مقدمة قصيرة جدًّا

جون فيني

الماء

ترجمة عبد الفتاح عبد الله

الماء

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
جون فيني

ترجمة
عبد الفتاح عبد الله

مراجعة
شيماء طه الريدي

هنـــداوي

الماء

جون فيني

Water

John Finney

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

يورك هاوس، شييت ستريت، ونـدسور، 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: ٧ ٣٦٧٩ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠١٥.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٤.

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

Copyright © John Finney 2015. *Water: A Very Short Introduction* was originally published in English in 2015. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Hindawi Foundation is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

المحتويات

شكر وتقدير	٩
تمهيد	١١
١- الماء، الماء في كل مكان ...	١٣
٢- جزيء الماء وتفاعلاته	٢٥
٣- الماء في حالة الجليد	٣٥
٤- الماء كسائل وكزجاج	٥٥
٥- تفسير حالات شذوذ الماء	٨٣
٦- الماء باعتباره جزيئًا حيويًّا	٩٧
٧- بعض الجدالات السابقة والراهنة	١١٧
قراءات إضافية	١٣١
قائمة الصور	١٣٥

تكريمًا لذكرى روجر ستون (١٩١١–١٩٧٩)
وديزموند بيرنال (١٩٠١–١٩٧١).

شكر وتقدير

يدين جميع العلماء للكثيرين الذين عملوا أو ناقشوا الأفكار معهم؛ لذا من المستحيل توجيه الشكر والتقدير لكل من ساهم بطريقةٍ ما في أي عمل.

غير أنني أمتنُّ بصورة خاصة لأوستن أنجيل، فيل بول، بول بارنز، جيريمي بوم، جون بوكيير، دانيال بورون، جراهام بوشنيل-واي، إيان تشيري، روي دانيال، بابلو ديبيندیتي، جون إندربي، مايكل فوك، فيليكس فرانكس، ألفونس جايجر، جوليا جودفيلو، دوسان هادزي، أندرياس هالبروكر، بيرتيل هال، كيرستي هيرمانسون، فيرنر كوس، موجنس ليمان، تيري ليلي، بيتر ليندلي، كولين لوبان، توماس لورتينج، ديفيد لوندونو، ألان ماكاي، دومينيك ماركس، بيلجانا مينتشيفا-تشوكاروفا، جورج نيلسون، إيفار أولوفسون، فيل بول، جون كوين، باولو رادايلي، فاليري ريات، كريستوف سالزمان، هيو سافيدج، فرانشيسكو سكيورتينو، نيل سكيبر، جيريمي سميث، ألان سوبر، روبن سبيدي، جين ستانلي، بيتر تيمينز، جاكي تيرنر، روبرت ويتورث وجو زاكاي، والذين لولاهم لفقدَ هذا الكتاب أشياء في غاية الأهمية. أما الأخطاء كلها فهي بالطبع مني أنا.

تمهيد

قد يكون للأحداث الصغيرة التي لا تبدو مهمةً تداعيات كبيرة. وفي حالتي، كان هذا الحدث تعليقًا غيَّر حياتي، ولولاه ما كنت لأعكف على هذه «المقدمة القصيرة جدًّا».

في الخمسينيات، كان فصلي المدرسي «يدرس» الأجسام الصلبة والسوائل والغازات مع معلم الفيزياء روجر ستون. كان هناك الكثير من المعلومات حول الغازات والأجسام الصلبة، لكننا لم نتناول دراسة السوائل. «من فضلك يا سيدي. ماذا عن السوائل؟» «هذا سؤال مُثير للاهتمام بالفعل يا فيني! السوائل معقَّدة جدًّا. لكن هناك رجل في كلية بركبيك في لندن يُحاول أن يفعل شيئًا حيالها.» ثم رن الجرس معلنًا نهاية الحصة.

بعد بضع سنوات، وبمجرد حصولي على شهادتي الجامعية في الفيزياء، وأتساءل إذا كان عليَّ السعي لاقتحام المجال البحثي، برزَتْ أمامي هذه التعليقات مرةً أخرى. لذا أرسلتُ رسالة إلى ذلك «الرجل في كلية بركبيك». وأعقب ذلك مقابلة شائقة، غير رسمية تمامًا، وانتهى الأمر بي بالعمل مع ديزموند بيرنال على «محاولة فعل شيء حيال» السوائل.

قبل نصف قرن، لم نكن نفهم حقًّا كيف تنتظِم الجزيئات في السوائل. لم تكن لدَينا فكرة واضحة عن طبيعة بنياتها؛ إذ كان يُعتقد في الغالب أنها إما أجسام صلبة بلورية مُضطربة، وإما غازات كثيفة. أما الآن، وبفضل التقدُّم في التقنيات التجريبية، مثل تشتُّت النيوترونات، وتشتُّت الأشعة السينية، والمدعومة بحوسبة عالية القدرة، صِرنا نعرف الكثير عن بِنى وخصائص السوائل البسيطة، وأيضًا السوائل المُثيرة للاهتمام والأشد تعقيدًا، مثل الماء الذي تقوم عليه حياتنا.

في هذا الكتاب، أحاول أن أقدم السمات البنيوية الأساسية للماء التي تُعطي أطواره السائلة والصلبة والغازية الخصائص التي تتمتع بها، وأتطرَّق أيضًا إلى بعضٍ من المجالات

العديدة التي تُشكِّل فيها هذه الخصائص أهميةً في مجالات مختلفة من العلوم. لكن لا يزال هناك أشياء لم نتوصَّل إلى فهمٍ كامل لها بعد. لقد كشف الماء عن بعض «أسراره». لكن لا يزال هناك الكثير يتعين القيام به قبل أن نستطيع القول بأن لدَينا فهمًا كاملًا للماء.

الفصل الأول

الماء، الماء في كل مكان ...

الهيدروجين والهيليوم والأكسجين هي العناصر الأكثر وفرة في الكون. لذا، فبالنظر إلى كون الهيليوم بالأساس عنصرًا غير نشط كيميائيًّا (فهو لا يُطلَق عليه صفة خامل اعتباطًا)، فليس من المُستغرَب أن يكون هناك الكثير من الماء H_2O. نحن نعلم أن هناك كثيرًا منه على الأرض على شكل سائل، وجليد، وبخار؛ فالماء، في الواقع، هو المركب الأكثر وفرة على سطح الأرض. ولكن على مستوى الكون كَكُل، هو واحد من أكثر الجزيئات شيوعًا بعد الهيدروجين H_2 نفسه. فهو لا يوجد فقط في هيئة غاز في الفضاء البين نجمي، وجليد على بعض الكواكب والأقمار الأخرى في نظامنا الشمسي، ولكن أيضًا في غلاف بعض النجوم، بما في ذلك شمسنا. كما يُوجَد بوفرة في شكل جليد صُلب مُتكثف أو متراكم على حبيبات الغبار، في الكويكبات والنيازك، وفي لبِّ المذنَّبات التي تزورنا من وقتٍ إلى آخر.

كيف نشأ الماء من الانفجار الكبير وكيف وصل إلى الأرض؟ نحن واثقون تمامًا أن بإمكاننا الإجابة عن السؤال الأول. لكننا لا نزال في جدلٍ حول الثاني. يُعتقَد أنه بعد أقل من دقيقتَين من الانفجار الكبير، كانت الحرارة مُنخفضة كفاية — بلغت نحو ثلاثة مليارات درجة مئوية — بما سمح للبروتونات (نوية الهيدروجين) والنيوترونات بالتجمع معًا لتشكيل نوي العناصر الأخف، وهي الهيليوم، والليثيوم، والبورون. بمجرد انخفاض الحرارة إلى نحو ٤٠٠٠ درجة مئوية، كانت النوي قادرة على الإمساك بالإلكترونات والاحتفاظ بها، وهكذا تشكَّلت ذرات الهيدروجين وهذه العناصر الثلاثة الأخرى. وقد مهَّد ذلك الطريقَ لتكوين عناصر الكون كما نعرفها اليوم؛ إذ يتألف نحو ثلاثة أرباعه من الهيدروجين، ونحو ربعه من الهيليوم، في حين يُشكل كل عنصر آخر من ١ إلى ٢ في المائة فقط من الإجمالي.

ولكن أين الأكسجين؟

كان علينا الانتظار وقتًا طويلًا جدًّا حتى يظهر الأكسجين. حين كانت المادة التي نتجت عن الانفجار الكبير في حالتها الغازية، كانت هناك أجزاء منها ترتفع فيها كثافة الغاز قليلًا. ثم مارست الجاذبية تأثيرها، مما أدى إلى تَكثُّفه في صورة «تكتلات» من المادة التي شكلت في النهاية النجوم. داخل هذه الأفران النووية النجمية، اندمجت نُويات الهيدروجين معًا لتشكيل الهيليوم. وأدت عمليات اندماج أخرى إلى تكوين عناصر أثقل مثل الكربون والأكسجين، ولكن للأسف تكوَّنت النظائر O^{15} فقط، والتي تتكون من ٨ بروتونات (التي تُحدِّد العنصر)، بالإضافة إلى 7 نيوترونات. ويُعتبَر النظير O^{15} نظيرًا نادرًا من الأكسجين، أما النظائر التي تُوجَد بصورةٍ أكثر تواترًا، فهي O^{16}، O^{17}، O^{18} (وتحتوي على ٨، و٩، و١٠ نيوترونات على التوالي). ومن المُثير للاهتمام أنه لم تُكتشف عملية «تخليق نووي» يمكنها إنتاج نظائر الأكسجين الأكثر شيوعًا هذه إلا في عام ١٩٥٧.

يستمر النجم في «الاحتراق» حتى يستنفد كل «وقوده النووي». بعدها يُصبح لبُّه غير مستقر؛ إذ ينهار تحت تأثير قوة جاذبيته، مما يؤدي إلى انفجارٍ ضخم، يُعرَف بالمستعر الأعظم. تكون طاقة هذا الحدث كبيرة لدرجة أنها تُحفز عملياتٍ تخليق نووي جديدة، ينتج عنها عناصر ثقيلة، مثل اليورانيوم والثوريوم. بعد ذلك يتشتَّت كل الحطام — الذي يحتوي تقريبًا على كل العناصر الموجودة في الجدول الدوري — في الفراغ الكائن بين النجوم.

إذا نظرنا إلى الفضاء، نجد نتائج هذه الانفجارات العظيمة وما فعله الزمن بها بعد ذلك، على سبيل المثال في السُّحب الجزيئية الضخمة التي يُمكننا رصدها بواسطة تلسكوب جيد. وبالإضافة إلى الهيدروجين الذي لا يزال مُهيمنًا، نجد غازات أخرى مثل أول أكسيد الكربون، والميثانول، والأمونيا. والماء. هناك أيضًا حبيبات صغيرة جدًّا من المواد الصلبة، مثل السيليكات والكربون (وحتى الألماس)، غالبًا ما تكون مُغطَّاة بطبقة من الجليد. عندما تبدأ المادة داخل هذه السحب الجزيئية في التكتُّل، تتسطح في شكل قرص دوار. تتجمع معظم المادة في القرص، في مركزه، لتشكيل نجم، بينما المادة التي تُوجَد على مسافة أبعد تُشكل مخزونًا تتكوَّن منه الكواكب. ويُعتقد أن نشأة الكواكب تحدث عن طريق تراكم الغاز وحبيبات الغبار لتشكيل أجسامٍ صخرية صغيرة (الكويكبات) تصطدم بعضها ببعض، وتتلاصق تحت تأثير قوة الجاذبية لتشكيل أجسام أكبر. يُستخدم معظم ما تبقى

من المادة ويُستهلك في هذه التصادمات؛ حيث «تلتهم» الأجسام الأكبر الأجسام الأصغر، مما يؤدي إلى نشأة الكواكب، ولكن ليس كما نعرفها بعد. ربما تكون أقرب إلى صخور منصهرة، ولكنها تحتوي بالفعل على جزء كبير من المادة التي لدينا الآن على الأرض.

كيف وصل الماء إلى هنا؟

ثمة آليات عديدة يمكن أن يكون الماء الذي لدينا على الأرض قد وصل من خلالها. تفيد إحدى النظريات الشائعة أنه جاء من خلال تصادُمات الأجسام «الرطبة» مثل المُذنبات، التي تحتوي على كمياتٍ كبيرة من الماء المتجمِّد. علاوة على ذلك، فقد أشرْنا بالفعل إلى أن حُبيبات الغبار التي تراكمت لتشكيل الأرض كانت لها أغلفة جليدية جاءت من الغاز الذي يُغلف حبيبات الغبار. من المُمكن أن يكون كثير من هذا الماء قد احتُجز أثناء عملية التراكم، وبما أن كتلة الماء في منطقة «الأرض الأولية» كانت أكبر بكثيرٍ من كمية الماء التي تراكمت في النهاية، فقد تكون هذه آلية مهمة وصل إلينا الماء عن طريقها.

يُعتبر التقاط الغاز من السديم الشمسي — وهو سحابة الغاز والغبار التي تشكَّلت منها الشمس وبقية الأجسام في النظام الشمسي قبل نحو ٤٫٥ مليارات سنة مضت — آلية أخرى من الآليات التي اقتُرحت لتفسير وصول الماء، وإن كان من غير المُرجَّح أن يكون هذا القدْر الكبير من الماء قد وصل إلينا بهذه الطريقة. بالإضافة إلى الماء الناتج عن تصادم المُذنبات، يمكن أن تكون الاصطدامات مع الكُويكبات أيضًا قد أضافت كميةً من الماء. من الصعب اختبار صحة هذه النظرية، ولكن الأدلة التي لدَينا تُشير إلى أنه من غير المُرجح أن تكون هي المصدر الرئيسي.

لا تزال القضية مُعلقة فيما يتعلق بماهية الآلية الفعلية لوصول الماء إلى الأرض، ولكن ثمة موقف مُرضٍ يُمكن تبنِّيه في هذا الشأن، وهو أن الآليات الثلاث الرئيسة المُدرجة هنا («التراكم الرطب»، والغاز من السديم الشمسي، والتصادمات اللاحقة بين الكويكبات والمذنبات) كلها ساهمت في تكوين الماء الذي لدَينا على الأرض. ولكن قدْر الماء الذي جاء من كلٍّ منها هو أمر غير واضح، وموضوع قيد البحث حاليًّا. على سبيل المثال، قامت «بعثة روزيتا» بأخذ عيناتٍ من سطح أحد المذنبات في عام ٢٠١٤، وكان الهدف من ذلك جزئيًّا هو البحث عن أدلة للمساعدة في حل هذه المشكلة المُثيرة للجدل منذ فترة طويلة.

ما فعلَه الماء بعد ذلك

يُعتبر توزيع ماء الأرض وتاريخه منذ وقت ظهوره حتى اليوم واحدًا من أعقد المشكلات في الكيمياء الأرضية. ولكن يُمكننا أن نطرح تكهنًّا قائمًا على معرفة. خلال المراحل الأخيرة من تكوين الأرض، كانت الكويكبات المتصادمة قد أُودِعت طاقةً كافية لإذابة جزء من الأرض على الأقل لتكوين مُحيط من الصهارة (قد تكون المادة المُندفعة منه هي ما شكَّلت قمرنا بعد ذلك).

إلى جانب الماء، كانت جزيئات أخرى مُتطايرة مثل الهيدروجين (بالطبع)، والنيتروجين، وأكاسيد الكربون، قد أُدمِجت أيضًا في محيط الحِمم خلال عملية التراكم. ثم، مع تبريد الصهارة وبدء تصلُّبها، أُطلِقت الجزيئات المُتطايرة لتُشكِّل غلافًا جويًّا بدائيًّا يتكون في أغلبه من الهيدروجين، وثاني أكسيد الكربون، وبخار الماء. وكان مجال الجاذبية للأرض غير كافٍ للحفاظ على الهيدروجين الخفيف، الذي فُقِدَ تدريجيًّا. ومع انخفاض درجة حرارة الأرض بما يكفي لتكثُّف بخار الماء في سُحب، جاءت الأمطار — وبقِيَت — حتى تشكلت المحيطات.

ورغم استمرار الشكوك، يمكن تقديم حجة جيوكيميائية معقولة لتفسير تأسيس الأنماط الحديثة لتكوُّن القشرة، والتعرية، وتكوُّن الرواسب في غضون نحو مائة مليون سنة منذ نشأة الأرض، ولكن مسألة ما إذا كانت الصفائح التكتونية قد نشأت بحلول ذلك الوقت تظلُّ سؤالًا مفتوحًا. فبحلول ذلك الوقت، ربما كان لدَينا غلاف جوي بدائي ومسطحات كبيرة من الماء؛ أي محيطات الماء السائل.

... ولا قطرة للشرب

نتقدَّم سريعًا إلى الوقت الحاضر حيث نعرف أكثر عن الماء على كوكبنا؛ وذلك لأسبابٍ واضحة جدًّا. ولكننا بالتأكيد لا نعرف كل شيء، على سبيل المثال نحن لا نعرف بأي درجةٍ من اليقين كم لدَينا من الماء. نعلم أن المحيطات تُشكِّل نحو ٧٠ في المائة من سطح الأرض، بينما يُغطي الجليد نحو ٥ في المائة منه، كالمُحيطات المتجمِّدة، والغطاءات الجليدية القطبية الجنوبية والشمالية، والجبال الجليدية. ولدَينا فكرة جيدة عن كمية الماء التي لدينا في المحيطات والأنهار، والماء المُختزن في الجليد، والمختزن في المياه الجوفية، والصخور،

والمواد العضوية؛ إذ يبلغ نحو ١,٩ ألف مليار مليار طن (أو ١,٩ مليار كيلومتر مكعب)، يتألف نحو ٧٠ في المائة منه من ماء المحيطات المالح.

وما قد يُثير الدهشة أن هناك كمية كبيرة من الماء أيضًا في وشاح الأرض، ويُقصد به طبقة السيليكات الصخرية الواقعة بين القشرة الأرضية واللب الخارجي. تتراوح معظم التقديرات لمحتوى الماء في القشرة بين ٠,٢ إلى ٢,٥ مليار مليار طن، علمًا بأن الرقم الأعلى يعادل نحو ضعفَي محيطات الأرض. ولكن ثمة تقديرات أعلى من ذلك.

هذا يعني أن هناك قدرًا ضخمًا منه حولنا. غير أن مُعظمه غير متاح لنا في شكل الماء العذب الذي نحتاج إليه، فإذا ما أغفلنا الماء الموجود في الوشاح الأرضي، فهذا يعني أن الماء العذب يُشكل نحو ٢ في المائة فقط من هذه الـ ١,٩ مليار مليار طن. وبما أن ما يقرب من ثلثَي هذه الكمية مُحتجَز في الغطاءات الجليدية، وباستبعاد تلك الكمية من المعادلة، فهذا يعني أن أقل من ١ في المائة من الماء العذب على الأرض يمكن أن يكون متاحًا لنا. وبالنظر إلى أن ٩٠ في المائة من هذه الكمية موجود في المياه الجوفية التي سيكون من الغباء التنقيب عنها واستخراجها بالكامل، فإن كمية الماء العذب التي يمكننا الوصول إليها بشكلٍ معقول تُعادل نحو ٠,١ في المائة من الإجمالي. ربما تظلُّ هذه الكمية تمثِّل كميةً كبيرة ظاهريًّا من الماء (١,٩ مليون مليار طن)، ولكن ضآلة النسبة تجذب انتباه العقل نحو الحاجة إلى الاعتناء بمصادر الماء العذب المتاحة بسهولة، وترشيد استخدامها.

لماذا نحتاج إلى الماء؟

الإجابة المختصرة هي: للحفاظ على مناخنا، وإبقائنا — والكائنات الحية الأخرى — على قيد الحياة.

ترتبط هاتان العبارتان بعمليات مُعقدة، يلعب فيها الماء في صورِه الثلاث دورًا بالغ الأهمية. نحن نحتاج إلى الماء بكمياتٍ وجودة مناسبَين، ولهذا فإن دورة الماء (التبخر والنتح ثم التساقط) تُعتبر عمليةً في غاية الأهمية باعتبارها آلية لتنقية الماء؛ فعلى الرغم من أن نحو ٧٥ في المائة من الماء «المعاد تدويره» يسقط على هيئة مطر على المُحيطات، فهو لا يُتاح لنا إلا بعملية تحلية مُكلفة (على صعيدَي الطاقة والمال). وعلى الرغم من أن الكمية الفعلية للماء في الغلاف الجوي الموجودة في أي زمنٍ تكون صغيرة، فإنها تلعب دورًا مركزيًّا في التأثير على طقسنا ومناخنا من خلال مجموعة معقدة من حلقات التغذية الراجعة.

من العناصر المُهمة أيضًا الغطاء الجليدي القطبي، الذي يعكس كميةً كبيرة من الإشعاع القادم من الشمس. فبدون هذا الغطاء الجليدي، ستمتصُّ الأرض المزيد من الحرارة. وبالإضافة إلى ارتفاع درجة حرارة اليابسات، سيؤدي ذلك أيضًا إلى ارتفاع درجة حرارة المحيطات، بما لذلك من آثار على التيارات المُحيطية، مثل تيار الخليج الذي يلعب دورًا رئيسًا في الحفاظ على المناطق المعتدلة في أوروبا الشمالية.

إن العوامل البيئية التي تؤثر على مناخنا مُعقدة ولم تُفهم بعدُ بالكامل؛ فنحن نتحدث عن توازناتٍ دقيقة جدًّا تشمل عددًا من العمليات المختلفة. ولكن في كثيرٍ من هذه العمليات، يحل الماء بجميع أطواره الثلاثة محلَّ القلب منها. وكما سنرى لاحقًا، فإن خواصَّه الخاصة في الطور السائل (مثل كمية الحرارة الكبيرة نسبيًّا التي يتطلبها رفع درجة حرارة كمية مُعينة من الماء بمقدار درجة مئوية واحدة)، وكجليدٍ صلب (الذي تقل كثافته عن كثافة الماء) ترتبط ارتباطًا وثيقًا بتأثيره على مناخنا.

احتياجات نفسية وفسيولوجية

على صعيد شخصيٍّ أكثر — أتمنَّى أن يجد صداه على نطاق أوسع — ثمة أسباب تجعلني وكثيرين آخرين نحتاج إلى الماء، وهي أسباب تتجاوز وظائفه الفيزيائية في الحفاظ على حياتي، والحفاظ على البيئة في حالة تسمح باستمرار وجودي المادي.

في سبيل الحفاظ على صحتي العقلية، يجب أن أختفي كل فترةٍ في الجبال والأودية، وأذهب إلى الأراضي الطينية على الساحل والجُزر المعزولة لأتشبع بجو الأماكن البرية التي تبقَّت لدَينا. وحاجتي إلى ذلك ليست لإنعاش نفسي روحيًّا فحسب، ولكن أيضًا لمساعدتي على تصفية ذهني، بما يسمح لي بالتفكير في المشكلات الصعبة، سواء كانت علمية أو غير ذلك. وكان الماء — ولا يزال — قوةً رئيسة في تشكيل تلك المناظر الطبيعية الملهِمة.

على سبيل المثال، الأودية العميقة التي تتخذ شكل حرف U، وتضم شلالات هائلة تتساقط فيها من الأودية المعلقة نُحِتت بفعل الجليد. والماء «السائل» أيضًا يُعَد قوة رئيسة في تشكيل المناظر الطبيعية؛ فالأنهار والجداول تنحت المادة ببطء لخلق أودية على شكل حرف V، في عملية تؤدي كل عامٍ إلى تآكل مليارات الأطنان من الرواسب التي يمكن أن تعزز الشرائط الساحلية. ويمكن أن تتآكل تلك السواحل نفسها بصفة مستمرة بفعل ماء المحيطات.

ومن خلال قدرته على التحميض من خلال إذابة ثاني أكسيد الكربون، كان الماء عنصرًا محوريًّا في تشكيل المعالم التي نراها في مناطق الحجر الجيري، بداية من مناظر الأودية الجافة الطبيعية المتنوعة بأشكالها الجميلة، وصولًا إلى الحُفَر التي تبتلِع تيارات الماء السطحي التي تحفر الكهوف الجوفية الهائلة، كما في حديقة كارلسباد الوطنية في ولاية نيو مكسيكو. تضم هذه الخزائن الجوفية صواعد ونوازل الكهوف، وغيرها من المنحوتات الطبيعية الرائعة التي شكَّلها الماء، والتي تجذب مستكشفي الكهوف لسَبر أعماقها. بينما يمكن لأولئك الذين يعانون من رُهاب الأماكن الضيقة منَّا، ولا يستطيعون النزول تحت الأرض في أماكن مغلقة، أن يستمتعوا بالأرصفة الجيرية — التي نحتها الماء أيضًا — التي تتميز بها حديقة بورين الأيرلندية الوطنية، على سبيل المثال، أو التلال الجيرية التي تتخذ شكل أبراج هائلة في جنوب شرق الصين التي ألهمت الرسَّامين الصينيين الكلاسيكيين.

الماء إذن مُهم لأرواحنا كما هو مُهم للحفاظ على حياتنا. وسننظر في الفصل السادس في كيفية قيامه بالأخيرة.

الماء في الجيولوجيا

لم يكن تطرُّقي إلى تأثير الماء على الأرض سوى مجرد خدش للسطح. فالماء ليس له تأثير مُهم في تشكيل التضاريس السطحية للكوكب فحسب، بل له أهمية بالِغة أيضًا فيما يحدُث داخل الكواكب، وكذلك في مواقع البراكين وأسلوب ثورانها. لقد أشرتُ بالفعل إلى أن كمية الماء في وشاح الأرض قد تكون كافيةً لإعادة ملء مُحيطات الأرض عدة مرات. إذن، ماذا يفعل هذا الماء هناك، وكيف يُمكن أن يؤثر فينا وجودُه على مسافةٍ سحيقة تحت أقدامنا؟

لنأخذ مثالًا واحدًا فقط. عند دفع صفيحة مُحيطية تحت صفيحة قارية (في عملية تُعرَف بـ «الاندساس»)، تجر الكثير من الماء معها (داخل المعادن المائية مثلًا). وبينما تغوص الصفيحة المندسَّة، ترتفع درجة حرارتها بفعل عمليات مثل الاحتكاك بين الصفيحة والقشرة، وبفعل تأثير الضغط. إذا كانت الحرارة كافية، فستبدأ الصفيحة في الذوبان، وبما أن المادة المنصهرة ستكون أخفَّ وزنًا من الصخر البلوري، فإنها ستميل إلى الطفو للأعلى.

يُمكن أن يلعب الماء دورًا حاسمًا هنا؛ إذ إن نقطة انصهار الصخور، تحت الضغط، تقلُّ بشكلٍ كبير من خلال وجود الماء. على سبيل المثال، الجرانيت الجاف على عُمق ٢٠ كيلومترًا تحت السطح يذوب عند درجة ١٠٠٠ مئوية، بينما يتحول الجرانيت «الرطب»

إلى مادة مُذابة عند درجة ٦٥٠ مئوية فقط. ويمكن أن ترتفع تلك الحِمم السائلة (الأخف) عندئذٍ، وعند الوصول إلى السطح، قد ينتُج عنها نشاط بركاني انفجاري.

قد يبدو هذا غريبًا للوهلة الأولى، ولكن من المعروف جيدًا أن تلك الانفجارات البركانية الهائلة تعتمِد على الماء الكامن في الأسفل. وهكذا نجد الماء أساسيًّا في تاريخ تكوين كثيرٍ من المعالِم الجيولوجية الناتجة عن النشاط البركاني. ولا يقتصر هذا على الأرض فقط؛ إذ يُعتقَد أن بعض أجزاء وشاح القمر يحتوي على قدْرٍ من الماء يُماثل ما يحتويه الوشاح العلوي للأرض منه.

ولكن ما هو الماء بالضبط؟

لقد افترضتُ ببساطة أن الماء هو جزيء يتكوَّن من ذرة أكسجين مُرتبطة بذرتَين من الهيدروجين. وهذا الاستنتاج يستند إلى عددٍ من الإنجازات والتطوُّرات الكبيرة في العلوم، بما في ذلك النظرية الذرية نفسها، والاعتراف بوجود العناصر. وقد استغرق الوصول إلى هذه المرحلة من المعرفة حول الماء وقتًا طويلًا؛ إذ لم يُعترَف بالصيغة الحالية للماء (H_2O) حتى الربع الثاني من القرن التاسع عشر.

كيف كان الماء يبدو لأجدادنا في العصور القديمة؟ مع وجود الماء في كل مكان حولهم، وكونه المُركب الوحيد على الأرض الذي يوجد طبيعيًّا في جميع حالاته الثلاث — الغازية، والسائلة، والصلبة — فليس من المُستغرَب أن يكون قد جذب الانتباه، وكان مصدر إلهام للفلاسفة، والشعراء، والموسيقيين، والفنانين التشكيليين، بالإضافة إلى علماء الفيزياء والكيمياء وعلماء الأرض وعلماء البيولوجيا في عصورٍ أحدث بكثير.

ربما كان انتشاره وأهميتُه لاستمرارية الحياة الوازع للقدماء لكي ينسبوا للماء مكانةً أولى في فلسفتهم. وفي قصة الخلق في سِفر التكوين، كانت المياه موجودة قبل الأرض: «لتجتمع المياه التي تحت السماء في موضعٍ واحد، ولتظهر اليابسة.» وأعطى البابليون الماء دورًا بالِغ الأهمية في الخلق؛ إذ كانت جميع الأراضي بحرًا حتى تدخَّل الإله مردوخ لخلق اليابسة. وفي القرآن الكريم، يقول النبي محمد إنه أُوحيَ إليه من الله أنْ «وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ». وكان الروم يعتقدون أن الله قد أجرى مياه الينابيع والمياه المعدنية على الأرض لعلاج الأمراض البشرية، بينما في الكنيسة المسيحية، كان يُنظَر إلى الماء على أنه يجلب الفوائد الروحية في المعمودية، وأن الماء المقدس يمكن أن يغسلنا من خطايانا.

عناصر العالم القديم

نميل في العموم إلى أن ننسِب الإعلان الأول (حوالي عام ٧٠٠ قبل الميلاد) بأن الماء هو العنصر الأساسي المُكوِّن لكل شيءٍ إلى طاليس الملطي؛ أحد الحكماء السبعة في العصور القديمة، والذي يُطلَق عليه أحيانًا أبا الفلسفة. ولِمَ لا وهو يُمكن تبخيره لتشكيل «هواء» من نوعٍ ما، وتجميده لتشكيل «أرض» من نوعٍ ما؟ إذن يمكن بالتأكيد أن يكون الأساس لجميع المواد (الصلبة والسائلة والغازية)، أليس كذلك؟

فضَّل آخرون بعد طاليس إعطاء الأفضلية لعناصر أخرى مثل الهواء والنار، وربما كان أمبادوقليس في القرن الخامس قبل الميلاد هو أول من جمع العناصر الأربعة «الكلاسيكية» للعالم القديم؛ الأرض، والهواء، والنار، والماء. قد نعزو إلى أمبادوقليس أيضًا الأفكار الأولى عن الذرات، من خلال مفهومه عن «الخواص» الأربع لـ «البذور» التي تناظر العناصر الأربعة الأصلية.

اعتمدت حضاراتٌ أخرى مجموعاتٍ مختلفةً من العناصر كأسس لها. على سبيل المثال، ركز الصينيون على خمسة عناصر، هي: الأرض، والخشب، والمعدن، والنار، والماء، وربما نلاحظ هنا أهمية الرقم خمسة للطاويين. وليس من المُستغرَب أن الماء يظهر كعنصرٍ مشترك في هذه التقاليد المختلفة.

بدأ الإسكندريون — ربما تحت تأثير الاتصالات مع مصر وآسيا الصغرى وبلاد الرافدين، وربما حتى الهند — في إدخال جوانب عملية في فلسفتهم الطبيعية (بما في ذلك إدراك أن بإمكان البخار بذل الشغل، رغم عدم بناء مُحرك بخاري حقيقي). وعلى الرغم من هذه الخطوات نحو البرجماتية، بدت أفكار أرسطو حول العناصر (بالإضافة إلى أفكاره الأخرى في مجالات متنوعة، من الفيزياء والكيمياء إلى الأخلاق والسياسة) أنها تُجمِّد عمليات التفكير، مما منع أوروبا من التحرُّر من هذه القيود الفكرية لنحو ألفَي سنة.

بدأ ليوناردو دافنشي في استخدام التجربة بالفعل كأداةٍ لتطوير فهم العديد من الأمور. على سبيل المثال، من خلال استنتاج أن الماء يتبخَّر في السحب، التي تتسبَّب في المطر، قطع دافنشي شوطًا نحو فهم دورة المياه. لكن بقِيَت فكرة الماء باعتبارها عنصرًا أساسيًّا. ولكن مع تطوُّر المنهج التجريبي في القرن السابع عشر الذي اقترح تحولاتٍ مُمكنة بين أزواج مختلفة من العناصر الأربعة، تزايدت صعوبة دمج ملاحظات في نموذج العناصر الأربعة الكلاسيكي.

الماء في بدايات العلم الحديث

في النصف الثاني من القرن السابع عشر — وهي الفترة التي شهدت بدايات الكيمياء الحديثة — لم يتمكن حتى روبرت بويل، الذي كان لدَيه من الفراسة والفطنة ما سمح له بصياغة قانون أساسي يتعلَّق بسلوك الغازات (قانون بويل)، من التحرُّر من الأفكار «الأولية» السابقة.

وعلى الرغم من أن اعتماده فكرة إمكانية تحويل الماء إلى مادة عضوية (وهي تجربة أُجريت في منتصف القرن السابع عشر من قِبَل جان بابتيستا فان هيلمونت، فسَّرت امتصاص شجرة نامية للماء بتحوُّل الماء إلى خشب)، كان الماء لا يزال يُعتبر عنصرًا. أما في تجاربه على الاحتراق، فيمكن العثور على البذور الأولى لكشف لُغز تركيب الماء. فبدون تحديد الغازات على النحو المُتعارف عليه (وهو ما حدث فيما بعد)، حصل على غاز الهيدروجين («الهواء غير النقي»)، عن طريق إذابة بُرادة الحديد في حمض، وأحرقه في الهواء. وبذلك ربما يكون أول من جمع الهيدروجين والأكسجين لتكوين الماء، ولكن بدون عِلم منه.

جاء الحسم النهائي بعد مرور مئات السنين من اكتشاف جوزيف بريستلي لغازٍ يُعزز الاحتراق، والذي سُمِّي لاحقًا بالأكسجين. ولكنه كان مُقيدًا فكريًّا بالإطار المفاهيمي القائم؛ لذا لم يتمكَّن أيضًا من رؤية الحقيقة. في الفترة نفسها، أنتج هنري كافنديش — وهو «العالِم النبيل» الثري الذي وزن الأرض — «الهواء القابل للاشتعال» من تأثير الأحماض على الحديد والزنك والقصدير، ولاحظ أن هذا الغاز يحترق بسهولة في الهواء. ولكن كما حدث مع بريستلي، عند تفسير نتائج هذه التجارب، لم يتمكن أيضًا من الخروج من الإطار المفاهيمي السائد في ذلك الوقت. (لم يمنع ذلك خلفاءه من تسمية مُختبر فيزياء مرموق في كمبريدج باسمه.)

لذا بحلول عام ١٧٧٥، عُزل كِلا مُكوِّنَي الماء. ولكن لم يكونا قد ترسَّخا بعدُ باعتبارهما عنصرَين لا «هواء غير نقي». وشهدت فترة السبعينيات من القرن الثامن عشر ثلاث تجارب توحَّد فيها الهيدروجين والأكسجين. أجرى هذه التجارب جون وارلتاير (أحد زملاء بريستلي)، وبيير جوزيف ماكير (أحد زملاء أنطوان لافوازييه في فرنسا، الذي سنلتقي به مرة أخرى قريبًا)، وجيمس وات، الذي قام فيما بعدُ بإنجازٍ مُثير للاهتمام مع المحرك البخاري، ولكنه كان آنذاك فني مُختبر لجوزيف بلاك، الكيميائي الاسكتلندي الذي اكتشف ثاني أكسيد الكربون. وقد أجرى بريستلي هذه التجربة أيضًا في عام ١٧٨١.

أنتجت كل التجارب بقايا من الماء، ولكن لم يُنظَر إلى ذلك باعتباره شيئًا لافتًا للانتباه؛ لأن تكاثف الماء من الهواء أمر عادي. واقترب كافنديش أكثر من «حل اللغز» عندما لاحظ في عام ١٧٨١ أن أحد عنصرَي «الهواء غير النقي» (وهو الأكسجين) اتَّحد مع «الهواء القابل للاشتعال» (الهيدروجين) بالنسبة الكمِّية ٢:١. وكان الناتج هو H_2O بالفعل، ولكن لم يُدرَك على هذا النحو. وكانت تلك محاولة كادت تُصيب الهدف.

هذه القصة كلها طويلة ومُعقدة، وتُلقي الضوء على مشكلة محاولة تفسير نتائج جديدة في ضوء مفاهيم قديمة. وتُظهِر أيضًا تردُّد بعض الباحثين في الاعتراف بعمل الآخرين، وهي سمة للأسف لا تزال موجودةً في البحوث الحالية، سواء أكانت علمية أم غير ذلك.

واختصارًا لهذه القصة الطويلة، تطلَّب الأمر من لافوازييه في فرنسا التوصل إلى الاستنتاج الصحيح، وترتيب الأوضاع من خلال إدراك أن الماء مُركب من الهيدروجين والأكسجين. ولم يتسنَّ له القيام بذلك إلا من خلال التخلُّص من الإطار المفاهيمي — القيد الفكري — الذي لم يتمكن العلماء البريطانيون من الفكاك منه. وبذلك أطلق على الغازَين المعنيَّين: «الهيدروجين» لقُدرته على توليد الماء، و«الأكسجين» لقُدرته على تكوين الأحماض، على الرغم من أننا نعرف الآن بالطبع أن الأكسجين لا يُوجَد في كل الأحماض. وأثبت لافوازييه استنتاجه أكثر من خلال «فصل» الماء واستعادة الهيدروجين الناتج.

اضطُرت الصيغة الفعلية إلى الانتظار خمسين عامًا أخرى للتأكيد عليها، وضع خلالها دالتون بدايات النظرية الذرية الحديثة. أخطأ دالتون في البداية حين افترض أن المُركبات يجب أن تتألَّف من ذرة واحدة من كل مُكوِّن من المكونات، وعلى أساس هذه الفرضية عيَّن للأكسجين وزنًا ذريًّا قدره ٧ (على الرغم من أنه كان سيُصبح ٨ لو توافرت لديه بيانات أدق). وجاءت القفزة الحاسمة والنهائية من الكيميائي السويدي يونْس ياكوب بيرسيليوس في عام ١٨٢٦. فمن خلال تصحيح الوزن الذري للأكسجين ليُصبح ١٦، أصبح الماء أخيرًا بصيغته المعروفة H_2O.

بذا صرنا نعرف الآن ماهية هذه المادة.

الفصل الثاني

جزيء الماء وتفاعلاته

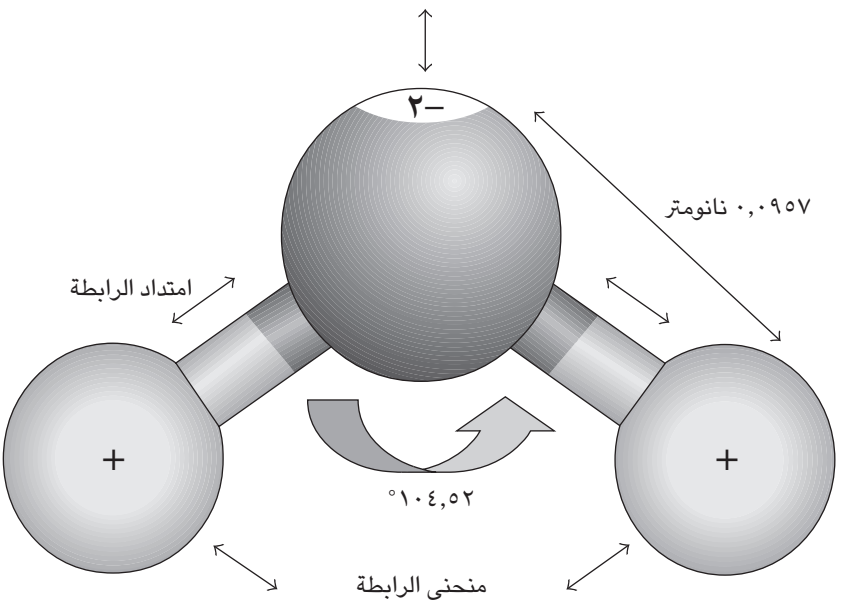
يكمن مفتاح فهم سلوك الماء في جميع حالاته المختلفة — الغازية، والسائلة، والبلورية، والزجاجية (أجل) — في الجزيء نفسه. لذا، بمجرد أن نفهم طبيعة الجزيء، يمكننا التفكير في كيفية تفاعُله مع جزيئات الماء الأخرى لاستكشاف سلوكه وخصائصه كمادةٍ غازية، أو سائلة، أو صلبة. أي يُمكننا دراسة حالته الاجتماعية الجزيئية. بالمثل، إذا استطعنا أن نفهم كيفية تفاعل جزيء الماء مع أنواعٍ أخرى من الجزيئات، يُمكننا استكشاف خصائص وسلوكيات المجموعة الواسعة من الأنظمة الكيميائية والفيزيائية والبيولوجية التي يدخل فيها الماء.

الماء منفردًا

إذن، كيف يبدو جزيء الماء بمفرده؟

تعتمد الإجابة في الواقع على الخاصية التي قد ترغب في التركيز عليها تحديدًا. على سبيل المثال، غالبًا ما يُنظر إلى بنية جزيء الماء باعتباره نسقًا من «بومرانج من كرات وعصي» من نُوي الأكسجين والهيدروجين المكونة له (انظر شكل ٢-١، متجاهلًا في الوقت الحالي الأسهم وعلامات الموجب والسالب). تمثل الكرات نُوي الذرات، وتُمثل العصي الروابط الكيميائية بينها. في هذه الروابط «التساهمية»، تُعتبر بعض الإلكترونات (الإلكترونات التكافؤية) من كل ذرة إلكترونات مشتركة بين النُّوي المختلفة التي تُشكل الجزيء.

يُبرز هذا التصوير الشكل الهندسي للجزيء، ولا غضاضة في ذلك؛ إذ إن لهذا الشكل الهندسي تأثيرًا كبيرًا في طريقة تفاعل جزيئات الماء بعضها مع بعض، ومع جزيئاتٍ



شكل ٢-١: تصوير لجزيء الماء بالكرة والعصا. تُظهر الأسهم كيف تهتز الذرات، بينما تُبيِّن علامات + و– موضع تركُّز الشحنة الكهربائية. مُنحنى الرابطة.

أخرى. تبتعِد نواة الأكسجين المركزية عن كل نواةٍ من نُوي الهيدروجين المرتبطة بها بمسافةٍ تبلغ نحو عُشر مليار من المتر: ٠,١ نانومتر.

بالنظر إلى أن كثيرًا من الجزيئات الأخرى التي تتكوَّن من ثلاث ذرات — على سبيل المثال، جزيء ثاني أكسيد الكربون (CO_2) — تكون خطية، قد يكون من المدهش قليلًا في البداية أن نجد أنَّ جزيء الماء «مُنحنٍ». هناك أسباب وجيهة لهذا تتعلق بميكانيكا الكم، والتي، عند إجراء الحسابات بالشكل الصحيح، تفسر لماذا تكون الزاوية HOH حوالي °١٠٤,٥. والمثير للاهتمام بصفةٍ خاصة بشأن هذه الزاوية أنها لا تقترِب فقط من الزاوية الرباعية الأسطح، التي تبلُغ حوالي °١٠٩,٥، بل أيضًا من الزاوية الداخلية للمُضلَّع الخماسي (°١٠٨). تذكَّر هذه الزوايا. فسنستفيد منها فيما بعدُ عندما نبدأ في تسويغ بِنى كلٍّ من الجليد والماء السائل.

