# في حب الفيزياء

## رحلة بين عجائب الفيزياء ... من نهاية قوس قزح إلى حافة الزمن

تأليف

والتر لوين

مع

وارن جولدستين

ترجمة

سارة عادل

مع

شهاب ياسين



مكتبة

1290


«هذا الكتاب تبيان لنباهة والتر لوين الخارقة للعادة وشغفه بالفيزياء وعبقريته في التدريس. كتاب يؤمل منه أن يجتذب مزيدًا من الناس، إضافة إلى كل من اجتذب، ليحذوا حذو ذلك العالِم والمعلم الفذ».

بيل جيتس

في حب الفيزياء

مكتبة 1290

في حب الفيزياء
For the Love of Physics
والتر لوين ووارن جولدستين
Walter Lewin & Warren Goldstein

الطبعة الأولى: ٢٠٢٣م
رقم إيداع: ٢٠٢٣/١٩٧٢م
تدمك: ٤-٠-٨٦٥٣٣-٩٧٧-٩٧٨
٣١٢ ص، ١٦×٢٣سم

جمهورية مصر العربية
٦٦ مساكن الرماية، الدور الثالث - شقة ١٠، الهرم، الجيزة

+201099596575
bookmania2017@gmail.com
بوك مانيا - Bookmania
book_mania2017

تصميم وتنفيذ
شركة خطوة

4 8 2023

مكتبة
t.me/soramnqraa

Arabic Language Translation Copyright © 2022 Book Mania
For the Love of Physics
Copyright © 2011 by Walter Lewin & Warren Goldstein
All Rights Reserved.

مكتبة 1290

# في حب الفيزياء

رحلة بين عجائب الفيزياء ... من نهاية قوس قزح إلى حافة الزمن

تأليف

والتر لوين

وارن جولدستين

ترجمة

سارة عادل

شهاب ياسين

بوك مانيا

# المحتويات


**إشادات بالكتاب** ..... ٦

**مقدمة** ..... ٩

١- من النواة إلى الفضاء العميق ..... ١٧

٢- القياسات والارتيابات والنجوم ..... ٣٧

٣- حركة الأجسام ..... ٥٣

٤- عجائب ماصة الشرب ..... ٧٣

٥- كل شيء عن قوس قزح ..... ٩٣

٦- تناغمات الأوتار والرياح ..... ١١٩

٧- عجائب الكهرباء ..... ١٤١

٨- ألغاز المغناطيسية ..... ١٦٩

٩- قانون حفظ الطاقة: كلما تغيرت الأشياء ازدادت ثباتًا ..... ١٨٩

١٠- أشعة سينية من الفضاء الخارجي ..... ٢١١

١١- مطاردة الأشعة السينية بالمناطيد.. البداية ..... ٢٢٣

١٢- الكوارث الكونية والنجوم النيوترونية والثقوب السوداء ..... ٢٤١

١٣- رقصة باليه في أعالي السماء ..... ٢٥٩

١٤- انفجارات الأشعة السينية! ..... ٢٧٣

١٥- الكون برؤى جديدة ..... ٢٨٧

**الشكر والتقدير** ..... ٢٩٩

**الملحق الأول: عظام الفخذ لدى الثدييات** ..... ٣٠٣

**الملحق الثاني: تطبيق قوانين نيوتن** ..... ٣٠٥

**نبذة عن المؤلفَين** ..... ٣١١

إشادات بالكتاب
مكتبة
t.me/soramnqraa

«كتاب بارع الجمال... هو مزيج من مذكرات علمية ممتعة وتقديم رائع للفيزياء».

**مجلة كيركوس ريفيوز**

«يحظى لوين، الأستاذ بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، بشعبية مستحَقة، مردُّها إلى ما يُلقيه من محاضرات مهمة عن الفيزياء (سواء تلك التي يلقيها على الهواء مباشرة أو الموجودة على مقررات معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا المتاحة على منصة OpenCourseWare وعلى موقع يوتيوب)، وهذه السيرة الذاتية السريعة المقترنة بذلك التقديم للفيزياء تصور إخلاصه وأسلوبه الحيوي في التدريس خير تصوير... وهذا النص المبهج يشع طاقة، ولسوف يُسعد قطاعًا عريضًا من القراء».

**مجلة بابلشرز ويكلي (مراجعة للكتاب حظيتْ بتقييم عالٍ).**

«لعل لوين هو أستاذ الفيزياء الوحيد في العالم الذي يحتفي بجمال معادلات الحقول الكهرومغناطيسية لماكسويل عن طريق تقديم الأزهار لطلابه المبتهجين؛ فهذا الساحر في قاعة الدرس يحول سطور المراجع الأكاديمية إلى سحر. وما يتمتع به لوين من قدرة هائلة على الإبداع... هو جواز سفره إلى عالم المغامرات».

**مجلة بوكليست (مراجعة للكتاب حظيتْ بتقييم عالٍ).**

«من بين جميع من شهرتهم منصة يوتيوب – مثل جاستن بيبر وراقصي مداخل حفلات الزفاف أولئك، وذلك الرجل الذي يفقد صوابه وهو يصور قوس قزح مزدوج بكاميرته – لا يستحق أحد تلك الشهرة أكثر من والتر لوين أستاذ الفيزياء بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. يتبدى حس ذلك الأستاذ بروعة العلم في أكمل صوره في كتابه الجديد: في حب الفيزياء:

رحلة بين عجائب الفيزياء.. من نهاية قوس قزح إلى حافة الزمن. لماذا يتخذ قوس قزح شكل قوس ولا يمتد على شكل خطٍ مستقيم؟ لماذا لا نرى الشفق القطبي إلا إذا كنا قريبين من أحد القطبين الشمالي أو الجنوبي؟ لو كنتَ مهتمًا بأن تعرف – أو تعيد معرفة – إجاباتِ هذه الأسئلة الشيقة ومئات غيرها فكتاب لوين هذا مناسب لك».

**صحيفة بوسطن جلوب.**

«يعلم الجميع أن أقواس قزح تظهر عقب العاصفة، لكن لوين في كتابه الجديد يميط اللثام عن أقواس قزح غير معتادة تواريها الطبيعة في رذاذ ترفعه أمواج المحيط إلى أعلى، وفي الضباب الذي يدور حول مصابيح السيارات الأمامية، وحتى في الجسيمات الزجاجية التي تسبح في مواقع البناء. بعد ما يربو عن الثلاثين عامًا من تدريس الفيزياء لطلبة الجامعات في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا صار لوين يمتلك ذخيرة من تفسيرات واضحة جذابة تقدم الفيزياء على أنها وسيلة للكشف عن عجائب العالم الخفية. كتاب متفرد مرح مفعم بالجدية، فصوله صور ماتعة لمواضيع تتدرّج من قوانين نيوتن إلى اكتشافات لوين ذاته الرائدة في مجال علم فلك الأشعة السينية. ومن كل صفحة من صفحاته يشِّع حس مُعدٍ بروعة العلم».

**مجلة ساينس نيوز.**

«من كل صفحة من صفحات هذا الكتاب الذي يمزج بين السيرة الذاتية والتطواف العلمي بشكل ماتع يشِّع شغف لوين بالفيزياء، ذلك الشغف الساطع غير المتواري. وهذا الشغف للاكتشاف أمر مُعدٍ».

**ماريو ليفيو، مؤلف كتابَي** The Golden Ratio
**و** Is God a Mathematician?

«في هذا الكتاب الممتع الجذاب السهل يستخدم والتر لوين، البطل الخارق للعادة في قاعات الدرس، قواه لأجل الخير، لأجلنا. يشترك المؤلفان في استمتاعهما بمعرفة أن العالم مكان قابل للتعرف على خباياه».

**جيمس كاكاليوس أستاذ الفيزياء ومؤلف كتابَي** The Physics of Superhroes
**و** The Amazing Story of Quantum Mechanics.

إلى كل مَن أزكى شعلة حبي للفيزياء والفن

**والتر لوين**

إلى حفيدي كايلب بنجامين لوريا

**وارن جولدستين**

# مقدمة

يذرع الأستاذ مقدمة قاعة الدرس جيئةً وذهابًا مخاطبًا الجمع ومومئًا برأسه، فيما يتوقف بين الفينة والأخرى بين سلسلة من ألواح الكتابة السوداء وطاولة ترتفع حتى فخذيه ليؤكد على نقطة بعينها؛ كان نحيلًا، وطوله يبلغ ستة أقدام وبوصتين، وكان يرتدي ما يبدو قميصًا أزرق من قمصان الأعمال الثقيلة، أكمامه مطوية حتى مرفقيه، وبنطالَ أعمال يدوية كاكي اللون، وينتعل صندلًا تحته جوربان أبيضان. يتراص أمامه أربعمائة مقعد بشكل متدرج، يشغلها طلبة يتململون في مقاعدهم دون أن يُحوّلوا أعينهم عن أستاذهم الذي يبدو وكأن جسده يشِع طاقةً طاغية. يبدو بجبهته العريضة وشعره الرمادي الثائر ونظارته وأثر اللكنة الأوروبية المجهولة في كلامه شبيهًا نوعًا ما بشخصية دوك براون، العالم المخترع العصبي المتفرد المجنون نوعًا ما، تلك الشخصية التي مثلها كرستوفر لويد في فيلم العودة إلى المستقبل.

لكن المكان ليس مرأب دوك براون، وإنما معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، تلك المؤسسة العلمية والهندسية الأبرز في الولايات المتحدة وربما في العالم بأسره، والمحاضر الواقف أمام لوح الكتابة الأسود هو البروفيسور والتر إتش. جي. لوين. يقطع تمشيته ويستدير مواجهًا الصف ويقول: «لكن أهم ما في إجراء القياسات، وهو الأمر الذي دائمًا ما تتجاهله جميع كتب الفيزياء الجامعية» – يفتح ذراعيه على اتساعهما فاردًا أصابعه – «الارتياب في القياسات». يتوقف عن الكلام ثم يخطو خطوة لمنحهم الوقت كي يتفكروا فيما قال، ثم يتوقف مجددًا ويقول: «أيُّ قياس تجريه دون حساب للارتياب لا معنى له». ثم تطير يداه متباعدتين تشقان الهواء للتأكيد على كلامه، ثم يصمتُ مجددًا.

يلصق سبابتيه بصدغيه ثم يديرهما كما لو كان يثقب بهما دماغه إذ يقول: «أكرر، أريد لكلامي أن يتردد في أذهانكم الليلة حين تفيقون من نومكم في الثالثة صباحًا. أيُّ قياس تجرونه دون أن تعُوا جيدًا ما يشوبه من ريبة، هو قياس لا معنى له على الإطلاق». أما الطلبة فلا يفتؤون يحدقون فيه وهم ذاهلون.

حتى هذه اللحظة لم تمض علينا سوى إحدى عشرة دقيقة في أول صفوف الفيزياء ٨,٠١ — أشهر مقرر تمهيدي للفيزياء يُدرَّس في الجامعات على مستوى العالم.

في ديسمبر من عام ٢٠٠٧، نشرتْ نيويورك تايمز موضوعًا عن والتر لوين تصدَّر صفحتها الأولى خالعةً عليه لقب «نجم الإنترنت» العامل في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، مبرزة محاضراته الفيزيائية المتاحة على موقع معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا للمقررات المتاحة على منصة OpenCourseWare لمناهج معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وعلى موقع يوتيوب وiTunes U و Academic Earth. كان لوين من بين أوائل المحاضرين الذين نشر معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا أعمالهم على شبكة الإنترنت، وقد غنم المعهد من ذلك مكاسب كثيرة؛ فقد جنى شعبية استثنائية. وصارت المحاضرات الأربعةُ والتسعون – وهي موزعة على ثلاثة مقررات كاملة، بالإضافة إلى سبعة محاضرات مستقلة – تحصدُ نحو ثلاثة آلاف مشاهدة يوميًّا، ونحو مليون سنويًّا. ومن بين هذه المشاهدات بيل جيتس بذاته؛ إذ شاهد مقررات ٨,٠١ والميكانيكا الكلاسيكية و٨,٠٢ والكهرباء والمغناطيسية حسبما ذكر في الخطابات التي أرسلها إلى والتر (عن طريق البريد المعتاد) والتي ذكر فيها أيضًا أنه يتطلع قدمًا للانتقال إلى مقرر ٨,٠٣ المتعلق بالذبذبات والموجات.

في جميع رسائل البريد الإلكتروني التي يتلقاها لوين يوميًّا من أناس من جميع الأعمار ومن جميع أصقاع الأرض عبارات تشترك في معنى واحد مفاده: «لقد غيرتَ حياتي». فقد كتب له ستيف، بائع الزهور المقيم في سان دييجو، يقول: «صرتُ أمشي وفي خطواتي وثبة جديدة عليَّ، وصرتُ أنظر إلى الحياة بعينين صبغتهما الفيزياء بصبغتها». وكتب له محمد، الطالب بالمرحلة الإعدادية بكلية الهندسة بتونس، يقول: «لسوء حظي لا يرى الأساتذة هنا في بلدي الجمال في الفيزياء كما تراه أنت، ولكَم عانيتُ أنا من ذلك. فهم لا يريدوننا إلا أن نتعلم كيف نحل تمارين تقليدية كي ننجح في الاختبارات، ولا يعنون بما هو وراء هذا الأفق الضيق». وكتب سيد، الإيراني الذي نال عددًا من درجات الماجستير الأمريكية، يقول: «لم أستمتع بحياتي حقًّا إلى أن شاهدتُك تدرس الفيزياء. لقد غيرتَ يا بروفيسور لوين حياتي بحق. والأسلوب الذي تدرس به الفيزياء يستحق عشرة أضعاف ما أدفعه من رسوم دراسية، ويجعل بعضًا من المدرسين، لا كلهم، حفنة من المجرمين. إن تدني مستوى التدريس جريمة لا تُغتفر».

وكتب سيدهارت من الهند يقول: «لقد استطعتُ الإحساس بأن الفيزياء تتجاوز أفق تلك المعادلات. سوف يتذكرك طلبتك، كما سأذكرك دومًا، أستاذًا من الطراز الرفيع جدًّا جدًّا، جعل الحياة والتعليم أكثر تشويقًا مما كنتُ أظن».

يقتبس محمد متحمسًا من محاضرة لوين الأخيرة في مقرر الفيزياء ٨,٠١ مؤمنًا على قوله: «لعلكم ستذكرون دومًا، من محاضراتي، أنه يمكن للفيزياء أن تكون مشوقة وجميلة وأنها تحيطنا طوال الوقت، ليتنا نتعلم كيف نراها ونقدر جمالها». وكتبتْ مارجوري، وهي واحدة أخرى من جمهوره، تقول: «أشاهدك كلما أتيح لي ذلك؛ أحيانًا خمس مرات أسبوعيًّا. تسحرني شخصيتك وحسك الفكاهي، وفوق ذلك كله ما لديك من قدرة على تبسيط الأمور. لقد كنتُ أكره الفيزياء في المدرسة الثانوية لكنك جعلتني أحبها».

يتلقى لوين عشرات من رسائل البريد الإلكتروني أسبوعيًّا ويرد على كل واحدة منها.

يأتي لوين بالسحر عندما يعرض لعجائب الفيزياء. ترى ما سِره؟ عن ذلك يقول: «إنني أُعرّف الناس على عالمهم، ذلك العالم الذي يسكنونه ويألفونه لكنهم لا يرونه كما يراه الفيزيائيون – حتى الآن. فإذا حدثتُهم عن الموجات المائية، أطلب منهم أن يجروا تجارب بعينها في أحواض استحمامهم؛ وهو أمر ليس غريبًا عليهم. كما أنهم ليسوا بغريبين عن أقواس قزح. وهذا من الأمور التي أحبها في الفيزياء، أنها تمكنني من أن أفسر أيَّ شيء. وأن عملية التفسير تلك قد تكون تجربةً رائعة لي ولهم. أجعلهم يحبون الفيزياء، وأحيانًا، عندما يندمج طلبتي في المحاضرة جدًّا، تبدو صفوف الدراسة كالعروض الفنية».

أحيانًا تجده جالسًا أعلى سلم يبلغ طوله ستة عشر قدمًا، يرتشف عصير الكرز من دورق موضوع على الأرض عبر ماصة طويلة ملتوية مختلَقة من أنابيب معملية. أو تجده يقترب من إصابة خطيرة، بأن يضع رأسه أمام كرة تدمير صغيرة، ورغم قوتها تتأرجح على بعد ميلليمترات من ذقنه. قد تجده يطلق النار من بندقية تجاه صفيحتي طلاء مملوءتين بالماء، أو يعرض نفسه لثلاثمائة ألف فولت ٣٠٠,٠٠٠ من الكهرباء عن طريق أداة غريبة تسمى مولد فان دي جراف – أداة تشبه تلك الأشياء الغريبة التي تصنع في معامل العلماء المجانين في أفلام الخيال العلمي – حتى يقف شعره الأشعث عموديًّا فوق رأسه. إنه يستخدم جسده كواحدة من معدات تجاربه. وكما يقول دومًا:

«في النهاية، يتطلب العلم تضحيات». وفي واحدة من تجاربه التوضيحية – المصورة على غلاف هذا الكتاب – تجده يجلس على كرة معدنية، غير مريحة إلى حد بعيد، مربوطة بنهاية حبل معلق في سقف قاعة الدرس (وهو ما يسميه بأم البناديل) ويتأرجح إلى الأمام والخلف بينما يتغنى طلبته بعدد التأرجحات، وكل ذلك ليثبت أن عدد التأرجحات التي ينجزها البندول في أي فترة زمنية يحددها لا علاقة له بالوزن المثبت إلى نهايته. يروي ابنه إيمانويل (تشاك) لوين الذي حضر عددًا من محاضراته قائلًا: «رأيته مرة يستنشق الهيليوم كي يغير صوته. ويظل يستنشق الكثير منه حتى يصل إلى مرحلة يكاد يغشى عليه فيها، وهذا كله كي يصل للتأثير الحقيقي الذي ينشده، وهذا هو الشيطان الذي يكمن في التفاصيل». يرسم لوين على لوحة الكتابة، وهو في ذلك فنان عظيم، رسومًا هندسية ورسومًا شعاعية ورسومًا بيانية وظواهر فلكية وحيوانات هجرها أصحابها. وكانت طريقته في رسم خطوط منقطة قد أبهجت الكثير من الطلبة حتى إنهم أنتجوا مقطعَ فيديو فكاهيًا على منصة يوتيوب أسموه «بعضًا من أفضل خطوط والتر لوين» مؤلَّفًا بكل بساطة من مقتطفات من محاضراته، يَظهر فيها وهو يرسم خطوطًا منقطة على ألواح رسم مختلفة خلال محاضرات مقرر ٨,٠١. (يمكنك أن تشاهد هذا المقطع من خلال هذا الرابط www.youtube.com/watch?v=raurl4s0pju).

لوين رجل صاحب حضور طاغٍ كاريزمي غريب الأطوار في ذات الوقت ومهووس بالفيزياء. دائمًا يحمل في محفظته أداتين تسميان مرشحتي استقطاب؛ حتى يتمكن في أي لحظة من معرفة إن كان مصدر الضوء، مثل السماء الزرقاء أو قوس قزح أو انعكاس الزجاج من النوافذ، مستقطبًا أو غير مستقطب، وحتى يتمكن كل من بصحبته من رؤية ذلك.

وماذا عن قمصان العمال الزرقاء التي يرتديها في صف الدرس هذه؟ ما اتضح هو أنها ليستْ بقمصان عمال على الإطلاق. بل يوصي لوين بتفصيلها له خصوصًا من القطن الفاخر ووفقًا لقياساته، يطلب منها دستة كل بضعة أعوام من خياط في هونج كونج. والجيب الكبير جدًّا في جانب القميص الأيسر حدد لوين حجمه ليلائم مفكرته. لكنه لا يطلب أغطية لجيوب قمصانه – فهذا الأستاذ المؤدي رجلٌ شديد الانتباه لهندامه – وهو ما يجعل المرء يتساءل عن السبب الذي يجعله يرتدي أغرب حِلية جيب ارتداها أستاذ جامعي في التاريخ، حِلية بلاستيكية في شكل بيضة مقلية. وعن هذا يقول هو مفسرًا: «أن تكون البيضة على قميصي خير لي من أن تُلقى على وجهي».

وماذا يفعل هذا الخاتم الضخم المصنوع من الزجاج العضوي وردي اللون في يده اليسرى؟ وما هذا الشيء الفضي الذي يخترق قميصه عند مستوى سرته والذي لا يفتأ هو يسترق النظر إليه؟

في كل صباح يرتدي فيه لوين ملابسه يجد نفسه أمام اختيار بين أربعين خاتمًا وخمسًا وثلاثين حِلية، والعشرات من الأساور والقلائد. تتنوع ذائقته ما بين الحلى غير المعتادة (مثل الأسوار الكينية المرصعة باللؤلؤ، وعقد ذي قطع كبيرة من العنبر، وحلى بلاستيكية على شكل فاكهة) والحلى العتيقة (مثل تلك الأسورة الفضية التركمانية) والجواهر التي صممها فنانون ومصممون؛ إلى الحلى المضحكة والفاضحة (مثل قلادة من حلوى عرق السوس اللدنة). عن هذا يقول: «بدأ الطلبة يلاحظون الأمر، فقلتُ لهم بدأتُ أرتدي حلية مختلفة كل محاضرة، وخاصة عندما أحاضر أطفالًا فهم يحبون ذلك».

وماذا عن ذلك الشيء المشبوك بقميصه ويبدو كدبوس ربطة عنق ضخم؟ إنه ساعة يد مصممة خصوصًا له (جاءته هدية من فنان صديق له) وجهها مقلوب حتى يتسنى للوين أن ينظر إلى قميصه ويتابع الوقت.

أحيانًا يخيل للآخرين أن لوين مشتتٌ، بل ربما يبدو أستاذًا شارد الذهن. لكن الحقيقة أنه دائمًا ما يكون شديد الاستغراق في التفكير في جوانب الفيزياء. تتذكر زوجته سوزان كاوفمان قائلة: «عندما نذهب إلى نيويورك عادة ما أتولى أنا القيادة. لكنني في المرة الأخيرة عندما فتحتُ الخريطة لاحظتُ معادلات مكتوبة على أطراف الولايات. كان قد كتب هذه المعادلات عندما كنتُ أقود السيارة في المرة السابقة في طريقنا إلى مكان المحاضرة التي سوف يلقيها، إذ كان يشعر بالضجر. كانت الفيزياء تشغل ذهنه على الدوام، وكان الطلبة والجامعة يعيشون معه طوال الأربع والعشرين ساعة».

تقول صديقة عمره، مؤرخة الآثار، نانسي ستايبر: ربما كان الأكثر إثارة للدهشة في شخصية لوين «هي الدقة الشديدة في تركيز اهتمامه، فدائمًا ما تجده منخرطًا بأقصى طاقته في التركيز على ما ينتقي، فيستبعد من تفكيره ٩٠ بالمائة من العالم حوله. وبهذا التركيز الليزري يتمكن من استبعاد ما لا يهمه، وينخرط ذلك الانخراط الشديد فيما يعمل، الذي يتولد منه ذلك الحب للحياة».

لوين من أولئك الساعين للكمال؛ فهو ذو هوس بالتفاصيل، يكاد يكون متطرفًا. فهو ليس فقط أبرز معلمي الفيزياء في العالم؛ وإنما هو أيضًا رائد في حقل فلك الأشعة السينية، وقضى عقدين من الزمان في اختبار الظواهر الفلكية ودون الذرية وملاحظتها عن طريق معدات شديدة الحساسية، مصممةٍ لقياس الأشعة السينية بدرجة عالية من الدقة. كما أنه بدأ يكتشف مختلف أنواع الظواهر الفلكية الغريبة، على غرار مفجرات الأشعة السينية X-ray bursters، بأن صار يطلق بالونات بالغة الضخامة بالغة الدقة، تطفو في الحد الأعلى للغلاف الجوي للأرض. وقد ساعدت اكتشافاتُه هو وزملاؤه في إزالة الغموض عن طبيعة موت النجوم في انفجارات المستعرات العظمى، لإثبات وجود الثقوب السوداء بالفعل.

لقد تعلم أن يختبر ويختبر ويختبر مجددًا، وهو الأمر الذي جعله ناجحًا، ليس فقط كعالمٍ مراقب متخصص في الفيزياء الفلكية، وإنما جعله ينجح أيضًا في إماطة اللثام بشكل رائع عن عظمة قوانين نيوتن، وعن كشف أسباب تلك النوتات الرنانة الجميلة التي تصدرها أوتار الكمان، وأسباب زيادة الوزن ونقصانه لفترة زمنية قصيرة جدًّا، عندما يستقل المرء مصعدًا.

دائمًا ما يتدرب على محاضراته في غرفة مغلقة ثلاثَ مرات على الأقل قبل أن يلقيها، وتكون البروفة الأخيرة في الخامسة صباحًا يوم المحاضرة. يقول عالم الفيزياء الفلكية ديفيد بولي David Pooley طالبه السابق الذي عمل معه في صفه: «ما يجعل محاضراته ناجحة هو الوقت الذي يكرسه لأجلها».

عندما رشح قسم الفيزياء بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا لوين لإحدى جوائز التدريس الرفيعة عام ٢٠٠٢، راح مجموعة من زملائه يسردون صفاته الدقيقة تلك. يتذكر واحد من طلاب والتر لوين، وهو ستيفن ليب — الذي صار الآن أستاذًا للهندسة الكهربائية وعلوم الكمبيوتر بمعمل معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا للأنظمة الإلكترونية والكهرومغناطيسية، وكان قد تلقى مقرر الكهرباء والمغناطيسية عام ١٩٨٤ — هذه التجربة قائلًا: «لقد تجلى على منصة القاعة، فأسر عقولنا حتى شعرنا وكأننا نستقل قطار الملاهي السريع خلال دراسة مقرر الكهرومغناطيسية، ولا أزال أحس ما سرى فيّ من قشعريرة إلى اليوم. إنه عبقري في الصف، وذو قدرة لا تُنافَس في إيجاد طرائق لتوضيح المفاهيم بطريقة سهلة».

كما حاول روبرت هولسايزر — زميل لوين في قسم الفيزياء — أن يقتطع بعضًا من وسائل لوين في الشرح في مقطع مصور ليعرضه على الجامعات الأخرى. لكنه وجدها مهمة مستحيلة. عن ذلك يقول: «كانت وسائله التي يستعين بها في الشرح مدمجة دمجًا بارعًا، في تطوير للأفكار يشمل البناء والخاتمة، للدرجة التي لا يتضح فيها متى تبدأ وسائل الإيضاح ومتى تنتهي. إنني أرى والتر يملك ثراءً في وسائل الإيضاح لا يمكن تجزئته إلى شذرات».

ما يجعل منهج والتر لوين شيقًا في إبرازه لعجائب الفيزياء هي تلك البهجة العظيمة التي ينشرها عند عرضه لهذه العجائب. يتذكر ابنه تشاك باعتزاز إخلاص والده في نقل تلك السعادة له ولأشقائه فيقول: «لديه تلك القدرة على أن يجعلك ترى الأشياء، ويغمرك بمدى جمالها، وأن يحرك في نفسك ما ركد فيها من سعادة واندهاش وحماس. تلك الأشياء التي أقصدها هي أشياء صغيرة بقدر لا يُصدق، يقف هو في مركزها، إنه يجعل المرء يسعد لأنه يعيش معه هذه اللحظات، ويحضر معه هذا الحدث الذي أنشأه. ذات مرة كنا نقضي عطلة في ماين. أذكر أن الطقس لم يكن جيدًا، كنا كبقية الأطفال نشعر بالضجر. لكن أبي أتى فجأة بطريقة ما بكرة صغيرة، وبشكل عفوي ابتكر لعبة صغيرة غريبة، وفي غضون لحظات أتى بعض الأطفال الآخرين من جيراننا في الشاطئ الآخر، وعلى حين غرة، صار هناك أربعة أطفال، ثم خمسة ثم ستة يلقون الكرة ويتلقفونها ويتضاحكون. أتذكر أنني كنت في غاية الحماس والسعادة. عندما أنظر إلى الماضي وأفكر فيما حفزني في حياتي لأن أحظى بلحظات السعادة الصافية تلك، وأدرك كيف هي الحياة جميلة، وأدرك ما تخبئه لي الحياة، أجد والدي هو من وراء ذلك كله».

اعتاد والتر أن يصفَّ أطفاله كي يلعبوا لعبة في الشتاء، يختبرون بها الخاصية الأيروديناميكية للطائرات الورقية الشراعية، عن طريق تطييرها في مدفأة غرفة معيشتهم الواسعة المفتوحة. يقول تشاك متذكرًا: «كانت والدتي تهلع عندما تجدنا نستنقذ تلك الطائرات من النار؛ لأننا كنا مصممين على أن نفوز بالمنافسة في الجولة القادمة».

وعندما كنا ندعو ضيوفًا على العشاء، كان والتر يترأس لعبة الذهاب إلى القمر. يتذكر تشاك قائلًا: «كنا نخفتُ الأضواء، ونضرب الطاولة بقبضاتنا مصدرين صوتًا كقرع الطبول المتواصل، نحاكي به الضوضاء التي تنشأ عن انطلاق صاروخ. وأحيانًا كان بعض الأطفال ينزلون أسفل الطاولة ويقرعونها. ثم كنا نتوقف عن القرع ما إن

نصل إلى الفضاء وما إن نحط على القمر حتى نمشي في غرفة المعيشة نتظاهر بأننا نمشي في مستوى من الجاذبية منخفض جدًّا، بأن نخطو خطوات متكلفة. لا بد أن الضيوف كانوا يقولون في أنفسهم إن هؤلاء القوم مجانين. لكننا - نحن الأطفال - كنا نراه أمرًا ساحرًا، أن نذهب إلى القمر».

