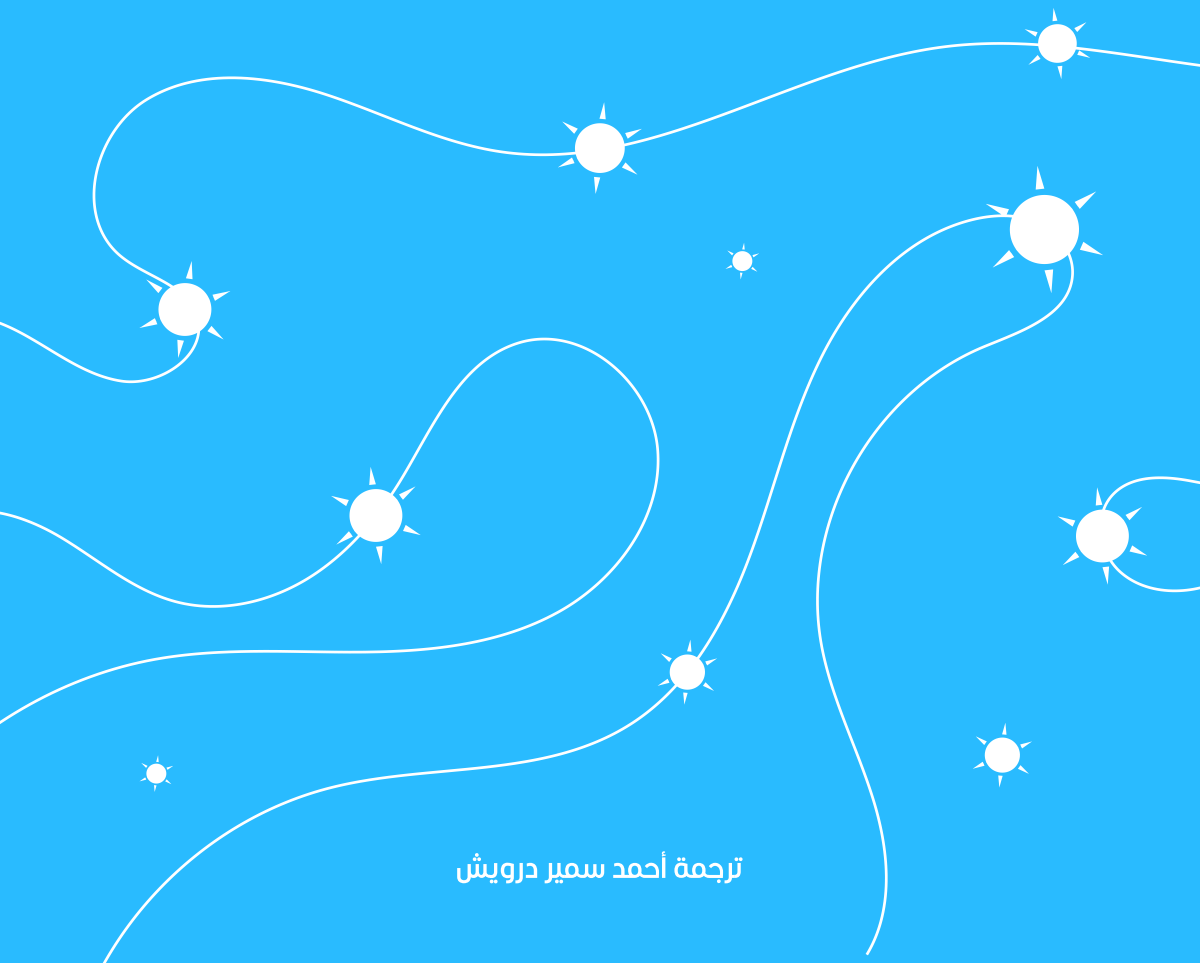
# عشر حقائق مشوِّقة

سر زرقة السماء وإجابات عميقة أخرى عن أسئلة بسيطة

جون جريبين



ترجمة أحمد سمير درويش

# عشر حقائق مشوِّقة

## سر زُرقة السماء وإجابات عميقة أخرى عن أسئلة بسيطة


**تأليف**

**جون جريبين**


ترجمة

أحمد سمير درويش

مراجعة

هاني فتحي سليمان


هنـــداوي

# عشر حقائق مشوِّقة

# Ten Tantalising Truths

جون جريبين

John Gribbin

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

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

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

---

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٨ ٣٣٣٣ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

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

جميع حقوق النشر الخاصة بتصميم هذا الكتاب وتصميم الغلاف محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بالترجمة العربية لنص هذا الكتاب محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بنص العمل الأصلي محفوظة لجون وماري جريبين عناية ديفيد هايام أسوشيتس ليمتد.

Copyright © The John and Mary Gribbin Partnership, 2023.

# المحتويات


| | |
|---|---|
| تمهيد | ٩ |
| ١- ما سر ظُلمة السماء ليلًا؟ | ١١ |
| ٢- كم تبعد أقصى الأشياء التي نستطيع رؤيتها؟ | ٢١ |
| ٣- كم عمر الشمس؟ | ٣١ |
| ٤- كيف نعرف أن أينشتاين كان على صواب؟ | ٤١ |
| ٥- ممَّ نشأ كل شيء؟ | ٤٩ |
| ٦- ما سرعة تحرك القارات؟ | ٥٩ |
| ٧- ماذا في باطن الأرض؟ | ٦٩ |
| ٨- لماذا الدم مالح كمذاق البحر؟ | ٧٩ |
| ٩- لماذا الرجال أكبر حجمًا من النساء؟ | ٨٩ |
| ١٠- ما سبب زرقة السماء؟ | ٩٩ |
| قراءات إضافية | ١٠٩ |

إلى ويليام، وبياتريس، وفلورنس: كبار المجادلين معي.

# تمهيد

# أسئلة مشوقة

حين ألَّفتُ كتابي «ستة أشياء مستحيلة»، لم أكن أتوقع أنه سيصبح باكورة سلسلةٍ من الكتب. ولكن لامسَ على ما يبدو وترًا حساسًا لدى مَن كانوا يريدون إجاباتٍ بسيطةً عن أسئلة علمية مُعقَّدة تتعلق مثلًا بطبيعة الواقع الكَمي، ونشأة الحياة على كوكب الأرض، وأصل الكون. وبعدما بذلتُ كلَّ ما بوسعي لتناول هذه المسائل في كتاب «سبعة أعمدة للعلم» وكتاب «ثمانية احتمالات مستبعدة»، شعرت بأن الشيء إذا زاد عن حده فسينقلب إلى ضده، فقررتُ اختتام سلسلة الكتب القصيرة بالانغماس في موضوع مختلف تمامًا؛ ألا وهو افتتاني بالزمن، والسفر عبر الزمن، والخيال العلمي، مُجسدًا إياه في كتاب «تسعة تصورات عن الزمن»، ومعتقدًا أن هذه ستكون نهاية السلسلة. لكني وجدت أناسًا آخرين لديهم أسئلة مختلفة. وأخصُّ بالذكر أحفادنا الذين بدأوا يطرحون أسئلة تبدو بسيطة ظاهريًّا، لكنها تتطلب تفكيرًا مليًّا للإجابة عنها بدقة. أدركت أن هذا كان مناقضًا تمامًا للنهج الذي اتبعته في التعامل مع سلسلتي المؤلَّفة من ثلاثة كتب؛ فبدلًا من أن أقدِّم إجابات بسيطة عن أسئلة مُعقَّدة، كنت أمنحهم إجابات مُعقَّدة عن أسئلة بسيطة. وإذا كانوا يطرحون هذه الأسئلة، فربما يكون أناسٌ آخرون لديهم اهتمامٌ بالإجابات. لذا بدأت أجمع ١٠ من أسئلتهم وإجاباتي دون التركيز على فكرة رئيسية مُعيَّنة باستثناء أنها كلها أسئلة واقعية تلقيتُها من أفراد الأسرة الأصغر سنًّا على مر العامَين الماضيَين. ولكن بينما كنت أخطط لترتيب موضوعات الكتاب، أدركت أن الأسئلة تُشكل تدرُّجًا طبيعيًّا من حيث ارتباطها بمكان كوكب الأرض في الكون ومكان الناس على كوكبنا؛ لذا فهذا هو الترتيب

التقريبي الذي تُعرض به الإجابات هنا. تجدر الإشارة إلى أن الأسئلة بالطبع أقدم بكثير من عُمر الأشخاص الذين طرحوها عليَّ، وبعض الإجابات تكاد تضاهيها قِدَمًا. لكن إذا كنت تظن أنك تعرف الإجابات، فربما تتعرض لبضع مفاجآت. وهذه من وجهة نظري إحدى سمات ما أسماه ريتشارد فاينمان «متعة اكتشاف الأشياء». فالأسئلة الواضحة أحيانًا ما يكون لها إجابات غير واضحة، وهذا جزء من متعة العلم. أرجو أن تستمتع بهذه الأمثلة. وإذا استمتعت، فاستفد منها أقصى استفادة؛ لأنني لا أنتوي حاليًّا تأليف كتاب بعنوان «١١ ظاهرة ممكنة شائقة للغاية»، لا سيما وأنني لا أستطيع تصوُّر ١١ موضوعًا من المناسب طرحه للنقاش. لكن إذا خطر ببالك أي موضوع كهذا، فلا تتردد في مراسلتي عبر بريدي الإلكتروني john@gribbin.co.uk؛ ينبغي للمرء ألَّا يجزم أبدًا بأنه لن يفعل شيئًا ما مرة أخرى.

جون جريبين، يونيو ٢٠٢٢

السؤال الأول

# ما سر ظُلمة السماء ليلًا؟

الإجابة البديهية أن جانب الأرض الذي يُخيِّم عليه الليل لا يكون مواجهًا للشمس، وأننا عندئذٍ نكون مُطلِّين على الكون المظلم البارد. ولكن لماذا الكون بارد ومظلم باستثناء قلةٍ من نجوم متناثرة؟ على حد علمنا، فإن أول مَن فكَّر جدِّيًّا في هذا اللغز هو الإنجليزي توماس ديجز، أحد مخترعي التلسكوب. ففي عام ١٥٧٦، اقترح ديجز أن الكون كبير بلا حدود وأزلي، رافضًا الفكرة القديمة التي كان يفترض أصحابها أن كوكب الأرض محاط بمجموعة من «كُرات بلَّورية». صحيح أنه أدرك أن الكون إذا كان كبيرًا بلا حدود ومليئًا بالنجوم، فيُفترض أن يرى المرء نجمًا حيثما يولِّي وجهه، دون فراغات مظلمة بين النجوم، لكنه استنتج أن النجوم السحيقة أشد خفوتًا من أن تُرى، وأن هذا هو السبب ببساطة. لكن في عام ١٦١٠، أدرك يوهانز كبلر أن هذه الحُجَّة مصيرها البُطلان.

قَلَب كبلر الحُجة رأسًا على عقب. لقد أوضح قائلًا إنه لو كان الكون مليئًا بالنجوم ولامتناهيًا بالفعل، فلا بد أن يرى المرء نجمًا حيثما يولِّي وجهه؛ لذا فإن ظلمة السماء ليلًا تؤكد قطعًا أن الكون ليس كبيرًا بلا حدود. وقال إن الكون محاطٌ حتمًا بحافةٍ ما، أو جدار، وأننا حين ننظر من خلال الفجوات بين النجوم، نكون ناظرين إلى ذاك الجدار. يكاد هذا يتسق مع الفكرة العصرية التي تفترض أن مجرتنا درب التبانة جزيرةٌ من النجوم طافية في الفضاء المظلم. فإذا تخيلت أنك تقف في أيكة صغيرة من الأشجار، فبمقدورك النظر من خلال الفجوات بين الأشجار لترى العالم الخارجي، لكن إذا كنت في غابة لامتناهية، فمن المُفترَض أن ترى شجرة حيثما تنظر. لكن هذا التشبيه قاصرٌ مع الأسف لأننا محاطون بمجرات أخرى؛ لذا يمكن تحديث الحُجة كلها بالقول إننا حيثما ننظر خارج مجرة درب

التبانة، يُفترض أن نرى مجرة أخرى.[١] سأواصل الحديث عن النجوم؛ لأن هذه هي الكيفية التي تطور بها الموضوع، لكن ضع في حسبانك أن الحُجة تنطبق بالقوة ذاتها على كونٍ ممتلئ بالمجرات.

كان عالِم الفلك السويسري جان-فيليب لوا دو شيزو هو أول مَن عبَّر عن ذلك اللغز تعبيرًا واضحًا بمصطلحات علمية، وذلك في أربعينيات القرن الثامن عشر. ويتمثَّل الاختلاف الفارق بين نهجه والتكهنات السابقة في أنه أجرى حساباته مستخدمًا أرقامًا حقيقية. إذ قدَّر المسافات بيننا وبين النجوم بتخمينٍ مفاده أنها كلها تتسم بسطوع الشمس الفعلي ذاته، وحساب المسافة التي من المفترض أن تكون تلك النجوم واقعة عندها لتبدوَ خافتةً جدًّا. ثم حسَب الحجم الذي كنا سنرى به قرص الشمس لو كان يَبعُد عنَّا تلك المسافة. وأخيرًا، توصَّل بالحسابات إلى أنه إذا كانت النجوم منتشرةً بتوزيع شبه متساوٍ في أرجاء الكون بنفس كثافتها في جزئنا من الكون، فإنَّ هذه الأقراص ستتداخل جميعًا، وبذلك ستبدو السماء كلُّها ساطعةً كالشمس إذا نظرنا إليها من مسافة تكافئ ١٥١٠ (أي مليون مليار) سنة ضوئية، بالمصطلحات الحديثة. واستنتج من ذلك احتمالين: إمَّا أن النجوم ليست موزعةً بالتساوي هكذا — بمعنى أن أيكتنا من الأشجار الفلكية محاطة حتمًا بحافةٍ ما — أو أن شيئًا ما يحدث ليحجب الضوء القادم من تلك النجوم السحيقة. اقترح دي شيزو أن الضوء يزداد خفوتًا أثناء انتقاله عبر الفضاء إلينا. صحيح أنه كان مخطئًا (أو بالأحرى مخطئًا إلى حد ما، كما سأُبين)، لكنه على الأقل حاول تفسير اللغز.

طُرح بعدئذٍ تحديثٌ عصري لحجة دو شيزو يجعلها أكثر إقناعًا لمحبي الرياضيات (إذا لم تكن من محبي الرياضيات، فتخطَّ هذه الفقرة). تخيَّلْ أن الأرض تقع عند مركز سلسلة كبيرة (يمكن أن تكون غير محدودة) من «الأغلفة» الرقيقة كقشور البصل (والمقصود أنها رقيقة وَفْق المعايير الفلكية). إذا كانت الأغلفة كلها لها السُّمك نفسه، فإن حجم الغلاف يتناسب مع $r^2$، علمًا بأن r يرمز إلى المسافة التي يبعدها عن كوكب الأرض.[٢]

---

[١] جدير بالذكر أن إدموند هالي، الشهير باكتشافاته المتعلقة بالمذنبات، فكَّر هو الآخر في لغز إظلام السماء ليلًا، في عام ١٧٢١، ولكن مثله مثل ديجز، ارتأى ببساطة أن النجوم السحيقة أشد خفوتًا من أن تُرى.

[٢] في الحقيقة يتناسب الحجم مع $r^2$ مضروبًا في سُمك الغِلاف، ولكن لأن الأغلفة كلها لها السُّمك نفسه، فإن هذا لا يؤثر في الحسابات.

وإذا كانت النجوم موزعة بالتساوي في كل أنحاء الكون، فإن عدد النجوم في كل غلاف يتناسب مع حجمه؛ لذا فهو أيضًا يزداد بزيادة $r^2$. لكن الضوء الذي يصل إلينا من كل نجم يقل بزيادة $r^2$ (أي يتناسب عكسيًّا مع $r^2$). وبذلك يتلاشى تأثير عوامل $r^2$ لأن بعضَها يُبطِل بعضًا، ويُسهم كل غلاف بالقدرِ نفسه من السطوع في السماء ليلًا (أو نهارًا!) وبطبيعة الحال، يُحجَب الضوء الوارد من الأغلفة السحيقة بفعلِ النجوم الموجودة في الأغلفة القريبة؛ لذا يتضح مجددًا أن السماء ينبغي أن تكون ساطعة بقدرٍ يساوي سطوع الشمس «فقط».

كان من المفترض أن يُنسَب هذا اللغز العلمي إلى دو شيزو، لكنه في الحقيقة دُوِّن في سجلات التاريخ باسم «مفارقة أولبرز»، وهي تسمية تُثير ضيقًا مُضاعَفًا لأن عالِم الفلك الألماني هاينريش أولبرز لم يَكُن أول مَن فكَّر في تلك المسألة، ولأنها ليست مفارقة أصلًا. لكن هذه هي طبيعة الأمور.

طرح أولبرز تفسيره الخاص للمسألة في عام ١٨٢٣. صحيح أنه كان مشابهًا جدًّا لفكرة دو شيزو، لكنه اقترح أن الضوء القادم من النجوم البعيدة لا يَخفُت في طريقه إلينا فحسب، بل يمتصه الغبار الموجود في الفضاء أيضًا. لكن المشكلة، التي أغفلها، أن الفضاء إذا كان فيه غبار يمتص الطاقة من النجوم، فإن ذلك الغبار سيسخَن، ويصبح في النهاية ساخنًا وساطعًا كالنجوم نفسها. لذا فإذا صَحَّ أن الكون كبير بلا حدود وأزلي، فسيبقى لغز سماء الليل المظلمة قائمًا بلا حل.

أتى أول تلميح إلى الحل الصحيح من الشاعر إدجار آلان بو، في مقالة بعنوان «يوريكا»، أو «وجدتها»، نُشرت في عام ١٨٤٨. لكن هذا في الحقيقة كان مجرد تلميح إلى إجابة محتملة وسط قدر كبير من التأمُّل الميتافيزيقي (بعضه قيِّم وبعضه فارغ)، ولا يستحق بو مقدار الفضل الذي يُنسب إليه في بعض الأحيان. ومع ذلك، يجدرُ تأمُّل الأجزاء القيِّمة من كلامه، التي يمكننا أن نعتبرها تُلمح إلى الاتجاه الصحيح، بعدما أدركنا الحقائق التي لم تكن معروفةً آنذاك.

يستهل بو كلامه ببداية موفقة، مُعبرًا بوضوح عن طبيعة اللغز:

> بنظرة فاحصة بسيطة جدًّا إلى السماء، يتأكد لنا أن النجوم تتسم بطابَعٍ عامٍّ معين من التطابق أو التساوي أو تساوي المسافات في توزيعها عبر حيز الفضاء الذي تقع فيه كمجموعة واحدة بشكل شبه كروي.

ويقول في فقرة أخرى:

> أيُّ رصد للقبة السماوية يدحض المفهوم الذي يفترض أن كونَ النجوم ممتدٌّ بلا أي حدود.

ولكن سرعان ما يتضح أنه يدحض فكرة عدم محدودية النجوم، وليس عدم محدودية الفضاء نفسه.

إذ أشار بنجاحٍ إلى أنه نظرًا إلى أن الضوء ينتقل بسرعة محدودة، فإنه يستغرق وقتًا طويلًا للانتقال عبر الفضاء إلينا من نجم بعيد، أو ما يسميه «السُّدُم»، التي صرنا نعرف الآن أنها مجرات أخرى:

> لأن الضوء الذي نُدرك به وجود السُّدُم الآن لا يمكن أن يكون سوى الضوء الذي انبعث من أسطحها منذ عدد هائل من السنين، فإن العمليات التي تُرصَد حاليًّا، أو التي يُفترض أنها تُرصد، ليست عمليات جارية الآن بالفعل، بل أطياف عمليات اكتملت منذ أمد بعيد في الماضي.

تُعد هذه رؤية ثاقبة مهمة. فنظرًا إلى أن الضوء ينتقل بسرعة محدودة، نرى الأجرام كما كانت حين انبعث منها الضوء. حتى ضوء الشمس يستغرق أكثر بقليل من ثماني دقائق ليصل إلينا. لذا يمكن القول، من منظورٍ ما، إنَّ التلسكوبات آلات زمن تمنحنا مشاهد من عصور أقدم كلما نظرنا إلى مسافة أبعد. والآن بعدما اتضحت تلك الفكرة، يمكننا أن نجعل بو يبدو ذا بصيرة ثاقبة جدًّا إذا سلَّطنا الضوء على هذه الفقرة بالذات من مقالته «يوريكا»:

> لو كانت النجوم متعاقبةً بلا نهاية، فإن خلفية السماء يُفترض أن تُظهر لنا سطوعًا موحدًا، كالذي تُظهره المجرة؛ لأنه يستحيل عندئذٍ أن توجد أي نقطة، في تلك الخلفية كلها، بلا نَجمٍ عندها. لذا فالطريقة الوحيدة التي نستطيع بها، في مثل هذه الحالة، أن نفهم سبب الفراغات التي ترصدها تلسكوباتنا في اتجاهات لا حصر لها هي أن نفترض أن الخلفية غير المرئية تقع على بعد مسافة هائلة لدرجة أنه لم يستطع أي شعاع مطلقًا الوصول إلينا حتى الآن. ربما يكون ذلك صحيحًا، فمن سيجرؤ على إنكاره؟

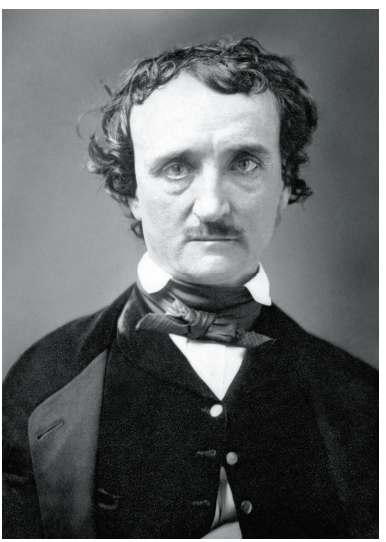
لكن من سوء حظه أنه في الجملة التالية من مقالته يعترف بعدم يقينه من ذلك دون أن ينكره فعليًّا؛ إذ يقول:

أؤكد ببساطة أننا لا نعرف أدنى سببٍ يجعلنا نؤمن بصحة ذلك.

فلو كان بو قد حذف تلك الجملة، لكان من الممكن أن يُنسَب إليه الفضل بجدارة في تفسير إظلام سماء الليل بأن الكون ليس قديمًا بما يكفي ليمتلئ بضوء النجوم.

بعد ذلك بقليل في مقالته، أورَد تفسيره الخاص للغزِ إظلام سماء الليل، مُكرِّرًا فيه أفكار كبلر. إذ أشار إلى:

> تلك الفجوات السماوية المتكررة التي لا نستطيع، ولو بأشد تدقيق ممكن، أن نرى فيها أي أجسام نجمية ولا حتى أي مؤشرات على وجودها؛ وتوجد عندها صدوع واسعة أحلك سوادًا من إيريبوس يبدو أنها تمنحنا لمحات من خلال الجدران المحيطة بكونِ النجوم إلى كون الفراغ اللامحدود، وما بعده.



إدجار آلان بو. (صورة من إبداع رسام مجهول رمَّمها يان فورجت وآدم كويردن، وهي تقع في نطاق الملكية العامة، ومنشورة على موقع «ويكيميديا كومنز».)

وهذه ببساطة هي الفكرة القديمة التي افترضت أننا نعيش في أيكة فلكية منعزلة وراءها فراغ أبدي.

كانت فكرة أبدية المكان والزمان هي التي تركت لغز إظلام سماء الليل بلا تفسير (ولا اهتمام كبير) حتى فترة لا بأس بها في القرن العشرين. ثم بدأ الوضع يتغير في نهاية عشرينيات القرن الماضي، حين اكتشف عالِم الكونيات البلجيكي جورج لوميتر وعالِم الفلَك الأمريكي إدوين هابل (بمساعدة مواطنه عالِم الفلك ميلتون هوماسون)، كلٌّ على حدة، أن الضوء القادم من مجرات بعيدة يُمَط إلى أطوال موجية أطول في طريقه إلينا. هذه هي ظاهرة «الانزياح نحو الأحمر» الشهيرة التي سُميت هكذا لأن الضوء الأحمر له أطوال موجية أطول من الضوء الأزرق؛ وسنستعرضها بمزيد من التفصيل في الإجابة عن السؤال الثاني. سرعان ما ثبَت أن هذا الانزياح يحدث لأن الفضاء نفسه يتمدد، أو يُمَط، مُباعِدًا بين المجرات. وهذا ليس ناتجًا من تحرُّك المجرات عبر الفضاء، بل من تمدُّد الفضاء نفسه، بما يتسق مع معادلات النظرية العامة للنسبية (التي كان يمكن استخدامها للتنبؤ بالتأثير، لكن هذه قصة أخرى).

أشار لوميتر إلى أن الكون لو كان يتمدد هكذا حاليًّا، لكان من المفترض أن تنسحق كل النجوم في كل المجرات معًا منذ وقت طويل مكوِّنة كتلةً واحدة في بداية عملية التمدد، وهو ما نسميه الآن الانفجار العظيم. وظل علماء الفلك يتجادلون حول حقيقة حدوث انفجار عظيم حتى ستينيات القرن الماضي، حين اكتشفوا مزيجًا من عدَّة عوامل (سأناقش أحدها قريبًا) قدمت دليلًا حاسمًا يؤيد تلك الفكرة. وتُخبرنا العمليات اللاحقة التي رصدت معدل تباعد المجرات، وغيرها من البيانات، بأن الانفجار العظيم حدث قبل ١٣,٨ مليار سنة. أمَّا ما حدث قبل ذلك، إن كان «قبله» شيء أصلًا، فلا يزال غير مؤكد. لكن عُمر الكون كما نعرفه يبلغ ١٣,٨ مليار سنة فقط؛ لذا يستحيل وجود نجوم أقدم من ذلك، ولم يُتَح للنجوم وقتٌ كافٍ لتملأ السماء بنورها، حتى لو كان الكون لامتناهيًا.

لكن المسألة لا تتوقف عند هذا الحد. ففي ثمانينيات القرن العشرين، نظر عالِم الكونيات البريطاني النمساوي المولد هيرمان بوندي إلى اللغز من منظور مختلف. وهو أن النجوم لا تدوم إلى الأبد. إذ تبدأ حياتها بكمية محدودة من الطاقة (تُطلَق بتحويل عناصر خفيفة كالهيدروجين إلى عناصر أثقل كالهيليوم)، ولا يتجاوز عمر النجم بضعة آلاف من ملايين السنين. وأن النجوم التي نراها حاليًّا مكونة أساسًا من الهيدروجين (وقليل من الهيليوم) المتبقيَين من الانفجار العظيم، وعندما يُستهلك كل وقودها، سيتلاشى الضوء

النجمي. بذلك ينقلب اللغز رأسًا على عقب؛ فبعدما كان السؤال «لماذا تُظلِم السماء ليلًا؟»، صار «لماذا لا تكون السماء مظلمة تمامًا ليلًا؟» تبقى الإجابة كما هي؛ أن عمر الكون صغير نسبيًّا وأنه لم يوجد إلا منذ ١٣,٨ مليار سنة. أي إن حياته لم تشهد وقتًا كافيًا لاستهلاك كل وقود الهيدروجين والهيليوم، ولكن عندما يحدث ذلك، ستكون السماء أشد ظلمة.

وهو ما يقودني إلى المنعطف الأخير في أحداث الحكاية، الذي أبرزه عالِم الفلك البريطاني إدوارد هاريسون في كتابه «كوزمولوجي: علم الكون». إذ تساءل عن ماهية ما نراه بالفعل في الفجوات المظلمة بين النجوم. وعلى حد تعبيره، فإننا حين ننظر «من خلال الفجوات الواقعة بين النجوم، نكون ناظرين إلى بداية الكون»، إلى الانفجار العظيم نفسه. وما نراه هناك هو الدليل على الانفجار العظيم والحل النهائي للغز سماء الليل المظلمة.

كما يعرف أي شخص استخدم منفاخًا يدويًّا لنفخ إطار دراجة، عندما تنضغط الأشياء، تصبح أكثر سخونة. والعكس صحيح أيضًا، فالغاز المتمدد يبرد. وهذا هو المبدأ الذي صُممت على أساسه الثلاجة المنزلية. ففي الأنابيب الموجودة داخل الثلاجة، يُسمَح لمائع التشغيل بأن يتمدد ويبرد، فيُبرد الهواء المحيط به (وفي الواقع «يتمدد» من سائل إلى غاز). وفي الأنابيب الموجودة خارج حجرة التبريد، ينضغط المائع بمضخة (فيعود إلى الحالة السائلة) ويسخن، لكن الحرارة تنبعث بعيدًا في الهواء، تاركة مائعًا باردًا يعود إلى الداخل. ثم يدور السائل ليمر بدورة أخرى، حاملًا الحرارة في الواقع من داخل الثلاجة إلى العالم الخارجي. يُمثل هذا أحد جوانب قانون علمي أساسي وضَّحته معادلات الديناميكا الحرارية توضيحًا صحيحًا، وهو ينطبق على الكون ككل كما ينطبق على الثلاجات المنزلية. فالكون يتمدد؛ لذا من المؤكد أنه يبرد. ما يعني أنه كان أسخن في الماضي. كذلك فسَّر هذا اكتشافًا محيرًا توصل إليه الباحثان الأمريكيان أرنو بينزياس وروبرت ويلسون في عام ١٩٦٢.

إذ كان بينزياس وويلسون يُعِدَّان تلسكوبًا راديويًّا في هولمدل بولاية نيوجيرسي من أجل برنامج بحثي، وتحيَّرا حين اكتشفا هسهسة طفيفة من ضوضاء راديوية قادمة من كل الاتجاهات في الفضاء بين النجوم والمجرات. فيمكن التعبير عن طاقة موجات الراديو بدلالة درجة الحرارة، وقد كانت درجة حرارة الهسهسة التي «سمعاها» نحو ٣ كلفن، أي −٢٧٠ درجة مئوية. أخذا اللغز إلى فريق في جامعة برينستون القريبة يقوده جيم بيبلز،

الذي أدرك أن هذا حتمًا إشعاع من الزمن الذي كان فيه الكون كله صغير العمر وساخنًا؛ أي من الانفجار العظيم نفسه.

أحتاج هنا إلى شرح ما يقصده العلماء بمصطلح الانفجار العظيم بالضبط. عند الرجوع في الزمن وتتبُّع تمدُّد الكون حتى ماضيه باستخدام معادلات النظرية العامة للنسبية، يتضح منطقيًّا أن كل ما نستطيع رؤيته في الفضاء ينبثق متفجرًا من نقطة واحدة حجمها صفر تُسمى نقطة التفرد. ولا أحد يؤمن بأن الكون الذي نعرفه قد بدأ هكذا بالضبط، خصوصًا وأن قوانين فيزياء الكم تُنافي وجود أشياء كنقاط التفرد. لذا يظل «الميلاد» الفعلي للكون لغزًا، ولكن إذا حددنا تلك اللحظة على أنها الصفر الزمني، فيمكننا وصف ما حدث في حِقب مختلفة بينما كان الكون يتمدد من شيء شبيه بنقطة التفرد. وبذلك فالمقصد الصحيح لمصطلح «الانفجار العظيم» لا يشير إلى نقطة التفرد، بل إلى الزمن الذي يلي الصفر الزمني مباشرة، عندما كان الكون كله ساخنًا وكثيفًا.

أصبح الباحثون يعتبرون اكتشاف إشعاع الخلفية هو اللحظة التي صار فيها إرجاعُ أصل الكون إلى الانفجار العظيم حقيقةً علمية راسخة، مع أن تلك الفكرة كانت مدعومةً بأدلة مهمة أخرى اكتُشفت لاحقًا في ستينيات القرن العشرين. لكن إشعاع الخلفية هذا قُتل بحثًا ويتيح لنا أفضل معلومات إرشادية عمَّا حدَث في الانفجار العظيم. وبفضل إجراء عمليات رصدٍ محسنة لإشعاع الخلفية من تلسكوبات راديوية على سطح الأرض، والأدوات المرفوعة عاليًا في الغلاف الجوي بالمناطيد، والكواشف المثبتة على أقمار صناعية، مع حسابات قائمة على النظرية العامة للنسبية، صرنا نعرف أن الكون كله، بعد الصفر الزمني بنحو ٣٠٠ ألف عام، كان ممتلئًا بمادة ساخنة تضاهي درجة حرارة سطح الشمس حاليًّا، أي نحو ٦٠٠٠ كلفن. تجدر الإشارة إلى أنه كان أشد سخونة قبل ذلك. وهذه ليست مصادفة. فدرجة حرارة سطح الشمس المرئي موجودة عند هذا المستوى لأنه يتسم بالبرودة الكافية بالضبط لارتباط الإلكترونات السالبة الشحنة بالأنوية الموجبة الشحنة لتكوين ذرات متعادلة. أمَّا في الظروف الأشد سخونة (كباطن الشمس أو الوقت الذي سبق انقضاء ٣٠٠ ألف سنة بعد الصفر الزمني في تاريخ الكون)، فتتفاعل الجسيمات ذات الشحنة الكهربائية مع الضوء والإشعاع الكهرومغناطيسي الآخر، الذي يرتد من جُسيم مشحون إلى آخر؛ ولكن حالما تُحبَس تلك الجسيمات هكذا، يستطيع الضوء أن يتدفق بحُرية عبر الفضاء. يحدث هذا عند سطح الشمس حاليًّا، وقد حدث في كل مكان عندما برد الكون وأصبحت حرارته أقل من درجة الحرارة الحرجة وصارت الإلكترونات محتجزة في ذرات. ثم أفلت الضوء المنبعث من الانفجار العظيم من براثن المادة، وظل يتدفق بلا عوائق منذ ١٣,٥ مليار سنة

حتى وقتنا هذا، وبقيَ يتمدَّد إلى أطوال موجية أطول في صورة ضوضاء راديوية ويبرُد طَوال وقت تدفُّقه. وهذا يبرر نظرية دو شيزو إلى حد ما، وإن كانت الكيفية التي «يتعب» بها الضوء المنبعث من الانفجار العظيم في رحلته عبر الفضاء لا تتناسب مع تصوره الذي افترض فيه أن الكون أبدي غير متغير.