على الرغم من أن هذه الصورة الثابتة ستساعدنا على فهم الجانب الهندسي لطريقة تفاعل جزيئات الماء، فإنها ساذجة جدًّا؛ لأنه ما مِن جزيء يظلُّ ثابتًا أبدًا. فالجزيئات تهتز. والطريقة الأبسط لتخيُّل حركتها الاهتزازية هي بتخيُّل كل رابطة O–H كما لو كانت نابضًا أو زنبركًا، على كل طرفٍ منه ذرات من الهيدروجين والأكسجين قادرة على التذبذُب، كما هو مشار إليه بيانيًّا بالأسهم على طول روابط O–H في الشكل ٢-١. بالإضافة إلى هذا النمط الاهتزازي لـ «تمدُّد الرابطة»، يمكن لذرات الهيدروجين أيضًا التذبذب بعضها نحو بعض، وبعيدًا بعضها عن بعض، بحيث تتغيَّر زاوية الرابطة HOH. يوضَّح هذا النمط الاهتزازي لانحناء الرابطة أيضًا بواسطة الأسهم ذات الصلة في الشكل ٢-١.

وكما هو الحال في جميع الجزيئات، تزداد الحركات الاهتزازية مع زيادة الحرارة. والعكس صحيح: كلما قلَّت الحرارة، قلت الحركات الاهتزازية. ولكن حتى عند درجة حرارة الصفر المُطلق (٠ كلفن، أو −٢٧٣° مئوية)، تبقى بعض الحركات الاهتزازية.

يُعتبر هذا واحدًا من تأثيرات ميكانيكا الكم يُعرَف بـ «حركة نقطة الصفر». بالنسبة إلى الأنظمة التي تحتوي على ذرات خفيفة، يمكن أن تكون هذه الحركات كبيرة وذات أهمية محتملة في تحديد بعض السلوكيات. وهكذا، وبما أن جزيء الماء يحتوي على اثنتَين من أخف الذرات — الهيدروجين — يحتفظ الجزيء بكمية كبيرة من الطاقة الاهتزازية حتى عند الصفر المطلق. قد يبدو الأمر غريبًا قليلًا أن نُشدد على هذه النقطة عند النظر في سلوك الماء تحت ظروف الحرارة المُحيطة العادية، ولكن كما سنرى في الفصلَين الخامس والسادس، قد تكون حركات النقطة الصفرية هذه مُهمة في بعض العمليات المهمة كيميائيًّا وبيولوجيًّا.

الماء المشحون: دور الإلكترونات

يُخبرنا هذا الوصف حتى الآن عن شكل جزيئات الماء وحجمها وحركاتها الداخلية، ولكنه لا يُخبرنا أي شيء عن كيفية انجذابها بعضها لبعض، أو انجذابها لأنواع أخرى من الجزيئات (أو تنافُرها معها). وللاطلاع على هذا، نحتاج إلى النظر في تأثيرات الإلكترونات في الجزيء. بعض هذه الإلكترونات تربط بين نُوي الأكسجين والهيدروجين لتكوين جزيء الماء. ولكن لفهم كيفية حدوث التفاعُل المُحتمل بين الجزيئات، نحتاج إلى النظر في جزيء الماء من حيث توزيع الشحنة الكهربائية.

الجزيء نفسه مُحايد كهربائيًّا. فكل ذرة هيدروجين تحتوي على بروتون واحد، وكل ذرة أُكسجين لها ثمانية بروتونات. ومن ثَمَّ يحتوي جزيء H_2O على عشرة بروتونات موجبة الشحنة، تُوازِنها عشرة إلكترونات سالبة الشحنة. بإجراء حسابات ميكانيكا الكم (أو القياسات التجريبية ذات الصلة)، نجد أن الشحنة ليست موزَّعة بالتساوي داخل الجزيء. بل هناك درجة من الفصل بين الشحنات الموجبة والسالبة.

أبسط تمثيلٍ لهذا الفصل بين الشحنات هو تعيين شحنة صغيرة مُوجبة لكل ذرة من ذرات الهيدروجين (علامة الموجب في شكل ٢-١)، مع شحنة سالبة مكافئة «على» ذرة الأكسجين يعادل حجمها ضعف حجم الشحنة على كل ذرة هيدروجين. بدلًا من وضعِها في مركز ذرة الأكسجين، تُشير الحسابات الميكانيكية الكمية إلى أنه من الأفضل اعتبار المنطقة ذات الشحنة السالبة كأنها «فص» واحد من الشحنة على الجانب «العلوي» من ذرة الأكسجين. يمكن النظر إلى الشحنات كما لو كانت مُتمركزة على زوايا مثلث متساوي الأضلاع، وبذلك يكون للجزيء عمومًا الشكل الهندسي لشحنة ثلاثية الأضلاع تقريبًا.

الجزيء الذي يحوي مناطق ذات شحنةٍ موجبة وسالبة منفصلة يمكن وصفه كَميًّا في إطار مجموعةٍ من «العزوم الكهربائية». وهذه العزوم مفيدة لنا في هذا المقام؛ إذ إننا بمجرد أن نعرف قيمها، يُمكننا معرفة كيفية استجابة الجزيء في مجالٍ كهربائي، تحديدًا مجال كهربائي تُنشئه الشحنات الكهربائية على الجزيئات المجاورة. بمعنًى آخر، تُتيح لنا العزوم الكهربائية حساب كيفية انجذاب الجزيئات بعضها لبعض أو تنافرها.

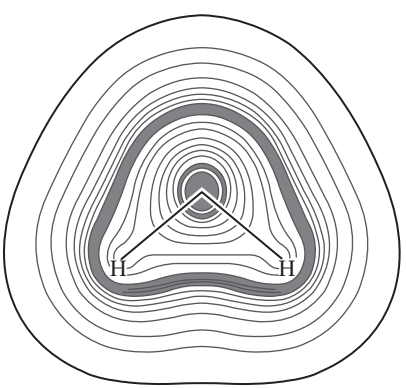
أهم هذه العزوم هو «العزم الثنائي القطب». تبلغ قمة هذا العزم بالنسبة إلى الماء ١٫٨٥ ديباي، وهي وحدة سُمِّيت تيمنًا باسم الفيزيائي الهولندي الشهير بيتر ديباي. وهي تسمية مناسبة للغاية؛ إذ كان أول إسهام علمي كبير لديباي هو تطبيق مفهوم العزم الثنائي القطب على توزيع الشحنة في الجزيئات غير المُتماثلة. وتُعتبَر هذه القيمة للعزم الثنائي القطب عالية جدًّا، ولكنها معقولة بالنسبة إلى جزيءٍ صغير.

إذا وضعنا الجزيء في مجال كهربائي، سواء أكان المجال خارجيًّا أم مشتقًّا من الشحنات الكهربائية على الجزيئات المجاورة، فسوف يستجيب من خلال تفاعل العزم الثنائي القطب الخاص به مع ذلك المجال الكهربائي الخارجي (وهي نقطة ترتبط بقدرة الماء المفيدة جدًّا على العمل كمذيب جيد، والتي سنُثيرها مرة أخرى في الفصلَين الخامس والسادس). ولكن سيكون للمجال الكهربائي الخارجي تأثير إضافي على جزيء الماء؛ إذ سيُشوه توزيع الشحنة حول الجزيء أكثر بطريقةٍ تزيد العزم الثنائي القطب.

لذا نقول إن الجزيء له «قابلية استقطاب ثنائي» كبيرة مع زيادة العزم الثنائي القطب الخاص به من خلال وجود مجال خارجي. وأُكرِّر، هذا السلوك مهم في فهم سلوك الماء كمذيب جيد. ولكن وجب التنبيهُ إلى أن هذه خاصية مشتركة بين كثير من الجزيئات الصغيرة. علاوة على ذلك، لا تخرج قيمة العزم الثنائي القطب للماء أو قابليَّته للاستقطاب عن النطاق المألوف لجزيء صغير، على الرغم من أن كليهما مُرتفع.

قبل أن نترك الحديث عن الخصائص الكهربائية لجزيء الماء، يجب أن نُشير إلى أن الجزيئات ستتنافر عندما تُصبح قريبة جدًّا بعضها من بعض بما يجعل توزيعات الإلكترونات تبدأ في التداخُل. الصورة البسيطة للجزيء الذي يُشبه الدمبل المعقوف في الشكل ٢-١ لا تُخبرنا شيئًا عن المدى المكاني لتوزيع الإلكترون، وإن كانت تُعطينا صورةً عن مكان تركيز الشحنة.

يقدِّم الشكل ٢-٢ صورةً أفضل. استنادًا إلى حسابات عالية الجودة من ميكانيكا الكم، يتبيَّن لنا إمكانية وصف الشكل الجزيئي بصورةٍ جيدة إلى حدٍّ معقول بأنه سطح غير كروي بعض الشيء. والبيانات التجريبية من تحليلات البِنية البلورية العالية الدقة تدعم هذا الوصف. وعلى الرغم من أنه غالبًا ما لا يتمُّ التركيز على هذا الجانب من جزيء الماء، فإنه يمكن أن يساعد في شرح البِنى المائية المُعقدة للغاية بطريقةٍ بسيطة نسبيًّا، وهي البِنى التي غالبًا ما نُلاحظها في الأنظمة الحيوية على سبيل المثال.



شكل ٢-٢: الخطوط الكفافية لكثافة الإلكترونات لجزيء الماء.

إذن ما المُميز بشأن الجزيء؟

رأينا أن جزيء الماء يتكوَّن من ذرتَي هيدروجين مُرتبطتَين كيميائيًّا (برابطة تساهمية) بذرة أكسجين واحدة. والجزيء ليس خطيًّا، ولكنه مُنحنٍ، بحيث تكون الزاوية HOH لهيكلِه الهندسي المتوسط — والتي تبلغ نحو ١٠٤٫٥ درجات — قريبة من كلٍّ من الزاوية الرباعية الأسطح والزاوية الداخلية لمُضلع خماسي مستوٍ. والجزيء يهتزُّ باستمرارٍ من الداخل. وبما أنه يحتوي على ذرَّتَين خفيفتَين (ذرتَي الهيدروجين)، فإن حركة النقطة الصفرية له تكون كبيرة. ويمكن اعتبار التوزيع الكلي لشحنة جزيء الماء أقربَ لأن يكون ثلاثيَّ الزوايا. وهذا التوزيع للشحنة يُعطي للجزيء عزمًا ثنائيَّ القطب كبيرًا، وسهولة اختلال هذا التوزيع تؤدي إلى قابلية استقطابٍ كبيرة، على الرغم من أن قيمة العزم الثنائي القُطب والقابلية الاستقطابية لا تخرجان عن المألوف مع القِيَم الموجودة لكثيرٍ من الجزيئات الصغيرة الأخرى. أخيرًا، يكون شكل الجزيء، المُحدَّد بتوزيع كثافة إلكتروناته، غير كروي قليلًا، وإن كان ملحوظًا.

في المُجمَل، يبدو جزيء الماء، عند النظر إليه بمفرده، جزيئًا صغيرًا عاديًّا.

الارتباط

تتفاعل جزيئات الماء معًا من خلال نوعٍ من التفاعل يُسمَّى «الرابطة الهيدروجينية». يُعتبَر هذا التفاعُل أضعف بكثيرٍ من الرابطة التساهمية التي تربط ذرات الهيدروجين والأكسجين في جزيء الماء (وتربط الذرات في الجزيئات عمومًا). غير أنه أقوى من تفاعُل «فان دير فالز» الذي يخلُق تجاذُبًا ضعيفًا بين الذرَّات أو الجزيئات التي لا تمتلك عزمًا ثنائيَّ القطب كبيرًا، كما في جزيئات مثل الميثان CH_4.

لا تزال طبيعة التفاعُل الهيدروجيني الفعلية مُثيرة للجدل قليلًا. فعلى الرغم من أن الأفكار الأولى كانت عادةً ما تعتبِر التفاعُل «إلكتروستاتيًّا» بحتًا، كونه يتحدَّد بحسب توزيع الشحنة على الجزيئات، فإن الأعمال النظرية اللاحِقة غالبًا ما كانت تُشير إلى وجود درجةٍ بسيطة من انتقال الإلكترونات بين جزيئات الماء المتفاعِلة، مما يشير إلى وجود طابع تساهمي. ولا يزال الجدل مستمرًّا حول ما إذا كان يجب اعتبار تفاعل الرابطة الهيدروجينية في حالة الماء تساهميًّا بصورة جزئية. ولكن لفهم بِنية الماء وخصائصها بصورةٍ عامة، ليس علينا القلق بشأن حسم هذا الجدل.

الشيء المُتفق عليه هو قوة التفاعل بين جزيئَين من الماء. فهو يقف في موضعٍ متوسط بين تفاعُل فان دير فالز والتفاعُل التساهمي. ويمكن وضع ترتيب حجم التفاعل (الذي يبلغ، بلغة الأعداد، نحو ٢٠ جولًا لكل مول) في سياقٍ ما عن طريق ملاحظة أن هذا الرقم يعادل نحو عشرة أضعاف تقلُّب حراري تقليدي في درجة حرارة الغرفة.

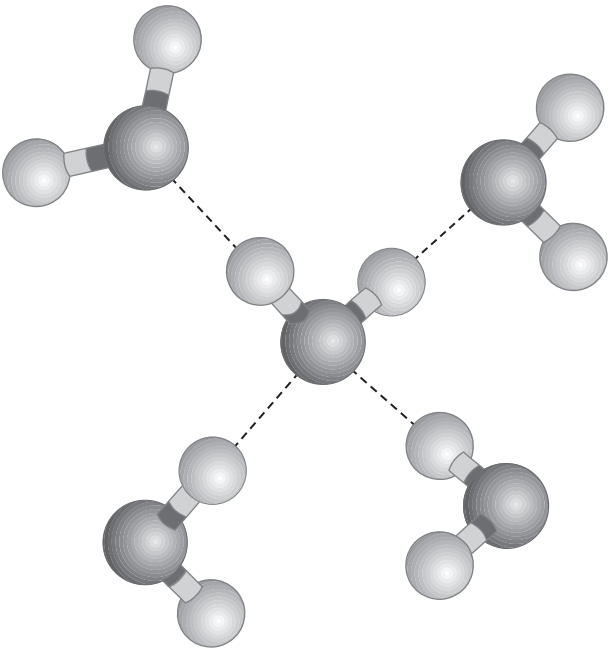
ترتبط القِيَم النسبية للتجاذُبات بين الجزيئات والتقلُّبات الحرارية بتماسُك مجموعة من الجزيئات في درجة حرارة مُعينة. في حالة الماء، يعني هذا الفرق، في ترتيب القوة بين طاقة الرابطة الهيدروجينية والتقلُّب الحراري التقليدي، أنَّ الماء يبقى سائلًا في درجة الحرارة المُحيطة. فالتقلُّبات الحرارية ليست قويةً بما يكفي لكسر ما يكفي من الروابط الهيدروجينية لتبخير السائل. في المقابل، تكون قوة التفاعُلات بين الجزيئات الصغيرة المُماثلة، مثل جزيء كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، أضعف بكثير؛ ومِن ثَم تكسرها التقلُّبات الحرارية بسهولة أكبر، وبالتالي تغلي هذه السوائل في درجات حرارة أقلَّ بكثيرٍ من الماء (−٦٠ درجة مئوية في حالة كبريتيد الهيدروجين).

تُقدم هذه القوة النسبية للرابطة الهيدروجينية فيما يتعلق بالتقلبات الحرارية المُعطِّلة تفسيرًا بسيطًا لواحدةٍ مما يُسمَّى بحالات شذوذ الماء، وهي أن الماء يكون سائلًا في درجة الحرارة المُحيطة، بينما يظلُّ كثير من الجزيئات الأخرى ذات الكتلة الجزيئية المُماثلة أو الأكبر، مثل كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، في حالةٍ غازية.

لكن ثمة المزيد من السمات لرابطة الهيدروجين المائية أكثر من مجرد قوتها. فما يجذب الاهتمام ويتمتع بأهميةٍ خاصة هو اتجاهيتها، وعدد الجزيئات التي تُحب التفاعل بعضها مع بعض.

يبدو من المنطقي تمامًا أن تنجذب ذرة الهيدروجين المُوجبة لأحد الجزيئات إلى المنطقة ذات الشحنة السالبة من الأكسجين عن أي جزيءٍ آخر. لذا، لن نتفاجأ بالعثور على هيدروجين يُشير إلى الجانب الخلفي للأكسجين في جزيءِ ماءٍ مجاور. ولكن بما أن الأكسجين له شحنة سالبة ضعف الشحنة المُوجبة على الهيدروجين، فإن الأكسجين لن يرتضي بالارتباط الهيدروجيني مع جزيءٍ آخر واحد فقط. فلا يزال مُتبقيًا لدَيه بعض «القوة الجاذبة» لجذب ذرة هيدروجين على جزيء ماءٍ آخر. في الواقع، هناك تفضيل مفهوم لدى كل ذرة أكسجين لجذب ذرات هيدروجين من جزيئَي ماء مُجاورَين.

علاوة على ذلك، يملك هذا الجزيء المائي «المركزي» أيضًا ذرتَي هيدروجين يجِب أن يُرضيهما؛ لذا ستميلان إلى التفاعُل مع المنطقة السالبة الشحنة من جزيئَي ماء آخرين.



شكل ٢-٣: جزيء ماء ذو نمط رباعي التناسُق يُظهر الترتيب الرباعي الأسطح في حالته المثالية لبيئة الجار الأول لجزيء ماء.

والنتيجة النهائية موضحة في الشكل ٢-٣، حيث يُحيط بكل جزيء ماءٍ في الوضع المثالي أربعة جزيئات مجاورة ترتبط معًا برابطة هيدروجينية. في اثنَين من هذه التفاعُلات، سيعمل جزيء الماء المركزي باعتباره «مانحًا» للرابطة الهيدروجينية من خلال توجيه هيدروجيناته (ذات الشحنة الموجبة) نحو منطقةٍ سالبة الشحنة في كلٍّ جزيءٍ من جُزيئَي الماء المجاورَين له. أما في التفاعُلَين الآخرين، فسيعمل الجزيء المركزي باعتباره «مُستقبلًا» للرابطة الهيدروجينية لجزيئَي ماء مجاورَين يوجِّهان هيدروجيناتهما نحو المنطقة السالبة الشحنة من جزيء الماء المركزي. إنها مجموعة متناسِقة ورائعة من التفاعُلات التي تجعل جميع الجزيئات في سعادة. وتأسيسًا على هذه الحجة البسيطة، يُمكننا بناء النمط الرباعي التناسُق للشكل٢-٣. فالجيران الأربعة تُشكِّل شكلًا «رباعيَّ الأسطح» حول الجزيء المركزي.

يتم إيجاد هذا الترتيب المثالي الموضعي الرباعي التناسُق عن طريق التجريب. تُظهر الدراسات البلورية على البِنى التي تحتوي على جزيئاتٍ أخرى مع الماء (الهيدرات)؛ أن هيدروجينات الماء تُشارك على نحو شِبه دائمٍ كمانح للرابطة الهيدروجينية، حيث تتوفر المناطق السالبة الشحنة للجزيئات المجاورة، ويسهل الوصول إليها. لذا، فعلى الرغم من أن المنطقة السالبة الشحنة هي فصٌّ واحد فقط له شحنة سالبة، فإن توافُر المساحة لاستيعاب ذرتَي هيدروجين مانحتَين في المنطقة ذات الشحنة السالبة المُضاعفة من الأكسجين في الماء سيدفع الجزيئات نحو التناسُق الرباعي الأسطح الذي نُشاهده في هذا النمط الرباعي. وتكون نسبة مانح الرابطة الهيدروجينية إلى المُستقبِل هي ٢:٢. والحسابات النظرية العالية الجودة تُعيد إنتاج هذه البنية الموضعية أيضًا.

ألقِ نظرة متأنِّية على هذا النسق لخمسة جزيئات من الماء واحفظه في ذاكرتك! إنه المفتاح لفهم الماء؛ أي فهم بِنيته في أشكاله المختلفة، وخصائصه، وسلوكه في جميع أنواع الظروف والبيئات. لذا سنُشير إليه مرارًا (حتى إنك بعد فترة قد تبدأ في الشعور بالملل حدَّ الغثيان) حين نستخدِمه لاستكشاف الطرُق التي تتفاعل بها جزيئات الماء في «أطوار التكثف»، بدءًا من الشكل البلوري المألوف الذي تجده في المُجمَّد أو على المنحدرات الثلجية.

الفصل الثالث

الماء في حالة الجليد

الجليد هو بلورة، بغضِّ النظر عن المكان الذي تجده فيه طبيعيًّا على الأرض، سواء في ثلاجتك، أو عندما يتساقط في صورة حبات ثلج في حديقتك، أو في نهر جليدي في القطب الشمالي. وهذا يعني على المستوى الجزيئي أن الجزيئات التي تُشكل البلورة مرتبة بنمط متكرر منتظم. بعبارة أخرى مختلفة قليلًا، يمكننا تخيل عددٍ قليل من الجزيئات مُرتبة داخل صندوق نُسميه «الخلية الوحدة». لتشكيل البلورة، ما علينا إلا تكرار تلك الخلية الوحدة عن طريق وضع وحدات خلايا أخرى تحتوي على جزيئات بجوارها في ثلاثة أبعادٍ لتشكيل البلورة الممتدَّة.

عند تكرار هذه العملية، يجب أن يكون لدينا وحدة خلية تملأ المساحة كاملة الفراغات عند تكرارها في ثلاثة أبعادٍ دون ترك أي فراغات. وهذا يُقيد عدد أشكال الصناديق التي يمكن أن تشكل وحدات خلايا صالحة؛ بالتأكيد يمكن للمكعب أن يتجمَّع مع مكعبات أخرى متطابقة لملء الفضاء الثلاثي الأبعاد، ولكن الشكل الرباعي الأسطح، على سبيل المثال، لا يمكنه ذلك. (جرِّب الأمر!)

علاوة على ذلك، عند تكرار وحدة خليةٍ تحتوي على جزيئات، يجب أن تكون التفاعُلات بين الجزيئات عبر حدود الخلية الوحدة مُتسقة مع الطريقة التي تتفاعل بها الجزيئات بعضها مع بعض. إذا نظرنا إلى الأمر باعتباره أحجيةً للصور المقطوعة، فلا يكفي أن تتناسب أشكال القِطَع بعضها مع بعض، ولكن يجب أيضًا أن تتطابق عناصر الصورة عبر الحواف الواصلة بينها.

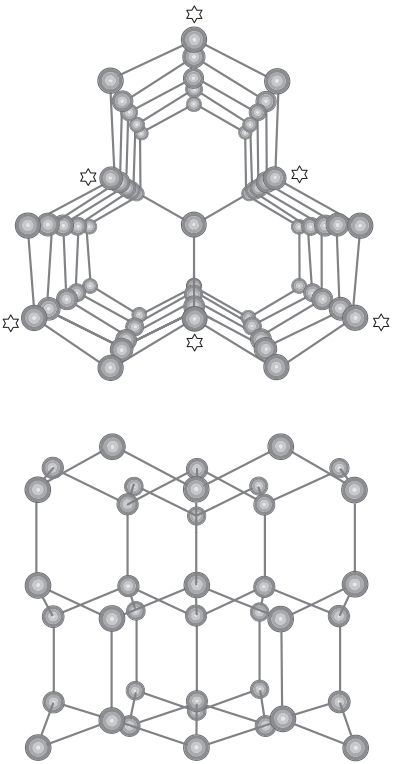
الجليد العادي

الآن ننتقِل للنظر في البنية الجزيئية للجليد نفسه، وفي هذا المقام يمكننا طرح سؤال بسيط. كيف يُمكننا ربط عدد من جزيئات الماء التي تتفاعل على النحو المشار إليه في النمط التناسقي الرباعي في الشكل ٢-٣، لتشكيل بِنية متكررة منتظمة تملأ الحجم الصحيح (الذي نعرفه من قياس كثافة الجليد) في درجة حرارة مُعينة، لنقُل إنها أقل بقليل من نقطة ذوبان الجليد، وهي درجة صفر مئوية؟

لتبسيط الصورة قليلًا، دعنا ننسى ذرات الهيدروجين مؤقتًا، ونُمثل البنية من حيث ذرات الأكسجين في كل جزيء ماء. وبذلك ستتبيَّن الإجابة عن سؤالنا في الشكل ٣-١، حيث تَتَّضِح بنية الجليد «العادي» من منظرَين مُختلفَين.

لهذه البِنية عدد من السِّمات المُثيرة للاهتمام. أولًا: يتَّسم كل جزيء ماء في الواقع بتناسُق رباعي، وهو ما يتوافق مع ما عرفناه في الفصل الثاني بشأن الطريقة التي تُفضِّل بها الجزيئات التفاعل معًا. ثانيًا: تُشكِّل جزيئات الماء بنًى حلقية سداسية (مغضَّنة)، بينما الزاوية OOO التي تتألَّف عن طريق ثلاثة جزيئات مجاورة من الماء تُشكل في الأساس الزاوية الرباعية الأسطح، وقياسها ١٠٩,٥ درجات. ولكونها قريبة جدًّا من الزاوية المتوسِّطة لجزيء الماء HOH، وهي ١٠٤,٥ درجات، فهذا يعني أن جزيئات الماء تكون «مُستقرة» جدًّا في هذا الترتيب، فإذا أظهرت ذرات الهيدروجين، فسنرى أنها لا تحيد إلا بقدْرٍ طفيفٍ جدًّا عن الخط المباشر بين مراكز الأكسجين المجاورة. بصيغةٍ أخرى مختلفة قليلًا، الروابط الهيدروجينية بين الجزيئات المجاورة تكون مُنحنية قليلًا فقط. ثالثًا: تكون أطوال الروابط الهيدروجينية (المتوسطة) كلها في البنية مُتطابقة تقريبًا.

أخيرًا، وكما هو واضح في أحد المواضع المُوضحة في الشكل ٣-١، فالبنية مفتوحة للغاية، حتى إن بإمكاننا أن نرى من خلال القنوات المفتوحة في البنية. وعلى الرغم من أن قدْر «المساحة الفارغة» في البنية مُبالَغ فيه عن طريق تمثيل كل جزيء ماءٍ بواسطة ذرة أكسجينه المركزية، فتظل هناك مساحة كافية لإقحام جزيئات ماء أخرى في هذه القنوات إذا استبدلت تمثيل الكثافة الإلكترونية الشاغلة للمساحة في الشكل ٢-٢ بكل ذرة أكسجين. وعدم حدوث هذا في الثلج هو نتيجة للقيود الزاوِيَّة المفروضة على النسق بسبب اتجاهية تفاعل جزيئات الماء بعضها مع بعض. وحتى لو حاولنا إقحام المزيد من الجزيئات في هذه المساحات، فإنها لن تتمكن من تكوين رابطة مع الجزيئات الموجودة هناك بالفعل.



شكل ٣-١: بنية «الثلج العادي» عند النظر إليه من اتجاهَين عمودِيَّين. ولأغراضٍ متعلقة بالتوضيح، مُوضَّح فقط مراكز الأكسجين في جزيئات الماء.

ولو أردنا استخدام القوة وأقحمنا جزيئات الماء الأخرى عنوة في هذه الثقوب، فسنملأ الفراغ بالكامل (مما يُشكِّل نسقًا «متراصًّا»)، وسنضاعف كثافة البلورة تقريبًا. لذا، فالكثافة الحقيقية لبنية الثلج تعادل فقط نحو نصف الكثافة التي ستكون عليها حال عدم وجود شرط التفاعل الاتجاهي. وكما سنرى في الفصل الخامس، عندما نأتي للنظر فيما يُسمَّى بالخواص الشاذة للماء، ستكون هذه البنية المفتوحة ذات صلةٍ وثيقة بأسباب انخفاض كثافة الثلج عن كثافة الماء، ما يجعله يطفو عليه.

إذا كان هذا النوع من البِنية البلُّورية المفتوحة، حقًّا، نتاجًا للشكل الهندسي الأساسي الرباعي الأسطح للنمط الرباعي المُوضَّح في الشكل ٢-٣، فإننا نتوقع أن نجد بنًى بلورية

مُماثلة في أنظمة أخرى حيث تتفاعل الذرات أو الجزيئات المُكوِّنة لهذه الأنظمة على نسق رباعي مُماثل. وهناك أنظمة على هذا النحو بالفعل. والأمثلة على ذلك تشمل السيليكات في العديد من الصخور، والألماس.

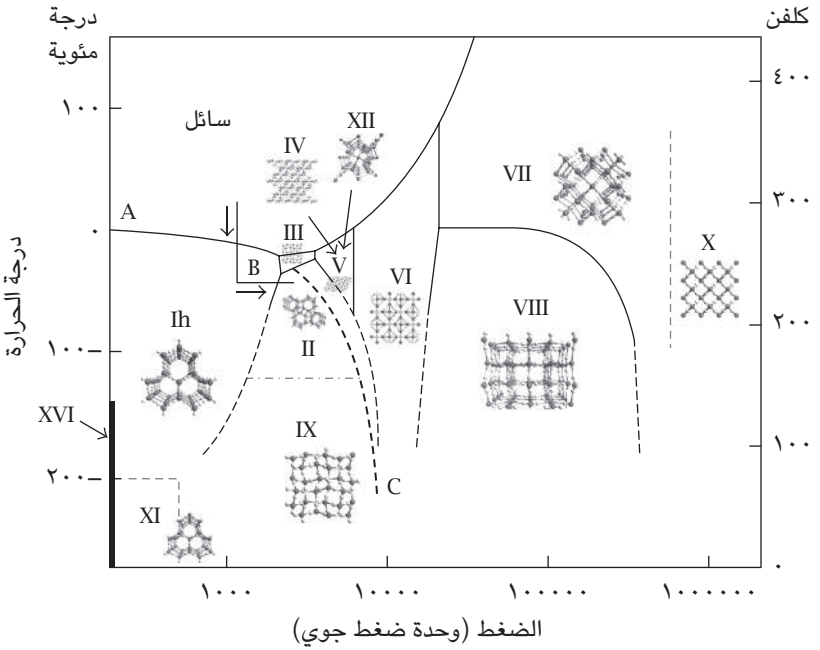
الضغط على الجليد

ولكن قصة الجليد لا تتوقف عند هذا الحد. في الواقع، كان يجب أن أُسمِّي الجليد الذي ناقشناه للتو بالجليد Ih. الرقم الروماني I لأنه كان أول نوعٍ من الجليد عرفناه، والحرف h بسبب تناظُره السداسي (كما يظهر بوضوحٍ على المستوى الجزيئي في الشكل رقم ٣-١، وأيضًا في التناظر السداسي لرقاقات الثلج الفردية عندما تُمسكها على سطح بارد). وهذه التسمية تعني أنه لا بد أن هناك أنواعًا أخرى من الجليد. وهذا صحيح فعلًا.

على سبيل المثال، إذا قمتُ بتبريد الجليد Ih إلى نحو −٣٠ درجة مئوية، وتطبيق نحو ٣٠٠٠ وحدة من الضغط الجوي، أجد «مرحلة» مختلفة من الجليد، وهو الجليد III. وهذا الجليد عبارة عن بلورة أيضًا؛ حيث تظل الجزيئات فيه تتفاعل من خلال نسَقِنا الرباعي التناسُق المألوف (أما زلتَ تتذكَّره؟). إذا قمتُ الآن بتبريد هذا الجليد III إلى نحو −٤٠ درجة مئوية، فسأحصل على مرحلةٍ أخرى، وهي الجليد II. وما قد يُثير الدهشة في البداية أنني إذا قمتُ بتطبيق الضغط على الماء «السائل» في درجة حرارة الغرفة، فإنني أحصل على مرحلةٍ أخرى عند أكثر من ١٠٠٠٠ وحدة ضغط، وهو الجليد VI، وأحصل كذلك على مرحلة أخرى (الجليد VII) عند زيادة الضغط إلى أكثر من حوالي ١٣٠٠٠ وحدة ضغط.

في الواقع، وطبقًا لآخر إحصاء، هناك ستة عشر (أو سبعة عشر حسب أقوال البعض) طورًا بلوريًّا معروفًا، مما يعني أن الجليد يتبلور بست عشرة (أو سبع عشرة) بِنية مختلفة. أي إن هناك ست عشرة أو سبع عشرة طريقة مختلفة تنتظم بها جزيئات الماء لتُشكِّل بِنًى بلورية مختلفة.

تعتمد كل هذه البنى على النمط الرباعي التناسُق للشكل ٢-٣، وتظهر الشروط المطلوبة، من درجة حرارة وضغط، لتحقيق أقصى استفادة من هذه الأطوار في «مُخطط أطوار» الماء في الشكل ٣-٢. على سبيل المثال، إذا أخذت إحداثي النقطة ٢٠ درجة مئوية ونحو ١٠٠٠ وحدة ضغط جوي، أجدني في منطقة استقرار الماء السائل. وإذا بقيتُ عند نفس مستوى الضغط وخفضت درجة الحرارة إلى نحو −٤٠ درجة مئوية، فإني أعبُر



شكل ٣-٢: مخطط أطوار الجليد، يظهر الأطوار التي نتوقع رؤيتها عند درجات حرارة وضغوط مختلفة. الصور المصغرة تظهر البنى المختلفة للجليد. الخط المتقطع BC هو امتداد افتراضي لخط الذوبان AB إلى ضغوط أعلى.

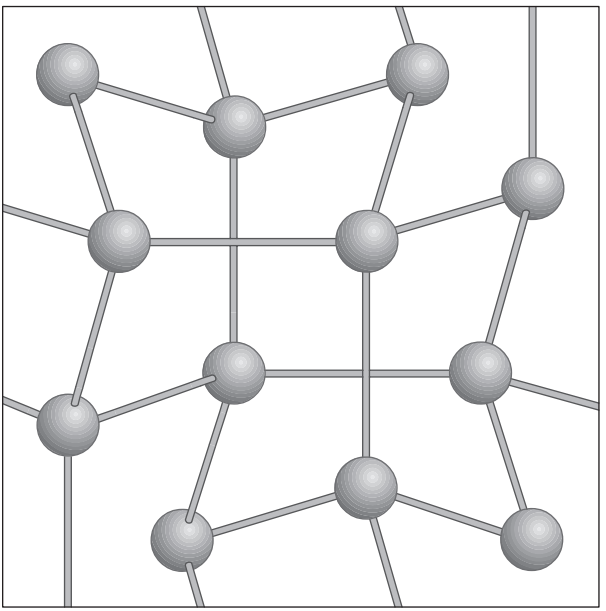
خطًّا فاصلًا (حد الطور) إلى الجليد Ih. إذا زدتُ الضغط الآن إلى نحو ٣٠٠٠ وحدة ضغط، فسأتجاوز حدَّ طورٍ آخر وصولًا إلى الجليد II. وهكذا.

تَظهر بنى كل من هذه الأطوار في الصور المُصغرة على مخطط الأطوار. ومن المثير للاهتمام النظر إلى بعضها بشيءٍ من التفصيل لرؤية الاضطراب الذي يمكن أن تُسببه جزيئات الماء.

التنوع الجزيئي

لننظر أولًا مرة أخرى فيما يحدُث عندما أزيد الضغط على الجليد Ih إلى نحو ٣٠٠٠ وحدة ضغط عند درجة حرارة حوالي −٣٠ درجة مئوية لتكوين الجليد III. إن زيادة

الضغط ستضغط الجليد بحيث يشغل حيزًا أقل. وسيتسبب هذا في تشويه نسق ترتيب الجزيئات في الجليد Ih (شكل ٣-١) على نحوٍ متزايد، حتى يصل إلى نقطةٍ عندها يكون من المُريح أكثر للجزيئات أن تُعيد تنظيم نفسها لتشكيل بِنيةٍ مختلفة تشغل حيزًا أقل.



شكل ٣-٣: بنية الجليد III، مُوضح فيها مراكز ذرات الأكسجين في جزيئات الماء فقط.

الشكل ٣-٣ يُقدِّم لمحةً عن الكيفية التي أعادت بها الجزيئات تنظيم نفسها لتشغل حيزًا أقل (حوالي ٢٠ في المائة في هذه الحالة) من خلال مشهد الجليد III المُوضح فيه؛ يُمكننا التقاط حلقة «خماسية» واحدة على الأقل في الخلية الوحدة المُوضحة (كم حلقة يمكنك إيجادها؟). وفي المتوسط سوف تشغل الجزيئات في هذه الحلقة حيزًا أقل مما كانت ستشغله في الحلقات السداسية للجليد Ih.

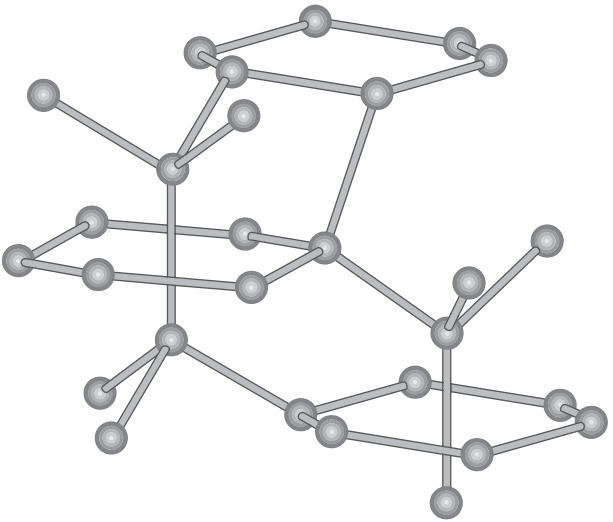
تُعتبر إعادة التنظيم في حلقات أقصر واحدةً من الطرق التي تتحايل بها جزيئات الماء لشغل حيزٍ أقل عندما تُوضع تحت الضغط. ويتم الحفاظ على النمط الرباعي، على

الرغم من أن روابط الهيدروجين ستُصبح مشدودةً ومشوهة على نحوٍ متزايد من أجل استيعاب الحلقات الأصغر. في حالة الجليد III، يتباين متوسط الزوايا للرابطة OOO بين ٨٨ درجة و١٤٨ درجة. هناك أيضًا زيادة في التبايُن في أطوال الروابط. فبينما كانت في الجليد Ih كلها شِبه متساوية عند ٠,٢٧٦ نانومتر، فإنها تتراوح بين ٠,٢٧١ نانومتر و٠,٢٨٣ نانومتر في حالة الجليد III. لذا، لكي تتمكن روابط الهيدروجين من شغل حيزٍ أقل مع الاحتفاظ بنمط التناسق العام الرباعي الزوايا، كان عليها أن تتغيَّر لتسهيل تكوين بنًى حلقية أصغر تشغل حيزًا أقل.

ولكن ليست هذه الطريقة الوحيدة التي تستجيب بها الجزيئات للحاجة إلى شغل حيزٍ أقل عند زيادة الضغط. فمع رفع الضغط، يكون هناك حدٌّ لحجم الشد والإجهاد الذي يُمكننا أن نُحدثه في روابط الهيدروجين لتكوين حلقاتٍ أقصر. لذا، للتغلب على هذه المشكلة، تتعاون الجزيئات للقيام بشيءٍ مدهش؛ إذ تستغل بعضًا من المساحة الفارغة التي أشرْنا إليها بالفعل بطريقة مبتكرة عن طريق «تمرير» روابط هيدروجينية عبر حلقات سداسية.

من الأمثلة على ذلك الجليد IV (شكل ٣-٤). مرة أخرى، يتم الاحتفاظ بالنمط الرباعي بالكامل، وتحدث زيادة أخرى في نطاق تشوُّه طول الرابطة تتراوح ما بين ٠,٢٧٤ نانومتر إلى ٠,٣٢٤ نانومتر، ليس من المستغرب أن الروابط الأطول هي تلك المرتبطة بالروابط «المنسوجة» التي «تتمدَّد» من خلال التنافُرات بين الجزيئات المُحيطة. تبلغ تغيرات زاوية الرابطة OOO ثلثين فقط من نظيرتها في الجليد III، مما يشير إلى أن تمرير الروابط الهيدروجينية يُخفف قدرًا من الإجهاد الزاوي لعملية الارتباط.

تُؤخَذ فكرة التمرير هذه إلى أقصى الحدود في الجليد العالي الضغط؛ VI، وVII، وVIII. يمكن اعتبار كلٍّ من هذه البِنى الثلاث شبكتَين متطابقتَين من جزيئات الماء تتداخلان بالكامل لشغل الحيز المتاح. يتضح هذا بأسهل ما يكون من خلال الجليد VIII، الذي يوضح الشكل ٣-٥ طريقة تداخل بنياته. ولكن كل شبكة من الشبكات البلورية الفرعية المتداخِلة لا تزال محتفظةً بالنمط الرباعي التناسُق، وبما أن الشبكات الفردية رباعية الزوايا، فإن القوة المُحفزة لتشوُّه الرابطة قد اختفت تقريبًا. والشد الموجود ناتج عن التمدُّد المحدود لكل شبكةٍ من وضعها المثالي لاستيعاب حجم جزيء الماء في «الثقوب»، وإلا فلن تكون هناك مساحة كافية لاستيعاب الشبكة «الأخرى». وينجم عن ذلك تمديد لروابط الهيدروجين بنسبة حوالي ٥ في المائة؛ أي إلى ٠,٢٨٨ نانومتر.



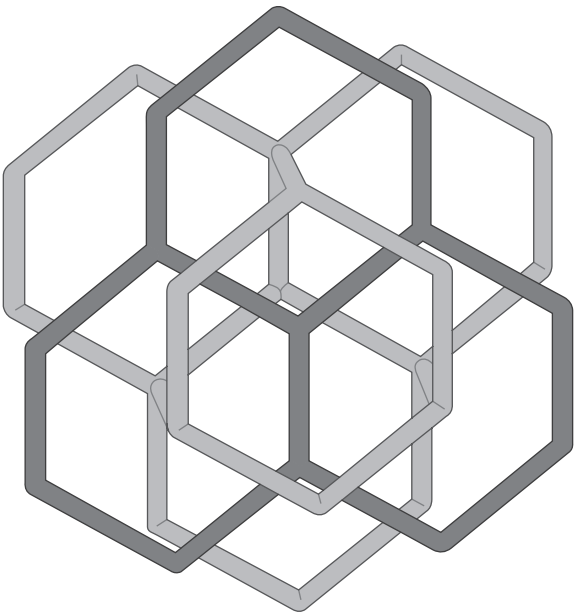
شكل ٣-٤: بنية الجليد IV، تُظهر كيف يمكن لروابط الهيدروجين أن «تشق طريقها» بين الحلقات.

قد نلاحظ بصورة عابرة أن بنية كل شبكة من الشبكات المتداخلة هي نفس بنية الألماس. ومن المُثير للاهتمام التكهُّن بما إذا كان يمكن إقناع شبكتَين من الألماس بالتداخل بطريقةٍ مُماثلة. وإذا كان الأمر كذلك، هل ستكون المادة الناتجة أقوى؟ أو أجمل؟

الخلاصة

من هذه الدراسة السريعة لأربع بِنًى للجليد، يمكننا أن نرى أن الأنساق التي تنتظم فيها جزيئات الماء تُظهر جميعها شكلًا هندسيًّا رباعيَّ التناسق، وتتوافق مع النمط الرباعي لشكل ٢-٣. ولكن هناك تبايُنات في أطوال روابط الهيدروجين وزوايا ذرات الأكسجين OOO التي تُستحث بواسطة الضغط عند تكوين بِنى الجليد العالية الضغط.

يبدو أن قدرة جزيء الماء على ثَني الرابطة «سهلة» نسبيًّا، بما يسمح له أن يستوعب بسهولة انحرافات كبيرة عن القيمة المثالية شبه الرباعية. فعند تقليل الحيز المتاح لتلك



شكل ٣-٥: بنية الجليد VIII. لإبراز الشبكات المتداخلة، مُوضح الروابط المرتبطة بالهيدروجين فقط.

الجزيئات عن طريق زيادة الضغط، تستغل الجزيئات احتمالات تشوُّه رابطة الهيدروجين عن طريق تنظيم نفسها بعددٍ كبير ومُدهش من الطرق المختلفة لملء المساحة المتاحة. ولكنها تحتفظ بترتيبها المَوضعي المفضل الرباعي التناسُق في كل هذه البِنى.