لقد ظل والتر لوين يصحب طلبته إلى القمر منذ أن خطا لأول مرة قاعة الدرس قبل خمسين عامًا مضتْ. والتر لوين ذلك الرجل المفتون بخبايا العالم الطبيعي وجماله – من أقواس قزح إلى النجوم النيوترونية، ومن عظام أفخاذ الفئران إلى أصوات الموسيقى – وإزاء مجهودات العلماء والفنانين في تفسير هذا العالم وإيضاحه بذات الدرجة، يعتبر واحدًا من أكثر المرشدين العلميين الشغوفين المخلصين المهرة لهذا العالم، من الذين ما زالوا على قيد الحياة. في الفصول التالية سوف تصير قادرًا على أن تختبر هذا الشغف والإخلاص والتفاني والمهارة بينما يكشف لك عن حبه للفيزياء الذي امتد طوال حياته ويشاركك فيه. فلتستمتع بتلك الرحلة.

وارن جولدستين

# الفصل الأول

## من النواة إلى الفضاء العميق

مكتبة
t.me/soramnqraa

ياله من عجب عجاب، لقد كان والد أمي عامل نظافة لا يجيد القراءة والكتابة. لكنني بعد جيلين صرتُ أستاذًا كبيرًا في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. وإنني مدين بالكثير لنظام التعليم الهولندي؛ فقد ارتدتُ كلية الدراسات العليا بجامعة دلفت للتكنولوجيا بهولندا وضربتُ ثلاثة عصافير بحجر واحد.

فقد شرعتُ منذ البداية في تدريس الفيزياء. ولكي أسدد رسوم الدراسة، تعين علي أن أحصل على قرض من الحكومة الهولندية، ولو قمتُ بالتدريس بدوام كامل لعشرين ساعة على الأقل أسبوعيًّا تخصم الحكومة في كل عام خُمس ذلك القرض. لكن للتدريس ميزة أخرى، ألا وهي أنني لن أضطر إلى الخدمة بالجيش. فقد كانت الحياة العسكرية أسوأ ما يمكن أن يحدث لي، كانت ستكون كارثة عظيمة. فلدي حساسية تجاه جميع أنواع السلطة – تلك هي شخصيتي – وكنتُ أعلم أن الأمر سينتهي بي إلى التشاحن مع القادة ثم مسح الأرضيات. ولذلك فقد درَّست الرياضيات والفيزياء بدوام كامل لاثنين وعشرين ساعة، وجهًا لوجه مع تلاميذ في مدرسة لبنان الثانوية بروتردام، ما بين أعمار السادسة عشرة والسابعة عشرة. وهكذا تجنبتُ الخدمة بالجيش ولم أضطر إلى تسديد القرض، وواصلت تحضير الدكتوراه في ذات الوقت.

كما أنني تعلمتُ التدريس. لقد كنتُ أجد متعتي في تدريس طلبة المدارس الثانوية، وفي تغيير أفكار أولئك الشبان بطريقة إيجابية. دائمًا كنتُ أحاول أن أجعل صفوف الدراسة أكثر إثارة للاهتمام، وممتعة للطلاب في ذات الوقت، رغم أن المدرسة نفسها كانت صارمة للغاية. كانت قاعات الدراسة ذات نوافذ علوية، وكان هناك واحد من نُظّار المدرسة يقف فوق كرسي ويتلصص على المدرسين من النافذة. هل تصدق هذا؟

لكنني لم أتقيد بفكر المدرسة، ولأنني كنتُ في كلية الدراسات العليا فقد كان الحماس يغلي في داخلي. كان هدفي هو إيصال هذا الحماس إلى الطلاب، وأن

أساعدهم على مشاهدة جمال العالم الذي يحيطهم بطريقة جديدة، وأن أغيرهم بحيث يرون عالَم الفيزياء جميلًا، وأن يفهموا أن الفيزياء موجودة في كل مكان وتتخلل حياتنا. لكنني وجدتُ أن ما يهم ليس ما أدرِّسه، وإنما ما أكشفه لهم. فتغطية المواضيع في قاعة الدرس قد تكون ممارسة مملة، وهذا هو ما يشعر به الطلاب. لكن من ناحية أخرى يساهم الكشف عن القوانين الفيزيائية وتوضيحُها من خلال المعادلات في عرض عملية الاكتشاف بما فيها من جِدة وإثارة، وهو الأمر الذي يحب الطلاب أن يكونوا جزءًا منه.

كما أنه قد تسنى لي أن أفعل هذا بطريقة مختلفة بعيدًا عن قاعات الدرس بمسافات كبيرة. فقد كانت المدرسة ترعى في كل سنة إجازة لمدة أسبوع كامل، يصطحب فيها أحدُ المعلمين الأطفالَ، في رحلة إلى موقع بدائي للتخييم على مسافة بعيدة نسبيًا. ولقد خرجتُ في هذه الرحلة ذات مرة، وأحببتها أنا وزوجتي هويبرثا. فهناك طبخنا معًا، ونمنا في الخيام. ولأننا كنا بعيدين جدًّا عن أضواء المدينة، فقد أيقظنا الأطفال ذات مرة في منتصف الليل، وأعطيناهم شراب الشوكولاته الساخنة، ثم أخرجناهم من الخيام لينظروا إلى النجوم. أريناهم المجموعات النجمية والكواكب، وتمكنوا من رؤية مجرة درب التبانة في أزهى صورها.

لم أكن وقتها أدرُس الفيزياء الفلكية ولا أدرِّسها – الواقع أنني كنتُ أصمم تجارب لاكتشاف بعض أصغر الجسيمات الموجودة في الكون – لكن الفلك كان لا يفتأ يسحرني. الحقيقة أن أي فيزيائي عاش على ظهر هذه الأرض، يحمل في قلبه حبًّا للفلك. والكثير منهم بنوا تلسكوباتهم الخاصة وهم في المدرسة الثانوية. حتى إن صديق عمري وزميلي بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، جورج كلارك، صنع وصقل مرآة يبلغ قطرها ست بوصات كي يضعها في تلسكوب عندما كان في المدرسة الثانوية. لماذا يحب الفيزيائيون الفلك إلى هذه الدرجة؟ واحد من أسباب ذلك أن الكثير من التطورات التي حدثتْ في الفيزياء – من نظريات عن الحركات المدارية – قد نتجتْ عن أسئلة وملاحظات ونظريات فلكية. لكن هناك سبب آخر أيضًا، وهو أن علم الفلك وعلم الفيزياء واحد؛ وهو الأمر الجلي للناظر في السماء الذي يرى الكسوف والمذنبات والشهب والعناقيد المغلقة والنجوم النيوترونية وانفجارات أشعة جاما والطائرات والأسدمة الكوكبية والمستعرات العظمى وعناقيد المجرات والثقوب السوداء.

ما عليك إلا أن تنظر إلى السماء وتطرح على نفسك بعض الأسئلة المنطقية، ألا

وهي: لماذا السماء زرقاء؟ لماذا الغروب أحمر؟ لماذا السحب بيضاء؟ لدى الفيزياء الإجابة، وهي أن ضوء الشمس مؤلف من جميع ألوان قوس قزح. لكنه بينما يشق طريقه متخللًا الغلاف الجوي، يتبعثر في جميع الاتجاهات متحولًا إلى جزيئات وجسيمات غبار دقيقة (أصغر بكثير من الميكرون الذي يبلغ حجمه ١/٢٥٠٠٠٠ من البوصة). ويسمى هذا بتبعثر رايلي. والضوء الأزرق هو الأكثر تبعثرًا من بين كل الألوان، إذ يبلغ تبعثره خمسة أضعاف تبعثر الضوء الأحمر. ومن ثم فإنك لو نظرتَ إلى السماء خلال النهار في أي اتجاه[1] تجد اللون الأزرق هو المهيمن، وهو ما يجعل السماء زرقاء. لو نظرتَ إلى السماء من فوق سطح القمر (قد تكون شاهدت الصور)، لن تجدها زرقاء وإنما سوداء كما هي سماؤنا في الليل. لماذا؟ لأن القمر ليس له غلاف جوي.

لماذا الغروب أحمر اللون؟ لذات السبب الذي يجعل السماء زرقاء. عندما تكون الشمس في الأفق، تنتقل أشعتها متخللة طبقاتٍ أسمك من الغلاف الجوي ويكون أكثر التبعثر في الأضواء الأخضر والأزرق والقرمزي التي تُرشَّح من ضوء الشمس بالطبع. وعندما يصل الضوء إلى أعيننا – وتصير السحب فوقنا – يكون مؤلفًا في معظمه من الأصفر والبرتقالي والأحمر على وجه الخصوص. ولذلك تبدو السماء أحيانًا كأنها نار مستعرة عند الغروب وعند الشروق.

لماذا السحب بيضاء؟ لأن قطرات الماء الموجودة في السحب أكبر بكثير من الجسيمات الصغيرة التي تجعل السماء زرقاء، وعندما يبعثر الضوء تلك الجسيمات الأكبر حجمًا تتبعثر الألوان بالتساوي. وهو ما يُبقي الضوء أبيض، لكن إذا كانت السحابة سميكة جدًّا ورطبة أو إذا كانت تقع في ظل سحابة أخرى، فحينها لن يخترقها الكثير من الضوء وستغدو السحابة داكنة.

واحد من العروض العملية التي ألجأ إليها في صفوفي هو تصميم قطاع من «سماء زرقاء». فأطفئ جميع الأضواء، ثم أسلط بقعة ضوء أبيض ساطعة جدًّا على سقف الغرفة قرب السبورة. وأحمي بقعة الضوء بعناية. ثم أشعل بضعة سجائر وأمسك بها داخل شعاع الضوء. إن جسيمات الدخان صغيرة بما يكفي لإحداث تبعثر رايلي، ولأن الضوء الأزرق هو الأكثر تبعثرًا، يرى الطلاب دخانًا أزرق. بعدها أضيف خطوة لهذا الشرح العملي، فأتنشق الدخان وأبقيه في رئتيَّ دقيقةً أو نحو ذلك، وهو ليس بالأمر اليسير، لكن العلم أحيانًا يتطلب تضحيات. ثم أزفر الدخان في شعاع الضوء.

(١) احترس! ولا تنظر أبدًا إلى الشمس.

عندها يرى الطلاب دخانًا أبيض، فقد صنعتُ سحابة بيضاء. لقد زاد حجم جسيمات الدخان الصغيرة في رئتيّ اللتين تحتويان على الكثير من بخار الماء. ومن ثم تتبعثر جميع الألوان بالتساوي بعد أن ازداد حجم الجسيمات، ويصير الضوء المبعثر أبيض. كما يتحول الضوء الأزرق إلى أبيض وهو الأمر المدهش حقًّا.

عن طريق هذا الشرح العملي استطعتُ أن أُجيب عن سؤالين في وقت واحد ألا وهما: لماذا السماء زرقاء؟ ولماذا السحب بيضاء؟ لكن في الحقيقة هناك سؤال ثالث بالغ الأهمية يتعلق باستقطاب الضوء، سوف أتناوله في الفصل الخامس.

في الريف، استطعتُ أن أُري طلابي مجرة أندروميدا، المجرة الوحيدة التي يمكن رؤيتها بالعين المجردة، والتي تبعد عنا نحو ٢,٥ مليون سنة ضوئية (١٥ مليون تريليون ميل)، وهي بمقاييس المسافات الفلكية تعتبر ملاصقة لنا. وتتكون هذه المجرة من ٢٠٠ مليار نجم. تخيل ذلك، ٢٠٠ مليار نجم نراها نحن رقعة باهتة مشوشة. كما تمكنَّا من رؤية كثير من النيازك التي يسميها معظم الناس شهبًا. فلو جلس المرء يراقب في صمت، فسيلاحظ واحدًا منها كل أربع دقائق أو خمس. لم تكن هناك أقمار صناعية وقتها، لكنك الآن تستطيع أن تشاهد كمًّا كبيرًا منها في السماء. هنالك ما يزيد عن ألفي قمر صناعي يدور حول الأرض، ولو ركزتَ بصرك خمس دقائق في السماء، فإنني شبه متيقن من أنك سترى أحدها، خاصة لو نظرتَ إلى السماء في الساعات القلائل التي تعقب الشروق أو تسبق الغروب، حيث لا تكون الشمس قد أشرقت على القمر الصناعي نفسه أو غربت عنه، ويظل ضوء الشمس يعكسه على عينيك. وكلما ازداد بعد القمر الصناعي، ومن ثم ازداد الفارق الزمني بين غروب الشمس على الأرض وغروبها على القمر الصناعي، تأخرتْ رؤيتك له أثناء الليل. ويمكنك تمييز الأقمار الصناعية فورًا لأنها أسرع ما يتحرك في السماء (عدا النيازك)؛ وإذا رأيتها تومض، فاعلم أنها طائرة وليست قمرًا صناعيًّا.

كنتُ أحب بشكل خاص أن أشير إلى كوكب عطارد؛ ليراه الناس ونحن نتأمل النجوم في السماء. ولأنه الكوكب الأقرب إلى الشمس، فهو كذلك الأصعب في رؤيته بالعين المجردة. ولا تتأتى الظروف المثالية لرؤيته إلا خلال أربعٍ وعشرين صباحًا ومساءً فقط في السنة كلها. تستغرق دورة عطارد حول الشمس ثمانية وثمانين يومًا فقط، وهو السبب الذي لأجله سمي هذا الكوكب باسم الإله الروماني الرسول ذي السرعة الخارقة؛ أما السبب الذي يصعب لأجله رؤية مداره فهو قربه الشديد من

الشمس. فعندما ننظر إليه من الأرض لا نجده يبعد عن الشمس إلا بقدر ٢٥ درجة، وهو القدر الذي يقل عن الزاوية التي تفصل عقربي الساعة عندما تشير إلى الحادية عشرة. لا تستطيع أن تراه إلا بعد الغروب بقليل وقبل الشروق، عندما يكون في أبعد ما يمكن أن يكون عن الشمس حسبما نراه من الأرض. في الولايات المتحدة نجده دائمًا قريبًا من الأفق، وقد لا يتسنى للمراقب رؤيته إلا إذا كان في الريف. يا للروعة إذا تسنى لك أن تراه حقًّا.

إن التأمل في السماء يجعلنا نرى مدى اتساع هذا الكون. لو واصلنا النظر إلى السماء ليلًا وتركنا أعيننا تتكيف مع السماء بالقدر الكافي، فستتمكن من رؤية ذلك البناء الخارق للامتدادات القصوى لمجرتنا، مجرة درب التبانة، وهي بنية بارعة الجمال، مؤلفة مما بين ١٠٠ مليار إلى ٢٠٠ مليار نجم، متجمعة كأنها محبوكة في نسيج شفيف دقيق للغاية. إن الكون أكبر من أن يُدرَك، لكن يمكنك أن تبدأ إدراكه بتأمل درب التبانة.

بحسب تقديراتنا الحالية، توجد في الكون مجرات بذات عدد النجوم الموجودة في مجرتنا. والحقيقة أن معظم ما تراه التلسكوبات عند رصد الفضاء العميق هو مجرات — فمن المستحيل تمييز نجم مفرد من مسافات بعيدة جدًّا – وكل واحدة من تلك المجرات تحتوي على مليارات النجوم. أو تأمل ذلك الاكتشاف الحديث لأضخم بناء في الكون، المسمى بحائط المجرات العظيم الذي رسم خريطته مسح سلُووانْ الرقمي للسماء، وهو مشروع ضخم جمع مجهودات ما يزيد عن ثلاثمائة فلكي ومهندس، وخمس وعشرين جامعة ومعهدًا بحثيًّا. كما أن التلسكوب الذي خصصه مشروع سلُووانْ يظل يراقب السماء كل ليلة، وقد بدأ تشغيله عام ٢٠٠٠، وسوف يواصل عمله حتى عام ٢٠١٤. يمتد هذا الحائط العظيم بطول مليار سنة ضوئية. هل دار رأسك؟ لو لم يحدث ذلك، فلتعلم أن الكون الذي يمكن رؤيته (لا كامل الكون بل الجزء الذي نستطيع رؤيته) تبلغ مساحته نحو ٩٠ مليار سنة ضوئية.

تلك هي قوة الفيزياء، نستطيع أن نعرف منها أن كوننا مؤلف من نحو ١٠٠ مليار مجرة. كما نعرف منها كذلك أن مِن بين كل المادة الموجودة في الجزء المرئي لنا من الكون، ٤ في المائة مادة عادية، وهي التي تتشكل منها النجوم والمجرات (وأنا وأنت). وهناك نحو ٢٣ بالمائة منها يسمى بالمادة المظلمة (غير مرئية). إننا نعلم بوجودها لكننا لا نعرف كنهها. أما الـ ٧٣ بالمائة الباقية والتي هي الكتلة الأعظم من الطاقة في الكون فتسمى بالطاقة المظلمة، وهي أيضًا غير مرئية؛ ولا يعلم أحد كنهها كذلك. وهو ما

يعني أننا نجهل بكنه ٩٦ بالمائة من الكتلة / الطاقة الموجودة في الكون. لقد أماطت الفيزياء اللثام عن الكثير، لكن ما زال هناك ألغاز كثيرة لم تُحل، وهو الأمر الذي أراه محفزًا جدًّا.

تستكشف الفيزياء نطاقات بالغة الضخامة، وفي الوقت ذاته تسبر أغوار أصغر النطاقات، بل أصغر دقائق المادة كالنيوترينو الذي يمثل شظية من البروتون. تلك النطاقات الصغيرة هي التي أنفقتُ عليها جل وقتي في بداية عملي بهذا المجال، أقيس وأرسم الخرائط الخاصة بانطلاق الجسيمات والإشعاع من النويات المشعة. وهذا يندرج تحت الفيزياء النووية، لكنه ليس تحت الفيزياء النووية المتخصصة في صناعة القنابل. لقد كنتُ أدرس سلوكيات المادة عند مستوى أولي.

لعلك تعلم أن غالبية المواد التي تراها وتستطيع لمسها، مؤلفةٌ من عناصر كالهيدروجين والأكسجين والكربون، مجمّعةً معًا في شكل جزيئات، وأن أصغر وحدة في العنصر هي الذرة المؤلفة من نواة وإلكترونات. تذكر أن النواة تتألف من بروتونات ونيوترونات. يتألف الهيدروجين، الذي هو العنصر الأخف وزنًا والأوفر في الكون، من بروتون واحد وإلكترون واحد. لكنّ هناك نوعًا من أنواع الهيدروجين يحتوي على نيوترون وبروتون في نواته، وهو نظير الهيدروجين الذي هو صورة أخرى من ذات العنصر، ويسمى اليوتيريوم. بل هناك أيضًا نظير ثالث من الهيدروجين بنواته اثنان من النيوترونات وبروتون واحد، ويسمى التريتيوم. لكن جميع نظائر أي عنصر بها ذات عدد البروتونات، لكنها تتباين في عدد النيوترونات، وكذلك تتباين العناصر في عدد نظائرها. فمثلًا للأكسجين ثلاثة عشر نظيرًا، بينما للذهب ستة وثلاثون نظيرًا.

من بين هذه النظائر ما هو مستقر، أي أنه يمكن أن يستمر إلى الأبد أو ما هو نحوه. لكن غالبيتها غير مستقرة، وهي وسيلة أخرى للقول بأنها مشعة، والنظائر المشعة تضمحل، أي إنها أجلًا أو عاجلًا سوف تتحول إلى عناصر أخرى. بعض تلك المواد التي تتحول إليها هذه المواد المشعة مستقر، ومن ثم، يتوقف الاضمحلال الإشعاعي، لكن بعضًا منها غير مستقر، ومن ثم، يتواصل الاضمحلال حتى الوصول إلى الحالة المستقرة. من بين نظائر الهيدروجين كلها نجد منها واحدًا مشعًا فقط، وهو التريتيوم الذي يتحول إلى نظير مستقر هو الهيليوم. ومن بين الثلاثة عشر نظيرًا للأكسجين ثلاثة مستقرة، ومن بين الستة والثلاثين نظيرًا للذهب واحد مستقر فقط.

لعلك تذكر أننا نقيس مدى سرعة اضمحلال النظائر عن طريق «عمر النصف»

لها، وهو الذي يتدرج من ميكرو ثانية (جزء من مليون جزء من الثانية) إلى مليارات السنين. فلو قلنا إن عمر النصف للتريتيوم يقدر بنحو اثني عشر عامًا، فإننا نعني أنه في أي عينة لدينا من التريتيوم سيضمحل نصف النظير في غضون اثني عشر عامًا (ولن يتبقى إلا ربعها فقط بعد أربعة وعشرين عامًا). يعتبر الاضمحلال النووي واحدًا من أهم العمليات التي من خلالها يتم تحويل العديد من العناصر المختلفة وإنشاؤها. لكنها ليستْ من ضروب الخيمياء. والواقع أنني خلال دراستي للدكتوراه اعتدتُ مشاهدة النظير المشع للذهب يضمحل إلى الزئبق، لا العكس الذي كان خيميائيو العصور الوسطى يودون أن يفعلوه. لكن رغم هذا هناك الكثير من نظائر الزئبق والبلاتينوم كذلك تضمحل متحولة إلى الذهب. لكن نظيرًا واحدًا للبلاتينوم ونظيرًا واحدًا للزئبق يضمحلان متحولَين إلى ذهب مستقر، من ذلك النوع الذي تحب أن تضعه حول إصبعك.

كان هذا العمل مشوقًا بشكل هائل؛ فقد كنتُ أحمل نظائر مشعة تضمحل في يدي حرفيًّا. كان أمرًا خارقًا. فقد كانت نصف عمر النظائر التي أعمل عليها يبلغ يومًا أو بضعة أيام. فمثلًا كان لذهب – ١٩٨ نصف عمر يقدر بما يزيد عن اليومين ونصف بقليل؛ لذلك فقد تعين عليَّ العمل بسرعة. فكنت أقود سيارتي من دلفت إلى أمستردام؛ لأنهم كانوا يستخدمون هناك المسرع الدوراني لتصنيع تلك النظائر، ثم أعود مسرعًا إلى دلفت. فهناك كنت أذوّب النظائر في الحمض كي أحولها إلى الصورة السائلة، ثم أضعها على غشاء رقيق وأدخلها في مِكشاف الجسيمات.

كنتُ أحاول التحقق من صحة نظرية تتعلق بالاضمحلال النووي، وهي نظرية تنبأتْ بمقدار إشعاع جاما، نسبة إلى جميع إشعاعات الإلكترون المنبعثة من النويات، وكان عملي هذا يتطلب قياسات دقيقة. كان هذا العمل قد أُنجز بالفعل على العديد من النظائر المشعة، لكن بعض القياسات الحديثة جاءت مغايرة لما تنبأتْ به تلك النظرية. اقترح عليَّ مشرفي البروفيسور آلدرت وابسترا أن أحاول تحديد موضع الخطأ، أفي النظرية أم في القياسات. كان ذلك عملًا ممتعًا للغاية كما لو أنني أعمل على أحجية معقدة بشكل ساحر. كان التحدي يتمثل في أن تكون قياساتي أكثر دقةً وتحديدًا من قياسات الباحثين الآخرين الذين أتوا من قبلي.

والإلكترونات صغيرة الحجم جدًّا حتى إن بعضهم يقول إنها ليس لها حجم من الناحية الفعلية – يقل عرضها عن جزء من ألف تريليون جزء من السنتيمتر – ويبلغ

الطول الموجي لأشعة جاما أقل من جزء من مليون جزء من السنتيمتر. ولقد زودتني الفيزياء بوسائل اكتشافِها وإحصائها. وذلك هو أمر آخر أحبه في الفيزياء التجريبية، أنها تجعلنا «نلمس» ما هو غير مرئي.

كي أحصل على القياسات التي أريدها، كان عليَّ أن أستنزف العينة قدر ما أستطيع، لأنني كلما حظيتُ بعدد أكبر حظيتُ بدقة أعظم. وكثيرًا ما واصلتُ العمل لنحو ستين ساعة متصلة دون نوم. لأنني كنتُ مهووسًا بعض الشيء.

والدقة للفيزيائي التجريبي مفتاح لكل شيء. والدقة هي الشيء الوحيد المهم هنا، والقياسات التي لا تنبئ بدرجة الدقة التي تتمتع بها لا معنى لها على الإطلاق. تكاد كتب الفيزياء الجامعية تتجاهل هذه الفكرة البسيطة القوية الجوهرية. لكن معرفة درجة الدقة هو أمر أساسي في كثير من أمورنا الحياتية.

خلال عملي في النظائر المشعة كان تحقيقي لدرجة الدقة تلك أمرًا غاية في الصعوبة، لكنني خلال ثلاث سنوات أو أربع ازددتُ براعة في إجراء القياسات. وبعد أن أجريتُ تحسينات على بعض المستكشفات صارت دقيقة إلى حد هائل. كنتُ أثبتُ النظرية وأنشر النتائج، ثم صار هذا العمل في النهاية أطروحتي للدكتوراه. وكان أكثر ما أرضاني بشكل خاص هو أن نتائجي كانت حاسمة جدًّا، وهو الأمر الذي لا يتأتى كثيرًا. فكثيرًا ما يحدث في الفيزياء وفي العلوم عامة أن لا تأتي النتائج قاطعة. لكنني كنتُ محظوظًا بالوصول إلى تلك النتيجة الحاسمة. لقد حللتُ أحجية وأثبتُّ نفسي فيزيائيًّا، وساهمتُ في رسم تلك المنطقة المجهولة الخاصة بعالم ما دون الذرات. كنت وقتها في التاسعة والعشرين من عمري، وكنت شديد الحماس لما قمتُ به من مساهمة عظيمة. ليس من المقدر لنا جميعًا أن نكتشف اكتشافات عظيمة ضخمة كما فعل نيوتن وأينشتاين، لكن لا تزال هناك الكثير من المناطق البكر القابلة للاستكشاف.

كما أن الحظ حالفني ونلتُ درجتي في وقتٍ كانت حقبةٌ جديدة من استكشاف طبيعة الكون تنفتح. فقد كان الفلكيون يقومون باكتشافات بسرعة مذهلة، إذ كان بعضهم يستكشف الغلاف الجوي لكل من المريخ والزهرة، مفتشين عن بخار الماء. بعضهم اكتشف أحزمة الجسيمات المشحونة التي تدور حول خطوط الحقول المغناطيسية الموجودة في الأرض، والتي نعرفها اليوم باسم أحزمة فان آلن. والبعض الآخر اكتشف مصادر ضخمة قوية للموجات الراديوية المعروفة باسم الكوازارات أو أشباه النجوم (المصادر الراديوية شبه النجمية). وفي عام ١٩٦٥ اكتُشف إشعاعُ الخلفية الكونية

الميكروي (CMB) - آثار الطاقة التي أطلقها الانفجار العظيم، والتي هي دليل قوي على نظرية الانفجار العظيم التي تفسر أصل العالم، والتي يثور بشأنها الكثير من الجدل. ولم يمض وقت طويل حتى اكتشف الفلكيون عام ١٩٦٧ فئةً جديدة من النجوم، سُمّيت فيما بعد النجوم النابضة (أو النابضات).

كان بإمكاني أن أواصل العمل في الفيزياء النووية؛ لأنه كانت تتم بها أيضًا اكتشافات هائلة. وكان جل هذا العمل في بحث واستكشاف مملكة الجسيمات دون الذرية الآخذة في الاتساع بسرعة، واستكشاف الكواركات على وجه الخصوص، والتي اتضح أنها لبنات بناء البروتونات والنيوترونات. فتلك الكواركات تتسم بتنوع كبير في أنماطها السلوكية، لدرجة أن الفيزيائيين كي يصنفوها خلعوا عليها ما أسموه بالتنوعات، على غرار: كوارك علوي وكوارك سفلي، وكوارك غريب وكوارك ساحر، وكوارك قمي وكوارك قعري. كان اكتشاف الكوارك واحدة من تلك اللحظات الجميلة في العلم التي تتأكد فيها فكرةٌ نظرية. فقد تنبأ الفيزيائيون النظريون بوجود الكواركات، ثم وجدها زملاؤهم التجريبيون. ولكم اندهشوا عندما وجدوا المادة أكثر تعقيدًا في أساساتها عما كان معروفًا من قبل. فمثلًا صرنا اليوم نعرف أن البروتونات تتكون من كواركين علويين وكوارك سفلي واحد، ملتصقين معًا بواسطة قوة نووية شديدة، تتخذ شكل جسيمات غريبة أخرى تسمى جلوونات. مؤخرًا قدر بعض الفيزيائيين كتلة الكوارك العلوي على أنها تساوي حوالي ٠,٢٪ من كتلة البروتون، في حين قدروا كتلة الكوارك السفلي بنحو ٠,٥٪ من كتلة البروتون. لم تعد تلك هي النواة التي عرفها جدك من قبل.

إنني على يقين أن مملكة الجسيمات دون الذرية تلك كانت ستكون مجالًا ساحرًا لأعمل فيه، لكنني عن طريق محض مصادفة سعيدة، قد اتضح لي أن المهارات التي تعلمتها بهدف قياس الإشعاع المنبعث من النواة نافعةٌ جدًّا في استكشاف الكون. وفي عام ١٩٦٥ تلقيتُ دعوة من البروفيسور برونو روسي بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا كي أعمل على علم فلك الأشعة السينية، التي كانت وقتها مجالًا جديدًا بالكلية، إذ إنه لم يظهر إلا قبل سنوات قلائل، بالمعنى الحرفي للعبارة، فقد دشنه روسي عام ١٩٥٩.

كان معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا أفضل شيء حدث في حياتي. فقد كان عمل روسي على الأشعة الكونية عملًا أسطوريًّا. كان قد سبق له أن ترأس قسمًا في لوس آلاموس خلال الحرب، وتفوق في إجراء قياسات الرياح الشمسية، التي تسمى أيضًا البلازما بين الكوكبية، والتي هي تيار من الجسيمات ذات الشحنة التي تطردها الشمس،

والتي تجعل شفقنا القطبي يتجه شمالًا و«يدفع» أذيال المذنبات بعيدًا عن الشمس. والآن خطرتْ بباله فكرة أن يفتش في الكون عن الأشعة السينية. وكان عمله هذا محض استكشاف، ولم يكن يملك أدنى فكرة عما إذا كان سيعثر على هذه الأشعة أم لا.