وهكذا يوجد سببان وراء ظلمة السماء ليلًا. أولهما أن النجوم لا تعيش زمنًا طويلًا بما يكفي لتسخين كل الفضاء الموجود بينها، وثانيهما أن الكون ليس محدود العُمر فقط، بل يبرُد مع مرور الزمن. وحتى لو كان الكون كبيرًا بلا حدود، فسيكون الوضع هكذا. لكن هذا يقودنا إلى سؤال آخر. عندما «ننظر» إلى إشعاع الخلفية في الكون، نكون عائدين بأنظارنا ١٣,٥ مليار سنة إلى الوراء وناظرين إلى كرة الانفجار العظيم النارية الساخنة. ولكن كَم تبعد هذه الكرة؟ ما أقصى مدى نستطيع أن نبلغه ببصرنا عبر الكون المتمدد؟

السؤال الثاني

# كم تبعد أقصى الأشياء التي نستطيع رؤيتها؟[1]

أعيدُ صياغة السؤال الذي طُرح عليَّ لأن نسخته الأصلية، التي قيل فيها «ما أبعد مدى نستطيع أن نبلغه ببصرنا؟»، ليس لها إجابة مباشرة، كما سأوضح. لا أقصد ما أبعد مدى نستطيع رؤيته بالعين المجردة، ولكن ما أبعد مدى يستطيع علماء الفلك «رؤيته» باستخدام أفضل أجهزة الكشف المتاحة؟ قبل أن أجيب عن هذا السؤال، أحتاج إلى تذكيرك ببعض التفاصيل عن الانفجار العظيم الذي وُلِد فيه الكون كما نعرفه، والتطرق بالأخص إلى مزيد من التفاصيل عن طبيعة ظاهرة الانزياح نحو الأحمر. وأحتاج أيضًا إلى تذكيرك بأن السنة الضوئية مقياس للمسافة — المسافة التي يقطعها الضوء في عام واحد — وليست مقياسًا للزمن. وعادةً ما يُفضل علماء الفلك قياس المسافات بدلالة وحدة تُسمى الفرسخ الفلكي؛ إذ يساوي الفرسخ الواحد نحو ٣,٢٦ سنوات ضوئية. لكن هذا أيضًا قد يسبب التباسًا مع الأسف. ففي فيلم «حرب النجوم: أمل جديد» (ستار وورز: آنيو هوب)، يقول هان سولو إنَّ مكُّوكه «اجتاز مسار كيسيل رن في أقل من اثنَي عشرَ فرسخًا فلكيًّا!»، وهذا أضحك علماء الفلك بشدة لأن الفرسخ الفلكي، مثله مثل السنين الضوئية، مقياس للمسافة وليس الزمن. لكن لنعُد إلى موضوعنا.

نعرف أن الانفجار العظيم قد حدث بالفعل للأسباب الموضحة في الإجابة السابقة. وكما أوضحت، فإن الدليل الأكثر إقناعًا على الانفجار العظيم هو وجود الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يصل إلى الأرض من كل الاتجاهات في السماء؛ أو ما يُعرَف

[1] هذه الإجابة نسخةٌ مستفيضة من مقالة كتبتُها لمجلة «بوبيولار أسترونومي».

بإشعاع الخلفية الكونية الميكروي الذي ينشأ من غاز ساخن عند درجة حرارة تكاد تساوي حرارة سطح الشمس حاليًّا، وانبعث بعد الانفجار العظيم بنحو ٣٠٠ ألف سنة. ونظرًا إلى أن الانفجار العظيم حدث قبل ١٣,٨ مليار سنة، فإن هذا الإشعاع ينتقل عبر الفضاء إلينا منذ فترة تكاد تساوي ١٣,٥ مليار سنة. ولأن الإشعاع الكهرومغناطيسي يتحرك بسرعة الضوء، فلا بد أن ذلك يعني أن تلك السحب الساخنة تبعد نحو ١٣,٥ مليار سنة ضوئية، أليس كذلك؟ حسنًا، الوضع ليس كذلك في الحقيقة. فطَوال الوقت الذي كان فيه الإشعاع في طريقه إلينا، كان الكون يتمدد. لذا فتلك السحب الآن أبعد بكثير مما تشير إليه هذه العملية الحسابية الساذجة.

ولتفادي أي سوء فهم، يجب أن أوضح أيَّ التباس بشأن الانزياح نحو الأحمر وظاهرة دوبلر. إنَّ أبرز صورة مألوفة لظاهرة دوبلر، التي سُميت باسم عالم الرياضيات النمساوي كريستيان أندرياس دوبلر، تتجلى لنا في الصوت. فدرجة الصوت الصادر من صافرة إنذار إحدى سيارات الإسعاف التي تقترب منَّا تبدو أعلى مقارنة بما يكون عليه الحال عند ابتعادها عنا؛ وذلك لأن الموجات الصوتية تنضغط معًا أثناء اقتراب السيارة وتتمدد متباعدةً أثناء ابتعاد السيارة. كذلك يحدث الشيء نفسه بالضبط للضوء، لكنه لا يُصبح ملحوظًا إلا عندما يكون مصدر الضوء متحركًا بسرعة تساوي جزءًا كبيرًا من سرعة الضوء التي تبلغ ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية. وهذا يحمل فائدة كبيرة في علم الفلك. يرجع أساس تسمية «الانزياح نحو الأحمر» بهذا الاسم إلى أن الضوء الأزرق له أطوال موجية أقصر من الأطوال الموجية للضوء الأحمر. فعندما يكون النجم قادمًا نحونا، ينضغط الضوء المنبعث منه فتنسحق موجاته وتتقارب معًا ويصبح الطول الموجي أقصر؛ لذا تتحرك السمات الملحوظة في طيف هذا الضوء نحو الطرف الأزرق للطيف؛ فيما يُسمى بالانزياح نحو الأزرق. ونعرف مقدار هذا الانزياح في الضوء المنبعث من أي نجم معين لأن السمات الطيفية ذاتها، التي تُسمى بالخيوط الطيفية، يُمكن دراستها في الضوء المنبعث من أجسام موجودة في مختبرات على كوكب الأرض، حيث لا يوجد انزياح. وبالمثل، إذا كان النجم يبتعد عنا، فإن الضوء يتمدَّد إلى أطوال موجية أطول وتتحرك سمات الطيف نحو الطرف الأحمر للطيف؛ فيما يُعرف بالانزياح نحو الأحمر. وإذا أردنا التعبير عن ذلك بمصطلحات انزياح دوبلر، فإن الأحمر يعني الابتعاد والأزرق يعني الاقتراب. تجدر الإشارة إلى أن علماء الفلك يستدلون من حجم هذه التأثيرات على مدى سرعة حركة النجوم، وهذا مفيد جدًّا بالأخص عندما يكون أحد النجوم دائرًا حول نجم آخر في نظام

نجمي ثنائي، لأن معرفة سرعة حركة النجوم، إلى جانب بعض القوانين الأساسية للحركة المدارية، تُتيح حساب كتلها.

كذلك تتعرض المجرات للظاهرة ذاتها بالفعل. فأغلب المجرات توجد في شكل عناقيد، وتتحرك داخل عناقيد، كنحل يتحرك بسرعة داخل سرب، بسبب التأثير المتبادل فيما بينها بفعل قوى الجاذبية. وهذا يؤدي إلى حدوث انزياح دوبلر في الضوء المنبعث من المجرات. وعلى سبيل التوضيح بمثال قريب من كوكب الأرض، فإن الضوء القادم من مجرة أندروميدا التي توجد في نفس عنقود مجرتنا درب التبانة يتسم بانزياح نحو الأزرق، وهذا يشير إلى أنها تتحرك نحونا بسرعة ١١٠ كيلومترات في الثانية، وأن المجرتَين ستتفاعلان معًا سنة (لم أستخدم مصطلح «تتصادمان» لأنه أقوى من اللازم؛ فالنجوم لا يرتطم بعضها ببعض، بل تمر متجاورةً كسربَين من الطيور) في غضون نحو خمسة مليارات.[٢] لكن هذه التأثيرات كلها ناتجة مِن تحرُّك أشياء عبر الفضاء. وقد قلت في الإجابة السابقة إن الانزياح الكوني نحو الأحمر ظاهرة مختلفة ناتجة من توسُّع الفضاء نفسه بينما يكون الضوء في طريقه إلينا. وكلما كان وقت رحلة الضوء أطول، كان توسُّع الفضاء في ذلك الوقت أكبر وكان تمدُّد الضوء أكبر. سيكون من المفيد هنا تشبيه المسألة بزنبرك مشدود بين جسمَين. إذا تباعد الجسمان، فسيُمَط الزنبرك وسنجد أن «الموجات» التي يُحدثها ستتمدد إلى شكل أكثر تسطحًا. لكن الزنبرك لم ينتقل ككلٍّ من الجسم الأول إلى الثاني. ويعتمد مقدار «التسطُّح» على مسافة التمدُّد؛ لذا فإن هذا يجعل الانزياح الكوني نحو الأحمر مقياسًا للمسافة وليس السرعة. ولكن ما المسافة التي يقيسها؟

تخيل أنك تقف عند نقطةٍ ما في منتصف أحد الماشي المتحركة الطويلة التي توجد في المطارات مثلًا، لكن هذا الممشى كان غير مُشغَّل. ميِّز المكان الذي تقف فيه ببقعة طلاء. ولنفترض أنني أقف عند نهاية الممشى، وأنه بدأ يتحرك مُبعدًا إياك عني عند تشغيله. لكنك أنت نفسك تمشي مسرعًا نحوي، وتتغلب على سرعة الممشى، وعندما تصل إليَّ، يتوقف الممشى. بحلول ذلك الوقت، ستكون بقعة الطلاء أبعد بكثير عني ممَّا كانت وقت انطلاقك. هذه هي «المسافة الحقيقية» إلى بقعة الطلاء الآن، وليست المسافة التي كانت

[٢] هذه كلها مسألة نسبية بالطبع. فلو وُجِد راصد على مجرة أندروميدا، لقال إننا نحن مَن نتحرك نحوها بسرعة ١١٠ كيلومترات في الثانية. أي إن مجرتنا ليست مميزة من المنظور الكوني.

تفصلني عنها عندما بدأتَ المشي. ولحساب المسافة الحقيقية التي يبعُدها جسم معيَّن بقياس مقدار الانزياح نحو الأحمر في الضوء المنبعث منه، نحتاج إلى استخدام بعض المعادلات البسيطة جدًّا. غالبًا ما يُقال لِمَن يؤلفون كُتبًا كهذا الكتاب إنَّ إدراج ولو بضع معادلات حتى سيُخيف القرَّاء؛ لذا يُنصحون بعدم إدراجها؛ ولكن نظرًا إلى أن السؤال الذي أجيب عنه مطروحٌ من شخص لم يدرس رياضيات الثانوية العامة حتى الآن، ولا يجد المعادلات مخيفة، فسأتجاهل هذه النصيحة.

يستخدم علماء الكونيات الرمز z للإشارة إلى الانزياح نحو الأحمر، والرمز اليوناني لامدا (λ) للإشارة إلى الطول الموجي. وباستخدام اختصار واضح تمامًا، فإن $\lambda_{obs}$ هو الطول الموجي الذي نرصده (أي نقيسه) لخط طيفي معين في الضوء القادم من مجرة بعيدة، و$\lambda_{rest}$ هو الطول الموجي المقاس للخط الطيفي نفسه في الضوء المنبعث من جسم ساكن (وليس متحركًا) في المختبر. تُحدَّد قيمة z بدلالة مقدار الخطوط الطيفية التي انزاحت نحو الأحمر. وتكمن الفائدة الكبيرة لهذا العامل المحدد في أن المسافة التي تبعدها المجرة مرتبطة بانزياح ضوئها نحو الأحمر؛ لذا فمن خلال قياس الانزياح نحو الأحمر، يستطيع علماء الكونيات حساب بُعد المجرات؛ وكلما كان الانزياح نحو الأحمر أكبر، كانت المجرة أبعد. ويُعد قياسه سهلًا نسبيًّا. فالانزياح الكوني نحو الأحمر يساوي الطول الموجي المرصود لخط طيفي معين مطروحًا منه الطول الموجي للخط المكافئ في طيفِ جسم ساكنٍ في المختبر، مع قسمة الفرق على الطول الموجي «في حالة السكون». وبذلك تكون صيغته الرياضية الأساسية على النحو التالي:

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{rest}}{\lambda_{rest}}$$

وبإعادة ترتيب بسيطة، تُصبح الصيغة:

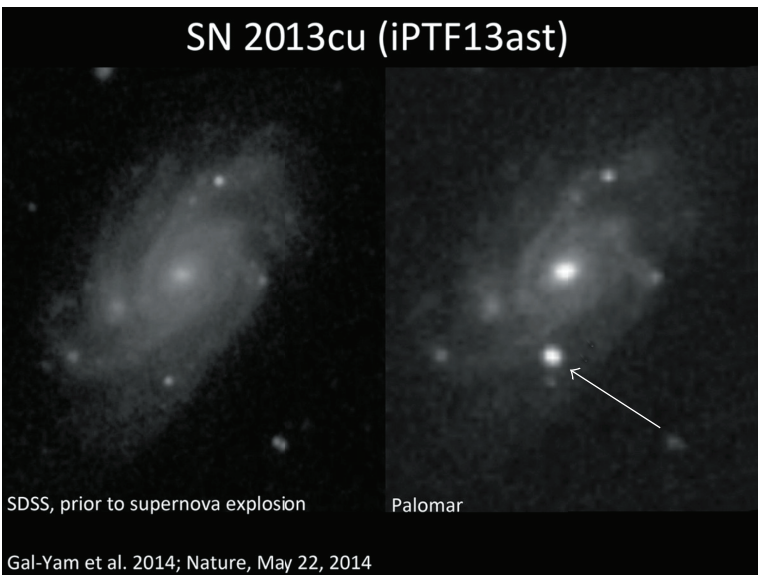
$$1 + z = \lambda_{obs}/\lambda_{rest}$$

يتحد هذا الانزياح الكوني نحو الأحمر مع أي ظاهرة دوبلر في كل مجرة على حدة. لذا فحين ينظر علماء الفلك إلى عنقود من المجرات، سيرصدون متوسط الانزياح نحو الأحمر الذي ينتج من تمدُّد الكون ويُبعِد العنقود كله عنا، لكن الانزياح نحو الأحمر في بعض المجرَّات المفردة سيكون أصغر قليلًا من المتوسط، بسبب تصادفِ تحرُّكها نحونا

في سرب المجرات ولأن ظاهرة دوبلر عندئذٍ تقلل من التأثير الكوني، بينما سيكون الانزياح نحو الأحمر أكبر قليلًا في مجرات أخرى لأنها تتحرك مبتعدة عنَّا في السرب ولأن ظاهرة دوبلر عندئذٍ تعزز التأثير الكوني. ولكن في حالة الأجسام البعيدة التي أهتم بها هنا، تكون تأثيرات دوبلر بالغة الضآلة مقارنةً بالانزياح الكوني نحو الأحمر.

يعتمد تحويل قياس الانزياح نحو الأحمر إلى قياس المسافة على معايرة ما يُسمى «العلاقة بين الانزياح نحو الأحمر والمسافة»، وذلك باستخدام قياسات المسافات الفاصلة بيننا وبين المجرات القليلة التي يمكن قياس مسافاتها بطرق أخرى. وأهم هذه المؤشرات التي تشير إلى المسافة هي النجوم المتفجرة، التي تُسمى المستعرات العظمى (ستجد المزيد عن المستعرات العظمى في إجابة السؤال الخامس). ويوجد نوع من المستعرات العظمى يُسمى «إس إن ١ إيه» وتتسم كل مستعراته بالسطوع نفسه. ولأسباب واضحة، يُشار إلى تلك المستعرات بمصطلح «الشموع القياسية». وإذا وجدنا أحد هذه المستعرات في مجرة بعيدة، نستطيع معرفة بُعد هذه المجرة بقياس درجة السطوع (أو الخفوت) التي يظهر بها ذلك المستعر الأعظم. يشبه هذا وجود شارع طويل مضاء بسلسلة من أعمدة الإنارة تتسم كلها بالسطوع الذاتي نفسه، وتُعَد بمثابة مجموعة أخرى من الشموع القياسية. إذا عرفتَ درجة سطوع أضواء الأعمدة، يمكنك إن شئت أن تحسب المسافة التي يبعدها عنك كل عمود دون أن تترك مكانك الذي تقف فيه عند نهاية الشارع، وذلك بقياس سطوع الضوء الذي يحمله. غير أن الحسابات هنا معقدة بعض الشيء بسبب الحاجة إلى استخدام معادلات النظرية العامة للنسبية (وهي أكثر تقدمًا بقليل من رياضيات الثانوية العامة؛ لذا لن أدرجها هنا) لحساب التغيرات التي طرأت على معدل تمدُّد الكون على مر الزمن الكوني. فهذا يستلزم حسابات أشد تعقيدًا للانزياح نحو الأحمر في الضوء المنبعث من الأجسام التي يمكن استنتاج مسافاتها باستخدام طرق أخرى، بما فيها دراسات المستعرات العظمى. خلاصة القول أن لدينا دليلًا قويًّا على أن تمدُّد الكون كان يتباطأ حتى وقت قريب، بمقاييس الزمن الكوني، ولكن يبدو الآن أنه يتسارع. وعند التعويض بالأرقام المناسبة في المعادلات الكونية، نجد أن الجسيمات الموجودة في الغاز الساخن الذي أطلق إشعاع الخلفية الكونية تبعد الآن نحو ٤٥,٧ مليار سنة ضوئية؛ وهذه هي مسافتها الحقيقية (وتُسمى أيضًا بالمسافة الشعاعية المسايرة). هذا هو أبعد مدى يستطيع علماء الفلك «رؤيته» حاليًّا. وقد تمدَّدت الأطوال الموجية للإشعاع المنبعث منذ ذلك الوقت من نطاق أطوال الضوء المرئي إلى نطاق أطوال الموجات الراديوية الميكروية، بما يكافئ انزياحًا نحو الأحمر قيمته أكبر قليلًا من الألف.

وإذا استطعنا رؤية الانفجار العظيم نفسه (بافتراض أن هذا قد يُصبح ممكنًا يومًا ما باستخدام إشعاع الجاذبية الذي يتحرك هو الآخر بسرعة الضوء) فسنكون عندئذٍ ناظرين إلى شيء أقدم من إشعاع الخلفية ببضع مئات الآلاف من السنين فقط، وأبعد منه بمسافة قصيرة تكافئ قِصَر الفارق الزمني؛ إذ سيكون واقعًا على بعد ٤٦,٦ مليار سنة ضوئية. قد يختلف الرقم النهائي اختلافات طفيفة بناءً على مجموعة المعادلات الكونية التي تحبذها (أو النموذج الكوني المفضَّل)، ولكن بالأرقام التقريبية، يخبرنا ذلك بأن المسافة الفاصلة بيننا وبين حافة الكون المرئي تبلغ ٤٦ مليار سنة ضوئية. يُمثل هذا تعريف الأفق الكوني (الذي يُسمى أيضًا بالأفق المُساير أو أفق الجسيمات). وذلك هو أبعد مدى نستطيع رؤيته في أي اتجاه، بمعنى أنه نصف قطر فقاعة الفضاء التي نستطيع ملاحظتها، وبذلك يبلغ قطر الفقاعة نحو ٩٢ مليار سنة ضوئية.




المستعر الأعظم. (أفيشاي جال يام، معهد وايزمان للعلوم.)

صحيح أن الأفق المساير هو أبعد مسافة نستطيع أن نتلقى منها معلومات في الوقت الحاضر. لكن هذا لا يعني أننا في مركز الكون، مثلما أن وجود أفق مرئي لركاب سفينةٍ

ما في المحيط الهادئ لا يعني أن السفينة موجودة في وسط المحيط. وعلى غرار البحَّارة في المحيط الهادئ، فإن أي راصد موجود بالقرب من حافة فقاعتنا سيستطيع أن يرانا عند أبعد مسافة مرئية له إذا نظر في اتجاهنا، وإذا نظر في الاتجاه المعاكس، فسيبلغ ببصره المسافةَ نفسها بعد حدود أفقنا. ولكن إذا افترضنا وجود أي راصدين بالقرب من حافة أُفُقنا ينظرون نحونا، فإنهم لن يرَوا مجرة درب التبانة بحالتها الحالية، ولكن بحالتها التي كانت عليها منذ نحو ١٣,٨ مليار سنة؛ أي إنهم سيرَون إشعاع الخلفية الكونية المنبعث من سُحُب الغاز الساخن الذي تكوَّنت منه المجرات والنجوم والكواكب وحياتنا نفسها في النهاية. وعلى عكس الأفق الذي نراه من سفينة في المحيط الهادئ، فإن الأفق الكوني يواصل الابتعاد عنَّا مع تمدد الكون؛ أي إن «الممشى المتحرك» لا يتوقف عن الحركة في هذه الحالة.

ولكن يوجد أفق مرئي آخر لن يتجاوزه أحد إطلاقًا حتى الحضارات المستقبلية التي ستصل إلى أفضل تقدُّم تكنولوجي ممكن. وهذا هو أفق الحدث الكوني؛ الذي يُعرف بأنه أبعد مسافة حالية عنَّا لن يصل إلينا من بعدها أيُّ ضوء ممَّا ينبعث حاليًّا على الإطلاق (وأحيانًا ما يُسمى «حد الرؤية المستقبلية»). يبلغ بُعده نحو ٦١ مليار سنة ضوئية. وأي شيء يقع أبعد منه سينجرف بعيدًا، بفعلِ تمدُّد الكون، بسرعةٍ تتجاوز سرعة الضوء؛ لذا لن تصل إلينا أيُّ معلومات من تلك المنطقة أبدًا، مثلما لا يمكن لأي معلومات، أو ضوء، الهروب من ثقب أسود. تجدر الإشارة إلى أن الأفق الكوني الحالي يقع على بُعد نحو ثلاثة أرباع هذه المسافة. وبغض النظر عن أي مشكلات عملية تشوب عملية الرصد، هذا معناه أن العدد الإجمالي لكل المجرات التي ستتسنى رؤيتها من كوكب الأرض لا يتجاوز نحو ضِعف العدد المرصود بالفعل حتى الآن.

لكن حتى هذه ليست نهاية القصة. فلو صحَّ بالفعل أن تمدد الكون يتسارع حاليًّا، كما تشير الأرصاد، واستمر هذا التسارع إلى الأبد، فستتلاشى حتى المجرات التي نراها اليوم مع تزايد انزياح ضوئها نحو الأحمر؛ إذ إنَّ موجات الضوء ستُمَط إلى شكل أكثر تسطحًا. وهكذا فكل جسم تتراوح قيمة انزياح ضوئه نحو الأحمر حاليًّا بين ٥ و١٠ سيصبح غير مرئي في غضون فترة تتراوح بين ٤ و٦ مليارات سنة؛ أي تقريبًا بحلول الوقت الذي ستتضخم فيه الشمس وتُصبح عملاقًا أحمر قُرب نهاية حياتها. ومن ثم، لو افترضنا أن حياةً تبدأ الآن للتو على كوكبٍ كالأرض يدور حول نجم كالشمس، وأن التطور هناك يحدث بنفسِ وتيرة حدوثه على كوكب الأرض، فبحلول الوقت الذي ستوجد فيه

على ذلك الكوكب حضارةٌ قادرة على دراسة الكون ككل، ستكون الأشياء المتاحة أمامهم لدراستها أقل بكثير من المتاح لدينا، مهما كانت جودة تلسكوباتهم. وذلك لأن سماءهم الليلية ستكون أشد ظلمة من سمائنا.

كل هذا يعيدني إلى النقطة التي بدأت منها هذه القصة، وإلى شيء يضايقني بشدة. حين يحدد علماء الفلك المسافة إلى الأجسام السحيقة، غالبًا ما يُخطئ الكثيرون منهم في عرض المعلومات. فعلى سبيل المثال، يوجد جسم اسمه «جي آر بي ٠٩٤٢٣» نتج من دَفقةٍ من أشعة جاما في انفجار كوني رُصِد في عام ٢٠٠٩ في مجرة تبلغ قيمة انزياح ضوئها نحو الأحمر ٨,١. ويُعَد هذا الجسم واحدًا من أجسام عديدة لن تتسنى رؤيتها عندما تتحول الشمس إلى عملاق أحمر. صحيح أن الانزياح نحو الأحمر عادةً ما يُستخدَم لقياس المسافة، ولكن عندما تكون قيمته كبيرة هكذا، فمن الأفضل تفسيره على أنه مقياس لمدى اقتراب الحدث المعني من الانفجار العظيم. يشير الانزياح نحو الأحمر للضوء المنبعث من دفقة أشعة جاما إلى أنها حدثت منذ نحو ١٣,٢ مليار سنة. لذا فسَّرت وسائل الإعلام الشعبية (وبعض علماء الفلك المتخصصين المشاغبين) ذلك بأنه يعني أن الدفقة تقع على بعد ١٣,٢ مليار سنة ضوئية. وفي الحقيقة يبعد الجسم الآن نحو ٣٢ مليار سنة ضوئية (وهو أبعد بقليل جدًّا مما كان عليه في عام ٢٠٠٩).[٣]

وهكذا بعدما نفَّستُ عن مكنون صدري، أستطيع القول إن إجابة السؤال الثاني سهلة ومباشرة. وإذا أردتُ التعبير عنها بكلمات الأغنية الشهيرة، فسأقول: «حين يكون الجو صافيًا، سترى بلا حدود» (أون أكلير داي، يو كان سي فوريفر). صحيح أن الواقع ليس شاعريًّا هكذا، لكنه مثير للاهتمام. تبين لنا الآن أن إشعاع الخلفية الذي نستطيع «رؤيته» يبعُد ٤٦ مليار سنة ضوئية، وكان ساخنًا كالشمس عند نشأته. وهذا يقودنا

[٣] ليس لدي أمل في إقناع الناس كلهم بتغيير عاداتهم المرتبطة بهذه المسألة، لكني واثق في أنك الآن ستكون حذرًا من الوقوع في هذا الفخ. ولكن إذا أردت تصحيح مثل هذه الأخطاء بنفسك حين ترى إعلانات مضللة تدعي اكتشاف مستويات قياسية من الانزياح نحو الأحمر في منشورات أقل موثوقية، فطالِع هذا الأداة الرائعة التي ابتكرها نِد رايت تحت اسم «حاسبة المسافة الحقيقية»، والمتاحة على الإنترنت عبر الرابط www.astro.ucla.edu/~wright/ACC.html. فهذه تتيح لك إدخال كل العوامل ذات الصلة؛ ثم اترك كل الأرقام الأخرى كما تظهر لك، واكتفِ بتغيير قيمة z للجسم المعني، وانقر على كلمة General لتعرف عمره بعد الانفجار العظيم.

إلى السؤال التالي. أو بالأحرى إلى سؤالين: كم عمر الشمس، وكيف تظل الشمس بهذا السطوع الشديد إلى الآن، بعد ١٣,٨ مليار سنة من الانفجار العظيم؟ دمجتُ إجابتَي هذَين السؤالَين معًا في الفصل التالي.

السؤال الثالث

# كم عمر الشمس؟

لا بد أن عمر الشمس أكبر من عمر الأرض بطبيعة الحال، وهذا يُضيف تعقيدًا آخر إلى ذلك السؤال، وإلى لغز بقاء الشمس ساخنة. وتجدر الإشارة هنا إلى أن هذا السؤال أيضًا مرتبط بإجابة السؤال الأول؛ ولأن النجوم الشبيهة بالشمس قديمة جدًّا (بالمقاييس البشرية)، هذا بدوره يقودنا إلى الإجابة عن السؤال الخامس، لكننا سنُضطر إلى تأجيل ذلك الآن. ولكن على كل حال، فإنَّ كل ذلك يوضح أن محاولة الإجابة عن أبسط سؤال يمكن أن تمنحنا رؤى متعمقة عن طبيعة الحياة والكون وكل شيء.

قبل القرن التاسع عشر، كان معظم الناس في العالم المسيحي يعتقدون أن الأرض والشمس خُلقتا منذ نحو ٦٠٠٠ سنة. وكان ذلك مبنيًّا على حسابات ليست علمية على الإطلاق تضمَّنت إحصاء عدد الأجيال المُشار إليها في الكتاب المقدس من يسوع المسيح إلى آدم وحواء. ولكن حالما بدأ العلماء يفهمون العمليات التي شكَّلت الأرض، أدركوا أن النطاق الزمني المعني أطول بكثير من ذلك حتمًا.

تبين أن الخطوة الفارقة الأولى في الاتجاه الصحيح كانت قفزةً هائلة جدًّا لدرجة أن العالِم الذي توصل إليها، وهو الفرنسي جان بابتيست جوزيف فوريه، لم ينشرها بالفعل قَط، ربما خوفًا من السخرية. إذ استوعب فوريه الفكرة التي يعود أصلها إلى إسحاق نيوتن، والتي تفترض أن كوكب الأرض تشكَّل في هيئة كرة صخرية منصهرة ثم ظل يبرد بوتيرة ثابتة منذ ذلك الحين. كانت هذه فيما يبدو الطريقة المنطقية لشرح النشاط البركاني في كوكبنا، وأتاحت طريقةً لمعرفة المدة التي يُفترض أن كوكب الأرض استغرقها ليبرد حتى وصل إلى حالته الحالية. استخدم فوريه معادلات توضح كيفية تدفق الحرارة خلال مواد مختلفة، وأخذ في حسبانه أنه حالما تشكلت قشرة صخرية صُلبة، أثَّرت كأنها بطانية، فأبطأت هروب الحرارة من الداخل، واقترح أن درجة الحرارة عند مركز الأرض

لا بد أن تكون نحو ٦٠٠٠ درجة مئوية، وهذه هي درجة حرارة الصخور المنصهرة. وفي عام ١٨٢٠، كتب الصيغة التي حُسب بموجبها عمر الأرض بناء على كل هذا. لكنه لم يكتب الرقم الذي نتج من هذه الصيغة قَط (أو على الأقل لم يُفصح عنه لعامة الناس). يبلغ هذا الرقم ١٠٠ مليون سنة؛ أي أكبر نحو ١٦ ألف مرة من التقدير المستمد من الكتاب المقدس. ثم مرَّ ٤٠ عامًا قبل أن يُجريَ أي شخصٍ آخر حسبةً قائمة على الأساس نفسه، ويحصل على إجابة مماثلة بشكلٍ جوهري، وينشر النتيجة. ولكن بحلول ذلك الوقت، في النصف الثاني من القرن التاسع عشر، كان العلماء لديهم شكوك قوية جعلتهم يرون أنه حتى ١٠٠ مليون سنة ليست فترة طويلة بما يكفي لتفسر مظهر الأرض، وتنوع الحياة عليها في الوقت الحاضر.

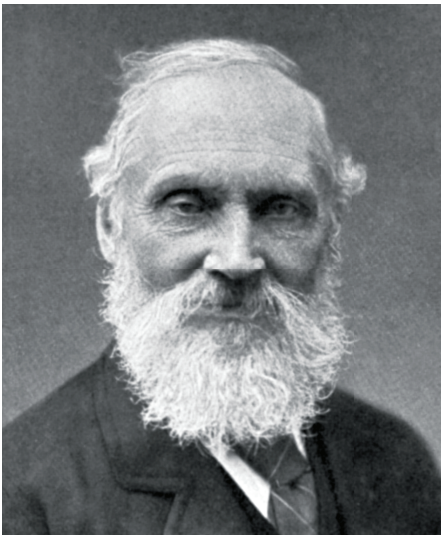
وفي أواخر القرن الثامن عشر، تناول الجيولوجي الاسكتلندي جيمس هوتون مسألة عمر الأرض (وعمر الشمس ضمنيًّا) من الجهة الأخرى؛ أي من الخارج إلى الداخل وليس من الداخل إلى الخارج. إذ درس تضاريس كوكبنا السطحية، بَدءًا من عملية التعرية البطيئة التي نحتَت تضاريس طبيعية مُعيَّنة مثل وديان الأنهار الضيقة، إلى الكيفية التي التوَت بها الطبقات الجيولوجية وانحنت بفعلِ قوًى هائلة أثَّرت فيها على مر فترات زمنية طويلة. واستنتج من ذلك أن عمر الأرض طويل جدًّا إلى حد أن حسابه مستحيل. وكتب آنذاك قائلًا: «لا نجد أثرًا لبدايةٍ؛ ولا احتمالًا لنهاية.» غير أن ما كتبه هوتون بنفسه لم يُحدث تأثيرًا كبيرًا، بسبب أسلوبه المكثف، ولكن في عام ١٨٠٢ نشر صديقه جون بلايفير نسخة محررة من نص هوتون، فلاقت اهتمامًا كبيرًا وأطلقت جدلًا عن عمر الأرض. وبذلك هُيئت الساحة لصاحب الإسهام الرئيسي التالي في تلك المسألة، وهو الاسكتلندي الآخر تشارلز لايل الذي وُلد في عام ١٧٩٧.

كان لايل سليلَ عائلةٍ ثرية والتحق بجامعة أكسفورد ليدرس الحقوق. ولكن عند وقت ما في منتصف العقد الثاني من القرن التاسعَ عشر، حين كان في الثامنة عشرة من عمره تقريبًا، صادف كتابًا عن الجيولوجيا في مكتبة أبيه وفُتِن به. قاده ذلك الكتاب إلى نسخة بلافير المُنقحة من كلام هوتون، فبدأ يحضر محاضرات عن علم المعادن، إلى جانب دراسته للحقوق. ومع أن لايل حصل بالفعل على المؤهل الدراسي اللازم لامتهان المحاماة، قاده شغفه الحقيقي في عشرينيات القرن التاسع عشر إلى خوض جولة في أوروبا ليشاهد بنفسه كيف تشكَّلت التضاريس الطبيعية بفعل النشاط الجيولوجي. بُهِر تحديدًا بطبقات الصخور البركانية، التي كانت تتخللها طبقات من الصخور الرسوبية، والتي أظهرت له

كيف ظلَّ جبل إتنا يبني نفسَه على مرِّ فترة زمنية طويلة جدًّا. وحين عاد إلى إنجلترا، ألَّف كتابًا رائعًا من ثلاثة مجلدات. صحيح أن عنوان كتابه الرائع كان «مبادئ الجيولوجيا» ليس إلَّا، لكن عنوانه الفرعي قدَّم تلميحًا وافيًا جدًّا عن محتواه؛ إذ كتب فيه: «محاولة لشرح التغيرات السابقة في سطح الأرض بالاستناد إلى أسباب سارية حتى الآن.»

كانت حُجة لايل أن النشاط الذي نراه حولنا اليوم، كالتعرية والبراكين والزلازل، هو كل ما يلزم لتفسير كيفية وصول الكوكب إلى حالته الحالية، بشرطِ أن يكون تأثير ذلك النشاط قد استمر فترة زمنية كافية. أي إننا لا نحتاج إلى كوارث طبيعية كطوفان نوح لشرح تلك المسألة. نُشر المجلد الأول من كتاب لايل في عام ١٨٣٠، وفي نهاية العام التالي، كانت توجد نسخة منه بين مجموعة الكتب التي أخذها الجيولوجي الشاب تشارلز داروين معه حين انطلق في رحلة حول العالم على متن السفينة «إتش إم إس بيجل». وحين ابتكر داروين فكرة حدوث التطور بالانتقاء الطبيعي لاحقًا، أدرك أن تلك العملية استلزمت قدرًا هائلًا من الوقت لإنتاج تنوع أشكال الحياة الذي نراه على الأرض حاليًّا، وأقدَم بلهفةٍ على قَبول الدليل الذي طرحه لايل، الذي كتب عنه داروين أنه منحه «هبة الوقت». ولكن في النصف الثاني من القرن التاسع عشر، بعد نشر كتاب داروين «عن أصل الأنواع» في عام ١٨٥٩، أدخل كلُّ ذلك داروين والجيولوجيين في صراع علمي محتدم مع علماء الفلك والفيزياء الذين قالوا إن الشمس يستحيل أن تكون قديمة بالقدر الذي تستلزمه نظريات داروين والجيولوجيين، علمًا بأن لايل كان قد أيَّد أفكار داروين في طبعة جديدة مهمة من «مبادئ الجيولوجيا» نُشرت في عام ١٨٦٥.