عند مناقشة الجزيء نفسه، خلصنا في منتصف الفصل الثاني إلى أنه قد يبدو جزيئًا عاديًّا. وبعد ملاحظة تعدُّد قدرات الجزيء في تكوين البنى في الأنواع المختلفة من الجليد، ربما يجب أن نبدأ في مراجعة هذا الرأي. يبدو أن النمط الرباعي متين ومرِن إلى حدٍّ ملحوظ؛ إذ يحافظ على تماسكه وتمامه في ظل نطاقٍ واسع جدًّا من مستويات الحرارة والضغط. هل يمكن أن تكون قدراته المُتعددة تلك ذات صلةٍ بخصائصه ووظيفته؟ تلك مسألة سنعود إليها عند مناقشة كلٍّ من الحالات الشاذَّة للماء (الفصل الخامس)، ودوره البيولوجي المشهود له (الفصل السادس).

الجليد «الشبحي» والهيدروجينات «المفقودة»

ربما لاحظت بعض التناقضات الظاهرية فيما قيل حتى الآن بشأن الجليد وطريقتي في عرض البِنى المختلفة له. سأحاول الآن توضيح هذه الأمور. وفي معرض ذلك، سنُلقي الضوء على جوانب من كلٍّ من الماء البلوري والماء السائل تَبيَّن أنها ليست فقط مُثيرة للاهتمام، ولكنها أيضًا مهمة جدًّا في فهم خصائصهما وسلوكهما.

أولًا: في مُخطط الأطوار في الشكل ٣-٢، يشار إلى مستويات الضغوط والحرارة التي يظهر عندها طوران مُعينان من الجليد (الجليد IV وXII) لا بمنطقة على المُخطط، ولكن بأسهُمٍ تُشير إلى منطقة الاستقرار لجليد V.

يعزى هذا إلى أن هذَين الطورَين شبه مُستقرَّين؛ ففي منطقة الضغط ودرجة الحرارة المشار إليها، يكون الجليد V هو الطور المستقر، ويمكن تحضير الجليد IV وXII فقط بإجراءاتٍ محددة جدًّا، قد ينطوي بعضها على إضافة كميات صغيرة من الشوائب التي تبدو أنها تُحقق الاستقرار للبُنى شِبه المستقرة. وتوضيحًا للجوانب الجذَّابة (أو المُحبطة) في مجال البحث في الأنواع المختلفة من الجليد، قد أذكر بصورةٍ عابرة أن الجليد XII قد رُصد لأول مرةٍ باعتباره طورًا شِبه مستقر في منطقة الجليد V، لكن وُجِد منذ ذلك الحين أنه يظهر كطورٍ مُستقر في درجات حرارة أقل.

الجليد XVI، الذي اكتُشف في عام ٢٠١٤، يكون أيضًا شِبه مُستقر عند كلٍّ من الضغط العادي والعالي. ومن المُثير للاهتمام أنه يُفترَض أنه يكون مُستقرًّا تحت الضغط «السلبي»؛ أي تحت الشد. لذا قد تكون منطقة استقراره إلى اليسار من الشكل ٣-٢. وبنية هذا الطور من الجليد المكتشف حديثًا مُثيرة للاهتمام للغاية. وسنلتقي به مرة أخرى في شكل مختلف في الفصل السادس.

ثانيًا: عند توضيح بِنية الجليد Ih، وIII، وIV في الأشكال ٤، و٦، و٧، أظهرتُ فقط مراكز ذرات الأكسجين للتأكيد على الطرُق التي ترتبِط بها الجزيئات معًا. واستخدمتُ تمثيلًا أبسط يوضح فقط الروابط الهيدروجينية بين جزيئات الماء عند التأكيد على بِنية الشبكة البلورية الفرعية المتداخلة للجليد VIII (شكل ٣-٥). فلماذا لم أظهر الهيدروجينات؟

علاوة على ذلك، كنت قد تحفَّظت قليلًا في القول إن هناك ست عشرة أو سبع عشرة بِنية معروفة للجليد، بينما يعرض ثلاث عشرة فقط في الشكل ٣-٢. أين البقية ولماذا لم تُعرض على هذا المُخطط؟ الإجابات عن هذه الأسئلة مترابطة.

الهيدروجينات غير المُنتظمة وقواعد الجليد

الإجابة عن السؤال الثاني ببساطة هي أنَّني لم أُظهر الهيدروجينات في أطوار الجليد Ih، وIII، وIV؛ لأننا لا نعرف أين هي. قد يبدو هذا اعترافًا غريبًا، ولكن في سبيل شرحِه أُعيد تقديم النمط الرباعي للشكل ٢-٣ بالتكرار السداسي في النصف الأيسر من الشكل ٣-٦. لماذا أُكرِّره ست مرات؟ انظر بعناية إلى كل صورةٍ من الصور الستِّ وسيتضح لك أنها ليست واحدة؛ فهي تختلف في مواقع ذرات الهيدروجين، أو اتجاه الجزيء المركزي، الذي هو في جوهره نفس الشيء.

يُظهر كلٌّ من هذه الأشكال بِنية موضعية مضبوطة رباعية التناسُق. إذا ركزنا على ذرات الهيدروجين، يُمكننا أن نقنع أنفسنا بأن نسق ترتيبها متوافق مع مجموعة من القواعد المُتعلقة ببُنى الجليد التي تحدَّدت لأول مرة في ورقة بحثية كلاسيكية نُشرت في عام ١٩٣٣، لجيه دي بيرنال وآر إتش فاولر، والتي لعبت دورًا جوهريًّا جدًّا في فهمِنا للماء، حتى إنني سأشير إليها عدة مرات. تنصُّ هذه القواعد — التي تُعبر بشكلٍ هندسي عن الكيمياء المعروفة — على أنه في الجليد:

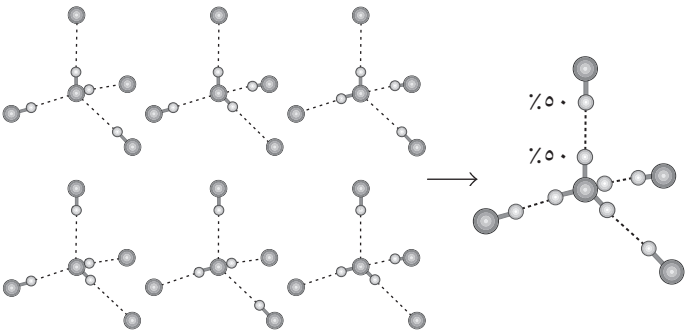
(١) ترتبط كل ذرة أكسجين تساهميًّا بذرَّتَين من الهيدروجين. وهذا في الأساس هو تعريف جزيء الماء.

(٢) كل ذرةٍ من ذرتَي الهيدروجين في كل جزيء ماء تُشكِّل رابطة هيدروجينية مع ذرةٍ أخرى من أكسجين الماء، بحيث تكون هناك ذرة هيدروجين واحدة بالضبط بين كل زوجٍ من ذرات الأكسجين.

من إحدى نتائج تطبيق هاتَين القاعدتَين أن كل جزيء ماء يرتبط بأربعة جزيئات مجاورة له من خلال الترابط الهيدروجيني، كما رأينا في النمط الرباعي التناسُق الذي كان محور نقاشنا حتى الآن.

بالنظر الآن إلى الأمثلة الستة لدَينا في الجانب الأيسر من الشكل ٣-٦، نرى أن جزيء الماء المركزي يتَّجه اتجاهًا مختلفًا في كلِّ مثال. ومن ثَم يجب أن تكون اتجاهات الجزيئات الأربعة المجاورة مختلفة لتتَّفق مع قاعدتَي بيرنال–فاولر.

عندما ننظر الآن في كيفية ترتيب كثيرٍ من جزيئات الماء داخل بلورة، نجد هذا الشرط الهيدروجيني يزيد الأمور تعقيدًا قليلًا. فعند أخذ أيٍّ من البِنى البلورية التي ناقشناها في



شكل ٣-٦: الأنساق الستة المُمكِنة لذرات الهيدروجين في النمط الرباعي (على اليسار)، والبنية العادية التي تُرصد من خلال تجربة حيود (على اليمين).

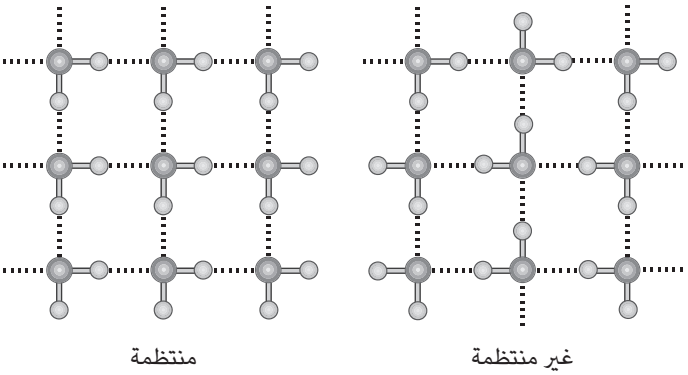
إطار مواقع مراكز الأكسجين في جزيئات الماء، نصطدم باحتمالية وجود نوعين مختلفَين من البنى البلورية عند إضافة الهيدروجينات.

في النوع الأول، تكون «اتجاهات» جزيئات الماء، وكذلك مواقعها، «منتظمة». هذا يعني أنه في كل وحدة خلية، تكون جزيئات الماء المكافئة في الاتجاه نفسه. أما في النوع الثاني، فتكون غير مُنتظمة؛ ففي كل وحدة خلية، لا تكون جزيئات الماء المكافئة في الاتجاه نفسه. ويتَّضح هذا الفرق، بغرَض تبسيطه، في شكلٍ تناظُري ثنائي الأبعاد، في الشكل ٣-٧، يُمكننا من خلاله أن نرى أن قواعد الجليد ملحوظة في كل من البنى المنتظمة وغير المنتظمة.

بينما قد يجب أن نتحدَّث اصطلاحًا عن هذا الانتظام/الاضطراب بوصفه نظامًا «اتجاهيًّا»، من حيث إنه يتعلق بالاتجاهات النسبية لجزيئات الماء، إلا إننا عادة ما نتحدث عنه بوصفه انتظامًا/اضطرابًا هيدروجينيًّا، ونميل إلى استخدام المُصطلحَين المختلفَين تبادليًّا.

إذن، لماذا ترتبط هذه التفصيلة الغامضة ظاهريًّا بالأسئلة التي طُرحت في وقتٍ سابق؟

أولًا: بعض أنواع الجليد الموضحة في مُخطط الأطوار في الشكل ٣-٢ غير منتظم اتجاهيًّا، وبعضها يكون منتظمًا. عندما تكون غير منتظمة اتجاهيًّا، لا نعرف في أي طرف من رابطة الهيدروجين يجب أن نتوقع رؤية ذرة هيدروجين، بما أن البنية التي نقيسها



شكل ٣-٧: الفرق (في شكل تناظري ثنائي الأبعاد) بين بِنية بلورية منتظمة هيدروجينيًّا (على اليسار)، وبنية غير مُنتظمة هيدروجينيًّا (على اليمين).

يتوسط قياسها جميع الجزيئات المكافئة في البلورة؛ ففي نصف الحالات ستكون ذرة الهيدروجين مرتبطةً بجزيء الماء المركزي في نمطِنا الرباعي التناسُق، وفي النصف الآخر ستكون مرتبطة بالجزيء المجاور.

سيُظهر تحديد بِنيتنا البلُّورية (الذي يتم على النحو الأمثل من خلال التشتُّت النيوتروني) جميع المواقع المُمكنة للهيدروجينات؛ لذا سيبدو أن بنيتنا تحتوي على هيدروجينات في كلا طرفَي الرابطة الهيدروجينية. ولكن بما أن كل رابطة هيدروجينية في الواقع يمكن أن تستوعب ذرة هيدروجين واحدة فقط، فإن احتمال شغل كل موقعٍ من هذه المواقع الهيدروجينية بذرات الهيدروجين سيكون بنسبة ٥٠ في المائة فقط (انظر الجزء الأيمن من الشكل ٣-٦). لذا لا نَجني شيئًا من إظهار ذرات الهيدروجين في بِنيةٍ غير مُنتظمة؛ ومن هنا جاء تجاهُلي لها في الأشكال السابقة.

من بين أنواع الجليد الموضحة في مُخططنا للأطوار، تُعتبر الأطوار Ih، وIII، وIV، وV، وVI، وVII، وXII، وXVI مضطربة اتجاهيًّا، بينما الأنواع II، وVIII، وIX، وXI مُنتظمة اتجاهيًّا. أما الجليد X، فلَه وضع مُختلف نوعًا ما سنذكُره لاحقًا. ولحُسن الحظ أن الجليد IX ليس له أي علاقة على الإطلاق بمرحلة «الجليد التاسع» في رواية «مهد القطة» لكورت فونيجت، وهي مرحلة كانت لها عواقب مروعة، على الرغم من أننا سنُواجه أصداءً لبعض التحذيرات المُشابهة المروعة عندما ننظر في حلقة الماء المُبلمَر في الفصل السابع.

أطوار الجليد السيئة السلوك

نحن الآن نقترب قليلًا من معرفة السبب وراء وجود ثلاثة (أو أربعة) أطوار مفقودة من مُخطط الأطوار في الشكل ٣-٢. وخلال رحلتنا لاكتشاف السبب، سنتعامل مع بعض الإشكاليات المُثيرة للاهتمام المُتعلقة بجوانب مهمَّة من سلوك كلٍّ من الجليد والماء السائل.

لننظُر في الأطوار المُضطربة أولًا. هناك مبدأ معروف في الفيزياء ينص على أن الانتظام يزداد مع انخفاض درجة الحرارة. إذن، بالتأكيد عندما نُخفِّض الحرارة، يجب أن تتغير اتجاهات جزيئات الماء حتى يتم إنتاج طَور مُنتظم من الجليد؟

يحدُث هذا بسهولةٍ فعلًا في حالات الأطوار غير المُنتظمة III وVII؛ فعندما نُخفِّض حرارتهما، تتغير اتجاهات الماء لتشكيل الأطوار المنتظمة IX وVIII على التوالي. ولكن الأطوار الأخرى المُضطربة تكون أقلَّ تجاوبًا بكثير. على سبيل المثال، الجليد XI — وهو النسخة المُنتظمة من الجليد Ih المألوف — لا يتكوَّن ببساطة عن طريق التبريد. بالمِثل، تتصرَّف الأطوار الأخرى غير المُنتظِمة IV، V، VI، وXII — مهما كانت وتيرة تبريدها بطيئة — على نحوٍ سيئ وتبقى غير مُنتظمة. فهي عالِقة في بِنياتها غير المُنتظمة حتى عند درجات الحرارة المنخفضة جدًّا.

هذا لا يعني أننا نكسر القاعدة الثالثة للديناميكا الحرارية التي تُخبرنا بأن كلَّ شيءٍ يجب أن يكون مُنتظمًا عند درجة الصفر المُطلَق. إنما يعني فقط أننا لا نستطيع الوصول إلى البنى المُنتظمة عن طريق التبريد البسيط. فهناك شيء يحول دون حدوث عملية الانتظام.

ويرجع السبب في هذا الشيء جزئيًّا إلى قاعدتَي بيرنال-فاولر.

تنظيم أطوار الجليد

لننظر مرةً أخرى إلى الشكل التناظُري الثنائي الأبعاد لجزء صغير من بلورة جليد غير منتظمة في الشكل ٣-٧. يتبع نسق الترتيب قاعدتَي بيرنال-فاولر بوضوح؛ إذ يتألف كلُّ جزيءِ ماء من ذرة أكسجين مرتبطة برابطة تساهمية بذرتَي هيدروجين، ترتبط كل منهما بجزيئات الماء المجاورة، وكل ذرة أكسجين في الماء مرتبطة أيضًا بذرتَي أكسجين مُجاورتَين أُخريَين من خلال هيدروجينات جزيئات الماء الأخرى تلك.

إذا أردنا تنظيم هذه المجموعة من جزيئات الماء، فسنُضطر إلى تدوير عدد من الجزيئات لتأخذ اتجاهات مختلفة. على سبيل المثال، تدوير الجزيء المركزي بزاوية ١٨٠

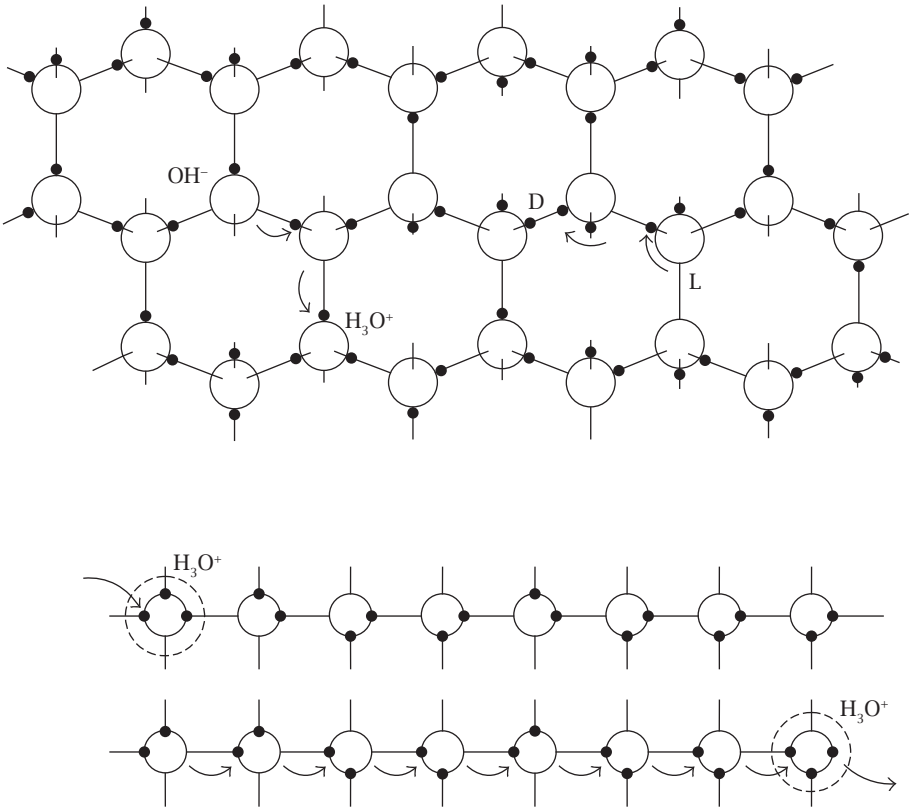
درجة سيدفعه إلى الاتجاه المُوضَّح في البِنية المُنتظمة. ولكن قيود بيرنال-فاولر تَحُول دون إجراء هذا التدوير؛ فهناك بالفعل ذرات هيدروجين من الجزيئات المُجاورة على الروابط التي يحتاج هذا التدوير لوضع ذرات الهيدروجين الخاصة به عليها؛ لذا لا يمكن تنفيذ هذه الحركة. ولتحقيق تقدُّم أكثر، نحتاج إلى العثور على آلية تجعل هذه الأنواع من الدورانات مُمكنة.

قد يكون أحد الاقتراحات للقيام بذلك القول بضرورة القيام بعدد من الحركات «المتناسقة» في وقت واحد بواسطة عددٍ من الجزيئات، بحيث تظلُّ قواعد بيرنال-فاولر مستوفاة. هذا ممكن من حيث المبدأ، ولكن الطاقة اللازمة لتنشيط مثل هذه العملية التعاونية كبيرة؛ ولذا من غير المُرجَّح أن تكون متاحةً في درجات الحرارة المنخفِضة. ثمة اقتراح آخر يتمثل في استعراض احتمالات وجود عيوب في بِنية الجليد قد تُسهل الحركات الاتجاهية المطلوبة.

نعلَم من الخصائص الكهربائية للجليد أن هذه العيوب يجب أن تكون موجودة؛ إذ يُوصِّل الجليد الكهرباء من خلال حركة البروتونات؛ لذا لا بد أن هناك آلية تمكِّن الهيدروجين من التحرك في بنية الجليد عند تطبيق مجال كهربائي، كأن يتحرك من اليسار إلى اليمين، كما في الشكل ٣-٧. بمجرد أن تُصبح هذه العيوب حاضرة، ولو بأعداد قليلة، ستُصبح الحركات الاتجاهية ممكنة، وقد تستطيع الامتداد عبر البلورة.

ثمة نوعان من العيوب معروفان عمومًا في بِنى الجليد؛ العيوب «الاتجاهية» (أو عيوب بيروم، نسبةً لاسم مُقترِحها)، والعيوب «الأيونية». وكما هو مُوضَّح في النصف العلوي من الشكل ٣-٨، هناك نوعان من عيوب بيروم؛ العيب D (من الألمانية doppelbesetze، وتعني مزدوجة الامتلاء)، والعيب L (من leere، وتعني فارغ). مِن المفترض أن تكون هذه الأوصاف واضحةً وغنية عن البيان. العيوب الأيونية هي ببساطة H_3O^+ وOH^-، والتي تكونت من خلال انتقال بروتون (هيدروجين) من جزيء إلى آخَر مجاور له. تُعتبر عملية التأيين هذه عمليةً مألوفة في الماء السائل، في ظلِّ ظهور كِلا الأيونَين بتركيز ١ في ١٠ ملايين جزيء ماء في حالة الحموضة المُحايدة.

يمكن لأي نوع من كِلا النوعَين من العيوب أن «يحرر» الحركات الدورانية، كما هو مشار إليه في النصف السُّفلي من الشكل رقم ٣-٨ للعيب الأيوني H_3O^+؛ إذ تترك العيوب النقطية المهاجرة خلفها أثرًا من جزيئات ماء تغيَّرت اتجاهاتها. وهكذا يُصبح لدَينا الآن آلية ممكنة لإعادة توجيه الجزيئات، بحيث يمكن لبلورة الجليد غير المنتظمة الوصول إلى بنيتها المفضلة المنتظمة والمنخفضة الحرارة.



شكل ٣-٨: الأنواع المختلفة للعيوب في بِنى الجليد والحركة المُحتملة للعيب الأيوني H_3O^+.

يبدو فعلًا أن هذه العيوب النقطية «الجوهرية» كافية لطورَي الجليد III وVII لتنتظِم عند تبريدها وتتحوَّل إلى الطورَين IX وVIII على التوالي. ولكن لا تزال أطوار الجليد الأخرى غير المُنتظمة تقاوم التنظيم لسببٍ ما لم نفهمه بعد. ولحمل هذه الأطوار على الانتظام، وُجِد أن مِن الضروري إدخال عيوب نقطية «دخيلة» عن طريق إضافة كميات قليلة جدًّا من حمضٍ أو قاعدة، وعندما تقترِن هذه العملية بالتبريد البطيء والمُتأني، يبدو أن ذلك يُعزز عملية الانتظام.

في حالة الجليد Ih، تؤدي إضافة تركيزات صغيرة من هيدروكسيد البوتاسيوم (بمعدلِ جزيءٍ واحد في حوالي ٥٠٠ جزيء من الماء) إلى بدء الانتقال إلى حالة الانتظام مُمثلة في الجليد IX عند نحو −٢٠٠ درجة مئوية. في المقابل، يبدو أن إضافة الحمض بدلًا من القلوي (جزيء حمض الهيدروكلوريك HCl بمستوى إضافةٍ أقلَّ بكثيرٍ يصل إلى نحو جزيءٍ واحد كل ٥٠٠٠٠ جزيء) ضرورية لأطوار الجليد V، VI، وXII للوصول إلى حالة الانتظام. ويؤدي التبريد المتأنِّي لكلٍّ من هذه الأطوار الثلاثة إلى أطوارها المُنتظمة التي اكتُشِفت مؤخرًا، وهي على التوالي: XII، وXV، وXIV. وهذه هي الأطوار الثلاثة «الغائبة» في مُخططنا للأطوار (شكل ٣-٢).

الجليد X وما بعده

أعلى أطوار الجليد التي تناولناها حتى الآن من حيث مستوى الضغط هو جليد VII (أو الطور الجليدي VIII الذي يُعتبَر الشكل المنتظم اتجاهيًّا له). بما أن جزيئات الماء في هذه البنية البلورية المتداخلة المزدوجة مُتراصة بأقصى قدْر مُمكن لها، ماذا سيحدث إذا واصلتُ تطبيق الضغط على هذه البنية؟

أولًا: سأضغط الجزيئات لتقترِب أكثر بعضها من بعض. وسيكون من نتائج ذلك أن المسافة بين ذرة الهيدروجين في أحد الجزيئات وبين الأكسجين في جاره المُرتبط معه برابطة هيدروجينية ستُصبح أقصر. وإذا واصلت ضغط البلورة أكثر، سيأتي وقتٌ تكون فيه كل ذرة هيدروجين على نفس المسافة من جزيء الماء «المصدر» وجاره «المرتبط معه برابطة هيدروجينية». عند هذه المرحلة، لن يتمكَّن الهيدروجين من التمييز بين الجزيء «المصدر» والجزيء «الجار». وستكون الرابطة الهيدروجينية قد أصبحت مُتماثلة، ولن يكون لقاعدتي بيرنال-فاولر اللتَين تتطلَّبان وجود جزيئات H_2O متميزة أي أهمية في هذا المقام. وبذلك سأكون قد حصلتُ في الواقع على بلورة من ذرات الهيدروجين والأكسجين، بدلًا من جزيئات الماء المميَّزة.

كان مقدار الضغط الذي يحدُث فيه مثل هذا الانتقال إلى ما اصطُلح على تسميته بالجليد X مجالًا نشطًا للتحقيق النظري والتجريبي لسنواتٍ عديدة. وعلى الرغم من أن الخواص الطيفية التي قد تُشير إلى حدوث انتقال إلى جليدٍ مُتماثل قد رُصِدت عند مقادير من الضغط تُقدَّر بنحو نصف مليون وحدة ضغط جوي، فلم يتم حتى الآن التعرُّف بشكلٍ قاطع على الجليد X.

كانت هناك تكهنات حول ما قد يحدث لجزيئاتنا المائية المسكينة مع تطبيق مقادير أكبر من الضغط. بل وطُرحت بِنًى أيونية أكثر كثافة، وثمة توقُّع بأن المادة ستُصبح حتمًا في النهاية مادة معدنية. قد تكون هذه التكهنات مُبهرة، لكنها لا تؤثر فعليًّا على فهمنا لخواص وسلوك الماء على الأرض؛ لذا سنترك هذا النقاش عند هذا الحد ونعود إلى الأرض.

حالة الجليد المكعب الغريبة

حتى الآن، امتنعتُ — ربما إلى حدٍّ مزعج — عن التصريح بما إذا كان هناك ستة عشر أم سبعة عشر طورًا معروفًا للجليد. وسأشرح الآن لماذا لم أكن باتًّا بشأن ذلك، وفي هذا الإطار سنمرُّ ببعض الأمور الأخرى المُثيرة للاهتمام التي لا تتعلَّق فقط بالجليد على الأرض، ولكن تتعلق أيضًا بالجليد في أماكن أخرى في النظام الشمسي.

لنعُد إلى الصورة العلوية لبِنية الجليد Ih في الشكل ٣-١. يُمكننا تصوُّر هذه البِنية كما لو كانت قد تكوَّنت عن طريق ربط طبقاتٍ من حلقات سُداسية مثنية بعضها فوق بعض. والطريقة التي رُصَّت بها هذه الطبقات للجليد Ih، بحسب المنظر المُوضَّح في النصف العلوي من الشكل، سارت بحيث تكون الحلقات بعضها فوق بعض، وهذا يُفسِّر وجود القنوات المفتوحة التي أشرتُ إليها سابقًا.

علاوة على ذلك، إذا نظرنا إلى طبقتَين متجاورتَين متراصتَين بعضهما فوق بعض، نرى أنهما صورتان طبق الأصل بعضهما من بعض، ربما يُمكن ملاحظة هذا بسهولة في المنظر السفلي في الشكل ٣-١. وإذا وسمْنا كل طبقة بحيث نُوضِّح هذا الاختلاف، فسنُسمي هذَين النوعَين من الطبقات النوع A والنوع C.

غير أن هذا الترتيب ACACAC الذي نجِدُه في الجليد Ih ليس الطريقة الوحيدة لرصِّ هذه الطبقات السداسية. فثمة طريقة أخرى.

انظر إلى الطبقتَين العلويتَين في الصورة العلوية من الشكل ٣-١. تخيَّل قطع الروابط الهيدروجينية التي تربط الطبقتَين العلويتَين (تحت الأكسجين المؤشَّر بالنجوم)، وتدوير الطبقة العلوية بزاوية ٦٠ درجة. لم يعُد بالإمكان إعادة ربط الجزيئات الموسومة مرة أخرى بالطبقة أدناها. ولكن يُمكن جعل الطبقة العلوية في موقعٍ يمكنها منه إعادة الارتباط مرة أخرى بالطبقة أدناها عن طريق تحريكها إلى أسفل إلى موقعٍ يمكن فيه لذرَّات الأكسجين المؤشَّرة بالنجوم الارتباط مرةً أخرى بعضها ببعض. ومع القيام بذلك، سنكون قد جلبنا بعض الجزيئات فوق القنوات المفتوحة في التراصِّ الأصلي. لنُسَمِّ هذه

الطبقة العلوية المُعاد توجيهها النوع B. سيتضح هذا بسهولة باستخدام النماذج؛ لذا لا داعيَ للقلق إذا لم يكن الأمر واضحًا لك الآن، فقط لاحظ أن هناك ثلاث طرقٍ مُمكنة لتسمية كل طبقةٍ تتسق مع الطريقة التي يمكن لجزيئات الماء ذات الطبقات السداسية المَثنية أن ترتبط بها هيدروجينيًّا بعضها مع بعض، وهذه الطرق هي: A، B، وC.

لقد أشرْنا بالفعل إلى أن الجليد Ih ينتج من التراصِّ ACACAC، وأن هذا التراصَّ له تناظر سداسي. في المُقابل، يُعطينا التراصُّ ABCABC بنيةً مختلفة. فبما أن لهذا التراصِّ تناظرًا مكعبًا، فقد سُمي بالجليد Ic، أو الجليد المكعب. هذه هي بنية الجليد «المفقودة» التي كنتُ حتى الآن حذرًا بشأنها؛ ببساطة لأننا لسْنا مُقتنِعين بوجوده بالفعل؛ إذ لم يستطع أحد حتى الآن أن يصنع عيِّنةً نقية منه.

حتى منتصف ثمانينيات القرن العشرين، كان يُعتقَد فعلًا أن طور الجليد Ic هو طور حقيقي من الجليد، على الرغم من أنه لم يتشكَّل في منطقة فريدة على مُخطط أطوار الجليد. كانت المادة التي تُسمَّى الجليد المُكعب تُصنَع بعدَّة طرق، عادة عن طريق تسخين بعض أنواع الجليد العالية الضغط في نطاق الضغط المُحيط، وكان يُعتقَد أحيانًا أنه طَور آخر شِبه مستقر من أطوار الجليد. ولكن كانت هناك سِمات في بيانات حيود النيوترونات والأشعة السينية تُستخدَم لتحديد البِنى البلورية التي لا تبدو سليمةً تمامًا.

واختصارًا لقصة طويلة جدًّا لا تزال مُستمرة، ثبت بالتجربة أن ما كان يُسمَّى سابقًا بالجليد المُكعب ما هو إلا بِنية يكون فيها تراصُّ الطبقات السداسية الشكل غير مُنتظم. فلا ينتظم النسق بالترتيب ABCABCABC إلخ، ولكنه يكون نسقًا أكثر عشوائية من الطبقات، على سبيل المثال ABCBCACBACAB ... وهكذا.

كل هذه الأشكال من التراصِّ مرتبطة ارتباطًا كاملًا برابطة هيدروجينية، وتتكون من نسقنا الأساسي الرباعي التناسُق. لكنها ليست بلورات «سليمة» بالمعنى الدقيق. ربما يكون من الأفضل وصفها بالجليد Ih، ولكن مع وجود عيوبٍ في تراصِّ الطبقات بعضها فوق بعض أثناء نمو البلورة. وهذا التراصُّ للبُنى المَعيبة معروف في مواد أخرى لها بِنًى مرتبطة ببُنى الجليد، مثل كربيد السيليكون. لذا على الرغم من أن هذا النوع من البِنى الصلبة مُثير للاهتمام، فإنه ليس حكرًا على الماء.

لكن إذا لم تكن البلورة «سليمة»، فلماذا نُزعج أنفسنا بشأنها، خاصة عندما تكون بِنيتها مُضطربة نوعًا ما ويصعُب شرحها؟ الإجابة ببساطة، لأنها ذات صلةٍ بالطريقة التي يتبلور بها الماء إلى جليد، وبالشكل الذي يُوجَد عليه الماء في أماكن أخرى، في كلٍّ من غلاف الأرض الجوي، وربما في أماكن أخرى في النظام الشمسي.

لنتناول نقطة التبلوُر أولًا. عندما يتبلور سائل إلى جسمٍ صلب بلوري، يكون هناك حاجز طاقة لتكوين النواة الصغيرة الأولى للبلورة. ويتَّضح أن حاجز الطاقة لتكوين نُوِيٍّ صغيرة من «الجليد المكعب» أقل من الحاجز المطلوب لتكوين الجليد السداسي المُستقر Ih. ولكن كلما نمَتْ تلك النواة، يصبح التراصُّ التكراري للبِنية المَعيبة غير مستقر بالنسبة إلى الجليد Ih، ومن ثم يتحول إلى بنية الجليد Ih السداسي المُنتظم. وإذا كنا نُنتج الجليد في مساحات ضيقة — على سبيل المثال في الزجاج الدقيق المَسام — نجد مرةً أخرى أن الطبقات القليلة الأولى يمكن أن تكون أمثلةً على الترتيب المكعب. ويثبت بالفعل أن تراص البنية المَعيبة شِبه مستقر عن طريق تسخين البنية إلى درجة حرارة تنشط فيها حراريًّا العيوب التي ناقشناها فيما سبق، والتي تسمح بالحركات التوجيهية. وتُصحح أخطاء التراص، ويتبقى لنا الجليد Ih المألوف لنا.

إذا ابتعَدْنا عن سطح الأرض، نجد أدلةً على وجود «الجليد المكعب» وعلى أهميته المحتملة. على سبيل المثال، هناك دلائل على أن بلورات الثلج تبدأ حياتها كنُوِيٍّ «مكعبة». علاوة على ذلك، أحيانًا ما قد يحتوي الجليد في السُّحب العالية الارتفاع، التي تتكون عن طريق تبلور بخار الماء، على أمثلة للبنية «المكعبة». وقد قدَّم كريستوف شاينر وصفًا لأول مرة في عام ١٦٢٩ للهالة التي تحمل اسمه، والتي تُرى أحيانًا عند زاوية ٢٨ درجة من الشمس أو القمر عندما يُضيء أحدهما من خلال إحدى هذه السُّحب. وتتسق هذه الزاوية مع تلك الفرضية. وبالابتعاد تمامًا عن الأرض، نجد أن هناك أيضًا أدلة على أن الجليد المكعب من مكوِّنات جليد المذنَّبات، وعلى كونه كذلك عنصرًا فيزيائيًّا فلكيًّا مهمًّا في مواضع أخرى في الكون.

الفصل الرابع

الماء كسائل وكزجاج

هل يمكن أن يكون للسائل بِنية؟

من الخصائص المُميزة للسائل أنه «يتدفق». في المقابل، الأجسام الصلبة البلورية لا تتدفَّق (اللهم إلا على مقاييس زمنية طويلة جدًّا يُمكننا تجاهُلها في الوقت الحالي). نحن نعلَم أن في أيِّ بلورة، يرتكِز كل جزيء على موضع ثابت مُعين، ومن ثَم ليس لدينا مشكلة في تصوُّر أن البلورة لها بِنية. أما في السوائل، فلكي يتدفق السائل، يجب أن تتحرَّك الجزيئات. إذن، هل يُمكننا الحديث عن وجود بنية للسائل؟

الإجابة بالطبع هي: نعم يمكننا ذلك. وإلا لما حاولنا فهم كيفية تفسير بنية الماء لكثيرٍ من خواص السوائل. ولكن بينما نُوضِّح فكرة ما نَعنيه ببنية السائل، يُمكننا النظر مرةً أخرى في كيفية تصوُّرنا لبُنى الجليد بأنواعه.

لأغراض التبسيط، افترضتُ ضمنيًّا في الفصل الثالث أن جزيئات الماء في الجليد كانت ثابتة، وذلك من أجل التأكيد على الطرُق التي ترتبط بها الجزيئات من خلال الترابط الهيدروجيني لتشكيل البِنى المختلفة. ولكن في الفصل الثاني، أشرْنا إلى الاهتزازات التي تحدُث في الجزيئات المعزولة، وهي الاهتزازات التي تثني الروابط، وتُسبب تمدُّدها، وهذه الحركات ستستمر في الجليد، وإن كان بتردُّداتٍ مُضطربة قليلًا بسبب التفاعُلات بين الجزيئية مع الجزيئات المجاورة.

علاوة على ذلك، ستتذبذب الجزيئات نفسها حول مواضعها المتوسطة.

ولكن بما أن البِنية تتحدَّد ببساطة بمتوسط مواضع ذرات الهيدروجين والأكسجين التي تشكل كل جزيء ماء، وستكون الحركات حول مواضع التوازُن تلك، فإن هذه الحركات لن تؤثِّر على البنية الأساسية للبلورة. فإذا أخذنا لقطة فوتوغرافية للبِنية بزمن

تعرُّضٍ أطول من زمن الاهتزاز الاعتيادي، فسنرى تلطيخًا طفيفًا حول المواضع المتوسطة للذرات، ولكن البنية المتوسطة التي تُحدِّدها تلك المواضع المتوسطة لن تتأثر. بالمثل، لن تؤثر نوعية الحركات الدورانية لجزيئات الماء التي ناقشناها في الفصل الثالث على البنية المتوسطة.

لذا فإن بِنى الجليد التي ناقشناها هي بنًى «متوسطة الاهتزاز»، أو «بِنى V». وهي المواضع المتوسطة للجزيئات التي سنراها إذا استطعنا أخذ لقطة فوتوغرافية للبلورة على مستوى جزيئي بزمن تعرُّض أطول من المقياس الزمني المميز للحركات الاهتزازية للجزيئات.

يمكننا النظر إلى بِنية السائل بطريقةٍ مماثلة. لنأخذ أولًا لقطة فوتوغرافية بزمن تعرُّض أطول من ذلك الخاص بالاهتزازات الجزيئية الفردية، ولكنه أقصر من ذلك الذي سيُظهر الجزيئات الفردية وهي تتحرَّك من مواضعها «اللحظية». ستُخبرنا هذه اللقطة بمواضع الجزيئات قبل أن تتمكَّن من الانتشار إلى مواضع جديدة. والآن بعد مرور بضع ثوانٍ، لنأخُذ لقطة أخرى بنفس زمن التعرُّض. ستُظهر لنا هذه اللقطة ترتيبًا «لحظيًّا» آخر للجزيئات يختلف في تفاصيله عن الأول؛ إذ ستكون الجزيئات قد تحركت بين اللقطتَين.

غير أننا إذا نظرنا بعنايةٍ باستخدام الأدوات الوصفية الصحيحة، يُمكننا ملاحظة سمات بنيوية مُشتركة بين جميع اللقطات التي نلتقِطها، مثل متوسط عدد الجزيئات على مسافةٍ مُعينة من كل جزيء. إذا أوجدنا الآن متوسط هذه الخصائص البنيوية، يُمكننا توصيف البنية V للسائل.

السوائل البسيطة أولًا!

قبل أن نستعرض بِنية الماء، نحتاج إلى التراجُع قليلًا والتفكير في إشكالية بِنية السوائل في إطارٍ أعم. وفي هذا السياق، سنتبع خُطى أحد عباقرة القرن العشرين الموسوعيين، وهو جاي دي بيرنال، الذي لم يكن في طليعة روَّاد تطوير علم البلورات بصفةٍ عامة فحسب، بل كان له دور فعَّال ومؤثِّر أيضًا في الاستفادة من هذا العلم في محاولة فَهم بِنى الجزيئات البيولوجية، مثل البروتينات. في الواقع، كان اهتمامُه بكيفية عمل الأنظمة البيولوجية على المستوى الجزيئي — التي تُعَدُّ دراستها محور البيولوجيا الجزيئية — هو

ما دفعه إلى التفكير في بِنية الماء. وعندما أدرك أن الماء مُتغلغل في كل الأنظمة الحية، ذهب إلى أننا بحاجةٍ إلى فهم الماء إذا أردنا فهم الوظائف البيولوجية.

في الواقع، وكما أشرْنا في الفصل الثالث، قدَّم بيرنال، بالاشتراك مع آر إتش فاولر، في عام ١٩٣٣ أول ورقةٍ بحثية جادة عن بنية الماء. ويُقال إن تلك الورقة البحثية كُتِبت بعد مناقشة استمرت ليلةً كاملة بين المؤلفَين في مطار موسكو، الذي كان مُغلقًا بسبب الضباب. وبالنظر إلى التأثير الذي أحدثته هذه الورقة — وما زالت تُحدِثه — على فهمنا للماء والمحاليل المائية، فإن تعطُّل حركة المطار هذه ربما كانت أحد أكثر أعطال حركة النقل إثمارًا في تاريخ العلم!

على الرغم من الطابع الإبداعي المؤثر لذلك البحث، فقد وجد بيرنال فيما بعد أن نهجه آنذاك في فهم بِنية الماء السائل غير كافٍ. فقد كان، على حدِّ تعبيره، نهجًا يعتمِد «بنية بلورية، في محاولة لتصوير بِنية الماء باعتبارها مزيجًا من البِنى الرباعية التناسق المُشابهة للكوارتز والتريديمايت». كان ذلك النموذج فائق الانتظام: «كان هذا في النهاية لإثبات مقاربة مُضللة نوعًا ما، تفترض درجةً من الانتظام … في السائل أكبر مما هو موجود في الواقع».

وكما أقرَّ هو نفسه، كانت بنية الماء مُشكلة عسيرة. وكانت كذلك بشكلٍ خاص؛ لأنه في ذلك الوقت لم يكن هناك فهم كبير لبُنى السوائل الأبسط بكثير من الماء. لذا دفع بأنه كان بحاجةٍ أولًا إلى فهم السوائل الأبسط: «لا يجدُر التطرُّق إلى السوائل المُعقدة حتى نفهم البسيطة منها». ومضى لتطوير نهجٍ لفهم بنية السوائل البسيطة مكَّنه بعد مرور أكثر من عقدَين من الزمن من بناء صورةٍ لبنية الماء تتَّفق مع البيانات التجريبية المُتاحة في ذلك الوقت. وكما سنرى، فإن تلك الأفكار ذات صِلة وثيقة أيضًا بما عرفناه عن بِنية الماء من واقع ما توصَّلت إليه أحدث الدراسات والأبحاث التجريبية والبنيوية عن السوائل في عصرنا الحاضر.

السوائل هي سوائل، ليست غازات أو بلورات

تُمثل بنى السوائل إشكالية ثبت أنها إشكالية أصعب من أن يتم التطرق إليها نظريًّا. وهذا يتناقَض تمامًا مع فهمنا لبُنى البلورات والغازات. لذا، فليس مُستغربًا أن الغازات والبلورات عادة ما كانت نقاط انطلاقٍ لمحاولة فهم بِنى السوائل.

كما رأينا في الفصل الثالث، في بلورة مثالية يُمكن تحديد مواقع الجزيئات في وحدة خلية، ويمكن استنساخ بنية البلورة المُمتدة ببساطة عن طريق تكرار وحدة الخلية تلك في ثلاثة أبعاد. ويمكن فهم بنية بلورة حقيقية من خلال النظر في آثار الانحرافات عن هذه البلورة المثالية، مثل الحركات الحرارية ووجود العيوب. والطابع الدوري الكامن في البنية يُبسِّط بشكلٍ كبير حساب الخواص الفيزيائية لبلورةٍ ما من المُؤشرات الجزيئية المعروفة.

يقع الغاز المثالي في الزاوية المقابلة لبلورة مثالية بحيث تكون المواقع اللحظية للذرات النقطية غير المُتفاعلة عشوائية. ومثلما نفهم سمات بلورة حقيقية عن طريق إحداث اضطرابٍ في انتظام البلورة المثالية، فإننا نكشف سمات الغاز الحقيقي عن طريق النظر في الاضطرابات الناتجة عن إعطاء الذرات النقطية حجمًا، والسماح لها بالتفاعل عن بعد. عندما يُضغط الغاز، تندفع الجزيئات مُقتربة أكثر بعضها من بعض، ومن ثم تتفاعل على نحوٍ أقوى. وما دامت الكثافة مُنخفضة إلى حدٍّ معقول، يُمكننا التنبؤ بقدر كبير من الصواب ببنية الغاز البسيط وخواصه.