في ذلك الوقت كان المرء في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا يستطيع العمل على أي فكرة تطرأ في ذهنه إذا استطاع إقناع الناس هناك بقابليتها للتنفيذ. شتان بين هذا وما كان يجري في هولندا؛ ففي دلفت كانت هناك تراتبية صارمة، وكان طلبة الدراسات العليا يعاملون على أنهم من طبقة دنيا. فقد كان الأساتذة يحوزون مفاتيح الباب الأمامي، بينما لا يحوز طالب الدراسات العليا سوى مفتاح باب القبو الذي تركن فيه الدراجات. وفي كل مرة كان أي طالب يدلف إلى المبنى كان عليه أن يتلمس طريقه بين غرف تخزين الدراجات، ويتذكر جيدًا أنه لا شيء.

ولو أراد طالب الدراسات العليا أن يواصل العمل إلى ما بعد الخامسة مساءً كان عليه أن يقدم طلبًا بذلك في الرابعة مساءً، مقدِّمًا فيها مبرراته للبقاء في وقت متأخر، وهو الأمر الذي تعين عليَّ فعله كل يوم تقريبًا. كانت تلك بيروقراطية غاية في الإزعاج.

كان الأساتذة الثلاثة الذين يديرون معهدي يحجزون أماكن لركن سياراتهم قريبة من الباب الأمامي. وكان واحد منهم، وهو المشرف عليَّ، يعمل في أمستردام ويحضر إلى دلفت مرة واحدة يوم الثلاثاء من كل أسبوع. وذات يوم سألته: «هل لي أن أستغل مكان الركن الخاص بك عندما لا تكون موجودًا؟» فأجابني قائلًا: «كلا بالطبع»، لكنني في اليوم التالي ركنتُ سيارتي مكانه، وكان من جراء ذلك أن نودي علي في المذياع الداخلي العام، وأُمرت بأشد العبارات أن أنقل سيارتي من ذلك المكان. وإليك هذا المثال الآخر، لأنني كنت أضطر للذهاب إلى أمستردام لإحضار النظائر فقد سمح لي بصرف خمسة وعشرين سنتًا لأبتاع بها كوب قهوة و١,٢٥ جيلدر لأبتاع بها غدائي (كان الـ ١,٢٥ جيلدر يساوي نحو ثلث دولار أمريكي في ذلك الوقت)، لكن كان عليَّ أن أقدم لإدارة الجامعة إيصالي شراء منفصلين للغداء والقهوة. ولما طلبتُ أن أضيف السنتات الخمسة والعشرين الخاصة بالقهوة إلى إيصال الغداء فأقدم إيصالًا واحدًا قدره ١,٥٠ جيلدر، كتب لي رئيس القسم، البروفيسور بليزي، خطابًا يقول لي فيه إنني إذا أردتُ أن أحظى بوجبة فاخرة فعلي أن أفعل ذلك على نفقتي الخاصة.

لذلك تخيل سعادتي عندما التحقتُ بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا وتخلصتُ

من كل هذا العناء، لقد شعرتُ وكأنني ولدت من جديد. وهناك وجدتُ كل ما يشجع المرء؛ فقد حزتُ مفتاحًا للباب الأمامي، وصرتُ أستطيع العمل في مكتبي في أي وقت شئت، ليلًا أو نهارًا. ولقد رأيتُ في مفتاح باب هذا المبنى مفتاحًا لكل شيء. وفي شهر يونيو من عام ١٩٦٦ عقب التحاقي بالمعهد بستة أشهر، عرض علي رئيس قسم الفيزياء وظيفةً تدريسية فقبلتها ولم أتركها أبدًا.

كما كان في التحاقي بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا متنفسًا منعشًا لي، إذ إنني قد عشت الدمار الذي صاحب الحرب العالمية الثانية؛ فقتل النازيون نصف عائلتي، وهي مأساة لم أتجاوزها بعد. أحيانًا ما أتكلم عن تلك المأساة ولكن في مناسبات نادرة؛ لأن الأمر يصعب كثيرًا عليَّ، رغم أنه قد مضى عليه ما يزيد عن الخمسة والستين عامًا، لكنه لا يزال مؤججًا للمشاعر. ودائمًا ما أكاد أنا وشقيقتي بيا ننفجر في البكاء عندما نتحدث في الأمر.

ولدتُ عام ١٩٣٦، ولم أكن قد تجاوزت الرابعة من عمري وقتما هاجم الألمان هولندا في العاشر من مايو عام ١٩٤٠. ومن ذكرياتي المبكرة ما حدث عندما اختبأنا جميعًا، جداي لأمي وأمي وأبي وشقيقتي وأنا في حمام منزلنا (وعنوانه ٦١ شارع آمندلسترات بلاهاي) مع دخول القوات النازية بلادنا. كنا نضع مناديل مبللة على أنوفنا لأننا حُذرنا من احتمال وقوع هجمات بالغاز.

في عام ١٩٤٢، اعتقلت الشرطة الهولندية جداي اليهوديين جوستاف وإيما لوين جوتفيلد من منزلهما. وفي ذات الوقت تقريبًا اقتادوا أخت والدي جوليا وزوجها جيكوب (كان ينادى جينو) وأطفالهما الثلاثة: أوتو ورودي وإيمي، ووضعوهم في شاحنة مع حقائب ملابسهم وأرسلوهم إلى معسكر فستربورك، وهو معسكر الترحيل في هولندا. كان أكثر من مائة ألف يهودي قد رحلوا من خلال فستربورك إلى معسكرات أخرى. ثم ما لبث النازيون أن أرسلوا جداي إلى معسكر أوشفيتز وقتلوهما – بالغاز – يوم وصولهما في التاسع عشر من نوفمبر من عام ١٩٤٢. كان جداي كلاهما في الخامسة والسبعين من عمرهما، ولذلك لم يكونا مؤهلَين لمعسكرات السخرة. أما فستربورك فقد كان على النقيض، غريبًا جدًّا، إذ بدا كما لو كان منتجعًا لليهود. كانت فيه عروض لرقص الباليه، ومحال. كما أن أمي اعتادت خبز فطائر البطاطس وإرسالها عبر البريد إلى عائلتنا في فستربورك.

ولأن زوج عمتي، جينو، كان ممن يسميهم الهولنديون «عديمي الجنسية» – إذ لم يحمل جنسية أي دولة – فقد استطاع البقاء في فستربورك بصحبة أسرته لخمسة عشر شهرًا، قبل أن يفصل النازيون بينهم ويشحنوهم إلى معسكرات متفرقة. فقد أرسلوا عمتي جوليا وابنتيها إيمي ورودي إلى معسكر اعتقال النساء في رافنسبروك بألمانيا ثم نقلوهم إلى معسكر بيرجن بيلسن حيث سجنوا إلى أن انتهت الحرب. توفيت عمتي جوليا بعد عشرة أيام من تحريرهم على يد الحلفاء، لكن ابنتا عمتي نجتَا. وأُرسل أوتو ابن عمتي الأكبر إلى رافنسبروك أيضًا حيث معسكر اعتقال الرجال، وقرب نهاية الحرب انتهى به المطاف إلى معسكر ساكسنهاوزن، وقد نجا من مسيرة الموت التي حدثتْ في ساكسنهاوزن في أبريل من عام ١٩٤٥. أما العم جينو فقد أُرسل مباشرة إلى بوخنفالد، حيث قُتل مع ما يزيد عن خمسة وخمسين ألفًا آخرين.

متى شاهدتُ فيلمًا عن الهولوكوست، وهو أمر لم أستطع فعله لزمن طويل جدًّا، أسقطتُ أحداثه فورًا على عائلتي. ولذلك فقد صعبت عليَّ مشاهدة فيلم الحياة جميلة، بل واعترضت عليه؛ إذ لا أستطيع أن أتخيل المزاح بشأن أمر جدي كهذا. وما زالت الكوابيس تزورني مرارًا، يطاردني فيها النازيون وأقوم منها مرتعبًا. بل إنني ذات مرة رأيت في أحد كوابيسي أن النازيين يعدمونني.

أرغب أن يأتي يوم أستطيع فيه أن أقطع تلك المسافة، المسافة التي قطعها جداي لأبي في نهاية حياتهما، من محطة القطارات حتى غرف الغاز في أوشفيتز. لا أدري إذا ما كنت سأفعلها يومًا ما، لكنني أظنه السبيل الوحيد لإحياء ذكراهما. ففي مواجهة تلك الوحشية لا نملك إلا تلك البادرات البسيطة، ومعها رفضنا لأن ننسى، فإنني لا أقول أبدًا إن أفراد عائلتي قد «ماتوا» في معسكرات الاعتقال، وإنما أقول دائمًا إنهم قد «قتلوا» حتى لا نسمح للغة بأن تواري الحقيقة.

كان أبي يهوديًّا لكن أمي لم تكن كذلك، ولأنه يهودي متزوج بغير يهودية فلم يكن هدفًا مطلوبًا على وجه السرعة بالنسبة لهم. لكن سرعان ما دخل ضمن نطاق أهدافهم، فإنني أتذكر أنه اضطر عام ١٩٤٣ إلى أن يضع على صدره شارة النجمة الصفراء. لم أضطر أنا أن أضعها ولا أمي ولا شقيقتي كما فعل هو. كما أننا لم نولي الأمر الكثير من الاهتمام على الأقل في البداية. وكان أبي يواريها بعض الشيء تحت ثيابه، وهو ما كان أمرًا ممنوعًا. لكن الأمر المفزع بالفعل هو أنه شيئًا فشيئًا صار متأقلمًا مع القيود التي وضعها النازيون، وهي القيود التي كانت تزداد سوءًا يومًا بعد يوم. ففي البداية مُنع

من استخدام وسائل المواصلات العامة، ثم مُنع من دخول المتنزهات العامة، ثم مُنع من دخول المطاعم، فقد أصبح شخصًا غير مرغوب فيه في أماكن اعتاد التردد عليها لسنوات كثيرة. والمدهش حقًا هو قدرة البشر على التأقلم مع تغير الظروف.

فعندما حُرم استقلال المواصلات العامة قال: «فليكن، فكم مرة كنت أستخدم هذه المواصلات على أية حال؟»، وعندما حُرم ارتياد المتنزهات العامة قال «فليكن، متى اعتدتُ ارتيادها على أية حال؟»، ثم عندما حُرم الدخول إلى المطاعم كان يقول: «فليكن، متى اعتدتُ الذهاب إلى المطاعم على أية حال؟». كان يحاول تسفيه تلك الفظائع ويصورها على أنها إزعاجات بسيطة؛ ربما من أجل أطفاله، وربما كان هذا ليحافظ على سلامه النفسي. لا أدري.

لا يزال الحديث في هذا الأمر من أقسى الأمور على نفسي. كيف للناس أن يروا الماء يرتفع ببطء ولا يدركوا أنه سيغرقهم؟ كيف لهم أن يروه ولا يروه في الوقت ذاته؟ ذلك أمر لا أستطيع التأقلم معه. لكنه، بالطبع، أمر مفهوم كلية، فقد يكون السبيل الوحيد المنجي للمرء طالما هو قادر على خداع نفسه.

ورغم أن النازيين قد حظروا على اليهود ارتياد المتنزهات العامة فإنه قد سُمح لوالدي بأن يسير في المقابر. إلى اليوم لا أزال أذكر مشيات كثيرة قطعتها معه في مقبرة قريبة. كانت تراودنا خيالات عن الكيفية التي مات بها أفراد عائلتنا – أحيانًا كنا نتخيل أربعة منهم ماتوا في يوم واحد. ما زلت أفعل ذلك عندما أتمشى خلال مقبرة ماونت آلبورن الشهيرة بكامبريدج.

لكن أكثر شيء درامي حدث لي خلال نشأتي هو اختفاء أبي المفاجيء. أتذكر جيدًا ذلك اليوم الذي رحل فيه. يومها عدت من المدرسة وخامرني شعور بشكل أو بآخر أنه رحل. لم تكن أمي في البيت، لذلك فقد سألتُ مربيتي ليني «أين أبي؟» فردت عليَّ بإجابة قصدتْ أن تكون مطمئنة، لكنني بشكل أو بآخر أدركتُ أن أبي قد رحل.

رأته بيا وهو يرحل لكنها لم تخبرني بذلك إلا بعدها بسنين كثيرة. كنا نحن الأربعة ننام في غرفة نوم واحدة طلبًا للأمان، وفي الرابعة فجرًا رأته هي ينهض ويضع بعض الثياب في حقيبة. ثم قبّل أمي ورحل. لم تعرف أمي أين ذهب، فلو عرفت لكان ذلك خطرًا محدقًا بها؛ لأن الألمان كانوا سيعذبونها ليعرفوا مكانه، وكانت هي ستخبرهم. صرنا الآن نعرف أن المقاومة أخفته ثم استطاع في النهاية أن يرسل لنا بعض

الرسائل أوصلتها المقاومة لنا، لكننا وقتها كنا في رعب لعدم معرفة مكانه، أو إذا ما كان على قيد الحياة.

كنت وقتها أصغر سنًّا بكثير من أن أدرك كيف كان لغيابه أثر بالغ على أمي. كان والداي يديران مدرسة في منزلنا – وهو بلا شك ما كان له بالغ الأثر في حبي للتدريس – وكافحتْ هي كي تواصل العمل بدونه. كانت أساسًا تحمل نزعة للاكتئاب، لكنها الآن بعد رحيل زوجها صارت تخشى على أطفالها أن يرسلوا إلى معسكرات الاعتقال. لا بد أنها كانت ترتجف رعبًا لأجلنا؛ لأنها ذات مرة – كما أخبرتني بعد خمسة وخمسين عامًا – طلبتْ مني ومن بيا أن نبيت في المطبخ، ثم قامت بسد الفرجات أسفل الأبواب عن طريق حشوها بستائر وبطاطين ومناشف حتى لا يتسرب الهواء إلى الخارج. كانت تنوي فتح محابس الغاز ثم تتركنا نستنشقه فنموت خلال نومنا، لكنها لم تفعلها. من كان ليلومها على التفكير في هذا، لم أكن أنا ولا بيا لنفعل ذلك.

كنت خائفًا للغاية، ورغم علمي بسخافة هذا إلا أنني كنت الذكر الوحيد بينهم، ما جعلني بشكل أو بآخر رجل البيت، رغم أنني كنت في السابعة أو الثامنة من عمري. في لاهايو حيث سكنا، كان هناك العديد من المنازل المدمرة الواقعة على الساحل، نصفها دمره الألمان الذين كانوا يشيدون الملاجيء المحصنة على الشاطيء. كنت أذهب إلى تلك المنازل لسرقة الخشب – كنت أنوي أن أقول «لجمع» لكنها كانت سرقة – كي نستخدمه وقودًا لأغراض الطهي أو التدفئة.

كنا نرتدي صوفًا خشنًا رديئًا باعثًا على الحكاك كي نُدفئ أنفسنا في الشتاء. حتى يومنا هذا لا أتحمل الصوف، فجلدي حساس لدرجة أنني أنام على ملاءات قطنية في كل واحدة منها ثمانمائة خيط. وذلك هو السبب أيضًا في أنني أطلب قمصانًا مصنوعة من قطن عالي الجودة لا يهيج بشرتي. تقول لي ابنتي بولين إنني عندما أراها ترتدي الصوف أستدير مبتعدًا إلى الاتجاه المعاكس، ذلك هو الأثر الذي تركته الحرب فيَّ واستمر معي حتى اليوم.

في خريف عام ١٩٤٤ وبينما الحرب لا تزال مستعرة، عاد أبي. اختلف أفراد عائلتي في آرائهم حول ما حدث بالضبط، لكنني أعتقد أن خالتي العزيزة لاوك كانت ذات يوم في أمستردام التي تبعد نحو ثلاثين ميلًا عن لاهاي، فوقعتْ عيناها على أبي بصحبة امرأة، فتبعته من بعد حتى رأته يدلف إلى منزل. ثم عادتْ إلى ذات المكان بعدها واكتشفتْ أنه يعيش مع امرأة.

أخبرتْ خالتي أمي بالأمر، التي ازدادتْ في بادئ الأمر اكتئابًا وإحباطًا، لكنني أُخبرتُ بعدها أنها استجمعتْ شتات نفسها واستقلتْ قاربًا إلى أمستردام (حيث لم تكن القطارات تعمل بعد) ومشتْ قاصدة ذلك المنزل، ثم قرعتْ جرس الباب. ومن الباب أطلت المرأة فقالت لها أمي: «أريد أن أتكلم مع زوجي». فأجابتها المرأة قائلة: «أنا زوجة السيد لوين»، لكن أمي أصرتْ قائلة: «أريد زوجي». هنا ظهر أبي لدى الباب فقالت له: «سأمهلك خمس دقائق لتحزم أمتعتك وترجع معي وإلا فلتحصل على الطلاق، وحينها لن ترى أبناءك مرة أخرى». في خلال ثلاث دقائق حزم أمتعته ونزل درج البيت كي يرجع معها.

لكن الأمور ازدادت سوءًا برجوعه من عدة أوجه؛ وذلك لأن الناس قد علموا أن أبي الذي اسمه والتر لوين كذلك يهودي. كانت المقاومة قد منحته أوراق هوية زائفة باسم جاب هورتسمان، وأرغمتنا أنا وأختي أن نناديه العم جاب. كان الأمر أشبه بمعجزة ولم أفهمه أنا ولا بيا حتى اليوم، لكن لم يسلمه أحد للنازيين. بل إن أحد النجارين قد صنع قمرة في الطابق السفلي من منزلنا، وكنا نفتح غطاءها فينسل أبي فيها متكورًا ليتوارى. وكان من العجيب أن أبي استطاع أن يفلتَ من الاعتقال تمامًا.

لقد عاد إلى البيت قبل انتهاء الحرب بثمانية أشهر أو نحوها وهي الفترة التي مررنا فيها بأقسى فترات الحرب على الإطلاق، ألا وهي مجاعة الشتاء الهولندية التي وقعت عام ١٩٤٤. ففي تلك الفترة جاع الناس حتى الموت، وقضى فيها نحو عشرون ألف شخص نحبهم. كنا نزحف تحت المنزل طلبًا للدفء كما أننا خلعنا كل عوارض الأرضية – العوارض الخشبية التي كانت تدعم الطابق الأرضي – لاستخدامها وقودًا للمدفأة. في مجاعة الشتاء تلك أكلنا بذور التوليب، بل ولحاء الأشجار كذلك. كان بإمكان الناس أن يسلموا أبي إلى النازيين لقاء الطعام. كما كان النازيون يدفعون مالًا (أظنهم كانوا سيدفعون خمسين جيلدر أي ما يعادل خمسة عشر دولارًا وقتها) لقاء كل يهودي يتم تسليمه.

ذات يوم أتى النازيون إلى منزلنا، فقد كانوا يجمعون الآلات الكاتبة، فتفحصوا آلاتنا التي كنا نستخدمها في تعلم الكتابة، لكنهم رأوها قديمة جدًّا. كان الألمان شديدي الحمق؛ إذ لم يكونوا يلقون القبض على اليهود حين صدر لهم الأمر بجمع الآلات الكاتبة. أعلم أن الأمر يبدو كما لو أنه فيلم سينمائي، لكن هذا ما حدث بالفعل.

لكن بخلاف كل صدمات الحرب تلك، أرى أن أروع ما في الأمر أنني عشتُ

طفولة طبيعية نوعًا ما. استمر والداي يديران مدرستهما – مدرسة لاهاي – كما فعلا قبل الحرب وأثناءها، يدرسان فيها الكتابة على الآلات الكاتبة والاختزال واللغات ومهارات الإدارة. بل إنني كنت أدرّس فيها كذلك أثناء دراستي الجامعية.

كان والداي يحبان الفن فبدأت أدرُسه. ولقد قضيتُ في الجامعة أوقاتًا رائعة من النواحي الأكاديمية والاجتماعية. وفي عام ١٩٥٩ تزوجتُ، ثم التحقت بمرحلة الدراسات العليا عام ١٩٦٠ وهو ذات العام الذي ولدتْ في أواخره ابنتي الكبرى بولين. أما ابني إيمانويل (الذي يحمل اسم تشاك الآن) فقد ولد بعدها بعامين، ثم ولدتْ ابنتي الثانية إيما عام ١٩٦٥ وولد ابننا الثاني جيكوب في الولايات المتحدة عام ١٩٦٧.

لقد حالفني الحظ مع التحاقي بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا؛ فقد وجدت نفسي في خضم اكتشافاتٍ متفجرة تجري في ذلك الوقت. وكانت الخبرة التي أحملها مناسبة جدًّا لما كان يقوم به فريق برونو روسي من أعمال رائدة في مجال علم فلك الأشعة السينية، رغم أنني لم أكن أعرف أي شيء عن أبحاث الفضاء.

كانت صواريخ V-٢ قد كسرتْ حدود غلاف الأرض الجوي، وهو الأمر الذي خلق مشهدًا مفعمًا بفرص جديدة للقيام باكتشافات. والمفارقة هنا أن من صمم صواريخ V-٢ كان فرنر فون براون الذي كان نازيًّا، وكان قد صمم تلك الصواريخ خلال الحرب العالمية الثانية لقتل المدنيين في دول الحلفاء، وكانت بالفعل شديدة التدمير. ففي بلدة بينيماندا بألمانيا، وفي مصنع ميتلفرك سيئ السمعة، المُقام تحت الأرض، عمل العمال المستعبدون على تصنيع هذه الصواريخ، ومات نحو عشرين ألفًا منهم أثناء ذلك. أما الصواريخ نفسها فقد قتلت أكثر من سبعة آلاف مدني كان معظمهم في لندن. وكان هناك واحد من مواقع إطلاق هذه الصواريخ يقع على بعد ميل واحد تقريبًا من منزل جداي لأمي القريب من لاهاي. أذكر صوت الأزيز بينما الصواريخ تزوّد بالوقود، وصوت الهدير وهي تطلق. وفي إحدى الغارات التي شنها الحلفاء بالقنابل، حاولوا تدمير معدات صواريخ الـ V-٢ لكنهم أخطأوا الهدف وقتلوا عوضًا عنها خمسمائة هولندي. وبعد انتهاء الحرب استقدم الأمريكيون فون براون إلى الولايات المتحدة وجعلوا منه بطلًا. إلى الآن أجدني مصعوقًا مما حدث، فهذا الرجل مجرم حرب.

عمل براون مع الجيش الأمريكي لمدة خمسة عشر عامًا على تصنيع أجيال جديدة من صواريخ V-٢، وهي صواريخ الريدستون وجوبيتر، التي كانت تحمل

رؤوسًا نووية. وفي عام ١٩٦٠ التحق بناسا، وأدار مركز مارشال لرحلات الفضاء في آلاباما، وهناك قام بتطوير صواريخ ساترن التي أرسلتْ رواد فضاء إلى القمر. ولقد كانت الأجيال الجديدة من صواريخه هي التي دشنتْ مجال علم فلك الأشعة السينية. وهكذا، فرغم أن الصواريخ قد بدأت كأسلحة، فإنها على الأقل أسهمتْ إسهامات كبيرة في العلم. ففي أواخر خمسينيات القرن العشرين وأوائل ستينياته فتحتْ هذه الصواريخ نوافذ جديدة على العالم – بل على الكون – مما أتاح لنا أن نختلس النظر إلى ما يتجاوز الغلاف الجوي للأرض، ونفتش عن أشياء لم نكن لنراها لولا تلك الصواريخ.

لقد استخدم روسي حدسه في اكتشاف الأشعة السينية القادمة من الفضاء الخارجي. ففي عام ١٩٥٩ ذهب إلى واحد من طلابه السابقين وهو مارتن آنيس، الذي كان يترأس وقتها مؤسسة بحثية بكامبريدج تسمى المؤسسة الأمريكية للعلوم والهندسة، وقال له: «لننظر ما إذا كانت توجد أشعة سينية هناك»، وقد كان. فقد قام الفريق الذي شكلته المؤسسة الأمريكية للعلوم والهندسة، بقيادة ريكاردو جياكوني الذي سيحصل فيما بعد على جائزة نوبل، بوضع ثلاثة من عدادات جايجر مولر في صاروخ أطلقوه في الثامن عشر من يونيو عام ١٩٦٢. لم يستغرق هذا الصاروخ سوى ست دقائق بسرعة تفوق الثمانين كيلومترًا (نحو خمسين ميلًا) كي يتجاوز الغلاف الجوي للأرض، وهو الأمر الذي يعد ضرورة، لأن الغلاف الجوي يمتص الأشعة السينية.

الأكيد أنهم اكتشفوا الأشعة السينية، والأهم من ذلك أنهم استطاعوا إثبات كون تلك الأشعة السينية آتية من مصدر يقع خارج النظام الشمسي. كان الأمر بمثابة قنبلة غيرتْ وجه علم الفلك بأسره. لم يكن أحد يتوقع ذلك، ولم يستطع أحد أن يفكر في أسباب معقولة لسبب وجودها في الفضاء الخارجي، بل لم يفهم أحد، في الواقع، تلك النتائج. ما فعله روسي هو أنه ألقى بتلك الفكرة في الهواء ليرى ما إذا كانت ستفلح، وهذا هو الحدس الذي جعل منه عالِمًا عظيمًا.

إنني لا أزال أذكر تاريخ وصولي إلى معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا بالضبط، في الحادي عشر من يناير عام ١٩٦٦، وذلك لأن واحدًا من أطفالي أصيب بالنكاف وقتها، واضطررنا لتأخير ذهابنا إلى بوسطن؛ لأن الخطوط الجوية الملكية الهولندية رفضت قبولنا على الرحلة؛ لأن النكاف مرض معدٍ. وفي يومي الأول قابلت برونو روسي، وجورج كلارك أيضًا، الذي كان أول من طير بالونًا إلى ارتفاع عال جدًّا – يبلغ

حوالي ١٤٠,٠٠٠ قدم للبحث عن مصادر الأشعة السينية، التي تبث أشعة سينية عالية الطاقة من النوع القادر على اختراق ذلك الارتفاع الكبير، حتى تصل إلى الأرض، وكان ذلك عام ١٩٦٤. قال لي جورج: «لو أردتَ الانضمام إلى مجموعتي فسيكون ذلك عظيمًا. لقد كنتُ في المكان والزمان المناسبين بالضبط.

عندما تكون رائدًا في شيء ما فأنت ملزم بأن تكون ناجحًا فيه، ولقد واصل فريقنا تحقيق الاكتشاف تلو الآخر. وكان جورج سخيًّا معي للغاية، إذ إنه بعد سنتين أوكل لي إدارة المجموعة بالكامل. ولكم كان من الرائع أن أكون مشاركًا في أحدث موجات علم الفلك الفيزيائي.

لقد كنتُ محظوظًا جدًّا؛ لأنني وجدتُ نفسي في وسط أكثر أبحاث علم الفيزياء الفلكية تشويقًا وقتها، لكن الحقيقة أن جميع مناحي الفيزياء بديعة؛ فكلها مفعمة بمباهج مثيرة للفضول، وكلها لا تفتأ تُميط اللثام عن اكتشافات جديدة مذهلة. فبينما كنا نكتشف مصادر جديدة للأشعة السينية، كان فيزيائيو الجسيمات يكتشفون المزيد من المكونات الأساسية للنواة، مزيلين بذلك الغموض المتعلق بما يجعل النواة متماسكة، بأن اكتشفوا بوزونات دبليو W وزد Z التي تحمل التفاعلات النووية «الضعيفة»، واكتشفوا الكواركات والجلوونات التي تحمل التفاعلات «القوية».

لقد مكنتنا الفيزياء من رؤية ما حدث في الأزمنة السحيقة، ومن رؤية حدود الكون القصوى، ومن تشكيل تلك الصورة المذهلة المعروفة باسم حقل هابل العميق الفائق، التي كشفتْ عن وجود ما يبدو عددًا لا متناهيًا من المجرات. لا يصح أن تنهي قراءة هذا الفصل دون البحث عن حقل هابل الفائق العميق على الشبكة العنكبوتية، بل إن من أصدقائي من جعلوا هذه الصورة حافظة لشاشات حواسيبهم.

يبلغ عمر الكون نحو ١٣,٧ مليار سنة. لكن ولأن الفضاء نفسه يتمدد بشكل هائل منذ حدوث الانفجار العظيم، صرنا اليوم نشاهد مجرات تكونت بعد ما بين أربعمائة وثمانمائة مليون سنة تلت الانفجار العظيم، وصارت الآن تبعد عنا أكثر من ١٣,٧ مليار سنة ضوئية. والآن صار الفلكيون يقدرون المسافة التي تفصلنا عن حافة الكون في جميع الاتجاهات بنحو ٤٧ مليار سنة ضوئية. وبسبب تمدد الكون صارت الكثير من المجرات القصية تتحرك مبتعدة عنا بسرعة تفوق سرعة الضوء. قد يبدو ذلك صادمًا بل ومستحيلًا بالنسبة لأولئك الذين نشأوا على المفهوم الذي وضعه آينشتاين في نسبيته الخاصة، والذي يقول بأنه لا يمكن لشيء أن يتحرك بسرعة تفوق سرعة الضوء. لكن،

ووفقًا للنسبية العامة التي وضعها آينشتاين، لا حدود للسرعة التي تتباعد بها مجرتان إحداهما عن الأخرى عندما يكون الفضاء نفسه يتمدد. الآن صار لدى العلماء أسباب كثيرة لأجلها يرون أننا نعيش في العصر الذهبي لعلم الكونيات، وهو العلم الذي يدرس أصل الكون بأسره وتطوره.

لقد أوجدت الفيزياء تفسيرات لجمال أقواس قزح وهشاشتها، ولوجود الثقوب السوداء، ولحركة الكواكب بتلك الطريقة التي تتحرك بها، ولما يحدث عند انفجار النجوم، ولتزايد سرعة دوران الراقصة على الجليد عندما تضم ذراعيها إلى صدرها، ولانعدام أوزان رواد الفضاء عندما يصعدون إلى الفضاء الخارجي، وللكيفية التي تشكلتْ بها العناصر في الكون، ونجحوا في التوصل إلى زمن بداية الكون، وللكيفية التي تُصدر بها آلة الناي الموسيقى، ولكيفية توليد الكهرباء التي تحرك أجسادنا كما تحرك اقتصادنا، وللشكل الذي بدا عليه الانفجار الكبير. لقد رسمت الفيزياء الحدود الدنيا للفضاء دون الجزئي والحدود القصوى للكون.