في بريطانيا، كان الفيزيائي ويليام طومسون، الذي صار يُعرَف باللورد كلفن لاحقًا، هو أبرز مناهضي أفكار الأمد الزمني الطويل كتلك التي اقترحها داروين ولايل، وأشد معارضيها صراحةً. فبحلول ذلك الوقت، كان علماء الفلك لديهم تقدير دقيق نوعًا ما لكتلة الشمس، بناء على دراسات لمدارات الكواكب التي تُبقيها الشمس حولها بقوة جاذبيتها. وقد أشار طومسون باستخدام هذا الرقم إلى أن الشمس، حتى لو كانت مكونة بالكامل من فحم يحترق في جوٍّ من الأكسجين الخالص، لكانت احترقت حتى تلاشت في غضون بضعة آلاف من السنين. وبهذه الطريقة أبرَز أن كوكب الأرض ليس فيه عمليات جارية معروفة بإمكانها الإبقاء على سخونة الشمس فترة طويلة؛ لكن حتى طومسون وافق على أن عمر الشمس أكبر حتمًا ممَّا تشير إليه هذه العملية الحسابية البسيطة. وبقي السؤال، كم عمرها؟



اللورد كلفن. (الصورة مأخوذة من مكتبة إي تي إتش وتقع في نطاق الملكية العامة، وهي منشورة على موقع «ويكيميديا كومنز».)

قضى طومسون سنوات عديدة في صقل فكرةٍ معينة بخصوص احتفاظ الشمس بسطوعها، وقد خطرت تلك الفكرة بباله بعدما تحسَّن فهمُه للعلاقات بين أنواع مختلفة من الطاقة تزامنًا مع الثورة الصناعية، التي استمدت زخمها من الفحم وقوتها الدافعة من البخار. كان أساس الفكرة أن الطاقة لا تفنى ولا تُستحدث من العدم. ولكن يمكن تحويلها من صورة إلى أخرى فقط. ففي اجتماع علمي عُقِد في عام ١٨٥٣، عِلم طومسون بفكرة اقترحها باحث مغمور يُدعى جون ووترستون. كان ووترستون مغمورًا لأنه لم يكن جزءًا من المؤسسة العلمية، وكان يواجه صعوبة في نشر أفكاره، لكن هذه الفكرة على الأقل وجدت الظروف المواتية. كان مُدركًا أنه إذا سقطت كتلة صخرية في الفضاء نحو الشمس، فستتسارع حركتها مع تحوُّل طاقة الوضع القائمة على الجاذبية إلى طاقة حركة، ثم تصطدم بالشمس وعندئذٍ تتبدد طاقة الحركة كلها في صورة حرارة. فهل تبقى الشمس ساخنة بسبب وابلٍ مستمر من هذه «النيازك» إذَن؟ مع الأسف لا.

حاول طومسون أن يُطبق الفكرة عمليًّا لكنه أدرك أنها تستلزم كمية كبيرة يستحيل توافرها من الصخور الفضائية. ولكي يُبرز ذلك، حسَب كمية الطاقة التي ستتوفر إذا سقطت كل الكواكب في الشمس واحدًا تلو الآخر. وتبين له أن عطارد، على سبيل المثال،

يمكن أن يوفر طاقة كافية للحفاظ على سطوع الشمس سبع سنوات، وأن الزهرة يوفر طاقة كافية لمدة ٨٤ سنة؛ لكن حتى نبتون، الذي يُعَد أكبر كوكب بعيد في المجموعة الشمسية، يمكن أن يُتيح طاقة كافية للحفاظ على سطوع الشمس نحو ٢٠٠٠ سنة فقط. ولم يكتمل الحل الذكي الذي اقترحه طومسون لهذا اللغز إلا في ثمانينيات القرن التاسع العشر، لكني سأتجاوز الخطوات المتداخلة المتشابكة وأتطرق إلى صميم الاستنتاج مباشرة. أدرك طومسون أن العامل المهم في الحساب ليس حجم الصخور الفضائية المفردة، بل إجمالي الكتلة (أو كمية المادة) المعنية. فإذا تصادم جسمان كنصفَي الشمس مثلًا، يُمكن أن يولِّدا حرارة تعادل ما ستولِّده سحابة من النيازك (أو الحصى أو حبيبات الرمل) ذات كتلة مكافئة لكتلة الشمس إذا سقطت مكوناتها نحو الداخل واندمجت معًا. وحتى لو بدأتَ حساباتك بسحابة ضخمة من جسيمات الغاز ذات كتلة مكافئة لكتلة الشمس، وسقطت جسيماتها لتندمج معًا، فستولِّد كمية الحرارة نفسها. وبحلول الوقت الذي ستكون فيه السحابة قد تقلَّصت إلى حجم الشمس، ستُقدَّر درجة الحرارة عند لُبِّها بملايين الدرجات المئوية. عندئذٍ سيؤدي الضغط الناتج من تصادم كل الجسيمات الساخنة وارتدادها في مختلف أنحاء لُب النجم إلى منعه من الانهيار. تُعَد هذه طريقة ممتازة لولادة نجم ساطع، وعلماء الفلك متيقنون من أن هذه بالفعل هي الكيفية التي وُلدت بها الشمس والنجوم. لكن طومسون تقدَّم خطوةً عن ذلك. فقد أدرك أن النجم حالما تشكَّل في هيئة كرة متوهجة من الغاز، فسيبدأ في الانكماش إذا برد قليلًا. لكن ذلك الانكماش سيُطلِق مزيدًا من طاقة الجاذبية، فيُسخنه مجددًا. وحسَب أن الشمس إذا كانت تنكمش بمعدل ٥٠ مترًا في السنة — علمًا بأن هذا الرقم كان أصغر بكثير من أن يستطيع علماء الفلك في القرن التاسع عشر قياسه — فستظل ساطعة بتوهج ثابت. لكن إلى متى؟

كان طومسون قد أجرى قبل ذلك حِسبةً قائمة على الطاقة المخزنة في سحابة منتشرة من الغاز ذات كتلة مكافئة لكتلة الشمس، وقدَّر بها أن طاقة الجاذبية المتاحة كافية للحفاظ على سطوع الشمس لبضع عشرات الملايين من السنين فقط، واستنتج أنه «من المرجح عمومًا أن الشمس لا تضيء الأرض منذ ١٠٠ مليون سنة ... أمَّا بخصوص المستقبل، فلنا أن نقول بيقينٍ مماثل إنَّ سكان الأرض لن يظلوا مستمتعين بالضوء والحرارة اللازمين لحياتهم لملايين عديدة من السنين القادمة، إلَّا إذا كان مخزن الكون الكبير يشهد تحضير مصادر طاقة غير معروفة لنا الآن.» ومع أنه لم يقصد ذلك، فقد

تبيَّن أن هذا التعليق يحمل قدرةً لافتة على التنبؤ بالغيب. فعندما نتأمل الماضي بعدما صرنا نعرف ما كان مجهولًا آنذاك، نرى أن الصراع بين النطاق الزمني الذي اقترحه الفلكيون والنطاق الزمني اللازم للعمليات الجيولوجية والتطور كانا يخبرانا بالفعل بحتمية وجود مصادر طاقة كانت غير معروفة للعلم في العصر الفيكتوري. ولكن ظلَّت هذه تبدو فكرة سخيفة للفيزيائيين في القرن التاسع عشر، عندما توصل كلفن إلى تقديره النهائي لعمر الشمس، آخذًا في حسبانه فكرة حدوث انكماش بطيء، وقائلًا إنه يبلغ ٢٤ مليون سنة. وقد توصل الفيزيائي الألماني هرمان هلمهولتز إلى النتيجة نفسها بمعزلٍ عن كلفن، وصارت معروفة الآن لعلماء الفلك باسم «نطاق كلفن–هيلمهولتز الزمني» للانهيار النجمي.

وقبل أن أخبرك بمصدر الطاقة الذي لم يكن معروفًا للعلم في القرن التاسع عشر (والذي ربما تكون قد خمنته بنفسك الآن، على أي حال)، وتأثيره في عمر الشمس، ينبغي النظر إلى مدى كثرة (أو يُمكن القول، من منظور آخر، مدى قلة) الطاقة اللازمة بالفعل للحفاظ على سطوع الشمس. أستمدُّ هنا تشبيهي التوضيحي المُفضل من كتاب لجورج جامو بعنوان «نجم اسمه الشمس» نُشر في عام ١٩٦٤. إذ استهل جاموف كلامه مُطالبًا قُراءه بتخمين الوقت الذي سيستغرقه إيصال وعاء من القهوة إلى الغليان إذا كان كل سنتيمتر مكعب من السائل في الوعاء يولِّد حرارة بنفسِ متوسط مُعدل توليد الحرارة الناتجة من كل سنتيمتر مكعب من الشمس. وكانت إجابته المفاجئة أن وصول الوعاء إلى الغليان سيستغرق شهورًا. فالشمس ضخمة، ولحساب متوسط معدل تسرُّب الحرارة من سطحها، ستجد أن كل جرام من مادتها يُطلق أقل بقليل من نصفِ جزءٍ من ١٠ ملايين من السُّعر الحراري في كل ثانية. وهذا أقل بكثير من معدل تولُّد الحرارة من جسم الإنسان بفعلِ العمليات الكيميائية التي تجري فيه. المقصدُ الذي كان جاموف يرمي إليه هنا بالطبع أن معدل إنتاج الحرارة الشمسية ليس منتشرًا بالتساوي عبر كل أجزاء الشمس. فمعظم طاقة الشمس تُطلَق في حيزٍ صغير من حجمها عند لُبِّها، في حين أن المنطقة الخارجية الأكبر حجمًا بكثير لا تشهد إطلاق أي طاقة. وقد ظهرت التلميحات الأولى إلى مصدر الطاقة المحتمل هذا في تسعينيات القرن التاسع عشر، وتحديدًا حينما كان كلفن يضع اللمسات الأخيرة على فرضيته (هو وهلمهولتز) المتعلقة بعُمر الشمس.

اكتشف الألماني فيلهلم رونتجن الأشعة السينية بالصدفة في عام ١٨٩٥ حين كان يُجري تجارب على الكهرباء (علمًا بأن الاكتشاف أُعلن في ١ يناير ١٨٩٦). ومع أن ذلك

الاكتشاف كان فارقًا، فإنه لم يتطلب أي مصدر طاقة جديد؛ لأن الطاقة استُمدت من حزم «أشعة الكاثود» (أو الإلكترونات) المُستخدمة في التجارب. ولكن عندما كان الفرنسي هنري بيكريل يواصل تلك الدراسة في فبراير ١٨٩٦، اكتشف أن بعض أشكال الإشعاع انبعثت من مواد معينة، من بينها بعض مركبات اليورانيوم، حتى عندما كانت ملفوفة بورق أسود سميك ومعزولة عن أي مصدر طاقة خارجي. فقد اخترق هذا الإشعاع المُكتشف حديثًا الورقَ وترك بصمته على ألواح تصوير فوتوغرافي. وبعد اكتشاف بيكريل، بدأت ماري كوري وزوجها بيير دراسة النشاط الإشعاعي، كما صار معروفًا، واكتشفا عنصرين مُشعين «جديدين»؛ البولونيوم والراديوم، قبل نهاية القرن. وبحلول عام ١٩٠٣، أجرى بيير كوري ومساعده ألبرت لابورد عمليات قياس دقيقة لكمية الحرارة المنبعثة من الراديوم. وقد أذهلت الكمية الناتجة زملاءهما. إذ تبيَّن أن جرامًا واحدًا من الراديوم يُنتج حرارة كافية لرفع درجة حرارة ١,٣ جرام من الماء من درجة التجمد إلى درجة الغليان في ساعة واحدة؛ وأنه يفعل ذلك ساعة تلو الأخرى، دون أي علامة على التوقف. ولكن ما هو مصدر الطاقة الذي كان يولد تلك الحرارة؟

اقترح عالم الفلك الإنجليزي ويليام ويلسون في عام ١٩٠٣، حتى من دون أن يعرف ماهية مصدر الطاقة، أن النشاط الإشعاعي قد يكون مصدرًا يُمِد الشمس بالحرارة؛ ويمكنك هنا أن تستنتج من تشبيه وعاء القهوة، الذي طرحه جاموف، مقدار الراديوم القليل الذي يلزم وجوده منتشرًا عبر حجم الشمس للحفاظ على حرارتها. حسَب ويلسون أن كل الكمية اللازمة هي ٣,٦ جرامات من الراديوم في كل متر مكعب من حجم الشمس. وقد أخذ جورج داروين (أحد أبناء تشارلز داروين) هذه الفكرة، واقترح أن هذا ربما يحل التضارب بين النطاق الزمني المستند إلى عملية التطور والنطاق الزمني الذي اقترحه علماء الفلك. صحيح أنه كان مخطئًا في ذلك، لكن اقتراحه أشار إلى الاتجاه الصحيح (وبالمناسبة، يُسهِم التسخين المستمد من النشاط الإشعاعي في تفسير سبب استمرار سخونة باطن الأرض فترة طويلة بعد تشكُّل الكوكب، وهذا يشير إلى أن عمر الأرض أكبر بكثير ممَّا حسبه فوريه). وبحلول عام ١٩٠٤، أظهر الفيزيائي النيوزيلندي المولد إرنست رذرفورد وبعض زملائه أن الطاقة تُطلَق عند تحوُّل ذرات عنصرٍ ما إلى ذرات عنصر آخر، مع انبعاث جسيمات في هذه العملية. يُعرف هذا باسم التحلل الإشعاعي. وفي الواقع، يتوقف الراديوم عن إطلاق الطاقة عندما تُستهلك كل ذراته هكذا، لكن ذلك يستغرق زمنًا طويلًا جدًّا.

أشار رذرفورد، في عرض تقديمي له ذلك العام أمام المعهد الملكي في لندن، إلى أن التسخين المستمد من النشاط الإشعاعي يُمكن أن يكون هو «مصادر الطاقة غير المعروفة لنا الآن» التي أشار إليها كلفن قبل ذلك بعقود. وقد أسعد ذلك كلفن، الذي كان حاضرًا آنذاك. لكن رذرفورد لم يُصِب سوى جزء من الحقيقة فقط. وبعد ذلك بعام واحد، كان أول من اتخذ الخطوة الأولى نحو الفهم الصحيح لأسباب احتفاظ الشمس بحرارتها فيزيائيٌّ شاب يعمل في سويسرا؛ وهو ألبرت أينشتاين.

لم يخطر ببال أينشتاين إطلاقًا أنه كان يحل لغز عمر الشمس حين توصل إلى نظريته الخاصة للنسبية في عام ١٩٠٥. فالنظرية الخاصة هي التي تمنحنا المعادلة الأشهر في كل العلوم: $E = mc^2$. وتخبرنا هذه المعادلة بأن المادة (التي يرمز m إلى كتلتها) تُعد شكلًا من أشكال الطاقة (E)، وأنه يمكن تحويل كلٍّ من المادة والطاقة إلى الأخرى. ولأن سرعة الضوء (c) تساوي رقمًا هائلًا، فإن الكتلة الصغيرة تكافئ كمية كبيرة من الطاقة. ففي التحلل الإشعاعي، نجد أن ذرةَ مادةٍ كالراديوم تبعث جسيمًا أو أكثر وتتحول إلى ذرة عنصر آخر. وعندئذٍ يكون مجموع كتلة الذرة المتبقية والجسيمات المنبعثة أقل بقليل من كتلة الذرة الأصلية، وتظهر الكتلة «المفقودة» في شكل طاقة الحركة لدى الجسيمات، وتتجلى في شكل حرارة. لكن لُب الشمس يشهد عملية مختلفة تنطوي أيضًا على تحويل الكتلة إلى طاقة.

استغرق علماء الفيزياء الفلكية أكثر من ٣٠ عامًا[١] كي يتوصلوا إلى الآلية الدقيقة التي يُسفر بها تحوُّل الكتلة إلى طاقة عن الحرارة اللازمة للحفاظ على سطوع الشمس، لكن العملية تتضمن اندماج ذرات الهيدروجين (أو نواه بالأحرى) معًا لتكوين ذرات (أو أنوية) هيليوم. إذ «تتكون» كل نواة هيليوم من أربع أنوية هيدروجين، وتُعَد كتلة نواة الهيليوم أقل بقليل من مجموع كتل أربع أنوية هيدروجين مفردة، بينما تُطلَق الكتلة الزائدة في شكلِ طاقة تحافظ على سخونة لُب الشمس. ويوجد ما يكفي من الهيدروجين في الشمس للحفاظ على استمرارية هذه العملية نحو ١٠ مليارات سنة، وهذا وقت كافٍ وزيادة لتأخذ عملية التطور مجراها. ولكن بناءً على هذا الدليل وحده، فإنَّ عمر الشمس ربما يبلغ مليار سنة، أو تسعة مليارات، أو أيَّ رقمٍ يتراوح بينهما. يتضح هنا مجددًا أن النشاط الإشعاعي يتيح خيطًا يرشدنا إلى عمرها الفعلي.

[١] كما أوضحتُ في كتابي «سبعة أعمدة للعلم».

فكل مادة مشعة «تتحلل» إلى ما يُعرَف بـ «نواتجها المتولِّدة منها» بمعدلٍ منتظم بمرور الزمن. صحيح أن بعض العناصر المشعة عمرها قصير جدًّا، وتكاد تتلاشى بسرعة كنفخةِ دخان حرفيًّا. لكن البعض الآخر عمره طويل جدًّا يصل إلى مليارات السنين. ويمكن معرفة تلك المعدلات من دراسة التحلل الإشعاعي في المختبر، دون انتظار مليارات السنين. تُمثِّل هذه الآلية أساسَ عمليةِ تحديد تاريخ الصخور بناء على نشاطها الإشعاعي. فإذا بدأتَ بعينة خالصة من عنصر مشع معين، كاليورانيوم مثلًا، فستجد أن الذرات تتحول بوتيرة ثابتة إلى ذرات عنصر آخر، وهو الرصاص في هذه الحالة؛ وفي الواقع، توصَّل الكيميائي الأمريكي برترام بولتوود في أوائل القرن العشرين إلى أن اليورانيوم يتحلل إلى الراديوم أولًا، ثم يتحلل الراديوم إلى رصاص، لكن المبدأ واحد. وهكذا ستنخفض نسبة اليورانيوم وترتفع نسبة الرصاص بمرور الزمن. لذلك فإذا صادفت صخرة تحتوي على يورانيوم ورصاص، فيمكنك حساب عمرها بقياس نِسبة كل عنصر منهما. تجدر الإشارة هنا إلى أن آرثر هولمز هو من أسس هذه الطريقة، وذلك في إنجلترا إبان العقدَين الأولَين من القرن العشرين. على أي حال، تبيَّن أن أقدم الصخور الموجودة على كوكب الأرض هي تلك التي كانت نيازك؛ أي كُتلًا صخرية هبطت من الفضاء بعدما تبقَّت من ميلاد المجموعة الشمسية. وتوضح لنا تقنية التأريخ هذه، باستخدام قياسات نِسَب الروبيديوم المشع وعنصر السترونشيوم المتولد منه، أن أقدم هذه الصخور الفضائية تشكَّلت منذ نحو ٤٫٥ مليارات سنة. لذا صرنا نعلم أن عمر المجموعة الشمسية، بما فيها الأرض والشمس، يبلغ نحو ٤٫٥ مليارات سنة، وقد استهلكت الشمس نحو نصف إمداداتها من الوقود النووي حتى الآن.

تبدو هذه إجابة مُقنعة عن سؤال «كم عمر الشمس؟»؛ لكنها مبنية على أسس معادلة أينشتاين الشهيرة. وهذا ما دفع أحد سائليَّ إلى طرح السؤال التالي: «كيف نعرف أن أينشتاين كان محقًّا؟»

السؤال الرابع

# كيف نعرف أن أينشتاين كان على صواب؟

اكتشاف أينشتاين أن الكتلة والطاقة قابلتان للتحول فيما بينهما كان مُستمَدًّا من نظريته الخاصة للنسبية، التي نُشرت عام ١٩٠٥. وتُعَد النظرية «خاصة» بمعنى أنها حالة خاصة لأنها لا تتعامل إلا مع سلوك الأشياء التي تتحرك في خطوط مستقيمة بسرعة ثابتة (أي بسرعة متجهة ثابتة) بعضها بالنسبة إلى بعض. غير أن معادلة أينشتاين الشهيرة لا تظهر في تلك الورقة البحثية بالفعل، لأنه لم يُدرك هذا المعنى الضمني لنظريته إلا بعدما أرسل تلك الورقة لتُنشر. لذا ظهرت المعادلة أولًا، بصيغة مختلفة قليلًا، في ورقة بحثية أخرى نُشرت لاحقًا في العام نفسه، وهي بمثابة حاشية، أو خاتمة، للورقة الأولى. وقد وصف أينشتاين كيف خطرت الفكرة بباله في رسالة إلى صديقه كونراد هابيشت بتاريخ سبتمبر ١٩٠٥:

> خطرت ببالي أيضًا نتيجة أخرى لورقة الديناميكا الكهربائية. وهي أن مبدأ النسبية، ومعادلات ماكسويل [المعنية بالظاهرة الكهرومغناطيسية]، يستلزمان أن تكون الكتلة مقياسًا مباشرًا للطاقة الكامنة في الجسم. فالضوء يحمل كتلة معه. وفي حالة الراديوم، يُفترض أن تشهد الكتلة انخفاضًا ملحوظًا. الفكرة مسلية ومغرية.

وعلى حد تعبيره في الورقة المنشورة، «كتلة الجسم مقياس للطاقة التي يحويها».

والعكس أيضًا صحيح. فالشمس تبقى ساخنة بتحويل الكتلة إلى أشكال أخرى من الطاقة، ولكن يُمكن تحويل أشكال أخرى من الطاقة إلى كتلة. فإذا ركلت كرة ما، فستجد أن معظم الطاقة الزائدة يُخصص لزيادة سرعة الكرة، ولكن ثمة قدرًا ضئيلًا يُخصص لزيادة كتلتها قليلًا. وفي حالة الأشياء التي تتحرك بوتيرة أبطأ بكثير من سرعة

الضوء، تكون الزيادة في الكتلة أصغر بكثير من أن نلاحظها. ولكن إذا كان أينشتاين محقًّا، فسنجد أن ميزان توزيع الطاقة يتغير في حالة الأجسام التي تتحرك بسرعة مكافئة لجزء كبير من سرعة الضوء. ومن ثم، إذا ركلت جسمًا كهذا، فستجد أن كمية كبيرة من الطاقة الزائدة تُخصص لزيادة كتلته، بينما ستُخصص نسبةٌ أقل لزيادة سرعته؛ ولذا فلن يتسارع إلا بمقدار ضئيل. كل هذا نشأ من النظرية الخاصة.

ثم مرت ١٠ سنوات أخرى قبل أن يتوصل أينشتاين إلى نظرية أعم تتناول سلوك الأجسام المتسارعة، بما في ذلك التسارع الناشئ من الجاذبية[١] الذي يُعد مهمًّا جدًّا للنظرية. ومن المنطقي جدًّا أن هذه صارت تُعرَف بالنظرية العامة للنسبية، وهي تشمل النظرية الخاصة بين طياتها؛ لذا فأي دليل على صحة النظرية العامة يُعَد كذلك دليلًا على صحة النظرية الخاصة. تجدر الإشارة إلى أن كلمة «الخاصة» أو «العامة» عائدة على النظرية نفسها، وليس النسبية؛ لذا لا يصح إطلاقًا أن نقول «نظرية النسبية الخاصة» أو «نظرية النسبية العامة».

قبل ظهور أينشتاين، كانت أفضل نظرية متاحة لدى الفيزيائيين عن الجاذبية هي تلك التي وضعها إسحاق نيوتن في القرن السابع عشر. لكنهم كانوا يعرفون أن نظرية نيوتن ليست مثالية؛ لأنها كانت عاجزة عن تفسير تفصيلةٍ شاذة بخصوص مدار كوكب عطارد حول الشمس. فمدار المريخ مثلًا، كحال مدارات الكواكب الأخرى في المجموعة الشمسية، يتخذ شكل قطعٍ ناقص توجد الشمس عند إحدى بؤرتيه. صحيح أنه يكاد يبدو دائريًّا تمامًا، ولكن إذا تخيلت أنك ضخَّمت شكله، فسيبدو كبتلة واحدة في رسمة مُبسطة لزهرة الأقحوان. ولكن كلما يدور عطارد حول الشمس، ينزاح مداره إلى الجانب قليلًا، كأنه ينزلق منتقلًا من إحدى بتلات زهرة أقحوان إلى البتلة المجاورة. يُسمَّى هذا الانزلاق بالانزياح في الحضيض الشمسي للمدار، ومع أنه ضئيل للغاية، لا يمكن تفسيره بنظرية نيوتن. وقد تكهَّن بعض علماء الفلك بأن هذا الانزياح قد يكون ناتجًا من وجود كوكب داخل مدار عطارد يؤثر فيه بقوى جذب، لكنهم لم يجدوا أي أثر لكوكب كهذا. غير أن النظرية التي وضعها أينشتاين في عام ١٩١٥ تنبأت بمقدار التأثير المَقيس بالضبط. قال في رسالة إلى أحد زملائه إنه شعَر «بحماسة مُبهجة بالغة» حين حسَب الحسبة، وقال

[١] يمكن أن يعني التسارع تغييرًا في السرعة أو تغييرًا في الاتجاه أو كليهما. لذا فالقمر الصناعي الموجود في مدار حول الأرض مثلًا يتسارع بفعل الجاذبية لأنه يغير اتجاهه باستمرار، حتى وإن لم تتغير سرعته.

لآخر إنَّ «نتائج حركة الحضيض الشمسي لعطارد تملؤني برضًا جامح».[٢] لكن الإبهار الناتج من تفسير شيءٍ مُكتشف بالفعل لا يضاهي أبدًا الإبهار الناتج من التنبؤ بشيء لا يُكتشف إلَّا لاحقًا. وقد كان هذا هو الدليل التالي (والأشهر) على صحة النظرية العامة.

كان أينشتاين قد طَرَح تفسيره لانزياح الحضيض الشمسي لعطارد (علمًا بأنه كان مجرد تفسير وليس تنبؤًا حقيقيًّا) في محاضرة ألقاها في الأكاديمية البروسية للعلوم في نوفمبر عام ١٩١٥.[٣] لكنه طرح تنبؤًا حقيقيًّا في المحاضرة نفسها(!). كانت نظرية نيوتن تتنبأ بأن الضوء الذي يمر قُرب الشمس سينحني بفعل جاذبية الشمس؛ وقد اتفقت معها معادلات أينشتاين في أن الضوء سينحني بالفعل، لكنه تنبأ بأن التأثير أكبر مرتين من ذلك الذي توقعَته نظرية نيوتن. وبذلك كانت هذه طريقة لإجراء مقارنة مباشرة بين تنبؤات النظريتَين، لو كان العلماء لديهم طريقة متاحة لقياس مقدار انحناء الضوء القادم من نجم بعيد عندما يمر بحافة الشمس. ومن حُسن الحظ، كانت لديهم طريقة كهذه بالفعل.

عادةً ما يستحيل رؤية الضوء القادم من نجم بعيد عند مروره قُرب حافة الشمس، أو تصويره، وذلك بسبب وهج الشمس نفسها. ولكن أثناء كسوف الشمس، أي عندما يحجب القمر ضوء الشمس، تصبح النجوم التي تبدو قريبةً من الشمس في السماء (لكنها بالطبع تكون بعيدة جدًّا عنها في الواقع) مرئيةً ويمكن تصويرها. ومن حسن الحظ الشديد، حدث كسوف شمسي في مايو ١٩١٩، ولم يَكُن لدى البريطانيين آنذاك بعد نهاية القتال أثناء الحرب العالمية الأولى سوى وقتٍ كافٍ بالكاد لينظموا بعثتَين لرصد الكسوف: إحداهما من البرازيل والأخرى من جزيرة برينسيبي، قبالة ساحل أفريقيا الغربي شمال خط الاستواء مباشرة. ثم أمكَن بعدئذٍ مقارنة الصور الفوتوغرافية لنمط النجوم حول موقع الشمس في السماء بصورٍ سابقة التُقطَت للنجوم في الرُّقعة نفسها من السماء في الموسم المعاكس (في شهر نوفمبر تقريبًا)، عندما كانت الشمس في الجانب المعاكس من الأرض؛ لذا كانت هذه النجوم في سماء الليل آنذاك. أظهرت المقارنة أن النجوم الأقرب إلى

---

[٢] نقلًا عن كتاب «أينشتاين: حياته وكونه»، تأليف والتر إيزاكسون، عن دار نشر سايمون وشوستر، في عام ٢٠٠٧. كان هذا دليلًا باهرًا على صحة كلام أينشتاين (أو بالأحرى صحة نظرية أينشتاين العامة.

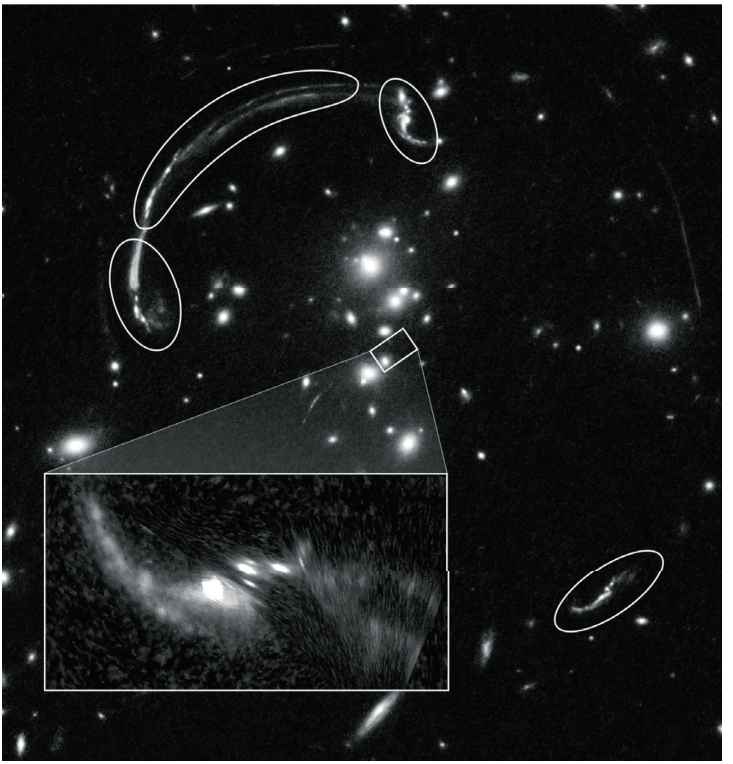
[٣] التفاصيل واردة في كتابي المعنوَن باسم «رائعة أينشتاين: ١٩١٥ والنظرية العامة للنسبية»، والصادر عن دار نشر آيكون في عام ٢٠١٥.

الشمس بدَت مُزاحةً قليلًا إلى الجانب وقت الكسوف؛ بسبب تأثير انحناء الضوء. وكان مقدار التأثير مشابهًا لِمَا توقعَته تنبؤات النظرية العامة، وليس تنبؤات نظرية نيوتن. أُعلنَت النتائج في اجتماع مشترك نُظِّم خصيصى بين الجمعية الملكية والجمعية الفلكية الملكية في لندن في نوفمبر ١٩١٩، وتصدرت العناوين الرئيسية في كل أنحاء العالم. ومن هنا بدأ أينشتاين يُعَد أشهر عالِم في العالَم.

ومنذ ذلك الحين، صارت ظاهرة انحناء الضوء أداة مهمة في علم الفلك لاستكشاف أبعد مدى للكون. وكلما كانت الكتلة أكبر، يمكن أن يشتد تأثير الانحناء؛ وتجدر الإشارة هنا إلى أن بعض أكبر تركيزات الكتلة في الكون تكمن في عناقيد المجرات؛ فبجانب احتواء العنقود المجري على النجوم الساطعة التي نراها، يمتلئ بـ «المادة المظلمة» التي يتجلى وجودها في تأثيراتها القائمة على قُوى الجاذبية. تعملُ هذه العناقيد كأنها عدسات ضخمة تُكبِّر الضوء القادم من أجسام أبعد، كمجرات مفردة مثلًا، وتُغير شكله؛ ولولاها لما رأينا تلك الأجسام السحيقة لأنها أبعد وأشد خفوتًا من أن تُرى باستخدام التلسكوبات الأرضية. ومن الأمثلة اللافتة على ذلك أن جاذبية عنقود مجري يُسمى RCS2 032727-132623 (علمًا بأن هذه الأرقام هي إحداثيات موقعه في السماء) أدت إلى انحناء الضوء القادم من مجرة أبعد بكثير وتضخيمه. وفي أوائل القرن الحادي والعشرين، حلَّل فريق من جامعة شيكاغو الصور الناتجة من ذلك الحدث؛ وقد ذكرت العديد من التقارير الرائجة عن هذا الاكتشاف أن تلك المجرة البعيدة تبعد نحو ١٠ مليارات سنة ضوئية عن الأرض، لكنها تقصد أن الضوء الذي نرى المجرة به انطلق منها قبل ١٠ مليارات سنة. وكما أوضحتُ في الإجابة عن السؤال الثاني، فهذه المجرة الآن أبعد من ذلك بكثير. لكن ذلك ليس مهمًّا في هذه الحالة. المهم أننا، بفضل عدسة الجاذبية، نستطيع رؤية مجرةٍ بحالتها التي كانت عليها في بدايات عُمر الكون، بعد أقل من أربعة مليارات سنة من الانفجار العظيم. وقد دُرست المجرة باستخدام التلسكوب الكبير جدًّا (أجل، هذا هو اسمه بالفعل) في تشيلي، وصُوِّرت بتلسكوب هابل الفضائي.

أكد مايكل جلادرز، أحد أعضاء فريق شيكاغو، أن «ما يحدث هنا هو أحد تجليات النسبية العامة [قيلت هكذا]؛ فبدلًا من رؤية الصورة العادية الخافتة لهذا المصدر البعيد، ترى صورًا مشوهة جدًّا ومُكبرة جدًّا للمصدر، ومتعددة أحيانًا كما في هذه الحالة، بسبب الكتلة ذات الجاذبية المتداخلة بيننا وبينه».

