الفيزيائية والكيميائية للحياة. ربما كان على المرء أن يعيش في فترة تلك الثورة ليدرك كم حولت بشكل جذري مفهومنا عما يعنيه علم الأحياء. كان علم الأحياء في الأربعينات مركزاً بشكل أساسي على الكائنات الحية، ومنفصلاً تماماً عن العلوم الفيزيائية. كانت الأبحاث على مكونات الجزيئات قد بدأت لتوها بشحذ قواها، وكانت طبيعة الجزيئات بالخاصة موضوع شك ونقاش. بعد ثلاثين سنة، بدا أن علم الأحياء قد قطع شوطاً طويلاً لأن يصبح منطقة من مناطق علم الكيمياء. بحلول سنة 1975، صارت مهمة تحديد بنية الجزيئات مهمة شاقة لكنها روتينية، وبدأت تظهر بانتظام أشكال ثلاثية الأبعاد للجزيئات. حُللت الطرق التي تُنتج فيها الجزيئات الحيوية الأساسية وأصبحت معروفة. استمرت الأنزيمات في تحدي الخيال الكيميائي، ولكن توضحت الطريقة التي تضمن فيها الأنزيمات المعدل العالي للعمليات الكيمائية الحيوية ودقتها. اكتشف علماء الكيمياء الحيوية، المبادئ، وإن لم يكتشفوا التفاصيل، التي تحصل فيها العضويات الحية على الطاقة وتسخرها لأداء العمل. لكن أكثر الإنجازات روعة كان حل المشكلة التي اعتبرها شرودينجر مركزية، وهي طبيعة الجينات. أدى ذلك بسرعة إلى اكتشاف القواعد التي تحكم تضاعف الجينات، ونقلها، والتعبير عن المعلومات الوراثية. كانت تلك أياماً عنيفة، أعادها هـ. ف. جدسون بشكل رائع في كتابه اليوم الثامن من الخلق (2). تبقى حتى اليوم مشاكل لم تحل في جميع تلك المناطق، لكننا نراها كأحاجي لا كأسرار غامضة. نفهم اليوم بشكل واسع كيف تجري المادة

والطاقة والمعلومات عبر العضويات الحية؛ تنتصب الكتب المرجعية الغزيرة التي سجلت فيها هذه المعلومات كنصب شامخ للإنجازات التي ليس لها إلاّ القليل من النظير في تاريخ العلم.

هل نستطيع إذاً أن نقول إن أحجية الحياة قد حلت ـ أو أنها ستحل قريباً، وهي تنتظر فقط بعض التفاصيل القليلة البارزة؟ إن من يعتقدون أن هدف البحث هو اكتشاف الآليات الفيزيائية والكيميائية التي تكمن خلف عملية الأحياء الكونية قد يميلون إلى هز رؤوسهم بالموافقة. لكن كل من يعرف المخلوقات الحية سوف يعترض بأن الخلاصة الوافية عن الجزيئات والآليات تُسقط ذات الخصوصيات التي يشعر بها المرء بديهة عما تعنيه «الحياة». لا شك بأن الحل المرضي لأحجية شرودينجر يجب أن يتكلم عن الخلايا، تلك الوحدات الشاملة التي وضعت فيها ظاهرة الحياة. ويجب أن يتطرق لأنواع الملاحظات التي اهتم بها علم الأحياء بشكل تقليدي: الشكل، والأفعال التي تخدم البنية، وسلوك البحث عن الهدف، والتكاثر، والتأقلم. يجب على الحل باختصار، أن يحيط علماً بالعضويات في جميع تعقيداتها، وميزاتها الفردية، وتنوعها. يستحق الفيزيائيون والكيميائيون أن يفخروا كل الفخر بإنجازاتهم. لكن يحق لعلماء الأحياء التقليديين أيضاً أن يشيروا إلى كم لا يزال يجب أن يُشرح، وأن يتساءلوا ما إذا كنا بهجرنا العضوية لبحث جزيئاتها، قد نسينا ماذا كان السؤال في الأصل.