ألّف صديقي وزميلي فيكتور فايسكوبف، الذي كان وقت التحاقي بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا شخصيةً سياسية كبيرة، كتابًا بعنوان «ميزة أن تكون فيزيائيًا». يجسد هذا العنوان الرائع ذلك الشعور الذي خامرني بأنني واقف في خضم أكثر أزمنة اكتشافات الفلك والفيزياء الفلكية تشويقًا، منذ بدأ الرجال والنساء ينعمون النظر في السماء ليلًا. وأولئك الرفاق الذين عملتُ إلى جوارهم في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وأحيانًا كانت لا تفصل مكتبي عن مكاتبهم سوى ردهة، قد ابتكروا أساليب إبداعية ومعقدة بشكل مذهل تجيب عن الأسئلة الأساسية في كل العلوم. ولقد كان لي شرف أن أساهم في توسيع المعرفة الجمعية للجنس البشري بالنجوم والكون وكذلك في جذب أجيال من الشباب إلى حب هذا الحقل الرائع.

منذ تلك الأيام الخوالي التي كنت أحمل فيها النظائر المتحللة في راحتَي يديَّ، لم أتوقف عن الابتهاج بالاكتشافات الفيزيائية الجديدة منها والقديمة، وبتاريخها الثري وبحدودها التي لا تفتأ تتسع، وبالطريقة التي فتحتْ بها عيناي على عجائب غير متوقعة موجودة في العالَم من حولي. فإنني أنظر إلى الفيزياء على أنها طريقة لرؤية – المذهل والممل، الضخم والدقيق – على أنهم كل متكامل متداخل وبديع.

ولذلك فإنني دائمًا أحاول أن أجعل الحياة تدب في الفيزياء عندما أشرحها لطلبتي. وإنني أعتقد أن الأهم بالنسبة لهم هو أن يتذكروا جمال الاكتشافات لا أن

يركزوا على الحسابات الرياضية المعقدة، فهم لن يكونوا جميعًا فيزيائيين. لقد بذلتُ قصارى جهدي كي أساعدهم على أن ينظروا إلى العالم بطريقة مختلفة؛ وأن يسألوا أسئلة لم يظنوا أنفسهم يومًا سيسألونها؛ وأن ينظروا إلى أقواس قزح بطريقة لم يعهدوها من قبل؛ وأن يركزوا على جمال الفيزياء الفائق لا الحسابات الرياضية الدقيقة. وذلك هو أيضًا الغرض من هذا الكتاب، أن يساهم في فتح عينيك على الطرق المدهشة التي تسلط بها الفيزياء الضوء على مجريات عالمنا وجماله وأناقته المذهلة.

# الفصل الثاني

# القياسات والارتيابات والنجوم

مكتبة
t.me/soramnqraa

## جدتي وجاليليو جاليلي

علم الفيزياء علم تجريبي في جوهره، والقياسات وما يتخللها من ارتياب هي صميم كل تجربة وكل اكتشاف. وحتى أعظم الفتوح النظرية في الفيزياء تُقدَّم في شكل تنبؤات عن مقادير يمكن قياسها. فلننظر، على سبيل المثال، إلى قانون نيوتن الثاني $F = ma$ (القوة تساوي الكتلة مضروبة في التسارع) والذي قد يُشكِّل أهم معادلة في الفيزياء، أو لننظر إلى معادلة آينشتاين $E = mc^2$ (الطاقة تساوي الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء)، وهي أشهر معادلات الفيزياء قاطبة. كيف للفيزيائيين أن يعبروا عن العلائق إلا من خلال المعادلات الرياضية المتعلقة بالمقادير القابلة للقياس، مثل الكثافة والوزن والطول والشحنة والجاذبية والحرارة والسرعة؟

سوف أُقر هنا بأنني منحاز بعض الشيء؛ لأن بحث أطروحة الدكتوراه الذي أنجزته قوامه قياس أنواع مختلفة من الاضمحلال النووي بدرجة عالية من الدقة، وأن إسهاماتي في السنين الأولى من بزوغ نجم علم فلك الأشعة السينية قد تأتت من قياسات أشعة سينية عالية الطاقة أتت إلينا من مسافة تقدر بآلاف السنين الضوئية. لكن بكل بساطة لا فيزياء بدون قياسات. والحقيقة التي لا تقل أهمية عن ذلك هي أنه لا قياسات ذات دلالة لا يحيط بها الارتياب.

والواقع أنك أيها القارئ تعتمد على قدر كبير من الارتياب طوال الوقت دون أن تدرك ذلك؛ فعندما يُبلغك مصرفك برصيد حسابك لديه، فإنك ترتاب في وجود خطأ قد يقل عن نصف بنس؛ وعندما تبتاع قطعة ملابس عبر شبكة الإنترنت فإنك تتوقع أنها ستناسبك ولن يختلف قياسها عن قياسك إلا بقدر يقل عن قياس واحد. فمثلًا إذا ابتعت بنطالًا قياسه ٣٤ قد يتباين قياسه بمقدار ٣ بالمائة في منطقة الخاصرة فيأتي

قياسه الحقيقي ٣٥ فينزل حتى فخذيك وقد يأتي قياسه الحقيقي ٣٣ ويجعلك تتساءل كيف زاد وزنك إلى ذلك الحد.

ومن الضروري أيضًا أن تُستخدم وحدات مناسبة للتعبير عن القياسات. ولنأخذ مثالًا على ذلك تلك المهمة الفضائية التي استغرقتْ أحد عشر عامًا وتكلفتْ ١٢٥ مليون دولار – مهمة مركبة المريخ المناخية المدارية – والتي انتهتْ نهاية كارثية بسبب الخلط الذي حدث بين الوحدات. فقد استخدم أحد فريقي المهندسين الوحدات المترية بينما استخدم الفريق الآخر الوحدات الإنجليزية، ونتيجة لهذا انتهى الحال بالمركبة عام ١٩٩٩ أن استقرتْ في مركز الغلاف الجوي للمريخ بدلًا من أن تستقر في مدار ثابت.

في هذا الكتاب، أستخدمُ الوحدات المترية في الأغلب وذلك لأن غالبية العلماء يستخدمونها. لكني استعين أيضًا بوحدات إنجليزية مثل البوصة والقدم والميل والرطل بين حين وآخر أينما لاءمَ ذلك الجمهور الأمريكي. ففيما يتعلق بدرجة الحرارة، استخدمتُ مقياسَي السيلزيوس والكلفن (الذي يساوي درجة سيلزيوس زائد ٢٧٣,١٥) واستخدمتُ أيضًا مقياس فهرنهايت في بعض الأحيان رغم أنه ما من فيزيائي يتعامل مع درجات الحرارة بمقياس فهرنهايت.مكتبة سُر مَن قرأ

ولأنني أُقدّر الدور المحوري الذي تلعبه القياسات في الفيزياء فإنني أتشكك في النظريات التي لا يمكن التحقق منها عن طريق القياسات. لنتأمل نظرية الأوتار أو تلك النظرية المتصلة بها والأكثر تفصيلًا، نظرية الأوتار الفائقة، وهما أحدث الجهود التي قام بها العلماء النظريون في سبيلهم لإيجاد «نظرية كل شيء». لم يتوصل العلماء النظريون بعد، رغم أن من بينهم علماء أفذاذ يعملون على نظرية الأوتار، إلى تجربة واحدة أو توقع واحد قادر على اختبار أطروحات نظرية الأوتار. ولا يمكن التحقق من أي شيء في نظرية الأوتار تجريبيًا، حتى الآن على الأقل. وهو ما يعني أن نظرية الأوتار لا تتمتع بأية قوة تنبؤية، وهو الأمر الذي حدا ببعض الفيزيائيين، من أمثال شيلدون جلاشو، الأستاذ بهارفارد، أن يتساءلوا عما إذا كانت تلك النظرية تمُتُّ للفيزياء بصلة من الأساس.

إلا أن لنظرية الأوتار بعض المناصرين الأذكياء البلغاء. واحد من هؤلاء هو براين جرين، صاحب الكتاب والبرنامج التلفزيوني على قناة بي. بي. إس. اللذين يحملان ذات العنوان «الكون الأنيق» (وقد حللتُ ضيفًا في فقرة قصيرة من هذا البرنامج)

ويشتركان في جمالهما وسحرهما. ومن أولئك أيضًا إدوارد ويتن، صاحب نظرية إم، وهي النظرية التي وحدتْ خمس نظريات أوتار مختلفة، وافترضتْ وجود أحد عشر بعدًا للفضاء، لا نرى نحن منها، بصفتنا كائنات متدنية الرتبة، إلا ثلاثة. وهي أطروحات جامحة باعثة على التأمل.

لكن تلك النظرية لا تفتأ تذكرني بجدتي لأمي، وقد كانت سيدة عظيمة في جعبتها الكثير من الأقوال والعادات التي كانت ستجعل منها عالمة بالسليقة. كثيرًا ما قالت لي جدتي أقوالًا على غرار: إنك عندما تقف تصير أقصر قامة منك عندما تستلقي. ولكم أحبُّ أن أدرّس هذا القول لطلابي؛ ففي اليوم الأول من الفصل الدراسي أعلن لهم أنني في إطار التكريم لجدتي سوف أضع هذا المفهوم الغرائبي تحت الاختبار. وهو الأمر الذي يجعل الطلبة في قمة الحيرة، وأكاد أسمع أفكارًا تدور في رؤوسهم من قبيل: «تقصر القامة وقوفًا عنها عند الاستلقاء؟ هذا مستحيل».

ويمكنني تفهم عدم اقتناعهم، فبالقطع لو كان هناك أي اختلاف في الطول بين وضعَي الاستلقاء والوقوف فسيكون اختلافًا طفيفًا جدًّا. فلو بلغ الفارق قَدمًا كاملة فسنلاحظ هذا، أليس كذلك؟ حينها ستنهض من فراشك فتسمع صوت انكماش قامتك، وتقصر بمقدار قدم واحدة. لكن لو كان الفارق قدره ٠,١ من السنتيمتر (أي ١/٢٥ من البوصة) فلن نلاحظه. ولذلك فإنني خمنتُ أنه لو كانت جدتي محقة، فإن الفارق لن يتجاوز سنتيمترات قليلة، أو ربما بوصة واحدة على الأرجح.

ولكي أجري تجربتي تلك كان عليَّ بالطبع أن أقنع طلبتي بالارتياب الذي يشوب قياساتي. لذلك فقد بدأتُ بقياس قضيب من الألمنيوم في وضع عمودي – بلغ طوله حوالي ١٥٠,٠ سنتيمترًا – وطلبتُ منهم أن يتفقوا معي على أنني قادر على القياس بمقدار ارتياب يزيد أو ينقص عن جزء من عشرة أجزاء من السنتيمتر. وبهذا يصير القياس العمودي ١٥٠,٠ ± ٠,١ سنتيمتر. ثم قستُ طول القضيب في الوضع الأفقي وجاء قياسه ١٤٩,٩ ± ٠,١ سنتيمتر وهو القياس الذي يتفق مع القياسات العمودية — في إطار مقدار الارتياب في القياسات.

ما الذي غنمتُه من قياس قضيب الألمونيوم في كلا الوضعين؟ غنمتُ الكثير في الواقع. أولًا أظهرتْ عمليتا القياس قدرتي على قياس الطول بقدر من الدقة يبلغ نحو ٠,١ من السنتيمتر (ميليمتر واحد). لكن الأمر الذي لا يقل عن ذلك أهمية هو رغبتي في أن أثبت لطلابي أنني لا أمارس ألاعيبَ عليهم؛ لنفترض مثلًا أنني أعددتُ مسطرة

قياس «مجهزة مسبقًا» خصوصًا لقياساتي الأفقية، ألا يوصف ذلك بالغش والخداع. لكنني عندما أثبتُ أن طول قضيب الألمنيوم متساوٍ في الحالتين، فقد أظهرتُ نزاهتي العلمية بدليلٍ لا يقبل الشك.

بعد ذلك، كنتُ أطلب متطوعًا أقيس طوله واقفًا ثم أدون ذلك الرقم على لوح الكتابة الأسود – ١٨٥,٢ سنتيمترًا (أي ما يزيد عن ستة أقدام بقليل) يزيد أو ينقص بالطبع بمقدار ٠,١ سنتيمتر على سبيل حساب الارتياب. ثم أساعد ذلك المتطوع على الاستلقاء على مكتبي داخل المُعدّة التي أستخدمها في القياس، والتي تبدو كمسطرة قياس عملاقة من طراز ريتز، وهي المسطرة الخشبية التي تستخدم في متاجر الأحذية، غير أن الجسد كله في حالتنا تلك يحل محل القدم. في هذه الأثناء آخذ في المزاح معه بشأن إذا ما كان مرتاحًا في هذا الوضع، وأهنئه على التضحية التي يبذلها في سبيل العلم، وهو ما يجعله قلقًا بعض الشيء. ماذا أحمل في كم قميصي؟ من كم قميصي أخرج قطعة خشبية مثلثة أضعها فوق رأسه، وبينما هو راقد أدون رقمًا جديدًا على لوح الكتابة. والآن صار لدينا رقمان، كل منهما به نسبة من الارتياب تُقدر بـ ٠,١ سنتيمتر. إذن، ما النتيجة؟

هل ستندهش عندما تعلم أن القياسين يتباينان بفارق قدره ٢,٥ أي ما يزيد أو ينقص عن ٠,٢ سنتيمتر بالطبع؟ هنا اضطررتُ لأن أخلُص لكون طوله راقدًا يتجاوز طولَه واقفًا بـ ٢,٣ سنتيمتر على الأقل (نحو ٠,٩ من البوصة). وهنا أعود إلى طالبي المستلقي وأعلن أنه أطول بنحو بوصة كاملة وهو راقد عنه وهو واقف ثم أعلنها جهرًا – وهو أفضل ما في الأمر – أن «جدتي كانت على حق، وهي دائمًا على حق».

هل تتشكك في الأمر؟ الواقع أنه قد اتضح أن جدتي تفوق معظمنا في العلم. فإننا عندما نقف تضغط الجاذبية الأرضية تلك الأنسجة اللينة الموجودة بين فقرات عمودنا الفقري، أما عندما نستلقي فيحدث أن تتمدد أعمدتنا الفقرية. قد تبدو لك تلك المعلومة منطقية عندما تسمعها، لكن هل كان بإمكانك التنبؤ بها؟ الواقع أنه حتى علماء ناسا لم يأخذوا هذا التأثير بعين الاعتبار أثناء تخطيط أولى البعثات الفضائية. فقد اشتكى رواد الفضاء في هذه البعثة من أن حللهم الفضائية ضاقتْ عليهم عندما وصلوا إلى الفضاء. وقد أظهرت الدراسات التي أجريت في وقت لاحق خلال بعثة سكاي لاب أن رواد الفضاء الستة الذين أُخذتْ قياساتُهم ازدادوا طولًا بمقدار ٣ في المائة — أي ما يزيد قليلًا عن بوصتين إذا كان طولك ستة أقدام. لذا فقد صارت حلل رواد

الفضاء اليوم تُصمم باتساع إضافي يستوعب هذه الزيادة في الطول.

هل أدركتَ مدى فائدة القياسات؟ وفي ذات الصف الذي أُثبتُ فيه أن جدتي كانت على حق، أجد متعة كبيرة في قياس بعض الأشياء الغريبة؛ سعيًا مني لاختبار اقتراح طرحه جاليليو جاليلي، رائد علم الفلك والعلم الحديث، والذي طرح على نفسه ذات يوم السؤال التالي: «ماذا لو كان حجم أضخم الثدييات أكبر بكثير من حجمها الذي نعرفه؟»؛ وكانت إجابته عن السؤال الذي طرحه أن لو كانت الثدييات أثقل وزنًا مما هي عليه، لتكسرت عظامها. عندما قرأتُ عن هذا الأمر أثار فضولي، ودفعني للتحري عن صحة كلامه. لقد بدتْ إجابته بديهية لكنني أردتُ التحقق منها.

كنت أعلم أن عظام الفخذ في الثدييات تتحمل معظم وزنها، لذلك فقد قررتُ إجراء قياسات مقارنة بين عظام أفخاذ ثدييات مختلفة. لو كان جاليليو محقًّا فإن عظمة الفخذ في الثدييات الضخمة لن تكون بالقوة الكافية التي تحمل بها وزن الحيوان. لقد أدركتُ بالطبع أن قوة عظمة الفخذ لدى الثدييات تتوقف على مدى سُمك تلك العظمة؛ فالعظام الأكبر سُمكًا قادرة على حمل وزن أكبر، ذلك أمر بديهي. وكلما كان الحيوان أكثر ضخامة احتاج إلى عظام أكبر سُمكًا.

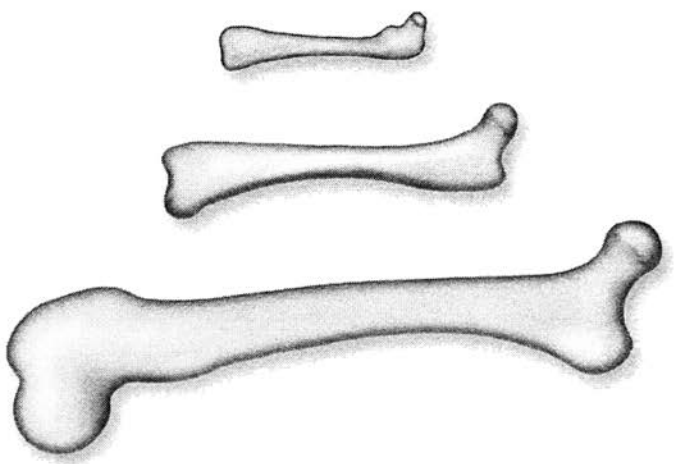
كما أن عظمة الفخذ تكون أطول كلما ازداد الحيوان ضخامة بالطبع، واستنادًا على تلك الحقيقة أدركتُ أنني إذا قارنتُ بين طول عظمة فخذ الحيوان الثدي وسُمكها في مقابل وزنه حينها فسأستطيع اختبار فكرة جاليليو. من الحسابات التي أجريتها والتي كانت من التعقيد لدرجة أنني لا أريد الخوض فيها هنا (سأشرحها في الملحق ١) خلصتُ إلى أنه لو كان جاليليو محقًّا فإنه كلما ازدادت الثدييات ضخامة فلا بد أن سمك عظام فخذها يزيد بسرعة تفوق زيادة طولها. من حساباتي وصلتُ إلى أنه لو كان حيوان ثدي ما يفوق حيوانًا آخر في ضخامته بخمسة أضعاف، فلا بد أن تكون عظمة فخذه أطول من عظمة فخذ الآخر بخمسة أضعاف، ومن ثم لا بد أن سمك عظمة فخذه أكبر من سمك نظيرتها لدى الحيوان الآخر إحدى عشرة مرة.

يعني هذا أنه عند مرحلةٍ ما سيصبح سمك عظمة الفخذ مساويًا لطولها أو أكبر منه، وهو ما سيؤدي إلى تكوينات جسدية غير منطقية على الإطلاق. هذه الثدييات، ولا شك، لن تكون الأصلح للبقاء، وهذا هو السبب في أن للثدييات حجم أقصى لا تتعداه.

وهكذا تكهنتُ بأن السُمك يزيد بوتيرة أسرع من وتيرة زيادة الطول. وهنا بدأتْ الإثارة.

ذهبتُ إلى جامعة هارفارد التي فيها تشكيلة جميلة من العظام، وطلبتُ منهم عظام فخذ لراكون وحصان. واتضح لي أن الحصان أضخم من الراكون بأربعة أضعاف، وتأكد لي أيضًا أن عظمة الفخذ لدى الحصان (٤٢,٠ ± ٠,٥ سنتيمتر) أطول من نظيرتها لدى الراكون بثلاث مرات ونصف (١٢,٤ ± ٠,٣ سنتيمتر). إلى الآن تسير الأمور بشكل جيد؛ لذلك فقد أدخلت هذه الأرقام في معادلتي، وتوقعتُ أن تكون عظمة فخذ الحصان أكثر سمكًا من مثيلتها لدى الراكون بما يزيد عن ست مرات بقليل. لكنني عندما قستُ السُمك (بنسبة ارتياب تبلغ نحو نصف سنتيمتر لدى الراكون و٢ سنتيمتر لدى الحصان) وجدتُ أن سُمك عظمة الحصان يبلغ خمس مرات سُمك عظمة الراكون أي ما يزيد أو ينقص عن نسبة ١٠ بالمائة، وهو ما رجّح كفة جاليليو بعض الشيء. لكنني قررتُ أن أزيد قدر البيانات وأضيف إليها ثدييات أصغر حجمًا وأخرى أكبر حجمًا.

لذا فقد عدتُ إلى هارفارد فأعطوني ثلاث عظمات أخرى لظبي وفأر كيسي وفأر عادي. وكان هذا شكل العظام وهي مصفوفة بجوار بعضها:



أليس ذلك جميلًا؟ كم هو جميل ذلك التوالي الشكلي، وانظر كم هي رقيقة صغيرة عظمة فخذ الفأر تلك. عظمة فخذ رقيقة دقيقة تخص فأرًا رقيقًا دقيقًا. أليس ذلك جميلًا؟ لن أتوقف عن الاندهاش من جمال كل تفصيلة من تفاصيل العالَم الطبيعي الذي نعيش فيه.

لكن ماذا عن القياسات، كيف تتوافق مع معادلاتنا؟ لكم صُدمتُ عندما أجريتُ الحسابات الرياضية، صُدمتُ بحق. فقد وجدتُ أن عظمة فخذ الحصان تفوق نظيرتها لدى الفأر طولًا بـ ٤٠ مرة، وتنبأتْ حساباتي بأن سُمكها سيفوق سمك عظمة فخذ الفأر بما يزيد عن ٢٥٠ مرة. لكنها في الواقع كانت تفوقها بـ ٧٠ مرة.

لذلك فقد سألتُ نفسي «لماذا لم أطلب منهم عظمة فخذ لفيل؟ فقد كان ذلك سيحسم المسألة». أظنهم انزعجوا مني عندما رجعتُ إليهم مرة أخرى، لكنهم كانوا من اللطف أن منحوني إياها. لكنني كنتُ وقتها على يقين أنهم منحوني إياها ليتخلصوا مني، وعليكم أن تصدقوني عندما أقول لكم إن حمل هذه العظمة أمر غاية في الصعوبة؛ فطولها يتجاوز ياردة كاملة ووزنها يبلغ طنًا. لم أستطع أن أصبر يومها كي أُجري حساباتي الرياضية، ولم أستطع النوم ليلتها مطلقًا.

هل تعرف ماذا وجدت؟ وجدتُ أن طول عظمة فخذ الفأر يبلغ ١,١ ± ٠,٠٥ سنتيمتر، وسُمكها يبلغ ٠,٧ ± ٠,١ ميليمتر، أي إنها بالغة النحول. بينما يبلغ طول عظمة فخذ الفيل ١٠١ ± ١ سنتيمتر أي نحو مائة مثل طول عظمة فخذ الفأر. أما عن سمك عظمة فخذ الفيل، فوفقًا لقياساتي كانت تبلغ ٨٦ ± ٤ ميليمتر، أي نحو ١٢٠ مثل قطر عظمة فخذ الفأر. لكن طبقًا لحساباتي، لو كان جاليليو محقًّا، فمن المفترض أن يفوق سمك عظمة فخذ الفيل نظيرتها لدى الفأر بألف مثل. بعبارة أخرى، كان من المفترض أن يبلغ سمكها ٧٠ سنتيمتر. لكن ما وجدته أنها تبلغ نحو تسع سنتيمترات فقط. ومن ثم فقد خلصت وأنا متردد إلى أن العظيم جاليليو جاليلي كان على خطأ.

## قياس الوسط بين النجمي

علم الفلك أحد فروع الفيزياء التي تكون القياسات فيها مضللة. كما تشكل القياسات والارتيابات إشكالية ضخمة لعلماء الفلك، خاصة ونحن نتعامل مع مسافات شاسعة. فكم تبعد النجوم عنا؟ وماذا عن جارتنا الجميلة، مجرة أندروميدا؟ وماذا عن كل تلك المجرات التي لا نستطيع أن نراها إلا عن طريق أقوى التلسكوبات؟ وعندما نرى أبعد الأجرام في الفضاء، كم تبلغ المسافة التي نرى عبرها؟ وما مدى اتساع الكون؟

تلك بضعة من أعمق الأسئلة وأكثرها جوهرية في العلم قاطبة. وقد قلبت الإجابات المختلفة رؤيتنا للكون رأسًا على عقب؛ بل إن مسألة المسافة برمتها لها

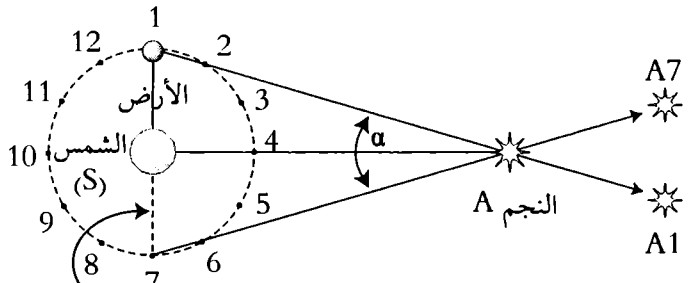
تاريخ مدهش. فبإمكانك تتبع تطور علم الفلك نفسه من خلال تتبع تغير أساليب حساب المسافات النجمية. هذه الأساليب، في كل مرحلة، كانت تعتمد على مدى دقة القياسات التي تتشكل من مزيج من دقة المعدات ومدى إبداع الفلكيين. فحتى نهاية القرن التاسع عشر كانت الطريقة الوحيدة التي يستطيع بها الفلكيون إجراء حساباتهم هي قياس شيء يسمى التزيح.

جميعكم تألفون ظاهرة التزيح دون حتى أن تدركوا ذلك. فأينما كنتم تجلسون، انظروا حولكم إلى أي جدار بسمة مميزة ممتدة على طوله — مثل باب فيه أو صورة معلقة عليه — أو لو كنت في الخارج فلتبحث عن علامةٍ مميزة مثل شجرة كبيرة على سبيل المثال. الآن مد ذراعيك أمامك وارفع أحد أصابعك بحيث يصبح إلى أحد جانبي ذلك الشيء العمودي الطويل. الآن أغمض عينك اليمنى أولًا ثم أغمض عينك اليسرى. حينها سترى إصبعك قد قفز من يسار الباب أو الشجرة إلى يمينهما. والآن حرك إصبعك ليقترب من عينيك ثم كرر ما فعلت. حينها ستجد إصبعك ينزاح مسافةً أكبر. إنه تأثير مهول! إنه التزيح.

يُعزى هذا التأثير إلى التحول نحو خطوط بصرية مختلفة عند مراقبة جسم ما، أي إن في ذلك المثال يحدث التحول من الخط البصري لعينك اليسرى إلى الخط البصري لعينك اليمنى (تبلغ المسافة الفاصلة بين كلتا عينيك ٦,٥ سنتيمتر).

تلك هي الفكرة الأساسية التي تستخدم لتحديد المسافة التي تفصلنا عن النجوم. إلا أننا بدلًا من الاعتماد على مسافة ٦,٥ سنتيمتر تقريبًا التي تفصل بين عيني المرء كمعيار، نستخدم قطر مدار الأرض (يبلغ نحو ثلاثمائة مليون كيلومتر) كمعيار. ومثلما تتم الأرض دورتها حول الشمس خلال عامٍ واحد (في مدار يبلغ قطره ثلاثمائة مليون كيلومتر)، يتحرك أي نجم قريب منا في السماء في مدار حول نجوم أخرى أبعد. فنقيس الزاوية (التي تسمى زاوية التزيح) بين موقعين للنجم يفصل بين قياسيهما ستة أشهر. فلو أجريتَ كثيرًا من أزواج القياسات التي يفصل بين كل زوج منهما ستة أشهر، فستتوصل إلى زوايا تزيح مختلفة. في الشكل الموضح بالأسفل، ولأجل التبسيط، انتقيتُ نجمًا على مستوى مدار الأرض (يسمى المستوى المداري ويسمى أيضًا مسار الشمس). لكن مبدأ قياسات التزيح كما وصفناه هنا ينطبق على أي نجم وليس فقط النجوم التي تقع في مدار الشمس.

لنفترض أنك رأيت النجم وقت كانت الأرض واقعة في الموضع 1 في مدارها حول الشمس. حينها سترى النجم يتخذ موضعه في الخلفية (على بعد كبير جدًّا) في اتجاه A1. ولو نظرت إلى النجم ذاته بعدها بستة أشهر (من الموقع 7) سوف تراه في الاتجاه A7. وتلك الزاوية الموسومة بالرمز α هي أكبر زاوية تزيح ممكنة. ولو أجريتَ قياسات مماثلة من المواقع 2 و8، 3 و9، 4 و10 فلا بد أنك ستجد زوايا تزيح أصغر من الزاوية α. ولو، فرضًا، راقبت النجم من النقاط 4 و10 (نقول فرضًا لأنه لا تتأتى المراقبة من الموقع 10، وذلك لأن الشمس تحجب رؤية النجم من هذا الموقع)، فستجد زاوية التزيح تساوي صفرًا. والآن انظر إلى المثلث المشكل من النقاط 1A7. نعلم أن المسافة من 1 إلى 7 تساوي ثلاثمائة مليون كيلومتر، ونعلم الزاوية α. وهكذا نستطيع الآن أن نحسب المسافة SA (عن طريق رياضيات المرحلة الثانوية).




يبلغ نصف قطر مدار الأرض حوالي مائة وخمسين مليون كيلومتر

رغم تباين زوايا التزيح التي تحدد في مرحلتين تفصلهما ستة أشهر، فإن علماء الفلك يتحدثون عن زاوية تزيح النجم. لكن ما يعنونه فعليًا هو نصف أكبر زوايا التزيح. فلو كانت زاوية التزيح القصوى تبلغ ٢,٠٠ ثانية قوسية، فإن زاوية التزيح ستكون ١,٠٠ ثانية قوسية، وهكذا سيكون النجم على مسافة ٣,٢٦ سنة ضوئية (لكن الواقع أنه لا يوجد نجم قريب منا إلى هذا الحد). وكلما صغر التزيح زادت المسافة. إذا كان التزيح ٠,١٠ ثانية قوسية فستكون المسافة ٣٢,٦ سنة ضوئية. فالنجم الأقرب إلى الشمس هو نجم قنطور الأقرب، يبلغ تزيحه ٠,٧٦ ثانية قوسية ومن ثم فإنه يقع على مسافة ٤,٣ سنة ضوئية.