وباستخدام برنامج كمبيوتر «ألغى» التشوهات الناتجة من تأثير عدسة الجاذبية — ويقوم على فهم نظرية أينشتاين — أنشأ الفريق صورة للمجرة تُظهرها كيفما كانت



يُظهر هذا الرسم صورةً محاكية (في أسفل اليسار) تُعيد المجرة اللامعة إلى شكلها الأصلي بعدما تشوَّه بفعلِ جاذبية عنقود مجرِّي بعيد. ويُبين المستطيل الصغير الظاهر في الوسط موقعَ مجرة الخلفية في السماء لو لم يكن العنقود المجري المتداخل موجودًا. تُظهر الحدود المستديرة صورًا مشوهة ومميزة لمجرة الخلفية ناتجةً من تأثير العدسة الجاذبية بفعلِ الكتلة الموجودة في العنقود. وتُبين الصورة الظاهرة في أسفل اليسار الشكل الأصلي الذي كانت المجرة المشوهة ستظهر به لو لم يكن العنقود موجودًا، وذلك بناء على نموذجٍ لتوزيع كتلة العنقود مشتقٍّ من دراسة الصور المشوهة للمجرة. (وكالة ناسا، ووكالة الفضاء الأوروبية، وجيه ريجبي (من مركز جودارد لرحلات الفضاء التابع لوكالة ناسا)، وكيه شارون (من معهد كافلي للفيزياء الكونية في جامعة شيكاغو) وإم جلادرز وإي فويتس (من جامعة شيكاغو).)

ستبدو لو كان لدينا تلسكوب قوي بما يكفي لنراها مباشرة. وقد كشف ذلك عن مناطق تشهد (أو كانت تشهد) ولادة نجوم جديدة، إذ ظهرت في شكل نقاط ضوئية ساطعة.

وتتجلى هذه المناطق بسطوعٍ أشد من أيٍّ من مناطق تكوُّن النجوم في مجرتنا درب التبانة، ما يُحسِّن فهم علماء الفيزياء الفلكية لكيفية تكوُّن النجوم والمجرات. غير أن عدسة الجاذبية لا تقدم دليلًا على صحة نظرية أينشتاين فقط؛ بل صارت أداة معتادة لدى علماء الفلك الموقنين تمامًا بصحة معادلات أينشتاين بقدر يقين المرء من أن الشمس ستشرق كل يوم.

لذا فإنَّ أينشتاين أو (نظرية أينشتاين) على صواب بلا ريب. ولكن يوجد دليل أخير جميل يؤكد صحة أشهر معادلة في العلوم تأكيدًا مباشرًا. فالفيزيائيون يستطيعون بالفعل قياس مقدار الكتلة المكافئ لكمية معينة من الطاقة.

وقد اكتسبوا هذه القدرة من آلات ابتُكرت في ثلاثينيات القرن العشرين لفحص بنية المادة؛ وهي «مُسرِّعات الجسيمات» النموذجية الأصلية. فالنظرية (الخاصة أو العامة) للنسبية تصف سلوك الأشياء التي يتحرك بعضها بالنسبة إلى بعض؛ ومن هنا جاءت تسميتها. وفي المثال الذي أريد استخدامه هنا، يعني هذا أننا يحق لنا أن نعتبر أنفسنا ثابتين (أي «في إطار مرجعي ثابت» أو «في حالة سكون»، بمصطلحات الفيزيائيين) ونستخدم معادلات أينشتاين لوصف سلوك جسيمات سريعة الحركة في المختبرات هنا على كوكب الأرض. ومن أمثلة هذه الجسيمات السريعة الحركة الإلكتروناتُ والبروتونات، التي تحمل شحنة كهربائية؛ لذا يُمكن التلاعب بها باستخدام مجالات كهربائية ومغناطيسية، ومن أمثلة هذه المختبرات مختبر فيرمي لاب في شيكاغو، والمنظمة الأوروبية للأبحاث النووية (سيرن) في جنيف.

كانت أولى مُسرعات الجسيمات عبارة عن أنابيب مستقيمة تحوي داخلها فراغًا، حيث كانت الجسيمات تُسرَّع بطولِ هذا الفراغ. وكانت الجسيمات السريعة الحركة توجَّه آنذاك نحو أهداف مصنوعة من مواد مختلفة، فتُطلِق تفاعلات تكشف عن تفاصيل بنية النوى الذرية. وكلما كان الجسم أسرع كان ذلك أفضل في هذه الحالة، لأن الجسيمات الأسرع تحمل طاقة أكبر وتُحدث تأثيرًا أكبر في الأهداف التي تصطدم بها. لكن هذه المسرعات الطولية كانت مشوبة بعيبٍ قاتل لأن سرعة الجسيمات كانت محدودة بطول الأنبوب الذي كانت تُدفَع بطوله بفعلِ مجالاتٍ كهرومغناطيسية. وللتغلب على هذه المشكلة، اخترع إرنست لورانس، الذي كان يعمل في جامعة كاليفورنيا في بيركلي، في بداية ثلاثينيات القرن الماضي نوعًا جديدًا من مسرعات الجسيمات صار يُعرف باسم السيكلوترون (أو المسرع الدوراني). وكما يوحي الاسم، يُسرع السيكلوترون الجسيمات

المشحونة حول مسار منحنٍ؛ ليس دائريًّا بالضبط، لكنه خارجٌ من مركز غرفة فراغ أسطوانية مسطحة، فتتبع الجسيمات مسارًا حلزونيًّا إلى أن تخرج في شكل حزمةٍ قوية من نقطةٍ قُرب الحافة الخارجية للغرفة. تبقى الجسيمات في هذا المسار الحلزوني بفعل مجال مغناطيسي ثابت، وتُسرع بمجال كهربائي متغير يُضبَط ليمنحها دفعة واحدة كلما أكملت لفة. وهذا يُتيح تسريع الجسيمات إلى طاقات أعلى ممَّا يُحققها المسرع الطولي لأنها تلف عدة مرات.

يُعرَف المعدل الذي يلف به الجسيم (دائرًا في مجال مغناطيسي عمودي عليه)، ويتلقى به كل دَفعة، باسم تردُّد السيكلوترون؛ وهو يعتمد على شحنة الجسيم وكتلته وقوة المجال المغناطيسي. ومن المدهش نوعًا ما أن تردُّد دوران كتلةٍ معينة من الجسيمات يبقى ثابتًا أثناء دورانها في مدار حلزوني ممتد إلى الخارج، لأن الجسيمات تتحرك بسرعة أكبر لمسافة أطول حول دائرة أوسع. لذا فإن تردد الدَّفعة التي يمنحها المجال الكهربائي يبقى ثابتًا ويستمر الشعاع في التسارع. لكن هذا يحدُّ من السرعة التي يمكن أن تصل إليها الجسيمات. فحالما تتحرك بسرعة تكافئ جزءًا كبيرًا من سرعة الضوء، فإنَّ الطاقة الزائدة التي تتلقاها من كل دَفعة من المجال الكهربائي لا تُستهلك في زيادة سرعتها هكذا ببساطة، بل تُضخم كتلتها. لكن تردد السيكلوترون يعتمد على الكتلة؛ لذا تُصبح الجسيمات غير متماشية مع المجال الكهربائي المتغير. وهذا مؤسف لأن السرعة عندئذٍ تصير غيرَ قابلة للزيادة، لكن الكتلة الزائدة مقياس لمقدار الطاقة الإضافية التي تحملها الجسيمات؛ لذا فحتى لو لم تزدَد السرعة كثيرًا، تُحدث الجسيمات تأثيرًا أقوى عند اصطدامها بالهدف، وهذا هو ما يريده المُجرِّبون. أو بالأحرى ستُحدث تأثيرًا أقوى، بشرط أن توجد طريقة لمواصلة تسريعها مع ازدياد كتلتها. وقد كانت هذه هي الحيلة التالية التي توصل إليها المُجرِّبون.

فبحلول أواخر ثلاثينيات القرن الماضي، كانت السيكلوترونات قد بدأت تصل إلى أقصى حدٍّ من الطاقة تستطيع أن تضيفه إلى حزم الجسيمات. فحين وصلت الجسيمات إلى سرعات نسبية مقاربة لسرعة الضوء وزادت كتلتها الفعلية، كان لا بد من تغيير تردد السيكلوترون ليواصل دَفع الجسيمات ما دام يستخدم المجال الكهربائي نفسه. كانت إحدى طرق حل هذه المشكلة تقليل التردد الذي يدفع به المجالُ الجسيماتِ حول الحلقة تزامنًا مع تحرُّكها في المسار الحلزوني نحو الخارج وازدياد كتلتها، وذلك لإبقائه متزامنًا مع التردد المداري المتغير للجسيمات في الحلقة. قامت على هذا المبدأ آلاتٌ جديدة كان

أولها السنكروسيكلروترون (أو المُسرع الدوراني التزامني) الذي ابتكره فريق لورانس في عام ١٩٤٦. وكانت هذه أقوى مُسرعات إبان خمسينيات القرن العشرين. صحيح أن تصميمات أخرى حلت محلها منذ ذلك الحين، لكن المهم هنا أن التعديلات اللازم إجراؤها على تردُّد المجال الكهربائي ليبقى متزامنًا مع الجسيمات مع ازدياد كتلتها تتماشى تمامًا مع ازدياد الكتلة الذي تنبأت به معادلات أينشتاين. لذا فلا شك إطلاقًا في أن أينشتاين كان محقًّا، وأن E تساوي $mc^2$ بالفعل؛ وهذا عامل رئيسي في الإجابة عن السؤال التالي.

السؤال الخامس

# ممَّ نشأ كل شيء؟

يجب أن أوضح المقصد المحدد من هذا السؤال. فمن السياق العام، كانت سائلته تقصد: «ممَّ نشأ كوكب الأرض وكل شيء فيه؟» لذا هذا هو السؤال الذي سأحاول إجابته من أجلها. وللإجابة، سأبدأ من الدليل الكوني الراسخ على أن الانفجار العظيم أنتج خليطًا مكونًا من الهيدروجين بنسبة ٧٥٪ والهيليوم بنسبة ٢٥٪ نشأت منه النجوم الأولى.[١] لذا فالجزء الأول من الإجابة يتعلق بأصل كل العناصر الكيميائية الأخرى التي تتكون منها أشياء كالكواكب مثلًا.

كما أوضحت في الإجابة عن السؤال الثالث، فإن نجمًا كالشمس يبقى ساخنًا بتحويل الهيدروجين إلى هيليوم في لُبه. صحيح أن هذه عملية متعددة المراحل، لكنها في كل مرة تُسفر عن تحول أربعة بروتونات (أنوية هيدروجينية) إلى نواة هيليوم واحدة تتكون من بروتونَين ونيوترونَين. ولأسباب واضحة، تُسمى هذه النواة «الهيليوم-٤». تتشابه النيوترونات مع البروتونات في الكتلة، لكنها لا تحمل شحنة كهربائية. أمَّا البروتونات، فهي موجبة الشحنة؛ وفي عملية تكوين الهيليوم، يُتخلص من الشحنة الزائدة في شكل بوزيترونات، التي تُعَد إلكترونات موجبة الشحنة. وإجمالًا، عندما تتحد أربع أنوية هيدروجينية لتكوين نواة هيليوم واحدة، يخرج ما يزيد قليلًا على ٠٫٧٪ من كتلة البروتونات الأربعة الأصلية في شكل طاقة.

تتسم نواة الهيليوم تحديدًا باستقرار شديد وتُعرَف أيضًا باسم جُسيم ألفا. وبذلك فإن هذا يُمثِّل نهاية الشمس والنجوم الأخرى التي تكاد تضاهي كتلة الشمس. فعند

---

[١] طالِع كتاب إيان موريسون «مقدمة في علم الفلك وعلم الكونيات» لمعرفة التفاصيل الأساسية.

تحويل كل الهيدروجين المتاح إلى هيليوم، يبرُد النجم إلى جمرة نجمية مطفأة تُعرف باسم القزم الأبيض. ولكن في النجوم التي تزيد كتلتها على الشمس بضع مرات، يتقلص النجم قليلًا عند استهلاك الهيدروجين، ويزداد سخونة بفضل تأثير كلفن-هيلمهولتز، وعندئذٍ يُسفر الضغط الداخلي عن تفاعلات أخرى قائمة على تكوُّن مزيد من العناصر باندماج جُسيمات ألفا بعضها مع بعض ومع أنوية تتزايد تعقيدًا. وكل خطوة من هذه العملية تُطلق طاقة وتحافظ على سخونة النجم؛ إلى حد ما.

يُفترَض أن النواة الأولى التي يُمكن أن تتكون من اندماج جسيمين من جُسيمات ألفا معًا هي البريليوم-٨، لكن هذه النواة غير مستقرة ولا تتراكم فترة طويلة داخل النجوم. ولكن من حُسن حظنا أن نواة البريليوم-٨ تستطيع خلال عمرها القصير أن تندمج مع جُسيم ألفا ثالث لتكوِّن نواة الكربون-١٢ المستقرة؛ لذا تُنتج النجوم كمية وفيرة من الكربون. ومن تلك اللحظة فصاعدًا، تُنتج عملية إضافة جُسيمات ألفا أنوية الأكسجين-١٦ والنيون-٢٠ والماغنسيوم-٢٤ والسيليكون-٢٨، إلى آخره. تجدر الإشارة هنا إلى أن أثقل العناصر التي يمكن إنتاجها بهذه الطريقة هي الحديد والنيكل، وإجبار الأنوية على الاندماج لتكوين عناصر أثقل من ذلك يستلزم كمية مُدخلة من الطاقة، كما سأوضح. وتُنتَج عناصر متوسطة الوزن بكمياتٍ أقل عندما تمتص هذه الأنوية الرئيسية جسيمات مفردة، كالبروتونات أو الإلكترونات، أو تُطلقها. لكن أحد هذه العناصر المتوسطة يُنتَج بوفرة نسبية. إذ تؤدي سلسلةٌ من تفاعلات الجسيمات تبدأ بالكربون إلى تحويل بعض أنوية الكربون إلى النيتروجين-١٥ المستقر.

ونتيجة لكل ذلك، وبغض النظر عن الهيليوم الذي لا يدخل في التفاعلات الكيميائية (على عكس التفاعلات النووية) فإن العناصر الأربعة الأكثر شيوعًا في المواد النجمية هي الهيدروجين والكربون والنيتروجين والأكسجين. وهذه أيضًا هي العناصر الأربعة الأكثر شيوعًا في الكائنات الحية؛ وهي مهمة جدًّا لعلم الأحياء لدرجة أنها يُشار إليها إجمالًا بالاختصار CHON (الأحرف الأولى من العناصر الأربعة المذكورة).[٢] وهكذا فمن الواضح أن الحياة تقوم على العناصر التي تتكون داخل النجوم؛ أي إننا غبار نجمي، على حد تعبير الأغنية. ولكن كيف تخرج هذه المواد النجمية من النجوم لتكوِّن الكواكب والناس؟

[٢] ينبغي ألا تفترض وجود أي دلالة باطنية خفية في ذلك. كل ما هنالك أن الحياة استخدمت أكثر المواد المتاحة شيوعًا، ليس أكثر.

رغم وجود مراحل سابقة في دورات حياة النجوم تتضمن تلميحات إلى ما سيحدث لاحقًا، فإنَّ القصة في الحقيقة تبدأ عند اللحظة التي يتوقف فيها إطلاق الطاقة من الاندماج النووي. غير أن المراحل المتقدمة في سلسلة الاندماج الذي يتضمن جسيمات ألفا لا تحدث إلا داخل النجوم التي تُعَد كتلتها أكبر من كتلة الشمس نحو ثماني مرات؛ ولذا توجد كميات هائلة من الكربون والأكسجين والنيتروجين في غبار النجوم. تمر النجوم التي تحمل كتلةً أكبر بضع مرات من كتلة الشمس بطورٍ يشهد تضخمًا هائلًا في سطحها الخارجي بفعلِ الحرارة المنبعثة من باطنها، وبذلك تتحول إلى ما يُعرَف باسم النجوم العملاقة الحمراء. وفي هذه المرحلة من حياة العملاق الأحمر، تُجرَف المادة من أعماقه الداخلية إلى سطحه. وعادة ما يُصبح قطره أكبر من قطر الشمس مئات المرات، وعند سطح نجمٍ كهذا، تصير قوى شد الجاذبية ضعيفة للغاية؛ لذا تهرب كمية كبيرة من مادته في شكل «رياح نجمية»، علمًا بأن هذه الرياح لا تحمل ذرات مفردة فقط، لكنها أيضًا تحمل جزيئات كأول أكسيد الكربون ومركبات أكثر تعقيدًا يتعرَّفها علماء الفلك باستخدام التحليل الطيفي. وبهذه الطريقة يمكن أن يفقد النجمُ من مادته كميةً تكافئ عُشر كتلته الشمسية كل ١٠٠٠ سنة؛ أي ما يعادل كتلة كوكب الأرض ٣٣ ألف مرة. لكن هذا مقدار ضئيل جدًّا بالنسبة إلى ما تنثره النجوم التي تبدأ حياتها بكتلة أكبر من كتلة الشمس بنحو ثماني مرات.

أمَّا ما يحدث بعدئذٍ، فيعتمد على مقدار الكتلة التي تتبقى عند استنفاد كل «الوقود» النووي. فالأقزام البيضاء المستقرة يجب أن تكون كتلتها أقل من كتلة الشمس بنحو ١٫٤ مرة لتحظى بشيخوخة مستقرة؛ وإذا كانت كتلتها أكبر من ذلك، فستنهار تحت ثقل وزنها، مُطلقةً كمية هائلة من طاقة الجاذبية. أمَّا إذا بدأ الجسم الأبيض بكتلة أقل قليلًا من هذا الحد الحرج، فإنه يمتص مزيدًا من المادة بقوة الشد القائمة على جاذبيته، خصوصًا إذا كان معه نجم مصاحب في مرحلة العملاق الأحمر، وعندئذٍ تزداد كتلته. وحالما تصل الكتلة إلى هذا الحد، ينهار النجم، وتُرسل الطاقة المنبعثة موجة اندماج تجتاح النجم أثناء انفجاره، فتُنتج كل العناصر وصولًا إلى الحديد (أو بالأحرى نظير الحديد-٥٦) وتنشرها في الفضاء الكامن بين النجوم. لا يتخلَّف شيء عن تلك العملية. ويُعرَف هذا الحَدَث باسم مستعر أعظم من النوع الأول. لكن حتى هذا يُعد متواضعًا بالنسبة إلى مصير نجمٍ ذي كتلة أكبر من كتلة الشمس نحو ١٥ مرة.

فهذه النجوم تمر بمراحل متتالية من الاحتراق النووي إلى أن تنتهيَ حياتها بلُبٍّ من الحديد (ذي حجم مكافئ لحجم الأرض ولكن بكتلة ككتلة الشمس) محاط بأغلفة

كقشور البصل، ومحتوٍ على عناصر كالسيليكون والكربون والأكسجين والهيليوم، وسط غِلاف جوي من الهيدروجين. وعند نفاد وقودها، ينهار اللب انهيارًا أقوى من انهيار القزم الأبيض، مكوِّنًا إما نجمًا نيوترونيًّا (ذا كتلة مكافئة لكتلة الشمس وحجمِ كرة قطرها نحو ١٠ كيلومترات) أو ثقبًا أسود. ومن ثم، يُرسل هذا دفقة من الطاقة نحو الخارج عبر الطبقات الخارجية. وتلك الطاقة تُكوِّن كل العناصر الأثقل من الحديد وتنشر مزيج العناصر خارجًا في الفضاء.[٣] وهذا الحدث يُعرَف بمستعر أعظم من النوع الثاني.

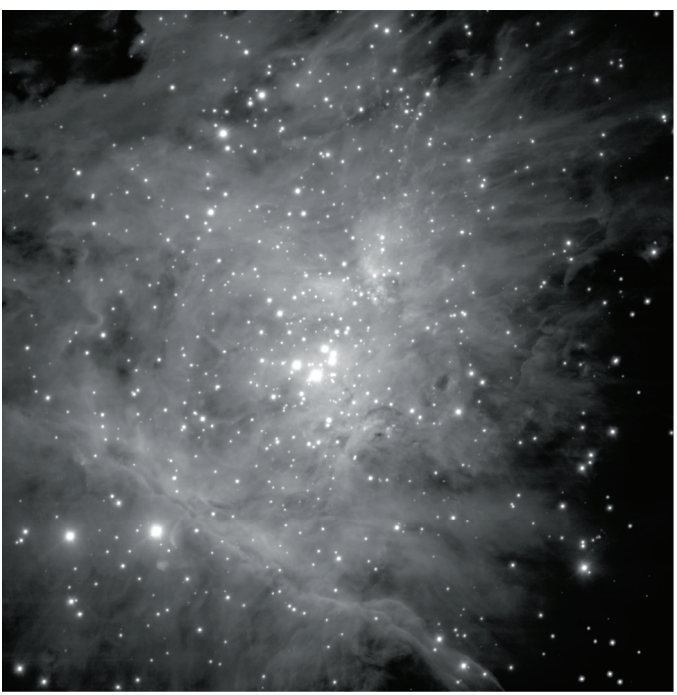
كل هذه العمليات تنشر عناصر أثقل من الهيليوم في الفضاء، فتنثر بذلك سُحُب الغاز (التي يبقى معظمها مكونًا من الهيدروجين والهيليوم) بين النجوم، وتتيح المادة الخام التي تتكون منها نجوم جديدة. لكن هذه عملية بطيئة جدًّا، بمعايير البشر. إذ يُقدر بعض علماء الفلك، بناءً على مجموعة متنوعة من الأدلة، أن مجرتنا درب التبانة تشهدُ تكثُّفَ مواد بكميةٍ تكافئ نحو عشر كتل شمسية لتكوِّن نجومًا جديدة في كل عام، وتحل محلها مواد مُعاد تدويرها من أجيال سابقة من النجوم. ولأن معظم النجوم أصغر حجمًا من الشمس بقليل، فهذا يعني أن من بين مئات مليارات النجوم في درب التبانة، يَبزُغ ما يتراوح بين ١٠ و٢٠ نجمًا جديدًا بالفعل في كل عام. لكن المجرة موجودة منذ ما لا يقل عن ١٠ مليارات سنة، وعلى مر تلك الفترة، تكوَّن أكثر من مائة مليار نجم بهذه الطريقة؛ أي حوالي ثُلث عدد النجوم الإجمالي في مجرتنا حاليًّا. أمَّا البقية، فتكونت فيما يُعرَف باسم نشاط «الانفجار النجمي» حين كانت المجرة صغيرة العمر؛ وقد تعرَّف بعض علماء الفلك مجراتٍ ذات انفجارات نجمية كهذه، كانت نشطة منذ فترة طويلة، عند مستويات عالية من الانزياح نحو الأحمر، وذلك برصدِ الضوء الذي انطلق منها بعد الانفجار العظيم ببضعة مليارات من السنين، كما ذكرتُ في الفصل السابق.

كل هذا يفسر المكان الذي نشأت فيه العناصر الكيميائية التي تتكون منها الأرض ونحن أنفسنا، وكيف انتشرت بين النجوم. ولكن كيف تلاقت بعض هذه المواد معًا لتُكوِّن مجموعتنا الشمسية؟

تُخبرنا الأدلة المستمدة من النشاط الإشعاعي بأن المجموعة الشمسية تكونت منذ أكثر بقليل من ٤٫٥ مليار سنة، عندما كان عمر مجرة درب التبانة لا يقل عن

[٣] تجدر الإشارة إلى أن بعض العناصر الثقيلة جدًّا تنبثق من أحداث أشد غرابة تتضمن تصادم ثقوب سوداء، ولكن لا داعي هنا إلى الاهتمام بالتفاصيل.

خمسة مليارات سنة، بناء على أدلة فلكية أخرى. لذا فبحلول ذلك الوقت، كانت توجد كمية وفيرة من «الغبار النجمي»، انتشرت بفعل الأجيال السابقة من النجوم العملاقة الحمراء والمستعرات العظمى، في سُحُب الغاز بين النجوم التي تكونت منها أنظمة جديدة. ولا تزال مثل هذه السُّحُب موجودة، ولا تزال تُكون نجومًا في الوقت الحاضر؛ لذا استطاع علماء الفلك دراسة تلك العملية بشيء من التفصيل، وذلك بالجمع بين عمليات الرصد التي رصدوا فيها أجسامًا مثل سديم الجبار، الذي يمثل إحدى مناطق تكوُّن النجوم في كوكبة الجبار، وفهمهم لقوانين الفيزياء. تبدأ العملية عندما تنضغط سحابة عرضها نحو ٢٠ فرسخًا فلكيًّا (أي ٦٥ سنة ضوئية تقريبًا) وتحوي مادة ذات كتلة تكافئ ثلث مليون كتلة شمسية، بفعلِ التفاعلات مع الأجسام المجاورة لها، التي ربما تتضمن انفجار مستعر أعظم قريبًا منها، فتبدأ الانهيار.



منطقة تكوُّن النجوم في كوكبة الجبار. (المرصد الأوروبي الجنوبي، مارك جيه ماكوركرن.)

وبحلول الوقت الذي انهارت فيه السحابة التي تكوَّنت فيها مجموعتنا الشمسية، كان معظمها لا يزال مكونًا من هيدروجين (بنسبة ٧٠٪) وهيليوم (بنسبة ٢٧٪)، مع أكسجين بنسبة ٠٫١٪ وكربون بنسبة ٠٫٣٪ ونيتروجين بنسبة ٠٫١٪ ومجرد نسبة ضئيلة جدًّا من عناصر أخرى. لكن كميةً كبيرة من المواد الأهم لم تكن موجودة في صورة غازية، بل كانت محبوسة في حُبيبات من الغبار والجليد، حاويةً داخلها جزيئات معقدة جدًّا.[٤] وأثناء انهيار السحابة العملاقة من الجزيئات، تفتَّتت وانقسمت إلى بقع تكونت داخلها نجوم مفردة، تمامًا كما نرى في كوكبة الجبار حاليًّا. ومن المرجَّح أن البقعة التي تكونت منها مجموعتنا الشمسية بدأت بكتلةٍ من المواد تضاهي كتلة الشمس مرتين تقريبًا. ومن المؤكد حتمًا أن بقعًا مفردة كهذه تدور، ومع انكماش بقعتنا، تسارعت وتيرة دورانها، كمتزلج على الجليد يدور ضامًّا ذراعيه إلى جسده. ثم بحلول الوقت الذي أصبح فيه مركز البقعة الذي تتزايد كتلته صغيرًا وساخنًا بما يكفي ليلمع بفعلِ تأثير كلفن-هيلمهولتز، كان محاطًا بقرص دوار من الغبار والغاز (ككعكة دونات)، بينما ظل النجم الأولي الواقع عند المركز يتنامى مع جذبه لمزيدٍ من المادة؛ وفي الوقت نفسه، كان الغاز البعيد عن النجم الوليد يُقذف إلى الفضاء بفعل سخونته المتزايدة. رُصدت أقراص كهذه حول العديد من النجوم الوليدة. ولكن بحلول الوقت الذي نما فيه النجم المركزي حتى وصل إلى حجم الشمس الحالي، كان كل الغاز الزائد قد تطاير بعيدًا، وكانت تفاعلات الاندماج النووي قد بدأت في باطنه، وكانت النسبة الضئيلة من المادة الغبارية المتبقية بعد زوال الغاز قد استقرت في شكل قرصٍ أقل سُمكًا، كحلقات زحل. وقد اعتمد مصير الأشياء الموجودة في ذلك القرص على المسافة التي كانت المادة تبعدها عن الشمس.

بالابتعاد تدريجيًّا عن الشمس، نجد أن لدينا أربعة كواكب صخرية صغيرة (عطارد والزهرة والأرض والمريخ)، ثم حزامًا من الحطام الصخري، وبعده أربعة كواكب غازية عملاقة (المشتري وزحل وأورانوس ونبتون)، ثم حزام من الحطام الجليدي، يضم داخله بلوتو، الذي كان يُصنَّف سابقًا على أنه كوكب، لكنه حتى ليس أضخم هذه الكتل الجليدية. ومن السهل شرح هذا الانفصال بين المادة الصخرية في الجزء الداخلي من المجموعة الشمسية والمادة الجليدية في الجزء الخارجي منها. فلو افتُرض وجود مادة جليدية بالقرب من الشمس حين كانت وليدة ساخنة، فمن المفترض أن تكون تلك المادة

[٤] أوضحتُ هذه السمات الكيميائية للفضاء الواقع بين النجوم في كتاب «سبعة أعمدة للعلم».

(التي لم تكن مقتصرة على جليد الماء، بل تضمنت مواد أخرى كالأمونيا المجمدة) قد تبخرت وأن الجزيئات قد قُذفت إلى مسافة أبعد عن النجم المركزي. ولكن بعد نقطة معينة، يُفترض أن درجة الحرارة صارت منخفضة بما يكفي لتظل كتل الجليد كما هي وتتراكم مكوِّنةً كواكب عملاقة. وهذه المنطقة الحرجة، التي يبدأ فيها انخفاض الحرارة بما يكفي ليبقى الجليد مستقرًّا، تقع بين مدارَي المريخ والمشتري ويسميها علماء الفلك خط الثلج. صحيح أن ما يحدث بعد خط الثلج باهرٌ بحد ذاته،[٥] لكنه ليس مهمًّا في سياق الحديث عن منشأ الأرض، باستثناء شيء واحد ربما كان يشغل بالك. إذا كان كل الجليد الموجود داخل خط الثلج قد تبخر وقُذف بعيدًا، فكيف تغطي المياه سطح الأرض في الوقت الحاضر؟ هذا لأن المذنبات، أي الأجسام الجليدية التي تزورنا من المناطق الخارجية في المجموعة الشمسية، حملت معها مياهًا ومواد متطايرة أخرى إلى الجزء الداخلي من المجموعة الشمسية بعد تكوُّن الكواكب، وقد ضربت بعض هذه المذنبات كوكب الأرض في بدايات عمره، فرسَّبت، ليس ماء فقط، بل مواد متطايرة أخرى وبعض الجزيئات المعقدة التي تعرَّف الباحثون وجودها في سُحُب الجزيئات على الكوكب الوليد (بما فيها سلائف الحياة).

أمَّا داخل خط الثلج، فتصادمت حبيبات الغبار في القرص وتلاصقت معًا، وأسفرت بذلك تدريجيًّا عن تكوين كتل كبيرة بما يكفي لتجذب كتلًا أخرى بفعل الجاذبية. وربما كانت تلك الحبيبيات بالأخص لزجة جدًّا لأن الحرارة الناتجة من النشاط الإشعاعي قد أذابت بعضها. وقد تبين أن بعض العينات المأخوذة من النيازك، وهي صخور متبقية من عملية بناء الكواكب، تحوي عناصر متولدة من عناصر شديدة النشاط الإشعاعي كانت هي نفسها قصيرة العمر، ولا بد أنها نتجت في انفجار مستعر أعظم قريب قبل تكوُّن الكواكب مباشرة. وبغض النظر عن تفاصيل الآلية، فإن سلائف الكواكب نَمَت بسرعة. وباستخدام محاكاة حاسوبية لهذه العملية، يقدر علماء الفلك أنه في غضون مليون سنة من وقت بزوغ ضوء الشمس، ربما كان يوجد ما يصل إلى ٣٠ كتلة صخرية كبيرة تدور حول الشمس في المنطقة الممتدة إلى مدار المريخ الحالي. وقد كان بعضها صغيرًا بحجم القمر (الذي يبلغ قطره ٢٧ في المائة من قطر الأرض) والبعض الآخر كبيرًا بحجم المريخ (الذي يبلغ قطره ٥٣ في المائة من قطر الأرض). كانت هذه الأجسام الكبيرة محاطة

[٥] كما أوضحت في كتاب «السبب: معجزة الحياة على الأرض».

بسرب من الأجسام الصغيرة لكنها جرفتها في سلسلة من التصادمات وتصادمت معًا، فاندمجت حتى بقيت خمسة أجسام كوكبية كبيرة فقط.

خمسة؟ ربما تظن أنني أخطأت، لكنني لم أخطئ. فإلى جانب كوكب عطارد الأولي وكوكب الزهرة الأولي والأرض الأولي والمريخ الأولي، لا بد أن المجموعة كانت تضم جسمًا آخر بحجم كوكب المريخ تقريبًا. وبفضل هذا الجسم الآخر أصبحنا موجودين الآن لنطرح أسئلة مثل «من أين أتينا؟»

إذا كنتَ قرأت كتابي «ثمانية احتمالات مستبعدة»، فستعرف إلامَ سيُفضي هذا الكلام. ولكن لِمَن لم يقرأه، فهاك ملخص موجز: كوكبنا مُتفرِّد في المجموعة الشمسية بأن لديه قمرًا ذا حجم يساوي ربع حجم الكوكب تقريبًا (من حيث القطر). لذا فلو نظر راصد غير متحيز من كوكب آخر إلى النظام الجامع بين الأرض والقمر، فسيبدو له نظامًا ثنائيًّا من كوكبَين وليس كوكبًا مُضافًا إليه قمر. لكن ذلك القمر الفائق الضخامة لم يصل إلى هناك لمجرد أن الأرض جذبته إليه في بدايات عمرها. تُقدِّم دراسات تركيب المادة القمرية، وبعض عمليات محاكاة ديناميكيات المجموعة الشمسية حين كانت في بدايات عمرها، صورةً مُقنِعة للكيفية التي تكوَّن بها القمر.

عندما تكوَّن كوكب الأرض نفسه، كان سينصهر، ولكن سرعان ما برد السطح ليكوِّن قشرةً صخرية سميكة، فيما استقرت حصته من المعادن الثقيلة، كالحديد، في مركزه. ولو كان كوكب الأرض قد بقي على حاله آنذاك دون أن يحدث له أي شيء آخر، لبدا أشبه بكوكب الزهرة حاليًّا. ولكن في غضون بضعة ملايين من السنين (لا تزيد على ١٠) من تكوُّن الأرض نفسها، تلقت صدمة جانبية طفيفة من الكوكب الأولي المارق الذي كان بحجم المريخ؛ وعلماء الفلك متيقنون جدًّا من وجود هذا الكوكب لدرجة أنهم أطلقوا عليه اسم ثيا، تيمنًا باسم والدة إلهة القمر، سيلين. ومن المفترض أن هذا الاصطدام أعاد صهر كلٍّ من الأرض وثيا، فيما تناثرت المواد الخفيفة الكامنة في قشرة كلتيهما في الفضاء، بينما اندمج لُبَّاهما الغنيان بالحديد واستقرا في مركز الأرض. ثم شكلت المادة القشرية الزائدة حلقةً حول الأرض تكوَّن منها القمر بالطريقة نفسها التي تكونت بها الكواكب حول الشمس. وعندما بردت الأرض، انهال عليها الماء ومواد متطايرة أخرى بفعل المذنبات فتكوَّن المحيط والغِلاف الجوي، مع الجزيئات المعقدة التي ربما تكون قد بدأت الحياة. ومن ثم فإن هذا هو منشأ كل شيء، لكن هذه ليست نهاية قصة الأرض.

فأسفل ذلك الغلاف الجوي والمحيط، تُرك الكوكب بُلبٍّ كبير من الحديد المنصهر (مسئولٍ، من بين عوامل أخرى، عن المجال المغناطيسي للكوكب) وقشرة صلبة رفيعة

جدًّا انقسمت إلى قطع تسمى الصفائح، علمًا بأن هذه الصفائح دُفعت في مختلف أنحاء السطح بفعل تحرك الموائع تحت تأثير الحمل الحراري أسفل السطح. وهو ما يقودني إلى سؤالنا التالي.