لذا لا نجد غرابةً في أن المحاولات الأولى لفهم بِنية السوائل قد تطرقت إلى المشكلة من كِلا هذين النهجين المتناقضين؛ أي عن طريق النظر إلى السائل باعتباره إما بلورة غير منتظمة للغاية وإما غازًا عالي الكثافة. وعلى الرغم من أن هذين النهجين كليهما يمكن أن يُسهِما إلى حدٍّ ما في التنبؤ ببعضٍ من خواص السوائل، فلا يمكن لأيٍّ منهما تفسير البيانات التجريبية على نحوٍ وافٍ.

بعبارة أبسط، معاملة السوائل باعتبارها موادَّ صلبة غير منتظمة يضفي عليها صفة الانتظام «أكثر مما ينبغي». أما إذا تعامَلْنا معها بوصفها غازاتٍ كثيفة، فلا يُمكننا تعيين «ما يكفي» من الانتظام لها؛ فبينما يُصبح الغاز أكثر كثافةً ويقترب من التكثف إلى سائل، لا يمكن للنظرية التعامُل مع التعقيد الذي تتَّسِم به التفاعلات التي تحدُث في السائل المكثَّف.

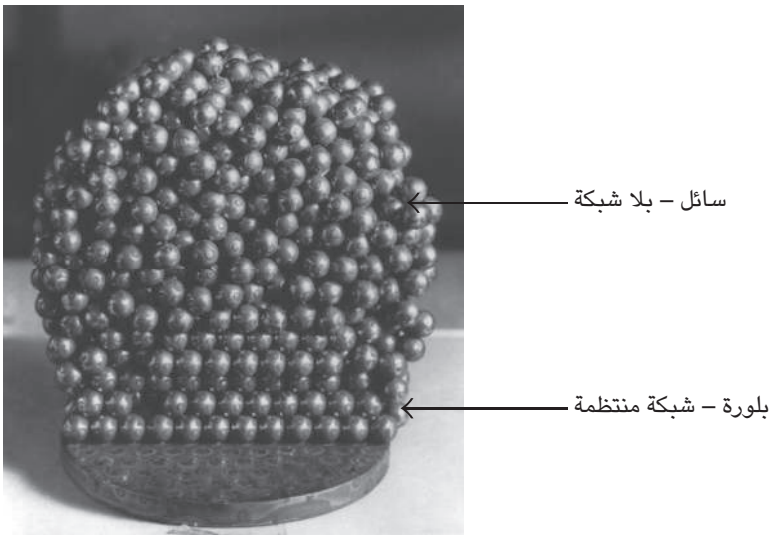
وجد بيرنال أن هذه النُّهُج «البلورية» و«الغازية» لفهم بنية السوائل غير مُرضية في أساسها. فقد أراد نموذجًا بسيطًا للسائل البسيط، الذي يتكوَّن من ذراتٍ يُمكن اعتبارها كراتٍ ناعمة جاذبة. وربما لأنه كان عالم بلورات، ومن ثم نظر إلى الأمر من زاوية بنيوية، أراد بيرنال صورةً فعلية وملموسة أكثر لبنية السائل: «نظرية من نوع ما عن السوائل تكون متجانسة مع نظرية البلورات الصلبة ومختلفة جذريًّا أيضًا، وتتمتَّع

بطبيعةٍ متجانسة في العموم». وذهب بيرنال إلى أن السائل — على عكس البلورة — لا يحتوي على خطوط أو مسطحات من الجزيئات. لذا يجب ألا يفترِض النموذج الوافي مثل هذه الكيانات البنيوية، التي ببساطة ليس لها وجود في السائل.

كان الحل الذي طرحَه بيرنال يُمثِّل فكرة مرئية للغاية وبسيطة بطبيعتها. وهي فكرة أثبتت الأعمال اللاحقة أنها صحيحة جوهريًّا كنموذج مرجعي للسوائل الحقيقية.

أكوام مُرتبة وأخرى فوضوية

سترى الطبقات الأربع أو الخمس السُّفلية من الشكل ٤-١ باعتبارها «بلورات» من كرات الصلب. فـ «الذرات» الكروية الصلبة مُرتبة في نمط مُتكرر ومنتظم، وتبرز خطوط ومسطحات الذرات التي تميز البلورات. تُعتبر هذه «كومة مُنتظمة» من الذرات؛ إذ تتفاعل الذرات معًا بطريقة تتوافق مع شكلها الكروي وصلابتها.



شكل ٤-١: نموذج بيرنال لترتيب الكرات في سائل بسيط (الجزء العلوي) مقارنة بالترتيب المُنتظم في بلورة (الجزء السفلي).

في المقابل، يُعتبر الجزء العلوي من الشكل ٤-١ «كومة» غير مُنتظمة من نفس النوع من «الذرات» الكروية الصلبة. فلا يُوجد نظام واضح، ولا توجد مسطحات أو خطوط طويلة مُستقيمة من «الذرات». ولكن لا تزال «الذرات» في حالة تفاعل بعضها مع بعض ككراتٍ صلبة بنفس الطريقة التي تتفاعل بها في البلورة. هذه الكومة الفوضوية هي في الواقع لقطة فوتوغرافية لِبِنية سائل يتكوَّن من «ذرات» كروية صلبة، وهي هنا لقطة لسائل (متجمد في الزمن) من كراتٍ من الصلب. وكما قال بيرنال ببساطة وإيجاز، الفرق في البنية بين البلورة والسائل هو الفرق نفسه بين «كومة مرتبة» و«كومة فوضوية» من الذرات. ففي كلتا الحالتين، تكون التفاعلات بين الذرات واحدة، وهي هنا تأتي في صورة تنافرات بين الكرات الصلبة. ولكن كما يُبين الشكل ٤-١، ثمة اختلاف جوهري بين بنية السائل وبنية البلورة.

السوائل البسيطة الحقيقية، بالطبع، ليست كراتٍ صلبة. من الأفضل النظر إليها باعتبارها كرات ناعمة تجذب إحداها الأخرى، ويُسمَّى التفاعُل بينها بـ «الجهد بين الجزيئي» للكرات. في حالة السوائل البسيطة، مثل الأرجون، يكون الجزء الخاص بالقوة التنافُرية من الجهد هو المسئول عن تحريك بنية السائل. وكما كان بيرنال يُحب أن يقول: «الكلمة المفتاحية في بنية السوائل هي تلك التي استخدمها همبتي دمبتي في «أليس عبر المرآة»: «اللانفاذية». فالبنية الفعلية تتحدَّد حتمًا من خلال شكل القوى التنافرية بين الجزيئات القريبة في العموم.»

قد يكون هذا النموذج — المُسمى بالرص العشوائي للكرات المُتساوية — بسيطًا، ولكن الأبحاث والدراسات اللاحقة أظهرت صحَّته الجوهرية، ليس فقط باعتباره نموذجًا لسائل بسيط مثالي، بل أيضًا بوصفه نقطة انطلاقٍ صالحة نحو نظرية الحالة السائلة عمومًا. وكما قال جون زيمان، أحد عظماء مُنظِّري الحالة السائلة في القرن العشرين: «يُنظر الآن إلى هذه الفكرة البسيطة ... بوصفها المفتاح لأي فهمٍ نوعي أو كمِّي لفيزياء السوائل.»

وتلك السوائل تشمل الماء.

من نماذج الرص إلى الشبكات

قد يكون لا بأس بهذا كصورةٍ لسائل من ذرات كروية، ولكن كيف يمكن له أن يساعدنا في فهم بنية الماء، حيث يكون التفاعل بين الجزيئات — النمط الرباعي الأساسي المرتبط

بأربع روابط هيدروجينية، والذي أودعته ذاكرتك (شكل ٢-٣) — أكثر تعقيدًا بكثيرٍ من التفاعل الكروي المتجانس بين الذرات البسيطة؟

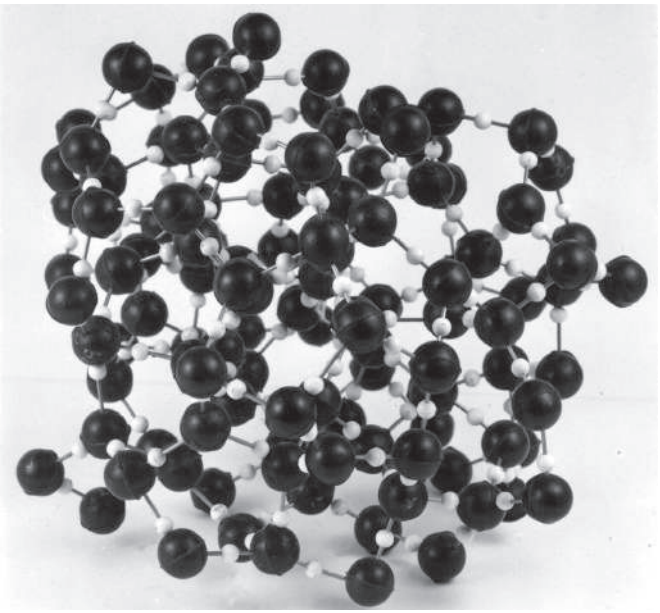
يُعتبر التوسُّع إلى مفهوم الماء أمرًا مباشرًا وواضحًا على الصعيد المفاهيمي. في الفصل الثالث، تطرقنا إلى بنى الجليد بأن تخيَّلنا كيف يمكننا ربط جزيئات الماء معًا لتشغل حيزًا معينًا بطريقة تتوافق مع تفاعل جزيئات الماء بعضها مع بعض (النمط الرباعي ذو الروابط الهيدروجينية)، ووجود شبكة بلورية. بالنسبة إلى نموذج مثالي لبنية الماء السائل، يُمكننا اتباع نفس النهج النظري، ولكن مع «تجاهل قيود الشبكة البلورية» هذه المرة. كل ما علينا فعله هو ربط جزيئات الماء معًا بحيث يتصل كل منها بأربعة جزيئات مجاورة له، مع الحرص على عدم إنشاء بلورة منتظمة وإنتاج نموذج بالكثافة الصحيحة. ويمكننا القيام بذلك بسهولة نسبيًّا.

يُظهِر الشكل ٤-٢ نموذجًا معمليًّا يتوافق تمامًا مع هذه الشروط؛ إذ ترتبط الكرات السوداء التي تمثل ذرات الأكسجين في الماء بأربعة جزيئات مجاورة من خلال الكرات الهيدروجينية البيضاء. كما تُستَوفى شروط النمط الرباعي (نتيجة للجهد بين الجزيئي لجزيئات الماء)، ولكن لا يوجد تنظيم مُتسق مُتكرر من النوع البلوري.

بالمقارنة مع نموذج السائل البسيط المُسمى بـ «الرص العشوائي»، يُعَد هذا النموذج البنيوي للماء «شبكة عشوائية». ولتوضيح المفهوم أكثر، يُظهِر الشكل ٤-٣ تمثيلًا تناظريًّا ثنائي الأبعاد ثلاثي التناسق لكلتا البنيتَين السائلة والبلورية. من المُثير للاهتمام أن السائل يبدو كما لو كان يمكن أن يكون له كثافة أعلى من البلورة (كما هو الحال فعلًا)، وهذه نقطة سنعود إليها في الفصل الخامس.

إحدى الطرق لتحديد الفرق بين البلورة المنتظمة والسائل غير المنتظم كميًّا هي النظر في البِنى الحلقية، كما فعلنا مع الجليد. في التمثيل التناظري الثنائي الأبعاد في الشكل ٤-٣، تتكون البلورة من حلقات سداسية فقط، بينما تحتوي الشبكة العشوائية على مزيجٍ من حلقات خماسية، وسداسية، وسباعية. أما في النظير الثلاثي الأبعاد، فيتألف طور الجليد Ih من حلقات سداسية — كما عرفنا في الفصل الثالث — بينما في نموذج الماء السائل المثالي، نجد مجموعةً من الحلقات تتكون من أربعة إلى سبعة أعضاء فأكثر.

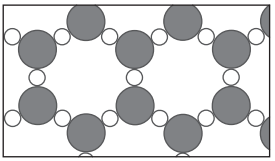
كيف تتطابق بِنية الماء السائل «الحقيقي» مع هذا النموذج الشبكي العشوائي المثالي؟ لدينا الآن بيانات تجريبية أفضل بكثيرٍ عن بنية الماء مما كانت متاحة لبيرنال. ومن ثم، صرنا نعرف الآن كيف يبدو شكل الماء السائل على المستوى الجزيئي. باختصار، مثلما



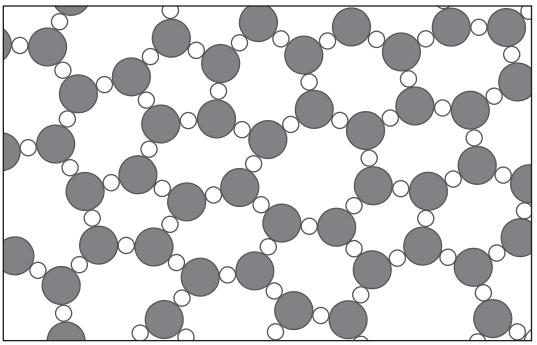
شكل ٤-٢: نسق شبكي عشوائي لجزيئات الماء. الكرات السوداء الكبيرة هي مراكز ذرات الأكسجين، والكرات البيضاء الصغيرة تمثل الهيدروجين.

يحتوي نموذج الرصِّ العشوائي الكروي على جوهر بِنية سائل بسيط، يحتوي نموذج الشبكة العشوائية على جوهر بِنية الماء السائل في الظروف العادية من الحرارة والضغط.

وفي رأيي أن أهم البيانات البِنيوية عن الماء قد جاءت من تشتُّت النيوترونات والأشعات السينية. فلهذه الطرق ميزة كبيرة من حيث وجود علاقة مباشرة بين التشتُّت المقيس والبنية الفعلية. في المقابل، ومن أجل تفسير نتائج كثيرٍ من التقنيات التجريبية الأخرى، نحتاج إلى افتراض نوع من النماذج يربط عملية القياس بالبنية. لذا يعتمد تفسير البيانات جوهريًّا على صحة النموذج الذي افترضناه. ومن ثَم، إذا كان هذا النموذج غير صحيح، فإن الاستنتاجات التي نستخلصها من البيانات ستكون أيضًا غير صحيحة. لذا فالأسلم الاعتماد على نتائج سليمة لقياسات التشتُّت، والتي يُمكننا الآن أن نربط بينها وبين أحدث الحسابات الحاسوبية لإنتاج بِنًى فعلية تتوافق مع بيانات التشتُّت التجريبية.



(أ)



(ب)

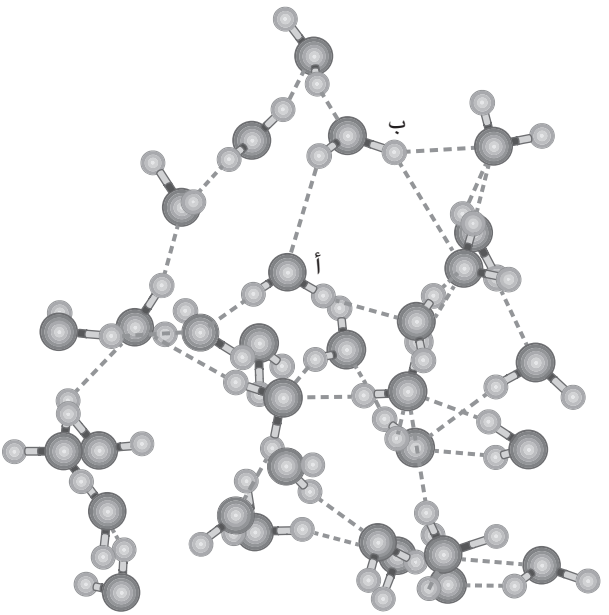
شكل ٤-٣: شكلان تناظريان ثنائيا الأبعاد لبِنية (أ) الجليد، و(ب) الماء السائل. ولاستيعاب الأبعاد الثنائية، تم تقليل التناسُق من أربعة إلى ثلاثة.

تدعم نتائج سنوات عديدة من هذه التجارب مُقترح بيرنال بأن الشبكة العشوائية هي في الواقع نموذج مرجعي مثالي لبِنية الماء. في الواقع، يُمكننا فحص تناسُق كل جزيء من جزيئات الماء في هذه البِنى العيِّنة (على الرغم من أن تحديد معيار للتناسُق ليس بالأمر السهل). وتُظهر النتائج أن النمط الرباعي الأسطح هو الغالب، كما هو متوقَّع. كما تُخبرنا كيف تختلف البِنية الحقيقية عن الشبكة العشوائية المرجعية تحت الظروف العادية، وعند تغيير درجة الحرارة والضغط.

العيوب في بِنية الشبكة العشوائية

يُظهِر الشكل ٤-٤ صورة مكبَّرة لمنطقة نموذجية محدودة في الماء السائل، مُستمَدة من قياسات التشتت النيوتروني المذكورة آنفًا. وبالرغم مما تبيَّن من أن النمط الرباعي

التناسُق هو الأكثر هيمنةً في وحدة الماء السائل المكونة من ٦٠٠٠٠ جزيء، والذي التُقِطت هذه اللقطة الفورية منه، فإن فحصًا دقيقًا للشكل يُظهر مثالًا جيدًا (أ) للتناسق الثلاثي الذي يوجَد فيه ذرة هيدروجين واحدة فقط من جزيء ماء مجاور، تُشير نحو المنطقة السالبة الشحنة في الجزيء أ.



شكل ٤-٤: صورة مكبَّرة لجزءٍ من نسق الماء السائل المُستمَد من القياسات التجريبية، يُظهر الروابط الهيدروجينية المُحتملة بين الجزيئات المتجاورة. اختير هذا الاتجاه لإظهار أمثلة على جزيء ثلاثي النسق أ، وتفاعل مُتشعِّب ب يبدو فيه أن ذرة هيدروجين واحدة ترتبط هيدروجينيًّا بجزيئَي ماء مُجاورَين.

لا ينبغي أن نتفاجأ بهذا حقًّا. ففي الفصل الثاني، اعتبرنا المنطقة السالبة الشحنة من جزيء الماء مثل «فص» واحد من الشحنة. ونظرًا لأن قيمة تلك الشحنة ضعف تلك الموجودة على كل ذرة هيدروجين، فإن جزيء الماء سيُفضِّل ربط منطقته السالبة الشحنة بذرتَي هيدروجين. ولكن حال عدم توافُر ذرتَين، فعليه أن يكتفي بواحدة فقط. في سياق

النسق العام المفضل الرباعي التناسُق، قد يُعتبر الترتيب الثلاثي النسق الثلاثي الأسطح الناتج عيبًا في نموذج الشبكة العشوائية المثالي.

يمكن أيضًا رؤية «عيب» آخر في الشكل ٤-٤. يعبر الجزء ب في الشكل عما يُعرَف بالتفاعل «المتشعِّب»، الذي تقوم فيه ذرة هيدروجين واحدة من جزيء الماء بالارتباط هيدروجينيًّا مع المناطق السالبة الشحنة من جزيئَي ماء مُجاورين، بدلًا من الارتباط بالجزيء العادي. وعلى الرغم من وجود ذرة هيدروجين واحدة فقط في المثال الموضح تلعب دور المانح للمنطقة السالبة الشحنة من الجزيء المُتفرع، فإنه في تلك الحالات التي تشارك فيها تلك المنطقة السالبة في رابطتَين هيدروجينيتين «عاديتين»، وتقوم ذرة الهيدروجين الأخرى في الجزيء بالارتباط برابطة هيدروجينية عادية مع جزيء مجاور آخر، سيكون لمثل هذا الجزيء تناسُق موضعي خماسي.

وكما سنرى لاحقًا، تبين أن «عيوب» الشبكة العشوائية المثالية هذه مهمة جدًّا في سياقات كلٍّ من ديناميكيات السوائل (كما سنرى لاحقًا في هذا الفصل) وأهميتها البيولوجية (الفصل السادس).

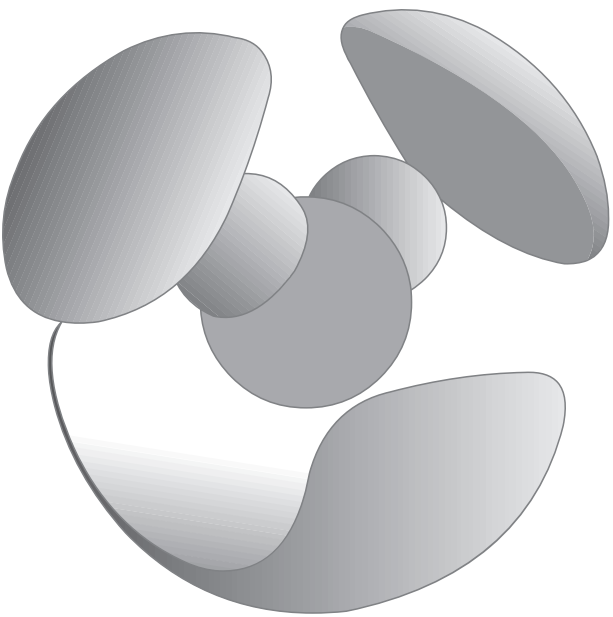
حين ناقشنا أطوار الجليد في الفصل الثالث، أشرنا إلى أنه من أجل اندماج بِنية الجليد داخل حيز أصغر كلما زدنا الضغط، أصبحت زوايا الرابطة وأطوالها تنحرف على نحو متزايد عن قيمها «المثالية». بالمثل، عندما ننظر إلى زوايا الرابطة OOO التي تشكلها ثلاثة جزيئات ماء متجاورة في نموذج الشبكة العشوائية المثالية، نجد أيضًا اختلافًا كبيرًا عن الزاوية الرباعية الأسطح المثالية.

إذا فحصنا توزيع زاوية الرابطة نفسها في بِنى الماء المستمَدة من التجارب، نرى أيضًا مجموعة من القيم يكون التباين بينها أوسع منه في أطوار الجليد المُختلفة، وإن كان هذا هو ما نتوقَّعه بالنسبة إلى سائل. أيضًا حين ناقشنا الأطوار المُختلفة من الجليد، رأينا كيف يمكن النظر إلى البِنى المختلفة في إطار البِنى الحلقية التي تُشكلها جزيئات الماء المكوِّنة لها؛ فنظرًا لتبايُن زوايا الرابطة وأطوالها في البِنى العالية الضغط، صارت مجموعة من أحجام الحلقات (تتراوح بين ٤ إلى ١٠ في الواقع) في عداد المحتمل.

بالمثل، في بنى الماء المستخرجة تجريبيًّا، نجد بنًى حلقية رباعية، وخماسية، وسداسية، وسباعية وأكثر، كما هو الحال في نموذج الشبكة العشوائية المثالية. قد نتذكر هنا التعليق الذي أدلينا به في الفصل الثاني حول قرب زاوية الماء HOH التي تبلغ ١٠٤٫٥° من الزاوية الداخلية لمضلع خماسي مستوٍ (١٠٨°). لذا من المُحتمل أن تشعر جزيئات الماء براحة كبيرة عند الاستقرار في بنًى حلقية خماسية.

التوزيعات المكانية

على الرغم من أن النمط الرباعي هو أساس بِنى كلٍّ من الأطوار المختلفة للجليد والماء السائل، فإن حقيقة وجود انحرافات عن الشكل المثالي في كِلا النوعَين من البِنى يعني أنه من المفيد أن يكون لدينا طريقة تصويرية لتحديد البنية الموضعية المتوسطة كميًّا حول جزيء ماء مركزي. يعرض الشكل ٤-٥ «دالة الكثافة المكانية» للماء في درجة حرارة الغرفة. يمثل الفصَّان أعلى وأسفل جزيء الماء المركزي كثافات انتشار جزيئات الماء في تلك المواضع والاتجاهات؛ انظر إلى الفصوص كما لو كانت خطوطًا كفافية تُمثِّل كثافةً معينة لجزيئات الماء المجاورة.



شكل ٤-٥: البيئة العادية للجزيء الأول المجاور لجزيء في الماء السائل.

يتجلَّى النمط الرباعي الاعتيادي بوضوحٍ في هذه الصورة. فيُظهر الفصان اللذان «يغطيان» ذرات الهيدروجين في جزيء الماء المركزي نطاقَ مواقع جزيئات الماء المجاورة

التي تستقبل الروابط الهيدروجينية من الجزيء المركزي. وهناك «نطاق مُتواصل» من الكثافة مُنحنٍ تحت الجزيء المركزي، عوضًا عن وجود فصَّين مُنفصلَين، بمعدل فصٍّ واحد لكل جزيء من جزيئَي الماء المانحَين للروابط الهيدروجينية للجزيء المركزي.

هذا يعكس حقيقة أن المنطقة السالبة الشحنة على ذرة الأكسجين هي فصٌّ واحد من الشحنة، ويترتب على هذا، على المستوى البِنيوي، أن جزيئات الماء التي تقترِب من جزيء ماء مجاور في اتجاه المنطقة السالبة الشحنة يمكن أن تأخُذ بسهولة مجموعة أوسع من الاتجاهات من تلك التي تقترب من جهة الهيدروجين.

النقاط البنيوية الأساسية

تتَّسِق الأدلة التجريبية في الواقع مع فكرة الارتباط الوثيق بين بِنية الماء الآنية (بنية الشكل V) في درجة حرارة وضغط الغرفة، وبين بِنية الشبكة العشوائية المثالية الرباعية التناسُق التي طرحها بيرنال. فهي تملك الخصائص البنيوية الأساسية للسائل، حيث لا يُوجَد ترتيب طويل المدى. كما تتَّسق البيئة الجزيئية الموضعية لجزيئات الماء المكوِّنة له وتغيراتها مع الطريقة التي تتفاعل بها جزيئات الماء معًا (الجهد بين الجزيئي).

في المتوسط، تكون بيئة الجزء المجاور الأول الرباعية الأسطح (لتتسق بذلك مع النمط الرباعي الأساسي)، على الرغم من وجود عيوب موضعية حيث يمكن أن يكون التناسق إما أكبر أو أقل من أربعة. ويُوجَد توزيع واسع لزوايا الرابطة OOO فوق الزاوية الرباعية الأسطح المثالية وتحتها، وتُشكل الجزيئات المرتبطة هيدروجينيًّا مجموعة من البِنى الحلقية. وعلى ذلك تبدو الشبكة العشوائية المثالية بالفعل بنيةً مرجعية جيدة للسائل الحقيقي.

الحركة في الأرجاء

ركَّزنا حتى الآن على تصوير البنية الآنية للماء؛ أي ما يبدو عليه ترتيب الجزيئات في لقطة فورية مأخوذة بزمن تعرُّض أقل من ذلك الذي يمكن للجزيئات نفسها التحرك فيه. لكن الماء سائل، وجزيئاته في حالة حركة، والبنية الآنية الواحدة ستتحول إلى بِنًى آنية أخرى. على صعيد تفصيلي، ستكون هذه البِنى كلها مختلفة، ولكن كل واحدة منها ستكون متَّسقة مع الخصائص البنيوية التي حدَّدناها في وقتٍ سابق. وللحصول على فهمٍ أكثر

استيفاء للماء كسائل، نحتاج إلى النظر في كيفية تحوُّل هذه البِنى من بِنية إلى أخرى. وهذا يعني أننا بحاجة إلى معرفة شيءٍ عن الجوانب الديناميكية للماء السائل.

في إطار ذلك، سرعان ما سنواجه لغزًا مُثيرًا للاهتمام. حين ناقشنا صعوبة تشكيل الجليد المُنتظِم وفقًا لترتيب ذرات الهيدروجين، خلصنا إلى أن الحركات الاتجاهية اللازمة لحدوث الانتظام عادة ما تتطلَّب عيبًا من نوعٍ ما. وقد كان هذا ضروريًّا لأن قيود بيرنال–فاولر كانت تعني أن جزيئًا واحدًا لا يُمكنه التحرك من تلقاء نفسه دون كسر تلك القيود.

يُعتبر تصوُّرنا لبنية الماء السائل أيضًا تصورًا لشبكة قوية الاتصال ومرتبطة هيدروجينيًّا فيما بينها؛ ومِن ثَم نتوقَّع أن تُعاني الجزيئات السائلة من قيودٍ مماثلة كما في أطوار الجليد. غير أنه عند ذوبان الجليد تحدُث زيادة في حركة جزيئات الماء تُقدَّر بمليون ضعف. لا يمكن تفسير هذا بكسر الروابط الهيدروجينية عند الذوبان؛ إذ إن متوسط عدد هذه الروابط لكل جزيءٍ في السائل يُعادل نظيره تقريبًا في الجليد. لذا لا بد أن هناك شيئًا آخر يمنح الجزيئات في السائل قُدرتها على التحرُّك.

لنستعرض بعض الأرقام. تُخبرنا القياسات التجريبية أنه في درجة الحرارة المحيطة، يُقدَّر الوقت الذي عادة ما يستغرقه جزيء الماء لـ «إعادة التوجيه» في السائل بنحو ٢ بيكوثانية (أو مليون من المليون من الثانية). علاوة على ذلك، يُقدَّر متوسط الوقت الذي يستغرقه جزيء الماء للتحرُّك مسافة مساوية تقريبًا لقُطرٍ جزيئي واحد بنحو ٧ بيكوثانية. غير أن قوة الرابطة الهيدروجينية العادية تكون أكبر بكثيرٍ من مقدار الطاقة النموذجي للتقلُّبات الحرارية في درجة حرارة الغرفة التي ستكون لازمةً لتوفير الطاقة لكسرها.

في الواقع، إن زمن إعادة توجيه جزيء الماء وزمن الانتقال المرصودين يكونان أقصر بعدة قيم أُسيَّة مما كنا نتوقع إذا سهَّل كسر رابطة الهيدروجين أيًّا من هذه الحركات الجزيئية. لذا لا بد أن هناك آلية أخرى تفسر هذه الحركات الجزيئية السريعة على نحو غير مُتوقع في هذا النوع من البنية المائية المرتبطة برابطة هيدروجينية.

هناك احتمالان واضحان. أولًا، وكما ذكرنا عند مناقشة الحركة في الجليد: قد يكون من المُمكن لعددٍ من جزيئات الماء المُتصلة أن تتحرك بصورةٍ جماعية بحيث لا تنكسِر الروابط الهيدروجينية. قد تتحرَّك الجزيئات المجاورة على نحوٍ تعاوني؛ وبذا تتجنَّب الحاجة إلى تجاوز حواجز الطاقة الكبيرة بين التكوينات المجاورة من الجزيئات. أما

الاحتمال الآخر (والذي ربما يكون ذا صلة) فيتمثَّل في التفكير في دورٍ مُحتمل للعيوب بطريقةٍ مشابهة لمناقشتنا عن الحركة الدورانية في الجليد. وعلى أساس حسابات المُحاكاة الحاسوبية، فهناك آلية من آليات العيوب البنيوية تُعتبر فعلًا، وفي العموم، حلًّا واحدًا على الأقل لهذا اللُّغز المُتعلِّق بالحركة.

يذهب هذا الرأي إلى أن العملية الفعلية لا تنطوي على عيوب الشحنة الكهربائية التي ناقشناها في الفصل الثالث فيما يتعلق بالجليد، ولكنها تنطوي على الرابطة الهيدروجينية المُتشعبة التي أشرنا إليها في وقتٍ سابق (انظر الشكل ٤-٤). ويُقدَّر أن كلًّا من هذه الروابط الهيدروجينية المتشعبة تحوي نحو نصف طاقة رابطة الهيدروجين «العادية»، وتشير المحاكاة الحاسوبية التي تم إجراؤها إلى إمكانية وجود تبادُل تفضيلي للجزيئات المتجاورة القريبة من هذه العيوب المتشعِّبة.

من الطبيعي أن نستنتِج أن هذه العيوب يمكن أن تُسهِّل الانتقال بين بنيتَين مختلفتَين موضعيًّا من الجزيئات مُرتبطتَين هيدروجينيًّا، مما يُتيح تغييرًا في البنية الموضعية دون الحاجة إلى كسر الروابط الهيدروجينية. وهكذا، وعلى الرغم من أن الشبكة المرتبطة هيدروجينيًّا في الماء السائل قوية نسبيًّا بما لا يجعلها تتعطَّل بسهولة بفعل التقلبات الحرارية العادية، يبدو أن آليات العيوب تمنح السائل الحركة التي نُلاحظها.

وهكذا يكون لدَينا صورة مُثيرة نوعًا ما للسائل كشبكةٍ قوية نسبيًّا من الجزيئات — يمكن القول إن صلابتها تُقدَّر على مقياس الوقت بالبيكوثانية — ولكن على الرغم من صعوبة كسر الروابط فيها، فإنها تتصرَّف باعتبارها سائلًا سليمًا ومتحركًا في درجة حرارة الغرفة، والتي هي سمات أساسية لأداء وظائفه الكيميائية والبيولوجية.

إضافة الحرارة

ماذا يحدث لبنية الماء عندما نزيد درجة حرارته؟ عندما نُسخن سائلًا «بسيطًا»، تتحدَّد بِنيته في الغالب بطريقةٍ تجمع جزيئاته — كما هو موضح في التجمُّع العشوائي المتقارب الذي ناقشناه في موضعٍ سابق في هذا الفصل — نتوقَّع أن يزيد متوسط المسافة بين الجزيئات. وهكذا سيتمدَّد السائل ليشغل حيزًا أكبر وتنخفض كثافته.

ولكن بِنية الماء، كما رأينا، بِنية أكثر انفتاحًا؛ إذ تتفاعل جزيئاته من خلال النمط الرباعي الأساسي في الشكل ٢-٣، مما يؤدي إلى بِنية أكثر انفتاحًا من بِنية السائل البسيط

الذي تتحدَّد بنيتُه إلى حدٍّ كبير من خلال قيود التجمُّع. إذن ماذا يحدث عندما نرفع درجة حرارة سائل له بِنية «شبكية» مثل الماء؟

لم تنظر الكثير من التجارب في كيفية تغير بِنية الماء عند تسخينه إلى نقطة الغليان، الأمر الذي قد يعكس توقعًا بعدم حدوث شيءٍ خارج عن المألوف. فيزداد متوسط المسافة بين الجزيئات، كما نتوقَّع، كما يزداد التبايُن في تلك المسافات. وتحدث هذه التغييرات لكل من مسافات الرابطة O–H بين الهيدروجين والأكسجين داخل الجزيئات، وللمسافات بين ذرات الأكسجين (O…O) في جزيء الماء الأول المجاور (المرتبطة هيدروجينيًّا). وبالتبعية، سيتمدد النمط الرباعي الأساسي.

بالإضافة إلى ذلك، يجب أن ننظر في تأثير زيادة الحرارة على «هندسة» النمط الرباعي الأسطح الأساسي. كنا سنتوقَّع أن تكون هناك زيادة في تغيرية الزاوية OOO، وهذا ما نراه. ولكن عند مناقشتنا لِبِنى الجليد العالية الضغط، رأينا أن حدوث زيادة في تشوه هذه الزاوية قد زاد من قدرة شبكة جزيئات الماء على ربط نفسها بنفسها بطرُق مختلفة (مثل زيادة الكثافة في حالة الجليد)؛ لذا قد نتوقَّع تغيرًا مماثلًا في بِنية الشبكة «المتوسطة المدى» نتيجة لهذه الزيادة في تشوهات زاوية الرابطة. قد يكون الأمر كذلك بالفعل، ولكن لا توجد حتى الآن بيانات تجريبية واضحة عن التغيرات البنيوية التفصيلية التي تحدث فعليًّا.

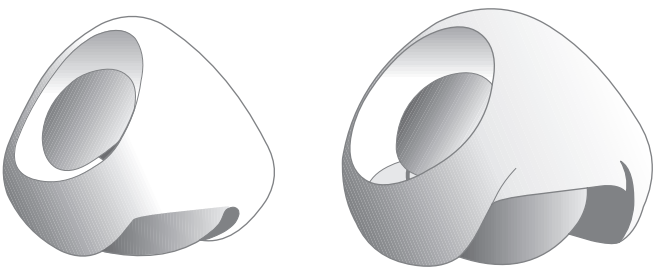
إضافة الضغط

بالنسبة إلى سائل بسيط، يدفع تطبيق الضغط الجزيئات المجاورة لتصبح أقرب بعضها إلى بعض، مما يُقلل متوسط المسافة بينها. ويؤدي هذا إلى تقليل الحيز المشغول وزيادة في الكثافة. أما بالنسبة إلى الماء، فنجد تأثيرًا مُماثلًا، ولكن التغيُّرات الأكثر إثارة للاهتمام في بنيتِه تحدث نتيجة لزيادة انحناء الرابطة الهيدروجينية. تذكَّر أن زيادة الضغط على الجليد أدَّت إلى زيادة انحناء الرابطة لتمكين الجزيئات من شغل حيز أصغر (مما يسَّر حدوث التغيرات في البِنى الحلقية في حالة الجليد)؛ ومن ثم قد نتوقع حدوث شيء مماثل في السائل.

إن ما نلاحظه نتيجةً لهذه الزيادة في انحناء الرابطة OOO عند زيادة الضغط على السائل هو في الواقع مُماثل لذلك. فزيادة انحناء الرابطة تسمح لطبقة الجزيئات المجاورة «الثانية» — تلك التي تتَّصل بالجزيء المركزي في النمط الرباعي من خلال الترابط

الهيدروجيني مع الجزيئات المجاورة الأولى للجزيء المركزي المرتبطة هيدروجينيًّا — بأن «تُدفع» لتقترب أكثر إلى جزيء الماء المركزي. وعلى الرغم من أن نمط الجار الأول يتشوَّه باطِّراد، فإنه يبقى محتفظًا في المتوسط بأربعة جزيئات مجاورة مرتبطة هيدروجينيًّا. من ثم تبدو هذه البنية بنيةً موضعية مرِنة على نحو ملحوظ.

يمكننا توضيح هذا من خلال النظر في كيفية تغيُّر وظائف الكثافة المكانية للماء (الموضحة لطبقة الجزيئات الأولى المجاورة تحت الظروف المحيطة في الشكل ٤-٥) مع الضغط. يوضح الشكل ٤-٦ كيفية توزيع طبقات الجزيئات الأولى والثانية المجاورة حول جزيء مركزي (على اليسار) تحت الضغط المُحيط، و(على اليمين) في سائلٍ ذي كثافة أعلى، يتم إنتاجه عن طريق زيادة الضغط إلى بضعة آلاف من وحدات الضغط.



شكل ٤-٦: متوسط توزيع طبقة الجزيئات المجاورة الأولى والثانية حول جزيء الماء المركزي في: (أ) الظروف المحيطة، و(ب) الضغط العالي.

تتشابَه التوزيعات المكانية التي تُمثل توزيع طبقة الجزيئات المجاورة الأولى إلى حدٍّ كبير في كلا الشكلَين، على الرغم من أنها مخفية جزئيًّا بفصوص طبقة الجزيئات المجاورة الثانية. وبذا يبقى النمط الرباعي محفوظًا. عندما نبحث عن التغييرات التي سبَّبها الضغط في التوزيعات المكانية لطبقة الجزيئات المجاورة الثانية عن طريق مقارنة الفصوص الخارجية في السوائل ذات الضغط القياسي والعالية الضغط، نرى شيئًا مماثلًا، وكذلك شيئًا مختلفًا. تبدو فصوص طبقة الجزيئات المجاورة الثانية مُتشابهة جدًّا في كلتا

الحالتين، ولكن في ظروف الضغط الأعلى دُفِعت هذه الفصوص لتقترِب أكثر إلى الجزيء المركزي. ليس واضحًا إن كانت قد حدثت إعادة هيكلة لشبكة الماء نتيجة كسر الرابطة وإعادة تكوينها، وإن كان هناك بعض المؤشرات على أن الأمر كذلك بالفعل. ولكن قد يكون الأمر فقط أن البِنية قد تكيفت مع الحيز المُتقلِّص المتاح له عن طريق انضغاط مُنتظم، وهو تفسير يبدو متسقًا مع النتائج الموضَّحة في الشكل ٤-٦.

وسنأتي على مناقشة أمر ذي صلة لاحقًا في هذا الفصل عند تناول الجليد غير المتبلور.

الذهاب إلى الحالة فوق الحرجة

رأينا أن زيادة الحرارة والضغط، كلٍّ على حِدة، تشكِّل عبئًا متزايدًا على اتجاهية الرابطة الهيدروجينية التي تُهيمن على بِنية الماء. فماذا يحدث عند زيادة الحرارة والضغط معًا؟ من المعروف جيدًا أن سلوك الماء فوق الحرج (أي فوق ٣٧٤ درجة مئوية، ونحو ٢٢٠ وحدة ضغط، حيث تبلغ كثافة الماء نحو ثلث ما تكون عليه تحت الظروف القياسية المحيطة) يختلف كيميائيًّا تمامًا عن الماء «العادي». على سبيل المثال، الجزيئات غير القابلة للذوبان نسبيًّا في الماء تحت الظروف القياسية المُحيطة يمكن أن تُصبح قابلة للذوبان إلى حدٍّ كبير، مما يجعل الماء فوق الحرج وسطًا فعالًا لعددٍ من العمليات، مثل معالجة النفايات الخطرة واستخراج المُذيبات. لذا فمن المُثير بصفة خاصة محاولة معرفة مدى اختلاف البنية تحت هذه الظروف الأكثر تطرفًا.

من الأسئلة التي قد نطرحها: إلى أي مدًى يُشوَّه النمط الرباعي للجزيئات المجاورة الأولى؟ ما النتائج البنيوية المترتبة على هذا؟ وهل يستمر تفاعل الرابطة الهيدروجينية الذي يُهيمن على بِنية الماء تحت الظروف العادية؟

فيما يتعلق بالبنية الشبكية، فالأدلة التجريبية واضحة تمامًا: عندما ترتفع الحرارة فوق ١٠٠ درجة مئوية (مع الحفاظ على السائل تحت ضغطٍ مُتزايد لمنع التبخر)، يتصاعد تشوُّه البنية الشبكية للماء. وتكاد تختفي تمامًا عند نحو ٣٠٠ درجة مئوية، على الرغم من أن الكثافة قد تكون عالية؛ إذ تصل إلى ٨٠ في المائة من كثافة السائل القياسي. ويبدو أن النمط التناسُقي الرباعي الأسطح يكون قد اختفى تمامًا.

أما فيما يتعلَّق بالكم المُتبقي من الرابطة الهيدروجينية، فالوضع أقل وضوحًا؛ إذ إن استخراج بصمةٍ واضحة لرابطة هيدروجينية من البيانات البنيوية ليس بالأمر السهل.

غير أن استخدام ما يُعتقد أنه معيار هندسي معقول لرابطة الهيدروجين يُشير إلى أن أغلب الترابط الهيدروجيني (ربما ليس كله) يكون قد فُقد مع وصول الكثافة إلى نحو ثلثَي قيمتِها القياسية، وهو استنتاج يتوافق إلى حدٍّ كبير مع ذلك الذي نستنتجه من تقنيات القياس الطيفي التي ترصد وجود روابط الهيدروجين بطريقةٍ مختلفة.

لذا فليس من المُستغرَب أن يختلف سلوك الماء فوق الحرج تمامًا عن سلوك الماء الذي نتعرض له في العادة.

التبريد

بما أن تسخين الماء يزيد من تشوُّه النمط الرباعي الأساسي المرتبط بروابط هيدروجينية، فقد نتوقع أن يحدث العكس عند تبريد الماء. هذا ما يحدث بالفعل في العموم؛ إذ يقلُّ مقدار انحناء الرابطة OOO مع انخفاض درجة الحرارة، وبالتبعيَّة يُصبح النمط الرباعي الموضعي المتوسط أقل تشوهًا.