ولكي تدرك دقة التغيرات في مواقع النجوم والتي يتعين على الفلكيين قياسها، علينا أن ندرك مدى صغر الثانية القوسية. تخيل دائرة عملاقة مرسومة في السماء ليلًا

تمر بسمتِ رأسك (الذي يعلو رأسك مباشرة) محيطة بالأرض. وكما نعلم، يبلغ قياس الدائرة ٣٦٠ درجة. وكل درجة مقسمة إلى ٦٠ دقيقة قوسية وكل دقيقة قوسية مقسمة بدورها إلى ٦٠ ثانية قوسية. ومن ثم فإن الدائرة الكاملة تحتوي على ١,٢٩٦,٠٠٠ ثانية قوسية. وهكذا يمكنك إدراك مدى دقة الثانية القوسية.

وإليك طريقة أخرى لتصور صغر الثانية القوسية؛ لو التقطت قرشًا وأبعدته عنك مسافة ٢,٢ ميل فسيساوي نصف قطره حسبما تراه من تلك المسافة ثانية قوسية واحدة. إليك طريقة أخرى. يعلم كل الفلكيين أن قطر القمر يساوي نصف درجة أو ثلاثين دقيقة قوسية. ويسمى هذا القطر الزاوي للقمر. لو استطعتَ أن تقسم القمر إلى ١٨٠٠ شريحة رفيعة متساوية الحجم، لكان عرض كل واحدة منها يساوي ثانية قوسية.

وبما أن زوايا التزيح التي يتعين على الفلكيين قياسها طلبًا لتحديد المسافات متناهية الصغر، فلعل ذلك يجعلك تقدر أهمية درجة الارتياب في القياسات بالنسبة إليهم.

وبفضل التحسينات التي تجرى على المعدات المستخدمة، والتي مكنت الفلكيين من إجراء قياسات أكثر دقة، تغيرت تقديراتهم للمسافات النجمية، بل أحيانًا ما تكون تغيرات مهولة. ففي بدايات القرن التاسع عشر، قاس توماس هندرسون تزيح نجم الشعرى اليمانية، وهو أسطع النجوم في السماء فوجده ٠,٢٣ ثانية قوسية بدرجة ارتياب تبلغ ربع ثانية قوسية. بعبارة أخرى نقول: إنه قاس الحد الأقصى للتزيح فوجده حوالي نصف ثانية قوسية، وهو ما يعني أن ذلك النجم لا يمكن أن يكون أقرب من ٦,٥ سنة ضوئية إلينا. لقد كانت تلك نتيجة بالغة الأهمية في عام ١٨٣٩. لكن بعد ذلك بنصف قرن قاس ديفيد جيل تزيح الشعرى اليمانية فوجده ٠,٣٧٠ ثانية قوسية بارتياب قدره يزيد أو ينقص عن ٠,٠١٠. جاءت قياسات جيل متوافقة مع قياسات هندرسون، لكن قياسات جيل أدق بكثير لأن الارتياب كان أقل بنسبة خمسة وعشرين بالمائة. فإذا كان مقدار التزيح ٠,٣٧٠ ± ٠,٠١٠ ثانية قوسية تصير المسافة التي تفصلنا عن الشعرى اليمانية ٨,٨١ ± ٠,٢٣ سنة ضوئية، وهو ما يزيد بالفعل عن ٦,٥ سنة ضوئية.

وفي تسعينيات القرن العشرين، قاس هيباركوس، وهو اختصار للقمر الصناعي فائق الدقة المحدد للتزيح (أعتقد أنهم أخذوا يتلاعبون بالاسم حتى وافق اسم عالم

فلك إغريقي)، تزيح أكثر من مائة ألف نجم (ومن ثم، بُعدها) بارتياب لا يزيد عن نحو واحد في الألف من الثانية القوسية. أليس ذلك مذهلًا؟ أتذكُر كم كان ينبغي أن يكون القرش بعيدًا عنك ليبلغ قياسه ثانية قوسيه؟ لكي يبلغ تزيحه جزءًا من ألف جزء من الثانية القوسية، فلا بد له أنه يقع على بعد ٢٢٠٠ ميل من المراقب.

كان نجم الشعرى اليمانية، بالطبع، من تلك النجوم التي قاس هيباركوس تزيحها، وجاءت النتيجة ٠,٣٧٩٢١ ± ٠,٠٠١٥٨ ثانية قوسية. وبناءً عليه، فإن نجم الشعرى اليمانية يبتعد عنا بمقدار ٨,٦٠١ ± ٠,٠٣٦ سنة ضوئية.

إلى يومنا هذا، أدق قياس للتزيح على الإطلاق أجراه علماء الفلك الراديوي خلال الفترة ما بين العامين ١٩٩٥ و١٩٩٨ لنجم مميز يسمى Sco X- ١. سوف أخبرك عنه في الفصل العاشر. فقد جاءتْ نتيجة قياس التزيح ٠,٠٠٠٣٦ ± ٠,٠٠٠٠٤ ثانية قوسية وهو ما يعني أن بعده عنا يبلغ ٩,١ ± ٠,٩ ألف سنة ضوئية.

بالإضافة إلى الارتيابات التي يتعين علينا التعامل معها في علم الفلك نتيجة للقصور في دقة المعدات، وأيضًا نتيجة لمحدودية الوقت المتاح للمراقبة، هناك أيضًا «كوابيس الفلكيين» ألا وهي الارتيابات «الخفية المجهولة». هل هناك من خطأ ترتكبه دون حتى أن تدري لأنك تُغفل جانبًا ما، أو لأن أدواتك غير مضبوطة بشكل صحيح؟ فمثلًا افترض أن ميزانك الشخصي الذي تحتفظ به في حمامك مضبوط منذ اشتريته على أن يظهر لك الرقم صفر إذا وضع عليه وزن مقداره عشرة أرطال. ولم تكتشف أنت الخطأ إلا عندما ذهبتَ إلى عيادة الطبيب فكدتَ تصاب بنوبة قلبية. نسمي نحن هذا خطأً نظاميًّا وهو أمر يثير هلعنا. رغم أنني لست من محبي وزير الدفاع الأسبق دونالد رمسفيلد، فإنني شعرتُ بمسحة تعاطف معه عندما قال أثناء مؤتمر صحفي عقد عام ٢٠٠٢: «نحن نعلم أن ثمة أمورًا نجهلها. لكن هناك أيضًا مجهولات غير معروفة، إنها تلك الأمور التي لا ندرك أننا نجهلها».

وتلك التحديات الناتجة عن محدودية قدرات أدواتنا هي ما يجعل من الإنجاز الذي حققته عالمة الفلك الفذة، هنريتا سوان ليفيت، إنجازًا مذهلًا، رغم أنها لا تحظى بما تستحق من الاهتمام. كانت ليفيت تعمل في وظيفة مغمورة في مرصد هارفارد عام ١٩٠٨ عندما بدأت في هذا العمل، الذي مهد السبيل لإحداث طفرة هائلة في قياس المسافة التي تفصلنا عن النجوم.

لقد تكرر حدوث هذا الأمر في تاريخ العلم لدرجة يمكننا معها أن نعتبره خطأً نظاميًا، ألا وهو التقليل من شأن موهبة العالمات وذكائهن وإسهاماتهن.[1]

لاحظتْ ليفيت أثناء قيامها بعملها في تحليل آلاف الألواح الفوتوغرافية لمجرة سحابة ماجلان الصغرى أنه في مجموعة محددة من النجوم النابضة الضخمة (صارت تعرف الآن باسم المتغير السيفيدي)، توجد علاقة بين السطوع البصري للنجم والوقت الذي تستغرقه كل نبضة، وهو ما يعرف باسم دورة النجم. ووجدتْ أنه كلما طالتْ دورة النجم، ازداد سطوعًا. وكما سنرى سوف يفتح هذا الاكتشاف الباب لقياس دقيق للمسافات التي تفصلنا عن العناقيد النجمية والمجرات.

ولكي نعرف قدر هذا الاكتشاف لا بد أن نفهم أولًا الفارق بين السطوع واللمعان. السطوع الظاهري هو مقدار الطاقة الذي يصلنا على الأرض لكل متر مربع في كل ثانية ضوئية. ويتم قياس هذا السطوع عن طريق التلسكوبات البصرية. أما اللمعان الظاهري فهو، على الناحية الأخرى، مقدار الطاقة المنبعثة من جرم فلكي في الثانية.

فلنتأمل مثلًا كوكب الزهرة، أسطع الأجرام السماوية في سماء الليل، أكثر سطوعًا من نجم الشعرى اليمانية ذاته وهو أسطع نجم في السماء. إن كوكب الزهرة شديد القرب من كوكب الأرض، ولذلك فهو شديد السطوع، لكنه لا يُصدر من داخله أي لمعان؛ فالطاقة المنبعثة منه منخفضة نسبيًا مقارنةً بالشعرى اليمانية، الذي يشكل فرن تخليق نووي قوي تبلغ ضخامته ضعف ضخامة الشمس، ويفوقها لمعانًا بخمسة وعشرين مثلًا. وبإمكان عالم الفلك اكتشاف الكثير عن النجم من درجة لمعانه، لكن معضلة اللمعان كانت تتمثل في انعدام أي طريقة فعالة لقياسه. وهكذا لا يمكننا قياس اللمعان، بل السطوع لأنه ما نراه. أما قياس اللمعان، فيستلزم معرفة سطوع النجم وبعده عن الأرض.

وقد استطاع إينار هرتزسبرونج عام ١٩١٣، وهارلو شابلي عام ١٩١٨، بالاستعانة بأسلوب يسمى التزيح الإحصائي، أن يحولا قيم السطوع التي توصلتْ إليها ليفيت إلى قيم لمعان. وبافتراض أن لمعان أي نجم سيفيدي بدورة معينة داخل سحابة ماجلان الصغرى يساوي لمعان أي نجم سيفيدي في أي مكان آخر له نفس الدورة، تمكنا من

(١) وهو نفس ما تعرضتْ له ليز مايتنر، التي أسهمتْ في اكتشاف الانشطار النووي؛ وكذلك روزاليند فرانكلين، التي أسهمت في اكتشاف تركيب الحمض النووي؛ وأيضًا جوسلين بيل، التي اكتشفت النباضات، والتي كان ينبغي أن تتشارك في جائزة نوبل في عام ١٩٧٤ مناصفة مع مشرفها، أنطوني هيويش، الذي نالها لأجل «دوره الحاسم في اكتشاف النباضات».

التوصل إلى طريقة لحساب علاقة اللمعان لجميع النجوم السيفيدية (حتى تلك التي تقع خارج سحابة ماجلان الصغرى). لكني لن أستفيض هنا في شرح المنهجية؛ لأن بها الكثير من التفاصيل الفنية المتخصصة، لكن المهم هنا هو إدراك أن حساب العلاقة بين اللمعان ودورة النجم كان نقطة فارقة في طريقة قياس المسافات؛ إذ صار من الممكن قياس بعد النجم عنا بمعلومية لمعانه وسطوعه.

ولأن الشيء بالشيء يذكر، فإن نطاق اللمعان عادةً ما يكون هائلًا؛ فالنجم السيفيدي الذي تبلغ دورته ثلاثة أيام يفوق الشمس لمعانًا بألف مرة. وإذا بلغتْ فترته الزمنية ثلاثين يومًا فسيفوق الشمس لمعانًا بثلاثين ألف مرة.

وفي عام ١٩٢٣، عثر الفلكي العظيم إدوين هابل على نجومٍ سيفيدية في مجرة أندروميدا[1] (والتي تعرف أيضًا باسم M31)؛ وهكذا حسب المسافة التي تبعدها عنا، ليجد أنها حوالي مليون سنة ضوئية، النتيجة التي جاءتْ صادمة جدًّا لفلكيين كثر. فقد كان الكثيرون منهم، ومن ضمنهم شابلي، يزعمون أن مجرتنا، درب التبانة، تحتوي الكون بأسره ومن ضمنه مجرة أندروميدا إلا أن هابل بيّن لهم أن تلك المجرة تبعد عنا بمسافةٍ لا نكاد نتصورها. لكن انتظر لحظة، فلو بحثتَ في محرك جوجل عن مجرة أندروميدا فستجد أنها تبعد عنا بـ٢,٥ مليون سنة ضوئية.

كان ذلك مثال على المجهولات غير المعروفة. فقد ارتكب هابل بكل عبقريته خطأً نظاميًّا؛ إذ بنى حساباته على قيمة اللمعان المعلومة لما سمي بعد ذلك بالنجوم السيفيدية من النوع الثاني، في حين أنه كان يرصد نوعًا من المتغيرات السيفيدية يبلغ لمعانه أربعة أمثال ما ظن أنه يراه (سُميتْ هذه النجوم فيما بعد باسم النجوم السيفيدية من النوع الأول). لم يكتشف الفلكيون هذه الاختلافات إلا في خمسينيات القرن العشرين، وعلى الفور أدركوا أن قياساتهم للمسافات التي أجروها على مدى ثلاثين عامًا قد جانبها الصواب بمُعامل اثنين وهو الذي يعتبر خطأً نظاميًّا لا يُستهان به، ضاعف حجم الكون الذي نعرفه.

وفي عام ٢٠٠٤، قاس علماء الفلك المسافة التي تفصلنا عن مجرة أندروميدا مستخدمين ذات منهجية المتغير السيفيدي، فوجدوها ٢,٥١ ± ٠,١٣ مليون سنة ضوئية. وفي عام ٢٠٠٥، قاسها فريق آخر من علماء الفلك باستخدام منهجية النجوم

(١) يسميها العرب مجرة المرأة المسلسلة، لكننا آثرنا استخدام الاسم الأجنبي لسهولة كتابته وشيوع تداوله (المترجم).

الثنائية الكسوفية، فوجدوا أن المسافة بيننا تبلغ ٢,٥٢ ± ٠,١٤ مليون سنة ضوئية أي نحو ١٥ مليون تريليون ميل. وهذان القياسان يتوافقان معًا تمامًا. لكن الارتياب يقدر بنحو ١٤٠,٠٠٠ سنة ضوئية (حوالي ١٠×٨[١٧] ميل). مع العلم أن تلك المجرة هي أقرب المجرات المجاورة لنا بالمعايير الفلكية. فلك أن تتخيل درجة الارتياب فيما يتعلق بالمسافات التي تفصلنا عن سواها من المجرات الأخرى العديدة.

قد يمكنك الآن أن تدرك سبب بحث علماء الفلك الدائم عما يسمى بالشموع القياسية، وهي الأجرام ذات قيم اللمعان المعروفة. فهذه الأجرام تمكننا من تقدير المسافات باستخدام مجموعة من الطرق العبقرية التي تُشكل طريقة قياسٍ موثوقة لهذا الكون. كما أنها اضطلعتْ بدور محوري في تحديد ما نطلق عليه سلم المسافات الكونية.

ونستعين بالتزيح لقياس المسافات في الدرجة الأولى من هذا السلم. وبفضل الدقة المذهلة لقياسات التزيح للقمر الصناعي هيباركوس، فقد صرنا الآن نستطيع قياس مسافات تفصلنا عن أجرام تقع على بعد آلاف السنين الضوئية، بدقة ممتازة. ثم أخذنا الخطوة التالية مع النجوم السيفيدية وهي الخطوة التي مكنتنا من الوصول إلى تقديرات للمسافات التي تفصلنا عن أجرام تقع على بعد يصل إلى مائة مليون سنة ضوئية. وفي الدرجات التالية، يستخدم علماء الفلك عددًا من الطرق الغريبة والمعقدة التي تعج بالتفاصيل الفنية، لدرجة يصعب معها الخوض فيها هنا، لكن العديد من هذه الطرق يعتمد على الشموع القياسية.

وكلما بعدت المسافات التي نريد قياسها، صارتْ عملية القياس أصعب. وربما يُعزى ذلك جزئيًا للاكتشاف الذي توصل إليه إدوين هابل عام ١٩٢٥، وهو أن مجرات الكون تتحرك مبتعدةً بعضها عن بعض. واكتشاف هابل هذا، وهو أحد أكثر الاكتشافات الصادمة أهمية وإثارة في علم الفلك، وربما في جميع العلوم خلال القرن الماضي، لا يضاهيه إلا اكتشاف دارون للتطور من خلال الانتخاب الطبيعي.

وجد هابل أن الضوء المنبعث من المجرات ينزاح بدرجة ملحوظة باتجاه الطرف الأقل طاقة من الطيف الكهرومغناطيسي، أي باتجاه اللون «الأحمر» الذي تكون فيه الأطوال الموجية أكثر طولًا. ويُطلق على هذه الظاهرة «الانزياح الأحمر». وكلما ازداد الانزياح الأحمر، كانت المجرة أسرع في الابتعاد عنا. تُعرف هذه الظاهرة على الأرض بالنسبة للصوت باسم «تأثير دوبلر»؛ وهي الظاهرة التي تفسر سبب قدرتنا على تمييز ما إذا كانت سيارة إسعاف تقترب منا أم تبتعد عنا؛ لأن الصوت يكون أخفض عندما تبتعد،

وأعلى عندما تقترب. (سأتناول انزياح دوبلر بمزيدٍ من التفصيل في الفصل الثالث عشر).

وقد وجد هابل في جميع المجرات التي استطاع قياس انزياحها الأحمر والمسافة التي تبعدها عنا، وجد أنه كلما زاد بُعد تلك الأجرام عنا، زادت سرعتها في التحرك مبتعدة. وهكذا، فالكون كان يتمدد. ويا له من اكتشاف عظيم! إن جميع مجرات الكون تسرع متباعدة بعضها عن بعض.

وقد يسبب ذلك قدرًا هائلًا من الالتباس في معنى المسافة إذا كانت المجرات تبعد عنا مليارات السنوات الضوئية. فهل تعني المسافة التي كانت وقت انبعثت الطاقة (منذ ١٣ مليار سنة مضت مثلًا) أم تعني المسافة التي نظنها الآن بما أن ذلك الجرم قد زادت سرعته زيادة كبيرة خلال تلك السنوات الثلاثة عشر مليارًا؟ قد يذكر أحد علماء الفلك أن المسافة تبلغ ١٣ مليار سنة ضوئية (يسمى ذلك بمسافة زمن انتقال الضوء) وقد يرى فلكي آخر أن المسافة التي تفصلنا عن ذات الجرم قدرها ٢٩ مليار سنة ضوئية (يسمى هذا المسافة المسايرة).

ومنذ ذلك الحين عُرفت النتائج التي خلص إليها هابل باسم قانون هابل، والذي ينص علي أن السرعة التي تتحرك بها المجرات مبتعدة عنا تتناسب طرديًا مع المسافة التي تفصل المجرات عنا. كلما كانت تلك المجرات بعيدة، زادت سرعتها في الابتعاد.

هكذا صار قياس سرعات المجرات أسهل نسبيًا؛ حيث يدل مقدار الانزياح الأحمر على سرعة المجرة على الفور. أما تحديد بُعد المجرة عنا، فهو مسألة مختلفة. فقد كان هذا أصعب ما في الأمر. تذكّر أن حسابات هابل للمسافة التي تفصلنا عن سديم أندروميدا جاءتْ خاطئة بمعامل ٢,٥. كان هابل قد وضع معادلة بسيطة نسبيًا وهي $V = H_0 D$؛ حيث $V$ هي سرعة المجرة، و$D$ هي المسافة التي تفصلنا عن تلك المجرة و $H_0$ هو ثابت صار يعرف اليوم باسم ثابت هابل. قدر هابل ذلك الثابت بحوالي ٥٠٠، ويُقاس بوحدات الكيلومتر في الثانية في ميجا فرسخ فلكي (١ ميجا فرسخ فلكي يساوي ٣,٢٦ مليون سنة ضوئية). كان الارتياب في ثابته يقدر بنحو ١٠ بالمائة. وهكذا، وفقًا لهابل، إذا أخذنا مجرة على بعد ٥ ميجا فرسخ فلكي مثالًا، فستكون سرعتها في الابتعاد عنا نحو ٢٥٠٠ كيلومتر في الثانية (حوالي ١٦٠٠ ميل في الثانية).

من الواضح أن الكون يتمدد بسرعة. لكن ذلك لم يكن هو كلَّ ما أماط اكتشافُ هابل اللثامَ عنه. لو عرفتَ حقًّا قيمة ثابت هابل فسوف تدير عقارب الساعة إلى الوراء كي تحسب الزمن الذي مضى على الانفجار العظيم، ومن ثم، تحسب عمر الكون.

هابل نفسه قدر عمر الكون بملياري سنة. لكن هذا التقدير يتعارض مع عمر الأرض الذي قدره الجيولوجيون بنحو ثلاث مليارات سنة. وهو الأمر الذي أزعج هابل كثيرًا لأسباب وجيهة. وبالطبع لم يكن يدرك أنه ارتكب عددًا من الأخطاء النظامية؛ إذا لم يكتف هابل بالخلط بين أنواع مختلفة من المتغيرات السيفيدية في بعض الحالات، بل ظن أن سحب الغاز التي تشكلها النجوم نجومًا ساطعة في مجرات بعيدة.

ويعد تأمُّلُ تاريخِ ثابتِ هابل نفسه أحد طرق التأمل الفعالة فيما يُضاهي ثمانين عامًا من التقدم في قياس المسافات النجمية. ظل علماء الفلك لقرابة قرن من الزمان يكافحون لتحديد قيمة ثابت هابل، الأمر الذي لم يسفر عن تقليل قيمة هذا الثابت لسبع مرات فحسب، وهو ما أدى بدوره إلى زيادة حجم الكون بدرجة ضخمة، بل وغيّر كذلك تقدير عمر الكون من التقدير الأولي الذي حدده هابل بملياري سنة إلى تقديرنا الحالي الذي نحدده بأربعة عشر مليار سنة أو ١٣,٧٥ ± ٠,١١ مليار سنة تحديدًا. والآن بفضل ما أتيح لنا من صورٍ رَصَدَ بعضها ذلك التلسكوب الرائع الذي يدور حول الأرض والذي يحمل اسم هابل نفسه، صار هناك إجماع على أن قيمة ثابت هابل تساوي ٧٠,٤ ± ١,٤ كيلومتر في الثانية لكل ميجا فرسخ فلكي. وأن قدر الارتياب في هذه القيمة يقدر باثنين في المائة فقط — وهو شيء عجيب.

لو تفكرتَ في الأمر قليلًا، لوجدت أن قياسات التزيح التي بدأت عام ١٨٣٨ صارتْ هي الأساس الذي قام عليه تطور الآلات والأدوات الرياضية، مما مكنها من الوصول إلى مسافات تقدر بمليارات السنين الضوئية عند حافة الكون المرئي.

ومع كل ذلك التقدم الذي أحرزناه في حل ألغازٍ على غرار ما سبق، تظل هنالك بالطبع ألغاز أخرى كثيرة لم تُحل بعد. فبرغم قدرتنا على قياس نسبة المادة المظلمة والطاقة المظلمة الموجودتين في الكون، ليست لدينا أدنى فكرة عن كنههما. ونعرف عمر الكون، لكننا ما زلنا نتساءل عما إذا كان سينتهي، وإن حدث فكيف ومتى؟ يمكننا أن نجري قياسات دقيقة للجاذبية الأرضية والكهرومغناطيسية والقوى النووية الضعيفة والشديدة، لكننا أبدًا لا نعرف ما إذا كان سيأتي يوم نجمعها فيه كلها في نظرية موحدة. ولا نحن نعرف احتمالات وجود كائنات ذكية أخرى على كواكب أخرى داخل مجرتنا، أو في غيرها من المجرات. ومن ثم، ما زال الطريق أمامنا طويلًا. لكن العجيب في الأمر هو كم الإجابات التي قدمتها لنا أدوات الفيزياء بقدر هائل من الدقة.

# الفصل الثالث

# حركة الأجسام

جرب القيام بهذا الأمر الممتع: قف على ميزان الحمام، ليس ذلك الميزان المعقد الذي تجده في عيادة الطبيب، ولا ذلك الميزان الزجاجي الرقمي الذي يتعين عليك أن تطرقه بإصبع قدمك كي يبدأ العمل، وإنما ميزان الحمام العادي الذي تستخدمه كل يوم. ولا بأس إن كنتَ تنتعل حذاءك (فلستَ مطالبًا بأن تثير إعجاب أحد)، ولا يهم أي رقم سيظهر لك، ولا ما إذا كان يروق لك. والآن قف على أطراف أصابع قدميك بسرعة، ثم اثبت على هذا الوضع. حينها سترى الميزان كما لو جن جنونه. وقد يتعين عليك أن تكرر الأمر عدة مرات كي ترى ما يحدث لأنه يحدث بسرعة.

أولًا يتحرك مؤشر الميزان إلى أعلى، أليس كذلك؟ ثم يتراجع تراجعًا كبيرًا قبل أن يعود ليشير إلى وزنك الذي كنت عليه قبل أن تتحرك، رغم أن ذلك المؤشر (أو الشاشة الرقمية) قد يظل يهتز قليلًا قبل أن يستقر، وذلك يتوقف على الميزان ذاته. ثم عندما تريح كعبيك على الميزان، خاصة لو فعلتَ ذلك بسرعة فستجد المؤشر ينخفض ثم يقفز إلى أعلى متجاوزًا وزنك قبل أن يعود مستقرًا على وزنك الذي قد تحب معرفته أو لا تحب. ما كل هذا؟ في النهاية لن يختلف وزنك سواء خفضتَ كعبيك لأسفل أو رفعتهما لأعلى واقفًا على أصابع قدميك، أليس كذلك؟ أم لعله سيتغير؟

للإجابة عن هذا السؤال – صدق هذا أو لا تصدقه – نحتاج إلى السير إسحاق نيوتن، الذي أراه أعظم فيزيائي جادَ به الزمان. بعض زملائي يختلفون معي في الرأي، وبالتأكيد يمكنك أن ترى أن ألبرت أينشتاين هو الأعظم، وهي وجهة النظر التي لها بكل تأكيد ما يسوغها، لكن لا يختلف اثنان بالقطع في أن أينشتاين ونيوتن هما أعظم فيزيائيين على الإطلاق. فلماذا أرجح أنا نيوتن؟ لأن اكتشافاته كانت جوهرية ومتنوعة جدًّا. فقد درس طبيعة الضوء ووضع نظرية الألوان. ولكي يدرس حركات الكواكب قام ببناء أول تلسكوب عاكس، الذي كان بمنزلة تطور مذهل، قياسًا إلى التلسكوبات

الانكسارية التي كانت تستخدم في عصره. وإلى اليوم ما زالت معظم التلسكوبات الكبرى تتبع المبادئ الأساسية لتصميم تلسكوب نيوتن العاكس. وخلال دراسته خصائص حركة الموائع، صارتْ له الريادة في مجال كبير من مجالات الفيزياء؛ إذ استطاع حساب سرعة الصوت (لكنه أخطأ الحساب بنسبة حوالي ١٥ بالمائة). كما أسس نيوتن فرعًا جديدًا كاملًا من فروع الرياضيات، ألا وهو التفاضل والتكامل. لكن لحسن الحظ لا يتعين علينا الاستعانة بالتفاضل والتكامل كي ندرك أهم إنجازاته وأقواها، التي صارت تعرف باسم قوانين نيوتن. وآمل أن أتمكن خلال هذا الفصل من تبيان مدى اتساع نطاق تأثير تلك القوانين التي تبدو بسيطة.

## قوانين نيوتن الثلاثة للحركة

ينص القانون الأول على أن الجسم الساكن سيظل في حالة السكون، والجسم المتحرك سيظل في حركته في ذات اتجاهه وبذات سرعته ما لم تؤثر عليه، في كلتا الحالتين، أي قوى خارجية. أو على حد قول نيوتن نفسه: «يظل الجسم الساكن في حالة سكونه، ويظل الجسم المتحرك يتحرك في خط مستقيم ما لم تجبره أي قوة تؤثر عليه على تغيير حالته». ذلك هو قانون القصور الذاتي.

ليس قانون القصور الذاتي بالغريب عنا، لكن لو تأملته قليلًا لوجدته منافيًا للمنطق السليم. وقد صرنا نقبل هذا القانون على علاته رغم أنه يناقض تجاربنا الحياتية اليومية. فالأجسام المتحركة نادرًا ما تتحرك في خط مستقيم. وهي بالقطع لا تظل تتحرك إلى الأبد، بل إننا نتوقع أن تقف تلك الأجسام في نقطة معينة. فلم يكن لأي ممارس لرياضة الجولف أن يتوصل إلى قانون القصور الذاتي؛ إذ إن قليلًا جدًّا من الضربات تجعل الكرة تمضي في خط مستقيم، أما الغالبية العظمى من الضربات فتجعل الكرة تتوقف قبل الوصول إلى الحفرة بمسافة صغيرة. فما كان وما زال بديهيًّا هو الفكرة المضادة – أن الأجسام تميل بطبيعتها إلى السكون – وهو الأمر الذي ساد الفكر الغربي لآلاف السنين، إلى أن توصل نيوتن إلى اكتشافاته.

لقد قلب نيوتن فهمنا لحركة الأجسام رأسًا على عقب؛ إذ فسر توقف كرات الجولف قبل وصولها إلى الحفرة بأن قوة الاحتكاك تبطئها، وفسر دوران القمر حول الأرض وعدم انطلاقه في الفضاء دون توقف بأن قوة الجاذبية الأرضية تبقيه في مداره.