السؤال السادس

# ما سرعة تحرك القارات؟

ربما لاحظ أي شخص نظر إلى صورة لكوكب الأرض من الفضاء أن نتوء قارة أفريقيا يُناسب الفجوة بين الأمريكتَين الشمالية والجنوبية، وأن البرازيل تلائم الحيز الواقع تحته بشكلٍ مثالي. وفي الواقع، لا تحتاج إلى صور من الفضاء لترى ذلك؛ فحالما توفرت خرائط دقيقة للقارات، لاحظ بضعة أشخاص تلك «المصادفة» وتكهَّنوا بالسبب وراءها. إذ افتُرِض أن القارات كانت مندمجة معًا في الماضي وانفصلت في كارثة كبرى ما، ولاقت هذه الفكرة انتشارًا أوسع في النصف الثاني من القرن التاسع عشر، بعد أن نشر الإيطالي الأمريكي أنطونيو سنايدر-بليجريني كتابًا عن هذا الموضوع بعنوان «الخلق وكشف أسراره» في عام ١٨٥٨ (العام الذي طرح فيه تشارلز داروين وألفريد راسل والاس على جمعية لينيان نظريتهما عن حدوث التطور بالانتقاء الطبيعي). صحيح أن عددًا متزايدًا من العلماء رفضوا الفكرة التي افترضت انفصال القارات بفعلِ كارثة واحدة مرتبطة بطوفان نوح، لكنهم قبلوا الأدلة التي أشارت إلى أن قارتَي أمريكا الجنوبية وأفريقيا كانتا مندمجتَين معًا في الماضي، تلك الأدلة التي بدأت تتراكم لديهم من مصادر متنوعة.

بعض هذه الأدلة مرتبط بعمل داروين ووالاس. إذ اتضح وجود تشابه بين أنواع النباتات والحيوانات الموجودة على جانبَين متقابلَين من المحيط الأطلسي عند خطوط عرض متقاربة، وإن لم يكن ذلك التشابه تامًّا، لأن الكائنات الحية تتطور. كذلك يتجلى تشابه أقوى في الصخور. فبعض السلاسل الجبلية التي تختفي داخل البحر على أحد جانبَي المحيط تعاود الظهور على الجانب الآخر، وهذا ينطبق أيضًا على الطبقات الجيولوجية والحفريات التي تحويها. وغالبًا ما يُضرَب هنا مثال تشبيهي يَفترضُ أنك إذا أخذت ورقة من إحدى الصحف وقصصتها إلى قصاصةٍ على شكل أفريقيا وأمريكا الجنوبية مندمجتَين معًا ثم قطعتها إلى شكل كل قارة على حدة، فستظل قادرًا على قراءة سطور

ورقة الصحيفة عبر الفجوة بينهما. بحلول نهاية القرن التاسع عشر، اتضح أن القارات كانت مندمجة معًا في الماضي. وبقيت الأسئلة التي تحتاج إلى إجابة آنذاك: كيف انفصلت، وما المدة الزمنية التي استغرقها ذلك؛ أي ما مدى سرعة تحرك القارات؟

في عام ١٩٠٨، ألقى فرانك تايلور، من جامعة ستانفورد، عرضًا تقديميًّا أمام الجمعية الجيولوجية الأمريكية، حيث وصف «الانجراف القاري» (كما أصبح معروفًا) بأنه «حركة زاحفة هائلة»، ولَفَت الانتباه إلى اكتشاف سلسلة جبلية ضخمة تحت البحر، وهي «حيد وسط المحيط الأطلسي»، تقع في منتصف المسافة تقريبًا بين أوروبا وأمريكا الشمالية وتمتد جنوبًا بين أفريقيا وأمريكا الجنوبية. كان هو أول شخص يقترح أن هذا هو المكان الذي انفصلت عنده القارات، وأنه «ظل ثابتًا بينما زحفت القارتان الواقعتان على جانبَيها في اتجاهَين متعاكسَين وشبه متوازيَين». لم تلقَ أفكار تايلور اهتمامًا كبيرًا آنذاك، ولكن اتضح أنه كان مُحقًّا إلى حد كبير. أما الشخص الذي حظيَت أفكاره عن الانجراف القاري باهتمام كبير بعدئذٍ، فكان عالم الأرصاد الجوية الألماني ألفريد فيجنر، وإن اتضح أنه لم يكن محقًّا تمامًا.

لم يكن فيجنر عالمًا جيولوجيًّا، لكنه كان على دراية كافية بالجيولوجيا لينزعج من ورقة بحثية علمية صادفها في عام ١٩١١ كانت تزعم أن التشابهات بين الأشياء الموجودة على جانبَي المحيط يمكن تفسيرها بأن هذَين الجانبَين كانا مترابطين في الماضي بـ «جسرٍ بري» غرق تحت الأمواج. ومن المؤكد حتمًا أن هذا كان هراء، لأنه حتى في السنوات الأولى من القرن العشرين، كان معروفًا أن قشرة القارات أقل كثافة من قشرة المحيطات؛ لذا تطفو القارات على صخور قاع المحيط الأكبر كثافة كما يطفو الجليد على الماء. فإذا دفعت مكعبًا من الثلج تحت سطح كوب من الماء، فسيطفو مجددًا حالما تتركه، وهو ما سيحدث أيضًا لكتلة من اليابسة إذ دُفِعت بطريقة ما إلى أسفل القشرة المحيطية.

كان فيجنر منزعجًا جدًّا لدرجة أنه، وإن لم يتخلَّ عن مهنته الأساسية، أمضى بقية حياته (حتى تُوفي عام ١٩٣٠) في تنقيح فكرته عن الانفجار القاري والترويج لها. وكان يعرف الكثير عن الجليد الطافي لأنه كان مختصًّ الأرصاد الجوية في رحلة استكشافية دنماركية إلى جرينلاند، حيث رأي كيف تنكسر الصفائح الجليدية الطافية وتتحرك خلال الماء، لكن لا تغرق تحت الأمواج. صحيح أنه كان محقًّا في اعتقاده أن الجسور البرية يستحيل أن تغرق، ولكن من سوء حظه أن ما كان يعرفه عن الجليد الطافي قاده عبر مسار خاطئ وهو ينقح أفكاره على مر العقدَين التاليَين.

لكن لنبدأ أولًا بما أصاب فيه فيجنر. جَمَع كمية هائلة من الأدلة ليُظهر أن القارات قد تحركت. وكان هو الشخص الذي تفتَّق ذهنه عن تشبيه القارات بورقة الصحيفة، ولأنه كان خبيرًا في الأرصاد الجوية، استطاع استخدام أدلة أحفورية ليستنبط الظروف المناخية في عصور ماضية، ويُظهر أشياء عديدة من بينها أن جزيرة سبيتسبرجن، التي تقع الآن شمال الدائرة القطبية الشمالية، كانت موجودة في المناطق الاستوائية ومغطاة بغطاء نباتي خصب يومًا ما. وبفضل كل هذا، وأدلة أخرى، استطاع أن يستنبط ظروف عصرٍ كانت فيه كل القارات الحالية مندمجةً في كتلة برية واحدة، وهي قارة عظمى سمَّاها بانجيا، بمعنى «كل الأرض».[١] وبذلك قدَّر أن قارة بانجيا بدأت تتفكك منذ نحو ٣٠٠ مليون سنة،[٢] وفسَّر وجود السلاسل الجبلية بأنها ناتجة من تصادمات بين القارات، أو تكمُّش القارات عند الحافة الأمامية التي تتصدر حركتها، كما في حالة جبال روكي والأنديز. لكنه لم يستطع تفسير كيفية تحرك القارات، وهذا كان عاملًا حاسمًا في منع أفكاره من أن تنال قبولًا واسع النطاق.

أمَّا خطأ فيجنر، فنشأ من معرفته بالجليد الطافي. ولكن حتى في ذلك الخطأ، كان قريبًا جدًّا من الصواب. اقترح فيجنر أن القارات تتحرك خلال القشرة المحيطية لقاع البحر كما تتحرك كتلة الجليد خلال الماء عند دفعها. الأمر هنا أشبه بجبل جليدي ضخم يتحرك خلال الماء بفعل رياح تهب على جسمه. ولكن كما أدرك فيجنر نفسه على الأرجح، عندما تتكسر صفيحة من الجليد الطافي وتنجرف القطع المتكسرة، فإنها لا تتحرك بنفسها خلال الماء. بل تنقلها تيارات المحيط. وبالمثال، فالقارات تُنقل في الحقيقة بفعل «تيارات» في القشرة المحيطية، ولا تتحرك بنفسها خلال القشرة المحيطية إطلاقًا. لكن الدليل الرئيسي الذي أوضح ذلك لم يتوفر إلا بعد ربع قرن من وفاة فيجنر.

فبحلول خمسينيات القرن الماضي، صار العالم مختلفًا تمامًا عن العالم الذي كان فيجنر يعرفه. إذ كان منقسمًا بعد الحرب العالمية الثانية إلى معسكرَين مسلحَين يتصارعان في الحرب الباردة. وكان من أشد مخاوف الجيش الأمريكي في الغرب أن يكون الاتحاد السوفيتي قادرًا على إخفاء غواصات مزودة بأسلحة نووية في أعماق المحيط

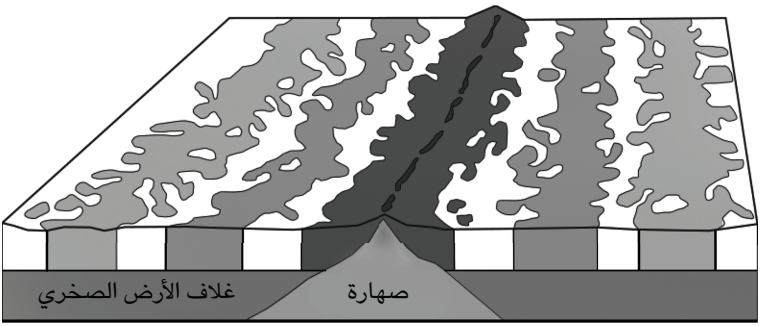
[١] أصبح اسم جيا، أو جايا، مألوفًا من نظرية جيم لَفلوك عن الأرض الحية.

[٢] تشير تقديرات حديثة إلى أن بانجيا تكونت منذ نحو ٣٣٥ مليون سنة وبدأت تتفكك منذ نحو ٢٠٠ مليون سنة.

الهادئ. وفي إطار الاستجابة لهذا التهديد المتصوَّر، أصدرت البحرية الأمريكية في عام ١٩٥٥ أمرًا بإجراء مسح لقاع البحر قبالة الساحل الغربي لأمريكا الشمالية، وذلك باستخدام السونار لإنشاء خريطة توضح أي تضاريس بحرية قد تحاول الغواصات الاختباء فيها. ولإخفاء الغرض الحقيقي من هذه المهمة العسكرية، سُمح لعلماء بإجراء تجارب خاصة بهم أثناء المسح، بشرط ألا تتداخل مع عملية إنشاء الخريطة. فقرروا، بدافع الفضول فقط دون أي تصورات مسبقة عمَّا قد يكتشفونه، أن يقيسوا مغناطيسية صخور قاع البحر، وذلك بجرِّ أداة تُسمى مقياس المغناطيسية خلف سفينتهم وهي تتحرك ذهابًا وإيابًا عبر رقعة من المحيط، كجرار يتحرك ذهابًا وإيابًا عبر حقلٍ ما وهو يحرثه. غير أن ما وجدوه كان غير متوقع على الإطلاق.

عندما تتصلب الصخور المنصهرة، تلتقط أثرًا مغناطيسيًّا من المجال المغناطيسي للأرض، ثم يتجمد هذا الأثر في الصخور، كأنه أثر حفري للمغناطيسية التي كانت موجودة في الصخور أثناء تصلبها. لذا يكون الأثر المغناطيسي في قطعة معينة من الصخور متجهًا من الشمال إلى الجنوب في البداية، ولكن مع تعرُّض الصخور لاختلاط عشوائي بفعل نشاط جيولوجي، كالزلازل مثلًا، فإنه قد يصبح في النهاية موجهًا نحو أي اتجاه. وإذا افترضنا أن أفراد فريق المسح كانوا يحملون أي توقعات، فهذا هو ما ظنوا أنهم ربما يجدونه: خليط من الأنماط المغناطيسية في الصخور الموجودة تحت سطح البحر، حيث يختلف اتجاه المغناطيسية باختلاف الصخور. لكن ما وجدوه في الواقع كان نمطًا من أشرطة مميزة جدًّا تتجه شمالًا وجنوبًا. ففي أحد الأشرطة، كانت مغناطيسية الصخور متجهة من الشمال إلى الجنوب في نفس اتجاه المجال المغناطيسي الأرضي الحالي. وفي الشريط التالي، كان النمط معكوسًا، أي متجهًا من الجنوب إلى الشمال على عكس المجال المغناطيسي الأرضي الحالي. وهكذا وجدوا النمط متكررًا كالأشرطة الموجودة في الرمز الشريطي، بينما كان بعضها أعرض من البعض الآخر. نُشرت نتائج المسح الأوَّلي في عام ١٩٥٨، وأطلقت موجةً من دراسات مشابهة في مختلف أنحاء العالم، ما أسفر عن اكتشافٍ فارقٍ أهَم.

هل تتذكر «حيد منتصف المحيط الأطلسي» الذي حاول فرانك تايلور أن يلفت الانتباه إليه في عام ١٩٠٨؟ أظهرت الدراسات المسحية أن نمط الأشرطة المغناطيسية العريضة والضيقة (أي الرمز الشريطي المغناطيسي) متطابقٌ على جانبَي الحيد؛ بل واكتُشِف التطابق ذاته على جانبَي حيود مشابهة في محيطات أخرى. وفي مثالٍ لافت




أشرطة «الرمز الشريطي المغناطيسي» في المحيط. (الصورة نشرها المستخدم Chmee2 عبر موقع «ويكيميديا كومنز»، وتقع في نطاق الملكية العامة.)

جدًّا،[٣] في منتصف الستينيات، أجرت سفينة أبحاث أمريكية تُدعى «إلتانين» مسحًا مغناطيسيًّا على طول مسار يبلغ أربعة آلاف كيلومتر ويمتد من الشرق نحو الغرب عبر حيد المحيط الهادئ، وصولًا إلى جنوب جزيرة إيستر. ثم رُسمت نتائج المسح — أي الأشرطة المغناطيسية العريضة والضيقة — على مخطط ورقي مع رسم الحيد في منتصف ذلك المخطط، وعند طيِّ نصف المخطط على نصفه الآخر، استقر كلا «الرمزين الشريطيين» فوق الآخر، وتبيَّن أن كل شريط قد استقر فوق نظيره الموجود على الجانب الآخر من الحيد، مُبرِزًا تناظر نمط الانعكاسات المغناطيسية.

وحالما لوحِظ النمط، كان من السهل شرحه. فحيود المحيط شقوقٌ في قشرة الأرض حرفيًّا، حيث تتصاعد عندها الصخور المنصهرة من الأسفل وتُدفَع إلى الخارج على جانبَي الحيد، فتبرد في أثناء ذلك وتُجمِّد داخلها المجال المغناطيسي السائد حينئذٍ. أي إنَّ تايلور كان محقًّا. فحيدُ وسط المحيط الأطلسي شَقٌّ فعليٌّ في القشرة فصل أوروبا عن أمريكا الشمالية، وأسفر عن تمدُّد قاع البحر على جانبَيه وبذلك ظل يُباعد بين القارتين منذ ذلك الحين. أي إنَّ القارات لا تتحرك بنفسها خلال صخور قاع البحر لكنها تُنقَل على ظهر صفائح صخرية، كما تُنقَل قطع الجليد الطافية على تيارات محيطية، ما يُكسب مفهوم الانجراف القاري اسمه الحديث؛ تكتونية الصفائح.

[٣] أذكره هنا لأنني أتذكر أنني قرأت عنه آنذاك.

ولكن لا شيء من ذلك يعني أن كوكب الأرض يتضخم مع تمدُّد المحيطات. صحيح أن حيود المحيطات تشهد تمددًا في القاع، لكن بعض الأماكن الأخرى تشهد تدمير قاع البحر عندها، حيث يُدفع إلى أسفل القارات مجددًا. وهذا ممكن لأن القشرة المحيطية أكبر كثافة وأقل سمكًا من القشرة القارية. وتتجلى نتائج هذه العملية عند المنطقة الواقعة بمحاذاة الجانب الغربي من المحيط الهادئ بالأخص، حيث أسفر تأثير دَفع القشرة المحيطية أسفل القشرة القارية عن سلاسل جبلية كبيرة ونشاط بركاني؛ بل إنَّ جزر اليابان نَتَجَت بالكامل من هذه العملية. وهكذا اتضح أن المحيط الهادئ يتقلص بنفس معدل تمدد المحيط الأطلسي.

لكن ما المدة الزمنية التي يستغرقها كل هذا؟ ما سرعة تحرُّك القارات؟ يعرف الجيولوجيون، من دراسات السمات المغناطيسية لطبقات الصخور على اليابسة، أن المجال المغناطيسي للأرض ليس ثابتًا، لكنه ينعكس من وقت إلى آخر، إذ يتبادل القطبان المغناطيسيان الشمالي والجنوبي مكانَيهما. لا يعني هذا أن كوكب الأرض ينقلب في الفضاء؛ بل يُنتَج المجال المغناطيسي بفعل تيارات دوامية من مواد منصهرة في أعماق باطن الأرض (ستجد مزيدًا من تفاصيل ذلك في الإجابة عن السؤال السابع)، وأحيانًا ما يتلاشى تمامًا ثم يتراكم مجددًا في الاتجاه المعاكس. صحيح أنه ما من أحدٍ يعرف سبب حدوث ذلك أو كيفيته، لكن الحقيقة أنه يتيح للجيولوجيين أداة مفيدة للغاية. وعلى وجه الخصوص، هم يستطيعون استخدامه لقياس أعمار الأشرطة المغناطيسية في قاع البحر.

وكل ذلك متاح بفضل وجود بعض الأماكن التي تتراص فيها الطبقات بترتيب منظم بعضها فوق بعض من الأحدث إلى الأقدم، رغم تعرُّض العديد من الطبقات الصخرية الأخرى للاختلاط بفعل الزلازل وأنشطة أخرى. ومن ثم، يمكن حساب أعمار طبقات الصخور المختلفة باستخدام طرق جيولوجية شائعة، وعندما تُقاس مغناطيسية الصخور، تكشف عن النمط ذاته الذي يضم أشرطة عريضة وضيقة مكافئة للانعكاسات المغناطيسية، والذي يُرى في صخور قاع البحر. لكن النمط هذه المرة يعد بمثابة تقويم زمني ممتد إلى الماضي.

يستمد علماء الجيوفيزياء من ذلك عدة معلومات منها كيفية تغير الموضع الزاوي للقارات بمرور الزمن. فقد يُظهر النمط مثلًا أن المنطقة المعروفة حاليًّا بأفريقيا كانت، في وقتٍ معين من الماضي الجيولوجي، منحرفةً بزاوية ما عن موضعها الحالي. وبدمج ذلك مع الأدلة الأحفورية النباتية والحيوانية، لاستنباط ظروف الماضي المناخية كما استنبطها

فيجنر، يستطيع علماء الجيوفيزياء حساب الوقت الذي كانت قارة بانجيا موجودة فيه، بل والوقت الذي انفصلت فيه إلى قطع، وتحديد الكيفية التي نُقلت بها في شتى أنحاء العالم إلى مواقعها الحالية بفعل تكتونية الصفائح. تمكن علماء الجيوفيزياء من تجميع كل هذا في أواخر ستينيات القرن العشرين، مع توفر أجهزة كمبيوتر علمية أكثر كفاءةً، لإنتاج خرائط توضح نمط القارات في عصور جيولوجية مختلفة. وبالصدفة كنتُ من أوائل الأشخاص الذين رأوا تلك الخرائط التي تُظهر الانجراف القاري.

حدثت هذه الصدفة لأن الكمبيوتر العلمي «الكفؤ» آنذاك كان يحمل ذاكرة حجمها ١٢٨ كيلوبايت،[٤] ويشغَل غرفةً كبيرة ومكيفة الهواء، ويتولى تشغيلَه فريق من مشغلي الكمبيوتر الذين كانوا يزودونه بالبيانات في شكل بطاقات مثقبة وشريط مغناطيسي، ثم يجمعون المخرجات، التي غالبًا ما كانت في شكل أرقام ومخططات بيانية مطبوعة على ورق. لم تكن تلك الأجهزة مزودة بشاشات مرئية؛ لذا لم تُرَ مخرجاتها إطلاقًا إلا على ورق مطبوع، مع أنها كانت موجودة أيضًا على بطاقات مثقبة وما إلى ذلك. وكان أحد هذه الأجهزة، ويُسمَّى «آي بي إم ٣٦٠/٤٤»، مملوكًا لمعهد الفلك النظري (كما كان معروفًا آنذاك) في كامبريدج، حيث كنت طالبًا باحثًا، وكنت أعمل مشغلًا لأجهزة الكمبيوتر بدوام جزئي. وفي الوقت نفسه، كان علماء الجيوفيزياء الذين يعملون في مبنًى مجاور لديهم اتفاق مع المعهد يسمح لهم بتشغيل برامجهم على جهازنا، وكانت إحدى مهامي تجميع مخرجاتهم المطبوعة وتجهيزها لهم ليأخذوها. ومن حسن حظي أن هذه المخرجات المطبوعة تضمنت تلك الخرائط الأولى التي تُبين الانجراف القاري. لذا رأيتها فور خروجها من الطابعة، وقبل أن يراها حتى الأشخاص المسئولون عن البحث، فضلًا عن ظهورها في دوريات علمية. لكن ما لم أكن أدركه آنذاك أن كل هذا لا يزال مستمرًّا؛ أي إن المحيط الأطلسي لا يزال يتوسع حتى وأنا أكتب هذه الكلمات.

يعيدنا هذا إلى العَلاقة بين الأشرطة المغناطيسية في قاع البحر والأنماط المغناطيسية المُكتشفة في الصخور القارية. يتسم نمط الأشرطة العريضة والضيقة بأنه مميز للغاية لأن انعكاسات المجال المغناطيسي لا تتكرر بمعدل منتظم. لذا يمكن اختيار شريط واحد (ونظيره الذي يُعَد بمثابة صورته المرآتية على الجانب الآخر من حيد وسط

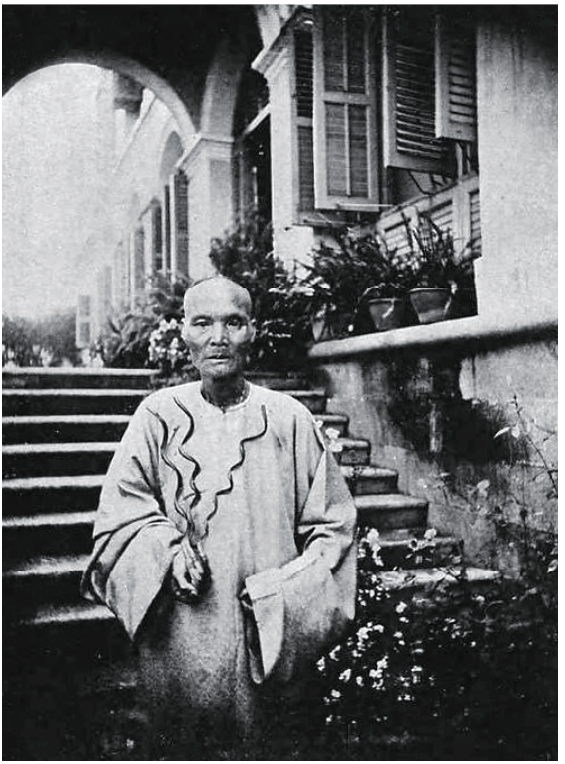
[٤] هذا ليس خطأ مطبعيًّا. فأنا أقصد ١٢٨ ألف بايت بالفعل. علمًا بأن الهاتف الذكي الحديث قد يحمل ذاكرة حجمها ١٢٨ جيجابايت، أي أكبر مليون مرة من ذاكرة أفضل كمبيوتر علمي في أوروبا عام ١٩٦٨.

المحيط الأطلسي)، ومعرفة الفترة المعينة التي تكوَّن فيها في الزمن الجيولوجي منذ عدد محدد من ملايين السنين. وبناء على ذلك، من السهل حساب مدى سرعة توسع المحيط الأطلسي على مرِّ بضع عشرات الملايين من السنين الماضية. ومن ثم، اتضح أن كلا جانبَي الصدع يشهد دفع قشرةٍ محيطية جديدة بمعدلٍ يساوي أقل بقليل من سنتيمترَين في السنة؛ وبذلك يتوسع المحيط إجمالًا بمعدل نحو أربعة سنتيمترات في السنة. أي إنَّ البُعد بين أمريكا وأوروبا الآن أطول بمترين مما كان عليه عندما نظرت إلى خرائط الانجراف القاري التي طبعها الكمبيوتر في كامبريدج. ولتوضيح هذا بمثال تشبيهي، فإن قاع البحر يشهد تكوُّن قشرة محيطية جديدة بنفس معدل نمو أظافرك تقريبًا. لذا فكلما تقص أظافرك، تذكر أن القارة تحركت بمقدار الجزء الذي أزلته للتو من أظافرك، منذ آخر مرة شذَّبتَها فيها.

هذا كله كلام علمي سليم ومؤكد. لكنه يعتمد على فهم كيفية تكوُّن المحيطات، وماهية المغناطيسية الأحفورية، وكيفية تأريخ مغناطيسية الصخور في القارات وربطها بمغناطيسية الصخور في قاع البحر. ومن ثم، سيكون الوضع أفضل إذا كانت لدينا طريقةٌ ما لقياس هذه الحركة مباشرةً. ومن المفارقات السعيدة أننا لدينا بالفعل طريقة؛ أو بالأحرى طريقتان لقياس الانجراف القاري مباشرة.

تتسم الطريقة الأولى بالدقة لكنها فيما يبدو تستعصي على الفهم نوعًا ما على أي شخص باستثناء المتخصصين في علم الفلك الراديوي. فعلماء الفلك لديهم طريقة اسمها قياس التداخل الراديوي من ضِمن الأدوات التي يستخدمونها لدراسة النجوم والمجرات البعيدة. وتعتمد تلك الطريقة على استخدام تلسكوبات راديوية منفصلة بمسافات كبيرة فيما بينها لدراسة جسمٍ واحد في وقت واحد وخلط الموجات الراديوية (أي السماح لها بالتداخل) بطريقةٍ تتيح عدة معلومات، من بينها أنها تكشف عن الفارق الزمني بين توقيتات وصول الموجات إلى كل تلسكوب. وبالطبع يرتبط الفارق الزمني بالمسافة بين التلسكوبات. وهكذا فباستخدام تلسكوبات في أمريكا الشمالية وأوروبا في أواخر القرن العشرين، راقب بعض متخصصي علم الفلك الراديوي الموجات الراديوية المنبعثة من شبه نجم (كوازار) بعيد على مر أكثر من عشر سنوات، ووجدوا أن أوروبا وأمريكا الشمالية ما زالتا تتباعدان كلتاهما عن الأخرى بنفس المعدل المستنتج من الدراسات الجيوفيزيائية بالضبط.

أمَّا الطريقة الأخرى، فهي مباشرةٌ أكثر. إذ تنطوي ببساطة على إرسال أشعة ليزر من محطة أرضية وارتدادها من قمر صناعي مزود بعواكس لامعة، والتقاط الأشعة



رجل طويل الأظافر، في عام ١٩٠٦ تقريبًا. (مأخوذة من موقع «ويكيميديا كومنز»، وتقع في نطاق الملكية العامة.)

المنعكسة في محطة أرضية أخرى بعيدة، ثم ارتدادها إلى المكان الذي أتت منه. يُحسَب الوقت الذي استغرقته الرحلة ذهابًا وإيابًا (عبر مسارَين يُمثلان ضلعَي مثلث)، وبذلك يشير مباشرة إلى المسافة بين المحطتَين الأرضيتَين، التي تُمثل قاعدة المثلث. تُظهر هذه التقنية أن قشرة المحيط الهادئ تتحرك غربًا بمعدل أربعة سنتيمترات سنويًّا؛ لذا فهي تختفي تحت قارة آسيا بهذا المعدل، وبذلك تُوازِن مُعدل توسُّع قشرة المحيط الأطلسي بالضبط. وهذا يجيبنا عن سؤال «ما سرعة تحرك القارات؟»، لكنه يقود إلى سؤال آخر: ما الذي يكمن تحت قشرة الأرض؟

السؤال السابع

# ماذا في باطن الأرض؟[1]

يرتبط سؤال «ماذا يوجد تحت أقدامنا؟» بسؤال آخر؛ وهو «كيف نعرف ما يوجد تحت أقدامنا؟» حاليًّا تبدو إجابة السؤال الثاني واضحة: بدراسة الزلازل. لكن استخدام الزلازل لنعرف ما الذي يوجد بباطن الأرض ليس بسيطًا إطلاقًا. فقد أخبرني إدوارد بولارد، وهو جيوفيزيائي بارز في جامعة كامبريدج وصاحب أول مُطابَقةٍ حاسوبية بين القارات الواقعة على جانبَي المحيط الأطلسي، ذات مرة أن محاولة التوصل إلى البنية الداخلية للأرض عن طريق دراسة الاهتزازات الناتجة عن الزلازل (أو الموجات الزلزالية) أشبه بمحاولة التوصل إلى البنية الداخلية لبيانو كبير بالاستماع إلى الضوضاء التي يُحدثها عند دَفعه إلى أسفل دَرَج. لكن تلك العملية صارت أسهل قليلًا بفضل وجود أدلة إرشادية أخرى.

فالفيزيائيون يستطيعون حساب كتلة الأرض بقياس قوة مجال جاذبيتها، ويعرفون حجمها أيضًا؛ لذا يعرفون كثافتها الإجمالية. وهذه الكثافة أكبر من كثافة الصخور الموجودة على سطح كوكبنا؛ لذا فلا بد أن الأرض تحوي داخلها لُبًّا مكونًا من مواد أكبر كثافة لكي يكون المجموع مساويًا للكثافة الإجمالية. كان إميل فايخرت أول مَن أجرى هذه الحِسبة، وهو عالم جيوفيزيائي ألماني كان يُجري أبحاثه في تسعينيات القرن التاسع عشر. واستنتج أن الأرض لها لب حديدي ذو قطرٍ يساوي ٠,٧٧٩ من قطر الكوكب الإجمالي وكثافة مقدارها ٨,٢١ جرام لكل سنتيمتر مكعب، في حين أن كثافة الطبقة الخارجية للأرض، المعروفة بالوشاح، تبلغ ٣,٢ جرامات فقط لكل سنتيمتر مكعب. وهذه الأرقام قريبة جدًّا من بعض التقديرات الحديثة.

---

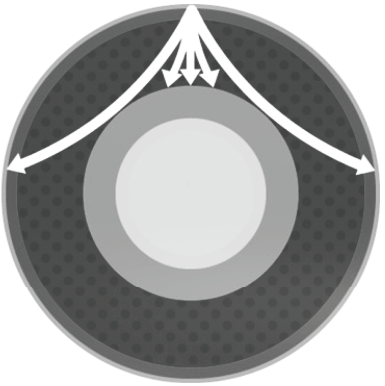
[1] هذه الإجابة منقولة بتصرف من كتابنا «كوكب الأرض: دليل إرشادي للمبتدئين»، الصادر في عام ٢٠١١ عن دار نشر وان وورلد؛ لأنني لم أستطع سردها بطريقة أفضل ممَّا وردت بها هناك.

واقترح فايخرت أيضًا أن صحة هذا التنبؤ يمكن اختبارها بدراسة كيفية انتقال الموجات الزلزالية عبر الأرض من موقع الزلزال إلى المواقع البعيدة التي تُكتشف عندها.[٢] وفي العام نفسه الذي اقترح فيه ذلك، أي ١٨٩٧، شهدت الهند زلزالًا جعل الجيولوجي البريطاني ريتشارد أولدهام يفكر تفكيرًا مشابهًا لهذا.

كان أولدهام يعمل لدى هيئة المسح الجيولوجي في الهند، التي كانت تحت الحكم البريطاني آنذاك. وقع زلزال قوي في ولاية آسام وشعَر به الناس على نطاق يبلغ ربع مليون ميل مربع، فقارن أولدهام بين التوقيتات التي شُعر فيها بالزلزال في أماكن متباعدة منفصلة بمسافات طويلة بينها، وتوصَّل إلى حتمية وجود ثلاثة أنواع من الموجات الزلزالية تنتقل خلال الأرض بسرعات مختلفة. يُسمى أحدها موجات الضغط (أو موجات P)، ويُشبه الموجات الصوتية ويتحرك بحركةٍ دافعة ساحبة. وهذه الموجات تُشبه الموجات الدافعة الساحبة التي يمكنك إنشاؤها باستخدام لعبة «سلينكي» التي تشبه زنبركًا طويلًا. أمَّا نوع الموجات الآخر المهم لدراسة باطن الأرض، فيُسمى موجات القص (أو موجات S)، لأنها تتحرك يمينًا ويسارًا، كالثعبان، أو كالموجات التي يمكنك إنشاؤها بإرسال تموجات تسري بطول حبلٍ ما. ونظرًا إلى أن الموجات P تنتقل أسرع من الموجات S، فإنها تصل أولًا إلى أجهزة الكشف، التي تسمى أجهزة قياس الزلازل، أو مقاييس الزلازل، ولذا يُشار أحيانًا إلى الموجات P بمصطلح الموجات «الأولية». أمَّا موجات القص، فتصل ثانيًا؛ لذا يمكن وصفها بمصطلح الموجات «الثانوية» أيضًا.

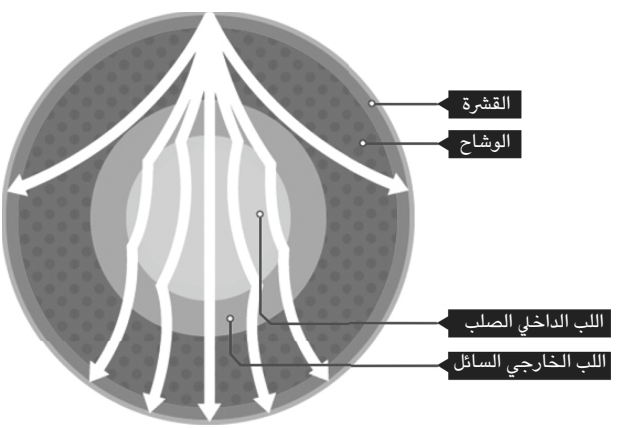
تنتقل الموجات الأولية في جسم الأرض بسرعات تتراوح بين نحو سبعة كيلومترات وأربعة عشر كيلومترًا في الثانية (أي أربعة أميال وثمانية أميال في الثانية)، بينما تنتقل الموجات الثانوية بسرعات تتراوح بين حوالَي أربعة كيلومترات وثمانية كيلومترات في الثانية (أي ٢٫٥ ميل في الثانية و٥ أميال في الثانية.) وبوجهٍ عام، فإن سرعة الموجات الثانوية في نوع معين من الصخور تساوي ٦٠ في المائة من سرعة الموجات الأولية فيه. هذا وتنتقل الموجات الأولية خلال كل من المواد السائلة والصلبة، لكن الموجات الثانوية لا تنتقل إلا

[٢] وهو ما يثير مسألة تزعجني بشدة. فالمركز السطحي للزلزال هو الموضع الموجود عند سطح الأرض مباشرةً فوق الزلزال الذي يحدث تحت الأرض؛ هذا كله كلام سليم ومضبوط. لكن ما يزعجني أن المصطلح تعرض للسطو من أشخاص يستخدمونه قاصدين به «المركز» فقط. انتهت شكواي الغاضبة، شكرًا لحسن استماعك.