وعلى الرغم من ذوبان الجليد عند التسخين، وتجمُّد الماء عادة عند التبريد إلى درجة صفر مئوية، يمكن تعريض الماء للتبريد الفائق مثل السوائل الأخرى؛ فتحت ظروفٍ مُعينة يمكن خفض درجة حرارته إلى ما دون نقطة تجمده العادية ويظل سائلًا. بل يمكن أن يظل سائلًا حتى بلوغ «درجة حرارة التنوِّي المُتجانس» التي تقارب −٤٠ درجة مئوية. لذا من الواضح أننا نودُّ معرفة ما يحدُث لبنيته عند خفض الحرارة إلى هذا الحد الأدنى: إلى أي مدًى قد يقترب من البنية الشبكية العشوائية المثالية الرباعية السطوح؟

للأسف، ليس من السهل إجراء قياسات بنيوية دقيقة على السائل الفائق التبريد؛ فهو نظام غير مُستقر، وسيتبلور حال وجود شوائب. حتى عندما نزيل معظم الشوائب، يظلُّ من الصعب الحفاظ على المادة سائلةً مدة طويلة بما يكفي لإجراء قياس بنيوي سليم.

ثمة طرق لتحقيق الاستقرار للسائل الفائق التبريد، مثل وضع قطرات صغيرة جدًّا في مُستحلبات أو في ثقوب دقيقة جدًّا في مواد أخرى. غير أنه نظرًا إلى أن تلك القطرات أو الثقوب تكون صغيرةً جدًّا بحيث يمكن أن تتأثر بنية الماء نفسها إلى حدٍّ كبير بوجود السطح؛ لا يمكننا التأكد من أننا أمام الماء في حالته القياسية حقًّا. علاوة على ذلك، ثمة صعوبات تجريبية في استخراج بيانات غير «ملوَّثة» بالتفاعلات بين السائل وسطح الحاوية؛ فبالنسبة لهذه القطرات الصغيرة، يمكن أن تكون مساهمات هذه التفاعُلات في الإشارة المرصودة كبيرة، ولا توجد طريقة واضحة لإزالتها من البيانات المرصودة.

غير أن بعض القياسات البنيوية للنيوترونات والأشعة السينية قد أُجريت على عينة الماء الكبيرة التي تعرضت إلى تبريد فائق حتى −١٠ درجات مئوية، ومؤخرًا على القطرات الدقيقة حتى درجة حرارة التنوِّي المتجانس مباشرة. تُظهر هذه القياسات أن المسافة إلى الجزيء المجاور الأول تقلُّ كما كنَّا نتوقع. علاوة على ذلك، تقل درجة انحناء رابطة الهيدروجين، مما يؤدي إلى تشوه أقل للنمط المتوسط للجزيء المجاور الأول الرباعي السطوح. وتستمر أنماط الترتيب الشبكي هذه كلما قللنا درجة الحرارة أكثر، ومع الوصول إلى درجة حرارة التنوِّي المتجانس التي تقترب من −٤٠ درجة مئوية، يبدو أننا نقترب أكثر من البنية الشبكية الرباعية السطوح المثالية.

ولكن «إلى أي مدًى» يمكننا أن نقترب في الواقع من هذه البنية المثالية؟ كيف ستبدو البنية إذا لم يتبلور السائل الفائق التبريد عند حوالي −٤٠ درجة مئوية؟

تجنُّب التبلور

يمكن تجنُّب التبلور في كثير من السوائل عند التبريد من خلال التبريد السريع. وهذه هي الطريقة المُتبعة في إنتاج «الزجاج»؛ تلك المادة الصلبة التي لم تتبلور في ترتيبٍ منتظم، ولكنها احتفظت ببِنية غير مُنتظمة. والقيام بهذا يكون أسهل مع بعض المواد عن بعضها الآخر، على سبيل المثال، يتم إنتاج زجاج النوافذ العادي بتبريد السيليكات السائلة ببطءٍ شديد. أما الماء، فيجب أن يكون مُعدل التبريد سريعًا جدًّا، حتى إنه على الرغم من تكوين شكلٍ غير متبلور من الجليد عن طريق ترسيب البخار على سطحٍ بارد منذ زمنٍ طويل يرجع إلى عام ١٩٣٢، لم يتم «تزجيج» الماء من خلال التبريد السريع للسائل حتى عام ١٩٨٢. وحتى هذا الإنجاز لم ينجُ من التساؤلات لعدة سنوات قبل أن تُصبح إمكانية صنع شكلٍ غير متبلور — أو غير منتظم الشكل — من الجليد من السائل مباشرة أمرًا مقبولًا.

فما هي بنية هذه المادة الجليدية غير المتبلورة، غير المُنتظمة الشكل؟ بعد عقود من العمل والبحث، بِتنا نعلم أن بنية الزجاج القائم على السيليكا هي في الأساس بِنية سائلة، ولكن جزيئاتها «متجمِّدة في الزمن»؛ إذ تكون الجزيئات مُثبتة في بنيةٍ شبيهة بالسائل. وقياسًا على ذلك، قد نتوقَّع أن تكون بنية الجليد غير المُتبلور هي بنية الماء الفائق التبريد، مع تكوين جزيئات الماء للبِنية الشبكية الرباعية نفسها، ولكن مع ثباتها في تلك المواضع.

ومع ذلك، وكما تعلَّم الكثيرون منَّا بعد أن دفعنا الثمن، قد يكون من الخطر التسرُّع في الوصول إلى استنتاجاتٍ حول الأمور المُتعلقة بالماء. لذا قد يكون من الحكمة أن ننظر أولًا في كيفية إنتاج الجليد غير المُتبلور وما تُخبرنا التجارب عن بِنيته. عندما نفعل ذلك، تصبح الأمور أكثر إثارة مما لو افترضنا ببساطة أن جزيئات الماء في الجليد غير المُتبلور ثابتة في ترتيبٍ بنيوي هو في الأساس نفس الترتيب البنيوي للسائل البارد.

كان أول تحضير ناجح لماء صلب غير مُتبلور في عام ١٩٣٢، وكان من خلال ترسيب بخار الماء الدافئ على سطحٍ بارد جدًّا. ليس من المُستغرب أن سُميت هذه المادة «الماء الصلب غير المتبلور»، أو الجليد غير المتبلور (ASW). بينما قد نعتقد للوهلة الأولى أن ترسيب بخار الماء على سطحٍ بارد هو أمر غامِض نوعًا ما، وبعيد كل البُعد عن أي صلةٍ بالتطبيق الحياتي أو بِدَور الماء في أي شيءٍ ذي أهمية، فإن من المُرجح أن هذا الشكل من الماء هو الشكل الأكثر وفرةً في الكون من الماء الصلب؛ حيث يتكاثف على جسيمات الغبار الكوني في درجات حرارة شديدة الانخفاض. لذا ربما يجدُر النظر فيه بمزيد من التفصيل لأجل أهميته الفيزيائية الفلكية وحدَها. ولا شك أن الفيزيائيين الفلكيين مُهتمون جدًّا بذلك.

الماء الصلب غير المُتبلور مادة ذات مَسامَّ دقيقةٍ لها قدرة كبيرة على امتصاص الغازات. ويعتمد عددُ المَسامِّ وأحجامها على ظروف التحضير؛ لذا إن أردْنا دراسة بِنيتها على المستوى الجزيئي، فإننا نحتاج إلى إيجاد طريقةٍ لصنع مادة قابلة للتكرار. ويُمكننا القيام بذلك عن طريق تلدِين العينات بتسخينها إلى درجة −١٦٣ مئوية، وهو إجراء نحصُل منه على حالة قياسية قابلة للتكرار والاستنساخ من الماء الصلب غير المُتبلور بكثافة (٠٫٩٤ جرام/سم٣) لا تختلف كثيرًا عن كثافة الثلج المُتبلور Ih عند درجة صفر مئوية (٠٫٩٢ جرام/سم٣).

لكن هذا هو الفصل الأول فقط في قصة مُثيرة، لم تكتمِل فصولها حتى الآن.

الجليد غير المُتبلور أم أطوار الجليد غير المتبلورة؟

يبدأ الفصل الثاني في هذه القصة بتحضير شكلٍ صلبٍ غير مُتبلور من الماء عن طريق تبريد السائل بسرعة، بحيث يتم «تجميد» حركات الجزيئات حتى لا يكون لدَيها وقت كافٍ لإعادة ترتيب نفسها في ترتيبها البلُّوري المُنتظم المُفضل. وتجنب عملية التبلور بهذه الطريقة سهل بالنسبة إلى عددٍ من «مواد التزجيج الجيدة»، مثل الزجاج المُصنَّع بالأساس من مادة السيليكا، والذي نشرب فيه مشروباتنا. لكن الماء مادة سيئة جدًّا لتشكيل الزجاج.

بل في غاية السوء، لدرجة أنه يحتاج إلى مُعدَّل تبريدٍ يزيد على مليون درجة في الثانية لمنعه من التبلور.

لم يتم تحقيق معدل التبريد هذا بنجاح إلا في أوائل الثمانينيَّات على يدِ واحدة من أبرز المجموعات البحثية المُتخصِّصة في الجليد، في بلدٍ جليدي بالقدْر المناسب (النمسا)، وذلك عندما نجح إرفين ماير وبيتر بروجيلر في إطلاق دفقٍ رقيق من الماء في سائلٍ بارد جدًّا (على سبيل المثال، البروبان السائل عند درجة −١٩٣ مئوية).

أثارت هذه المحاولات الأولى — والتي أنتجت مزيجًا من الثلج المُتبلور وغير المتبلور — ضجةً كبيرة بين خبراء الماء الذين كانوا يعتقدون أن الوصول إلى حالة اللاتبلور بواسطة التبريد بالسائل لن يكون مُمكنًا. وعندما طوَّر ماير وفريقه تقنياتهم التجريبية، أُنتِجت عينات صلبة لا تُظهر أي علاماتٍ على وجود مادة بلورية، أقنعت معظم المُشككين في نهاية المطاف. وهكذا وُلِدت المادة المُسمَّاة بـ «الماء الزجاجي الفائق التبريد» (HGW).

كانت كثافته ٠٫٩٤ جرام/سنتيمتر٣ أيضًا. وعلى الرغم من أن الكثافات المُماثلة للجليد غير المُتبلور والماء الزجاجي الفائق التبريد أشارت إلى احتمال تشابُهِ بنيتهما، لم يكن هناك أي دليل تجريبي في ذلك الوقت لدعم هذا الافتراض أو دحضِه.

بعد فترة وجيزة من العمل الذي أنجزَتْه مجموعة إنسبروك، وفي الجانب الآخر من العالم، في كندا تحديدًا، جاء مختبر آخر رائد في بحوث الجليد (والذي قاده ببراعة الرئيس المستقبلي لنادي جبال الألب الكندي، تيد والي) ليُضفي مزيدًا من الغموض والتعقيد على الفهم السائد (الراسخ) للجليد، من خلال إنتاج جليدٍ يبدو ظاهريًّا غير مُتبلور عن طريق ضغط الجليد البلوري إلى أكثر من ١٠٠٠٠ وحدة ضغط. قد يبدو إجراء تجربةٍ كهذه أمرًا مُستغربًا، لكن كان لديهم حجة مثيرة لتبريرها: إذا تم ضغط مادة صلبة عند درجة حرارة منخفضة بما يكفي لمنع تحولها إلى مرحلةٍ بلورية أخرى، فقد «يذوب» متحولًا إلى جسمٍ صلب غير متبلور.

إذا عدنا إلى مُخطط أطوار الماء (الشكل ٣-٢)، ومددنا خط الذوبان AB افتراضيًّا إلى ضغوط أعلى كما هو موضَّح، نجد أنهم قد جادلوا بأن مثل هذا التحوُّل «الذوباني» قد يحدُث إذا ضغطوا الجليد Ih عند نحو −٢٠٠ درجة مئوية، التي سيعبر عندها إلى خط الذوبان الافتراضي عند نحو ١٠٠٠٠ وحدة ضغط (عند النقطة C تقريبًا في الشكل ٣-٢). جرب المُختبر ذلك، وبالفعل بدا أن البِنية البلورية تنهار لتتحول إلى بنيةٍ غير متبلورة. ونظرًا لأن كثافة هذه المادة كانت أعلى من كثافة كل من الجليد غير المُتبلور والماء الزجاجي الفائق التبريد، فقد سُميت بالجليد غير المُتبلور العالي الكثافة (HDA).

مرة أخرى، كان تفسير هذه التجربة بأنها أنتجت مادةً غير متبلورة حقيقية مثيرًا للجدل في ذلك الوقت، وظلَّ كذلك عقودًا. كان بعض القائمين على التجربة يعتقدون أن الضغط المُفرط قد أدى إلى انهيار الشبكة البلورية للجليد، وأن ما رُصِد كان ذوبانًا «ميكانيكيًّا» نتج عنه «بلورات نانوية» صغيرة جدًّا من الجليد.

وهكذا صار لدَينا الآن مادة مائية صلبة غير بلورية على ما يبدو، تم تحضيرها بثلاث طرقٍ مختلفة. هل هذا يعني أنه قد حان الوقت للبحث عن بِنياتها وحسم الشكوك التي تتراكم؟ ليس بعد؛ فلا يزال في القصة فصلان آخران قبل أن نتمكَّن من القيام بذلك.

إذا أخذنا الجليد غير المُتبلور العالي الكثافة عند الضغط القياسي المُحيط، وسخنَّاه ببطء إلى أعلى من حوالي −١٥٥ درجة مئوية، فإن المادة لا تتبلور، ولكنها تتمدَّد وتبقى غير متبلورة. يؤدي هذا الإجراء إلى التحول إلى ما يبدو أنه شكلٌ آخر صلب غير مُتبلور من الجليد؛ وهو «الجليد غير المُتبلور المُنخفض الكثافة». وكثافته التي تبلغ ٠٫٩٤ جرام/سم^{٣} مُشابهة لكثافتَي كلٍّ من الجليد غير المُتبلور والماء الزجاجي الفائق التبريد (LDA). علاوة على ذلك، إذا أبقَينا الضغط على الجليد غير المُتبلور العالي الكثافة أعلى من ٨٠٠٠ وحدة ضغط، وسخنَّاه إلى نحو −١١٠ درجات مئوية، نحصل على تحوُّلٍ إلى شكل آخر غير مُتبلور من الجليد فيما يبدو. ونظرًا لحدوث تقلصٍ ما خلال هذا التحول، فقد زادت الكثافة. لذا يُسمَّى هذا الشكل الخامس — وهي تسمية غير مفاجئة، وإن كانت تدعو إلى الملل بعض الشيء — «جليدًا غير متبلور فائق الكثافة» (VHDA).

سنتوقف الآن ونلتقِط أنفاسنا قبل النظر في بِنى هذه الأشكال الخمسة.

استكشاف حقول الجليد (غير المُتبلورة)

يسرد الجدول رقم ٤-١ هذه الأشكال الخمسة غير المتبلورة، إلى جانب طرق تحضيرها وكثافاتها. مما سبق، يتَّضح على الفور أن ثلاثة منها — الجليد غير المتبلور، والماء الزجاجي الفائق التبريد، والجليد غير المُتبلور المنخفض الكثافة — لها الكثافة نفسها في الأساس. ورغم أنه من غير الضروري لشكلَين من المادة نفسها، لهما نفس الكثافة، أن يكون لهما نفس البنية، فإن هذا أمر وارد كثيرًا؛ لذا ساد افتراض عام لسنوات عديدة بأن ذلك صحيح. غير أننا لم نحصل على أدلةٍ بنيوية مباشرة لتأكيد صحة هذا الافتراض، حتى تم إجراء قياسات عالية الجودة للتشتُّت النيوتروني على هذه المواد في السنوات الأولى من القرن الحادي والعشرين؛ أي إن كلًّا من الجليد غير المتبلور، والماء الزجاجي الفائق

التبريد، والجليد غير المتبلور المنخفض الكثافة، له البِنية ذاتها على المستوى الجزيئي، على الرغم من تحضيرها بطرق مختلفة.

علاوة على ذلك، يبدو أن جزيئات الماء في جميع الأشكال الثلاثة تكون ذات تناسق رباعي شِبه مثالي كما في النمط الرباعي المثالي، ويكون متوسط الزاوية OOO حوالي ١١١ درجة، وهي قريبة جدًّا من الزاوية الرباعية الأسطح المثالية، التي تبلغ ١٠٩,٤٧ درجات. وهكذا يُمكننا استنتاج أن البِنى الجزيئية القصيرة المدى لكلٍّ من الجليد غير المُتبلور، والماء الزجاجي الفائق التبريد، والجليد غير المُتبلور المنخفض الكثافة، ترتبط ارتباطًا وثيقًا بشبكة رباعية الأسطح ذات رابطةٍ هيدروجينية من جزيئات الماء؛ أي بنموذج الشبكة العشوائية الذي كنَّا نُناقشه باعتباره نموذجًا مثاليًّا للماء السائل.

جدول ٤-١: الأشكال الخمسة للجليد غير المُتبلور

الشكل	الاختصار	طريقة التحضير	الكثافة (ج/سم^{٣})
الماء الصلب (الجليد) غير المُتبلور	ASW	ترسيب بخار الماء	٠,٩٤
الماء الزجاجي الفائق التبريد	HGW	تبريد قطرات السائل على ١٠^{٧} درجات/ثانية	٠,٩٤
الجليد غير المتبلور المنخفض الكثافة	LDA	تسخين الجليد غير المُتبلور العالي الكثافة إلى أعلى من −١٥٥ درجة مئوية تقريبًا	٠,٩٤
الجليد غير المُتبلور العالي الكثافة	HAD	ضغط الجليد Ih إلى أعلى من ١٢٠٠٠ وحدة ضغط عند −١٩٦ درجة مئوية	١,١٥
الجليد غير المتبلور الفائق الكثافة	VHDA	تسخين الجليد غير المُتبلور العالي الكثافة على نحو حوالي ٨٠٠٠ وحدة ضغط إلى نحو −١١٠ درجات مئوية	١,٢٦

استنادًا إلى قياسات تشتُّت الأشعة السينية على قطرات الماء المُبردة تبريدًا فائقًا، أشرْنا بالفعل إلى أنه عند تبريد الماء تبريدًا فائقًا، تتقلَّص الشبكة بشدَّة وتبدو فعلًا أنها تقترِب من بِنية الشبكة العشوائية المثالية. وعلى الرغم من أننا لا نملك أدلة مباشرة تُمكِّننا من تأكيد ذلك، فقد نفترض أن هناك نوعًا من التسلسُل البنيوي بين الماء المبرد تبريدًا فائقًا وهذا الشكل غير المُتبلوِر المنخفض الكثافة.

البِنى العالية الكثافة

بعد أن بسَّطنا صورة الجليد غير المُتبلور من خمسة أشكال إلى ثلاثة، ماذا عن بِنى الجليد غير المُتبلور العالي الكثافة، والجليد غير المُتبلور الفائق الكثافة؟ كما يوضح جدول ٤-١، لهذَين الشكلَين كثافة مُختلفة أعلى من كثافة الجليد غير المتبلور والماء الزجاجي الفائق التبريد، والجليد غير المُتبلور المنخفض الكثافة، التي تتميز جميعًا بانخفاض الكثافة. إذن، ما هي هذه البِنى؟ وبما أنها أكثر كثافةً من الماء السائل، هل يُمكن أن تكون لبِنياتها علاقة ببِنية الماء السائل تحت الضغط التي ناقشناها في وقتٍ سابق؟

تم الكشف عن بنيتَي هذين الشكلَين المُتبقيين من الجليد غير المُتبلور باستخدام قياسات تشتُّت النيوترونات، والتي تقول التفسيرات الراهنة لها إن كل جزيءِ ماءٍ في كِلا الشكلَين المُرتفِعَي الكثافة يرتبط في المتوسط برابطة هيدروجينية بأربعة جزيئات مجاورة. لذا لا يوجَد تغيير في البِنية الموضعية الأساسية للجزيئات المجاورة الأولى، وبذلك يكون النمط الرباعي قد نجا. غير أن الأمور تبدو مختلفةً جدًّا إذا نظرنا إلى جزيئات الماء التي تكون «خارج» نطاق المسافة مع طبقة الجزيئات المجاورة الأولى التي تتحدَّد بواسطة الجزيئات المجاورة الأربعة المرتبطة هيدروجينيًّا. أما بالنسبة إلى الجليد غير المُتبلور المنخفض الكثافة، فلا تُوجَد جزيئات ماء في هذه المنطقة. ولكن في المتوسط يوجَد جزيء إضافي في هذه المنطقة للجليد غير المُتبلور العالي الكثافة، واثنان إضافيان للجليد غير المتبلور الفائق الكثافة ذي الكثافة الأعلى.

ما حدث، فيما يبدو، أن الحاجة إلى شَغل حيزٍ أقلَّ أدَّت إلى دفع طبقة الجزيئات المجاورة الثانية، التي كانت في الأساس على مسافةٍ أبعد عن كل جزيءٍ مركزي (على مسافة حوالي ٠,٤٥ نانومتر في حالة الماء السائل، وأطوار الجليد غير المُتبلورة ذات الكثافة المنخفضة) للاقتراب أكثر من ذلك الجزيء المركزي. وهكذا أصبح الآن على مسافة تتراوح بين ٠,٣١ و٠,٣٥ نانومتر منه، ولكن دون الارتباط معه مباشرة برابطة هيدروجينية.

وعلى الرغم من أن الصور ليست متطابقة إلى حدٍّ كبير، فإن التوزيعات المكانية لطبقة الجزيئات المجاورة الأولى والثانية تبدو مشابهة لنظيرتها في الماء السائل تحت الضغط (الشكل ٤-٦). لذا يبدو أن حالات الجليد غير المُتبلورة ذات الضغط العالي قد يكون لها بِنًى مشابهة لبِنى الماء السائل تحت الضغط.

تعدُّد الأشكال غير المُتبلورة

قبل أن نكتشف إمكانية إنتاج أكثر من شكلٍ مختلف بنيويًّا من الجليد غير المتبلور، ساد شعور عام بأنه من المُحتمل أن تكون هناك بِنية غير متبلورة واحدة فقط للمادة. هذا يختلف عن حالة البلورات، حيث غالبًا ما يمكن ترتيب الجزيئات — كما رأينا في الجليد — بطرق منتظمة مختلفة لتشكيل بِنًى بلورية مختلفة.

قد تكون ظاهرة «تعدُّد الأشكال البلورية» هذه مُثيرة للاهتمام بصفة خاصة؛ لأن الأشكال البلورية المُختلفة يمكن أن تكون لها خواص فيزيائية مختلفة. هذه النقطة لا تخفى بالتأكيد على القائمين على صناعة الأدوية على سبيل المثال، الذين قد يحتاجون إلى التأكُّد من أن عقارًا ما له شكل بلوري مُعين لتحسين امتصاص الجسم له. أما بالنسبة إلى الأشكال البنيوية غير المُتبلورة، فكان يُعتقَد أنه مع غياب قيود الشكل البلوري ستكون هناك طريقة واحدة فقط لترتيب الجزيئات بطريقةٍ غير بلورية. ومن خلال هذه النتائج التي توصَّلنا إليها عن الجليد، اضطُررنا إلى النظر في إمكانية تعدُّد الأشكال غير المتبلورة.

لذا بوصفنا علماء مُتشككين، ربما يجب أن ندرس احتمالية ألا تكون هذه البِنى الجليدية غير المتبلورة مُختلفة اختلافًا واضحًا. لقد رأينا في وقتٍ سابق أن وضع الماء السائل تحت الضغط يُعدل بِنيته من خلال دفع طبقة الجزيئات المجاورة الثانية غير المُرتبطة لتقترب أكثر، لكننا لم نرَ حينها حاجةً لتسمية هذا بِنية سائلة مُختلفة جوهريًّا.

استنادًا لمُناقشتنا للبنى غير المتبلورة العالية الكثافة أعلاه، ألا تبدو العلاقة البنيوية بين البِنية الشبكية شبه العشوائية للجليد غير المُتبلور المنخفض الكثافة وبنى الجليد غير المُتبلور العالية الكثافة مُشابهة للعلاقة بين الماء ذي الكثافة المنخفضة والعالية؟ في هذه الحالة، هل يجب أن ننظُر فعلًا إلى الجليد غير المُتبلور ذي الكثافة المُنخفضة والعالية باعتبار أن لدَيهما بِنى مختلفة بصورة واضحة؟

على الرغم من أن الأدلة المؤيدة أو المُعارضة لِمثل هذا الاقتراح ليست حاسمة، فهناك بيانات مُقنعة إلى حدٍّ كبير تُشير إلى أننا نتعامل فعلًا مع ثلاثِ بنًى جليدية غير متبلورة

متمايزة. وتُظهر القياسات الدقيقة حدوث قفزةٍ كبيرة في الكثافة عند الانتقال من حالة الجليد غير المُتبلور المنخفض الكثافة إلى الجليد غير المُتبلور العالي الكثافة، فإذا كان لهذَين الشكلَين في الأساس البنيةُ الأساسية نفسها، فلنا أن نتوقَّع أن بإمكاننا الانتقال بسلاسة من واحدةٍ إلى الأخرى. بالمِثل، عند تحويل الجليد غير المُتبلور العالي الكثافة إلى جليدٍ غير مُتبلور فائق الكثافة، نجد تغييرًا كبيرًا في قابلية الانضغاط، على الرغم من عدم حدوث تغيُّر كبير في الكثافة. وبناء على ذلك، تُشير الأدلة الحالية إلى أن لدَينا حالة حقيقية من تعدُّد الأشكال غير المتبلورة.

ثمة ملاحظة تتعلَّق أيضًا بهذه الحجة، وهي أنه في حالة الجليد غير المُتبلور العالي الكثافة والجليد غير المُتبلور الفائق الكثافة، هناك الكثير من التشوُّه في الأنماط الموضعية الرباعية الأسطح. لقد اكتشفنا لدى مناقشتنا لأطوار الجليد العالية الضغط في الفصل الثالث أن الضغط الناجم عن روابط الهيدروجين الشديدة التشوُّه يمكن تخفيفُه إذا «مررت» بعض روابط الهيدروجين عبر الحلقات التي تُشكلها الجزيئات الأخرى (انظر الشكل ٣-٤). أليس من المُمكن أن يكون ثمة شيء مُشابه يحدث هنا، مع حدوث انتظامٍ حلقي في البِنى الجليدية غير المتبلورة العالية الضغط؟

إذا كان الأمر كذلك، فنحن نتوقَّع حدوث فجوةٍ بين بِنيةٍ غير مترابطة وأخرى مترابطة، وهو انتقال طوبولوجي من المُحتمل أن ينعكس في صورة توقُّف بعض الخواص الفيزيائية، وكما أشرْنا في وقتٍ سابق، يحدث تغير في قابلية الانضغاط عند الانتقال من الجليد غير المتبلور العالي الكثافة إلى الجليد غير المتبلور الفائق الكثافة.

غير أن تخفيف الضغط الناجم عن تمرير الروابط الهيدروجينية سيؤدي على الأرجح إلى الحدِّ من تشوُّه النمط الأساسي الرباعي الأسطح الرباعي التناسُق، وهذا عكس ما ترصده التجارب. علاوة على ذلك، فشلت المحاولات حتى الآن للكشف عن حدوث أي تمريرٍ للروابط في بِنى الجليد غير المُتبلورة التي جرت محاكاتها بالكمبيوتر في العثور على أي منها.

لذا، وبينما لا تزال القضية قيد النظر، فإن الأدلة المُتراكمة حتى الآن تُشير إلى أننا يجب أن ننظر إلى الجليد غير المُتبلور المُنخفض الكثافة، والجليد غير المُتبلور العالي الكثافة، والجليد غير المُتبلور الفائق الكثافة، باعتبارها جميعًا أشكالًا متمايزة من الجليد غير المُتبلور ذات التعدُّد الشكلي.

هل الجليد غير المُتبلور غير بلُّوري حقًّا؟

قبل ختام هذا النقاش حول الجليد غير المتبلور، يجب أن نُشير إلى نقطة أخرى إضافية لا يزال هناك بعض الخلاف حولها: هل هذه الأشكال غير المُتبلورة حقًّا غير مُتبلورة أم ربما تكون مجرد تجمُّعات بلورية دقيقة جدًّا مرتبطة بعضها ببعض؟ أم قد تكون مجرد مزيجٍ من بلورات صغيرة من أطوار مختلفة، بالنظر إلى العدد الكبير من أطوار الجليد البلورية المختلفة؟

سعيًا لحلِّ هذه الإشكاليات، بُذلَت محاولات جادة لتفسير بيانات التشتُّت النيوتروني من حيث التبلور. ولكن فشلت جميع النماذج الدقيقة التبلور التي اختُبرت حتى الآن في التوافق مع البيانات التجريبية. وهكذا، وعلى الرغم من صعوبة «التأكد التام» من بيانات التشتُّت النيوتروني (أو الأشعة السينية) أن العينة حقًّا غير بلورية، فإن الرأي الغالِب يقول إن هذه البِنى الجليدية هي فعلًا وبحقٍّ غير مُتبلورة.

الفصل الخامس

تفسير حالات شذوذ الماء

كثيرًا ما يُسلَّط الضوء على حقيقة اختلاف سلوك الماء أحيانًا عن معظم السوائل الأخرى. وقد اكتُشف هذا السلوك الشاذ منذ سنوات عديدة؛ لذا تساءل الناس لفترة طويلة لماذا يبدو أن الماء يتصرَّف بصورة غريبة. وفي مُحاضرة رائعة أمام جمعية نوتنجهام الأدبية والفلسفية في عام ١٨٨٧، أشار جيمس إم ويلسون — الذي كان حينها أستاذًا للرياضيات في مدرسة راجبي، ولكنه أصبح فيما بعدُ رئيس الأساقفة في مانشستر — أن جميع حالات شذوذ الماء قد تعتمِد على خاصيةٍ واحدة له. فهل كان على حق؟ لنُحاول معرفة ذلك.

لقد صادفنا بالفعل شيئًا من هذا الشذوذ المزعوم. على سبيل المثال، بينما تكون معظم الهيدريدات الأخرى (مثل كبريتيد الهيدروجين) في حالةٍ غازية في درجات الحرارة والضغط الطبيعية، يكون الماء سائلًا. علاوة على ذلك، يظلُّ الماء سائلًا في مدًى واسعٍ نسبيًّا من درجة الحرارة (١٠٠ درجة مئوية)، ويستغرق كميةً كبيرة غير مُتوقعة من الطاقة لتبخيره عند نقطة غليانه؛ إذ إن حرارة تبخُّره الكامنة عالية إلى حدٍّ ما.

وقد أوضحنا هاتَين الخاصيتَين الشاذتَين على ما يبدو في الفصل الثاني. فهما نتيجتان طبيعيتان لقوة الرابطة الهيدروجينية المثالية بين جزيئات الماء. وكما عرفنا في موضع سابق، فإن هذه الطاقة في درجة حرارة الغرفة تُعادل عدة أضعاف طاقة التذبذُب الحراري العادية اللازمة لكسرها. في المُقابل، تتفاعل معظم الجزيئات الصغيرة الأخرى بالأساس من خلال قوى فان دير فالز الأضعف بكثير. ونظرًا لأن الطاقة الاعتيادية لهذا التفاعل الأضعف عادة ما تكون أقلَّ بكثيرٍ من طاقة التذبذبات الحرارية في درجة حرارة الغرفة، فإن معظم الجزيئات الصغيرة تكون غير قادرةٍ على البقاء في الحالة السائلة تحت الظروف المحيطة.

اختلاف مفيد

إن تفسير ما قد نُسميه بحالات الشذوذ «البنيوية» للماء السائل ليس أمرًا سهلًا للدرجة. على سبيل المثال، الماء السائل أعلى كثافةً من الجليد، في تناقُض صارخ مع معظم الأنظمة الأخرى حيث يكون الطور السائل أقلَّ كثافة من الطور البلوري. علاوة على ذلك، «يتقلص» الماء البارد عند التسخين، مع وصول كثافته إلى الحد الأقصى عند درجة ٤ مئوية. ونتيجة لذلك، لا يطفو الجليد على الماء فحسب، ولكن أيضًا لأن الماء الشديد البرودة أقلُّ كثافة من الماء الأكثر دفئًا قليلًا، فإن الماء البارد سيميل إلى الاستقرار على سطح البحيرات. ولِكِلا هاتَين الخاصيتَين غير العاديتَين عواقب كبيرة. على سبيل المثال، تتراتب البحيرات الباردة في طبقات. كما أنها تتجمَّد من الأعلى وليس من الأسفل؛ إذ تتسبب طبقة الجليد العائمة بما تتَّسِم به من انعدام الحمل الحراري، وانخفاض القدرة على توصيل الحرارة في إبطاء التجمُّد أكثر. وهذا أمرٌ مُهم جدًّا إذا كنتَ سمكة.

وهكذا يكون لِكِلا هاتَين الخاصيتَين للماء أهمية مناخية وبيولوجية. بل غالبًا ما يُفترض أن الأهمية البيولوجية العامة للماء مرتبطة بصفةٍ خاصة بخواصِّه الشاذة. لا تزال صحة هذا من عدمها موضع جدل (انظر الفصل السادس). أما ما نحن واثقون بشأنه فهو الأسباب الجزيئية لهذا السلوك الشاذ المزعوم.

ما هو السلوك الطبيعي ولماذا؟

ببساطة، عندما يتجمد سائل «طبيعي»، يتقلص حجمه. في المقابل، عندما تذوب بلورة «طبيعية» تقل كثافتها؛ إذ يشغل السائل حيزًا أكبر لكل جزيء من البلورة. وعندما نرفع حرارة السائل، يتمدد. وهذا يجعل ضغطه أسهل؛ ومن ثم تزداد القابلية للانضغاط كلما زادت درجة الحرارة. وعندما نُسلط ضغطًا على السائل، تزداد لُزوجته، وتقل قدرة الجزيئات على الانتشار — أو الانتشارية — في السائل.

يمكننا أن نفهم لماذا يكون هذا هو السلوك الطبيعي للسوائل عن طريق الرجوع إلى نموذج الرص العشوائي للسائل البسيط الذي ناقشناه في الفصل الرابع. ألقِ نظرة على الشكل ٤-١، الذي يقارن بين الترتيب المُنتظم للكرات في بلورة وبين الترتيب غير المُنتظم لسائل مثالي. يتبيَّن من المقارنة أن كثافة المادة المُتراصَّة بشكل غير منتظم (السائل المثالي) تكون أقل من كثافة التجمُّع البلوري المنتظم بنحو ١٥ في المائة؛ ومن ثم يجب أن تكون

المادة في الحالة السائلة أقل كثافة منها في الحالة البلورية القريبة من نقطة الذوبان. هذه حقيقة هندسية أساسية؛ لا يمكننا رص الكرات بكفاءة أعلى عنه في الرص البلوري المُنتظم الموضح في الشكل. وعلى الرغم من أن الأمر كذلك بالفعل كما هو معروف تجريبيًّا منذ أكثر من مائة عام، فإن إثباته رياضيًّا صعب للغاية؛ إذ لم تثبت صحة هذا الافتراض إلا مؤخرًا فقط.

إذا رفعنا حرارة السائل «الطبيعي» الآن (أو بالأحرى بلورة من مادته)، فمن المعروف عمومًا أنه سيتمدد؛ إذ يزداد متوسط المسافة بين أزواج الذرات. وإذا زدنا الضغط الآن، سنضغط الحيز الذي يشغله السائل، ومن ثم تقل المساحة التي تحتاجها الجزيئات لتتمكن من الحركة، بالإضافة إلى زيادة شدة القوى بين الذرات المتجاورة. ونتيجة لذلك، ستقل الانتشارية وتزداد اللزوجة.

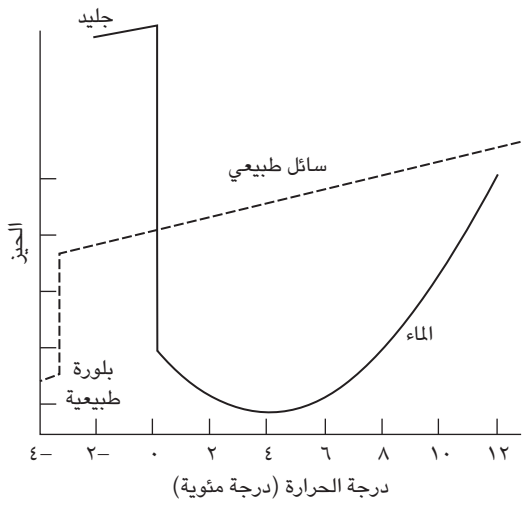
السلوك السيئ للماء

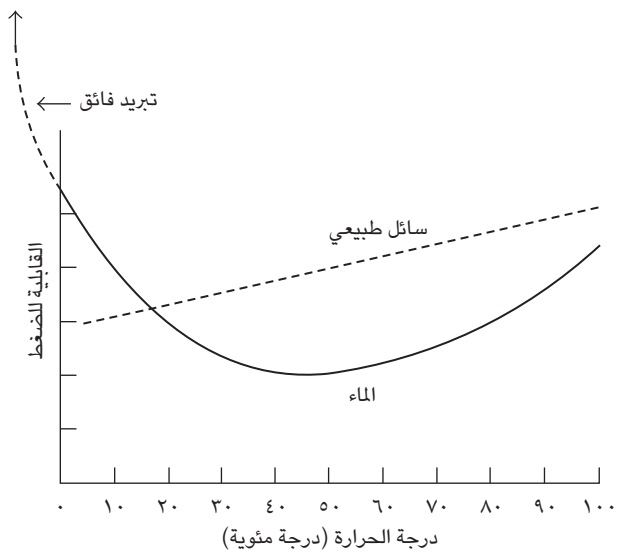
يوضح الشكل ٥-١ بيانيًّا (الشكل العلوي) كيف يتغير حجم الماء، وكيف تتغير قابليته للانضغاط (الشكل السفلي) مع تغير الحرارة. ولأغراض المقارنة يُعرض السلوك المتوقع لكل خاصية من خواص السائل «الطبيعي».

نرى على الفور أن الماء يفعل الأشياء على نحو مختلف تمامًا. ففي درجات الحرارة الأقل، تفعل كل من الخواص الموضحة الشيء «الخطأ».

«يتقلص» الجليد عند الذوبان، بينما يتمدد السائل الطبيعي. وعند أقل من أربع درجات مئوية «يتقلص» الماء السائل عند التسخين، في حين يتمدَّد السائل الطبيعي عبر نطاق درجة حرارته. وبين نقطة الذوبان ودرجة حرارة ٤٦ مئوية «تقل» قابلية الماء للانضغاط مع زيادة الحرارة، بينما تزداد هذه القابلية بالنسبة إلى السائل الطبيعي. وإذا نظرنا إلى لزوجة الماء عند درجة ٣٠ مئوية أو أقل، فإنها «تقل» كلما زاد الضغط من ١ إلى حوالي ١٠٠٠ وحدة ضغط، بينما تزداد اللزوجة مع زيادة الضغط في السائل الطبيعي.

يبدو أن الماء يسيء التصرُّف عند درجات الحرارة المنخفضة. ولكن عند رفع درجة حرارته، يبدو أنه يتوافق مع السلوك «الطبيعي». والسبب في هذا الطابع الفصامي الظاهر (إذ يكون سلوكه غير طبيعي عند درجات الحرارة المنخفضة، وطبيعيًّا في درجات الحرارة الأعلى) يتعلق بالبنية الموضعية الرباعية التي تُعتبر النمط البنيوي الأساسي في الماء. فهذا





شكل ٥-١: كيف تؤثر درجة الحرارة على حجم الماء (الشكل العلوي)، وقابليته للانضغاط (الشكل السفلي)، مقارنة بما يُرصَد في السوائل «الطبيعية».

السلوك السيئ يعود برُمَّته إلى الهندسة الجزيئية الموضعية التي تعكس اتجاهية تفاعل الرابطة الهيدروجينية (الشكل ٥-١).

الشذوذ في الذوبان

بالنسبة إلى نموذج السائل الطبيعي المصوَّر في الشكل ٤-١، تتيح إزالة قيد التبلور على البلورة الكروية الصلبة للجزيئات شَغْلَ حيز أكبر. لذا يكون السائل أقل كثافة من البلورة. أما بالنسبة إلى الماء، فقد رأينا بالفعل أن بنية الطور البلوري الطبيعي — طور الجليد Ih السداسي — يتطلَّب مساحةً كبيرة، ويوضح الشكل ٣-١ القنوات المفتوحة التي تترتَّب على الهندسة الرباعية «المفتوحة» لتناسُق الماء في نمطنا الرباعي الأساسي. عند ذوبان الجليد، نزيل قيد التبلور. حينها تتمكن الجزيئات من استكشاف مجموعة أوسع من البِنى الهندسية الموضعية، وكما ناقشنا في الفصل الرابع، تَنتُج مجموعة مختلفة من البِنى الموضعية اللحظية (انظر، على سبيل المثال، الشكل ٤-٤).

إذا نظرنا إلى هذا الذوبان من حيث البِنى الحلقية، نجد أن طور الجليد Ih يحتوي فقط على حلقات سداسية. وإزالة قيد التبلور تتيح للسائل تشكيل مجموعة من البِنى الحلقية. وستشتمل هذه البِنى الحلقية على حلقات خماسية ورباعية، وكلاهما سيشغل مساحة لكل جزيء أقل مما ستشغلها الحلقات السداسية لطور الجليد Ih.

بدلًا من ذلك، قد ننظر إلى التغير في الحيز في إطار تشوُّه النمط الرباعي التناسق الأساسي. نحن نعلم أن هذه الأنماط في طور الجليد Ih تكون قريبة جدًّا من الهندسة الرباعية النموذجية. ولكي تتناسب مع الحيز المُتقلِّص المتاح لها في أطوار الجليد العالية الضغط، يجب أن تتشوَّه هذه الوحدات الجزيئية الموضعية الأساسية عن طريق زيادة انحناء زوايا الرابطة OOO، وهو تشوُّهٌ ساعد في تشكيل مجموعة مختلفة من البِنى الحلقية. بعبارة أخرى مختلفة قليلًا، كلما كان النمط الرباعي أكثر تكاملًا، احتل حيزًا أكبر. في المقابل، عندما نتجه إلى بنًى حيث يكون هذا النمط الأساسي أكثر اضطرابًا — ذوبان البلورة في هذه الحالة — يمكن للنظام أن يشغل حيزًا أقل. ومن ثم تزداد كثافته.

إذا نظرنا إلى الأمر من كلتا الزاويتين — كتغيير في توزيع البنى الحلقية أو كتشوه في السائل للنمط الرباعي الأساسي — نجد أن إزالة قيود التبلور للجزيئات تتيح للجزيئات أن تشغل مجموعة من البنى الموضعية، التي يشغل كثير منها حيزًا لكل جزيء أقل مما تشغله البلورة. وتكون المحصِّلة النهائية — كما قد يشير الرسم الكرتوني الثنائي الأبعاد

في الشكل ٤-٣ — سائلًا ذا كثافة «أعلى» من كثافة البلورة. ومن ثم يتقلَّص الجليد عند الذوبان.

وهذا يعني أن الماء يتمدد عند التجمد. وبذلك، يمكن أن يسبب قدرًا من الضرر لأنظمة شديدة الاختلاف مثل الخلايا البيولوجية والصخور. لذا، يكون هذا الشذوذ مهمًّا جدًّا من الناحية الجيولوجية والبيولوجية، بالإضافة إلى أنه ربما يقدِّم فكرة بشأن الطعام المجمَّد، ولماذا لا يكون لذيذًا مثلما كان قبل وضعه في الثلاجة.

بارد وفصامي

يُمكننا أن نقدم حجة ذات صلةٍ لتفسير سلوك التمدُّد الحراري عند درجات الحرارة المنخفضة، الموضح في الشكل ٥-١. كما نعلم، يتمدَّد السائل البسيط عند التسخين، حيث يزداد متوسط تباعد الجزيء المجاور الأول. يحدث هذا في الماء أيضًا، ولكن بالإضافة إلى ذلك، تؤدي زيادة الحرارة إلى تشويه زوايا الرابطة OOO في النمط الرباعي الأساسي. والزيادة الناتجة في تبايُن زاوية الرابطة ستُتيح استكشاف البِنى الموضعية «الأعلى كثافة» (كما فَعلَت عند ذوبان الجليد).