ولكي تدرك حقيقة القصور الذاتي، فكر في صعوبة الانعطاف عند نهاية حلبة التزلج، إذ تجد جسدك راغبًا في مواصلة التحرك في خط مستقيم، وينبغي لك أن تعلم مقدار القوة التي يتعين عليك أن تؤثر بها على زلاجتيك عند الزاوية الصحيحة كي تنعطف عن المسار دون أن تندفع بلا تحكم أو ترتطم بالجدار. أو لو كنتَ تتزحلق على الجليد، فكر في مدى صعوبة تغيير مسارك بسرعة تجنبًا للاصطدام بمتزحلق آخر. والسبب في أننا نلاحظ القصور الذاتي، بصورة أوضح، في هاتين الحالتين تحديدًا مما نلاحظه بصورة عامة - هو أن مقدارَ الاحتكاك المؤثر هنا قليلٌ لدرجة لا تكفي لإبطاء سرعتنا، ومساعدتِنا على تغيير اتجاه حركتنا. ما عليك إلا أن تتخيل أن ملاعبُ الجولف مفروشة بالجليد، حينها ستدرك بالضبط إلى أي حد ستواصل كرة الجولف تدحرجها.

فكّر في مدى ثورية تلك الفكرة؛ إذ غيّرتْ كل معتقداتنا السابقة جذريًا، بالإضافة إلى أنها قادتنا إلى اكتشاف قوى موجودة حولنا لا تفتأ تؤثر علينا رغم أننا لا نراها، قوى على غرار الاحتكاك والجاذبية والمغناطيسية والكهربية. كانت إسهاماته في الفيزياء عظيمةً جدًّا لدرجة أن وحدة القوة سُميت نيوتن. لكنه لم يكتف بتمكيننا من «رؤية» هذه القوى الخفية، وإنما بيَّن لنا أيضًا كيفية قياسها.

في قانونه الثاني قدم نيوتن دليلًا إرشاديًّا، بسيطًا وقويًّا في ذات الوقت، لحساب هذه القوة. والقانون الثاني هو القانون الشهير $F = ma$، الذي يعتبره البعض أهم معادلات الفيزياء قاطبةً. وللتعبير عنه لغويًا نقول إن محصلة القوى $F$ لجسم ما تساوي كتلة الجسم $m$ مضروبةً في محصلة تسارعه $a$.

ولكي ترى بنفسك مثالًا على مدى فائدة هذه المعادلة في حياتنا اليومية، انظر لأي جهاز أشعة سينية، فستجد أن تحديد مقدار الطاقة المطلوب إنتاجها من هذا الجهاز بالضبط أمر غاية في الأهمية. فيما يلي سأوضح كيف تتيح لنا معادلة نيوتن تحديد هذا المقدار.

من أهم النتائج التي تم التوصل إليها في مجال الفيزياء — وسنتطرق إليها لاحقًا — أن أي جسيم مشحون (إلكترون كان أو بروتون أو أيون) إذا وضع في حقل كهربي فستؤثر عليه قوة. وإذا علمنا شحنة الجسيم وقوة الحقل الكهربي نستطيع حساب تلك القوة الكهربية التي تؤثر على ذلك الجسيم. لكن إذا استطعنا معرفة القوة

فسنستطيع حينها، باستخدام قانون نيوتن الثاني، حساب تسارع الجسيم.[1]

في أجهزة الأشعة السينية، تتسارع الإلكترونات قبل أن تصطدم بهدفها داخل أنبوب الأشعة السينية. وسرعة اصطدام الإلكترونات بهدفها هي التي تحدد نطاق طاقة الأشعة السينية التي ستتولد بعد ذلك. وبإمكاننا أن نغير مدى تسارع الإلكترونات عن طريق تغيير قوة الحقل الكهربي. ومن ثم، نستطيع التحكم في السرعة التي تضرب بها الإلكترونات الهدف لاختيار نطاق الطاقة المطلوب من الأشعة السينية.

ولتسهيل هذه الحسابات يستخدم علماء الفيزياء وحدة قوة تسمى نيوتن، حيث ١ نيوتن تساوي القوة التي تُسرِّع كتلة بمقدار كيلوجرام بسرعة متر واحد في الثانية لكل ثانية. لماذا نقول «في الثانية لكل ثانية؟ لأنه مع التسارع تظل السرعة تتغير، وهكذا وبعبارة أخرى نقول إنها لا تتوقف بعد الثانية الأخرى. ولو كان التسارع ثابتًا فهذا يعني أن السرعة تتغير بذات القدر كل ثانية.

للتوضيح: تخيل كرة بولينج أُسقطتْ من أعلى مبنى شاهق في مانهاتن – ولم لا يكون مبنى الإمباير ستيت؟ من المعلوم أن تسارع الأجسام الساقطة إلى الأرض يقدر بما يقارب ٩٫٨ متر في الثانية لكل ثانية؛ وهو ما يسمى بعجلة الجاذبية، ويرمز له في الفيزياء بالرمز g (طلبًا للتبسيط سوف أتجاهل مقاومة الموائع الآن، لكنني سوف أستفيض فيها لاحقًا). بعد الثانية الأولى تصير سرعة سقوط كرة البولينج ٩٫٨ متر في الثانية. وبنهاية الثانية رقم اثنين تزيد سرعتها بمقدار ٩٫٨ إضافية في المتر في الثانية، ومن ثم ستتحرك بسرعة ١٩٫٦ متر في الثانية. وتستغرق ٨ ثوانٍ لتصطدم بالأرض، وحين تفعل تكون سرعتها ٩٫٨ مضروبة في ٨ أي نحو ٧٨ مترًا في الثانية (حوالي ١٧٥ ميل في الساعة).

ماذا عن ذلك المعتقد الشائع القائل بأنه عند إلقاء عملة معدنية من قمة مبنى الإمباير ستيت فمن المحتمل أن تقتل شخصًا ما؟ مرة أخرى سوف أستبعد دور مقاومة الموائع، مع التأكيد على أنه ذو أهمية محورية في هذه الحالة. لكن حتى مع استبعاد ذلك الدور فإن تلك العملة المعدنية التي ستصطدم بسرعة تبلغ حوالي ١٧٥ ميلًا في الساعة لن تقتلك على الأرجح.

---

(١) لقد افترضت هنا أن القوة المؤثرة على الجسيم المشحون بفعل الجاذبية ضئيلة جدًّا لدرجة قد لا تُذكر.

وهذا السياق مثالي لتناول مسألة ستظل تبرز المرة تلو الأخرى في هذا الكتاب، ومرد ذلك في الأساس إلى أنها تبرز المرة تلو الأخرى في الفيزياء، ألا وهي الفرق بين الوزن والكتلة. لاحظ أن نيوتن استخدم الكتلة في معادلاته لا الوزن، ولهذا قد تظن أنهما ذات الشيء، في حين أنهما مختلفان في الجوهر. إننا عادة ما نستخدم الرطل والكيلوجرام (الوحدات التي سنستخدمها في هذا الكتاب) على أنها وحدات للوزن في حين أنها، في الواقع، وحدات للكتلة.

والفارق بينها في الواقع بسيط؛ إذ إن كتلتك لا تتغير أينما كان موقعك في الكون، نعم لن تتغير كتلتك سواء أكنتَ على القمر، أم في الفضاء الخارجي، أم على سطح كويكب ما. وزنك هو الذي يتغير؛ فما هو الوزن إذن؟ هنا تغدو الأمور أكثر تعقيدًا. فالوزن هو نتاج للجاذبية الأرضية، الوزن قوة؛ حيث يساوي الكتلة مضروبة في تسارع الجاذبية ($F = mg$). من ثم، فإن الوزن يتباين وفقًا لقوة الجاذبية المؤثرة عليه، وذلك هو السبب في تناقص أوزان رواد الفضاء على سطح القمر. تبلغ الجاذبية على سطح القمر سدس قوتها على الأرض، ومن ثم، يبلغ وزن رائد الفضاء على القمر سدس وزنه على سطح الأرض.

أما بالنسبة للكتلة، فإن الجذب الثقالي للأرض لا يتغير أينما كنت على سطحها. وهكذا نستطيع أن نقول دونما خوف من انتقاد: «إنها تزن مائة وعشرين رطلًا»[1] أو «إنه يزن ثمانين كيلوجرامًا»، حتى لو كنا بهذا نخلط بين هاتين الفئتين (الكتلة والوزن). لقد فكرتُ طويلًا ومليًّا فيما إذا كنتُ سأستخدم الوحدة الفيزيائية التقنية للقوة (ومن ثم، الوزن) في هذا الكتاب بدلًا من الأرطال والكيلوجرامات، لكنني أحجمتُ عن هذا لأنها قد تكون مربكة، فحتى الفيزيائي الذي تبلغ كتلته ٨٠ كيلوجرامًا لن تجده يقول: «إن وزني سبعمائة وأربع وثمانين نيوتن» (٨٠ × ٩,٨ = ٧٨٤). لذا عوضًا عن ذلك، سأطلب منك أن تتذكر الفارق بين الاثنين، وسنعود إلى هذا الأمر عما قريب عندما نتطرق إلى سبب جنون ميزان الحمام وقت أن تقف عليه على أصابع قدميك.

وكون عجلة الجاذبية واحدة فعليًّا في أي مكان على سطح الأرض هو السبب وراء لغزٍ لعلك قد سمعت عنه، ألا وهو أن الأجسام ذات الكتل المتباينة تسقط بذات السرعة. هناك قصة شهيرة عن جاليليو ذُكرتْ في أحد الكتب القديمة، التي روتْ سيرته، تروي أنه أجرى تجربة بأن ألقى بقذيفة مدفع وكرة خشبية صغيرة من فوق

(١) يساوي الكيلوجرام الواحد حوالي ٢,٢ رطلاً.

قمة برج بيزا المائل في نفس الوقت. وقد شاع بين الناس أن نيته كانت دحض معتقد يُنسب إلى أرسطو مفاده أن الأجسام الأثقل تسقط بسرعة تزيد عن سرعة الأجسام الأقل ثقلًا. ظلت الشكوك تحوم، لفترة طويلة، حول هذه القصة، إلى أن تأكد في وقتنا الحالي أن جاليليو لم يجر هذه التجربة أبدًا، لكنها ما زالتْ قصةً جميلة لدرجة أن ديفيد سكوت قائد بعثة أبوللو ١٥ إلى القمر أسقط مطرقة وريشة صقر على سطح القمر في نفس الوقت كي يرى إذا ما كانت الأجسام ذات الكتل المتباينة تسقط لأسفل بذات السرعة في الفراغ. هناك مقطع رائع يعرض هذه التجربة يمكنك أن تشاهده من خلال الرابط التالي: http://video.google.com/videoplay?doc id=6926891572259784994#.

ما أدهشني في هذا المقطع هو مدى بطء سقوط الجسمين. فقد تتوقع دون تفكير أن يسقطا بسرعة، أو أن المطرقة على الأقل ستسقط بسرعة. لكنهما يسقطان ببطء وذلك لأن عجلة الجاذبية على القمر تساوي سدسها على الأرض فقط.

لماذا كان جاليليو محقًّا في اعتقاده بأن الجسمين ذوَي الكتلتين المتباينتين سيبلغان الأرض في نفس اللحظة إذا سقطَا؟ لأن عجلة الجاذبية واحدة لجميع الأجسام. فوفقًا للمعادلة $F = ma$ كلما زادت الكتلة زادت قوة الجاذبية، إلا أن عجلة الجاذبية تتساوى لكل الأجسام. ومن ثم فكل الأجسام تسقط نحو الأرض بذات السرعة. لكن طاقة الجسم الأثقل كتلةً أكبر، ومن ثم، فإن تأثير اصطدامه يكون أشد.

لكن تجدر الإشارة هنا إلى أن الريشة والمطرقة لن يصلا إلى الأرض في ذات الوقت إذا ما أجريتْ هذه التجربة على ظهر كوكبنا. ذلك هو تأثير مقاومة الموائع الذي لم نحسب حسابه حتى الآن. ومقاومة الموائع هي قوة تعاكس حركة الأجسام المتحركة. كما أن تأثير الرياح على الريشة أكبر منه على المطرقة.

وهذا يأتي بنا إلى سمة بالغة الأهمية من سمات القانون الثاني. ففي تلك المعادلة المذكورة أعلاه نجد كلمة محصلة كلمة محورية؛ إذ إنها غالبًا ما يحدث في الطبيعة أن تؤثر أكثرُ من قوة على جسم واحد؛ ويجب أن يُحسب حساب كل واحدة منها. وهذا يعني أنه يتعين جمع هذه القوى جميعًا. لكن الأمر ليس بهذه البساطة لأن تلك القوى يطلق عليها المتجهات، بمعنى أن لها اتجاهًا كما أن لها مقدارًا، أي إنك لا تستطيع أن تجري عملية حسابية على غرار ٢ + ٣ = ٥ لتحديد محصلة القوة. لنفترض أن قوتين أثرتَا على كتلة قدرها ٤ كيلوجرامات، واحدة من هاتين القوتين مقدارها ٣ نيوتن وتتجه

إلى الأعلى، والأخرى مقدارها ٢ نيوتن وتتجه إلى الأسفل. فإن مجموع هاتين القوتين يساوي ١ نيوتن والاتجاه نحو الأعلى، ووفقًا لقانون نيوتن الثاني سيتسارع الجسم لأعلى ويبلغ تسارعه ٠,٢٥ متر في الثانية لكل ثانية.

بل إن مجموع القوتين قد يساوي صفرًا؛ ذلك لأنك إذا وضعت جسمًا كتلته $m$ على طاولة، فوفقًا لقانون نيوتن الثاني، ستصير القوة المؤثرة على هذا الجسم حينها $mg$ (الكتلة × عجلة الجاذبية) نيوتن متجهة إلى أسفل. وبما أن الجسم لا يتسارع فإن محصلة القوة تساوي صفرًا. وهو ما يعني أنه لا بد أن تكون هناك قوة $mg$ نيوتن متجهة إلى أعلى. وهي القوة التي تدفع بها الطاولة الجسم لأعلى. وعند جمع قوة $mg$ متجهة لأسفل بقوة $mg$ متجهة لأعلى يكون الناتج صفرًا.

ينقلنا هذا إلى قانون نيوتن الثالث: «لكل فعل رد فعل مساوٍ له في المقدار ومضاد له في الاتجاه». وهو ما يعني أن القوتين اللتين يؤثر بهما الجسمان أحدهما على الآخر متساويتان ومتضادتان في الاتجاه. أحب أن أعبر عن هذا بقولي: إن الفعل يساوي سالب رد الفعل، أو «لكل فعل رد فعل مساوٍ له في المقدار ومضاد له في الاتجاه» كما يشيع بين العامة.

بعض من مقتضيات هذا القانون بديهية؛ فمثلًا يُصدر المدفع ردَّ فعل ارتدادي فوق كتفك عندما تطلق النار منه. لكن تذكر أيضًا أنك عندما تضغط على الجدار بجسدك فإنه يضغط عليك في الاتجاه المقابل وبذات القوة بالضبط. وكذلك تؤثر كعكة الفراولة الصغيرة التي تناولتها في عيد ميلادك بضغطٍ متجهٍ لأسفل على صحن الكعك، كما يؤثر عليها الصحن بضغط متجهٍ لأعلى بذات المقدار. الحقيقة أنه رغم غرابة هذا القانون الثالث إلا أن أمثلته العملية تحيطنا من كل جانب.

هل حدث يومًا وفتحتَ صنبور المياه المتصل بالخرطوم الملقى على الأرض فوجدته يتلوى كما الأفعى، وربما يحالفك الحظ ويُغرق أخاك بالماء؟ فما تفسير ذلك؟ يُعزى السبب إلى أنه مثلما يضغط الماء خارجًا من الخرطوم فإنه يضغط في الاتجاه المقابل على الخرطوم، ونتيجة لذلك تجده يتلوى في المكان كله. مثلما لا بد أنك يومًا نفختَ بالونًا من قبل ثم أطلقته، لا شك أنه راح يطير في هواء الغرفة بجنون. ما يحدث هو أن البالون يدفع الهواء إلى خارجه، والهواء الخارج يدفع البالون في الاتجاه المقابل، مما يجعله يندفع طائرًا في الهواء كما يحدث في حالة تلوي الخرطوم. ولا يختلف ذلك كثيرًا عن المبدأ الذي تقوم عليه آلية عمل الطائرات النفاثة والصواريخ؛

فهي تنفث الوقود بسرعة كبيرة جدًّا مما يجعلها تتحرك في الاتجاه المعاكس.

والآن كي نفهم جيدًا غرابة هذه القوانين وعمقها، دعنا نرى ما تخبرنا أنه سيحدث إذا ألقينا بتفاحة من سطح مبنى بارتفاع ثلاثين طابقًا. نعلم أن عجلة الجاذبية تُقدر بنحو ٩,٨ متر في الثانية لكل ثانية. والآن لنفترض أن كتلة التفاحة تبلغ نصف كيلوجرام (نحو ١,١ رطل). باستخدام القانون الثاني $F = ma$، نجد أن الأرض تجذب التفاحة بقوة تبلغ ٠,٥ × ٩,٨ = ٤,٩ نيوتن. لا بأس بذلك حتى الآن.

لكن الآن لنفكر فيما يقتضيه القانون الثالث: إذا جذبت الأرض التفاحةَ بقوة تبلغ ٤,٩ نيوتن، فحينها ستجذب التفاحة الأرض بقوة تبلغ ٤,٩ نيوتن. وهذا يعني أن الأرض ستسقط على التفاحة مثلما تسقط التفاحة على الأرض. ألا يبدو هذا جنونًا؟ لكن تمهل قليلًا. بالنظر إلى أن حجم الأرض أضخم من حجم التفاحة بأضعاف مضاعفة، نجد الأرقام جنونية. وبما أننا نعلم أن كتلة الأرض تقدر بنحو ٦ × ١٠$^{٢٤}$ كيلوجرام نستطيع أن نعرف الارتفاع الذي تسقط منه الأرض على التفاحة: نحو ١٠$^{-٢٢}$ متر أي نحو جزء من عشرة ملايين جزء من البروتون، وهي مسافة من الصغر بحيث لا يمكن حتى قياسها؛ إنها في الواقع بلا معنى.

تلك الفكرة القائلة بأن القوتين المتبادلتين بين جسمين تكونان متساويتين ومتضادتين في الاتجاه تنطبق على جميع مناحي حياتنا، وهي السبب الذي جعل ميزان حمامك يجن عندما ضغطتَ عليه بأصابع قدميك. ينقلنا هذا إلى السؤال عن كنه الوزن، ولذلك فلنفهمه بشكل أكثر تحديدًا.

عندما تقف على ميزان الحمام تدفعك الجاذبية لأسفل بقوة تبلغ $mg$ (حيث $m$ هي الكتلة) ويدفعك الميزان لأعلى بذات القوة، ومن ثم، فإن محصلة القوى تساوي صفرًا. تلك القوة التي تدفعك لأعلى هي التي يقيسها الميزان بالفعل، وذلك القياس هو وزنك المسجل. تذكر أن الوزن والكتلة ليسَا سواء. فلكي تتغير كتلة جسمك عليك أن تتبع حمية غذائية (أو يمكنك بالطبع أن تفعل العكس وتأكل أكثر)، لكن من الممكن أن يتغير وزنك بكل سهولة.

لنفترض أن كتلة جسدك ($m$) تبلغ ٥٥ كيلوجرامًا؛ عندما تقف على ميزان فإنك تضغط عليه لأسفل بقوة $mg$، وكذلك يؤثر عليك الميزان لأعلى بذات القوة $mg$. هنا تصبح محصلة القوى المؤثرة عليك صفرًا. القوة التي يؤثر بها الميزان عليك هي التي

تقرأها على شاشة الميزان. ولأن الميزان قد يعرض وزنك بالكيلوجرامات فسوف تقرأ عليه ٥٥ كيلوجرامًا.

والآن لنرى وزنك وأنت في مصعد. عندما يتوقف المصعد دون حركة (أو عندما يتحرك بسرعة ثابتة) لا يتسارع جسدك (ولا المصعد كذلك) وسوف يشير الميزان إلى أن وزنك ٥٥ كيلوجرامًا، تمامًا كما حدث عندما وزنتَ نفسك في حمامك. عندما تدلف إلى المصعد (أثناء وقوفه) وتقف على الميزان تجد وزنك ٥٥ كيلوجرامًا. والآن تضغط على زر الطابق الأعلى فيتسارع المصعد قليلًا لأعلى حتى يصل إلى سرعته الكاملة. لنفترض أن التسارع يبلغ مترين في الثانية لكل ثانية وهو تسارع ثابت. خلال الفترة القصيرة التي يتسارع المصعد فيها لا يمكن أن تكون محصلة القوى المؤثرة عليك يساوي صفرًا. فبحسب قانون نيوتن الثاني لا بد أن تكون محصلة القوى $F_{net}$ الواقعة عليك هو $F_{net} = ma_{net}$. وبما أن محصلة التسارع هي متران في الثانية لكل ثانية فإن صافي القوة الواقعة عليك يساوي $m \times 2$ متجهة إلى أعلى. وبما أن قوة الجاذبية المؤثرة عليك لأسفل هي $mg$، فلا بد أن تؤثر عليك كذلك قوة $mg + m2$ والتي يمكن كتابتها أيضًا بهذا الشكل $m(g + 2)$ متجهة لأعلى. من أين تأتي هذه القوة؟ لا بد أن تأتي من الميزان (من أين ستأتي إلا منه؟). يؤثر الميزان عليك بقوة مقدارها $m(g + 2)$ متجهةً لأعلى. لكن تذكر أن الوزن الذي يظهر على شاشة الميزان هو القوة التي يضغط عليك الميزان بها لأعلى. ومن ثم، فإن الميزان يخبرك أن وزنك يبلغ نحو ٦٥,٣ كيلوجرام (تذكر أن $g$ تُقدر بنحو ١٠ متر في الثانية لكل ثانية). لقد اكتسبتَ وزنًا كبيرًا نوعًا ما.

وفقًا لقانون نيوتن الثالث، إذا أثَّر الميزان عليك بقوة تساوي $m(g + 2)$ متجهةً لأعلى، فلا بد أن تضغط عليه أنت بذات القوة لأسفل. قد يبدو لك من المنطقي حينها بما أن الميزان يؤثر عليك بنفس القوة التي تؤثر أنت بها عليه فإن محصلة القوى تساوي صفرًا، ومن ثم، لن يتسارع جسدك. إن التفكير على هذا النحو خطأ شائع. فهناك قوتان فقط تؤثران عليك، وهما القوة $mg$ المتجهة لأسفل والتي تُعزى إلى الجاذبية الأرضية، والقوة $m(g + 2)$ المتجهة لأعلى الناتجة عن الميزان. ومن ثم، تؤثر عليك محصلة قوى تساوي $2m$ باتجاه الأعلى، مما سيجعل جسمك يتسارع بعجلة مترين في الثانية لكل ثانية.

في اللحظة التي يتوقف فيها المصعد عن التسارع يعود وزنك لمعدله الطبيعي. ومن ثم فإن وزنك لا يزداد إلا خلال تلك الفترة القصيرة التي يتسارع فيها المصعد لأعلى.

هنا يمكنك أن تخمن بنفسك أن في حالة تسارع المصعد لأسفل، سينخفض وزنك. خلال تلك الفترة التي سيبلغ فيها تسارع المصعد لأسفل مترين في الثانية لكل ثانية، فسيشير الميزان إلى أن وزنك يساوي $m(g-2)$، أي ما يُعادل حوالي ٤٣,٥ كيلوجرام. أي مصعد يتجه لأعلى، لا بد له أن يتوقف، وكذا لا بد أن يتسارع لأسفل لفترة قصيرة قبل أن يتوقف. وهكذا فقرب نهاية رحلتك في المصعد لأعلى ستجد نفسك قد فقدت بعض الوزن، وهو الأمر الذي سيسرك. لكنك لن تلبث كثيرًا قبل أن يتوقف المصعد وسيعود وزنك لما كان عليه (٥٥ كيلوجرامًا).

افترض الآن أن شخصًا يحمل لك بُغضًا شديدًا أقدم على قطع كابل المصعد وبدأت في السقوط مقتربًا من بئر المصعد بعجلة g. أعلم أنك لن تفكر على الأرجح وقتها في الفيزياء، لكن الأمر قد يكون بمثابة تجربة (قصيرة) مشوقة. سيصير وزنك $m(g-g)=0$؛ أي أنك ستكون عديم الوزن. فنظرًا لأن الميزان يسقط بذات معدل التسارع الذي تسقط به أنت، فهذا يعني أنه لم يعد يؤثر عليك بقوة تتجه لأعلى. ولو نظرت إلى الميزان لحظتها لوجدته يخبرك بأن وزنك صفر. لكن الواقع أنك وكل شيء معك في المصعد تطفون في هذه الحالة، حتى لو أنك قلبتَ كوبًا من الماء رأسًا على عقب لحظتها، لما سقط الماء منه، رغم أنني أرجوك ألا تحاول تطبيق تلك التجربة بالطبع.

وهذا عينه تفسير طفو رواد الفضاء داخل مركباتهم الفضائية. إذ إن أي مركبة فضائية أو مكوك فضائي وقت يكون في مداره يكون في الحقيقة في حالة سقوط حر تمامًا كما في حالة سقوط المصعد. فما المقصود بالسقوط الحر؟ قد تفاجئك الإجابة. يحدث السقوط الحر عندما تكون الجاذبية الأرضية هي القوة الوحيدة المؤثرة عليك. وفي مدار المركبة الفضائية يكون رواد الفضاء والمركبة ذاتها بكل ما فيها في حالة سقوطٍ حر تجاه الأرض. والسبب في عدم ارتطامهم بالأرض هو أن الأرض منحنية بينما رواد الفضاء والمركبة الفضائية وكل ما فيها يتحركون بسرعة شديدة أثناء سقوطهم نحو الأرض، وسطح الكوكب نفسه ينحني مبتعدًا عنهم ولهذا فلا يرتطمون بها أيضًا.

ومن ثم فإن رواد الفضاء يكونون عديمي الوزن داخل المكوك الفضائي. لكنك لو كنتَ داخل المكوك الفضائي لظننتَ أن الجاذبية منعدمة، لكن الحقيقة أنه لا شيءَ في هذا المكوك له أي وزن. وكثيرًا ما يقال إن المكوك وهو في مداره يمثل بيئة منعدمة الجاذبية لأن القائلين يرون كذلك. في حين أن الجاذبية لو انعدمت لما ظل المكوك في مداره.

في رأيي، إن فكرة تغير الوزن مذهلة، لدرجةٍ حفزتْ لديَّ الرغبة في شرح هذه الظاهرة — حتى من حيث انعدام الوزن — في قاعة الدرس. ماذا لو صعدت على طاولة ووقفتُ على ميزان حمام مقيد بإحكام إلى قدماي؟ ثم فكرتُ أنني قد أستطيع بطريقة ما أن أبين لطلابي — عن طريق تركيب كاميرا خاصة — في نصف ثانية أو نحوها أنني عندما أسقط سقوطًا حرًّا فسيشير ميزان الحمام إلى صفر. بإمكاني أن أقترح عليك تجربة الأمر بنفسك، لكن لا داعي لذلك لأنني لم أفلح في الأمر ولم أخرج بشيء سوى أنني كسرتُ عددًا كبيرًا من الموازين. تكمن المشكلة في أن الموازين التي يمكنك ابتياعها من السوق لا تتجاوب بسرعة، وذلك لأن ثمة قصورًا ذاتيًا في زنبركاتها. وهنا يشوش أحد قوانين نيوتن على الآخر. فلو استطعتَ القفز من أعلى مبنى يبلغ ارتفاعه ثلاثين طابقًا فستملك على الأرجح وقتًا كافيًا (نحو ٤,٥ ثانية) لملاحظة هذا التأثير، لكن في هذه التجربة بالطبع مشكلات أخرى.

لذا بدلًا من تكسير الموازين والقفز من أعلى المباني، هنالك أمر آخر تستطيع تجربته في فناء منزلك الخلفي لتجربة حالة انعدام الوزن هذه، إذا كانت لديك طاولة من تلك التي تُصطحب في الرحلات الخلوية، وتتمتع بركبتين سليمتين. أُجري هذه التجربة أمام طلابي فوق طاولة المعمل. ما عليك سوى أن تصعد فوق الطاولة وتمسك بإبريق يحتوي جالونًا أو نصف جالون من الماء فوق راحتيك وهما مفرودتان، ولا تمسكه من الجوانب؛ إذ يجب أن يكون الإبريق مستقرًا فقط على يديك. والآن اقفز من على الطاولة، وسترى الإبريق يطفو فوق يديك. وإذا استطعتَ أن تطلب من صديق لك أن يصور لك مقطع فيديو وأنت تقفز، ثم شغلتَه بالإيقاع البطيء، فحينها سوف ترى الإبريق يطفو بكل وضوح؛ ذلك لأنك حين تتسارع للأسفل تصير القوة التي كنت تضغط بها على الإبريق لأعلى كي تبقيه على يديك، صفرًا؛ عندئذ تصبح عجلة الإبريق ٩,٨ متر في الثانية لكل ثانية، وهو نفس معدل تسارعك لأسفل. فإنك والإبريق معًا تسقطون سقوطًا حرًّا.

لكن كيف لذلك أن يفسر الجنون الذي يعتري ميزانك عندما تقف على أصابع قدميك؟ لأنك بينما تقف مرتفعًا على أصابع قدميك فإنك تتسارع لأعلى، تتزايد قوة الميزان التي تدفعك. ولذلك يزداد وزنك لهذه الفترة القصيرة. لكن بعدها، وأنت على قمة أصابع قدميك، تأخذ في التباطؤ، وهو ما يعني أن وزنك يتناقص. ثم بينما تخفض كعبيك لأسفل تنعكس العملية بأكملها، ولقد وضحتُ للتو كيف تستطيع، دون أن تغير

من كتلة جسدك، أن تزيد وتنقص من وزنك لجزء من الثانية.

## قانون الجذب العام
## نيوتن وثمرة التفاح

يتحدث الناس في المعتاد عن قوانين نيوتن الثلاثة، لكن نيوتن في الواقع صاغ أربعة قوانين. وقد سمعنا جميعًا بقصة نيوتن عندما كان في بستان يراقب تفاحة تسقط من شجرة. يزعم أحد المؤرخين لسيرة نيوتن أن نيوتن نفسه مَن روى تلك الحكاية. وكتب ويليام ستوكلي صديق نيوتن مقتبسًا من محادثة جرت بين الاثنين قائلًا: «لقد استلهم الأمر برمته من سقوط ثمرة التفاح، حيث طرأ الأمر على ذهنه بينما كان يجلس متأملًا، ففكر في نفسه لماذا يتحتم أن تسقط التفاحة على الأرض سقوطًا عموديًّا»[1]. لكن ما زال هناك كثيرون لا يصدقون هذه القصة. كما أن نيوتن لم يرو لستوكلي القصة إلا قبل وفاته بعام واحد، ولم يذكرها مرة أخرى في مؤلفاته الضخام.