تختلف الأسئلة المفتوحة حول عمل، وسلوك، ونشاطات العضويات في درجتها، وربما في نوعها، عن المعضلات التي كانت تحل برضى شديد في الأيام السهلة لعلم الأحياء الجزيئي. إن الآليات الكيميائية الحيوية، وبنية الـ «د.ن.أ DNA»، وحتى تضاعف ونقل المعلومات الوراثية بسيطة ـ ليس من حيث سهولة اكتشافها، ولكن من حيث أنها تشمل عدداً محدوداً من التفاعلات. الأكثر من ذلك هو أن البنيات والتفاعلات خطية بكل معنى الكلمة: إن جملة «الـ «د.ن.أ DNA» يصنع الـ «ر.ن.أ RNA» الذي يصنع

البروتين» تصف نقل مجموعة خطية واحدة من الرموز إلى مجموعة أخرى. لكننا عندما نبحث كيف تزحف المتحولة، أو كيف تنمو خلية الخمائر ويتبرعم منها خلية بنت، فإن الظاهرة تصبح أعقد بكثير. تعتمد أفعال العضويات الحية تقليدياً على تناسق عمل ملايين من الجزيئات، التي تنتمي إلى مئات أو حتى ألوف من الأنواع المختلفة، نظمت في تسلسل هرمي من عوامل التحكم. إن عدداً قليلاً فقط من هذه الجزيئات حر في المحاليل. على العكس من ذلك، فإن الكثير منها تجمع أولاً في منشآت محكمة تقاس أبعادها بالميكرومتر أو حتى بالميليمتر، وهي وحدات قياس أعظم من وحدات الجزيئات المنفردة، وتظهر أفعالها المجتمعة بشكل مميز اتجاهاً في الفراغ. تؤكد هذه المظاهر ما سماه وارين ويفر، في مقالة أخرى لمحاضرة في الأربعينيات (3)، مشكلة التعقيد المنتظم. يستوجب الحل المرضي لأحجية الحياة تفسيراً منطقياً للتنظيم الحيوي، ولا يزال علينا أن نحقق ذلك.

فكر ويفر في أنه يجب على العلم خلال الخمسين سنة التالية أن يناقش أسئلة مثل «ما الذي يجعل زهرة الربيع تتفتح في الوقت الذي تتفتح فيه؟» ونحن نناقش الآن هذه الأسئلة. لدينا أسباب عديدة تجعلنا نعتقد أن كل ظاهرة أحيائية، مهما كانت معقدة، تبنى في النهاية على التفاعلات الكيمائية والفيزيائية بين الجزيئات. باتخاذ هذا المبدأ نقطة انطلاق، تبذل حالياً جهود شديدة لفهم كيف و متى تتفتح الأزهار (وكيف تزحف المتحولة وتتبرعم الخمائر)، بتحديد الجزيئات المعنية ووصف كيف تتداخل مع بعضها البعض. نجح الكثير من هذه المشاريع، وكان نجاح بعضها باهراً، ومكّننا ذلك من وضع شرح ميكانيكي لعدد متزايد من الظواهر الأحيائية. إن تقلص العضلات مثال واضح: يمكننا أن نشرح بطريقة كاملة ومرضية كيف تعمل الآلة العضلية، باعتبار أن العناصر الجزيئية قد رتبت في إطار بنيوي تم كشفه بالمجهر الضوئي. لكن ليس من الواضح أبداً أننا نستطيع أن نجيب على سؤال ويفر بالتقدير الاستقرائي من الأقسام الجزيئية للعمل ككل. لو كنا نعلم

البنية الكيميائية لكل جزيء عضلي، وفهمنا التفاعلات الكيميائية، فهل سيكفي ذلك لأن نحدد كيف تتناسق هذه الجزيئات في الزمان والمكان لتنتج عضلة عاملة؟