وهكذا يكون لدينا تأثيران يحدُثان عند زيادة الحرارة؛ عملية تمدُّد حراري عادية تؤدي إلى زيادة متوسط مسافات الرابطة الهيدروجينية بين الجزيئات و«انخفاض» في الكثافة، وزيادة في التبايُن الزاوي ستؤدي بدورها إلى «زيادة» في الكثافة. وبناء على ذلك، فإن هذين التأثيرَين يعمل كل منهما ضد الآخر؛ إذ يُحاول أحدهما زيادة حجم السائل، والآخر يحاول تقليله. وسيكون التغيُّر المرصود في الحيز نتيجة للتسوية بين هذين الاتجاهين المتنافسَين. عند درجة الحرارة المُنخفضة (التي تقلُّ عن درجة الحرارة القصوى للكثافة، وهي ٤ درجات مئوية)، يُهيمن تباين زاوية الرابطة، مما يؤدي إلى تقلُّص الحجم الكلِّي للسائل، أما فوق هذه الدرجة، فتتولَّى آلية التمدُّد الحراري العادية السيطرة ويبدأ السائل في التمدُّد كسائل عادي.

يُمكننا تفسير شذوذ خاصيةِ قابلية الانضغاط عند درجات الحرارة المُنخفضة بطريقة مماثلة. كما نرى في الشكل ٥-١، على عكس السائل العادي، يُصبح الماء البارد أكثر صعوبةً في ضغطه عندما نرفع الحرارة إلى درجة ٤٦ مئوية. وفوق هذه الدرجة، يعود سلوكه طبيعيًّا. مرة أخرى تحدث منافسة بين تأثيرَين متعارضَين. فعند درجات الحرارة المنخفضة، سيزيد تطبيق الضغط من متوسط تشوُّهات الأنماط الرباعية الأساسية من

خلال مزيدٍ من الانحناء للزاوية OOO. وهذا بدوره سيسمح بتكوين بِنًى موضعية أعلى كثافة، ودفع جزيئات الماء أكثر بعضها نحو بعض الناتج عن هذا سيجعل ضغط السائل أصعب. بمجرد أن نتجاوز الحد الأدنى في مُنحنى قابلية الانضغاط، تُهيمن عملية التمدُّد الحراري «العادية»، مما يُقلل من كثافة السائل، ومن ثم يجعل ضغطَه أسهل.

يُمكننا أيضًا بطريقةٍ مماثلة شرح حالات الشذوذ في الخواص الديناميكية، مثل اللزوجة والانتشارية. في السوائل العادية، تُقلل زيادة الضغط من الحجم النوعي لكل جزيء، مما يقلل قدرة الجزيئات على الحركة، وانخفاض الانتشارية بالتبعية. الماء البارد يفعل العكس؛ إذ إن زيادة الضغط تزيد انتشاريته. التفسير هنا في الأساس هو نفسه الذي تناولناه في وقتٍ سابق؛ زيادة الضغط ستُشوِّه النظام التوجيهي الموضعي من خلال زيادة انحناء الرابطة الهيدروجينية. وحين نتذكَّر كيف استدعَينا وجود بِنى العيوب المُتشعبة في الفصل الرابع لتفسير قدرة شبكة الماء السائل المُرتبطة فيما بينها هيدروجينيًّا على الحركة، نجد أن زيادة الضغط ستزيد على الأرجح من تركيز هذا العيب؛ ومِن ثم يكون من المتوقَّع زيادة الانتشار. أما اللزوجة فهي مُرتبطة ببساطة بمعكوس عملية الانتشار؛ لذا فإن تفسيرًا مُماثلًا ينطبق أيضًا على السلوك الشاذ للُّزوجة.

هل هذا السلوك الغريب فريدٌ من نوعه؟

الإجابة البسيطة هي لا. إذا كانت تفسيراتنا لهذه الخواص الشاذة صحيحةً وسليمة، ألن نتوقَّع من المواد الأخرى التي تتَّسِم بِنياتها بتناظُرٍ رباعي موضعي مُشابهٍ أن تتصرَّف بشكلٍ غريب أيضًا؟ بلى، نتوقَّع ذلك. وهذا ما يحدُث بالفعل.

إحدى تلك المواد مألوفة لنا كثيرًا، وهي السيليكا. في السيليكا، ورمزها الكيميائي SiO_2، تتصل كل ذرة سيليكون بأربعة ذرات أكسجين في نمطٍ رباعي التناسُق مُشابهٍ جدًّا لما كنَّا نناقشه بالنسبة إلى الماء، وتكون كل ذرة أكسجين مُشترَكة بين ذرتَي سيليكون متجاورتَين. لذا لا ينبغي أن نتفاجأ من وجود تشابُهات بينها وبين الماء من حيث خواص حالتها السائلة. فهي تتميز، على سبيل المثال، بدرجة حرارةٍ للكثافة القصوى يُمكن تفسيرُها بنفس الطريقة التي شرحنا بها أسباب مرور الماء بكثافة قصوى في درجة حرارة مُعينة. تشمل الأمثلة الأخرى السيليكون والجرمانيوم، اللذَين يرتبطان في العادة بالذرَّات المجاورة لهما بشكلٍ هندسي موضعي رباعي السطوح.

علاوة على ذلك، بعض الذرَّات أو الجزيئات الأخرى التي ترتبط معًا من خلال الارتباط الموجَّه قد تكون لها بِنًى مفتوحة، ومن ثم تُظهر سلوكًا «شاذًّا» ذا صلة، على سبيل المثال، يتقلَّص البزموت أيضًا عند الذَّوبان. قد نُلاحظ أن هذا السلوك مُشابهٌ لسلوك الماء، ولكن الترابُط الأقوى بين الجزيئات في هذه المواد يعني أن هذا السلوك يحدث في درجات حرارةٍ أعلى بكثير؛ إذ تبلُغ نقاط ذوبان السيليكا SiO_2، والسيليكون Si، والجرمانيوم Ge، والبزموت Bi على التوالي ١٧١٠ درجات مئوية، ١٤١٠ درجات مئوية، ٩٣٧ درجة مئوية، و٢٧١ درجة مئوية، مقارنة بصفر درجة مئوية للماء.

بذا، فإن توقُّعاتنا صحيحة. إن الهندسة الموضعية بين الجزيئية هي المسئولة في نهاية المطاف عن «حالات الشذوذ» البنيوية التي يُمكننا ملاحظتها، ليس فقط في الماء السائل، بل أيضًا في السوائل الأخرى ذات البِنى الهندسية الموضعية المُماثلة. يبدو أننا يجب أن نوجه الشكر لروح جيه إم ويلسون لبُعد نظرِه وفطنته في نوتنجهام في عام ١٨٨٧، حين أشار إلى أن خاصية بنيوية واحدة قد تكون مسئولة عن الخواص غير العادية للماء. علاوة على ذلك، وعلى الرغم من المزاعم المتكررة بأن الأمر عكس ذلك، فلا وجود لـ «غموض» حقيقي حول أصل الخواص الفيزيائية للماء. فبإمكاننا فهمها من حيث اتجاهية تفاعُلاتها بين الجزيئية. وفي هذا الإطار، لا يُعَد الماء حالة استثنائية.

المذيب الشامل؟

ثمة جوانب أخرى لسلوك الماء تجعله مُثيرًا للاهتمام بصفة خاصة، وإن كانت لا تُعتبر جوانب شاذة، بالإضافة إلى أنها مفيدة ومهمة للغاية كيميائيًّا وفيزيائيًّا وبيولوجيًّا وجيولوجيًّا وبيئيًّا. تتعلق هذه الجوانب بالخواص الكهربائية للجزيء. وعلى الرغم من أن هذه الخواص مُرتبطة ارتباطًا وثيقًا مع البِنية الجزيئية للماء، من الأسهل النظر إليها بمعزلٍ عن حالات الشذوذ البنيوية.

نعلم من واقع مُناقشتنا للجزيء نفسه في الفصل الثاني أنه يمتلك مناطق منفصلة ذات شحنة موجبة وسالبة. الصورة الأبسط التي عرضناها في الشكل ٢-١ كانت تحتوي على شحناتٍ موجبة افتراضية على ذرات الهيدروجين، ومنطقة سالبة الشحنة على ذرات الأكسجين على الجانب الآخر. وبما أننا نعلم أن الشحنات غير المُتشابهة تتجاذب، فإن نموذجًا بسيطًا لتفاعل الترابط الهيدروجيني بين جزيئين من الماء من شأنه أن يُبين أن

المناطق الموجبة الشحنة تجذب المناطق السالبة الشحنة، مما ينتج عنه بنيتنا الموضوعية الرباعية المألوفة لنا.

غير أن الماء لم يكن وحيدًا قطُّ في كونه جزيئًا «قطبيًّا»؛ أي جزيئًا يحتوي على شحنات منفصلة. لذا، إذا قُمنا بمزج الماء مع جزيئات قطبية أخرى، فسنتوقع أن حدوث تجاذبات بين الشحنات غير المُتشابهة أيضًا في الجزيئات المضافة. وتكون النتيجة محلولًا مائيًّا يتكون من الجزيئات المُضافة. بالمثل، إذا أضفنا الملح إلى الماء، فسوف يذوب بسهولةٍ أيضًا؛ فالأيون المُوجَب للملح سيبحث بكل سعادةٍ عن المنطقة السالبة في الماء، بينما سيتَّجه الأيون السالب للطرف الهيدروجيني المُوجَب في الماء. لذا، يُعَد الماء مُذيبًا جيدًا بصفةٍ خاصة للجزيئات أو الأيونات القطبية أو المشحونة الأخرى.

لا ينفرد الماء بهذه القدرة على إذابة «الأشياء»، ولكنه يُجيد ذلك بشدة. ويرجع هذا إلى سببَين رئيسين. الأول، كما ذكرنا في الفصل الثاني: لأن عزمَه القطبي — الذي يقيس قوة الجودة القطبية للجزيء — عالٍ جدًّا. غير أننا ذكرنا أيضًا في الفصل الثاني أن للماء قدرة استقطاب عالية؛ إذ يزداد توزيع شحنته بسهولةٍ نسبيًّا عندما يكون في مجالٍ كهربائي.

في السائل، سيختبر كل جزيء ماء مجالًا كهربائيًّا (متذبذبًا) من جيرانه. هذا المجال سيُحدث اضطرابًا في توزيع شحنته الكهربائية. وسيكون التأثير العام لذلك في السائل هو زيادة متوسط العزم القطبي الجزيئي في السائل. وعلى الرغم من عدم وجود قياسات سهلة التفسير لدرجة تعزيز العزم القطبي، فإن الحسابات المُستنِدة إلى بِنى السائل الواقعية تشير إلى توزيعٍ واسع لنتائج العزم القطبي الفردي، تتراوح من حوالي ٢ إلى حوالي ٤ ديباي، ما يعني متوسطًا أعلى بصورة ملحوظة من قيمة الجزيء المعزول التي أشرنا إليها في الفصل الثاني، والتي تبلغ ١٫٨٥ ديباي.

الانفصال ليس صعبًا

من نتائج تعزيز عزم القطبية هذا زيادة قُدرة الماء السائل كمذيب. لنفكر على سبيل المثال في إضافة بعض الملح العادي (NaCl) إلى الماء. الشحنات الفعالة على أيونات الصوديوم والكلور أكبر من نظيرتها على جزيئات الماء، لماذا إذن لا تُفضِّل أيونات الصوديوم والكلور التلاحُم معًا في المحلول؛ فالطاقة التي ستربطهما معًا، في النهاية، أكبر من تلك التي ستُقنعهما بأن يكونا مُتعدِّدَي الشركاء، ويتزاوجا مع جزيءٍ أو اثنَين من الماء، وبالتالي

يذوبان؟ السبب في ذلك هو أن الماء لدَيه حيلة سرِّية قذرة (إذا كنت تؤمن بالزواج الأحادي)، تتمثل في أن وجودَه في حدِّ ذاته يُضعِف التجاذب بين الأيونات ذات الشحنات المتضادَّة.

يعود هذا إلى فيزياء التفاعل الأساسية بين شحنتَين. نحن نعلم أن القوة التي تجذب شحنتين q^+ وq^- تعتمد على حجم الشحنات والمسافة بينهما. فيضعُف التفاعُل كلما كانت الأيونات متباعدة، فيما يُعرَف بقانون التربيع العكسي.

غير أن القوة تُعدَّل بفعل طبيعة الوسط الذي يحدُث فيه التفاعل، وكلما كان الوسط أكثر قطبية، كان التفاعُل أضعف. ويُقاس هذا الضعف كميًّا بواسطة «ثابت العزل الكهربائي» أو «النفاذية» الكهربائية ϵ: كلما كانت النفاذية أكبر، كان التفاعل أضعف. والسوائل المُكوَّنة من جزيئات ذات عزمٍ قطبي عالٍ لها نفاذية كبيرة. لذا تنفض التجاذبات بين الأيونات، وتتجمَّع جزيئات الماء حول الأيونات التي ذابت الآن في المحلول.

حذارِ أيتها الأيونات! فالماء مُذيب قوي جدًّا.

تحويل الشحنات

بالإضافة إلى ارتفاع الانتشار الجزيئي بصورةٍ غير طبيعية في الماء السائل، ترتفع توصيليته الكهربائية أيضًا. يبدو هذا غريبًا للوهلة الأولى، لماذا تقوم مجموعة من جزيئات H_2O المُحايدة بتوصيل الكهرباء أصلًا؟ لدَينا بالفعل مفتاح لإجابة هذا السؤال من مناقشتنا للعيوب في الجليد.

رغم أننا نفترِض حتى الآن أن الماء السائل مُكوَّن من جزيئات H_2O محايدة، فالأمر ليس بهذه البساطة. ولعلَّ هذا من حُسن حظنا؛ لأنه لو كانت هناك جزيئات مُحايدة فقط، فإن الكثير من الأشياء المُهمَّة لوجودنا لم تكن لتحدُث. العامل الحاسم غير المتوقَّع هنا أن جزيئات الماء يمكن أن تتفكَّك إلى أيونات من خلال تفاعُل تفكك.

$$2H_2O \Longleftrightarrow H_3O^+ + OH^-.$$

هذه الأيونات — أو الصيغ المائية منها، مثل $H_5O_2^+$ — لا تُوجَد إلا بتركيزات منخفضة جدًّا، تبلغ نحو زوجٍ واحد من الأيونات في حوالي عشرة ملايين جزيء ماء في الظروف القياسية المُحيطة. ولكن حقيقة وجودها تعني أن الماء حمض ضعيف (لوجود

أيونات موجبة) وقلوي ضعيف (لوجود أيونات سالبة) على حدٍّ سواء. يمكن تعديل التوازن بين تركيزات الأيونات الموجبة والسالبة — والحامضية أو القلوية بالتبعية — عن طريق إضافة جزيئات أخرى. يؤثر تغيير الحرارة كذلك على توازُن التفكُّك؛ فعند درجة حرارة ١٠٠٠ مئوية وضغط يساوي ١٠٠ وحدة ضغط، يتأيَّن جزيءٌ واحد تقريبًا من كل ألف جزيءٍ من الماء، مما يجعل السائل مُركبًا كيميائيًّا مختلفًا تمامًا، وفي غاية الشراسة.

إن وجود الأيونات في الماء السائل، حتى بأدنى تركيزٍ طبيعي لها، كافٍ لحدوث عمليات نقل الشحنة، والتوصيل الكهربائي بالتبعية. وكما سنرى لاحقًا في الفصل السادس، فإن القدرة على نقل الشحنة مُهمة عند النظر في الأهمية البيولوجية للماء.

آلية التوصيل

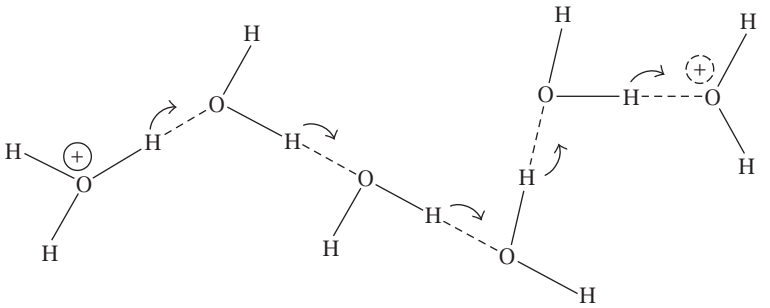
على الرغم مِن أننا نعلم أن هذه الأيونات تُشارك في توصيل الشحنة عبر الماء، فلا يزال هناك جدل حول الآلية الفعلية لذلك. وكان التفسير المُفضل لذلك لسنواتٍ عديدة، يتمثل في عمليةٍ اقترحها الكيميائي الألماني تيودور جروتوس منذ أكثر من قرنَين، والذي يرجع إليه الفضل في تأسيس النظرية الأولى للتحليل الكهربي وصياغة القانون الأول للكيمياء الضوئية.

كما هو موضح في الشكل ٥-٢، يُشار إلى أن بروتونًا ينتقل من أيون H_3O^+ من خلال رابطة هيدروجينية إلى جزيء ماءٍ مجاور، مما يُعيد إنشاء الأيون H_3O^+ على الجزيء المجاور. ثم ينتقل بروتون آخر من الجزيء المُتلقي بطريقةٍ مماثلة إلى جزيء مُجاور آخر، وهكذا، مما يؤدي إلى انتقال البروتون «الزائد» الأصلي عبر السائل.

يمكن استدعاء عملية مُماثلة لمحاولة شرح الحركة «العكسية» لأيون OH^-؛ جرِّب ذلك برسم سلسلةٍ مُماثلة مرتبطة برابطةٍ هيدروجينية من جزيئات الماء مع وضع OH^- في أحد الأطراف، ثم اسمح لذرة هيدروجين من أحد جيرانها بتحويله إلى H_2O. ثم استمر هكذا على طول السلسلة حتى تصِل إلى الطرف الآخر، حيث ستكون قد أنشأت أيون OH^- جديدًا. وهكذا ستكون الشحنة السالبة قد انتقلت من أحد طرفَي السلسلة إلى الطرف الآخر.

بقدْر ما تبدو هذه الآلية جذابة، إلا أنها تتعارَض مع بعض الأدلة التجريبية.

موضح في الشكل ٥-٣، من خلال سلسلة من اللقطات البنيوية، تفسير يبدو أنه يتَّفق مع البيانات التجريبية. الجزيء A في الصورة العلوية هو أيون H_3O^+. وبما أنه



شكل ٥-٢: فكرة تيودور جروتوس عن كيفية انتقال الشحنة الكهربية الموجبة في الماء.

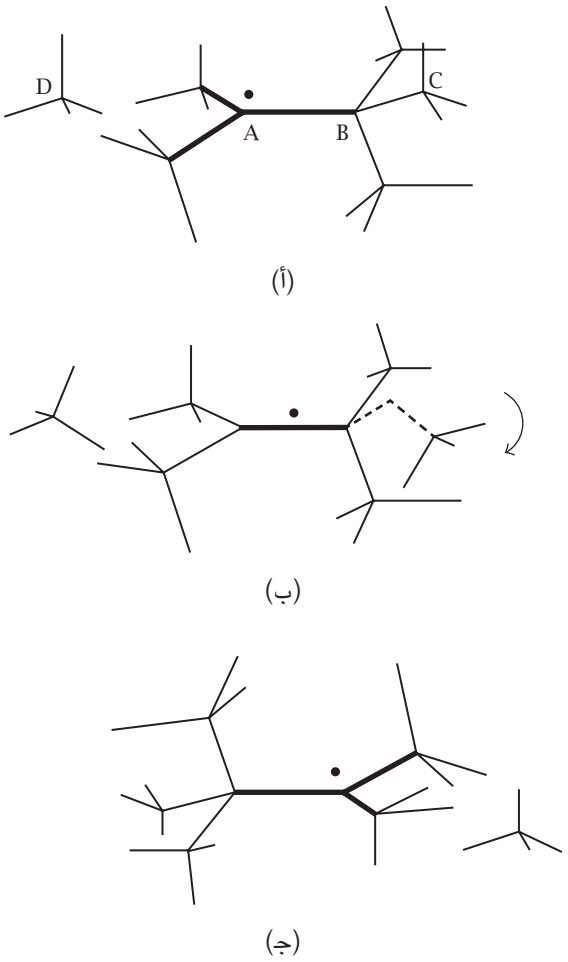
يحتوي على ثلاث ذرات من الهيدروجين، فإنه يرتبط هيدروجينيًّا بثلاثة جزيئات أخرى من الماء من خلال توجيه كل واحدة من ذرات الهيدروجين تلك نحو المناطق السالبة الشحنة من ثلاثة جزيئات ماء مجاورة.

لكي يتمكن البروتون الإضافي من الانتقال عبر رابطة هيدروجينية، يجب أن يفقد الجزيء المجاور المُتلقي في مدار التناسق الأول للجزيء A (الجزيء B) أحد جيرانه الأربعة، لنقل الجزيء C، الذي يوجَد في الغلاف التناسقي الثاني للأيون H_3O^+ (الجزيء A). يُعتقَد أن كسر هذه الرابطة الهيدروجينية (انظر الصورة الوسطى) يتحكم في معدل انتشار البروتون. بمجرد أن ينتقل البروتون إلى الجار B، يفقد الجزيء A جارًا رابعًا؛ لذا يرتبط جزيء ماءٍ آخر به (D).

وهكذا يمكن اعتبار أن هذه العملية تُستحث بقطع رابطة الهيدروجين أمام البروتون المتحرك مع تكوين رابطة هيدروجين لاحقة في ظهره. يمكن تشبيه الأمر هنا بالنبي موسى وهو يشق البحر الأحمر بعصاه.

هل هذا هو دور ميكانيكا الكم؟

كان الدارِج طوال ما لا يقلُّ عن أربعين عامًا الاعتقاد بأن البروتونات قد «تمر نفقيًّا» عبر سلاسل جزيئات الماء. في هذا التأثير الميكانيكي الكمومي المعروف، قد يكون الجسيم الذي لا يملك طاقةً كافية للتغلُّب على حاجز الطاقة قادرًا في الواقع على المرور نفقيًّا «خلاله».



شكل ٥-٣: اعتقادنا الحالي عن كيفية انتقال البروتونات عبر الماء.

وبقدْر ما قد تبدو الفكرة جذَّابة، فإن الحسابات الحديثة لا تدعم فكرة كون هذه الآلية ذات أهمية كبيرة هنا.

غير أن ما تُظهِره الحسابات فعليًّا أن الحاجز أمام حركة البروتون على طول الرابطة الهيدروجينية «يُجرَف» إلى حدٍّ ما بفعل حركة النقطة الصفرية لذرات الهيدروجين التي

أشرنا إليها في الفصل الثاني. يُعتقَد أن حركة النقطية الصفرية هذه تُقلل بصورةٍ فعالة من حاجز الطاقة التقليدي لحركة البروتون بنسبة ٧٥ في المائة تقريبًا، مما يُسهل عملية نقل البروتون. وبما أن حركة النقطة الصفرية تزداد كلَّما كانت الذرة أخفَّ وزنًا، فإن حقيقة أن الماء يحتوي على ذرتَين خفيفتَين مهمة لانتقال الشحنة في السائل. وهذه الأهمية موصولة لقدرته العالية بصورةٍ غير طبيعية على توصيل البروتونات التي مِن المحتمل أن تكون لها أهمية بيولوجية كبيرة، كما سنرى في الفصل السادس.

الفصل السادس

الماء باعتباره جزيئًا حيويًّا

الماء جزيء حيوي

الماء أساسي للحياة، هذا ما يتكرر على مسامعنا. فجميع أشكال الحياة المعروفة تحتوي على نسبة عالية من الماء، وفي حين يدخل في تكوين كل منا بنحو ٧٠ في المائة، يتفوق علينا القنديل بمحتوًى من الماء يصل إلى نحو ٩٨ في المائة. لذا فليس من المُستغرَب أننا قد أصبحنا نعتقد أن الماء هو عنصر حاسم للحياة. يُقال لنا حيثما لا يوجَد ماء لا يمكن أن تكون حياة.

تمتدُّ هذه العقيدة إلى بحثنا عن الحياة خارج حدود الأرض، الذي يبدو أنه يتركَّز على البحث عن الأماكن التي قد يكون (أو كان) فيها ماء. فقد حاز البحث عن الماء على المريخ اهتمامًا مكثفًا لعقود. وعلى ما يبدو، هناك الكثير من الأدلة التي تُشير إلى أن الأشكال المألوفة للحياة لا تزدهِر في غياب الماء بالتأكيد. على سبيل المثال، كان تجفيف الطعام وسيلةً فعالة لزمنٍ طويل للحفاظ عليه من هجوم الجراثيم.

أما على الأرض، فبالطبع لا يُوجَد سائل يتوافر طبيعيًّا وبصفة مستمرة غير الماء؛ لذا فإن اعتماد أي شكلٍ للحياة على الأرض في تطوُّره على وسط سائل غير الماء أمر مستبعد. وإذا كانت الحياة التي نراها على الأرض تعتمد على الماء، فهل هذا ببساطة نتيجة حتمية لاتساع نطاق وجود الماء السائل على الأرض؟ أم لأن الماء قد يكون «فريدًا» في قُدرته على دعم وجود «أي شيء» نعرف أنه حي؟

بالنظر إلى هذا الاعتراف بالأهمية البيولوجية للماء، قد يكون من المدهش نوعًا ما أنَّ علم الأحياء يميل في إطاره التعليمي إلى الاعتراف بما يُسمَّى «جزيئات الحياة»، كالإنزيمات التي تُحفز التفاعلات الكيميائية التي تقوم عليها الحياة، والأحماض النووية التي تحمل الشفرة الجينية، والدهون التي تُشكل الخلايا التي يحدث فيها كثير من العمليات الحيوية.

ولا يُلتفَت كثيرًا إلى الوسط المائي الذي يحدث فيه كثير من العمليات البيولوجية، إن التُفِت إلى هذا الأمر عمومًا.

قد نتساءل في أذهاننا في هذا المقام عن السبب وراء رغبة بيرنال في فهم السوائل (الفصل الرابع): لقد أراد فَهم الماء ودوره في العمليات البيولوجية. فإذا كانت الحياة بالفعل تعتمِد على الماء، فربما يجِب اعتبار جزيء الماء نفسه جزيئًا بيولوجيًّا في حدِّ ذاته، تمامًا كالبروتين أو الحمض النووي. وقد يصحُّ هذا أكثر إذا كان الماء بالفعل أساسيًّا لعمل هذه الجزيئات الحيوية الأكبر والأكثر رومانسية.

لماذا يُعَد الماء مهمًّا من الناحية البيولوجية؟

إذا كانت الحياة «برُمَّتها» تعتمد بالفعل على الماء، فيجب أن نكون قادرين على تفسير ذلك. مع بداية إدراك مزيدٍ من العلماء للأهمية البيولوجية للماء، شهدت السنوات الأخيرة تزايُد المؤتمرات العلمية وورش العمل حول «الماء في الأحياء». غير أنه نادرًا ما يبدو أن هذه الفعاليات تتساءل بالضبط عن «لماذا» يُعَد الماء مُهمًّا. ما الوظائف البيولوجية التي يُشارك فيها الماء على المستوى الجزيئي؟ هل الماء حقًّا ضروري؟ هل هناك شيء فريد في خواص الماء يعني أنه لا يمكن لمركَّب آخر أن يحلَّ محله؟

إذا لم نتمكَّن من الإجابة عن هذه الأسئلة، فكيف يُمكننا أن نتأكد من أن الماء «أساسي» للحياة؟ هل يمكن أن تقوم جزيئات أخرى بدورٍ مُماثل أو أدوارٍ مماثلة؟ هل يمكن استبدال وسط آخر بالماء في شكلٍ آخر للحياة في مكانٍ آخر في الكون، ويظلُّ بإمكانه القيام بعمليات التمثيل الغذائي والتكاثر؟

سنتناول بإيجازٍ هذَين السؤالَين الأخيرَين قُرب نهاية هذا الفصل. أما الآن، فسنتعمق في معرفتنا بالماء وتفاعُلاته، لنرى إن كان بإمكاننا الإجابة عن السؤالَين اللذَين ربما يكونان أقلَّ صعوبة: «كيف» يؤثر الماء في العمليات البيولوجية، و«ما» الخواص في جزيء الماء التي تُمكِّنه من القيام بذلك.

تثبيت بِنى البروتين

نظرًا لاتساع نطاق العمليات المهمَّة بيولوجيًّا الذي قد نتناوله، سنُركز على دور الماء في بنية الإنزيمات وطريقة عملها، لتوضيح طرُق مساهمة الماء في هذه العمليات.

الإنزيمات هي جزيئات بروتينية كبيرة، تتكوَّن من «سلسلة» من جزيئات (أحماض أمينية) أصغر، مُرتبطة معًا بروابط كيميائية. لكي يقوم الإنزيم بعملِه في تحفيز تفاعل كيميائي، مثل التعديل الكيميائي لجزيءٍ آخر — «الركيزة» التي يعمل عليها — يجب أن يتخذ أولًا بِنية تُمكِّنه من العمل. تحتاج السلسلة المُمتدة من الأحماض الأمينية إلى «الطي» لتشكيل ترتيبٍ أكثر انضغاطًا، حيث تكون أجزاء الجزيء النشطة في تحفيز العملية الكيميائية مكشوفة، بحيث يمكن للركيزة الأصلية الوصول إليه.

ثمة طريقة بسيطة لتخيُّل تفاعُل الإنزيم مع الركيزة، وهي أنها تنطوي على آلية القفل والمفتاح؛ يجب أن تتمكن الركيزة (المفتاح) من الالتصاق بالجزء النشط على الإنزيم (القفل) حتى يمكن للتفاعل الكيميائي (تدوير المفتاح) أن يتم. وكما نعرف من التجربة، إذا كان القفل تالفًا، فإن الروافع داخله لا تكون في المكان الصحيح، ولن يدور المفتاح. بالمثل، إذا لم يكن للإنزيم البنية الصحيحة، قد لا ترتبط الركيزة به، أو حتى إذا فعلت ذلك، فقد لا تحدث العملية الكيميائية.

وهكذا فإن «بنية» الإنزيم ضرورية لنشاطه. لذا من الطبيعي أن نركز أولًا على «بنية» هذا الجزيء الكبير، ونرى كيف يُمكن أن يكون الماء ذا صلةٍ بتشكيل هذه البنية والحفاظ عليها.

المذيب الشامل مرة أخرى

للقيام بهذا، نحتاج بالطبع إلى النظر في كيفية تفاعُل جزيئات الماء مع جزيئات أخرى.

لقد أنجزنا الجزء الصعب في هذا الشأن بالفعل في الفصل الخامس، حيث أشرنا إلى الكيفية التي يمكن بها لجزيئات الماء — كونها ذات قطبية قوية — التفاعل من خلال الترابط الهيدروجيني مع جزيئاتٍ قطبية أخرى. وهكذا، وبما أن كثيرًا من المجموعات الكيميائية على الأحماض الأمينية التي تُشكل إنزيمنا مجموعات قطبية، إذ تحتوي على سبيل المثال على مجموعات كحولية OH−، ومجموعات حمضية NH−؛ سنتوقع أن يتفاعل الماء بسهولة معها. وسنتوقع أن تحدث هذه التفاعُلات مع مجموعاتٍ قطبية أخرى بطرقٍ تتوافق مع هندسة التفاعل. تذكر مرة أخرى نمطنا الرباعي!

عندما ننظر إلى بِنى جزيئات الإنزيم، نجد أنها تميل إلى الطي بحيث تتخذ شكل بِنًى مدمجة تُشبه الكرة (ليس بالضرورة أن تكون كروية الشكل؛ فكرات الرجبي أقرب في الشبَه لبعض الإنزيمات). ولكن ليس من الضروري أن تكون الأسطح ملساء وانسيابية

على المستوى الجزيئي، وقد يكون هناك جيوب، خاصةً في المواقع النشطة حيث تحتاج الركيزة إلى الارتباط (وهي خاصيةٌ ربما تكون من بين أسباب استخدام تشبيه القفل والمفتاح). عندما تُطوى جزيئات الإنزيم في هذه البنية المدمَجة، تتفاعل مجموعات كيميائية مختلفة من الأحماض الأمينية بعضها مع بعض، على سبيل المثال من خلال الروابط الهيدروجينية المُشابهة لتلك التي تناولناها في حالة تفاعل جزيئات الماء بعضها مع بعض.

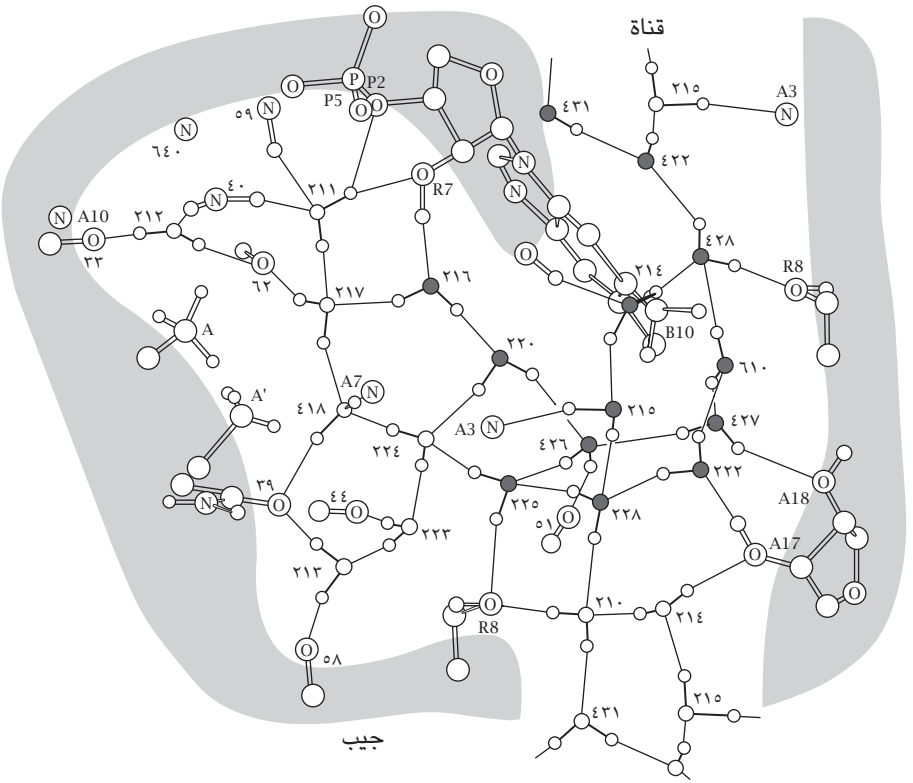
ولكن ستكون هناك على السطح مجموعات كيميائية مكشوفة. إذا كانت هذه المجموعات المكشوفة قادرة على الارتباط هيدروجينيًّا مع مجموعات أخرى، فمِن المُرجح أن تكون البنية غير مستقرة للغاية بالنسبة إلى البِنية غير المطوية، ومن ثم قد لا يُطوى الجزيء الكبير، ما لم تستطع تلك المجموعات المكشوفة العثور على مجموعةٍ قطبية للتفاعل معها.

وهنا يتدخَّل الماء ليُنقذ الموقف.

تلبية الاحتياجات المتبادلة

يوضح الشكل ٦-١ أنواع التفاعلات التي تقوم بها جزيئات الماء مع سطح الجزيء الحيوي العادي. يُظهر هذا المثال قسمًا في جيب على سطح تميم الإنزيم (أو المرافق الإنزيمي) لفيتامين بي١٢، وهو جزيء أساسي لنشاط كثير من الإنزيمات، ويدخل في عددٍ من العمليات الكيميائية الحيوية. في الواقع، كان فيتامين بي١٢ واحدًا من البِنى التي مُنحت عنها دوروثي هودجكين جائزة نوبل في الكيمياء عام ١٩٦٤، وبتشجيعٍ قوي منها نُفِّذ هذا العمل على بِنية المذيب.

بعض جزيئات الماء — مثل تلك المُرقَّمة ٢١٧ و٢٢٤ — تبدو مكتملةً جدًّا؛ إذ ترتبط بجيرانها من خلال أربع روابط هيدروجينية كما في النمط الرباعي؛ حيث يحدُث تفاعل مع مانحَين اثنَين للهيدروجين، وآخر مع مُستقبِلَين اثنين للهيدروجين في كل حالة. عند النظر إلى جزيء الماء المرقم ٢١٣، نرى أنه يمنح كِلا ذرتَّيه من الهيدروجين إلى ذرات الأكسجين (القطبية) المكشوفة للمجموعات على تميم الإنزيم المرقم ٣٩ و٥٨، كما كنَّا نتوقع. بالمثل، يرتبط هيدروجين جزيء الماء المُرقَّم ٢١١ من خلال طرفه السالب من الأكسجين مع ذرات الهيدروجين (القطبية هي الأخرى) على مجموعات تميم الإنزيم المُرقمة ٤٠ و٥٩. لذا يبدو أن جزيئات الماء هذه تتفاعل مع جيرانها (من جزيئات الماء وغير الماء) كما كنا نتوقَّع أن تفعل.



شكل ٦-١: لقطة لترتيب جزيئات الماء في تميم الإنزيم لفيتامين بي١٢.

ولكن إذا تحرَّينا مزيدًا من الدقة، وبُعد النظر قليلًا، ونظرنا عن كثبٍ إلى هذين الجزيئين المائيَّين الأخيرين، نجد أن الأمور ليست كما كنَّا نتوقَّع. فجزيء الماء المرقم ٢١٣ يرتبط هيدروجينيًّا مع ذرة هيدروجين واحدة أخرى فقط (من جزيء الماء رقم ٢٢٣). ويبدو أن ذرة الهيدروجين «العلوية» لجزيء الماء المرقم ٢١١ تتفاعل مباشرةً مع مجموعتَين وليس مجموعة واحدة من المجموعات القطبية على سطح تميم الإنزيم. وهكذا فإن رابطة الهيدروجين ليست مثالية، تمامًا كما هو حالها في السائل. قد نلاحِظ أيضًا بصورة عابرة أن زوايا الرابطة والمسافات التي نُلاحِظها في هذه الشبكة المائية المُعقدة يمكن تفسيرها في إطار القيود الطاردة المفروضة على التفاعلات بين الجزيئية بواسطة

الشكل الفعلي للجزيء الذي أشرْنا إليه في الشكل ٢-٢؛ إذ تلعب «لانفاذية» بيرنال، التي كانت مفتاحًا لبنية السوائل البسيطة، أيضًا دورًا بنيويًّا مهمًّا في الماء.

إذا قُمنا بقياس بنية الماء في هذه الأنظمة المهمة بيولوجيًّا، نجد أنها لم تتغير على نحوٍ جوهري عن تلك الموجودة في السائل في حالته القياسية العادية. فجزيئات الماء ترتبط هيدروجينيًّا مع المجموعات القطبية للجزيئات الأخرى بطرُق تتَّسِق مع الطريقة التي تتفاعل بها جزيئاتها في سائلها الخاص. وهذا يشمل التكيف مع التناسق الثلاثي والخماسي حيث يكون هناك نقص أو زيادة (على التوالي) في ذرات الهيدروجين المتاحة لتكوين النمط الرباعي المثالي.

لذا يبدو الماء مُستقرًّا ومستريحًا للغاية في هذه البيئات المعقدة. في هذا المثال على تميم الإنزيم بي[١٢]، نرى أنه يمكن أن يملأ «الشقوق» في الجزيئات الأكبر بطريقةٍ موفرة للطاقة. وبما أن بِنية الجزيء الكبير أساسية لعمله البيولوجي، فإن قدرة الماء على «إتمام» التفاعلات مع المجموعات القطبية، سواء في الشقوق أو على السطح الخارجي المكشوف — الذي سيُساعد على تقويض استقرار الإنزيم إذا لم يتم تلبية حاجته — تُتيح له تثبيت هذه البنية، وبالتالي تفعيل نشاطه الكيميائي الحيوي.

بعبارة أبسط، جزيئات الماء ضرورية للغاية في الحفاظ على البِنى النشطة للجزيئات الحيوية الأخرى. وتُعَد قدرة جزيء الماء على التنوُّع في تفاعُلاته مع الجزيئات الأخرى (تذكَّر الأطوار الستة عشر للجليد في الفصل الثالث، والعيوب، مثل الروابط الهيدروجينية المتشعِّبة في الفصل الرابع) خاصيةً في غاية الأهمية، تُمكِّنه من أداء الدور المُتمثِّل في تثبيت البنية.

«رُهاب الماء»

عند النظر مرة أخرى إلى الشكل ٦-١، قد نلاحظ أن ليس كل أسطح مجموعات تميم الإنزيم الموضحة تتفاعل مباشرة مع جزيئات الماء المُحيطة. على سبيل المثال، المجموعتان على اليسار من الشكل، A و'A، هما مجموعتا ميثيل ($-CH_3$). هذه مجموعات «غير قطبية»؛ أي ليس لها فصل شحنة كبير من شأنه أن يُساعدها على التفاعل مباشرة مع مجموعة قطبية أخرى مثل الماء. لذا، ليس لديها قوة جذب كبيرة لجزيئات الماء. لذا حتى عندما تكون هناك مجموعة غير قطبية قريبة، لا يكون لدى الماء حافز طاقة كبير للتفاعل معها. والأفضل له كثيرًا (أي ملائم أكثر من ناحية الطاقة) تجنُّب المجموعة غير القطبية،

والارتباط هيدروجينيًّا مع مجموعة قطبية قريبة. على سبيل المثال، كما نرى في الشكل ٦-١، يُفضِّل جزيء الماء ٢١٢ الارتباط مع الأكسجين القطبي للمجموعة ٣٣.

يؤدي هذا التجنُّب للمجموعة غير القطبية هنا إلى مرور شبكةٍ من جزيئات الماء (مدعومة من الأكسجين القطبي من المجموعة ٦٢) حول مجموعتَي المِيثيل هاتَين من أكسجين المجموعة ٣٣ إلى أكسجين المجموعة ٣٩. لا يُوجَد تفاعل قوي بين جزيئات الماء التي تشكِّل هذا «القفص» أو الغلاف الجزئي والمجموعتَين غير القطبيتَين A و'A على سطح تميم الإنزيم. بالمثل، يظهر قفص (أكبر بكثير) حول مجموعة البنزيميدازول في الجزء العلوي من الشكل، كما هو مُوضَّح من خلال جزيئات الماء مع ذرات الأكسجين المُظلَّلة.

لماذا يُعَد هذا «التغليف» مُهمًّا؟ أولًا: لأنه يُظهر لنا أن الماء يظل بإمكانه ترتيب نفسه في بنية «مريحة» (أو مقبولة من ناحية الطاقة)، حتى عندما تكون المجموعات غير القطبية موجودة على سطح جزيء حيوي. ومن ثم، لن يتسبَّب وجود المجموعات غير القطبية بالضرورة في تقويض استقرار بِنية الجزيء الحيوي في الماء.

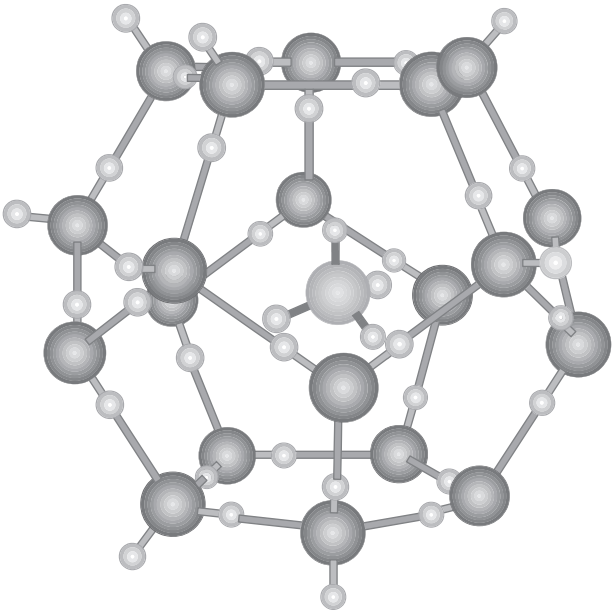
يوضِّح الشكل ٦-٢ تمثيلًا نموذجيًّا لبِنية الماء حول جزيء الميثان غير القطبي؛ إذ نرى من خلاله أن جزيئات الماء تُرتب نفسها في بِنية كروية تُشبه القفص حول الميثان. وبما أن الميثان جزيء غير قطبي، فلا يُمكنه أن يرتبط هيدروجينيًّا مباشرة بجزيئات الماء المحيطة به، التي ترتبط بدَورها إحداها بالأخرى من خلال روابط هيدروجينية.