موجات ثانوية. (هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية.)

خلال المواد السائلة. وتجدر الإشارة هنا إلى أن اكتشاف إمكانية انتقال الموجات الأولية عبر مناطق معينة في باطن كوكبنا لا تستطيع الموجات الثانوية الانتقال خلالها هو الذي كشف عن اللب الخارجي المنصهر لكوكب الأرض.




موجات أولية. (هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية.)

وتوجد كذلك موجات سطحية، وكما يوحي اسمها، فهي تنتقل عبر سطح الأرض. صحيح أن هذه الموجات يمكن أن تكون قوية جدًّا وتُحدث ضررًا جسيمًا، لكنها لا تخبرنا بمعلومات كثيرة عن عمق باطن الأرض. بل تأتي هذه المعلومات من الموجات الأولية والثانوية، التي تُعرف معًا باسم الموجات الجسمية. استقر أولدهام في بريطانيا عام ١٩٠٣ ودرس بياناتٍ مستمدة من آلاف الزلازل في مختلف أنحاء العالم، فكشفت له مباشرة عن وجود اللب بالإضافة إلى معلومات أخرى.

وقد تمكَّن من ذلك لأن الموجات الزلزالية تنتقل عبر باطن الأرض بسرعات مختلفة اعتمادًا على نوع الصخور التي تنتقل خلالها. فالسرعة التي تتحرك بها الموجات تعتمد على عدة عوامل، من بينها درجة حرارة الصخور، وما إذا كانت تلك الصخور لينة أم صُلبة. وعندما تنتقل الموجات خلال أنواع مختلفة من الصخور، أو خلال نفس النوع من الصخور عند درجات حرارة مختلفة، يمكن أن يتغير الاتجاه الذي تتحرك فيه، مثلما يمكن أن يتغير اتجاه شعاع من الضوء عندما ينتقل من نوعٍ معين من المواد (كالهواء مثلًا) إلى نوع آخر من المواد (كالزجاج أو الماء). وهذا ما يُسمى الانكسار. وكذلك عندما تصل موجة زلزالية مُتحركة خلال نوع معين من الصخور إلى حدود صخرة من نوعٍ مختلف، يمكن أن تنعكس، كانعكاس الضوء من المرآة.

أشارت دراسة أولدهام ضمنيًّا إلى أن اللب سائلٌ حتمًا، ولكن في عام ١٩٣٦، اكتشفت الجيوفيزيائية الدنماركية إنجي ليمان أن الأرض لها لُب داخلي صلب، وهو ما يعكس الموجات الزلزالية. ولكن على غرار ما حدث في دراسة الانجراف القاري، لم نتوصل إلى تفاصيل بنية كوكبنا الداخلية إلا نتاجًا لسياسات الحرب الباردة.

فلو كان لديك مقياسُ زلازل واحد فقط لتدرس به الاهتزازات الزلزالية، فلن تستطيع في الحقيقة أن تفهم شيئًا من تلك الاهتزازات أكثر ممَّا سيفهمه أي شخص من الضوضاء التي تصدر من بيانو يُدفع نحو أسفل دَرَجٍ ما. ولكن بعد حظر تجارب القنابل النووية في الغلاف الجوي في أوائل ستينيات القرن العشرين، أرادت المؤسسة العسكرية وحكومات القوى العظمى مراقبة الموجات الزلزالية الناتجة من التجارب التي يجريها خصومها تحت الأرض. وقد دفع هذا الحكومة الأمريكية إلى إنشاء الشبكة الموحَّدة العالمية للرصد الزلزالي التي تجمع بيانات من محطات الرصد الزلزالي في كل أنحاء العالم لتحليلها في مختبر مركزي في الولايات المتحدة. صحيح أن هذه لا تزال أهم شبكة من نوعها، لكن توجد الآن مئات من المقاييس الزلزالية الحساسة المترابطة معًا ضِمن شبكات منتشرة على

جزء كبير من سطح الأرض، وكل يوم يشهد وقوع العديد من الزلازل الخفيفة في أماكن مختلفة، فتُحدِث اهتزازات ترصدها تلك الأجهزة وتحللها.

تجدر الإشارة إلى الشبكات العالمية المنتشرة على نطاق واسع مفيدة في إتاحة صورة عامة عن بنية الأرض، لا سيما تقسيمها إلى طبقات مختلفة. ولكن توجد أيضًا شبكات تضم العديد من مقاييس الزلازل المتقاربة ضِمن نطاق أضيق للحصول على صورة أكثر تفصيلًا لما يحدث في منطقة معينة من الكرة الأرضية. وهذه الشبكات تستطيع «رؤية» أدق التفاصيل حتى كيلومترات قليلة. وهكذا فتلك الطرق مجتمعةً تتيح للجيوفيزيائيين صورة لما يحدث في أعماق الأرض من تحت أقدامنا.

اتضح من ذلك أن الغِلاف الخارجي الصُّلب للأرض — أو ما يعرف بالغلاف الصخري — منقسم إلى سبع صفائح كبيرة وعدة صفائح أصغر. وأن بعض الصفائح مكونة بالكامل من قشرة محيطية، لكن البعض الآخر مكون من قشرة محيطية وقشرة قارية معًا. ولا يمكن لأي صفيحة أن تتحرك بمعزل عن غيرها لأن كل ما يصدر منها يؤثر في الصفائح المجاورة، وكل ما يصدر من الصفائح المجاورة يؤثر في الصفائح المجاورة لها، وهكذا دواليك.

أمَّا تحت القشرة الأرضية، التي تشبه قشرة البيضة نوعًا ما، فيقع باطن الأرض الذي يشبه باطن البيضة نفسها؛ إذ يحتوي على لُب (على غرار صفار البيضة) محاط بطبقة عميقة من المواد (على غرار بياض البيضة). ولكن على عكس صفار البيضة وبياضها، فإنَّ كلتا هاتين الطبقتين الرئيسيتين من باطن الأرض منقسمة إلى منطقة داخلية وأخرى خارجية تعرَّف عليهما الباحثون من دراسات زلزالية.

إذا بدأنا من السطح واتجهنا إلى الأسفل تدريجيًّا نحو مركز الأرض، نجد أن متوسط سمك القشرة يبلغ نحو سبعة كيلومترات (أي أربعة أميال) تحت المحيطات ونحو ٣٥ كيلومترًا (أي ٢٠ ميلًا) في القارات. وهي تشكل ٠,٦ في المائة فقط من حجم الأرض و٠,٤ في المائة من كتلتها. يتميز الجزء السفلي من القشرة بحدٍّ يُسمى انقطاع موهوروفيتشيتش (أو موهو) على اسم العالم الكرواتي الذي اكتشفه. ثم تأتي الطبقة الرئيسية الواقعة تحت القشرة، وتسمى الوشاح وتنقسم إلى جزأين: الوشاح العلوي والوشاح السفلي.

لكن الانتقال من القشرة إلى الوشاح لا يحدث عبر خطٍّ فاصل حاد. بل يندمج الجزء العلوي من الوشاح مع القشرة مكوِّنًا منطقةً صخرية صلبة تسمى الغلاف الصخري، وتمتد إلى عمق نحو ٢٥٠ كيلومترًا (١٥٠ ميلًا) تحت القارات، لكنها أرقُّ بكثير تحت

المحيطات وأكبر سُمكًا بقليل من القشرة نفسها عند حيود وسط المحيط. وتحت الغلاف الصخري مباشرة، توجد منطقة شبه سائلة يزيد سمكها قليلًا على ١٠٠ كيلومتر (٦٠ ميلًا)، لكنها لا تزال تمثل جزءًا من الوشاح من حيث التركيب الكيميائي؛ وهذه ما تُعرَف بالغلاف الموري. يعد هذا الجزء من الوشاح هو العامل الأساسي للحركة التكتونية للصفائح. فنظرًا إلى أن الغلاف الموري شبه سائل، فإنَّ الغلاف الصخري الصلب الواقع أعلاه، بما فيه القشرة، يمكن أن ينزلق عليه، فيسمح بتحرك الصفائح وتمدد قاع البحر وانجراف القارات. ولا تتكون الصفائح التي تقوم عليها الحركة التكتونية من قشرة فقط، لكنها عبارة عن ألواح صخرية تتضمن القشرة والجزء العلوي من الوشاح العلوي. يحتوي الوشاح العلوي على الغلاف الصخري والغلاف الموري، ويمتد إلى عمق يبلغ نحو ٦٧٠ كيلومترًا (٤١٥ ميلًا) من السطح، فيما يمتد الوشاح السفلي إلى عمق يبلغ نحو ٢٩٠٠ كيلومتر (١٨٠٠ ميل). ويُشكِّل هذا ٨٢ في المائة من حجم الأرض و٦٧ في المائة من كتلتها. وتنتقل الموجات الأولية بسرعة تبلغ نحو ثمانية كيلومترات في الثانية في الجزء العلوي من الوشاح، وبسرعة مقدارها ١٤ كيلومترًا (٨٫٥ ميلًا) في الثانية في الجزء السفلي منه.

ومقارنة بالانتقال التدريجي من القشرة إلى الوشاح، يحدثُ عند هذا العمق انتقالٌ مفاجئ إلى منطقة من المواد السائلة لا تستطيع الموجات الثانوية المرور خلالها، وتسمى اللب الخارجي. وعند الجزء السفلي من اللب الخارجي، أي على عمق نحو ٥١٠٠ كيلومتر، أو ٣١٠٠ ميل، من سطح الأرض، نصل إلى قمة اللب الداخلي، وهو عبارة عن كتلة صلبة من المواد قطرها نحو ٢٤٠٠ كيلومتر، أو ١٥٠٠ ميل، أي نحو ثلثي قطر القمر. ومن السمات العجيبة للُّب الداخلي الصلب أنه يدور بوتيرة أسرع قليلًا من بقية الأرض، وأن معدل دورانه ازداد بمقدار عُشر لفة على مر الأعوام الثلاثين الماضية، أي بمعدل سنوي يزيد قليلًا على درجة واحدة، أو ١ / ٣٦٠ من الدائرة. يساوي حجم اللب كله حجم كوكب المريخ نفسه تقريبًا. لكن بعض دراسات الموجات الزلزالية كشفت أن جزأَي اللب كليهما أكبر كثافة بكثير من الوشاح الواقع أعلاه. صحيح أن نصف قطر اللب أقل بقليل من نصف قطر الأرض، لكن حجمه أقل من خُمس حجمها، لأن الحجم يعتمد على مكعب نصف القطر (فمكعب الرقم ٢ مثلًا يساوي ٨، ومن ثم إذا كان لدينا كرة ذات نصف قطر يساوي نصف نصف قطر كرة أخرى، فسيكون حجم الأولى مساويًا لثُمن حجم الثانية فقط). وإجمالًا، تبلغ المسافة من سطح الأرض إلى مركزها ٦٣٧١ كيلومترًا، أو ٣٩٥٩ ميلًا.

غير أن هذه المسافات كلها متوسطات. أمَّا في الحقيقة، فتختلف أعماق حدود طبقات الأرض المتنوعة اختلافًا طفيفًا باختلاف المكان، وقد تتغير بمرور الزمن. وعلى وجه الخصوص، يُعتقد أن اللب الداخلي الصلب ينمو ببطء مع تبلور جزء من اللب الخارجي السائل فوقه. وهذا هو أحد مصادر الطاقة التي تحافظ على سخونة باطن كوكبنا (جنبًا إلى جنب مع الطاقة المشعة)، لأن السوائل عندما تتصلب، تُطلق طاقة تسمى الطاقة الكامنة. وحتى الآن، تبلور نحو ٤ في المائة من اللب، وسيستغرق تصلُّب الجزء الباقي نحو ٤ مليارات سنة أخرى. يشغل اللب كله ١٧,٤ في المائة فقط من حجم الأرض، لكنه يحوي ٣٢,٦ في المائة من كتلتها، ما يشير إلى أن كثافته كبيرة جدًّا مقارنةً بكثافة بقية كوكبنا؛ إذ تبلغ نحو ١٢ جرامًا لكل سنتيمتر مكعب (٠,٤ رطل لكل بوصة مكعبة)، أي تساوي كثافة الماء ١٢ مرة، وتُعد أكبر قليلًا من كثافة الرصاص في أيٍّ من أشكاله التي قد يوجد بها على سطح الأرض.

تجدر الإشارة هنا إلى أن حركة الصفائح التكتونية مدفوعةٌ بالحمل الحراري في الوشاح؛ أو الوشاحَين. يبدو هذا جنونيًّا؛ أفليس الوشاح طبقةً صخرية صلبة تستطيع الموجات الثانوية الانتقال خلالها؟ في الحقيقة، إذا اهتز الوشاح فجأة بفعل زلزال ما، تنتقل خلاله الاهتزازات، كالموجات الصوتية التي تنتقل خلال جرسٍ يَرِن. ولكن إذا ظل يُدفع باستمرار فترةً طويلة، فسيتدفق تدريجيًّا كسائل شديد اللزوجة. وفي الواقع، لدينا شيء نستخدمه في الحياة اليومية يُظهِر سلوكًا كهذا؛ وهو الزجاج. فإذا ضربت قطعة زجاجية بمطرقة، فستتحطم كالمواد الصلبة. ولكن إذا أمعنت النظر إلى الزجاج الملون في نوافذ الكاتدرائيات القديمة، فسترى أن الجزء السفلي منه أكبر سُمكًا من أعلاه. وهذا لأن الزجاج ظَلَّ، على مر القرون منذ تركيبه، يتدفق إلى أسفل كدِبسٍ شديد اللزوجة تحت تأثير الجاذبية. وهكذا فالوشاح كالزجاج، لكنه حتى أكثر لزوجة منه.

وبسبب انقسام الوشاح إلى منطقتَين علوية وسفلية منفصلتَين بحدٍّ ضيق كما اتضح من دراسات المسح الزلزالي، فلا أحد متيقن تمامًا من آلية عمل هذا الحمل الحراري. يفترض أحد الاحتمالات أن كلا جزأَي الوشاح له نظامُ حملٍ حراري خاص به، كأنهما غلايتان إحداهما فوق الأخرى. فيما يفترض احتمالٌ آخر معاكس تمامًا أن الوشاح كله يتحرك بفعلِ الحمل الحراري كوحدةٍ واحدة، وهذا الاحتمال يكاد يتجاهل الحد الفاصل بين الوشاحَين العلوي والسفلي. لكن يبدو أن التفسير الأفضل يتضمن مزيجًا بين هاتَين الفكرتَين. فألواح قاع البحر التي دُفعَت إلى الأسفل بفعل الاندساس يمكن تتبعها بعمليات

المسح الزلزالي وصولًا إلى الحد الفاصل بين الوشاحَين العلوي والسفلي على عمق نحو ٦٥٠ كيلومترًا (٤٠٠ ميل). وحالما تصل الألواح إلى هناك، يبدو أنها تنتشر مكوِّنة طبقةً تتجمع على مرِّ فترة ربما تبلغ مئات الملايين من السنين، ثم تتراكم بكميةٍ هائلة لدرجة أنها تخترق الحد وتواصل النزول داخل الوشاح السفلي، كأنها انهيار جليدي، حتى تكاد تصل إلى الجزء العلوي من اللب الخارجي. هذا وتتضمن بعض دراسات المسح الزلزالي أدلةً على أن ألواحًا صُلبة من المواد تتراكم عند قاعدة الوشاح، حيث تبقى زمنًا طويلًا ربما يصل إلى مليار سنة لكي تُسخنها الحرارة المنبعثة من اللب تسخينًا كافيًا ليجعل المواد تبدأ الصعود مرة أخرى نحو السطح. ثم تصبح المواد المعاد تسخينها جزءًا من عمود صاعد يخترق الحد مُقتحمًا الوشاح العلوي ويُكوِّن نقطة ساخنة. وهكذا توجد نقطة ساخنة تحت هاواي، وأخرى تحت صدع شرق أفريقيا تقسم قارة أفريقيا إلى جزأين وتفصل معظم أفريقيا عن آسيا. وإذا استمرت هذه العملية، فستُنتج محيطًا جديدًا بحيدٍ خاص به عند وسطه.

تجدر الإشارة إلى أن الحرارة التي تدفع هذه الأعمدة إلى أعلى وتُعد السبب الرئيسي لتمدد قاع البحر تأتي قاطعةً كل هذه المسافة من قاع الوشاح، وترفع عمودًا يصل إلى ارتفاع مقداره نحو ٣ آلاف كيلومتر (١٨٠٠ ميل). والسبب الوحيد الذي يجعل كل ذلك ممكنًا أن باطن الأرض أشد سخونة من سطحها. ونحن نعرف درجة سخونة اللب بالضبط لأننا نعرف ماهية مكوناته بالضبط.

تَعرَّف علماء الفلك ماهية النيازك — التي تُعد قطعًا صخرية سقطت من الفضاء إلى الأرض — باعتبارها قطعًا متبقية من حلقة المواد التي كانت تدور حول الشمس وتكوَّنت منها الكواكب. وتغتني هذه الصخور بأربعة عناصر على وجه الخصوص: وهي الحديد والأكسجين والماغنسيوم والسيليكون، بالإضافة إلى سبيكة من الحديد والنيكل. ومن ثم، فإذا كانت الأرض مكونة من ذلك الخليط ذاته من المواد، وبالنِّسب ذاتها، فستكون كثافتها مساوية بالضبط لكثافة كوكبنا الإجمالية المَقيسة، التي تبلغ ٥٥٢٠ كيلوجرامًا لكل متر مكعب، أو ٠,٢ رطل لكل بوصة مكعبة. ولكن إذا أزلت الحديد والنيكل من خليطٍ من المواد النيزكية بحجم الأرض، فسيتبقى لك حجمٌ مماثل لحجم وشاح الأرض، وتركيبٌ كيميائي شبه مطابق لتركيب المواد الموجودة هناك بالفعل. وعندئذٍ ستكون كمية الحديد «المطروحة» من الخليط مساوية بالضبط للكمية اللازمة لصنع لُب الأرض. وهكذا تخبرنا هذه الحسبة البسيطة جدًّا بأن لب الأرض لا بد أن يكون مكونًا من الحديد في الغالب،

مع بعض النيكل أيضًا. أي إنَّ كوكبنا مكون من مواد النيازك ذاتها، لكن الحديد والنيكل استقرَّا في وسطه، وتركا المواد الأخف وزنًا في الطبقات الخارجية على حالها.

وبناء على معرفة تركيب لب كوكب الأرض، يمكن حساب درجة حرارته. فلأن اللب الداخلي صلب واللب الخارجي سائل، لا بد أن تكون درجة حرارة الحد الفاصل بين اللب الداخلي واللب الخارجي مساويةً لنقطة انصهار خليط الحديد والنيكل عند الضغط المقابل لعمق ٥١٠٠ كيلومتر (٣١٠٠ ميل) تحت سطح الأرض، حيث ينضغط الحديد وصولًا إلى كثافةٍ تساوي كثافة الماء ١٢ مرة. وتُظهر تجارب مختبرية أن درجة الحرارة هذه تقارب ٥ آلاف درجة مئوية (أي ١٠ آلاف درجة فهرنهايت)، وبالمصادفة البحتة، تكاد هذه الدرجة تساوي درجة الحرارة على سطح الشمس. ونظرًا إلى أن اللب الداخلي عبارة عن كتلة صلبة من الحديد والنيكل وأنه بذلك يُعَد موصلًا جيدًا جدًّا للحرارة، يمكن أن نجزم بأن هذه الدرجة ثابتة إلى حدٍّ كبير عبر كل أجزاء اللب الداخلي. لذا فدرجة الحرارة عند مركز الأرض أيضًا تبلغ نحو ٥ آلاف درجة مئوية.

وبفضل انقسام بنية اللب المكون من الحديد والنيكل إلى لب داخلي صلب محاط بلُب خارجي سائل، فإن تلك البنية مسئولة عن واحدة من أبرز سمات الكوكب اللافتة؛ وهي مجاله المغناطيسي، الذي يقدم لنا عدة فوائد منها أنه يحمينا من إشعاع كوني ضار. لا أحد يعرف كيفية تولُّد المجال المغناطيسي بالضبط، ولكن لا بد أنه ناتج من تيارات مادية تدور حاملةً المادة في اللب الخارجي الموصِّل للكهرباء وتولِّد المجال المغناطيسي في أثناء ذلك كأنها دينامو. وتُظهِر حسابات وتجارب أن مثل هذه الآلية لن تكون ممكنة إذا كان اللب كله سائلًا، لأن المائع عندئذٍ سيدور في خطوط أكثر استواءً ولن يولِّد مجالًا مغناطيسيًّا. لذا فأفضل تفسير لتولُّد المجال المغناطيسي للأرض أن اللب الصلب محاط بأسطوانات من مواد تدور دورانات دوامية في اللب الخارجي، ككرة تنس محاطة بحلقة من أقلام تحديد سميكة واقفة حولها في وضعية رأسية. إذ يمتزج الحمل الحراري بالقوى المُسببة للالتواء الناتجة من دوران الأرض (أو تأثير كوريوليس) فيولِّدا في كلِّ «قلمِ تحديد» مجالًا مغناطيسيًّا يُسهِم في المجال المغناطيسي الكلي. ولكن في غضون ٤ مليارات سنة من الآن، عندما يتصلب اللب كله، ستفقد الأرض مجالها المغناطيسي القوي. وهذا خبر سيئ لأي شكل من أشكال الحياة سيكون موجودًا حينئذٍ، ولكن ليس فيه ما يُقلقنا نحن.

هذا هو كل ما نعرفه عن عمق باطن الأرض. غير أن السؤال التالي يعيدنا إلى السطح والعلاقة بين الكوكب وبيننا.

السؤال الثامن

# لماذا الدم مالح كمذاق البحر؟

كان السؤال الذي طُرِح عليَّ في الحقيقة هو: «لماذا يُشبه مذاقُ البحر الدم؟» لكن الترتيب الصحيح معكوس هنا، لأن البحر وُجِد أولًا ثم تطور الدم لاحقًا. لذا فمن أجل إيجاد الإجابة، عليَّ أن أعكس الترتيب، وأبدأ بسؤال «لماذا البحر مالح؟» لذا احتفِظ بسؤال الدم على الهامش في ذهنك مؤقتًا.

تهيمن المحيطات على سطح الأرض. فمعظم كوكبنا مُغطًّى بطبقة رقيقة من مياه مالحة في الغالب تُشكل ٩٧ في المائة من إجمالي المياه الموجودة على سطح الكوكب. وتتيح هذه المحيطات موطنًا لمعظم أشكال الحياة على الأرض، وتحمل نحو ٥٠ مليون طن من الملح المذاب؛ الذي يتكون معظمه من الملح الشائع، أي كلوريد الصوديوم. وبذلك يُشكِّل الصوديوم والكلور نحو ٣٫٥ في المائة من وزن المحيطات، لذا يحتوي كل لتر من مياه البحر على نحو ٣٥ جرامًا من الملح. صحيح أن مياه البحر تحوي أملاحًا أخرى، أبرزها البوتاسيوم والكالسيوم، لكن الصوديوم والكلور معًا يشكلان نحو ٨٥ في المائة من كمية «المواد الصلبة» في المحيطات. وإذا أمكن استخراج كل هذا الملح ونشره بالتساوي على سطح الأرض، فسيكوِّن طبقة سُمكها أكبر من ١٦٠ مترًا.

لكن المحيطات صغيرة جدًّا مقارنة بطبقات الصخور التي تحدثتُ عنها في الإجابة السابقة. فقاع أعمق محيط يقع على بُعد نحو ١١ كيلومترًا فقط تحت سطح البحر، وإذا تكرَّمنا وقلنا إنَّ موطن الحياة يمتد إلى قمة أعلى جبل، على ارتفاع نحو تسعة كيلومترات فوق مستوى سطح البحر، فعندئذٍ سيكون النطاق الصالح للحياة كله محصورًا في طبقة لا يزيد سُمكها على ٢٠ كيلومترًا. وبالنسبة إلى قُطر الأرض، يعادل هذا السُّمك سُمك قشرة تفاحة بالنسبة إلى حجم التفاحة كلها. لذا يتأثر تركيب المحيطات تأثرًا شديدًا بالعمليات الجيولوجية التي تتضمنها حركة الصفائح التكتونية وتمدد قاع البحر، خصوصًا النشاط

البركاني عند حيود وسط المحيطات. ولكن لم يكن أيٌّ من ذلك معروفًا في عام ١٧١٥، عندما توصل إدموند هالي إلى أول تفسير علمي لملوحة البحر.

طرح هالي تخمينًا معقولًا بالنسبة إلى الزمن الذي عاش فيه، إذ افترض أن الأنهار تلتقط شوائب من الصخور التي تتحرك فوقها وتُرسبها في البحر، فتتراكم الأملاح هناك ويزداد تركيزها. ويرجع تراكم الأملاح إلى أن المياه العذبة تتبخر تاركةً الأملاح كما هي، ثم يُعاد الماء إلى فوق اليابسة في صورة بخار، حيث يُمطر ويكمل الدورة. واقترح هالي إمكانية الاستعانة بذلك لتقدير عمر الأرض، بقياس كمية الملح الموجودة في الأنهار وحساب المدة الزمنية التي استغرقها البحر ليصل إلى ملوحته الحالية. لكنه لم يستطع تطبيق الفكرة لعدم توافر قياسات لكمية الملح الموجودة في كل أنهار العالم — علمًا بأن تركيز الملح في البحر أكبر نحو ٢٠٠ مرة من تركيز الملح في الأنهار — أو حجم المحيطات.

وربما يكون من حُسن حظ هالي أنه لم يستطع إجراء تلك الحسبة لأنها لم تكن لتنجح. فبادئ ذي بَدء، تقوم حسبته على افتراض أن المحيطات كانت مياهًا عذبة خالصة في بداية نشأتها، ولا يوجد دليل على ذلك (صحيح أنه لا يوجد دليل ينفي ذلك أيضًا، لكن هذا لا يجدي نفعًا كبيرًا). وثانيًا، يفترض هالي أن المحيط أشبه ببحيرة داخلية منغلقة على نفسها يظل حجمها ثابتًا، وأن كل الملح الذي يُلقى فيها يبقى هناك. لكننا صرنا نعلم أن المحيطات تتغير دائمًا على مرِّ فترات زمنية جيولوجية، إذ يرتفع قاع البحر أحيانًا بسبب النشاط التكتوني ويجف مكوِّنًا طبقاتٍ كبيرة من الملح، بينما يُدفَع إلى أسفل القشرة القارية عند أماكن أخرى، فيذوب ويُنشئ نشاطًا بركانيًّا يقذف خليطًا من المواد الكيميائية إلى الغلاف الجوي، ويكوِّن صخورًا جديدة تحتوي على معادن كثيرة من البحر، وبذلك يُتيح المواد الخام اللازمة لتجوية مستقبلية ستحدث بفعلِ أمطار وأنهار تُعيد تلك المعادن إلى البحر. وصحيح أن بعض الجيوفيزيائيين يُقدرون أن هذا النشاط حاليًّا يكاد يكون في حالة اتزان، بما يجعل ملوحة البحار شبه ثابتة. لكن الحال لم تكن هكذا دائمًا.

ولحساب التغيرات التي طرأت على ملوحة البحر على مر الزمان الجيولوجي، نحتاج أولًا إلى معرفة مصدر كل المياه أصلًا، وهذا لا يزال محل جدل بين الخبراء. صحيح أنهم متفقون، كما أوضحتُ سابقًا، على أن الأرض تكونت منذ نحو ٤٫٥ مليار سنة، من تراكم الحطام في المجموعة الشمسية عندما كانت وليدة؛ إذ تصادمت الصخور معًا وتراكمت لتكوِّن كوكبًا أوليًّا جَذَب مزيدًا من الحطام إليه بفعلِ الجاذبية وظل يجرف الحطام

من المنطقة المحيطة به حتى أخلاها تمامًا. ثم أسفر تصادم تلك النيازك الصخرية عن تسخين الكوكب الوليد حتى حوَّله إلى كرة منصهرة ظلَّت تبرد تدريجيًّا على مرِّ بضع مئات من ملايين السنين، وكوَّنت قشرة صلبة حولها. لكنهم منقسمون حول نشأة المياه؛ إذ ترى مدرسةٌ فكرية أن الغازات التي انبعثت من باطن الأرض، وتدفقت إلى الخارج من البراكين، كوَّنت الغلاف الجوي حول الأرض وأنتجت بخار الماء الذي سقط في صورة أمطار ليكوِّن أولى المحيطات. فيما تقترح المدرسة الفكرية المنافسة، التي أراها تبدو أكثر منطقية، أن حطامًا جليديًّا أتى من مكانٍ أبعد عن الشمس بعدما تبقى من تكوين الكواكب، وكان يُشبه المذنبات في جوهره، حَمَل معه الماء إلى الكوكب الوليد في المراحل النهائية من تطوره. ولكن في كلتا الحالتَين، ثمة أدلة جيولوجية على أن المحيط الأول قد أنشئ قبل أقل من ٤ مليارات سنة بقليل، عندما كانت الأرض أنشط جيولوجيًّا بكثير مما هي عليه حاليًّا. ومن الممكن تمامًا بالطبع أن تكون كلتا العمليتَين قد أسهمت في تكوين ذلك المحيط.

وبغض النظر عن الكيفية التي تكوَّن بها المحيط الأول، فلا بد أنه اغتنى بالمعادن، بما فيها الملح الذي يهمنا، بفعلِ النشاط الجيولوجي العنيف تحت سطح الماء في بدايات عمر الأرض. إذ تُخبرنا الأدلة الجيولوجية بأن حيود المحيط كانت أطول امتدادًا وأشد نشاطًا آنذاك، كما هو متوقع عندما كان الكوكب لا يزال في مرحلة البرودة من حالته البُدائية، وأن الأجزاء الأولى من القشرة القارية كانت أصغر من القارات اليوم وكانت منتشرة في مختلف أنحاء الكرة الأرضية. ثم ازداد سُمك القشرة القارية بمرور الزمن الجيولوجي بسبب النشاط البركاني، خصوصًا على طول الحواف التي يُدفَع عندها قاع البحر إلى أسفل القشرة القارية. ومن ثم، فأفضل طريقة يمكن للجيولوجيين الاستعانة بها لتقدير كمية الملح التي كانت موجودة في المحيط الأول هي إضافة كمية الملح المترسب في طبقات كبيرة في مختلف أنحاء العالم وحساب تأثير تلك الكمية على الملوحة إذا أذيبت كلها في البحر مجددًا.

تجدر الإشارة إلى أن طبقات الملح هذه ضخمة؛ إذ تُقاس كمية الملح التي تحويها بآلاف مليارات الأطنان. وتوجد رواسب هائلة في أماكن عديدة، بما فيها أستراليا وكندا وإيران وعمان وباكستان وبيرو والمملكة العربية السعودية. وقد ترسبت هذه الطبقات أثناء مراحل نادرة من النشاط التكتوني شهدت تفكك قاراتٍ عظمى مثل بانجيا وتكوين بحارٍ ضحلة شاسعة (كالبحر الأبيض المتوسط والبحر الأسود حاليًّا) صارت منغلقة

على نفسها وسط اليابسة وجفَّت بعدئذٍ، ثم دُفن الملح في أثناء مراحل لاحقة من النشاط التكتوني. تكرَّر ذلك أكثر من مرة خلال تاريخ الأرض، لكني سأسلط الضوء هنا على تفكُّك القارة التي خلَّفت قارة بانجيا، والتي تُسمى رودينيا (وتُعرَف أحيانًا باسم بانجيا الأولى)، في نهاية فترة زمنية جيولوجية تُسمَّى عصر ما قبل الكمبري، منذ نحو ٥٤٠ مليون سنة؛ لأن هذا الحدث بالأخص مهم لأشكال الكائنات الحية المشابهة لنا.

يُسمى عصر ما قبل الكمبري هكذا لأنه أتى قبل العصر الكمبري الذي شهِد تنوع الحياة وانتشارها عبر كوكب الأرض. صحيح أن عصر ما قبل الكمبري امتد عبر ٩٠ في المائة من تاريخ الأرض، لكن الحياة في محيطاته كانت مقتصرة على كائنات حية بسيطة، كالبكتيريا المعروفة باسم الطحالب الخضراء المزرقة. وكان من أسباب ذلك ارتفاع ملوحة المحيطات. أمَّا في بداية العصر الكمبري، فقد انخفضت الملوحة، وأدى ذلك إلى عدة تغيرات كيميائية اتضح أنها مفيدة للحياة، من بينها تسهيل إذابة الأكسجين في مياه البحر. إذ شجعت هذه التغيرات الكيميائية على حدوث الطفرة التي شهدت انتشار الحياة خارج المحيطات وعبر اليابسة. وهذه الطفرة، الظاهرة في السجل الأحفوري، هي السبب الذي جعل الجيولوجيين يطلقون على هذه الفترة بداية العصر الكمبري.[١]

لذا رُبطت طفرة انتشار الحياة على الأرض رَبطًا وثيقًا بالانخفاض الشديد في ملوحة المحيطات. صحيح أن مقدار الانخفاض الذي حدث آنذاك لا يزال محل جدل بين الجيولوجيين. ولكن ربما لا يكون هذا الجزء من الإجابة كامنًا في الجيولوجيا، بل في علم الأحياء. وهو ما يرتبط بالجزء المتعلق بالدم في السؤال الذي طُرح عليَّ.

كانت الحياة طَوال معظم تاريخها على كوكب الأرض مكونةً من كائنات وحيدة الخلية طافية في البحر. وقد وصفتُ آلية عمل الخلايا في كتابي «ثمانية احتمالات مستبعدة»، لكن كل المهم هنا أن ما يحدث داخل الخلايا يعتمد على كيمياء الحمض النووي وكيفية تفاعله مع جزيئات أخرى لتشغيل آليات عمل الخلية. وكل هذا محاط بجدار خلوي يسمح بإنفاذ بعض الأشياء (التي ربما نصفها عمومًا بالمواد المغذية) من الداخل إلى الخارج ويسمح بخروج أشياء أخرى (وهي النفايات الناتجة). كانت البيئة الخارجية المحيطة بالخلايا في

[١] يمكن اعتبار اسم «الكمبري» مجرد تسمية عادية، كالمصطلحات الجيولوجية الأخرى. فهو في الحقيقة مستمد من كلمة «كمري» التي تُعد اسمًا آخر لويلز، حيث وجد الجيولوجيون الروَّاد صخورًا مهمة من ذلك العصر نفسه.