هذا في الواقع لغز فلسفي حقيقي، إحدى صيغ السؤال هي ما إذا كان يمكن لعلم الأحياء في النهاية أن «يقلص» إلى الكيمياء والفيزياء أم هل هو علم ذاتي له مبادئه الخاصة. سوف أعود لهذا الموضوع أكثر من مرة في الفصول اللاحقة، لكن لغرضنا الحالي فإن الجواب ببساطة هو أنه يوجد في الحياة أكثر من مجرد آليات جزيئية (4). لا يمكن أن نعرف من كيمياء الجزيئات الكبيرة ومن التفاعلات التي تحفزها، سوى القليل عن تناسقها في الأفعال الفيزيولوجية على المستوى الخليوي، ولا يمكن أن نعرف أي شيء على الإطلاق عن شكل أو تطور هذه الخلايا. لذلك يبدو لي أنه من الواضح أنه لايمكن أن يجرى البحث عن طبيعة الحياة فقط في الأفق الكيميائي. يجب علينا أيضاً أن نبحث في كيفية ترتيب الجزيئات في بنيات أكبر، وكيف ينشأ الاتجاه والعمل والشكل، وكيف تتجمع الأجزاء لتشكل الكل. إضافة إلى ذلك، يجب علينا ألاّ ننسى أن الجزيئات، والخلايا، والعضويات مخلوقات من التاريخ، جاءت حصيلة للصدف والضرورات. لا يمكن أن يكون هناك جواب بسيط عن سؤال ما هي الحياة؟ إن السؤال دعوة لاستكشاف المستويات المتتابعة من الحقيقة الأحيائية، وإن أية محاضرة عن علم الأحياء الجزيئي ليست في طبيعتها أكثر (ولا أقل) توضيحاً من مشي عبر الغابات في وقت الربيع.

طرح إيروين تشارغاف نفس النقطة منذ عدة سنوات، في واحدة من أكثر السير الذاتية التي كتبها عالم بصيرة (وإثارة للقلق)(5). «يبنى فهمنا للعالم من مستويات لا حصر لها. يستحق كل مستوى الاستكشاف، طالما أننا لا ننسى أنه مستوى من بين عدة مستويات. إن معرفة كل ما يمكن معرفته عن مستوى واحد ـ وهو شيء لن يحصل في الغالب ـ لن يعلمنا الكثير عن

المستويات الأخرى». في المرة القادمة التي تسافر فيها بالطائرة، فكر في جناح الطائرة. لقد صمم لكي يحقق الرفع، وتقوم أقسامه المكوّنة بذلك الفعل: يمكن للميكانيكي الماهر، المزود بصفائح من الألمنيوم وعلبة من مسامير البرشام ومخطط الجناح، أن يصنع جناحاً يمكن استعماله، لكن هل يمكنه أن يستخلص مبادئ الديناميكا الهوائية للطيران من نسخ الجناح؟ بنفس الطريقة، لم يكن ممكناً التنبؤ بقوانين ماندل من بينة الـ «د.ن.أ DNA»، أو حتى من بنية الصبغيات؛ في الواقع، ليس لهذه القوانين مغزى إلاّ في إطار الخلايا والانقسام. إن الحاجة لمعرفة الأجزاء لكي نفهم الكل تجربة شائعة، لكن من النادر أن نستطيع التنبؤ بصفات الكل من صفات الأجزاء لوحدها. هذا ما يقصد بالقول القديم بأن الكل أكبر من مجموع أجزائه. لذلك أجد أنه لا يمكن تصديق أن أشكال الخلايا وعملها (ناهيك عن تفتح أزهار ويفر) يمكن أن يتم التنبؤ به من معرفة مكوناتها الجزيئية فقط، مهما كانت هذه المعرفة شاملة. سيكون من الخطأ الفادح أن ندفع جانباً المستويات الأعلى من النظام الأحيائي كما لو أنها كانت ثانوية أو مشتقة؛ على العكس من ذلك، فإن الكيفية التي تتجمع فيها الأجزاء مع بعضها يجب أن تكون مفتاحاً لأي بحث في طبيعة الحياة.

أحس شرودينجر بذلك، وخصص الصفحات الأخيرة من كتابه الصغير النحيل لمشكلة النظام الأحيائي. يبدو التنظيم المتقن لكل خلية وعضوية وكأنه يتعارض مع القانون الثاني للميكانيكا الحرارية، التي تصر على أن الميل العام للعمليات الفيزيائية هو تشتيت النظام وإحداث الطاقة غير المستفادة، وهي مقياس عدم الانتظام. عزا شرودينجر القدرة الخارقة للأشياء الحية على توليد حالتها المنتظمة والحفاظ عليها وتكاثرها إلى استخلاص «الطاقة غير المستفادة السلبية» من البيئة. أما اليوم، فإننا باتباع هارولد موروفيتس (6)، نصيغ العبارة بطريقة مختلفة بقولنا إن العضويات الحية تستخلص الطاقة من البيئة، وتستعملها لتقوم بكل أشكال الأعمال الفيزيائية والكيميائية، وبذلك

تحول الطاقة إلى تنظيم. لا تعارض الحياة القانون الثاني؛ إنها تتجنبها. لكن المشكلة تبقى في أن الموجودات التي تستطيع تحويل الطاقة إلى تنظيم لا يمكن أن نتنبأ بها من القوانين التي وضعتها الفيزياء التقليدية. أبدى ذلك لشرودينجر أن العضويات تقع خارج الفيزياء في بعض المظاهر الهامة؛ أو أن الفيزياء تحتوي على أسس أخرى لها صلة بالأنظمة العضوية، وهي لا تزال بحاجة لأن تكتشف.