في هذه البنية، يحتفظ كل جزيء ماء بأربعة جيران. يظهر ثلاثة منها في الشكل داخل المدار، بينما يتصل الرابع بجزيئات الماء في موضع آخر في البنية. في إطار الشكل الهندسي التفصيلي للقفص، نرى حلقاتٍ خماسية تتوافق مع الهندسة المحلية شِبه رباعية السطوح لنمطنا الرباعي الأساسي المعروف. ويمنح كل جزيء ماء، حسبما يُفضِّل، رابطتَين هيدروجينيَّتَين، ويستقبل اثنتَين من جيرانه.

لذا، حتى عندما لا يكون هناك إمكانية للارتباط هيدروجينيًّا مع جزيءٍ غير قطبي أو مجموعة غير قطبية، يمكن للماء أن يتكيَّف مع وجود المجموعة غير القطبية من خلال هذا النوع من التغليف.

سد أنابيب الغاز

يُعرَف نوع البِنية الموضح في الشكل ٦-٢ عادة ببنية «الكلاثرات» أو البِنية القفصية، وهي كلمة مُشتقة من الكلمة اللاتينية clatratus، وتعني «ذو قضبان» أو «شبكي». بناءً على



شكل ٦-٢: انتظام جزيئات الماء في شكل «قفص» في بلورة من هيدرات الميثان.

طبيعة الجزيء في القفص وحجمه، يُوجَد عدد من بِنى الكلاثرات البلورية المختلفة التي يمكن أن يُشكِّلها الماء، وإن كانت كلها تتوافق مع هندسة التفاعل شِبه رباعية السطوح المُفضَّلة له. يمكن أن تُمثل هذه البِنى القفصية مشكلة خاصة في استخراج النفط والغاز، ونتيجة لذلك، أُجريَ كثير من الأبحاث للعثور على طرق لمنع تكوُّنها في الأنابيب.

علاوة على ذلك، تُوجَد كميات كبيرة من الميثان متجمِّدة بصورة طبيعية في صورة كلاثرات موجودة في تكوينات التربة الصقيعية الدائمة التجمُّد، وفي أعماق المُحيط. وبما أن الميثان غاز دفيء أقوى بكثيرٍ من ثاني أكسيد الكربون، فإن الانطلاق المحتمل لغاز الميثان — على سبيل المثال عند ذوبان التربة الصقيعية — سيكون له تداعِيات مؤثرة على تغيُّر المناخ. وقد طُرح الانطلاق الهائل لغاز الميثان من أعماق البحر كتفسيرٍ لفقدان السفن في مثلث برمودا، المُحدَّد بحدودٍ غير دقيقة، تتمثل في مثلث رءوسه هي فلوريدا وبرمودا وبورتوريكو. ولكن على الرغم من وجود ترسُّبات ضخمة من هيدرات الميثان

قبالة جنوب شرق الولايات المتحدة، لا يُعتقَد حدوث إطلاقات ضخمة للميثان يمكن أن تكون قد تسبَّبت في غرق سفينة خلال الخمسة عشر ألف سنة الماضية.

على الرغم من الاعتقاد الذي ساد طويلًا بأن هذه البِنى البلورية القفصية تكون مستقرة فقط عندما تكون هناك جزيئات «ضيفة» تشغل جزءًا كبيرًا من الأقفاص، فقد تبيَّن الآن أنه من الممكن إخراج أو تفريغ الجزيئات الصغيرة الضيفة — بعناية شديدة — لترك بنية القفص الفارغة. هذه البنية هي بِنية طور الجليد XVI الذي ورد في الفصل الثالث، والذي يمكن أن تُساعد دراسته في المستقبل في فهمنا لاستقرار هذه البِنى المُهمة وخواصها، رغم أنها في بعض الأحيان تكون مُزعجة.

التفاعُل الكاره للماء

بقدْر ما يمكن أن تبدو هذه الأقفاص مثيرةً للإعجاب، فهي ليست مجرد «وجوه جميلة». فهي تقودنا على نحوٍ مُهم للغاية إلى التفكير فيما اعتقد الكثيرون لأكثر من خمسين عامًا أنه ظاهرة ذات أهمية بيولوجية كبيرة مُرتبطة بالماء. هذه الظاهرة هي ما يُسمَّى بـ «التفاعل الكاره للماء».

يوصف هذا عادة بأنه مَيل اثنين من الجزيئات أو المجموعات غير القطبية إلى «انجذب» بعضها إلى بعض في الماء. ألقِ نظرةً أخرى على بِنية القفص في الشكل ٦-٢. إذا وضعنا الآن قفصًا آخر مشابهًا بالقرب منه، فسيحدث احتكاك بين جزيئَي الميثان، وينتج عن ذلك إعادة ترتيب جزيئات الماء المحيطة لتشكيل قفصٍ أكبر حول جزيئَي الميثان المتَّصلَين. ستظل جزيئات الماء مكتملةً تمامًا من حيث الترابط الهيدروجيني بعضها مع بعض — تذكر تنوُّعها البنيوي — ولكن بما أن المساحة السطحية للقفص الناتج ستكون أقل من مساحة السطح في القفصَين المنفصلَين، فلن تشارك جميع جزيئات الماء من «القفص» الأصلي في القفص الجديد الأكبر. وتلك الجزيئات التي لن تُشارك ستُحرَّر من الأقفاص، وتُطرَد إلى السائل المحيط.

يعتمد التفسير التقليدي لهذا الانجذاب الظاهري بين المجموعات غير القطبية في الماء على افتراض أن جزيئات الماء المُشاركة في الأقفاص المحيطة تكون بطريقةٍ ما «أكثر انتظامًا» من تلك الموجودة في السائل. وإذا كان هذا صحيحًا، فبما أن جمع اثنين من المجموعات غير القطبية سيؤدي إلى طرد بعض جزيئات الماء من الأقفاص إلى السائل،

فسيكون هناك إذن انخفاض عام في الانتظام في النظام. وهذا الانخفاض في الانتظام إيجابي من ناحية الطاقة؛ ومن ثم يشجع هذا التجمع للكيانات غير القطبية.

على الرغم من أننا لا نحتاج إلى الدخول في تفاصيل تقنية، سيؤدي تحرير بعض جزيئات الماء الأصلية في القفص، في لغة الديناميكا الحرارية، إلى زيادةٍ في خاصية مُرتبطة بالفوضى في النظام، تُسمَّى الإنتروبيا أو القصور الحراري. وبما أن تقليل الطاقة الحرة للنظام هو قوة دافعة لعملية (فيزيائية أو كيميائية) ما، والزيادة في الإنتروبيا ستساهم في هذه الخسارة، يُعتبر هذا التجمُّع للمجموعات غير القطبية في الماء عملية «مدفوعة بالإنتروبيا».

وماذا عن الأدلة التجريبية؟

يجدُر بي في هذا المقام أن أكون صريحًا وأشير إلى أن هذا التفسير يتعرض لتشكيكٍ مُتزايد، رغم أنه لاقى قبولًا طوال عقود. فعندما يُوضَع قيد الاختبار باستخدام قياسات تشتُّت النيوترون، لا يُرصد أي فرقٍ بنيوي بين الماء في الأقفاص والماء السائل العادي. فمن الصعب فعلًا إيجاد أدلةٍ تجريبية على حدوث أي تعزيزٍ بنيوي للماء بالقُرب من كيانٍ غير قطبي.

علاوة على ذلك، تُظهر قياسات البِنى الفعلية في محاليل الكيانات غير القطبية أن بِنى الأقفاص في السائل ليست مثالية، كما في الشكل ٦-٢؛ فهي أكثر فوضى بكثيرٍ مما تُوحي به تلك الصورة. ويُوجَد تفسير أبسط يتوافق مع التجربة؛ فقد يكون ما يحدث لا يزيد عن كونه نتيجةً للاختلاط غير الكامل للمُكوِّنَين. قد نلاحظ أيضًا في هذا السياق أن هذا النوع من التفاعُل في المحلول يحدُث أيضًا مع مجموعةٍ من المذيبات غير المائية الأخرى. يمكن أيضًا تفسير هذا التأثير العام «الرهابي تجاه المُذيبات» بطريقةٍ مُماثلة، دون الحاجة إلى استدعاء أي فكرة تعلق بإعادة هيكلة المذيب.

مهما كان تفسير هذه النزعة في الكيانات غير القطبية للتجمُّع معًا، فهي تُمثِّل تأثيرًا حقيقيًّا ذا أهمية بيولوجية.

أحجية ثلاثية الأبعاد

وصفنا الآن طريقتَين يمكن من خلالهما حدوث تفاعلٍ بين المجموعات الجزيئية التي تشكل بروتينًا مطويًّا في بيئةٍ مائية. قد ترتبط المجموعات القطبية في البروتين بواسطة

روابط هيدروجينية مع مجموعاتٍ قطبية أخرى، أو مع جزيء ماء في مُحيطها. ونتيجة للتفاعل الكاره للماء (بغضِّ النظر عن تفسيره الفيزيائي)، قد تُفضِّل المجموعات غير القطبية أن تكون على اتصالٍ مع مجموعات غير قطبية أخرى في داخل البروتين، أو أن تُحيط بها شبكة من الجزيئات المائية على شكل قفصٍ إذا كانت على السطح. بالإضافة إلى ذلك، حيثما تُوجَد مجموعات ذات شحنة على بروتينٍ ما، يمكن أن تتفاعل هذه المجموعات إما مع مجموعاتٍ ذات شحنة مضادة، وإما مع جزيئات الماء. وفي بعض البروتينات التي تتضمَّن أحماضًا أمينية تحتوي على الكبريت، يمكن أن تكون هناك روابط تساهُمية داخلية من خلال روابط ثنائي الكبريتيد بين جزيئات الكبريت.

وبناء على ذلك، هناك عدد من الأنواع المُختلفة من التفاعلات الجزيئية يمكن أن تحدث عندما يُطوى البروتين إلى بِنيته النشطة، أو «الأصلية». ولكي يكون البروتين مُستقرًّا على مستوى بِنيته غير المطوية «المشوهة»، يجب أن تكون هذه الأنواع المختلفة من التفاعلات مكتملةً إلى حدٍّ كبير من خلال إنشاء روابط مناسبة. لذا قد يكون طي البروتين أشبه بحلِّ أحجيةٍ للصور المقطوعة الثلاثية الأبعاد. ولكنه أحجية مُعقدة نوعًا ما؛ لوجود أنواع مختلفة من القِطع يمكن أن تتناسب فقط مع أنواعٍ مُحددة (مُماثلة أو مختلفة) من القطع. فتتناسب القطع القطبية مع القطع القطبية الأخرى (في الاتجاهات الصحيحة)؛ وتتناسب القطع غير القطبية مع القطع غير القطبية الأخرى؛ وتتناسب الشحنات الموجبة مع السالبة؛ وتتناسب جزيئات الكبريت مع جزيئات الكبريت الأخرى. ولكن لكي يكون البروتين الأصلي مُستقرًّا، يجب أن تكون جميع هذه الأنواع المختلفة من التفاعلات مُشبعة إلى حدٍّ كبير.

تبدو هذه مهمة عسيرة بالنسبة إلى جزيء كبير مُعقد؛ فالبِنية النشطة تحتاج إلى تلبية عددٍ كبير من المُتطلبات المختلفة. هنا يبدو أن الماء يأتي ليُنقذ الموقف. فهو ينساب بأريحية في المواقع المتاحة للارتباط الهيدروجيني. يمكن لجزيئات الماء أن تسكن الواجهات غير المنتظمة، ويمكنها تكوين روابط هيدروجينية حيثما لا تُوجَد مجموعة قطبية أخرى على الجزيء الحيوي متاحة للقيام بذلك. ومن خلال التناسُق الثلاثي والخماسي — الذي يُعَد جانبًا مهمًّا من تنوعُّه البنيوي — يمكنه أن يتعامل مع الاختلالات بين المانح والمُتلقي، مثلما يحدث حين «يتشعب» جزيء هيدروجين واحد (مثلما يفعل على جزيء الماء رقم ٢١١ في الشكل ٦-١) للمساعدة في تلبية احتياجات ذرتَين منفصلتَين من الأكسجين ليس لديهما خيار هيدروجيني قطبي آخر متاح.

إذن تعتمد سلامة بِنية البروتين النشطة بشدة على الماء. ليس فقط بسبب التفاعل الكاره للماء الذي يُروَّج له منذ الخمسينيات باعتباره القوة الدافعة الرئيسة في طي البروتين، ولكن بسبب تنوُّعه في تلبية التفاعلات التي لم تكن لتتمَّ في ظروف مغايرة. ربما يكون الأمر مربكًا، ولكنه رائع بالتأكيد!

يمكننا اتباع نهجٍ مُماثل عند النظر في التفاعلات بين الجزيئات الكبيرة والجزيئات الأخرى. عندما ترتبط ركيزة بالموقع النشط لإنزيمٍ ما، يمكن لجزيئات الماء أيضًا أن تكون مهمةً في ضمان تلبية مُتطلبات الترابط الهيدروجيني في مُركَّب الإنزيم والركيزة. فعندما يتفاعل جزيئان كبيران، فإنهما يحتاجان أيضًا إلى الاندماج معًا بطريقةٍ تلبِّي متطلبات الترابط بين الجزيئات للمجموعات المتلامِسة على الأسطح. بالنسبة إلى الجزيء الكبير الذي يتكوَّن سطحه المكشوف من خليطٍ من مجموعاتٍ قطبية وغير قطبية (كما هو الحال مع معظم البروتينات الكروية الشكل)، نتوقَّع أن تتفاعل المجموعات غير القطبية الموجودة على جزيءٍ ما مع المجموعات غير القطبية الموجودة على الجزيء المجاور له. كذلك نتوقع أن ترتبط المجموعات القطبية المكشوفة على أحد الجزيئات برابطة هيدروجينية مع المجموعات القطبية على الجزيء المجاور. وفي الحالات التي لا تكون فيها المجموعات القطبية قريبة بما يكفي، أو لا تكون محاذيةً بالشكل المناسب الذي يسمح بترابط هيدروجيني سليم، يمكن جلب جزيء دخيل أو اثنين من الماء لإنشاء الرابطة عن بُعد.

إذن فالجمع بين أُحجيتَين مكتملتَين معًا هو أحجية أخرى من النوع نفسه.

الحُجيرات البيولوجية

يتم قدْر كبير من النشاط البيولوجي في الخلايا، وهي حُجيرات تعجُّ بكثيرٍ من الجزيئات المختلفة. لا تفصل جدران هذه الحجيرات محتويات الخلية عن بيئتها الخارجية فحسب، بل تتحكم أيضًا في مرور الجزيئات التي وقعَ عليها الاختيار من وإلى الخارج. من خلال التفاعل الكاره للماء، تعتمِد هذه الجدران على الماء في الحفاظ على سلامتها.

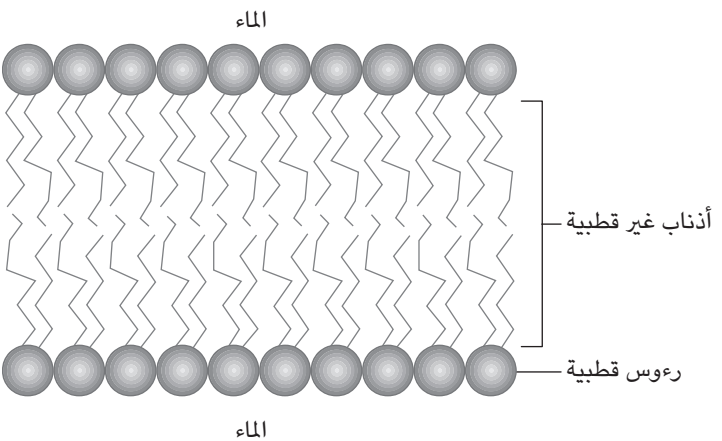
المكوِّن الرئيسي لجدران الخلايا الحيوانية هو «الدهون الفسفورية»، وهي جزيئات طويلة مُتسلسلة لها مجموعة رأس قطبية قوية، وذَنَب مُتسلسل هيدروكربوني غير قطبي. كما نتوقع، ستتفاعل مجموعات الرأس القطبية مباشرة مع الماء، بينما ستُفضِّل السلاسل غير القطبية، نتيجة للتفاعل الكاره للماء، التفاعل بعضها مع بعض. بذا يُمكننا أن نفهم

كيف يمكن أن يؤدي مزيج من هذه التفاعلات إلى تكوين بنية «ثنائية الطبقات»، كما هو موضح في الشكل ٦-٣.

يلعب الماء دورًا محوريًّا في تكوين هذه البِنى والحفاظ عليها. ويدخل أيضًا في الآليات التي تمرُّ الجزيئات الأخرى عن طريقها إلى الغشاء لأداء وظائفها البيولوجية.

بعض المحتويات الأخرى للملفِّ البيولوجي للماء

الأدوار البيولوجية للماء التي نوقشت حتى الآن هي أدوار ثابتة إلى حدٍّ كبير تتعلق بوظيفته في بِنية البوليمرات الحيوية واستقرارها.



شكل ٦-٣: مخطط توضيحي للطريقة التي يتم بها تنظيم جزيئات الدهون في غشاء ثنائي الطبقات.

يمكن أيضًا للماء أن يلعب دورًا أكثر نشاطًا، على سبيل المثال، هناك أدلة قوية على أن الماء شريك نشط في آلية ضخ البروتونات التي تنقل البروتونات عبر غشاء الخلية. كما يدخل كشريك نشط (كحمض أو قلوي على سبيل المثال) في بعض التفاعلات الكيميائية التي تُحفزها الإنزيمات.

هناك أيضًا دور للماء كوسط ناقل. لكي تتم العمليات البيولوجية، يجب أن تتحرك الجزيئات من مكانٍ إلى مكان. لذا فإنها تحتاج إلى وسط سائل مناسب للقيام بذلك فيه. ولا شك أن الماء يلعب مثل هذا الدور، وثمة أسباب وجيهة تُفسِّر قيامه بهذه المهمة على نحوٍ جيد.

أولًا: يجب أن يكون الوسط الحيوي الفعَّال مذيبًا جيدًا، وقد أوضحنا بالفعل لماذا يُعَد الماء مذيبًا جيدًا. فسماحيته العازلة تجعله مُذيبًا جيدًا للجزيئات المشحونة والقطبية. وهو قادر أيضًا على استيعاب المجموعات غير القطبية في المحلول.

ثانيًا: لكي يصل جزيء الركيزة إلى الموقع النشط لإنزيمٍ ما، يجب أن يكون في وسطٍ يُمكنه الحركة عبرَه. قد يبدو القول إن الماء هو في الواقع وسط سائل مناسب بديهيًّا، ولكن كما اكتشفنا في الفصل الرابع عند مناقشة الحركة الجزيئية، فإن التفاعل القوي نسبيًّا لرابطة الهيدروجين يعني أن الماء قد لا يكون وسطًا جيدًا للدرجة لحركة الجزيئات الأخرى. ولكن، كما وجدْنا في وقتٍ سابق، يبدو أن وجود عيوب الرابطة العابرة (الروابط المتشعِّبة) يوفر آليةً من شأنها أن تجعله يتصرف باعتباره سائلًا جيدًا ومُتنقِّلًا في درجة حرارة الغرفة، وهي الخواص اللازمة له من أجل وظائفه الكيميائية — ومن ثم البيولوجية — على الرغم من أن شبكته السائلة قوية نسبيًّا على مقياس البيكوثانية.

إن القدرة على تمكين الجزيئات من الحركة ليست العنصر المُهم الوحيد لوسط حيوي فعال. ففي كثير من التفاعلات الكيميائية الحيوية، يجب أن تتحرك الشحنات (البروتونات أو الإلكترونات). على سبيل المثال، قد يحتاج بروتون ما إلى الوصول إلى موقعٍ على أحد البروتينات التي يُشكل هذا البروتون ضرورةً له على الصعيد الكيميائي من أجل أداء عمله. مرة أخرى، يبدو أن الماء له دورٌ هنا. كما ناقشنا في الفصل الخامس، يمكن للبروتونات الانتقال بسهولةٍ نسبية عبر سلسلة من جزيئات الماء المرتبطة هيدروجينيًّا، على الرغم من أننا قد لا نكون مُتأكدين تمامًا من الأسباب التي تُمكِّنها من ذلك. وعلى الرغم من أن توصيل البروتون قد لا يكون ذا صلةٍ بنظام المرافق الإنزيمي بي١٢ الموضح في الشكل ٦-١، فإن بالإمكان رؤية مسار مُوصِّل محتمل لجزيئات الماء، يمتدُّ من جزيئات الماء السطحية ٢١٥ و٤٣١ إلى الجيب.

ثالثًا: لقد تجاهلنا تمامًا حتى الآن التأثير المُحتمَل لديناميكيات جزيئات الماء على العمليات الحيوية. وهذا مجالٌ يكثر فيه النقاش، وتتعدَّد فيه الآراء وتتباين (سنتناول بعضها مرة أخرى في الفصل السابع). ولكن بما أن البيئة المائية هي بيئة سائلة، فلا

يمكن أن يكون هناك شك حقيقي في أن حركات الجزيئات في السائل يجب أن تكون مرتبطة بطريقةٍ ما بحركة البوليمرات الحيوية، سواء كانت بروتينات بنيوية، أو إنزيمات، أو أحماضًا متعددة النُّوِي، مثل الحمض النووي الريبوزي المنقوص الأكسجين (دي إن إيه)، أو أغشية خلوية، أو أي شيءٍ آخر.

في هذا المقام يجدُر بي أن أعترف بشيء آخر. حتى الآن، كنت مذنبًا (مرة أخرى!) بتوصيل صورةٍ ثابتة للأمور أكثر مما ينبغي. عند النظر إلى المرافق الإنزيمي بي[١٢] في الشكل ٦-١، سيكون لديك عذرك حين تعتقِد أن جزيئات الماء ثابتة؛ أي مُثبتة في المواقع الموضحة به. لكن «الأمر ليس كذلك». فهي في حركةٍ مستمرة؛ إذ يُستبدل جزيء مُعين بجزيء آخر باستمرار. إن ما يوضحه الشكل ٦-١ هو صورة لمتوسط المواقع عبر مدةٍ من الزمن، تُساعدنا على فَهم إشكاليات الأهمية البنيوية. ولكن كل شيءٍ في حالة حركة مستمرة؛ الجزيئات الحيوية الكبيرة، وكذا جزيئات المذيب. وبما أن جزيئات الماء تتفاعل مع المجموعات المكشوفة على الجزيء الكبير، فلا بد أن هناك ارتباطًا بطريقةٍ ما بين حركات الجزيء الكبير والماء.

وتظل مسألة الكيفية التي يؤثر بها هذا الارتباط الديناميكي في النشاط الحيوي مسألةً مفتوحة إلى حدٍّ كبير. هناك بعض الأدلة التي تُشير إلى أن ديناميكيات المذيب ربما تحفز ديناميكيات الجزيء الحيوي، ومن ثم تُحفز نشاطه؛ في هذه الحالة، سيكون الجزيء الحيوي تابعًا للمذيب وليس العكس، كما افترض الجميع عمومًا. وحتى لو لم تكن علاقة التابع والمتبوع هذه صحيحة، فمن المُحتمل جدًّا أن ديناميكيات جزيئات المُذيب ستعدِّل ديناميكيات الجزيء الحيوي، ومن ثَم تؤثر في نشاطه.

ولكن مهما كانت ماهية المذيب، فمن المُحتمل أن يكون هناك بعض التأثير المتبادل بين المذيب والجزيء الحيوي. وهذا يتَّفق مع الملاحظة التي تُشير إلى أنه حيثما يُستبدل المذيب غير المائي بمذيبٍ مائي إلى حدٍّ كبير، يمكن أن يتغير نشاط الجزيء الحيوي، ويكون التغيُّر جوهريًّا إلى حدٍّ كبير في بعض الحالات. غير أن مدى عزو هذا التغيُّر إلى الديناميكيات المتغيرة لا يزال غير واضح؛ إذ ستكون كل الأشياء الأخرى قد تغيَّرت، مثل سماحية العزل الكهربائي، وربما بعض التغيرات الطفيفة في بِنية الإنزيم.

ولكن ربما يُمكننا الدفع بحجةٍ معقولة، مفادها أن نشاط الجزيء الحيوي — بعد أن تطور في بيئةٍ مائية — سيكون قد تحسَّن ليتلاءم مع تلك البيئة.

ما الخواصُّ التي تُعتبَر مهمة حيويًّا؟

هل يُمكننا الآن استخلاص بعض الخواص الواعدة على المستوى الجزيئي التي قد تبدأ في الإجابة عن هذا السؤال؟

لقد واجهنا مرارًا وتكرارًا الترتيب الرباعي السطوح المثالي لهندسة التفاعُل الموضعية. وكان هذا هو المفتاح لفهم ما يُسمَّى بشذوذ الماء في الفصل الخامس. ويبدو أن هذه الهندسة أيضًا تلعب دورًا محوريًّا في التنوُّع البنيوي للجزيء الذي ذهبنا آنفًا إلى أهميته البيولوجية الكبيرة في تثبيت البِنى البروتينية واستقرارها. علاوة على ذلك، فإن التباين في توزيع الشحنة — بالنظر إلى كون طرف الجزيء ذي الشحنة الموجبة (مانح الهيدروجين) أكثر تقييدًا في التوجيه من الطرف ذي الشحنة السالبة (مُستقبِل الهيدروجين) — يساهم أيضًا في هذا التنوع البنيوي.

هذا التباين يجعل كلًّا من البِنى الموضعية الثلاثية والرباعية «مستقرة»، ويتيح للرابطة الهيدروجينية أن تكتمِل حتى في الحالات التي يكون هناك فيها تفاوت بين عدد الذرات المانحة والمُستقبلة المتاحة في بِنية مُعقدة لجزيءٍ كبير. لذا لا يقتصر الأمر على أن هذه الهندسة الرباعية — طبقات الجزيئات الأربعة المتجاورة المرتبطة هيدروجينيًّا، وتتكون من ذرتَين مانحتَين اثنتَين للبروتون، وذرتَين مُستقبلتَين له — مهمة حيويًّا للحفاظ على استقرار بِنى الإنزيم الأصلية، بل قد يكون طابعها غير المُتماثل ذا أهميةٍ أيضًا. لذا قد تفتقر الأنظمة الأخرى «الأكثر اكتمالًا» ذات التناسُق الرباعي، مثل السيليكا، أو السيليكون، أو الجرمانيوم، إلى خاصية مهمة يمتلكها الماء عندما يتعلق الأمر بكونها مذيبًا حيويًّا «داعمًا» ومفيدًا لمُتطلبات البِنى الحيوية.

ثانيًا: أشرْنا في الفصل الرابع إلى أن طاقة الرابطة الهيدروجينية تُعادل نحو عشرة أضعاف طاقة التذبذُب العادي في درجة حرارة الغرفة؛ ولذا نتوقَّع أن تكون حركة جزيء الماء في السائل أقل بكثيرٍ مما يتم رصده. فقد كان يُزعم أن وجود مجموعةٍ كبيرة من عيوب التناسُق الموضعي — لا سيما الروابط الهيدروجينية المتشعبة — يُفسِّر الحركة الجزيئية المرصودة. لذا يبدو أن لدَينا إطارًا جزيئيًّا قويًّا نسبيًّا، ولكن يتَّسم بحركةٍ أعلى بكثير مما كنا نتوقع. مرة أخرى، يبدو أن السبب في ذلك يتعلق بتفاصيل الهندسة الرباعية غير المُكتملة. لذا، إذا كانت العمليات الحيوية الجزيئية تتطلَّب إطارًا مذيبًا ثابتًا نسبيًّا، مع قدرة داخلية مدمجة على السماح بحركات جزيئية سريعة نسبيًّا، فيبدو أن الماء قد وضع نفسه في موقفٍ قوي يؤهِّله للقيام بالمهمة بفاعلية وكفاءة.

ثالثًا: الماء السائل ناقل جيد للبروتونات، ونقل البروتونات ضروري لبعض العمليات الحيوية الجزيئية. ويبدو أن عملية النقل تتطلَّب الإطار المرِن نسبيًّا الذي أشرْنا إليه للتو، على أن يكون مُتغيرًا نسبيًّا على المستوى الجزيئي الفردي. علاوة على ذلك، وكما أشرْنا في الفصل الخامس، قد يتم تسهيل خطوة نقل البروتون في حدِّ ذاتها بواسطة حركات النقطة الصفرية، مما يُقلل من ارتفاع حاجز الطاقة الذي يجب أن يعبره البروتون المنتقِّل.

لا شكَّ أن ضرورة هذه الخواص من عدمها لأي عمليةٍ حيوية جزيئية قد تكون مبنيةً على كيمياء مختلفة؛ هو أمر محلُّ جدل. ولكن فيما يتعلق بالطريقة التي تطورت بها الحياة في الماء، قد يتم التدليلُ على أنها تطورت بحيث تستغلُّ هذه الخواص بالذات، بالإضافة إلى الخواص الأكثر وضوحًا، مثل خواص الإذابة لسائلٍ ذي ثابت عزل كهربائي عالٍ. قد نتصور وجود جزيئات أخرى تتمتع ببعض الخواص المذكورة أعلاه. ولكن هل يُمكننا التفكير في جزيء واحد — بخلاف الماء — يتمتع بها «جميعًا»؟

في رواية «دليل المسافر إلى المجرة»، كُلِّف الكمبيوتر الفائق العملاق «ديب ثوت» بمهمة معرفة «الإجابة عن السؤال الأسمى للحياة، والكون، وكل شيء». وجد الكمبيوتر أنها مهمة مُستنزِفة للوقت، حتى بالنسبة إلى كمبيوتر فائق. وأخيرًا عاد بالإجابة: «٤٢». يروقُني أن أُفكر في هذه الإجابة باعتبار أنها تعني أربع روابط هيدروجينية، مع ذرتَين مانحتَين وذرتَين مُستقبلتَين. ربما تكون هذه الخاصية الأساسية للماء هي معنى الحياة.

هندسة المذيب الحيوي

من إحدى الوسائل لاستكشاف سبب أهمية الماء للعمليات الحيوية استبدال وسط آخر به. ثمة وسيلة أخرى هي نزع الماء من نظامٍ حيوي عامل. من خلال ملاحظة ما يحدث في كلتا الحالتَين، أو ملاحظة خواص الوسط البديل في الحالة الأولى، قد يُلقَى بعض الضوء على جوانب الماء ذات الأهمية الحيوية فعليًّا.

عيَّن روي دانيال — عالم الكيمياء الحيوية الذي عمل معي مدةً طويلة في نيوزيلندا — الماء في الأنظمة الإنزيمية في أربع فئات.

أولًا: نحتاج إلى وسط انتشار من أجل وصول الركيزة إلى الموقع النشط، ولكي ينتقل ناتج التفاعل إلى المكان الذي يحتاج إليه. بالنسبة لنا، هذا الوسط سائل ومائي، ولكن هذا لا يعني أنه يجب أن يكون كذلك بالضرورة. ثانيًا: هناك الماء المُحيط بالإنزيم النشط، ويكون المدار المائي الداخلي على اتصالٍ مباشر مع سطح الإنزيم (كما في مثال المرافق

الإنزيمي بي[١٢] في الشكل ٦-١). ثالثًا: يُمكن أن تكون هناك جزيئات ماء داخل الجزيء الحيوي ترتبط برابطةٍ هيدروجينية مع المجموعات القطبية الداخلية، وبالتالي تساهم بقوة في استقرار البِنية النشطة. وأخيرًا: حيثما يشتمل التفاعل الكيميائي الذي يحفزه الإنزيم على الماء تحديدًا (مثل تفاعل الجفاف أو التحلُّل المائي)، يكون الماء بالطبع شرطًا أساسيًّا.

لنبدأ بالماء في الفئتَين الأولى والثانية، يُمكننا استبدال بعض الجزيئات العضوية الأخرى بمعظمه (وليس كله!) مع بقاء الإنزيم نشطًا. من هذا يُمكننا استنتاج أن البنية النشطة لم تُدمَّر. غير أن النشاط عادة ما يقلُّ بصورةٍ كبيرة، على الرغم من أنه من خلال اختيار المذيب على نحوٍ صحيح، يمكن تصميم أنظمة إنزيمات «أكثر» نشاطًا مما هي عليه في بيئة مائية.

من الأسباب التي تُفسِّر انخفاض النشاط أنه، في الأوساط ذات ثابتِ العزل الأقل (رُصد النشاط حيث كان ثابت العزل للوسط أقلَّ أربعين مرةً من الماء)، يكون الإنزيم أقل مرونة، مع ارتباط حركته بثابت العزل الخاص بالوسط. ومن المُحتمَل أن تساهم هذه الحركة المنخفضة على الأقل في خفض النشاط؛ على سبيل المثال، من المُحتمَل أن تكون الحركات الجزيئية المساهمة في عملية التحفيز أبطأ. إذا بدأنا الآن بإضافة جزيئات الماء مرة أخرى ببطء، شيئًا فشيئًا، تبدأ مرونة الإنزيم في الزيادة. ويزداد كذلك نشاط الإنزيم كما هو متوقَّع.

وهكذا يُمكننا أن نخلُص إلى أنه كلما زادت درجة التميُّؤ في نظام استُبدل فيه المذيب العضوي بمعظم الماء في البداية، يزداد كلٌّ من نشاط الإنزيم ومرونته. غير أن الإنزيم يظلُّ قادرًا على العمل — وإن كان ببطءٍ نوعًا ما — حتى عندما يكون معظم الوسط المحيط سائلًا عضويًّا «مناسبًا». لذا في بيئةٍ خالية تمامًا من الماء، قد لا يُثبَّط نشاط الإنزيم بسبب غياب الماء في حدِّ ذاته، بشرط أن يسمح المُذيب بالاحتفاظ ببنيةٍ قادرة على تحفيز التفاعُلات. في مثل هذه الحالات، قد لا يكون الماء ضروريًّا.

الجفاف التام

ماذا يحدث لنشاط الإنزيم عند إزالة الماء تمامًا؟ كيف تتأثر بِنيته؟ لقد ذكرنا أن الماء (أو أي وسط سائل عضوي مناسب) له أهميته في استقرار البنية النشطة تحفيزيًّا للإنزيم.

لذا، قد نتوقع أن إزالة الماء ستتسبَّب في فقدان تلك البِنية، مما يؤدي إلى إنزيمٍ غير نشط.

من المُثير للاهتمام أنه ليس بالضرورة أن يكون الأمر كذلك. فمثلما يُقلل استبدال المذيب العضوي بالماء من حركة الجزيء الحيوي، كذلك تفعل إزالة الماء. وبما أن الإنزيم يحتاج إلى أن يكون مُتحركًا بما فيه الكفاية لتغيير بِنيته، فإن إزالة الماء منه من المُحتمل أن تُصعِّب عليه تغيير طبيعته وتشويهها. لذا، لا ينبغي أن نتفاجأ إذا «لم» يفقد بنيته العامة القادرة على التحفيز عند الجفاف، خاصةً إذا أُزيلَ الماء عن طريق التجفيف بالتجميد أو «التجفيد»، وهي عملية يتوقَّف فيها ضخُّ الماء بعد تجميد المُستحضر، وتقل حركة الإنزيم أكثر.

يمكننا تحديد جزيئات الماء التي تتحرَّر بسهولة أكبر عند التجفيف، ومتابعة كيفية تأثير إزالة بعض جزيئات الماء (على سبيل المثال، تلك المُرتبطة هيدروجينيًّا مع المجموعات الأميدية أو الكحولية على الإنزيم) على كلٍّ من كيمياء الإنزيم (العمليات اللازمة للتحفيز الفعال) وفيزيائيته (المرونة). غير أنه من الصعوبة بمكانٍ إزالة كل جزيئات الماء. على وجه الخصوص، سيكون من الصعب جدًّا زحزحة أيٍّ من جزيئات الماء الواقعة داخل البروتين المطوي (تلك التي تقع في الفئة الثالثة من فئات روي دانيال المذكورة أعلاه). فإذا تمكنَّا من إزالتها، فمن المُحتمَل أن نُدمر البنية الأصلية النشطة.

بافتراض أن بإمكاننا إزالة الماء في الفئتَين الأولى والثانية (السائل المُحيط والمياه الملامِسة لسطح الإنزيم)، إذا أردنا الآن قياس النشاط المُتبقي، فسنواجِه مشكلة صغيرة؛ إذ لم يعُد لدَينا وسط سائل يمكن من خلاله أن تنتشِر الركيزة والناتج إلى موقع الإنزيم النشط ومنه على التوالي.

حلَّت مجموعة روي دانيال هذه المشكلة على نحوٍ ممتاز عن طريق العمل مع ركائز ونواتج غازية بدلًا من السائلة. من خلال هذه الوسيلة الذكية، فصلوا دور الماء المتعلِّق بانتشار الناتج والركيزة عن أي مُتطلبات مُحددة من الماء في عملية التحفيز. وقد خلصت هذه النتائج بشكلٍ مُثير للاهتمام إلى أنه، في حالة النظام المُختار من الإنزيم المُحدد، لا توجد حاجة أساسية للماء في النشاط الحفزي لذلك الإنزيم بعَينه. ولم تكن مرونة الإنزيم التي يُعززها الماء، أو طبقة جزيئات التميُّؤ السطحي ضروريتَين للنشاط. ربما كان النشاط منخفضًا، ولكن الإنزيم كان لا يزال نشطًا. فماذا يُمكننا أن نستنتِج من هذا؟

الحياة كما «لا» نعرفها؟

تُوضِّح هذه التجارب على نشاط الإنزيم في المُستحضرات الخالية من الماء أن هناك على الأقل عملية مهمَّة بيولوجيًّا كنَّا نعتقد أنها تحتاج إلى الماء، بينما هي في الواقع ليست في حاجةٍ إليه. وعلى الرغم من أننا لا نستطيع التعميم من مِثالٍ واحد لإنزيم يمكن أن يؤدي وظائفه دون ماء، فإن ذلك يعني أن بعض أنواع العمليات الحيوية اللامائية «قد» تعمل وتؤدي دورها، وإن كان تصوُّر كيفية نشأة مثل هذا النظام دون ماء مسألة أخرى.

غير أننا رأينا أيضًا أنه كلما أضفْنا الماء إلى إنزيمٍ جافٍّ، يزداد النشاط، وبالطبع تكون معدلات العمليات الإنزيمية مُهمةً في الحفاظ على العمليات الحيوية. وبما أن العمليات الحيوية التي نعتمِد عليها قد تطوَّرت في وسطٍ مائي، فإن معدلات هذه العمليات تكون متوافقة مع هذا الوسط. إن الحصول على إنزيم للعمل في بيئةٍ غير مائية، أو في وسط عضوي لا مائي مسألة مُستقلة. أما تحقيق التناغُم في العمل بين مائة ألف عملية مختلفة ومتَّصلة، فهي مسألة مختلفة تمامًا؛ إذ ينبغي لهذه العمليات أن تعمل في تناغُمٍ من أجل دعم وجودنا.

بينما يؤكد هذا على أهمية الماء الحيوية للحياة «كما نعرفها»، فإن هذا النقاش ربما يُشير إلى أنه لو كان هناك مُذيب مختلف موجود على الأرض (أو في أي مكانٍ آخر في الكون)، لربما استُغلت خواص هذا المُذيب المختلف في تطوير شكلٍ مختلف من الحياة. وقد دارت مناقشات مثيرة للاهتمام حول أنواع الخصائص التي قد يحتاجها هذا المذيب لتمكين عمليات التخليق الجزيئي، والأيض، والتكاثر التي تُميز الأشياء الحية. بعض هذه المناقشات مُدرَج في قسم «قراءات إضافية». وهي تُشير إلى أننا قد نُخفق في خِضمِّ بحثنا عن الحياة في مكان آخر في الكون إذا ركَّزنا فقط على وجود الماء كشرطٍ أساسي للحياة.

الفصل السابع

بعض الجدالات السابقة والراهنة

ما الذي تبقَّى لنفهمه؟

آمُل أن يكون قد بات واضحًا الآن بالدرجة الكافية وجود فهم جيِّد إلى حدٍّ كبير لبنية الماء وديناميكياته وخواصِّه في العموم. فلدَينا فكرة جيدة عن بِنيته، وكيف أن هذه البنية تُفسر السبب وراء اختلاف خواصِّه — التي يرتبط بعضها بأدواره في الحفاظ على الحياة على الأرض — عن خواصِّ أي سائل «عادي» في بعض الأحيان. ولكن يظلُّ هناك عددٌ من الإشكاليات لا تزال تطلُّ برءوسها، وتُشير إلى أنه ربما لا يزال هناك بعض الأمور حول الماء لم نفهمها بعد.

في وسائل الإعلام السائدة، تُقدَّم لنا مياه معالَجة بشكلٍ خاص، يُقال لنا إنها تتمتع بقدراتٍ رائعة على شفائنا من مختلف الأمراض، أو تجعلنا بصحَّة ممتازة. وهكذا يُمنَح الماء مكانة «سحرية» من نوعٍ ما، يبدو أننا سنكون أغبياء إذا لم نستفِدْ منها. ولكن أيضًا في الأدبيات العلمية الجادة، ثارت جدالات وخلافات مُثيرة للاهتمام. وقد أُنهيَ بعضها بفاعلية من خلال العمل التجريبي الجيد. ولا يزال البعض الآخر لم يُحسَم بعد.

تنقسِم هذه القضايا المُثيرة للجدل إلى نوعَين. يتعلق النوع الأول بالخواص المنسوبة إلى الماء، وتتعارَض إما مع فهمنا الحالي للماء نفسه، وإما — وهو الأخطر — مع المبادئ الفيزيائية الراسخة. النوع الثاني لا يكسر أيًّا من القوانين المعروفة للفيزياء، ولكنه لم يُحسَم تجريبيًّا بعد. سنُناقش أمثلةً من كل فئة، وسنبدأ بواحدةٍ من القضايا الملحَّة حقًّا.

«ذاكرة» الماء

تُعتبر هذه الفكرة القديمة الأساس لمزاعِم متنوعة حول الماء، وخاصة قيمته العلاجية المحتملة التي تتجاوز حاجتنا الحيوية الأساسية له. وتأتي هذه الفكرة في أشكالٍ مختلفة.

على سبيل المثال، زُعِم أننا إذا وضعنا كلماتٍ أو نيَّات طيبة فيه، فإن بوسعنا أن ننقل إليه «ذبذبات الحب، والامتنان، والشفاء». ويزعم آخرون أنه من خلال غمر النباتات في الماء وتعريضها لأشعة الشمس، يمكن نقل «الطاقات الشافية» للنباتات والزهور إلى الماء. على ما يبدو أن بإمكاننا — من خلال القيام بشيءٍ ما للماء — أن نمنحه خاصية من نوعٍ ما، تبقى معه وتلازِمُه بشكلٍ ما؛ أي إن لدَيه ذاكرة. ويُقال لنا إننا يجب أن نختار نوع الماء الذي سيفيدنا على النحو الأفضل.

في ظل ما نعرفه عن الماء، يُصبح من السهل تمامًا رفض مثل هذه الادِّعاءات باعتبارها ادعاءاتٍ خيالية. غير أن نفس النوع من المفاهيم متأصِّل في الطب التجانُسي أو المعالجة المثلية، وهو نظام من أنظمة الطب البديل تطوَّر على مدى أكثر من ٢٠٠ عام، ولا يزال مُستخدَمًا حتى اليوم. (مما يثير الجدل أنه لا يزال بالإمكان الحصول على العلاج التجانسي في بعض مناطق المملكة المتحدة من خلال هيئة الخدمات الصحية الوطنية.)