سهول الملح في بادووتر، ولاية كاليفورنيا، الولايات المتحدة. (ميكنتورتون، CC BY-SA 4.0، عبر موقع «ويكيميديا كومنز».)

الأصل هي البحر المالح بالطبع. ويعد الدم بمثابة صورة مصغرة من البحر. إذ يتكون من سائل مائي يُسمى البلازما تطفو فيه أنواع مختلفة من الخلايا، منها الخلايا الحمراء التي تُكسبه لونه. ويحتوي هذا الجزء المائي من الدم على ملح ومواد أخرى بتركيزٍ يُشبه تركيزها في مياه البحر إلى حدٍّ لافت. وتبلغ نسبة البلازما في الدم نحو ٥٥ في المائة؛ لذا تُشكل الخلايا أقل من نصف إجمالي كمية الدم. أي أن خلايا الدم تطفو في محيط خاص بها.

كان أول مَن لفت الانتباه إلى المدلولات التطورية الضمنية لهذا هو عالِم الكيمياء الحيوية الكندي آرتشيبولد ماكالوم، في بحث علمي نُشِر في عام ١٩٢٦. إذ أدرك أن هذا التشابه يعني ضمنيًّا أن أسلافنا تطوروا في البحر، وأن دمنا يحمل أثرًا متبقيًا من الظروف التي تطوروا فيها. ربما تتساءل لماذا مضى كل هذا الوقت الطويل قبل أن يشير أحدٌ إلى شيء يبدو واضحًا لك على الأرجح، لكن كتاب تشارلز داروين «عن أصل الأنواع» لم يُنشَر إلا في عام ١٨٥٩؛ أي بعد عام واحد من ولادة ماكالوم. والفترة الممتدة من عام ١٨٥٩ إلى عام ١٩٢٦ كانت ٥٧ عامًا فقط، أي تكاد تساوي نصف الفترة الممتدة من عام ١٩٢٦ إلى وقت كتابة هذه الكلمات؛ لذا فالمدلولات الضمنية لنظرية التطور آنذاك لم تكن مفهومة بالكامل بعد.

وبعد ذلك بعشر سنوات، نشر آرثر بيرس الذي كان أستاذًا لعلم الحيوان في جامعة ديوك آنذاك، كتابًا بعنوان «هجرات الحيوانات من البحر إلى اليابسة» قال فيه إنَّ «التشابه العام بين دماء الحيوانات ومياه البحر فُسِّر على أنه يُبين أن الحيوانات كلها نشأت في البحر» وأشار إلى «الاعتقاد السائد» الذي يؤمن بأن الدم صورة معدلة من ماء البحر. فيما

كتبت راشيل كارسون إحدى رواد علم البيئة في كتابها الأكثر مبيعًا «البحر من حولنا» تقول: «الأسماك والبرمائيات والزواحف، والطيور والثدييات ذوات الدم الحار؛ بل وكل منَّا يحمل في عروقه سائلًا جاريًا مالحًا يحوي مزيجًا من عناصر الصوديوم والبوتاسيوم والكالسيوم بالنِّسب ذاتها التي توجد بها في ماء البحر تقريبًا.»

وفي عام ١٩٥٧، عُقدت الندوة الدولية الأولى عن أصل الحياة على كوكب الأرض في موسكو. فاستغلت رايسا بيرج أستاذة علم الأحياء التطوري تلك المناسبة لتوضح لهذا الجمهور المتخصص أن أول حُجة في «أهم الحجج المؤيدة للفرضية القائلة بأن الحياة بدأت في المحيط فقط هي التشابه بين تركيب الملح في سوائل الجسم لدى حيوانات البر وملح مياه المحيطات» والثانية أن «التشابه بين تركيب ملح مياه المحيطات وملح سوائل أجسام حيوانات البر» لا يمكن تفسيره إلا بالاستناد إلى عملية التطور.

المقصد أن الكائنات الحية الأولى التي عزلت نفسها عن البحر ظلت محتاجة إلى سائل داخلي يحمل المواد في كل أجزاء أجسامها، ليوصل العناصر المغذية إلى الخلايا ويحمل النفايات الناتجة بعيدًا عنها، وقد كان هذا السائل في الأساس مياهًا بحرية معدَّلة من المياه التي كانت تحيط بتلك الكائنات وقتما اتخذت هذه الخطوة التطورية في الزمن الجيولوجي. ومنذ ذلك الحين، تغيرت ملوحة المحيطات، لكن العمليات الكيميائية الجارية داخل الحيوانات المتطورة حافظت على تركيز دمائها كما هو.

إذن فما مدى التشابه بين الدم (أو بالأحرى البلازما) ومياه البحر، وما الذي يخبرنا به ذلك عن التطور؟ تذكَّر أن متوسط نسبة ملوحة مياه البحر في محيطات العالم تبلغ نحو ٣,٥ في المائة. فيما تبلغ نسبة ملوحة دم الإنسان ٠,٩ في المائة؛ أي إنَّ ملوحة مياه البحر تعادل ملوحة الدم نحو ٣,٥ مرات. وليس دم الإنسان فقط. فكل الحيوانات الفقارية (أي الحيوانات ذات الأعمدة الفقرية، التي تعني كل الأسماك والطيور والثدييات والبرمائيات والزواحف) لديها نفس هذا التركيز الفريد من الملح في دمائها.[٢] ويعد هذا واحدًا من أدلة عديدة تُظهر أن هذه الحيوانات كلها منحدرة من سلف مشترك.

وإذا صغنا هذه المعلومة بالعكس، فسنقول إنَّ ملوحة دم الفقاريات كلها، وليس دمك فقط، تكاد تساوي ربع ملوحة مياه البحر فقط. صحيح أن هاتين النسبتَين متقاربتان

[٢] من المفترض أن الأمر نفسه ينطبق على أنواع الفقاريات التي انقرضت، كالديناصورات؛ لذا فمن المرجح أن دمك مشابه جدًّا لدم الديناصورات.

بما يكفي لإقناعنا بأن الدم مياه بحرية معدَّلة (لأن الدم في النهاية يمكن أن يصبح أشد ملوحة من مياه البحر بمائة مرة أو أقل ملوحة منها بمائة مرة ما دام منفصلًا عنها)، ولكن قد يبدو هنا للوهلة الأولى أن هذا لغز مثير للفضول يجب على خبراء علم الأحياء التطوري تفسيره. فإذا كانت مياه البحر تصير أقل ملوحة بمرور الزمن الجيولوجي، فكيف لدمائنا أن «تظل محتفظة» بملوحة أقل من الملوحة الحالية؟ ولكن يمكن تفسير ذلك بطريقة واضحة. إذ تُظهر أدلة حفرية وأدلة أخرى أن الفقاريات الأولى تطورت منذ نحو ٥٠٠ مليون سنة، وإذا كان خبراء علم الأحياء التطوري على صواب، فإنَّ ذلك التطور قد حدث في مياه ذات ملوحة تعدل رُبع متوسط ملوحة البحار الحالية فقط. يكمن مفتاح اللغز في كلمة «متوسط» هذه.

إحدى المسائل التي لا أزال أجد صعوبة في فَهْمها، وإن كنت أعرفُ بالاستدلال المنطقي أنها صحيحة حتمًا، هي أننا عندما نقول إنَّ الفقاريات كلها منحدرة من سلف مشترك، فإننا نقصد ذلك حرفيًّا. أي إنَّ فردًا واحدًا فقط حدثت فيه التغيرات الجينية (طفرات في الحمض النووي) التي بدأت سلسلةً من الخطوات على طول مسار مؤدٍّ إلى تطور العمود الفقري. ولا بد أن هذا الفرد كان لديه صلات قرابة بالطبع. أي أفرادٌ آخرون من نفس نوعه استطاع أن يتزاوج معهم آنذاك. لكن نَسل هذا الفرد هُم فقط الذين تطوروا على طول السلالات المتفرعة المختلفة التي أدت إلى نشأة كل الأسماك والطيور والثدييات والبرمائيات والزواحف. وليس بالضرورة أن ذلك الفرد المتفرد كان يعيش في أعماق المحيط. إذ تخبرنا الأدلة الكيميائية الحيوية بأنه كان يعيش في جزء مخفف نسبيًّا من المحيط، كمصبٍّ ضحل كانت مياه الأنهار العذبة تختلط عنده بمياه البحر المالحة. بل وتوجد أسباب وجيهة تُرجِّح أن مثل هذه البيئة كانت صالحة للحياة قبل ٥٠٠ مليون سنة. فمن المفترض أن المياه الضحلة سمحت بتغلغل أشعة الشمس، فأتاحت بذلك الطاقةَ التي تعتمد عليها كل أشكال الحياة على سطح الأرض. ومن المرجح أن انخفاض ملوحة هذه المياه سمح بإذابة مزيد من الأكسجين فيها، فشجَّع تكاثر الكائنات الحية وبذلك شجَّع التطور.

ومن ثم، فهذه هي إجابة سؤال «لماذا الدم مالح؟» لأن سَلَف كل الفقاريات كان يعيش، منذ نحو ٥٠٠ مليون سنة، في مصب دافئ ضحل وسط مياه تبلغ ملوحتها نحو ٠٫٩ في المائة، أي إنها كانت تحمل نحو تسعة جرامات من الملح مذابة في كل لتر من الماء. ولكن قبل الانتقال إلى مناقشة سؤال تطوري آخر مثير للاهتمام، يجدر أن نتوسع في هذه

المسألة قليلًا بإمعان النظر في كيفية تأقلم إحدى سلالات الفقاريات، وهي الأسماك، مع العيش في مياه ذات درجات ملوحة مختلفة.

وتعد الأسماك بالأخص مثيرة للاهتمام هنا لأن موضوع حفاظ حيوانات اليابسة على ملوحة دمائها ممل؛ لأن ملوحتها بقيت ثابتة كما هي فور خروجها من الماء. فالثدييات أمثالنا والطيور والزواحف تمتص أملاحًا ومياهًا عذبة في طعامها وشرابها، وتستخدم ما تحتاج إليه للحفاظ على تركيز الأملاح المعتاد في دمها (أي التركيز الذي تطورت به حتى تأقلمت على استهلاكه قبل خروجها من البحر) وتُفرز ما يكفي للحفاظ على ثبات التوازن نفسه؛ ليس فقط في حيوان معين طَوال حياته، بل في كل الأجيال منذ خروج أسلافنا من البحر. ولا يتأثر ذلك بالبيئة الخارجية ما دام يوجد لدى تلك الكائنات طعام لتأكله ومياه لتشربها.

أمَّا الأسماك، فتُجابه مشكلات مختلفة. فهي تُضطر مثلنا إلى امتصاص الماء الذي تحتاج إليه من البيئة المحيطة بها ثم تعالجه ليصل إلى الملوحة اللازمة لدمائها. لكن ملوحة الماء الذي تمتصه تعتمد على المكان الذي تعيش فيه. ومع ذلك، فدماء الأسماك — كل دماء الأسماك الفقارية — تحمل نفس ملوحة دمائنا.

لا تواجه الأسماك التي تعيش في مياه قليلة الملوحة، كمصبات الأنهار الضحلة التي يبدو مُرجحًا أنها شهدت ظهورَ أول الكائنات الفقارية، مشكلة كبيرة في ذلك؛ لأن ملوحة المياه المحيطة بها لا تختلف كثيرًا عن ملوحة دمائها. لكن الأسماك التي تعيش في المحيطات المفتوحة محاطة بمياه أشد ملوحة بكثير من تركيز الأملاح اللازم لدمائها. لذا فمع انتقال أسلافها إلى هذه البيئة على مرِّ أجيال عديدة، تطورَت لديها آلية كيميائية حيوية للتعامل مع ذلك. صحيح أنها تُضطر إلى شرب ماء يحتوي على ملح أكثر بكثير مما تحتاج إليه، لكنها تُرشح هذا الماء وتفصل عنه الملح الزائد في كليتَيها، ثم تُفرز كميات صغيرة من البول العالي التركيز تتخلص فيها من الملح الزائد. وكذلك تستعين بآلية أخرى لضخ الصوديوم إلى الخارج من خياشيمها، باستخدام كمية من الطاقة هنا أيضًا.

أمَّا الأسماك التي انتقل أسلافها في الاتجاه الآخر؛ أي من مياه قليلة الملوحة إلى مياه عذبة خالصة، فاكتسبت آلية معاكسة تمامًا. إذ تحتاج تقريبًا إلى كل الملح الذي تستطيع استخلاصه من طعامها للحفاظ على تركيز الأملاح في دمها، وتحتفظ به بإخراج كميات كبيرة من البول المخفف جدًّا (تصل إلى ثلث وزن جسمها يوميًّا)؛ وكما خمنتَ، لديها آلية في خياشيمها لامتصاص مزيد من الأملاح.

وعمومًا، يعني ذلك أن أسماك المحيط لا تستطيع العيش في المياه العذبة، وأن أسماك البحيرات والأنهار ذات المياه العذبة لا تستطيع العيش في البحر. ولكن كما نرى في الكثير من القواعد، فاستثناءات هذه القاعدة مثيرة جدًّا للاهتمام. إذ تقضي بعض الأسماك كالسلمون والأنقليس جزءًا من حياتها في المياه العذبة وجزءًا من حياتها في البحر. فحمضها النووي يحمل الشفرة الكيميائية الحيوية التي تخص كل نوعٍ من أنواع السلوك، وتتعرض لتبديل حيوي يقلب السمات الكيميائية الحيوية للفرد من نمطٍ إلى آخر في الوقت المناسب. ولكن أين يحدث التبديل؟ عادة ما يطرأ التغيير لدى تلك الأسماك، التي يتعيَّن عليها تبديل آلية توازن الملح عندها من نظام إلى آخر، في مصبات المياه قليلة الملوحة في الطريق بين موائل المياه المالحة وموائل المياه العذبة، حيث تكون ملوحة الماء متطابقة مع ملوحة دمائها.

كل هذا يُبرز سمة رئيسية من سمات التطور. وهي أنك يجب أن تبنيَ على ما حدث سابقًا. فإذا افترضنا أنك تصمم سمكةً معينة لمحيطٍ مالح مثلًا، فسيكون من الأسهل بالطبع أن تمنحها دمًا مطابقًا لملوحة الماء. فالعمليات الكيميائية الحيوية التي تعدل ملوحة الدم وتُقللها تُعد أكثر تعقيدًا، وتستهلك موارد كيميائية وتتطلب مزيدًا من الطاقة، وكل هذا يمنح الأسماك المصممة بذكاء أفضليةً عليها. لكن التطور لا يمكنه التخلص من الآلية التي كانت تعمل في المياه القليلة الملوحة والبدء من جديد؛ بل لا بد أن يبنيَ على الموجود بالفعل. وكذلك ففي العديد من الأنواع الحية اليوم، غالبًا ما توجد آثار متبقية من نمط حياة أسلافها، أيْ سماتٌ لم تعد مهمة ولكن لم يُتخلَّص منها. حتى أجسادنا نفسها تحمل بقايا تطورية واضحة من هذا النوع، كما توضح الإجابة التالية.

السؤال التاسع

# لماذا الرجال أكبر حجمًا من النساء؟

ليس كل الرجال أكبر حجمًا من كل النساء. ولكن في العديد من المجتمعات البشرية المختلفة في أجزاء مختلفة من العالم، تجد أن متوسط طول الرجل أكبر من متوسط طول المرأة. لا بد أن ذلك له سبب ما، والسبيل إلى معرفة التفسير يكمن في اتباع نصيحة تشارلز داروين بأننا ينبغي أن نشرع في «النظر إلى الإنسان كما ينظر علماء التاريخ الطبيعي إلى أي حيوان ثديي آخر».[1] بالطبع كان داروين يعني بكلمة «الإنسان» النوعَ البشري كله، وكان مقصده أن التطور أثَّر في نوعنا كيفما أثر في كل الأنواع. ومن أجل أي مشككين، يطرح سؤالَين توضيحيَّين دون أن ينتظر إجابة لهما؛ إذ قال:

> مَن يريد تحديد ما إذا كان البشر نسلًا مُعدَّلًا من شكلٍ معين كان موجودًا قبلهم، فمن المفترض أن يسأل أولًا عمَّا إذا كانوا متفاوتين، ولو قليلًا، في البنية الجسدية والقدرات العقلية؛ وإذا كانوا كذلك بالفعل؛ فينبغي أن يسأل عمَّا إذا كانت تلك الفروق تنتقل إلى نسلهم وفق القوانين السائدة لدى الحيوانات الأدنى رتبةً أم لا. أكرر مرة أخرى، هل نستطيع أن نجزم، على حد معرفتنا، بأن التفاوتات ناتجة من الأسباب العامة نفسها لدى كائنات حية أخرى، ومحكومة بالقوانين العامة نفسها التي تنطبق على تلك الكائنات؟

الإجابة عن كل ذلك هي «نعم» بالطبع. فكما هي الحال لدى كائنات أخرى، يختلف نسل البشر قليلًا عن آبائهم، ما يُنشئ مجموعة متنوعة من الأفراد. وإذا كان الأفراد لديهم

---

[1] انظر كتاب «نشأة الإنسان» http://darwin-online.org.uk/.

خصائص معينة تجعلهم أنجح، بمعنى أنها تجعلهم يتركون نسلًا أكثر عددًا بدورهم، فإنَّ هذه الخصائص ستنتشر بين المجتمع وتصبح شائعة على مر ملايين السنين. هذا هو المقصود بالانتقاء الطبيعي. وهي عملية بطيئة تستغرق زمنًا طويلًا. أي إنَّ الآلاف القليلة التي انقضت من السنين منذ إقامة الحضارة البشرية لم تكن كافيةً لإحداث تغيير ملحوظ في آثار تلك العملية، وكلنا نحمل خصائص تطورت هكذا وكانت نافعة لأسلافنا. لذا فلا بد أن الرجال أكبر حجمًا من النساء لأن هذه كانت «استراتيجية» تطورية نافعة لأسلافنا، حتى وإن لم تكن مهمة جدًّا في المجتمع الحديث.

وفي الحقيقة يُعد هذا غريبًا بعض الشيء. صحيح أنه يبدو طبيعيًّا لدى معظم الناس؛ لأن الكثيرين منَّا لا يعرفون شيئًا عن الحياة الخاصة للأنواع الأخرى. ولكن من الشائع في بعض الأنواع الأخرى أن تكون الأنثى أكبر حجمًا من الذكر. وهذا له مزايا تطورية واضحة. فالإناث عليها تكريس الكثير من الموارد لصنع البيض، ومُلزَمة في حالة الثدييات بتغذية الجنين النامي داخل جسدها. فيما يبدو أن الذكر لا يؤدي أي دور[٢] سوى تلقيح البيض ثم يركض (أو يطير، أو يسبح) ليُخصب بيض إناث أخرى (أو تأكله الأنثى، في بضع حالات قليلة، لتوفر مزيدًا من الموارد للبيض النامي). وهذه القاعدة التي يشيع فيها أن الإناث أكبر حجمًا من الذكور تسود بين أغلب الحشرات؛ ولمَّا كان عدد أنواع الحشرات أكبر بكثير من عدد كل الأنواع الحيوانية الأخرى مجتمعة، فهذا يعني أن تلك القاعدة تنطبق على معظم الأنواع في المملكة الحيوانية ككل. صحيح أنها أقل شيوعًا في عالم الثدييات، لكنها موجودة في بعض الأنواع الثديية، من بينها الأرانب والخفافيش وفقمات شائعة. ومن السهل جدًّا رؤية الميزة التطورية الكامنة في أن تكون الإناث أكبر حجمًا من الذكور لدرجة أن السبيل إلى فهم السبب الذي يجعل الرجال أكبر حجمًا من النساء يكمن في النظر إلى الاستثناءات الأخرى لهذه القاعدة، ومحاولة اكتشاف التشابهات المشتركة بينها.

مع أننا لسنا متيقنين تمامًا من الكيفية التي بدأ بها التكاثر الجنسي، كما ألمحتُ سابقًا، فإنه أدى إلى استراتيجيات تطورية مختلفة لدى الذكور والإناث، ما أسفر عن منافسة بين الجنسَين تشكل جزءًا من المنافسة التطورية بين الأفراد في أي نوع.

[٢] كدتُ أقول: «لا يؤدي أي غرض»، لكني تذكرت أن التطور ليس له غرض بالطبع؛ فهو عملية عمياء.

وهذا جدير بالتوضيح؛ لأنه من السهل أن يختلط علينا الأمر فلا نعرف بالضبط أيُّ الأفراد هُم المشاركون في المنافسة التي تُعد جزءًا أساسيًّا من التطور بفعل الانتقاء الطبيعي. عادة ما يُضرَب المثل هنا بأسود تطارد غزلانًا لتأكلها. ربما تظن للوهلة الأولى أن الأسد الساعي إلى الأكل ينافس الغزال الساعي إلى الهرب. لكن المسألة أكثر تعقيدًا من ذلك بقليل. فالأسد سيصطاد أبطأ غزال؛ لذا فإنَّ ما يهم الغزال في الحقيقة ليس أن يركض أسرع من الأسد، بل أن يكون أسرع من أبطأ غزال راكض في القطيع. أي أن الغزلان يتنافس بعضها ضد بعض على ألَّا تكون بطيئة. وبذلك ففي الأجيال المتعاقبة، سيكون البقاء من نصيب الغزلان الأسرع، ولأنها تعيش لتورِّث حمضها النووي إلى نسلها، سيصبح مجتمع الغزلان في المجمل أسرع مع تعاقب الأجيال واحدًا تلو الآخر. وبالمثل، فالأسود التي تتكيف تكيفًا أفضل مع اصطياد الغزلان وأكلها بسرعة وبمخالب حادة وأسنان قوية ستكون هي الأنجح في جلب الطعام إلى جماعتها، وإطعام نسلها، وبذلك ضمان بقاء حمضها النووي.

وهذه نقطة أخرى مثيرة للاهتمام. فاللبؤة هي التي تصطاد وتجلب الطعام إلى جماعتها. لكن الأسد الذكر أكبر حجمًا بكثير، مع أنه يقعد متكاسلًا أغلب الوقت. فكيف يساعد ذلك في ضمان توريث حمضه النووي؟ مع مَن يتنافس؟ يتنافس مع غيره من الذكور التي تريد أن تحل محله وتستولي على جماعته من الإناث. وهو ما يعطينا أول تلميح عن السبب الذي جعل الرجال أكبر حجمًا من النساء؛ ولكن قبل أن أخوض في تفاصيل ذلك، يجب أن أوضح المزيد عن آلية عمل التطور.

ثمة استراتيجيتان متطرفتان متناقضتان تمامًا تعززان فُرص توريث نُسَخ من الحمض النووي للفرد إلى الأجيال المتعاقبة. الأولى هي إطلاق عدد هائل من نُسخ مادتك الوراثية على أمل أن يظل القليل منها باقيًا. وهذا ما يُسمى «نموذج الدَّرْدار والمحار» لأن كلًّا من هذين النوعين يمارسانه. فإذا نظرت إلى تكاثر الشتلات التي تنمو تحت ظُلَّة من فروع إحدى أشجار الدَّرْدار، فسترى هذه الاستراتيجية أثناء سريانها؛ صحيح أن الكثيرين منا لم يشاهدوا يرقات محار بالفعل، لكنها هي الأخرى بالغة الصغر وتُنتَج بغزارة مماثلة. تتضح لك الغزارة المُفرطة الكامنة في هذه الاستراتيجية عندما تتوقف لحظة لتُذكِّر نفسك بأن عدد أشجار الدردار في الغابة سيظل كما هو إذا بقيت شتلةٌ واحدة فقط من الشتلات العديدة التي تنتجها كل شجرة طَوال حياتها لتنمو وتصبح شجرةً ناضجة. ومن ثم، تنشأ هنا منافسة ضارية، وتُتاح فرص كثيرة لتأخذ عملية التطور بالانتقاء الطبيعي مجراها. أكرر مرة أخرى أن المنافسة تكون بين أفراد من النوع

ذاته، وأن الأفراد الأكثر مواءمة لبيئتهم (الأكثر مواءمة كأنهم قطعةٌ ملائمة لأحجيةٍ ما) تنتقيهم الطبيعة ليبقوا ويتكاثروا بدورهم.

أمَّا على النقيض، فتوجد الاستراتيجية التي أُحب أن أسميها «كل بيضك في سلة واحدة»، لأنها حرفيًّا هي الطريقة التي تستخدمها الطيور التي تضع بيضها في أعشاش. تقوم هذه الاستراتيجية على إنتاج عدد قليل جدًّا من النسل في المرة الواحدة، لكنهم يحظَون بحماية ورعاية متقنة إلى أن يصيروا قادرين على الاعتناء بأنفسهم. يتجلى هذا بوضوح شديد في سلوك العديد من الطيور، والشيء الأشد لفتًا للانتباه أن هذا، في معظم الحالات، يتطلب قدرًا هائلًا من الجهد لدرجةٍ تستلزم مشاركة الوالدين كليهما لضمان بقاء أفراخهما على قيد الحياة. وعلى عكس نموذج «الدَّرْدار والمحار» الذي لم يكن الوالد يفعل فيه شيئًا على الإطلاق لمساعدة النسل، فإنه في استراتيجية «كل البيض في سلة واحدة» يبذل الوالدان جهدًا، إلى حد الإنهاك في كثيرٍ من الأحيان، لتنشئة أفراخهما الصغيرة. ونحن جميعًا على دراية كافية بدورة حياة الطيور لذا فلا داعيَ إلى الإسهاب في هذه النقطة. لكن ثمة نتيجة واحدة مثيرة للاهتمام ربما تكون متعلقة بمسألتنا (البشرية). ففي الحالات التي يتشارك الوالدان العمل هكذا، غالبًا ما يكون الفرق الظاهري بين الوالدين الذكر والأنثى طفيفًا جدًّا. وعادة ما يُضرب المثل هنا بالبجعات؛ إذ تضع بضع بيضات فقط كل عام، بمعدل بيضة واحدة في كل مرة، ويتشارك كلا الوالدين واجبات تنشئة الصغار، ومع أن الذكر أكبر حجمًا بقليل من الأنثى، يَصعُب التفرقة بينهما بنظرة سريعة.

صحيح أن الاختلافات بين الجنسين تبدو واضحةً في أنواع أخرى من الطيور. فذكر الطاووس مثلًا، بذيله الكبير الملون، لا يمكن الخلط بينه وبين أنثى الطاووس. لكن هذه الاختلافات غالبًا ما تكون نتيجة المنافسة بين الذكور لاجتذاب زوجة. فمن الواضح أن إناث الطواويس تنجذب بالفعل إلى الذكور ذات الذيل الملون الكبير، ومع أن لا أحد يعرف كيف بدأ هذا، فمن الواضح أن تفضيل الإناث للذيول الأكبر جعل الذكور ذوي الذيول الأكبر يورثون حمضهم النووي إلى الأجيال القادمة، وبذلك يتزايد طول ذيولهم بمرور الوقت حتى تصبح عائقًا يمنع الذكور من البقاء على قيد الحياة. لكن هذا النوع من الانتقاء الجنسي مسألة أخرى.

وإجمالًا، لا تختلف استراتيجية «البيض في سلة واحدة» في جوهرها عن نموذج «الدَّردار والمحار». ففي هذه الاستراتيجية أيضًا سيبقى عدد أفراد النوع، وليكُن البجع مثلًا، ثابتًا إذا أنتج كل زوجَين من البجع طَوال حياتهما فردَين فقط يبقيان حتى سن

البلوغ. كما أنها أيضًا تشهد «هَدرَ» كميات هائلة من الأفراد، وبقاء قلة قليلة من الأفراد المتكيفين جيدًا. وهذا يمنحك شيئًا جديرًا بأن تتأمله في المرة القادمة التي ترى فيها بطةً أمًّا تسبح عبر بركةٍ وخلفها طابور من صغارها. وهو أنه من المرجح ألَّا يبقى أيٌّ منها على قيد الحياة حتى سن البلوغ.

لكن استراتيجيات التكاثر لا تقتصر على هذه الأمثلة المتطرفة. بل توجد أنواع عديدة من الكائنات تمارس استراتيجياتٍ مختلطة من أنواع مختلفة؛ إذ تتضمن تقديم بعض الرعاية من الوالدين ولكن بقدرٍ أقل بكثير من تلك التي يقدمها زوجان من البجع مثلًا. إذ يجب الوصول إلى توازن بين إنتاج الكثير من النسل، لتضمن «انتشار» العديد من نسخ حمضك النووي، والقدرة على رعاية النسل فترة كافية ليحظَوا بفرصة ليبقوا على قيد الحياة، والأهم من ذلك، أن يتكاثروا بدورهم. وهذا يؤثر مباشرة في فهمنا للأسباب التي تجعل الذكور أكبر حجمًا من الإناث في بعض الأنواع الثديية، بينما تجعل الإناث أكبر حجمًا من الذكور في أنواع أخرى.

تُعد الثدييات بالأخص مهمةً هنا لأن الاستراتيجيتين المناسبتين للذكور والإناث كي ينجحا في البقاء عبر عملية التطور تتجسدان أساسًا في المثالَين المتطرفَين اللذين أوضحتهما للتو. فالأنثى ليس لديها خيار سوى إنتاج عدد صغير نسبيًّا من النسل ورعايتهم فترةً زمنية معينة قد تطول أو تقصُر. أمَّا الذكر، فيستطيع من حيث المبدأ أن يُلقِّح أعدادًا كبيرة من الإناث ولا يهتم بمصير النسل. غير أن المشكلة التي تواجه الذكر أنه، إذا لم يُسهم في رعاية نسله، فقد لا يبقون على قيد الحياة. يتجلَّى هنا في الخصائص البيولوجية البشرية مثال صارخ لهذا الاختلاف؛ لأن البشر حديثي الولادة يبقون عاجزين تمامًا فترة طويلة جدًّا (يكمن سبب ذلك في قصة تطورية أخرى شائقة مرتبطة بحجم دماغنا الكبير، لكنها لا تقع في نطاق هذه الإجابة). ومِن ثَم، يمكن للمرأة أن تصبح حُبلى بمعدل يصل إلى نحو مرة واحدة في السنة على أقصى تقدير، وحتى لو أنجبت أي إنسانة بضع مجموعات من توأمَين أو ثلاثة، سيكون استثناءً لافتًا إذا استطاعت إنجاب أكثر من ٥٠ طفلًا في حياتها. أمَّا الرجل، فيستطيع بسهولة، إذا وجد عددًا كافيًا من الشريكات المستعدات للتزاوج، أن يضاجع امرأة مختلفة كل أسبوع، وينجب ٥٠ طفلًا في عام واحد؛ ثم ٥٠ طفلًا في العام التالي، وهكذا دواليك على مرِّ عقود. لكن الصعوبة عندئذٍ ستكمن في توفير الرعاية اللازمة لهؤلاء الأطفال إذا أريدَ لهم البقاء على قيد الحياة فترة كافية لتوريث حمضه النووي إلى أي أجيال لاحقة.

تجدر الإشارة إلى أن هذا الافتراض تحقَّق بالفعل وهو مؤكد بالسجلات الموثقة لنساء البشر. ففي المثال الأشد تطرفًا بين الأمثلة المذكورة في السجلات الموثوقة التي بقيت حتى الآن، كان مولاي إسماعيل، آخر إمبراطور مغربي من سلالة مولاي الشريف، قد أنجب ما مجموعه ٥٢٥ ابنًا و٣٤٢ ابنة بحلول عام ١٧٠٣، ولم يتوقف عند هذا الحد (علمًا بأنه تُوفي في عام ١٧٢٧ عن عمر ٥٥ عامًا)، غير أن السجلات اللاحقة غير مكتملة. صحيح أن هذا شيء عظيم له، لكنه مفيد للنساء أيضًا، لأنه يضمن توريث حمضهن النووي إلى أجيال لاحقة. ما يهمنا هنا أنه كان رجلًا ثريًّا مقتدرًا لديه الموارد اللازمة للاحتفاظ بعدد كبير من الزوجات وكل هؤلاء الأطفال (ولعلَّ لقبه «المتعطش للدماء» يعطيك فكرة عن مدى قوته). أمَّا الرجال العاديين في عصره، وكل الرجال العاديون في عصور ما قبل التاريخ، فإنهم لم يستطيعوا تحقيق أي شيء كهذا.

وإذا أردنا التوضيح بمثال غير بشري، فيمكننا القول إنه مثلما تتنافس الغزلان لترى أيُّها يستطيع الركض بسرعة كافية، يتنافس الذكور للحصول على قرينات وإنجاب نسل. وهذا المثال مستمد من دراسة أجراها صاحب الاسم الجميل بيرني لوبوف (ومعناها «الثور») وزملاؤه من حرم جامعة كاليفورنيا في سانتا كروز، وتشمل مستعمرة من أفيال البحر راقبوها على مرِّ عدة سنوات.

تكفينا هنا نتائج عمليات الرصد من موسم واحد فقط في المستعمرة الواقعة على جزيرة آنيو نويفو. ففي ذلك الموسم، كان في المستعمرة ١١٥ ذكرًا، لكن قلة منهم هي التي كانت لديها جماعات من الإناث وكان كلٌّ منهم يحرس جماعته بغيرة شديدة، بينما طُرِد معظم الذكور الآخرين إلى الأطراف الهامشية وكانوا يحاولون التزاوج ببعض الإناث عندما يكون «صاحبها» منشغلًا عن حراستها. لكنهم نادرًا ما كانوا ينجحون. ففي المجمل، هيمن خمسةٌ فقط من الذكور البالغ عددهم ١١٥ ذكرًا على ١٢٣ من أصل ١٤٤ حالة تزاوج؛ أي أكثر بقليل من ٨٥ في المائة من إجمالي حالات التزاوج. ولتحقيق هذا النجاح، لا بد أن يكون الذكور أكبر حجمًا بكثير من الإناث، ليس للتغلب عليهن، ولكن للتصدي للذكور الآخرين وإبعادهم. وبذلك يظفر أكبر الذكور حجمًا بأكبر عدد من الإناث.

لكن حتى النجاح الضعيف الذي أحرزه الذكور القليلون الذين تسللوا من وراء ظهر صاحب الإناث يُبرز نقطة أخرى مرتبطة بهذا السياق. وهي تتعلق بما يُسمى «التيقن من الأبوة»، وتقوم على الاختلاف الحاسم بين الجنسين. ففي الثدييات، لا يكون لدى الأم

مولاي إسماعيل. (صورة نقشها نقَّاشٌ مجهول من القرن الثامنَ عشر، وهي تقع في نطاق الملكية العامة ومنشورة عبر موقع «ويكيميديا كومنز».)