لكن رغم ذلك لا يجادل أحد في أن نيوتن كان أول من أدرك أن تلك القوة التي تسبب سقوط التفاحة من الشجرة هي ذاتها التي تحكم حركة القمر والأرض والشمس بل وجميع ما في الكون من أجسام. كانت تلك رؤية كاشفة فريدة؛ لكنه مرة أخرى لم يتوقف عند هذا الحد؛ فقد أدرك أن كل جسم في هذا الكون يجذب إليه كل جسم آخر، وخرج بمعادلة لحساب مدى قوة هذا الجذب، وهي المعادلة التي تعرف بقانونه للجذب العام. ينص هذا القانون على أن قوة الجذب التي بين جسمين تتناسب طرديًّا مع مجموع كتلتيهما، وتتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة بينهما.

إذن، بعبارة أخرى، باستخدام مثال افتراضي تمامًا أؤكد على أنه لا علاقة بينه وبين الواقع، لو كان كوكبَا الأرض والمشتري يدوران حول الشمس من نفس المسافة، ولأن حجم كوكب المشتري يبلغ نحو ٣١٨ ضعفًا لحجم كوكب الأرض، لكانت قوة الجذب بين الشمس والمشتري ستعادل ٣١٨ مثل قوة الجذب بين الشمس والأرض. ولو كانت كتلتَا الشمس والمشتري متساويتين، لكنّ المشتري في مساره الطبيعي الذي يبعد عن الشمس خمسة أمثال بعد مسار الأرض عن الشمس، حينها، ولأن قوة الجذب

---

(١) نشرت الجمعية الملكية مؤخرًا صورة رقمية على الإنترنت لمخطوطة ستوكلي، تستطيع أن تطلع عليها على الموقع التالي: http://royalsociety.org/turning-the-pages/.

تتناسب تناسبًا عكسيًّا مع مربع المسافة، ستبلغ قوة الجذب بين الشمس والأرض خمسة وعشرين مثل قوة الجذب بين الشمس والمشتري.

في كتاب نيوتن الشهير «المبادئ الرياضية للفلسفة الطبيعية»، الصادر عام ١٦٧٨ – والذي نسميه اليوم «المبادئ» – لم يستعن نيوتن بمعادلة لتوضيح قانون الجذب العام، لكننا اعتدنا التعبير عنه في الفيزياء اليوم على النحو التالي:

$$F_{grav} = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

هنا، $F_{grav}$ هي قوة الجذب الثقالي بين جسم كتلته $m_1$ وجسم آخر كتلته $m_2$، وتعبر $r$ عن المسافة بينهما؛ أما $2$ فهي مربع المسافة. فماذا عن $G$؟ إنها ما يُطلق عليه ثابت الجاذبية. لقد علم نيوتن بالقطع بوجود هذا الثابت لكنه لم يذكره في كتاب المبادئ. ومن بين كثيرٍ من القياسات التي أُجريتْ منذ ذلك الحين، صرنا الآن نعلم أن أدق قيمة لـ $G$ هي ٦,٦٧٤٢٨ ± ٠,٠٠٠٦٧ × ١٠$^{-١١}$.[١] ونحن، علماء الفيزياء، نعتقد أن هذه القيمة تنطبق على الكون بأسره مثلما خمن نيوتن.

لقد كان تأثير قوانين نيوتن مهولًا، ولا يمكن أن يُوفَّى حقه من التقدير. كما أن كتاب المبادئ واحدٌ من أهم الكتب العلمية في التاريخ. فقوانينه تلك غيرت علمَي الفيزياء والفلك بالكامل؛ فقد أتاحتْ حساب كتلة الشمس والكواكب، والطريقة التي يتم بها هذا الحساب بالغة الروعة. إذا عرفتَ الدورة المدارية لأي كوكب كان (كالمشتري أو الأرض مثلًا) وعرفتَ المسافة التي تفصله عن الشمس، فحينها تستطيع أن تحسب كتلة الشمس. ألا يبدو ذلك كأنه سحر؟ بل إننا نستطيع أن نخطو خطوة إضافية إلى الأمام؛ حيث إننا إذا عرفنا الدورة المدارية لواحد من أقمار المشتري الساطعة (التي اكتشفها جاليليو عام ١٦٠٩) وعرفنا المسافة بين المشتري وذلك القمر، نستطيع حينها أن نحسب كتلة المشتري. ومن ثم إذا عرفتَ الدورة المدارية لقمر الأرض الذي يدور حولها (٢٧,٣٢ يومًا) وعرفتَ متوسط المسافة بينه وبين الأرض (حوالي ٢٣٩,٠٠٠ ميل) فستستطيع حينها حساب كتلة الأرض بقدر كبير من الدقة. سأريك كيف تفعل ذلك في الملحق ٢. ولو كنتَ تجيد بعضًا من الحسابات الرياضية فستستمتع بذلك.

(١) لو أردت استخدام هذه القيمة تأكد أن الكتل التي تقيسها بوحدة الكيلوجرام وأن المسافة $r$ بوحدة المتر. حينها يمكن قياس قوة الجاذبية بوحدة نيوتن.

لكن قوانين نيوتن تمتد إلى ما وراء النظام الشمسي؛ فهي تصف حركة النجوم، والنجوم الثنائية (الفصل الثالث عشر)، وتجمعات النجوم، والمجرات بل وحتى تجمعات المجرات، وتفسرها جميعًا. كما تستحق قوانين نيوتن أن يُنسب لها الفضل في اكتشاف المادة المظلمة التي اكتُشفتْ خلال القرن العشرين. سوف أُخبرك المزيد عنها في موضع لاحق من الكتاب. إنها قوانين بارعة الجمال تحبس الأنفاس من فرط بساطتها وقوة تأثيرها في الوقت نفسه؛ إنها تفسر كثيرًا من الظواهر المتنوعة تفسيرًا يأسر اللب.

من خلال جمعه بين فيزياء الحركة وفيزياء التفاعل بين الأجسام وفيزياء حركات الكواكب، شكّل نيوتن نظامًا جديدًا للقياسات الفلكية، يُظهر كيف أن تلك المشاهدات التي ظلتْ محيرة لقرون هي في الواقع مرتبطةٌ بعضها ببعض. وقد اكتشف آخرون غيره لمحات من أفكاره تلك، لكنهم لم يستطيعوا ربط بعضها ببعض كما فعل هو.

كان جاليليو الذي توفي قبل مولد نيوتن بعام قد أتى بنسخة مبكرة لقانون نيوتن الأول، إذ استطاع وصف حركة كثيرٍ من الأجسام وصفًا رياضيًّا. كما أنه اكتشف أن جميع الأجسام ستسقط من ارتفاع معين بذات السرعة (في غياب مقاومة الموائع). لكنه لم يستطع تفسير الأمر. كما اكتشف يوهانس كبلر أساسيات عمل مدارات الكواكب، لكنه لم يعلم ما الذي يجعلها تعمل بهذه الطريقة، لكن نيوتن فسر تلك الأمور. وكانت تفسيراته، كما رأينا، والكثير من الاستنتاجات التي نتجت عنها؛ لا تمت للبداهة بصلة.

لا تفتأ قوى الحركة تبهرني. فالجاذبية تلازمنا دائمًا وتسيطر على الكون بأسره. والمذهل فيها – في الواقع، هو أحد الأمور المذهلة فيها – أنها تعمل عن بعد. هل توقفتَ يومًا وفكرتَ أن كوكبنا لا يخرج عن مداره أبدًا، وأننا أحياء بفضل قوة جذب موجودة بين جسمين يفصلهما ٩٣ مليون ميل؟

## حركة البندول

رغم أن قوة الجاذبية تهيمن على حياتنا، فإن تأثيرها على العالم محير من جوانب عدة. دائمًا ما أستعين ببندولٍ لأوضح لطلابي لأي درجة تتنافى آلية عمل الجاذبية مع المنطق.

قد يظن كثيرون منكم أنه إذا تأرجح على أرجوحة بجوار شخص أخف وزنًا

بكثير، على سبيل المثال: طفل حديث المشي؛ فإن حركة أرجوحة الأول ستكون أبطأ كثيرًا من حركة أرجوحة الشخص الأخف وزنًا. لكن هذا ليس صحيحًا. فقد تفاجؤون بأن الزمن الذي يستغرقه البندول لإكمال حركة تأرجح واحدة، وهو الزمن الذي نطلق عليه دورة البندول؛ لا يتأثر بالوزن الذي يتدلى من البندول (نسمي هذا الوزن المتأرجح الثقل). لاحظ أنني أتكلم هنا عما يسمى بالبندول البسيط، الذي لا بد أن ينطبق عليه شرطان: أولًا، لا بد أن يكون الوزن المتأرجح أثقلَ كثيرًا من وزن الوتر الذي يحمله حتى يتسنى لنا تجاهل وزن الوتر. ثانيًا، لا بد أن يكون حجم الوزن المتأرجح صغيرًا بما يكفي لاعتباره نقطة صفرية الحجم[1]. من اليسير صناعة بندول بسيط في البيت؛ فما عليك إلا أن تربط تفاحة بوتر خفيف الوزن يبلغ طوله أربعة أمثال حجم التفاحة على الأقل.

باستخدام قوانين نيوتن للحركة أشتق معادلة لحساب زمن البندول البسيط في قاعة الدرس، ثم أختبر تلك المعادلة. لتحقيق ذلك يتعين عليَّ افتراض كون الزاوية التي يتأرجح البندول بها زاوية صغيرة. أحتاج هنا لأن أكون شديد التحديد فيما أعني. عندما تنظر إلى البندول الذي صنعتَه في منزلك وهو يتأرجح من الأمام إلى الخلف أو من اليمين إلى اليسار، ستلاحظ أن البندول في معظم الوقت يتحرك إما إلى اليمين أو إلى اليسار. لكنك ستجده يتوقف تمامًا مرتين خلال كل تأرجح كامل، وستجده يغير اتجاهه عقب كل وقفة. عندما يحدث ذلك تكون الزاوية التي بين الوتر والخط العمودي قد بلغتْ قيمتها القصوى، وهو ما نسميه بسعة البندول. لو كان تجاهل مقاومة الموائع (الاحتكاك) ممكنًا، فحينها ستتساوى الزاوية القصوى التي يتوقف فيها البندول أقصى اليسار، مع الزاوية القصوى التي يتوقف عندها البندول أقصى اليمين. لكن المعادلة التي أشتقُّها هنا لا تصلح إلا للزوايا الصغيرة (السعات الصغيرة). نسمي مثل هذا الاشتقاق في الفيزياء تقارب الزوايا الصغيرة. دائمًا ما يسألني طلابي: «إلى أي مدى يبلغ هذا الصغر؟». بل إن إحداهن كانت أكثر تحديدًا في أسئلتها وقالت: «هل تعتبر السعة التي تبلغ خمس درجات صغيرة؟ هل تظل تلك المعادلة صالحة لسعة قدرها عشر درجات أم أن العشر درجات ليست قدرًا صغيرًا؟». تلك أسئلة ممتازة ولا شك، وإنني أقترح أن نجرب الأمر بأنفسنا في قاعة الدرس.

---

(١) لو لم يتسنَ تجاهل كتلة الوتر ولم تتسنَ معاملة حجم الوزن المتأرجح على أنه كتلة نقطية، حينها لن يعتبر هذا البندول بسيطًا. حينها سنسميه بندولًا فيزيائيًا وسيسلك سلوكًا مختلفًا.

تلك المعادلة التي أشتقها بسيطةٌ جدًّا وأنيقة جدًّا، رغم أنها قد تبدو مضنيةً لأولئك الذين لم يُجروا أي حسابات رياضية مؤخرًا: $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

تشير $T$ إلى زمن البندول (بالثواني)، و$L$ هو طول الوتر (بالأمتار)، و$\pi$ تساوي ٣,١٤ و$g$ هو عجلة الجاذبية (٩,٨ متر في الثانية لكل ثانية). وهكذا، فإن الشطر الأيمن من المعادلة يعني ٢ $\pi$ مضروبًا في الجذر التربيعي لطول الوتر المقسوم على عجلة الجاذبية. لن أخوض هنا في تفاصيل تؤكد أن هذه هي المعادلة الصحيحة (تستطيع أن تتابع عملية اشتقاقي للمعادلات في محاضراتي المسجلة، إذا كنتَ تريد ذلك؛ رابط الموقع موجود أسفل الصفحة).

لقد أوردتُ المعادلة هنا ليتسنى لك إدراك مدى الدقة التي تُثبت بها التجاربُ العملية التي أؤديها في قاعة الدرس صحةَ المعادلة. تتنبأ المعادلة بأن البندول ذا الوتر الذي يبلغ طولُه مترًا واحدًا يكون زمنه ثانيتين. لذلك فقد قِستُ الوقت الذي يستغرقه بندولٌ بوترٍ يبلغ هذا الطول لكي يكمل عشر تأرجحات، فكان نحو عشرين ثانية. وعندما نقسم هذا الزمن على ١٠ فسنجد الأرجحة الواحدة تستغرق نحو ثانيتين. ثم آتي ببندول طول وتره أقصر أربع مرات من طول هذا البندول. فأجد المعادلة تتنبأ بأن زمنه أقصر بمرتين من زمن هذا البندول. لذلك أجعل طول وتر البندول ٢٥ سنتيمترًا فأجد أنه يستغرق بالفعل نحو عشر ثوانٍ ليكمل أرجحة واحدة. وهو ما يؤكد المعادلة.

لاختبار المعادلة بدرجة أدق من اختباري السابق الذي أجريته عن طريق بندول به تفاحة صغيرة، صنعنا بندولًا بسيطًا في قاعة الدرس بوتر يبلغ طوله ٥,١٨ متر (نحو ١٧ قدمًا) وثقل كروي معدني يبلغ ١٥ كيلوجرامًا. وأسميته البندول الأم. يمكنك أن تشاهده قرب نهاية محاضرتي عبر الرابط التالي: http://ocw.mit.edu/courses/01-physics-i-classical-mechanics-fall-1999/video--physics/8./lectures/embed10

كم ينبغي أن يكون الزمن $T$ للبندول؟ سيكون $T = 2\pi\sqrt{\frac{5.18}{9.8}}$، الزمن يساوي حاصل ضرب ٢ باي في الجذر التربيعي لطول الوتر مقسومًا على عجلة الجاذبية، أي ٤,٧٥ ثانية. ولاختبار صحة ذلك، كما وعدتُ طلابي، قستُ سعتَي الخمس درجات والعشر درجات.

أستخدم في قياسي مؤقِّتًا رقميًّا كبيرَ الحجم، يستطيع الطلاب رؤيته، وهو مؤقِّت

يعرض الوقت بدقة تبلغ جزءًا من مائة جزء من الثانية. وعلى مر السنين كنتُ قد اختبرتُ زمن ردي للفعل في تشغيل المؤقِّت وإيقافه عددًا لا حصر له من المرات، وعلمتُ أن قدْرَه جزءٌ على عشرة أجزاء من الثانية (في أحسن الظروف). يعني ذلك أنني لو كررتُ ذات القياس عشرات المرات فسأجده يتباين في الزمن تباينًا يبلغ ٠,١ ثانية (وربما ٠,١٥ ثانية). لذ فسواء قِسْتُ الزمن اللازم لأرجحة واحدة أو لعشر أرجحات فسيكون الزمن بارتياب يزيد أو يقل عن ٠,١ ثانية. ولذلك فقد تركتُ البندول يتأرجح عشر مرات لأن هذا سينتج عنه قياس أدق بعشر مرات لزمن البندول عنه إذا تركته يتأرجح لمرة واحدة فقط.

أشُد ثقل البندول إلى الخارج حتى يصير قدر الزاوية التي يشكلها الخيط مع الخط العمودي نحو خمس درجات، ثم أفلته وأضغط زر المؤقِّت. يشرع الطلبة في إحصاء كل أرجحة بصوت عالٍ، وبعد عشر أرجحات أوقف المؤقت. المدهش أن المؤقت يحسب ٤٥,٧٠ ثانية، أي عشرة أضعاف تقديري للأرجحة الواحدة، وهو ما جعل الطلاب يصفقون بحرارة.

ثم أزيد السعة إلى عشر درجات، وأفلت الثقل المتأرجح، ثم أضغط زر المؤقت؛ ويشرع الطلاب في العد، وعقب الأرجحة العاشرة أوقف المؤقت فأجد الرقم الظاهر على شاشته ٤٥,٧٥ ثانية. و٤٥,٧ ± ٠,١ لعشر أرجحات يعني ٤,٥٧٥ ± ٠,٠١ ثانية لكل أرجحة. مما يعني أن نتيجة سعة الخمس درجات هي نفسها نتيجة سعة العشر درجات (مع نسبة ارتياب في القياسات). وهكذا فإن قياساتي ما تزال دقيقة.

ثم أسأل الطلبة أن يفترضوا أنني جلستُ على الثقل وتأرجحت معه، فهل سنخرج بنفس الزمن حينها أم أنه سيتغير؟ بالطبع لا أريد أن أجلس على ذلك الشيء (فهو أمر مؤلم للغاية)، لكن لأجل العلم ولأجل إضحاك الطلبة ودمجهم في التجربة فلن أفوت هذه الفرصة. بالطبع، لا يمكنني أن أجلس منتصبًا على الثقل؛ لأن ذلك سوف يؤدي إلى تقصير الحبل وتقليل الزمن قليلًا. لكنني لو جعلتُ جسمي في الوضع الأفقي قدر الاستطاعة كي يكون على نفس مستوى الثقل، فإنني أحافظ على طول الحبل كما هو تقريبًا. لذلك أجذب الثقل لأعلى وأضعه بين رجليَّ وأمسك بالحبل ثم أطلق العنان لنفسي. يمكنك أن ترى هذا على غلاف الكتاب.

ليس من اليسير عليَّ أن أُشغِّل المؤقِّت وأُوقفه وأنا أتعلق في البندول دون أن أزيد من زمن رد الفعل. لكنني قد تدربتُ على ذلك مرات كثيرة، لدرجة أنني صرتُ على

شبه يقين من أن مقدار الارتياب الذي يمكن تحقيقه في قياساتي ± ٠,١ ثانية. أتأرجح عشر مرات وطلبتي يعُدون الأرجحات ويتضاحكون من عبثية موقفي ذلك، وأنا أتذمر وأزمجر بصوت عالٍ ثم أوقف المؤقِّت عقب إكمال الأرجحات العشر، فأجده يسجل ٤٥,٦١ ثانية. وهو ما يعني ٤,٥٦ ± ٠,٠١ ثانية. أصيح عاليًا «الفيزياء حقّ» فتضج القاعة بحماس الطلاب.

## الجدات ورواد الفضاء

من الجوانب الخادعة في الجاذبية أننا يمكن أن ننخدع في إدراك الاتجاه الذي تجذب منه حقيقةً فنتصور أنها تجذب من اتجاه آخر. فالجاذبية تشد الأجسام تجاه مركز الأرض، وذلك بالطبع على الأرض وليس على كوكب بلوتو. لكننا أحيانًا نرى الجاذبية ذات تأثير أفقي، وهذه الجاذبية الاصطناعية أو المتصورة كما نسميها يمكن أن تتحدى الجاذبية نفسها.

يمكنك شرح الجاذبية الاصطناعية عمليًا بكل سهولة بأن تفعل أمرًا اعتادتْ جدتي فعله في كل مرة كانت تُعد فيها طبق السلطة. تذكر أن جدتي كانت لها أفكار رائعة، فهي التي علمتني أن المرء يكون أطول قامةً وهو مستلقٍ عنه واقفًا. أما حين كانت تُعد السلطة فقد كانت تستمتع بوقتها. كانت تغسل الخس في مصفاة، ثم بدلًا من أن تجففه في منشفة قماشية، وهو ما يدمر أوراقه، ابتكرتْ أسلوبها الخاص، حيث كانت تضع منشفةَ أطباق فوق المصفاة وتثبتها برباط مطاطي، ثم تشرع في أرجحتها بشكل دائري بعزم شديد وسرعة خارقة.

ولذلك فإنني عندما أشرح هذا لطلبتي أطلب من الجالسين منهم في أول صفين أن يغلقوا دفاترهم كي لا تتبلل صفحاتها. لأنني أحضر الخس معي إلى قاعة الدرس، وأغسله بعناية في حوض موضوع فوق طاولتي، ثم أشرع في تجهيزه داخل المصفاة. أقول لهم «تأهبوا» ثم أطوح ذراعي بضراوة في شكل دائرة عمودية فتتناثر قطرات الماء في كل مكان. بالطبع قد صار لدينا الآن دوارات سلطة بلاستيكية مملة حلت محل الطريقة التي كانت جدتي تنتهجها – وهو من سوء حظ هذا الكتاب. فلطالما انتزعت المدنيةُ الحديثة الرومانسيةَ من حياتنا.

وذلك النوع من الجاذبية الاصطناعية يشهده رواد الفضاء أثناء تسارعهم في المدار

المحيط بالأرض. روى لي جيفري هوفمان، صديقي وزميلي في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، والذي ذهب في خمس بعثات فضائية بمكوك فضائي، أن طاقم المكوك شهد خلال مرحلة الإطلاق مجموعة من التسارعات المختلفة التي تتدرج من نحو ٠,٥ ج في البداية وصولًا إلى ٢,٥ ج بنهاية مرحلة الوقود الصلب. ثم ينخفض التسارع مرة أخرى لفترة قصيرة إلى ١ج، وهي المرحلة التي يبدأ الوقود السائل فيها بالاحتراق ثم يزداد التسارع مرة أخرى إلى ٣ ج في الدقيقة الأخيرة من الإطلاق. ويستغرق الإطلاق وقتًا يبلغ في الإجمالي نحو ثماني دقائق ونصف الدقيقة كي يصل إلى سرعة تبلغ نحو ١٧,٠٠٠ ميل في الساعة. وهو الوضع الذي لا يكون مريحًا أبدًا. وعندما وصلوا إلى المدار في النهاية انعدم وزنهم ومروا بمرحلة انعدام الجاذبية.

الآن صرت تعلم أن الخس الذي يشعر بأن المصفاة تضغط عليه، ورواد الفضاء الذين يشعرون بمقاعدهم تضغط عليهم، يتأثرون بنوع من أنواع الجاذبية الاصطناعية. فتلك الآلة الغريبة التي تمتلكها جدتي – ومثلها مجففات الخضروات – هي نوع من أنواع الطرد المركزي، حيث إنها تفصل الخس عن الماء المتعلق بأوراقه، ضاربة إياه ليندفع من ثقوب المصفاة. لا تحتاج لأن تكون رائد فضاء لتمر بهذه الجاذبية المحسوسة. تأمل تلك اللعبة الشيطانية في مدينة الألعاب، والمسماة باللعبة الدوارة التي تقف فيها على حافة قرص دوار ضخم مسندًا ظهرك إلى حاجز معدني. بزيادة سرعة الدوران تجد أنك تُدفع أكثر ناحية الحاجز، أليس كذلك؟ وفقًا لقانون نيوتن الثالث فإنك تضغط على الحاجز بذات القوة التي يضغط الحاجز بها عليك.

تلك القوة التي يضغط الحاجز بها عليك تسمى قوة الضغط المركزي. وهي القوة التي تولد العجلة اللازمة ليدور جسدك؛ وكلما ازدادت سرعتك ازدادت قوة الضغط المركزي. تذكر أنك لو صرتَ تتحرك في شكل دائري فإنك تحتاج إلى قوة (ومن ثم عجلة) لتظل تتحرك حتى لو ظلتْ سرعتك ثابتة. وبذات الطريقة توفر الجاذبية قوة الطرد المركزي اللازمة لجعل الكواكب تدور حول الشمس، كما سنورد في الملحق ٢. أما تلك القوة التي تضغط بها أنت على الحاجز فتسمى عادة قوة الجذب المركزي. وكلتا القوتين، الطرد المركزي والجذب المركزي، تتساويان في المقدار لكنهما تتضادان في الاتجاه. ويتعين عليك ألا تخلط بينهما؛ فقوة الطرد المركزي هي وحدها التي تؤثر عليك (لا نظيرتها الأخرى)، وقوة الجذب المركزي هي وحدها التي تؤثر على الحاجز (لا نظيرتها الأخرى).

وبعض الألعاب الدوارة في مدينة الألعاب يمكن أن تدور بسرعة خارقة لدرجة أنها تستطيع أن تخفض الأرض التي تقف أنت عليها دون أن تنزلق أنت لأسفل. فما الذي يمنعك من الانزلاق لأسفل؟

تأمل الأمر قليلًا. لو لم تكن تلك اللعبة الدوارة تدور مطلقًا، لجعلتْك قوة الجاذبية تنزلق لأسفل؛ وذلك لأن قوة الاحتكاك (المتجهة لأعلى) بينك وبين الحاجز لن تكون كبيرة بما يكفي لمعادلة قوة الجاذبية. في حين تزداد قوة الاحتكاك، عند انخفاض الأرضية، مع دوران اللعبة؛ وذلك لأنها تعتمد على قوة الطرد المركزي. وكلما تعاظمتْ قوة الطرد المركزي (مع انخفاض الأرضية) تعاظمت قوة الاحتكاك. ومن ثم، إذا دارت اللعبة بالسرعة الكافية، مع انخفاض الأرضية، تصير قوة الاحتكاك كافية لمعادلة قوة الجاذبية، مما يحول دونك ودون الانزلاق.

تكثر الطرق التي يمكن بها شرح الجاذبية الاصطناعية عمليًا. إليك واحدة منها تستطيع أن تجربها في بيتك، أو بالأحرى باحة بيتك الخلفية. اجلب حبلًا، واربط في نهايته عبوة طلاء فارغة بعد أن تملأها بالماء – نصيحتي أن تملأ نصفها فقط لأنك لو ملأتها بالكامل سيثقل وزنها بدرجة يصعب عليك تدويرها – ثم ادفع العبوة بكل قوتك كي تلف في حركة دائرية فوق رأسك. قد تحتاج لبعض التدريب كي تستطيع دفعها كي تدور بالسرعة المناسبة. عندما تفعل ذلك، ستلاحظ عدم انسكاب ولو قطرة ماء واحدة من العبوة. في فصلي، أجعل بعضًا من طلبتي ينفذون تلك الحيلة، فتضج القاعة بحماس الطلاب. وهذه التجربة البسيطة تفسر لنا لماذا تجعلك بعض الأنواع الماكرة من تلك اللعبة الدوارة تدور بالتدريج إلى أن تجد نفسك مقلوبًا رأسًا على عقب، ورغم ذلك لا تسقط على الأرض (لكنك بالطبع ولأسباب تتعلق بالأمان تكون مقيدًا بحزام إلى تلك اللعبة).

تلك القوة التي يضغط بها الميزان عليك تحدد وزنك الذي يُظهره الميزان على شاشته؛ هي قوة الجاذبية – لا انعدام الجاذبية – والتي تجعل رواد الفضاء منعدمي الوزن؛ وعندما تسقط التفاحة على الأرض تسقط الأرض كذلك على التفاحة. إن قوانين نيوتن بسيطة متسعة النطاق متعمقة ومناقضة للبداهة إلى حد واضح. كان السير إسحاق نيوتن عند صياغته لتلك القوانين يسبر أغوار كونٍ زاخر بالألغاز. ولقد استفدنا كثيرًا من قدرته على حل بعض تلك الألغاز وتمكيننا من رؤية العالم بطريقة جديدة جذريًا.

# الفصل الرابع

# عجائب ماصة الشرب

يتضمن أحد الشروح العملية المفضلة لديّ في الفصل عبوتَي طلاءٍ وبندقية. إذ أملأ إحداهما بالماء حتى حافتها ثم أغلق غطاءها بإحكام. ثم أعبئ الثانية دون أن أملأها تمامًا تاركًا بها شبرًا فارغًا أو نحوه تحت حافتها ثم أغلقها بإحكام هي الأخرى. وبعد أن أضع واحدة أمام الأخرى فوق إحدى الطاولات، أخطو نحو طاولة أخرى تبعد عنها بضع ياردات فوقها صندوق طويل من ورق مقوى أبيض اللون، واضح أنه يخفي أداة ما. ثم أرفع الصندوق فتظهر تحته بندقية مثبتة على حامل مصوبة إلى عبوتي الطلاء. هنا تتسع أعين الطلبة ويتساءلون: هل سيطلق النار حقًّا داخل قاعة الدرس؟

أسألهم حينها: «ماذا سيحدث إذا أطلقنا رصاصة لتخترق هاتين العبوتين؟» لكني لا أنتظر إجابة، وإنما أنحني لأفحص مرمى البندقية عادة بأن أعبث بترباسها قليلًا، وهو الأمر الذي يساعد على تعظيم ترقبهم، ثم أنفخ بعض الغبار عن خزنة الرصاص، وأدس بها رصاصة، ثم أعلن بصوت عال: «ها هي الرصاصة، هل أنتم مستعدون لهذا؟» ثم أشرع في العد وأنا واقف جوار البندقية وإصبعي على الزناد: «ثلاثة، اثنان، واحد» ثم أطلق الرصاصة. حينها يطير أحد غطائَي العلبتين منفتحًا بينما يظل الآخر على حاله. أيهما تظن أنه انفتح؟

لتعرف الإجابة عليك أولًا أن تعرف أن الهواء قابل للانضغاط، على عكس الماء؛ فجزيئات الهواء تنضغط متقاربة إحداها من الأخرى، كما هو الحال في أي غاز آخر، لكن جزيئات الماء على النقيض من هذا، مثلها مثل أي سائل آخر لا يمكنها ذلك. والآن حين تخترق الرصاصة علبة الطلاء يصاحبها قدر كبير من الضغط. في تلك العبوة التي بها هواء، يعمل ذلك الهواء عمل وسادة أو ماصٍّ للصدمات، فلا يتعرض الماء للضغط ولا تنفجر العبوة. لكن في نظيرتها المملؤة بالماء لا يستطيع الماء الانضغاط فيشكل قدرًا كبيرًا من الضغط على جدران العبوة وقمّتِها؛ مما يجعل قمتها تنفجر. ولك

أن تتخيل درجة الإثارة ومقدار الصدمة التي يشعر بها طلبتي.