هل نستطيع أن نتبين أية مبادئ لنظام أعلى نحتاج إليها للفهم الجوهري للحياة؟ يقفز أحدها على الأقل إلى ذهننا: مبدأ داروين في التطور بالتنوع العشوائي والانتقاء الطبيعي. لقد شكّل هذا المبدأ الجزيئات قدر ما شكّل العضويات، ولا يمكن شرح الحياة بدونه. للتأكيد، فإن الآليات التي تكمن خلف التطور، مثل الآليات التي تكمن وراء الوراثة أو علم الطاقة، تعمل على مستوى الجزيئات، وتقلد بعض الآليات الجزيئية التي تشمل على التنوع العشوائي والانتقاء بين الجزيئات الكبيرة التطور الأحيائي. لكنني أشك في أن التطور بالانتقاء الطبيعي كان سيستنتج من علم الجزيئات، لو أن داروين عاش ليراه؛ وها هو تعميم آخر لا يجد معناه الكامل إلاّ في مضمون العضويات. قد تكون هناك أمثلة أخرى، مثل الافتراض الذي يخمن بأن منشأ الأشكال الأحيائية يجب أن يبحث عنه في التنظيم الذاتي العفوي للأنظمة الفيزيائية التي تتعرض لدفقة من الطاقة. اعتبر شرودينجر، من بين آخرين، أن «المادة الحية، بينما لا تتملص من «قوانين الفيزياء» التي أثبتت حتى الآن، تشمل على الغالب «قوانين أخرى للفيزياء»، غير معروفة حتى اليوم. لكن ما أن تكتشف هذه القوانين، فإنها ستكون جزءاً حميماً من العلم كما هي حال القوانين الأخرى»[1]. نتلمس هنا الأفكار الرئيسية لعلم الأحياء المستقبلي، الذي سنعود إليه أكثر من مرة.

النظام، التعقيد، التنظيم، الوظيفة: هذه الأسماء التي تبدو مألوفة بشكل مخادع تشير إلى طريق الجبهات الفكرية العالية لعلم الأحياء. يجب

على المستكشفين الذين يسافرون في البراري أن يضعوا ثقتهم لا في علم الأحياء الجزيئي فحسب، بل بعلم الفزيولوجيا ـ علم الأنظمة المعقدة. نحن نعلم جميعاً في باطننا بأن الخلية أكثر من مجرد تجمع للجزيئات المنفردة؛ إنها كلٌ مرتب، ومنظم، ذو هدف وتطور. لسوء الحظ، فإن طرق التحليل تقتضي بأن نبدأ أبحاثنا بهرس البنية المتقنة للخلية الحية إلى أن تصبح عجينة. لا عجب إذاً أن المنظور المتكامل غائب بشكل مفجع من النظرة الجزيئية للحياة بالشكل الذي تطورت فيه خلال نصف القرن الماضي.

إذاً ما هي الحياة؟ لا يزال السؤال وجيهاً كما كان من قبل. على الرغم من عقود من التقدم المذهل، فإن الطبيعة الجوهرية للحياة لا تزال تتملص منا. نحن نعلم الكثير ونشرح أكثر، لكن المرء يشك أحياناً بأن قدرتنا على الشرح قد تجاوزت فهمنا. وعندما نعيد اختراع الفزيولوجيا، ونتقن تنظيم الذات وننقب الصخور بحثاً عن آثار الخلق في المستحاثات ـ فهل سنحل عندها أحجية شرودينجر؟ ربما لا. لكننا سنحصل على وعي أفضل للمبادئ الأساسية لعلم الحياة، قواعد علم الأحياء التي كتب إيروين تشارغاف يوماً مقدمة بارزة عنها[5]. بأسوأ الأحوال، يجب أن نرى بشكل أوضح ما الذي تعنيه الأحجية، وما هي أفضل طريقة للتفكر بها.