أيُّ شكٍّ في أن نسلها هم نسلها بالفعل. صحيح أنه حتى أنثى الطائر لا يمكن أن تكون متيقنة تمامًا من أن كل البيض في العش بيضها هي، كما يتضح في مثال الوقواق. لكن المرأة التي تلد طفلًا وترضعه لا يكون لديها أيُّ شك في أصل هذا الطفل، حتى لو لم تكن تعرف هوية أبيه، كما يحدث أحيانًا. أمَّا الذكر، فلا يكون لديه يقين كهذا. والطريقة الوحيدة التي يستطيع بها أن يتيقن تمامًا من أن النسل الذين أنجبتهم أنثى تزاوج بها هُم نسله بالفعل هي أن يكون قد أبعد كل الذكور الآخرين عنها؛ كما تحاول أفيال البحر أن تفعل، مع أنها لا تنجح في ذلك دائمًا.

ومن منظور التطور، فإنه حتى لدى الأنواع التي تستلزم مشاركة الوالدين معًا لتنشئة النسل بنجاح، قد لا «تهتم» الأنثى بهوية مَن تتزاوج به ما دامت ستحظى بذَكَرٍ

ما ليساعدها في تنشئة الأطفال. كذلك فالذكر الذي ينجح في التسلل من وراء ظهر ذكرٍ آخر للتزاوج بأنثى في حمايته يحصل على فوائد عديدة بأقل الأعباء. وهكذا فإنَّ ذلك يضع حدًّا أقصى للعدد الذي يمكن أن تصل إليه جماعة الإناث الخاصة بفيل البحر؛ لأن الذكَر لو وجد نفسه مطالَبًا بحراسة عددٍ يفوق طاقته من الإناث، فسيتحمَّل في النهاية كل الأعباء مقابل فوائد قليلة. ينطوي كل هذا على مدلولات ضمنية مثيرة للاهتمام عن السلوك البشري لن أتطرق إليها هنا، لكنك تستطيع التفكير فيها بنفسك؛ أمَّا في اللحظة الحالية، فسألتزم بالكلام عن الحقيقة الأساسية المتمثلة في أن الذكر يستحيل أن يكون على يقين من الأبوة إلَّا إذا أبعد الذكور الآخرين عن إناثه.

غير أن هذه الاستراتيجية يمكن أن تسبب مشكلات أيضًا، على الأقل في الأنواع غير الثديية. وأستعرض هنا مثالًا مسليًّا من سلوك الزرزوريات (علمًا بأنه مُسلٍّ لنا نحن وليس لها). فالاستراتيجية التي اكتسبتها تلك الطيور تقتضي أن يبقى الذكر مع الأنثى ليضمن عدم حدوث تزاوج بينها وبين أي ذكر آخر. وهذا يعني أنه بعد وضع دُفعة من البيض في العش، يذهب الذكر مع الأنثى عند بحثها عن الطعام. وأحيانًا ما تزور أنثى أخرى العش المتروك بلا حراسة وتترك إحدى بيضاتها فيه. تبدو البيضة الإضافية مماثلة تمامًا لكل البيضات الأخرى، فيعتني بها صاحبا العش ويرعيان الفرخ الصغير الذي يخرج منها، دون أن يدركا أن لديهما فرخًا غريبًا وسطهما. يستنتج هنا اختصاصيو علم الأحياء التطوري الذين يدرسون مثل هذه الظواهر أن ذَكَر الزرزوريات يرى أن الأعباء الزائدة الناتجة من تربية فرخٍ إضافي ليست كبيرة بقدرِ الأعباء التي قد يتحملها لو صار لديه عشٌّ كامل ممتلئ ببيض ليس من نسله.

لكن لنعُد إلى النقطة الأساسية التي أناقشها هنا. جمعتُ الآن أدلة كافية لأستطيع الإجابة عن سؤال «لماذا الرجال أكبر حجمًا من النساء؟» من منظورِ كائنٍ فضائي يزور الأرض ويدرس سلوك أنواع شتى من الحيوانات الثديية. فمثل هذا الراصد غير المتحيز سيلاحظ أن الذكور أكبر حجمًا من الإناث في العديد من الأنواع، وستكشف له القياسات الدقيقة أن درجةَ هذه الظاهرة، التي تُسمى ثنائية الشكل الجنسي، ترتبط ارتباطًا مباشرًا بعدد القرينات اللواتي يحميهن الذكر؛ علمًا بأنني قلت «يحميهن» لأنني لم أجد كلمة أفضل. أشرتُ سلفًا إلى الأسود وأفيال البحر. ولاستعراض مثالٍ من نوعٍ آخر من الكائنات أقرب صلةً إلى نوعنا، فإنَّ هذا الراصد البيولوجي التخيُّلي القادم من الفضاء لو نظر إلى جماعات الغوريلا، فسيلاحظ أن جماعة كاملة من الغوريلا تكون خاضعةً لهيمنة ذكر

واحد أطول من الإناث بنحو ٣٠ في المائة وأثقل وزنًا منهن مرتين؛ وأنه يُبقي كل الذكور البالغين بعيدًا عن إناثه (حتى يكبُر في السن ويصبح واهنًا) ولا يحمل أدنى شك في أبوته لجميع الصغار في تلك الجماعة. ومع أن الحمض النووي للبشر يُشبه الحمض النووي للغوريلا بنحو ٩٨ في المائة، فإنَّ متوسط الفرق في الطول بين الرجال والنساء، بالنظر إلى سكان الكوكب إجمالًا، يبلغ نحو ثمانية في المائة فقط. وهنا يستنتج ذلك الراصد البيولوجي الفضائي غير المتحيز، «بالنظر إلى الإنسان كما ينظر علماء التاريخ الطبيعي إلى أي حيوان ثديي آخر»، أن كل ذكرٍ ناجح، في عصور ما قبل الحضارة، كان قادرًا على الاحتفاظ بجماعةِ إناث مكونة من اثنتَين أو ثلاث على الأكثر، بينما كان الرجال الفاشلون يُضطرون إلى اتباع الاستراتيجيات نفسها التي اتبعها ذكور أفيال البحر الفشَلة، إذ كانوا يحاولون التسلل والتزاوج خلسة.

سيبدو كل ذلك مفهومًا إذا نظرت إلى ظروف عصور ما قبل التاريخ من منظور تطور كلٍّ من الرجال والنساء. إذ ستجد أن عدد الجماعة الأسرية المكونة من رجل وامرأتين فعَّال جدًّا لتنشئة الأطفال، وخصوصًا للمساعدة في الولادة وما بعدها مباشرة، في حين أن الرجل الواحد ما كان ليستطيع أن يحمي، أو يحرس، أكثر من ثلاث نساء بمختلف أطفالهن، حتى لو كان كل الأفراد البالغين مشاركين في أنشطةٍ مثل جمع الطعام. وتتجلى حقيقة نجاح هذه الاستراتيجية التطورية في كل مكان حولنا بالفعل. فالبشر هُم من يهيمنون على عالم الثدييات، وليس الأسود ولا الغوريلات ولا أفيال البحر. لكن إحدى نتائج هذا النجاح أن الاختلاف في الحجم بين الرجل والمرأة لم يَعُد مهمًّا للتطور؛ صحيح أننا نعلم لماذا تطور الرجال حتى صاروا أكبر حجمًا من النساء، لكن هذه الظاهرة، التي تُسمى «ثنائية الشكل الجنسي»، لم تعُد مفيدةً وصارت مجرد أثر متبقٍّ من نمط حياة أسلافنا القدامى.

السؤال العاشر

# ما سبب زرقة السماء؟

إذا كنتَ قرأت إجابة السؤال الأول بالفعل، فأنت تعرف لماذا تكون السماء مظلمة ليلًا. ولكن إذا كنتَ تتأمل تلك الإجابة، فلعلك بدأت تتساءل لماذا لا تظلم السماء نهارًا أيضًا، باستثناء الجزء الواقع في اتجاه الشمس. على كل حال، تنطبق الحجج التي استخدمتُها لشرح السبب وراء ظلمة سماء الليل بالقوة ذاتها على وقت النهار. وتُظهِر الصور التي التقطها بعض رواد الفضاء على القمر أن السماء هناك مظلمة بالفعل طَوال الوقت، باستثناء الجزء الواقع في اتجاه الشمس. لذا فلا بد أن الإجابة مرتبطة بوجود غلاف جوي حول الأرض وعدم وجود غلاف جوي حول القمر. لكني لا أنوي إسكاتك بإجابة غير مقنعة بأن أكتفيَ قائلًا إن ذلك «يرجع إلى وجود غلاف جوي حول الأرض». فالسؤال عندئذٍ يُصبح: «كيف يجعل الغلاف الجوي السماء زرقاء؟»

كما هي الحال في العديد من الظواهر العلمية، يبدأ تفسير هذه الظاهرة بدراسة أجراها إسحاق نيوتن في القرن السابع عشر. ففي منتصف الستينيات من القرن السابع عشر، كان نيوتن قد حصل للتو على درجة البكالوريوس من جامعة كامبريدج وعاد إلى منزله في وولستورب في لينكولنشاير، لتجنب الإصابة بالطاعون أثناء تفشِّيه. فأسفر ذلك عمَّا يُعرف بـ «عام معجزاته» الذي استطاع فيه، بفضل تحرره من أي مشتتات خارجية، أن يتوصل إلى العديد من الاكتشافات العلمية المهمة. وقد انبثق الاكتشاف الذي يهمنا هنا من دراسته للضوء.

كان من المعروف تمامًا بحلول عصر نيوتن أن الضوء القادم من الشمس عندما يمر خلال قطعة زجاجية مثلثية، تسمى المنشور، فإنه يخرج من الجانب الآخر في شكلِ نمطٍ من الألوان، كألوان قوس قُزح. وقد أثارت هذه الظاهرة اهتمام نيوتن بعدما اشترى قطعة زجاجية كهذه كانت تُباع على أنها تحفة نادرة في أحد المعارض. كذلك فإنَّ الضوء

ينحني (أو ينكسر) في طريقه خلال الزجاج، وتخرجُ تلك الألوان المختلفة بزوايا مختلفة قليلًا. وكان يبدو التفسير الواضح لهذه الظاهرة، قبل ظهور نيوتن، أن الضوء الأبيض «الخالص» يتلون بفعل الشوائب التي يلتقطها من الزجاج في طريقه خلال المنشور، لكن نيوتن ابتكر تجربة عبقرية لاختبار هذه الفكرة.

أجرى التجربة في غرفةٍ أبقاها معتمة بستائر ثقيلة على النافذة، مع ترك فتحة صغيرة لإدخال شعاع من ضوء الشمس إلى الغرفة.[١] وعندما اعترض طريق الشعاع بمنشورٍ زجاجي مُثبَّت بالزاوية الصحيحة، خرج الضوء من الجانب الآخر وأنتَج طيفًا من الألوان على الحائط المقابل للنافذة؛ طيفًا يضم ألوان قوس قزح ذاتها بالترتيب ذاته. وكان نيوتن هو الذي سجَّل تلك الألوان على أنها أحمر وبرتقالي وأصفر وأخضر وأزرق ونيلي وبنفسجي. لكن الألوان ليست منفصلة بحدود واضحة بينها؛ فالأحمر ممتزج بالبرتقالي، والبرتقالي ممتزج بالأصفر، وهكذا دواليك. ولكن عندئذٍ أتى اختباره الحاسم. فإذا صحَّت الأفكار القديمة بخصوص الضوء، فمن المفترض أن يُسفر وضع منشور ثانٍ في مسار شعاع الضوء الملون عن إنتاج طيف أكثر تلوُّنًا. لكن نيوتن وجد أنه عندما وضع المنشور الثاني مقلوبًا بالنسبة إلى المنشور الأول، هكذا ∆∇، اندمجت أشعة الضوء الملون وعادت لتصبح شعاعًا واحدًا من الضوء الأبيض «الخالص». وفي تجربةٍ أخرى، جعل نيوتن شعاعًا ضوئيًّا ملونًا واحدًا يمر خلال منشور ثانٍ. فخرج الشعاع على الجانب الآخر دون تغيير.

ومن ثم، خلَص نيوتن إلى وجود استنتاج واحد فقط يمكن أن يفسر كل ذلك. وهو أن الضوء الأبيض ليس خالصًا، بل مكون في الواقع من مزيجٍ من كل ألوان قوس قزح، وكل لون بحد ذاته يُمثِّل صورة خالصة من الضوء. وعلاوة على ذلك، يُفسِّر هذا كيفية نشأة أقواس قزح نفسها بفعل الانكسار، مع أن تلك العملية تنطوي أيضًا على حدوث انعكاس داخل قطيرات الماء، ولذا يتحتم أن تكون الشمس خلفك لكي ترى قوس قزح.

لكن لم يكن من الممكن معرفة تفاصيل ما يجري في تلك العملية إلا بعد فهم طبيعة الضوء بوضوح أكبر، وهو ما بدأ يظهر في أوائل القرن التاسع عشر، عندما أظهر توماس يونج في إنجلترا وأوجستان-جان فرينل في فرنسا كلٌّ على حدة أن الضوء ينتقل كشكل

[١] لا يزال بمقدورك زيارة الغرفة وبقية منزل أسرته في وولستورب.

من أشكال الموجة، وكشفت قياساتٌ أن الضوء الأحمر له أطول أطوال موجية في الطيف المرئي (بطول موجي يبلغ نحو ٧٥٠ نانومترًا)، بينما يتسم الضوء البنفسجي بأقصر أطوال موجية (إذ يبلغ طوله الموجي نحو ٣٨٠ نانومترًا.[٢] أمَّا الطول الموجي للضوء الأزرق، فيبلغ نحو ٤٥٠ نانومترًا. ولتوضيح هذا بمثال تقريبي، فإنَّ سُمك شعرة الإنسان يبلغ نحو ٥٠ ألف نانومتر. لكن نوعية الموجات التي ينتمي إليها الضوء ظلت لغزًا محيرًا حتى ستينيات القرن التاسع عشر، عندما توصَّل جيمس كلارك ماكسويل، بناءً على عمل مايكل فاراداي، إلى مجموعة من المعادلات تصف كيفية تحرُّك الموجات الكهرومغناطيسية عبر الفضاء، ووجد أن هذه الموجات تتحرك بسرعة الضوء. وهذا الدليل على أن الضوء يتحرك في شكل موجة كهرومغناطيسية ظهر تزامنًا مع توصُّل العالم الأيرلندي الموسوعي جون تيندال إلى الظاهرة الأساسية التي تفسر سبب زُرقة السماء. لكن اكتشافه كان نتيجةً فرعيةً لدراسةٍ صارت الآن أهم بكثير؛ وهي دراسته للظاهرة التي نسميها الآن «تأثير الدفيئة».

في بداية القرن التاسع عشر، كان عالم الفلك ويليام هيرشل يدرس طيف ضوء الشمس فاكتشف وجود «لون» من الإشعاع ذي طول موجي أطول من الضوء الأحمر، ولا نستطيع رؤيته بالعين المجردة لكنه يُسخِّن السطح الذي يلمسه. أصبح هذا يُعرَف باسم الأشعة تحت الحمراء. وتتجلى إحدى صوره في الدفء الذي تشعر به إذا وضعت يدك بالقرب من المشعاع دون أن تلمسه. ويوجد أيضًا إشعاعٌ ذو أطوال موجية أقصر من الضوء البنفسجي، ويُسمى بالأشعة فوق البنفسجية. تكهَّن عدة علماء، أبرزهم الفرنسي جوزيف فوريه، بأن الغلاف الجوي للأرض يُعَد نوعًا ما بمثابة بطانية؛ إذ يجعل سطح كوكبنا أكثر دفئًا ممَّا كان سيصير عليه بدون غلاف جوي، لكن تيندال هو مَن أجرى التجارب التي أكدت ذلك بقياس كمية الأشعة تحت الحمراء التي تمتصها الغازات المختلفة. تضمنت التجارب تمرير إشعاع منبعث من مصدر ساخن خلال أنبوب زجاجي طويل وقياس مقدار الحرارة التي اجتازت الغاز في الأنبوب. فوجد أن النيتروجين والأكسجين، المُكونَين الرئيسيَّين للغلاف الجوي، يمتصان كمية قليلة جدًّا من الأشعة تحت الحمراء، لكن غاز ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء يمتصان كمية كبيرة. واستنتج من ذلك أن الطاقة القادمة من الشمس في الجزء المرئي من الطيف تعمل على تدفئة سطح

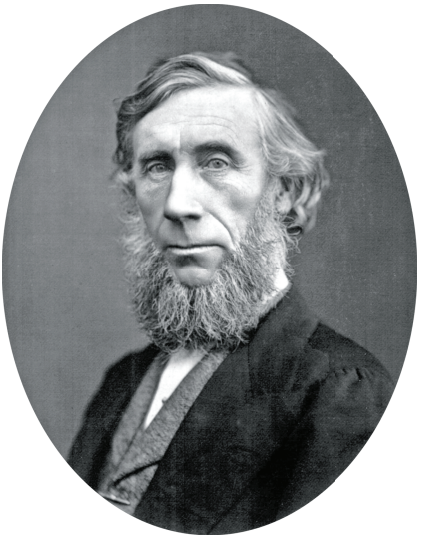
[٢] النانومتر يساوي جزءًا من المليار من المتر.

الأرض، ثم يُشع السطح الدافئ تلك الطاقة مُعيدًا إياها إلى الخارج في صورة أشعة تحت حمراء تبقى محبوسة في الغلاف الجوي. وعلى حد تعبير تيندال في عرض تقديمي أمام الجمعية الملكية في يونيو عام ١٨٥٩، «فعندما يمتص الكوكب الحرارة، تتغير جودتها بشدة لدرجة أن الأشعة المنبعثة من الكوكب لا تستطيع العودة إلى الفضاء بالحُرية نفسها. وبذلك فإنَّ الغلاف الجوي يسمح بدخول الحرارة الشمسية؛ لكنه يكبح خروجها، ما يُسفر عن نزعةٍ إلى تراكم الحرارة عند سطح الكوكب». وكتب تيندال أن الأرض، لولا هذه الغازات، «لوقَعَت في قبضةٍ حديدية مُحكَمة من الصقيع».

وتتجلى صحة هذا التعليق في المقارنة بين درجة الحرارة على الأرض ودرجة حرارة القمر الخالي من الهواء. فيبلغ متوسط درجة الحرارة على سطح القمر كله، ليلًا ونهارًا، سالب ١٨ درجة مئوية؛ فيما يبلغ متوسط درجة حرارة الأرض ١٥ درجة مئوية، ويُعزى هذا الفرق البالغ ٣٣ درجة كله تقريبًا إلى تأثير الدفيئة الطبيعي، وإن كان يتأثر أيضًا بكمية قليلة من الحرارة تتسرب من باطن الأرض إلى سطحها.[٣] وقد استمرت هذه التجارب، مع دراسات وأبحاث أخرى، حتى امتدت إلى ستينيات القرن التاسع عشر؛ وبفضل اتباع نهجٍ مختلف في التعامل مع المسألة، فهم العلماء تفاصيل أساسية تتعلق بأسباب زُرقة السماء.

كان تفسير السبب وراء زرقة السماء يحير علماء كثيرين آنذاك، وكان تيندال بالأخص مهتمًّا بمعرفة السبب لأنه كان مولعًا بتسلق الجبال وكثيرًا ما رأى السماء زرقاء صافية فوق جبال الألب، ولونًا مُزرَقًّا طفيفًا في الضوء المنعكس من الثلج، وتَشتُّت الضوء في السُّحُب والضباب. وقد توصَّل إلى اكتشافه الكبير بفضل التحسينات التي طرأت على المصابيح الكهربائية في ستينيات القرن التاسع عشر. ففي عام ١٨٦٨، كان تيندال يُجري تجربة بسُحُب اصطناعية في أنبوبه المليء بغاز ثاني أكسيد الكربون، فلاحظ أنه إذا احتوى الأنبوب على غاز غباري، وسُلِّط بطولِه شعاعٌ من ضوء كهربائي أبيض، فسيبدو «مسار الشعاع أزرق بوضوح» عند النظر إليه من الجانب. ثم أظهر في تجارب لاحقة أن اللون الأزرق ربما نشأ مع تكوُّن السُّحُب في الأنبوب، وأنه كان أقوى عندما كانت الجزيئات أصغر، وأنه صار أضعف مع ازدياد حجم الجسيمات. لم يتحقق ذلك التأثير إلَّا في حالة الجسيمات الصغيرة جدًّا؛ بالأحرى في «جزء صغير جدًّا من طول موجة الضوء

[٣] يتزايد هذا الفرق الآن لأن الغازات المنبعثة من الأنشطة البشرية تُقوِّي التأثير.



جون تيندال. (مؤسسة سميثسونيان عبر موقع «ويكيميديا كومنز».)

البنفسجي»، على حد قول تيندال في مقالة قرأها في الجمعية الملكية في يناير عام ١٨٦٩. لكنه لم يستطع تحديد الجسيمات التي شاركت في إحداث هذا التأثير بالضبط ولا تفسير سبب بروز الضوء الأزرق هكذا. ثم كان صاحبُ الخطوة التالية جون ويليام ستروت (المعروف باسم اللورد رايلي، وهو لقب ورثه في عام ١٨٧٣، عند وفاة والده).

فانطلاقًا من عمل تيندال، نشر رايلي عدة أوراق بحثية تكللت بإسهامٍ علمي ظهر في عام ١٨٨١. إذ استطاع، بفضل الفهم العميق الذي أتاحه ماكسويل، أن يُعوِّض بأرقام فعلية في الحسبة المتعلقة بتفاعل الضوء مع الجسيمات ذات الشحنة الكهربائية، مع أنه لم يكن هناك أحد آنذاك، قبل نحو ٢٠ عامًا من اكتشاف الإلكترون، يعرف بالضبط ما هي الجسيمات المشاركة في ذلك التفاعل. وكانت الحقيقة الأساسية التي اتضحت من عمل رايلي أنه فيما يتعلق بجسيمات أصغر بكثير من الطول الموجي للإشعاع، تتناسب كمية التشتت الناتجة بهذه الطريقة مع العدد واحد مقسومًا على الطول الموجي للإشعاع الكهرومغناطيسي مرفوعًا للأس أربعة. بعبارة أخرى، كلما كان الطول الموجي أقصر، كان التشتت أكبر. ولأسباب واضحة، يُعرف هذا بقانون التربيع العكسي. ومن ثَم فإنه بناءً على الأطوال الموجية التي ذكرتها للضوءين الأحمر والأزرق، من السهل حساب أن الضوء

الأزرق يتشتت بمقدارٍ أكبر بنحو ثماني مرات من تشتُّت الضوء الأحمر بفعلِ الجسيمات التي توجد في الهواء، والتي صرنا نعرف الآن أنها ذرات وجزيئات. تُعرف هذه العملية باسم تشتُّت رايلي، وهذا يبدو ظُلمًا لتيندال الذي كان هو من اكتشف الظاهرة أصلًا، لكن تلك هي طبيعة الأمور.

في الحقيقة هذا هو كل ما تحتاج إليه لتفهم السبب وراء زُرقة السماء، ولكن لا تزال لدي معلومة تكميلية لا أستطيع مقاومة ذكرها، وهي تتضمن ألبرت أينشتاين. ففي عام ١٩١٠ استطاع أينشتاين، في إطار دراسةٍ أكبر لعمليات التشتت، أن يُحسِّن دقة هذه الحسابات، وأن يستخدمها لعدة أغراض من بينها تقدير أحجام الجسيمات (أو الجزيئات) المشاركة في التفاعل؛ فكانت أصغر بكثير من الأطوال الموجية للضوء المرئي.[٤] صحيح أن التفاصيل لا تؤثر في القصة الرئيسية، لكن مشاركته تمنحني الفرصة لأشير إلى أن فهمنا للسبب وراء زرقة السماء يبدأ بإسحاق نيوتن وينتهي بألبرت أينشتاين، أي أعظم فيزيائيَّين جاءا إلى الدنيا على الإطلاق. وهو ما يُبرِز كيف يُمكن أن تتطلَّب الأسئلة البسيطة إجابات معقدة.

أستطيع الآن وأنا متسلح بكل هذه المعلومات أن أشرح السبب وراء زُرقة السماء. فهو يرجع إلى أن الضوء الأزرق المنبعث من الشمس لا يرتد ببساطة من جزيء إلى آخر، كالكرة التي ترتد من مَصَدٍّ إلى آخر في لعبة البينبول. بل إنَّ ما يحدث في الواقع أن الجزيء يمتص الضوء، فيكتسب طاقة في هذه العملية، ثم يشع الضوءَ على الفور تقريبًا في كل الاتجاهات، فيفقد الطاقة التي اكتسبها للتو. وصحيح أن الجزيئات تُشع نفس اللون الذي امتصته، لكن كفاءة العملية برمتها في إشعاع الضوء الأزرق أكبر ثماني مرات من كفاءة إشعاع الضوء الأحمر. يتكرر هذا مرارًا، ويظل الضوء الأزرق ينتشر من جزيء إلى آخر في أرجاء السماء كلها، فيهبط بعضه إلى الأرض (وأعيننا) في نهاية المطاف، بينما يتجه البعض إلى الأعلى باتجاه الفضاء. وكل الضوء الأزرق الذي تراه في السماء، أيًّا كان الجزء الذي تنظر إليه، هو ضوء شمسي تشتت بهذه الطريقة.

أمَّا الضوء الأحمر، فلا يتشتت بسهولة في تلك العملية، بل يرتد عن جزيئات الغبار وقطيرات الماء في الهواء، كما ترتد الكرات من المصدات في آلة البينبول. لذا ينعكس

[٤] بالأحرى، تتضمن هذه العملية إلكترونات مرتبطة بجزيئات بفعلِ قوى كهربائية.

عن السُّحُب والغبار في الهواء، وهذا النوع من التشتت يبلغ ذروته عند شروق الشمس وغروبها، حين تكون الشمس منخفضة في الأفق ويكون أمام الضوء مسافة طويلة ليقطعها خلال الغلاف الجوي، ما يجعل السماء حمراء عند أسفل الأفق وقت غروب الشمس وشروقها.

كل هذا كلام سليم ومقبول تمامًا. لكن أرجو أن تكون قد لاحظت أن هذا يثير سؤالًا آخر. إذا كان تشتت رايلي يخضع لقانون التربيع العكسي الذي أوضحته للتو (وهو يخضع له بالفعل)، فلماذا لا تكون السماء بنفسجية (أو ربما أرجوانية، إذا أخذنا اللون الأزرق أيضًا في الحسبان)؟ تتضمن الإجابة عن هذا السؤال التكميلي مزيجًا من الفيزياء وعلم الأحياء. فالفيزياء مرتبطة بطبيعة ضوء الشمس. إذ تشع الشمس معظم طاقتها في منتصف الطيف المرئي، في نطاق اللونين البرتقالي والأصفر، بينما تشع طاقةً أقل عند طرفَي الطيف، أي في نطاق اللونين الأحمر والبنفسجي. وقد تطورت أعيننا على الاستفادة من الضوء المتاح لها، ولهذا لا نرى سوى هذا النطاق فقط من الإشعاع الكهرومغناطيسي. لذا فكمية الضوء البنفسجي المتاحة للتشتت أقل من كمية الضوء الأزرق المتاحة للتشتت. لكن الطريقة التي تطورت بها أعيننا تؤثر في الكيفية التي نلحظُ بها الضوء المشتَّت.

تحمل أعيننا ثلاثة أنواع فقط من المستقبلات، التي تُعرَف أيضًا بالمخاريط، وتستجيب بأشد قوة للأطوال الموجية الحمراء أو الخضراء أو الزرقاء، بإرسال إشارات إلى أدمغتنا تُفسَّر على أنها مجموعة متنوعة من الألوان على حسب نسبة كلٍّ من هذه الألوان الأساسية الثلاثة. لكن كلًّا من هذه المستقبلات يستجيب في الواقع لمجموعة من الأطوال الموجية، علمًا بأن ذروة استجابة الأول تقع عند طول قريب من ٥٦٤ نانومترًا (وهذا ما يُعرَف بالمخروط الأحمر)، فيما تقع ذروة استجابة الثاني بالقرب من ٥٣٤ نانومترًا (وهو ما يُعرَف بالمخروط الأخضر)، وتقع ذروة استجابة الثالث بالقرب من ٤٢٠ نانومترًا (وهذا هو المخروط الأزرق). صحيح أن الضوء الأزرق هو الذي يحقق أقصى استثارة للمخاريط الزرقاء، لكنها أيضًا تُستثار بألوان أخرى بقوةٍ أقل. كذلك تُستثار المخاريط الأخرى بمجموعة من الأطوال الموجية. إذ تُستثار المخاريط الخضراء استثارة بسيطة بالضوء الأزرق، وإذا صَحَّ ببساطة أن الضوء الأزرق هو ما يتعرض لأكبر تشتُّت، فمن المفترض عندئذٍ أن نرى السماء زرقاء مخضرة. لكن الضوء البنفسجي يتشتت أيضًا، وبسبب شذوذ في السمات الكيميائية الحيوية، فإنَّ المخاريط الحمراء أكثر حساسية بقليل للضوء البنفسجي من المخاريط الخضراء. وفي المجمل، تتعرض المخاريط الحمراء

والخضراء لاستثارة شبه متساوية بفعل الضوء القادم من السماء. والنتيجة أن تأثير استثارة المخاريط «الخضراء» بفعل الضوء الأزرق وتأثير استثارة المخاريط «الحمراء» بفعل الضوء البنفسجي يُلاشي كلاهما الآخر، فتلحظ أدمغتنا اللون الأزرق فقط. بذلك نكاد نكون قد وصلنا إلى نهاية قصة سبب زُرقة سمائنا، لكنها ليست نهاية قصة وجود سماوات زرقاء في المجموعة الشمسية.

عندما تلقَّى علماء الفلك صورًا ملونة من سطح المريخ لأول مرة، بعدما عادت بها بعثة «فايكنج لاندر» الأولى في نهاية فبراير ١٩٩٧، فوجئوا حين اكتشفوا أن السماء بدت حمراء. وسرعان ما أدركوا أن ذلك يرجع إلى أن الصور التُقطت في أعقاب عاصفة ألقت بكميات كبيرة من الغبار الأحمر في الغلاف الجوي. ولكن حتى بعد زوال الغبار الناتج من العاصفة، وجدوا أن السماء على المريخ تبدو مختلفة تمامًا عن السماء على الأرض، وهذا أيضًا يُمكن تفسيره بدلالة تشتُّت رايلي.

يتسم الهواء على سطح المريخ بأنه رقيق جدًّا؛ حيث تبلغ كثافته عند السطح أقل من ١ في المائة من كثافة الغلاف الجوي للأرض؛ وهذا يعني أن الجزيئات المتاحة لإحداث التشتت قليلة جدًّا. وبافتراض تساوي العوامل الأخرى، من المفترض عندئذٍ أن تظهر سماء النهار على المريخ بلون أزرق باهت جدًّا. لكن العوامل الأخرى ليست متساوية. فالمريخ جاف جدًّا ومليء بالغبار لدرجة أنه يحمل سديمًا دائمًا من الغبار معلقًا في هوائه، وتُسفر جسيمات الغبار هذه (التي تُعد دقيقة جدًّا، لكنها أكبر بكثير من الجزيئات) عن ارتداد كمية كافية من ضوء الشمس بين حبيبات الغبار، كارتداد الكرات في آلات البينبول، لإضفاء ما يسميه البعض لون «حلوى التوفي» — الذي يُعد أصفر في الواقع — على سماء المريخ. لكن الوضع يختلف وقت غروب الشمس (وشروقها). فعندما تكون الشمس منخفضة في أفق المريخ، يتحتم على الضوء أن يقطع مسافة أطول خلال الغلاف الجوي الرقيق، ويُصادف جزيئات كافية كي يبدأ تشتت مؤثر في الحدوث. لذا فإنَّ السماء على المريخ تبدو زرقاء وقت الغروب!

ولكن إذا كنت تريد رؤية سماء ذات زُرقة مذهلة، فأفضل مكانٍ لك أن تكون معلَّقًا من منطاد طاف فوق غيوم كوكب المشتري. ففي أكتوبر ١٩٨٩، أُطلقت المركبة الفضائية «جاليليو» التابعة لوكالة ناسا من المكُّوك الفضائي «أتلانتس»، ووصلت إلى كوكب المشتري في ديسمبر ١٩٩٥. وكانت تلك المركبة تحمل مسبارًا لاستكشاف الغلاف الجوي لكوكب المشتري أُطلِقَ من المركبة الفضائية الرئيسية في ١٣ يوليو ١٩٩٥، عندما كان لا يزال على

بُعد نحو ٨٠ مليون كيلومتر من الكوكب العملاق، ووُضِع في مسارٍ محسوب وفقًا لقوانين نيوتن للحركة. وصل المسبار إلى الغلاف الجوي لكوكب المشتري في ٧ ديسمبر ١٩٩٥، وأُبطئ بمظلةٍ قُطرها ٢٫٥ متر، ما مكَّنه من إرسال بيانات إلى المركبة لمدة ٥٨ دقيقة، وقياس ضغوط أكبر ٢٣٠ مرة من تلك الموجودة عند مستوى سطح البحر على الأرض، قبل أن يُسحَق تمامًا. وعند هذه الضغوط العالية، التي تتوافق مع الكثافة العالية، يكون تشتُّت رايلي فعَّالًا جدًّا، ما يجعل السماء تكتسي بلون أزرق ساطع لامع. من المؤكد أن نيوتن وتيندال ورايلي وأينشتاين كانوا سيبتهجون بهذا الاكتشاف لو كانوا عاصروه.

# قراءات إضافية

## مؤلَّفات سهلة

George Gamow, *A Star Called the Sun*, Viking, New York, 1964.

John Gribbin and Mary Gribbin, *How Far is Up?:* The Men Who Measured the Universe, Icon, London, 2003.

Iain Stewart and John Lynch, Earth: *The Power of the Planet* BBC, London, 2007.

Rachel Carson, *The Sea Around Us*, Oxford University Press, Oxford 1951.

## مؤلَّفات ليست سهلة جدًّا

Edward Harrison, Cosmology: *The Science of the Universe*, Cambridge University Press, Cambridge 1981.

Roland Jackson, *The Ascent of John Tyndall: Victorian Scientist, Mountaineer, and Public Intellectual*, Oxford University Press, Oxford, 2018.

Rudolf Kippenhahn, *100 Billion Suns: The Birth, Life and Death of the Stars*, Weidenfeld & Nicolson, London, 1983.

Stephen Mason, *Chemical Evolution: Origins of the Elements, Molecules and Living Systems*, Clarendon Press, Oxford, 1991.

## مؤلَّفات صعبة

Ken Croswell, *The Alchemy of the Heavens: Searching for Meaning in the Milky Way*, Anchor, New York, 1995.

Ian Morison, *Introduction to Astronomy and Cosmology*, Wiley, New York, 2008.

## مؤلَّفات مسلية

George Gamow, *Mr Tompkins in Paperback*, Cambridge University Press, Cambridge reprint edition, 2012.

John Gribbin and Mary Gribbin, *On the Origin of Evolution: Tracing Darwin's Dangerous Idea from Aristotle to DNA*, Collins, London, 2020.

هنـــداوي