يعتمد هذا العلاج على نظرية «علاج الداء بالداء»، بمعنى أن المادة التي تُسبِّب أعراض مرضٍ ما يمكن أن تشفِي أيضًا أعراضًا مُماثلة لدى المرضى. غير أنه بالنظر إلى أن الكميات الكبيرة من مثل هذه المواد تُسبِّب المرَض، تُذاب المادة المعنيَّة في الماء لتقليل تركيزها. ثم تُخفَّف مرارًا وتكرارًا؛ إذ يُعتقد أن التخفيفات الأكبر هي الأكثر فاعلية في العلاج. وعلى الرغم من أن بعض المُمارِسين يستخدمون تخفيفاتٍ تحتوي بالفعل على بعض جزيئات المادة الأصلية، فإن «المنتج النهائي» غالبًا ما يُخفَّف بحيث لا يحتوي على جزيءٍ واحدٍ من المادة الأصلية. إذن فإن أي فاعلية للمُستحضَر تعتمد حتمًا على احتفاظ الماء بذكرى ما لما كان مُذابًا فيه أصلًا.

كُتِب العديد من الأوراق البحثية العلمية عن ذاكرة الماء. ونُشِر واحد من هذه الأبحاث في دوريةٍ علمية كبرى، حتى بعد مُراجعتها من قِبَل خمسة خبراء مُستقلِّين أوصَوا برفضها لأسبابٍ علمية. كذلك مرَّت بي أوقات في مسيرتي العلمية كنتُ أُصاب فيها بالإحباط الشديد بسبب تجربة تتعلق بالماء لا تسير حسب فهمي للفيزياء. كنتُ محبطًا للغاية، حتى إنني في أحلك الساعات (أحيانًا في منتصف الليل خلال إجراء تجربة طويلة) ظننتُ أن تأثيرًا ما للذاكرة هو تفسير ذلك الأمر حتمًا.

كانت هناك تجربة خاصة تتعلق بمحاولة تكوين الجليد III. وفقًا لمُخطط أطوار الماء/الجليد (انظر الشكل ٣-٢)، ينبغي أن أتمكن من القيام بذلك عن طريق زيادة الضغط على الجليد في الطور Ih إلى نحو ٣٠٠٠ وحدة ضغط في درجة حرارة −٥٠ درجة

مئوية تقريبًا لتكوين الجليد II. يمكنني بعد ذلك تسخين الجليد II الذي يُفترض أنه يتحول إلى الجليد III في درجة حرارة −٣٠ درجة مئوية تقريبًا. لكن ذلك لم يحدث. فقد بقِيَ الجليد في الطور II. لذا قُمنا بتسخينه أكثر، مُتجاوِزين منطقة استقرار طور الجليد III دون رؤية أي علامة على الطور المُستقر المتوقَّع، حتى ذاب الجليد.

كنا في حيرة من أمرِنا. ما الذي يحدث؟ ربما كانت عملية الانتقال من الجليد II إلى الجليد III عملية بطيئة نسبيًّا، ولم نُعطها الوقت الكافي؟ حسنًا، لا مشكلة، يجب أن نُبرد عينتنا التي صارت سائلة الآن، وسوف تتبلور مرة أخرى إلى الجليد III. لكن ذلك لم يحدث. فقد حصلنا على الجليد II مرة أخرى. كرَّرنا عملية الذوبان والتبريد عدة مرات، ولكن كنا دائمًا نخرج بالنتيجة نفسها. لذا، بما أن الجليد II كان الشكل البلوري الذي بدأنا به، فقد دفعَنا ذلك إلى التفكير في أن الماء قد احتفظ بذِكرى لطوره البلوري السابق، بحيث فضَّل أن يتبلور مرةً أخرى إليها. كانت فرضية يائسة بالنسبة إلى فيزيائي عاقل. ولكن في النهاية، وبعد مزيدٍ من التفكير والتجربة، وجدْنا تفسيرًا مناسبًا ومقنعًا تمامًا لما لاحظناه، لم يتطلب افتراض وجود ذاكرةٍ طويلة الأمد للماء، والمُصادفة أنه قد قادنا إلى اكتشافٍ جديد لم نكن نتوقَّعه.

في الواقع أن الماء يمتلك ذاكرة «بالفعل». ولكنها ذاكرة «قصيرة الأجل»، ذاكرة قصيرة جدًّا تصل إلى بضع بيكوثوانٍ، ما يُعادل بضعة ملايين من الملايين من الثانية. كما علِمنا في الفصل الرابع، يبلغ الوقت المعتاد الذي يستغرقه جزيء الماء لإعادة التوجيه ٢ بيكوثانية تقريبًا في درجة الحرارة المُحيطة. علاوة على ذلك، يبلغ متوسط الوقت الذي يستغرقه جزيء الماء للتحرُّك مسافةً مساوية تقريبًا للقُطر الجزيئي نحو ٧ بيكوثوانٍ. لذا تُخبرنا الفيزياء الأساسية أنه لا يمكن بأي حالٍ أن تتذكر عينة من الماء السائل لأكثر من بضع بيكوثوانٍ كيف يمكن أن تكون بِنيته قد تغيرت بواسطة مادة مُذابة سابقًا. بعبارة أخرى، إذا كان هناك تركيب للماء يُستحث بواسطة مادةٍ ما، وكان هذا التركيب نشطًا في علاج عَرَض مُعين، فإن فترة صلاحية «الدواء» هو بضعة ملايين من ملايين من الثانية.

الماء المُبلمَر

في منتصف ستينيَّات القرن العشرين، ادَّعى باحث في منطقة جبال الأورال أنه أنتج شكلًا من الماء أكثر كثافةً واستقرارًا من الماء العادي. أُنتِجت عيناته الصغيرة في أنابيب شعرية من الكوارتز معلقة فوق حمَّام مائي، يتبخَّر منها الماء ثم يتكثف في هيئة السائل «الجديد»

في الأنابيب الشعرية. وفي ظلِّ العلم بأن كثافة الماء منخفضة نسبيًّا بسبب بِنيته الموضعية الأساسية الرباعية، بدا منطقيًّا أن تكون هناك طريقة أخرى قد تُرتِّب بها جزيئات الماء نفسها بكثافة أعلى. فنحن في نهاية المطاف لدَينا بِنًى جليدية غير متبلورة ذات كثافات أعلى من كثافة الماء (الفصل الرابع)؛ فلِمَ لا يكون هناك طور سائل ذو كثافة أعلى؟

كانت المشكلة هي الادِّعاء بأن الشكل الجديد المزعوم أكثر استقرارًا من الماء العادي. ولو كان الأمر كذلك حقًّا، لكان هناك خطر من أن يتحوَّل كل جزيء ماءٍ على الأرض إلى هذا الشكل الأكثر استقرارًا، وبالتبعية يمحو الحياة دفعةً واحدة. فهل يُصبح الماء سلاحًا للدمار الشامل؟

ربما لم يكن لهذا العمل أن يتقدَّم خطوة لولا أن تولاه بوريس ديرجيجن، أحد أبرز العلماء في القرن العشرين الذين أرسَوا قدرًا كبيرًا من أُسس علم السطوح الحديث. قام بوريس بتحسين تقنية الإنتاج، وقاس عددًا من خواصه. كانت نقطة التجمُّد حوالي −٤٠ درجة مئوية أو أقل، ونقطة الغليان حوالي ١٥٠ درجة مئوية أو أكثر. وكانت لُزوجتُه العالية تعني أن نمط تدفُّقه أقرب إلى شرابٍ سميك لزِج منه إلى الماء، وكانت الكثافة أعلى بنسبة ١٠–٢٠ في المائة من كثافة الماء العادي، ورغم أنه لم يتم التعرُّف عليه في ذلك الوقت، فلم يكن يختلف عن الثلج العالي الكثافة غير المُتبلور الذي تطرَّقنا إليه في الفصل الرابع.

قدم بوريس هذا العمل في مؤتمر في نوتنجهام في المملكة المتحدة في عام ١٩٦٦. ولو لم يتم تقديمه من قِبَل عالم بارز مِثله، لربما مرَّ دون أن يلتفت إليه أحد. ولكن النتائج المزعومة — التي حظِيَت بتأييد قطبٍ علمي عالمي مرموق ذي شأن — كانت غريبة لدرجة أن السباق للعثور على بِنية ما كان يُسمَّى ببساطة الماء «الشاذ» قد بدأ.

وفي يوم ما في أواخر عام ١٩٦٦، توجهت إلى فندق قريب من كلية بيركبيك بلندن لاصطحاب بوريس ديرجيجن من أجل خوض نقاشٍ مع بيرنال، الذي كنتُ أُعِد رسالة الدكتوراه حول بِنى السوائل تحت إشرافه. أحضر ديرجيجن معه صندوقًا صغيرًا يحتوي على أنبوب شعري من الماء الشاذ وقدَّمه لبيرنال. تلا ذلك مناقشة شائقة جدًّا، ترتَّب عليها تكليفي أنا وزميلي إيان تشيري (وبول بارنز، الذي انضمَّ إلينا في هذا المشروع لاحقًا) بمهمة معرفة ماهية هذا الشيء.

حاولنا جاهِدين أن نصنعه، فوضعنا حمَّام الماء والأنابيب الشعرية في مُجففات محكمة الإغلاق، أُفرِغَ منها الهواء بواسطة مضخَّة، في محاولةٍ لتسريع عملية التكوين.

فباءت محاولتنا بالفشل، ما أثار إحباط بيرنال. في مكانٍ آخر، استغل أشخاص الفرصة، بدا بعضهم مدفوعًا بآمال الحصول على جائزة نوبل والأموال الكثيرة. كانت البحرية الأمريكية مهتمة به لأسبابٍ سرية، وهو ما وجدناه أمرًا مُثيرًا للتكهُّن به. فقامت مجموعة من الكيميائيين النظريين في الولايات المُتحدة بإجراء حساباتٍ ميكانيكية كمية عالية الجودة، وخلصت إلى أن المادة كانت في الواقع بوليمر؛ إذ ارتبطت جزيئات الماء بعضها ببعض من خلال روابط كيميائية تساهُمية بدلًا من الروابط الهيدروجينية الأضعف في الماء العادي. ومن هنا جاء مصطلح «الماء المبلمر» $(H_2O)_n$.

أما في بيركبيك، فقد واصلنا مواجهة المشاكل. لذا جربنا طرقًا أخرى لإنتاج المادة، دون تحقيق أي نجاح. بدأنا نبدو كما لو كنَّا باحثين غير أكفاء. وفي نهاية المطاف، وبعد أن تملَّكَنا اليأس، أخرجنا مصيدة البخار في خط الفراغ بين المُجفف ومضخة التفريغ و... أصبنا الهدف! كانت هناك أعمدة من سائلٍ في الأنابيب. إذن ماذا بعد؟

على الرغم من أننا لم نُطِق صبرًا لمحاولة معرفة كيفية ترتيب جزيئات الماء في هذه المادة، كان أول شيءٍ يجب القيام به هو التأكُّد من أننا نتعامل مع ماءٍ مبلمر نقي. لذا أرسلنا بعض «أفضل» عيناتنا إلى زملاء لنا لإجراء تحليلات المسبار الإلكتروني ومطياف الكتلة. وأتتنا النتائج؛ ما كان لدَينا هو زيتٌ من مضخة التفريغ، الأمر الذي فسَّر على الفور سهولة الإنتاج بمجرد أن أزلنا القطعة التي كانت مُصمَّمة لمنع مثل هذا التلوث للعينات.

كان الآخرون يصِلون إلى استنتاجاتٍ مُماثلة. كان لدَينا زيت من المضخة. وحصل البعض على سيليكا مُذابة من داخل الأنابيب، بينما وجد باحثٌ آخر أوجُهَ تشابهٍ مع العرق الذي يُفرزه شخصيًّا بعد مباراة كرة يد. كان ما تحصَّل عليه يعتمد على الطريقة التي حاولت بها صنع العينة والاحتياطات التي اتخذتها، أو لم تتخذها. في النهاية، أدَّى تراكم الأدلة التجريبية إلى انسحاب ديرجيجن من العمل الأصلي، مُسلِّمًا بأن «هذه الخواص (الشاذة) يجب أن تُنسب إلى وجود شوائب، وليس إلى وجود جزيئاتٍ من الماء المبلمر»، على الرغم من أنه بعد بضع سنوات، عقب نشر ورقتنا البحثية في مجلة «نيتشر» عن «الماء المبلمر والملوثات المبلمرة»، كتب إليَّ بيرنال قائلًا إننا يجب أن نُفصَل لعدم كفاءتنا.

وهكذا استطعنا أن نلتقِط أنفاسنا مرة أخرى. فلم نعُد بحاجة للقلق بشأن تحول كل الماء في العالم إلى شكلٍ أكثر استقرارًا، وربما غير نشط حيويًّا، إن لم يكن سامًّا.

انتظام السطوح

من المُتفق عليه على نطاق واسع أن الطرق التي يمكن للجزيئات أن تنتظم بها بالقرب من سطحٍ صلب ومستوٍ يجب أن تكون مقيدة بوجود السطح نفسه. يُمكننا رؤية هذا في نموذج بيرنال للكرات الصلبة في سائلٍ بسيط؛ فكما هو موضح في الشكل ٤-١، تميل الجزيئات إلى الانتظام في طبقاتٍ شبهِ مرتبة بالقُرب من السطح.

قد يكون هناك تأثير انتظام مُماثل متوقَّع بالنسبة إلى جزيئات الماء بالقرب من سطح مستوٍ. فقد نتوقَّع أن تكون جزيئات الماء مرتبةً هناك بطريقةٍ مختلفة قليلًا، قد يقول البعض إنها «أكثر ترتيبًا». وإذا كان الأمر كذلك، فقد تكون خواص جزيئات الماء البينية مختلفة ولو قليلًا عن تلك الجزيئات في الماء في حالته القياسية. وبالنظر إلى أن الكثير من الماء في الخلية الحيوية سيكون بالقُرب من نوع من السطوح، فإذا كانت الجزيئات البينية تتصرف بشكلٍ مختلف عن جملة السائل، فإن ذلك قد يكون له تأثيرات كبيرة على دور الماء في العمليات الحيوية. وفي إطار استكشاف هذه المسألة، من المفيد النظر على نحوٍ منفصل إلى كيفية تأثر: (أ) بنية الماء؛ (ب) ديناميكيات الماء، بوجود سطح «عادي».

إلى أي مسافةٍ يمتد تأثير هذا الترتيب من سطحٍ ما؟ هناك كثير من الأدلة التجريبية التي فُسِّرت على أنها تُظهر أن تأثير السطح لا يمتدُّ فقط إلى طبقةٍ جزيئية أو طبقتَين، بل يمتد إلى ما هو أبعد بكثير في السائل القياسي. إذا كان الأمر كذلك فعلًا، فإننا نتوقع لخواص الطور المائي الذي يقع على مسافةٍ ما من السطح أن تكون مُضطربة بشكل كبير عن خواص السائل في حالته القياسية. وسيكون لهذا تداعِيات على حركة الجزيئات المهمة بيولوجيًّا، مثل جزيئات ركيزة الإنزيم.

بالنظر إلى أن الخلية تحتوي على عددٍ كبير من البِنى المُتمايزة، لكل منها وظائفها الخاصة (مثل الريبوسومات، والميتوكوندريا)، وهي بالفعل تعجُّ بـ «الأشياء»، فكلما امتدَّ تأثير هذا «الترتيب»، زادت توقعاتنا بتأثُّر خواص الماء في الخلية. في الواقع، يذهب بعض الباحثين إلى أن خواصَّ «كل» الماء في الخلية تكون مُضطربة عن خواص السائل في حالته القياسية. ويكون الاضطراب كبيرًا بحيث يتصرَّف كسائلٍ لزج. وإذا كان الأمر كذلك، فسيكون هناك تأثيرٌ كبير على كلٍّ من حركة الجزيئات داخل الخلية، وعلى التفاعُلات بين مكونات الخلية المختلفة.

ولكن يجب أن نتذكَّر أننا لا نتعامل مع أسطحٍ متجانسة ومسطحة على المستوى الجزيئي. علاوة على ذلك، تميل الأسطح إلى التعقيد على المستوى الكيميائي؛ إذ تُعرِّض مزيجًا من المجموعات القطبية والمشحونة وغير القطبية للوسط الخارجي. ومن الأشياء التي تعلَّمناها من الدراسات البلورية العالية الدقة للبروتينات أنَّ الماء مُتنوِّع جدًّا على المستوى البنيوي، حتى إنه يتكيَّف بشكلٍ مريح جدًّا مع هذا التعقيد الهندسي والكيميائي. في تلك الحالات بين السطحية، تبدو بِنية السائل على السطح مشابهة جدًّا لبنية الماء في الحالة القياسية. لذا إذا كان هناك أي «انتظام» بنيوي للسائل، فمن المُرجَّح أن يكون محدودًا.

إذا كان الماء في الخلية أكثر لزوجةً من السائل النقي العادي، فإننا نتوقَّع أن يظهر هذا في قياسات ديناميكيات جزيئات الماء بالقُرب من الجزيئات الحيوية. ولكن تُشير الأدلة التجريبية هنا أيضًا إلى العكس.

يمكن القول إن أوضح البيانات عن ديناميكيات جزيئات الماء في الأنظمة المعقدة، وأقلها قابلية للتحدِّي والتشكيك، تأتي من قياسات الرنين المغناطيسي النووي. وهذه ليست بتقنية بسيطة عندما يتعلَّق الأمر بتفسير نتائج القياسات؛ في الواقع، كان التفسير التقليدي في السبعينيات من القرن العشرين أنَّ حركات جزيئات الماء بالقُرب من أي بروتين تتباطأ بمقدار مليون مرة تقريبًا. ولكن مع تطور التقنية، بدأ يتضح أن هذا الاستنتاج اعتمد بشدة على النموذج المُستخدَم لتفسير البيانات، وبدأت أبحاث أكثر تطورًا في إظهار التناقضات الكامنة داخل النموذج التفسيري المُستخدَم.

واختصارًا لقصةٍ طويلة مُعقَّدة، فإن الصورة الحالية أبسط بكثير. هناك جزيئات مائية في جيوب معزولة داخل بعض البروتينات يكون تباطؤها الحركي كبيرًا، قد يصِل إلى عدة قِيَم أُسِّية مقارنة بالماء في حالته القياسية. هذه الجزيئات المائية في الواقع هي أجزاء مكوِّنة لبِنية البروتين نفسه، وهي تلك الجزيئات التي ذكرناها في الفصل السادس، والتي لا يمكن إزالتها دون أن تتغيَّر طبيعة البروتين. وبما أنها معزولة داخل الجزيء الكبير، فلا يمكن أن تؤثر على العمليات التي تحدُث على سطح البروتين أو بالقُرب منه.

وفي تناقُض صارخ، تتباطأ الغالبية العظمى من جزيئات الماء في طبقة التميؤ لجزيئات البروتين نحو مرتَين فقط، مقارنة بالماء في حالته القياسية. لذا تظلُّ حركة هذه المياه السطحية عالية. ومن ثَم، يمكن أن تتم العمليات النشطة حراريًّا التي تحدث عند

السطح البيني بين البروتين والطور المائي (مثل ارتباط الركائز، والتعرُّف، والتحفيز) بمعدلات معقولة. فنحن ما زلنا نعمل في سائل، وليس شرابًا لزجًا.

لذا لا يوجد في هذه النتائج الكثير مما يُشير إلى وجود تأثير كبير على نشاط الإنزيم، سواء من الانتظام البنيوي لجزيئات الماء أو من تباطؤ حركاتها بالقرب من سطح بيني حيوي. غير أن الحجج القوية لا تزال قائمة، خاصة فيما يتعلق بحالة الماء في البيئة المكتظة داخل الخلية.

سائلان «اثنان»؟

بالرغم من أن هذا الموضوع قد أُثيرَ بدايةً من عام ١٩٩٢، فإن أصله يعود إلى منتصف القرن العشرين. كان فهمنا لبِنية الماء حينها أكثر بدائيةً مما هو عليه الآن، وكان يهيمن عليه النماذج التي أُبطِلت منذ زمنٍ طويل في ضوء الأدلة التجريبية.

على سبيل المثال، كان أحد النماذج الأولى المُستخدَمة لمطابقة بيانات حيود الأشعة السينية يتصور الماء السائل باعتباره بنيةً غير منتظمة مشابهة للجليد، مع وجود جزيئات «بينية» إضافية تشغل بعض الثقوب الكبيرة في بنية الجليد Ih. كان هناك نموذج آخر يعود إلى لينوس بولينج يعتمد أيضًا على فكرة الجزيئات البينية في بنية شبكية غير منتظمة. غير أن شبكته تلك لم تكن شبكة جليدية، وإنما كانت شبكة قفصية؛ إذ تشغل جزيئات الماء بعض التجاويف التي تشغلها جزيئات الغاز الضيف في هيدرات الغاز (انظر الفصل السادس).

تناولت نماذج «كيميائية» أخرى الماء باعتباره خليط توازن من «أنواع» مختلفة. في واحد من أقدم هذه النماذج، كانت «الأنواع» عبارة عن تجمُّعات صغيرة من جزيئات الماء — $(H_2O)_2$ (ثنائي الهيدرول)، و $(H_2O)_3$ (ثلاثي الهيدرول) — اختلطت مع جزيئات H_2O المفردة لتكوين السائل. كان أحد نماذج الخليط الأخرى التي شاعت في الستينيَّات هو نموذج «الرابطة الهيدروجينية المكسورة». عرَّف هذا النموذج «الأنواع» المختلفة من حيث جزيئات الماء التي شكلت روابط هيدروجينية صفرية وأحادية وثنائية وثلاثية ورباعية مع الجزيئات المجاورة.

على الرغم من أن بعض هذه النماذج استمر في التطوُّر في ستينيات القرن العشرين، فقد تعرضت النُّسخ الأولى منها للنقد في بحث بيرنال وفاولر الكلاسيكي الذي نُشر عام ١٩٣٣ (انظر الفصلين الثالث والرابع)، باعتبارها «مصمَّمةً بطريقةِ الكيمياء الجزيئية

أكثر مما ينبغي». وأشار كلاهما إلى أن هذا النوع من النماذج يُعطي وصفًا غير وافٍ للبنية الفعلية للسائل من حيث الترتيب النسبي للجزيئات. وكما رأينا في الفصل الرابع، كان بيرنال يفضِّل وضع الأساس لنموذج الشبكة العشوائية الذي نعتبره الآن نموذجًا مثاليًّا للبنية السائلة الفعلية.

إذا نظرنا بعُمق أكبر قليلًا في فكرة نماذج الخليط، يُمكننا أن ندرك لماذا كانت تُعَد طريقًا مغريًا لاتباعه في إطار محاولة فهم الخواص الشاذة ظاهريًّا للماء السائل. خذ حقيقة أن الماء يتقلص (على نحوٍ شاذ) عند تسخينه حتى درجة كثافته القصوى عند ٤ درجات مئوية، وبعد ذلك يتمدَّد بما يتماشى مع توقُّعاتنا للسائل العادي. في الفصل الخامس، شرحنا هذا السلوك في إطار نزعتَين متعارضتَين. إحدى هاتَين النزعتَين (وهي انحناء الرابطة) تتيح زيادة الكثافة عند تسخين البنية، بينما النزعة الأخرى (وهي تمدُّد الرابطة) تُقللها. فدون درجة حرارة الكثافة القصوى تُهيمن آلية انكماش الحجم، بينما فوقها تتولى عملية تمدُّد الحجم الدفة.

على النقيض من ذلك، يمكن لنموذج خليط بسيط أن يفسر هذا السلوك، لا من حيث النزعات المُتعارضة عند زيادة الحرارة، ولكن بالأحرى كتغييرٍ في نِسَب أو أعداد نوعَين مختلفَين من بِنية الماء، بما يُحقق التوازن. يمكن تصوُّر هذه الأنواع المختلفة من البِنى بعدة طرق، ولكن في الشكل الأبسط للنموذج، يُنظَر إلى السائل على أنه مُكوَّن من أشكالٍ «سميكة» و«ضخمة». وعلى الرغم من طرح أشكالٍ مختلفة أخرى، كان يُفترض في معظم هذه النماذج «ذات الحالتين» أن الأنواع الضخمة هي تجمعات من الجزيئات المرتبطة هيدروجينيًّا (ربما كانت مشوهة و«أشبه بالجليد»، وربما تُشبه الشبكة العشوائية الرباعية المثالية)، بينما كانت الأنواع السميكة تُعتبر متراصَّةً ومتقاربة أكثر (تذكَّر نموذج الرصِّ العشوائي النموذجي لسائل بسيط) وذات طاقة أعلى.

وبناء على ذلك، تُفسَّر خواص السائل في إطار التوازن بين الأنواع السميكة والضخمة، وهو توازن يتغيَّر بتغيُّر درجة الحرارة أو الضغط. ومع ضبط عوامل التغيُّر داخل النموذج على نحوٍ ملائم، يمكن استنساخ بعض البيانات الحرارية الديناميكية التجريبية. على سبيل المثال، تغيير الحرارة سيُغير الأعداد النسبية للنوعَين المختلفَين في الكثافة، مما يؤدي إلى إمكانية وصول الكثافة إلى أقصى قيمةٍ لها.

على الرغم من أن القياسات التجريبية اللاحِقة — التي اكتملت بتطوُّر النمذجة الحاسوبية — أثبتت أن نماذج الخليط هذه غير ضرورية، وتتعارَض مع البيانات

التجريبية، فقد عاودت فكرة وجود بنيتَين سائلتَين مُحتملتَين مُختلفتَي الكثافة الظهورَ بشكلٍ مختلفٍ وأكثر دقَّةً في عام ١٩٩٢. كما رأينا في الفصل الخامس، على الرغم من وجودِ طرُق بديلة لشرح حالات شذوذ الماء التي ناقشناها حتى الآن، فإن سلوك الخواصِّ الأخرى للماء مع الحرارة أدَّى إلى فرضيات جديدة شائقة مُثيرة فكريًّا نوعًا ما.

يُمكننا توضيح هذا في إطار خاصيةِ قابلية الماء للانضغاط، التي ناقشناها في الفصل الخامس باعتبارها خاصية شاذة. كما رأينا في الشكل ٥-١، تصل قابلية الانضغاط إلى الحدِّ الأدنى لها عند درجة ٤٦ مئوية. ما لم أُشِر إليه في الفصل الخامس هو أننا عندما نُقلل درجة الحرارة في المنطقة الفائقة التبريد، يُصاحب ذلك ارتفاع جوهري يزداد انحدارًا أكثر وأكثر (انظر الشكل ٥-١). ونظرًا لأننا نتوقع هذا النوع من السلوك عند الاقتراب من نقطةٍ حرجة — والتي يُقال إن التمييز بين طورَين للمادة (مثل الحالة السائلة والغازية) يختفي عندها — فإننا سنودُّ حقًّا أن نرى ما سيحدُث عندما نستمر في خفض الحرارة.

ولكن لم يُحالفنا الحظ. فقانون ميرفي يفرض سيادته في هذا المقام! فنحن نصل إلى درجة حرارة التَّنوِّي المُتجانس عند حوالي −٤٠ درجة مئوية، ما يترتب عليه تبلور السائل الفائق التبريد.

هناك نظريات مُتناقضة حول الأسباب التي تؤدي إلى هذا الارتفاع السريع في قابلية الانضغاط (وأيضًا في الخواص الحرارية الديناميكية الأخرى القابلة للقياس). ولعل أكثر هذه النظريات إثارةً للجدل هي أننا ربما نقترِب من نقطة حرجة لسائلَين لهما بنيتان مختلفتان. تُعَد هذه الفرضية، في ضوء البيانات، معقولة بما فيه الكفاية؛ لذا يجِب أن نكون قادرِين على اختبارها بالتجربة. ولكن يتدخَّل قانون ميرفي مرةً أخرى؛ إذ يبدو أن النقطة الحرجة المُفترضة ستظهر في ظروفٍ من التبريد الفائق العميق لا يُمكننا الوصول إليها. فيصرُّ السائل على التبلوُر قبل أن نتمكَّن من الوصول إليها. فإذا كانت هذه النقطة الحرجة بين هذَين السائلَين موجودة أصلًا، فهي في «أرض مهجورة» لا يُمكننا الوصول إليها تجريبيًّا.

قبل تلخيص الحالة الراهنة بشأن هذه الفرضية عن الحالتَين السائلتَين للمادة، من الأفضل أن نتراجع قليلًا ونُفكر في الفرضية المطروحة. للوهلة الأولى، تبدو فكرة احتواء سائل على بنيتَين مختلفتَين، وانتقاله بوضوح بينهما، فكرةً غريبة. فالسوائل أنظمة مائعة، تكون الجزيئات فيها في حركةٍ مستمرة، وتُغيِّر مواقعها وجيرانها طوال الوقت. ومن ثَم نتوقَّع أن تكون هناك تغييرات طفيفة «مستمرة» في البِنية العامة للسائل (على

سبيل المثال، عند تغيير الحرارة أو الضغط، كما ناقشنا في الفصل الرابع)، بدلًا من حدوث تغييرٍ مُحدَّد غير مستمر في بِنية السائل عند الوصول إلى درجة حرارة وضغط مُعيَّنَين.

غير أن هناك حججًا نظريةً جيدة لدعم مثل هذه الاحتمالية. فوجود بنيتَين سائلتَين مُتمايزتَين أمر مُمكن، بشرط أن تكون دالة الجهد بين الجزيئي — الطريقة التي تتفاعل بها الجزيئات بعضها مع بعض — ذات شكلٍ مُعين. توجَد أيضًا بيانات تجريبية تشير إلى أن سيناريو السائلَين ربما لوحِظ في بعض السوائل. فلماذا لا يسري على الماء؟ خاصةً عندما نعرف أن هناك بالفعل نوعَين على الأقل من الجليد غير المُتبلوِر في ظروف الضغط المحيط؛ الجليد غير المتبلور المُنخفض الكثافة، والجليد غير المتبلور العالي الكثافة. ربما كانت هذه هي البِنى (المثالية) لهذَين السائلين؟ قبل بضع سنوات، كان هذا الاقتراح يبدو معقولًا، حتى اكتُشِف الجليد غير المُتبلور الفائق الكثافة، حين سارع البعض إلى اعتماد ذلك كبِنية «مرجعية» للسائل ذي الكثافة الأعلى.

بما أننا لا نستطيع الوصول تجريبيًّا إلى المنطقة الحرجة المُفترضة، فهل يمكننا الوصول إليها عن طريق المُحاكاة الحاسوبية، حيث يُمكننا التحكم في النظام بطريقةٍ تمنعه من التبلور؟

بُذِلتْ بالفعل كثير من الجهود لإجراء مثل هذه الحسابات منذ التسعينيات. بل زعمت باكورة هذه المحاولات وجود ثلاثِ بِنًى سائلة مختلفة أو أكثر للماء المُحاكى حاسوبيًّا، ولكن يبدو أن الوضع قد استقرَّ على محاولة العثور على أدلةٍ جيدة على وجود سائلَين ذوَي بِنية مختلفة. فهناك مشكلات تقنية كبيرة ليس فقط في حساب حدود الطور، ولكن أيضًا في تحديد بِنًى سائلة مُختلفة في عمليات المحاكاة. وقد أُحرِز كثير من التقدُّم في معالجة هذه المسائل، ولكن مسألة وجود سائلَين بِبنيتَين مُختلفتَين في الماء لا تزال لم تُحسَم بعد.

وحتى لو أثبتت المُحاكاة الحاسوبية وجود سائلَين مختلفَين لنموذج حاسوبي معين للماء، فلن يسعنا إلا أن نستنتج وجود سائلَين لدالة الجهد تلك. فما زلنا لا نعرف دالة الجهد المائي بدقةٍ كافية لنكون واثقين أننا نحاكي شيئًا يُشبه الماء الحقيقي. لذا فالإجابة الواضحة عن السؤال عما إذا كان هناك انتقال بين حالتَين سائلتَين في الماء الحقيقي لا الماء المحاكى بالحاسوب، ستحتاج إلى بعض التجارب المُبتكَرة، التي تتحايل بطريقةٍ ما على مشكلة عدم القدرة على الوصول إلى تلك الأرض المهجورة. وهناك بعض المؤشِّرات على أن التجارب عند الضغوط السلبية قد تكون واحدةً من الطرق للمُضيِّ نحو تحقيق ذلك.

يبدو أن هذه المسألة ستظلُّ مثارةً لبعض الوقت.

الاستنتاجات؟

تُشير الشكوك المُتبقية حول الماء — والتي ناقشنا بعضها هنا — إلى أن هذا العنوان يجب أن يُذيَّل بالفعل بعلامةِ استفهام. ولكن يجب ألا ينتقِص ذلك من حقيقة أن بِنية الماء وسلوكه مفهومان بشكلٍ جيد جدًّا.

رغم أنه يمكن القول إن أُسُس أفكارنا عن الماء قد وضعها بيرنال وفاولر في تلك الليلة الضبابية في مطار موسكو في الثلاثينيَّات، فإن أفكارنا حول بِنية الماء تطوَّرت من خلال النماذج الكيميائية، ونماذج الخليط، والنماذج البلورية غير المُنتظمة، والنماذج الفراغية، لتصل إلى الصورة الحالية المُتعلقة بالشبكات العشوائية ذات التناسق الرباعي. ويتوافق هذا مع البيانات التجريبية عن بِنية السائل. وعلى نحوٍ خاص، كانت قياسات التشتت النيوتروني والأشعة السينية، التي أصبحت مُمكنةً بفضل التطوُّرات في كِلا المصدرَين وفي أنظمة الكشف، كانت أداةً رئيسة في الوصول إلى مُستوانا الحالي من الفهم. كما جرى تحسين تفسير هذه البيانات بصورةٍ أكبر من خلال استخدام موارد الحوسبة العالية القدرة بطريقة خلَّاقة ومبتكرة. والمُثير في الأمر أن بعض أفضل دوالِّ الجهد المستخدَمة في عمليات المُحاكاة الحاسوبية للأنظمة المائية — سواء أكانت من الماء النقي أم من الأنظمة الجزيئية الكبيرة المُعقَّدة والمهمة بيولوجيًّا — ترتبط ارتباطًا وثيقًا بنموذج جزيء الماء البسيط الذي قدَّمه بيرنال وفاولر في بحثهما المؤثر عام ١٩٣٣.

عند مقارنة خواص الماء مع السوائل الأخرى، يُرى بعضها شاذًّا. ولحالات الشذوذ هذه أهمية في مجالات خطيرة، مثل التأثير على مناخنا وفي عمل الأنظمة الحيوية. ويُمكننا شرحها من حيث المبدأ في إطار البنية السائلة الموضعية. وقد نستطيع أيضًا شرحها من خلال سيناريو الحالتَين السائلتَين. ولكن بما أن هذه الصورة لا تبدو ضروريةً لفهم حالات شذوذ الماء، فقد نتساءل إن كان فهم تلك المسألة بالذات — الأمر الذي سيكون في حدِّ ذاته «إنجازًا» علميًّا كبيرًا — سيزيد بشكلٍ كبير من معرفتنا بأسباب تصرُّف الماء كما يتصرَّف.

احذر من الضجة!

في كتاب جون بولكينجهورن «نظرية الكم: مقدمة قصيرة جدًّا»، نجد عنوان القسم الأخير به «ضجة الكم». في هذا القسم، يُصدِر جون تحذيرًا على المستوى الصحي الفكري ضد

استخدام الطبيعة الغريبة والمدهشة لنظرية الكم لشرح أشياء لا نفهمها، مثل التخاطر والوعي. وأجد في نفسي ميلًا لإصدار تحذيرٍ صحي مُماثل هنا بلفت الانتباه إلى «ضجة الماء». صحيح أن الماء سائل مُثير للاهتمام وغير عادي وضروري للحياة، ولكن هذا لا يعني أنه يجب أن يكون له سمات سحرية، أو تلك الخصائص الشفائية أو المُعززة نفسيًّا الغامضة التي تُنسَب إليه بصور مختلفة.

لكنه نظام مذهل حقًّا على الصعيد العلمي. ودراسته بأشكاله المختلفة أمر مُحفز للغاية. ويمكن لدراسته أن تكون في بعض الأحيان مُحبِطة ومُربِكة، على سبيل المثال عندما يجد شخص ذو نزعةٍ تشكيكية صحية مِثلي (كما أرجو) في نفسه ميلًا للوقوع في فخِّ ذاكرة الماء حين كنت أحاول بلورة حالة الجليد III من السائل. قد نفهم بنيتَه الأساسية، وديناميكياته، وتفاعلاته في الحالات البلورية، وغير البلورية، والسائلة، والغازية. ولكنه لا يزال يُطلُّ علينا بكثيرٍ من التحديات، التي يجب أن نُجابهها إذا كنا نرغب في تكوين فهمٍ مُتكاملٍ لجوانب أدائه الوظيفي، لا سيما في الأنظمة الحيوية.

قراءات إضافية

ربما يكون من الغريب أن الكتب والمقالات الجيدة غير المُتخصِّصة في مجال الماء قليلة ومتباعدة، ويعتبر كتاب «قصة الماء»، من تأليف فيليب يول الأفضل من حيث تغطيتِه الواسعة للموضوع. ولا يزال كتاب «بنية الماء وخواصه»، من تأليف أيزنبرج ووزمان، مادة علمية جيدة وتثقيفية للغاية. وتُقدِّم السلسلتان اللتان حرَّرهما فرانكس تغطيةً شاملة لمُعظم جوانب الماء، على الرغم من حدوث تطوُّرات كبيرة في كلٍّ من جودة المعلومات وفهمها منذ ذلك الحين.

كتب ومقالات غير مُتخصصة

P. Ball, *H_2O: A Biography of Water* (London, Weidenfeld and Nicholson, 1999).

J. L. Finney, 'Ice: the laboratory in your freezer,' *Interdisciplinary Science Reviews* 29 (2004) 339.

J. L. Finney, 'Bernal and the structure of water,' *Journal of Physics: Conference Series* 57 (2007) 40.

J. L. Finney, 'Sculpting ice molecule by molecule.' In H. Aardse and A. van Baalen (eds), *Findings on Ice* (Amsterdam, Pars Foundation and Lars Müller Publishers, 2007), 79.

F. Franks, *Polywater* (Cambridge, MIT Press, 1981).

كتب أكثر تخصُّصًا

R. M. Daniel and J. L. Finney (eds), 'The molecular basis of life: is life possible without water?', *Philosophical Transactions of the RoyalSociety, London* B359 (2004) 1141.

D. Eisenberg and W. Kauzmann, *The Structure and Properties of Water* (Oxford, Clarendon Press, 1969).

F. Franks (ed.), *Water: A Comprehensive Treatise* (New York, Plenum, 1972 to 1982 (7 volumes)).

F. Franks (ed.), *Water Science Reviews* (Cambridge, Cambridge University Press, 1985 to 2009 (5 volumes)).

F. Franks, *Water: A Matrix of Life*, 2nd edition (Cambridge, The Royal Society of Chemistry, 2000).

R. M. Lynden–Bell, S. C. Morris, J. D. Barrow, J. L. Finney, and C. L. Harper, Jr (eds), *Water and Life: The Unique Properties of H2O* (Boca Raton, CRC Press, 2010).

V. F. Petrenko and R. W. Whitworth, *Physics of Ice* (Oxford, Oxford University Press, 1999).

مراجعات ومقالات علمية

P. Barnes, I. Cherry, J. L. Finney, and S. Petersen, 'Polywater and polypollutants,' *Nature* 230 (1971) 31.

T. Bartels–Rausch, V. Bergeron, J. H. E. Cartwright, et al., 'Ice structures, patterns, and processes: a view across the icefields,' *Reviews of Modern Physics* 84 (2012) 885.

J. D. Bernal and R. H. Fowler, 'A theory of water and ionic solution, with particular reference to hydrogen and hydroxyl ions,' *Journal of Chemical Physics* 1 (1933) 515.

J. D. Bernal, 'The structure of liquids,' *Proceedings of the Royal Society, London* A280 (1964) 299.

D. T. Bowron, J. L. Finney, A. Hallbrucker, et al., 'The local and intermediate range structures of the five amorphous ices,' *Journalof Chemical Physics* 125 (2006) 194502.

P. G. Debenedetti and H. E. Stanley, 'Supercooled and glassy water,' *Physics Today*, June 2003, 40.

J. R. Errington and P. G. Debendetti, 'Relationship between structural order and the anomalies of liquid water,' *Nature* 409 (2001) 318.

J. L. Finney, 'Hydration processes in biological and macromolecular systems,' *Faraday Discussions* 103 (1996) 1.

T. Loerting, K. Winkel, M. Seidl, et al., 'How many amorphous ices are there?', *Physical Chemistry Chemical Physics* 13 (2011) 8783.

D. Marx, A. Chandra, and M. E. Tuckerman, 'Aqueous basic solutions: hydroxide solvation, structural diffusion, and comparison to the hydrated proton,' *Chemical Reviews* 110 (2010) 2174.

M. J. Mottl, B. T. Glazer, R. I. Kaiser, and K. J. Meech, 'Water and astrobiology,' *Chemie der Erde* 67 (2007) 253.

C. G. Salzmann, P. G. Radaelli, B. Slater, and J. L. Finney, 'The polymorphism of ice: five unresolved questions,' *PhysicalChemistry Chemical Physics* 13 (2011) 18468.

H. Savage, 'Water structure in crystalline solids: ices to proteins,' *Water Science Reviews* 2 (1986) 67.

A. K. Soper, 'The radial distribution functions of water and ice from 220 to 673K and at pressures up to 400MPa,' *Chemical Physics* 258 (2000) 121.

A. K. Soper, 'Structural transformations in amorphous ice and supercooled water and their relevance to the phase diagram of water,' *Molecular Physics* 106 (2008) 2053.

A. K. Soper, ‘Supercooled water: continuous trends,’ *Nature Materials* 13 (2014) 671.

B. Stevens and S. Bony, ‘Water in the atmosphere,’ *Physics Today* (June 2013), 29.

قائمة الصور

(2–1) Ball and stick representation of a water molecule.
(2–2) Electron density contours of the water molecule.
(2–3) A four–coordinated water molecule showing the ideal tetrahedral arrangement of the first–neighbour environment of a water molecule.
(3–1) The structure of 'normal' ice looked at from two perpendicular directions.
(3–2) The phase diagram of ice, showing the phases we expect to see at different temperatures and pressures.
(3–3) The structure of ice III.
(3–4) The structure of ice IV.
(3–5) The structure of ice VIII.
(3–6) The six possible arrangements of hydrogens in the four–fold motif, and the average structure that would be seen by a diffraction experiment.
(3–7) The difference between a hydrogen–ordered and hydrogen–disordered structure.
(3–8) The different kinds of defects in ice structures and the possible movement of an H_3O^+ defect (By permission of Oxford University Press).

(4–1) Bernal's model of the arrangement of spheres in a simple liquid compared with the ordered regular arrangement in a crystal (From Finney, 'Bernal and the structure of water,' *Journal of Physics: Conference Series* 57 (2007) 40–52 © IOP Publishing. Reproduced by permission of IOP Publishing. All rights reserved. <http://iopscience.iop.org/1742-6596/57/1/004>)

(4–2) A random network arrangement of water molecules (From Finney, 'Bernal and the structure of water,' *Journal of Physics: Conference Series* 57 (2007) 40–52 © IOP Publishing. Reproduced by permission of IOP Publishing. All rights reserved <http://iopscience.iop. org/1742-6596/57/1/004>).

(4–3) Two-dimensional analogues of the structures of ice and liquid water.

(4–4) A close-up of part of a liquid water arrangement derived from experimental measurements, showing likely hydrogen bonds between neighbours (Daniel Bowron of the Rutherford Appleton Laboratory).

(4–5) The average first-neighbour environment of a molecule in liquid water (Alan Soper of the Rutherford Appleton Laboratory).

(4–6) The average distribution of first and second neighbours around a central water molecule at ambient and high pressure (Alan Soper of the Rutherford Appleton Laboratory).

(5–1) How temperature affects the volume and the compressibility of water, compared to what is observed for 'normal' liquids (By permission of Oxford University Press).

(5–2) Theodor Grotthuss's idea of how positive electrical charge might be conducted in water.

(5–3) How we now think protons move in water.

(6–1) A snapshot of an arrangement of water molecules in vitamin B12 coenzyme (Modified from figure 4(a) of Bouquiere, Finney, and Savage,

Acta Cryst. B50 (1994) 566–78. Reproduced with permission from the IUCr).

(6–2) The ‘cage’ arrangement of water molecules in a crystal of methane hydrate.

(6–3) A schematic of the way lipid molecules are organized in a bilayer membrane.

هنـــداوي