## ضغط الهواء يحيط بنا

دائمًا ما أجد الكثير من المتعة في صفوفي الدراسية عند استخدام الضغط، وضغط الهواء على وجه الخصوص ينطوي على كثير من التسلية؛ وذلك لما ينطوي عليه من خواص تتناقض مع البداهة. حتى إننا لا ندرك أننا معرضون لضغط الهواء إلى أن نشرع بالفعل في التفتيش عنه، وعندها يغدو الأمر مذهلًا للغاية. ما إن ندرك وجود ضغط الهواء – ونبدأ في فهمه – حتى نصير نراه في كل مكان، من البالونات إلى البارومترات، إلى الكيفية التي تعمل بها ماصات الشرب، إلى مدى العمق الذي تستطيع السباحة فيه أو الغوص فيه داخل المحيط.

إن تلك الأشياء التي لا نراها ولم نكن ندركها مثل الجاذبية وضغط الهواء قد اتضح أنها من بين أكثر الظواهر إثارة للدهشة. يشبه الأمر بمزحةٍ عن سمكتين تسبحان معًا بسعادة في نهر ما، ثم تدير إحداهما وجهها ناحية الأخرى وعليه نظرة متشككة وتقول: «ما كل هذا الكلام المثار حديثًا عن الماء؟».

في حالتنا نحن البشر، لا نقدر أهمية وزن غلافنا الجوي غير المرئي وكثافته. إننا، في الحقيقة، نعيش في قاع محيط هواء شاسع يؤثر علينا بقدر كبيرٍ من الضغط في كل ثانية من كل يوم. لنفترض أنني رفعتُ يدي أمامي موجهًا راحتي لأعلى. والآن لنتخيل أنني وضعتُ على راحتي بشكل متوازن أنبوبًا طويلًا جدًّا مربع الشكل يبلغ عرضه سنتيمترًا واحدًا (في كل جانب بالطبع) ويصل طوله إلى قمة الغلاف الجوي، أي أكثر من مائة ميل. إن وزن الهواء في الأنبوب – بغض النظر عن وزن الأنبوب نفسه – سيقدر بنحو كيلوجرام واحد أو نحو ٢,٢ رطل.[١] وهذه إحدى طرق قياس ضغط الهواء: إذ يسمى كل ١,٠٣ كيلوجرام لكل سنتيمتر مربع من الضغط بالغلاف الجوي القياسي. (وربما تعرف قياسه على أنه ١٤,٧ رطل في كل بوصة مربعة).

تتمثل إحدى الطرق الأخرى لحساب ضغط الهواء – وأي أنواع أخرى من الضغط – في معادلة غاية في البساطة، لدرجة أنني عبرتُ عنها بالكلمات دون أن

(١) تذكروا أيها العلماء أنني أستخدم لغة العوام لا اللغة التقنية. ورغم أن الكيلوجرام هو في الواقع وحدة كتلة لا وحدة وزن فإنه يُستخدم عادة للتعبير عن كليهما، وذلك ما أفعله في هذا الكتاب.

أفصح عن أنها معادلة. الضغط يساوي القوة مقسومة على المساحة: $P=F/A$. وهكذا فإن ضغط الهواء عند مستوى سطح البحر يساوي نحو كيلوجرام واحد لكل سنتيمتر مربع. إليك وسيلة أخرى لتصوير العلاقة بين القوة والضغط والمساحة.

لنفترض أنك تتزلج على بحيرة متجمدة، ثم تكسّر الجليد تحت أحدهم فسقط في الماء. كيف لك أن تقترب من تلك الحفرة، هل ستخطو نحوها سائرًا على الجليد؟ لا، ما ستفعله هو أنك ستزحف على بطنك ببطء بمقدار ٢,٥٤ سنتيمتر للأمام في كل زحفة موزعًا قوة جسدك على مساحة أكثر اتساعًا، ومن ثم فإنك تسلط ضغطًا أقل على الجليد مما يجعله أقل عرضة للانهيار. وكم هو من المدهش ذلك الفارق بين الضغط الذي يسلطه جسدك على الجليد وقوفًا مقابله رقودًا.

لنفترض أنك تزن نحو ٧٠ كيلوجرامًا، وأنك تقف على الجليد على ساقين منتصبتين. إذا كانت قدماك تفترشان مساحة سطحية تقدر بنحو ٥٠٠ سنتيمتر مربع (أي ٠,٠٥ متر مربع) فإنك تؤثر بضغطٍ قدره ٠,٠٥/٧٠ كيلوجرام على كل متر مربع، أو ١٤٠٠ كيلوجرام على كل متر مربع. وإذا رفعتَ إحدى قدميك ووقفتَ على الأخرى، فإنك بذلك قد ضاعفت الضغط إلى ٢٨٠٠ كيلوجرام على كل متر مربع. إذا كنتَ مثلي تبلغ ستة أقدام طولًا ثم رقدتَ على الجليد فما الذي يحدث حينها؟ ما يحدث هو أنك تَبسُط الكيلوجرامات السبعين على نحو ٨٠٠٠ سنتيمتر مربع أو نحو ٠,٨ متر مربع، ويسلط جسدك ضغطًا يقدر بـ ٨٧,٥ كيلوجرام فقط على كل متر مربع من الأرض، أي ما يقل بنحو اثنين وثلاثين مثل الضغط الذي يؤثر به جسدك وأنت واقف على قدم واحدة. وكلما اتسعت المنطقة قل الضغط الواقع عليها، والعكس بالعكس. ففي المسألة الكثير مما يناقض البداهة.

فمثلًا ليس للضغط اتجاه، ورغم هذا فإن القوة التي يسببها الضغط لها اتجاه؛ فهي تقع عمودية على السطح الذي يؤثر عليه الضغط. والآن فلتفرد يدك (رافعًا راحتك لأعلى) وفكر في القوة المؤثرة على يدك – لا أنابيب هذه المرة. إن مساحة يدي تبلغ نحو ١٥٠ سنتيمترًا مربعًا، ومن ثم، فلا بد أن قوةً تقدر بـ ١٥٠ كيلوجرامًا، أي بنحو ٣٣٠ رطلًا، تضغطها لأسفل. لكن لماذا إذن لا أجد صعوبة في رفعها بكل سهولة؟ إنني لستُ برافع أثقال. الواقع أنها لو كانت القوة الوحيدة المؤثرة لما استطاع أحد أن يرفع ذلك الوزن الواقع على يده. لكنها ليست القوة الوحيدة. فلأن الضغط الذي يسلطه الهواء يحيط بنا من جميع الجهات، فإن قوةً أخرى بمقدار ١٥٠ كيلوجرامًا تتجه لأعلى

تضغط على ظهر يدك. ومن ثم فإن صافي القوة الذي يقع على يدك مقداره صفر.

لكن لماذا لا تنسحق يدك تحت وطأة كل هذه القوة الضاغطة عليها؟ لا شك أن عظام يديك بالقوة الكافية لئلا تنسحق. فإذا نظرتَ إلى قطعة من الخشب بحجم يدك فإنك بكل تأكيد لن تجد الضغط الجوي يسحقها.

لكن ماذا عن صدري؟ فمساحة صدري تبلغ نحو ١٠٠٠ سنتيمتر مربع، ومن ثم فإن صافي القوة الضاغطة عليه بفعل ضغط الهواء تقدر بنحو ١٠٠٠ كيلوجرام أي طن متري. كما أن صافي القوة الضاغطة على ظهري تقدر أيضًا بنحو طن كامل. لماذا لا تنسحق رئتايَ؟ السبب في ذلك أن ضغط الهواء في رئتايَ هو أيضًا ١ ضغط جوي، ومن ثم، فليس هناك فارق في الضغط بين الهواء داخل رئتَيَّ والهواء الذي خارجها الذي يضغط على صدري لأسفل. ولذلك أستطيع التنفس بكل سهولة. للتوضيح، انظر إلى صندوق مصنوع من ورق مقوى أو من الخشب أو من المعدن، ذي أبعاد تماثل أبعاد صدرك. عندما ينغلق هذا الصندوق يصير الهواء داخله مساويًا للهواء الذي تتنفسه، فيساوي ١ ضغط جوي. والصندوق لا ينسحق لذات السبب الذي يحول دون انسحاق رئتَيك. ولا تنهار المنازل بفعل الضغط الجوي؛ لأن ضغط الهواء داخلها يماثل نظيره خارجها، وهو ما نسميه بتوازن الضغط. لكن الموقف سيختلف بالكلية إذا كان الضغط الجوي داخل الصندوق (أو المنزل) أقل بكثير من ١ ضغط جوي؛ حينها تزداد احتمالات تحطم الصندوق (أو انهيار المنزل) كما أُوضح في صف الدراسة. وسأستفيض في شرح هذا لاحقًا.

كوننا لا نلاحظ ضغط الهواء في المعتاد لا يعني أنه غير مهم. فدائمًا ما نشاهد توقعات حالة الطقس تشير إلى انخفاض أنظمة الضغط الجوي وعلوها. وكلنا نعلم أن علو نظام الضغط الجوي غالبًا ما سيصاحب صباحًا مشرقًا لطيفًا، وأن انخفاض نظام الضغط الجوي يعني أن ثمة عاصفة تقترب منا. ومن ثم فإن قياس ضغط الهواء أمر محبذ جدًّا لنا. لكن كيف لنا أن نفعل ذلك دون الشعور بالضغط؟ لعلك تعلم أننا نقيس الضغط الجوي باستخدام البارومتر، لكن هذا لا يفسر الكثير.

## سحر ممصات الشرب

لنبدأ بحيلة بسيطة لا بد أنك قمتَ بها عشرات المرات. إذا وضعتَ ماصة في

كأس ماء – أو في كأس مليء بعصير التوت البري كما أحب أن أفعل أنا في صفي – فستجدها تمتلئ بالعصير. فإذا سددتَ فتحتها العلوية بإصبعك ورفعتها عن الكأس فستجد العصير يظل فيها ولا يسقط؛ الأمر يشبه السحر. ما السبب في هذا؟ تفسير ذلك ليس بهذه البساطة.

كي نفسر ذلك، وهو الأمر الذي سيساعدنا على فهم آلية عمل البارومتر، لا بد لنا أن نفهم آلية عمل الضغط في السوائل. يسمى ذلك الضغط الذي يسببه السائل وحده الضغط الهيدروستاتيكي (كلمة الهيدروستاتيكا «Hydrostatic» مشتقة من كلمة لاتينية تعني «سائل ساكن»). لاحظ أن إجمالي الضغط الموجود تحت سطح سائل ما – كمحيط مثلًا – هو مجموع الضغط الجوي الموجود فوق سطح الماء (تمامًا كما كان الحال مع يدك المفرودة) والضغط الهيدروستاتيكي. إليك هذا المبدأ الأساسي: في أي سائل ساكن، يتساوى الضغط على المستويات المتساوية. وبناءً عليه، يتساوى الضغط في كل مكان من المستويات المستعرضة.

ومن ثم، إذا كنتَ في حوض سباحة، وغمرتَ يدك بعمق متر واحد تحت سطح الماء عند الجزء الضحل من حوض السباحة، فسيصير إجمالي الضغط الواقع على يدك، والذي هو مجموع الضغط الجوي (١ ضغط جوي) والضغط الهيدروستاتيكي، متطابقًا تمامًا مع الضغط الواقع على يد صديقك الذي يغمر يده تحت سطح الماء بمتر واحد أيضًا ولكن في الجزء العميق من حوض السباحة. لكنك إذا غمرتَ يدك لعمق أكبر، لنقل مترين، تحت سطح الماء، فسوف تتعرض لضغط هيدروستاتيكي مضاعف. فكلما زاد قدر السائل الموجود فوق مستوى معين، تعاظم الضغط الهيدروستاتيكي في ذلك المستوى.

وبالمناسبة، ينطبق المبدأ ذاته على ضغط الهواء أيضًا. فأحيانًا ما نرى غلافنا الجوي مثل محيط من الهواء، وفي قاع ذلك المحيط، فوق الجانب الأعظم من سطح الأرض، يقدر الضغط الجوي بنحو ١ ضغط جوي. لكن إذا صعدنا إلى قمة جبل شاهق فسنجد الهواء أقل، ومن ثم سينخفض الضغط الجوي. فعلى قمة جبل إيفرست يبلغ الضغط الجوي نحو ثلث ضغط جوي واحد.

لكن لو لسبب ما لم يكن الضغط متساويًا على طول سطح مستو، فحينها سيتدفق السائل إلى أن يتعادل الضغط في طول السطح المستوي بأكمله. مرة أخرى تَصدُق هذه القاعدة على الهواء أيضًا، ونعرف نحن هذا التأثير باسم الرياح – فهي تنتج عن تحرك

الهواء من ضغط عالٍ إلى ضغط منخفض حتى تختفي هذه الفروقات، ولا تتوقف الرياح إلا حين يتعادل الضغط.

ماذا يحدث مع ماصة الشرب إذن؟ عندما تضع الماصة داخل الشراب – بينما لا تزال فوهتها العليا مفتوحة – يدخل السائل إلى الماصة حتى يصل سطحه إلى ذات المستوى الذي يصله السائل داخل الكأس وخارج الماصة؛ ويكون الضغط في السطحين كليهما متساويًا: ١ ضغط جوي.

والآن تصور أنني مصصت السائل عن طريق الماصة. حينها سوف أسحب منها بعض الهواء وهو الأمر الذي يخفض ضغط عمود الهواء الذي يعلو السائل داخل الماصة. إذا ظل السائل داخل الماصة في مكانه فسيقل الضغط على سطحه عن ١ ضغط جوي؛ وذلك لأن ضغط الهواء فوق السائل قد انخفض. ومن ثم فإن الضغط في السطحين، داخل الماصة وخارجها، اللذين هما على ذات المستوى (في ذات المستوى الأفقي) سيتباين، وهو الأمر الذي لا يمكن أن يكون. ومن ثم فإن السائل يرتفع داخل الماصة إلى نفس مستوى سطحه خارج الماصة، حتى يصير ١ ضغط جوي. وإذا كان مع امتصاص الشراب ينخفض الضغط في الماصة بنسبة ١ بالمائة (أي من ١,٠٠ ضغط جوي إلى ٠,٩٩ ضغط جوي)، فإن هذا الشراب أيًّا كان – ماء كان أو عصير توت أو عصير ليمون أو جعة أو نبيذًا – سيرتفع لنحو ١٠ سنتيمترات. كيف عرفتُ أنا ذلك؟

لا بد أن يرتفع السائل كي يعوض ذلك النقص في ضغط الهواء البالغ ٠,٠١ ضغط جوي فوق السائل الموجود في الماصة. ومن معادلة حساب الضغط الهيدروستاتيكي في السوائل، والتي لن أتطرق إليها هنا، عرفتُ أن الضغط الهيدروستاتيكي لـ ٠,٠١ ضغط جوي للماء (أو أي سائل غيره في نفس كثافته) يسببه عمود من ١٠ سنتيمترات.

إذا كان طول ماصة الشرب الذي تشرب منها ٢٠ سنتيمترًا، فسيكون عليك أن تمتص بقوة كافية لخفض ضغط الهواء إلى ٠,٩٨ ضغط جوي كي يرتفع الشراب إلى عشرين سنتيمترًا ويصل إلى فمك. تذكر هذا فسوف تدرك أهميته في وقت لاحق. الآن بعد أن صرتَ تعرف كل شيء عن انعدام الوزن في المكوكات الفضائية (كما ذكرنا في الفصل الثالث) وعن طريقة عمل ماصة الشرب (في هذا الفصل)، إليك هذه المشكلة الجديرة بالاهتمام: كرة من العصير تطفو داخل مكوك فضائي، في المكوك الفضائي لا يلزم وجود كأس لتناول العصير وذلك لأن العصير لا وزن له. فإذا ما أولج رائد فضاء

ما ماصة داخل كرة عصير وشرع يمتص السائل، فهل سيتمكن من شرب العصير بهذه الطريقة؟ قد تفترض أن ضغط الهواء في المكوك الفضائي قدره نحو ١ ضغط جوي.

والآن لنرجع إلى الماصة التي سددتَ فوهتها العليا بإصبعك. إذا رفعتَها ببطء بمقدار خمسة سنتيمترات أو ما نحو بوصتين فلن يفلتَ العصير منها ما دامت الماصة داخل السائل؛ بل سيظل العصير في ذات المستوى (تقريبًا لا بالضبط) الذي كان عليه من قبل. يمكنك أن تختبر هذا بأن تضع علامة على جانب الماصة عند المستوى الذي عليه العصير قبل أن ترفعها. حينها سوف يرتفع سطح العصير داخل الماصة بقدر نحو خمسة سنتيمترات فوق سطح العصير في الكأس.

لكن مع التسليم بالحقيقة الراسخة التي أوردناها آنفًا، والتي تفيد بتساوي ضغط السائل خارج الماصة وداخلها – عند نفس المستوى – فكيف لذلك أن يتأتى؟ ألا ينتهك ذلك القاعدة؟ كلا، لا يفعل. فالطبيعة حاذقة للغاية؛ إذ إن الهواء الذي يحبسه إصبعك داخل الماصة سيزيد من حجمه بالقدر الكافي لجعل الضغط ينخفض بالقدر ذاته (نحو ٠,٠٠٥ ضغط جوي) مما يجعل الضغط في السائل داخل الماصة الموجود عند نفس مستوى سطح السائل في الكأس متساويًا، أي مقداره ١ ضغط جوي. وذلك هو السبب في أن العصير لن يرتفع لخمسة سنتيمترات بالضبط وإنما لارتفاع أقل من ذلك بقليل، أي قد يقل عنه بقدر مليمتر واحد، وهو القدر الكافي لمنح الهواء الحجم الإضافي اللازم لخفض ضغطه للقدر المطلوب.

هل لك أن تخمن إلى أي حد سيرتفع الماء (عند مستوى سطح البحر) في داخل أنبوب عندما تغلق فوهته وترفعه ببطء إلى أعلى؟ يتوقف ذلك على قدر الهواء الذي كان محتبسًا داخل الأنبوب عندما شرعت ترفعه. إذا كان في الماصة مقدارٌ قليل جدًّا من الهواء، أو لم يكن فيها هواء على الإطلاق (وهذا أفضل) فسيصير الحد الأقصى لارتفاع الماء نحو ٣٤ قدمًا، أي ما يزيد قليلًا عن عشرة أمتار. لا يمكنك بالطبع أن تنجز هذا باستخدام كأس صغير، وإنما قد تحتاج إلى دلو مملوء بالماء. هل فاجأك هذا؟ أما الشيء الأكثر إثارة للحيرة، فهو أن شكل الأنبوب لا يهم. تستطيع أن تجعل الأنبوب ينحني أو تديره بشكل حلزوني، وسيظل الماء قادرًا على الارتفاع بشكل عمودي إلى ٣٤ قدمًا؛ وذلك لأن تلك الأقدام الأربعة والثلاثين من الماء تنتج ضغطًا هيدروستاتيكيًا قدره ١ ضغط جوي.

إذا عرفنا أنه كلما انخفض الضغط الجوي، انخفض الحد الأقصى الذي يمكن أن يبلغه عمود الماء، فإن هذا يمنحنا طريقة لقياس الضغط الجوي. ولكي نرى ذلك يمكننا أن نمضي بالسيارة إلى قمة جبل واشنطن (يبلغ ارتفاعها ٦٣٠٠ قدم)، حيث يبلغ الضغط الجوي نحو ٠,٨٢ ضغط جوي، وهو ما يعني أن الضغط الواقع على السطح خارج الأنبوب لا بد أن يكون أيضًا ٠,٨٢. وهكذا فإنني عندما أقيس الضغط في الماء داخل الأنبوب مقارنة بمثيله خارج الأنبوب فلا بد أنني سأجده كذلك يساوي ٠,٨٢ ضغط جوي، ومن ثم فإن الحد الأقصى لارتفاع الماء داخل الأنبوب سيكون أقل من ذلك. سيساوي الحد الأقصى لارتفاع الماء ٠,٨٢ مضروبًا في ٣٤ أي نحو ٢٨ قدمًا.

بقياس ارتفاع العمود باستخدام عصير التوت البري عن طريق وضع علامات دالة على الأمتار والسنتيمترات على الأنبوب نكون حينها قد صنعنا بارومترًا من عصير التوت البري، يشير إلى التغيرات الحادثة في الضغط الجوي. يقال إن العالم الفرنسي بليز باسكال قد صنع بارومترًا مستخدمًا النبيذ الأحمر، وهو الأمر المتوقع من رجل فرنسي. أما الرجل الذي ينسب له اختراع البارومتر في منتصف القرن السابع عشر فهو الإيطالي إيفانجلستا تورشيللي، الذي عمل لفترة قصيرة مساعدًا لجاليليو، فقد استقر رأيه على استخدام الزئبق في البارومتر. وذلك لأن السوائل الأكثر كثافة تولد في أي عمود المزيد من الضغط الهيدروستاتيكي، مما يجعل مستوى ارتفاعها في الأنبوب أقل مقارنةً بالسوائل الأقل كثافة. ولأن كثافة الزئبق تفوق كثافة الماء ١٣,٦ مرة، فقد جعل الزئبق طول الأنبوب مناسبًا بدرجة أكبر. لا يتغير الضغط الهيدروستاتيكي لعمود من الماء يبلغ طوله ٣٤ قدمًا (والذي قدره ١ ضغط جوي)، حيث نقسم ٣٤ قدمًا على ١٣,٦، فنحصل على قدمين ونصف القدم من الزئبق (أي ستة وسبعين سنتيمترًا).

لم يكن تورشيللي يهدف في بادئ الأمر من آلته تلك إلى قياس الضغط الجوي، وإنما كان يحاول اكتشاف الحد الأقصى الذي تستطيع المضخات الماصة رفع عمود الماء إليه – وهو الأمر الذي يمثل مشكلة كبيرة في مجال الري. فقد صب الزئبق في الفوهة العلوية لأنبوب زجاجي يبلغ طوله مترًا واحدًا وقاعه مغلق. ثم قام بإغلاق حافته العلوية بإبهامه وقلبَه رأسًا على عقب، غامرًا فوهته في صحن مجوف به زئبق قبل أن يزيح إصبعه عن الفوهة. عندما فعل ذلك تسرب بعض الزئبق الذي في الأنبوب إلى الصحن لكن عمود الزئبق الذي بقي في الأنبوب بلغ ستةً وسبعين سنتيمترًا ارتفاعًا. زعم هو أن تلك المساحة الخاوية التي ظلت في قمة الأنبوب هي فراغ وهو واحد من

أوائل الفراغات التي أنتجت في المعامل. كان يعلم أن كثافة الزئبق تبلغ ١٣,٦ ضعفًا لكثافة الماء، ومن ثم، فإنه استطاع حساب الطول الأقصى لعمود الماء – وهو الأمر الذي كان همه الأول في الأساس – فوجده ٣٤ قدمًا. وفي أثناء عمله ذلك لاحظ ملاحظة جانبية مفادها أن مستوى السائل يرتفع وينخفض بمرور الوقت، وتكوّن لديه اعتقاد بأن هذه التغيرات تُعزى إلى الضغط الجوي. وتلك عبقرية فذة. كما أن هذه التجربة تفسر السبب في وجود فراغ إضافي صغير أعلى البارومترات الزئبقية.

## الضغط تحت الماء

بتحديده للطول الأقصى لعمود الماء، توصل تورشيللي أيضًا إلى أمر ما قد يكون دار بخلدك وأنت تحاول لمح سمكة تسبح في المحيط. إنني أخمن أنك أيها القارئ لا بد أنك مارستَ السباحة عن طريق أنبوب التنفس. أنابيب التنفس لا تتجاوز القدم الواحد طولًا؛ وإنني متأكد من أنك كنتَ ترغب في الغوص لأعماق أكبر وتمنيتَ لو أن تلك الأنابيب كانت أكثر طولًا. فإلى أي عمق تظن نفسك قادرًا على الغوص مع استمرار عمل مُعدّة التنفس؟ خمسة أقدام؟ عشرة أقدام؟ عشرين قدمًا؟

يروق لي أن أجد الإجابة عن هذا السؤال في صف الدراسة عن طريق أداة بسيطة تسمى المانومتر، وهي أداة معملية شائعة الاستخدام. إنها من البساطة أن المرء يستطيع صناعتها في المنزل على النحو الذي سأصفه بعد قليل. إنني أهدف من ذلك إلى معرفة مدى العمق الذي أستطيع الغوص إليه دون التوقف عن استنشاق الهواء إلى داخل رئتيَّ. ولتحديد ذلك عليَّ أن أقيس الضغط الهيدروستاتيكي للماء، الذي يضغط على صدري، وهو الضغط الذي يزداد قوةً كلما غصتُ إلى عمق أكبر.

ذلك الضغط الذي يحيطنا والذي – كما تذكر – يتساوى في المستويات المتعادلة، هو مجموع الضغط الجوي والضغط الهيدروستاتيكي. إذا سبح المرء تحت سطح البحر فسيتنفس هواء من الخارج، ولهذا الهواء ضغط جوي يبلغ مقياسه ١ ضغط جوي. ومن ثم، فإنني عندما أستنشق الهواء من خلال مُعدّة السباحة يصير ضغط الهواء في رئتَيّ ١ ضغط جوي كذلك. لكن الضغط الواقع على صدري يساوي مجموع الضغطين الجوي والهيدروستاتيكي. وهكذا يزيد الضغط الواقع على صدري عن الضغط داخل رئتَيّ ويصير الفارق بينهما هو الضغط الهيدروستاتيكي. لا يمثل ذلك أي مشكلة عند الزفير،

لكن المرء يحتاج لأن يوسع صدره عند الشهيق، وإذا زاد الضغط الهيدروستاتيكي زيادة كبيرة ناتجة عن الغوص إلى أعماق أبعد فلن يجد المرء في نفسه القوة العضلية القادرة على تجاوز هذا الفارق في الضغط، ولن يستطيع استنشاق المزيد من الهواء. فإذا أراد المرء الغوص إلى أعماق أكبر، فعليه أن يستنشق هواء مضغوطًا للتغلب على الضغط الهيدروستاتيكي. لكن الهواء المضغوط ضغطًا شديدًا مرهق جدًّا لأجسادنا، وهو السبب الذي لأجله قد وضعتْ حدودٌ زمنية للغطس.

والآن، لنعد إلى السباحة باستخدام أنابيب التنفس، إلى أي مدى يستطيع المرء أن يتوغل في الماء؟ لتحديد ذلك أعلق مانومترًا على أحد حوائط قاعة الدرس. تخيل أنبوبًا بلاستيكيًّا شفافًا يبلغ طوله أربعة أمتار، أثبتُ إحدى نهايتيه إلى الجزء العلوي الأيسر من الجدار، ثم أثبتُ النهاية الأخرى إلى جواره، ليصبح الأنبوب على شكل حرف U. يبلغ كلٌّ من ذراعي حرف الـ U المترين طولًا. ثم أصب في الأنبوب قدرًا من عصير التوت البري، يصل طول العمود منه إلى مترين، فأجده يستقر عند ذات المستوى في طرفي الأنبوب كليهما. وعندما أنفخ في الطرف الأيمن من الأنبوب أدفع عصير التوت نحو حافته اليسرى. وتلك المسافة العمودية التي أتمكن من دفع العصير إليها سوف تنبئني بأقصى عمق أستطيع الغوص إليه باستخدام مُعدّات التنفس. لماذا؟ لأن ذلك يعتبر مقياسًا لقدر الضغط الذي تستطيع رئتاي أن تشكلانه للتغلب على ضغط الماء الهيدروستاتيكي – لأجل هذا المثال جعلنا الماء وعصير التوت البري متعادلين – لكننا استخدمنا هنا عصير التوت البري كي يراه التلاميذ بسهولة.

ما أفعله هو أنني أنحني وأزفر مفرغًا رئتاي، ثم أستنشق بعمق مالئًا إياهما، ثم أضع نهاية الأنبوب اليمنى في فمي وأنفخ بأقصى ما أستطيع من قوة. تغور وجناتي وتجحظ عيناي، ويرتفع مستوى العصير نحو الحافة اليسرى لعدد من البوصات، بالكاد يرتفع – هل تستطيع أن تخمنه؟ – ٥٠ سنتيمترًا. يتطلب الأمر مني كل ما لديَّ من قوة كي أرفع مستوى العصير إلى هذا الحد، لكنني لا أستطيع تثبيته عند هذا المستوى لأكثر من ثوانٍ معدودة. هكذا دفعتُ العصير إلى أعلى لمسافة ٥٠ سنتيمترًا في الطرف الأيسر، وهو ما يعني أنني دفعته إلى أسفل لمسافة ٥٠ سنتيمترًا في الجهة اليمنى – أي إن إجمالي إزاحة عمود العصير الذي أحدثتُه بلغ ١٠٠ سنتيمترٍ في اتجاه عمودي، أو مترًا كاملًا (٣٩ بوصة). عندما نسبح باستخدام مُعدّات التنفس، نستنشق الهواء عن طريق الأنبوب، ولا نزفره من خلاله. لذا فربما كان استنشاق الهواء أكثر سهولة، أليس

كذلك؟ لذا أعيد التجربة مرة أخرى، لكن هذه المرة أقوم بامتصاص العصير بأقصى قوتي. لكنني أجد النتيجة ذاتها تقريبًا، إذ إنها لا ترتفع إلا إلى نحو ٥٠ سنتيمترًا في الجانب الذي أمتص منه – ومن ثم، فإنه ينخفض إلى ٥٠ سنتيمترًا في الجانب الآخر، وأصير أنا مجهدًا أيما إجهاد.

لقد حاكيتُ للتو تجربة السباحة على عمق متر واحد من سطح الماء، أي ما يعادل عُشر ضغط جوي واحد. عادة ما يندهش طلابي جميعًا من هذه التجربة، ويظنون أنهم قادرون على أن يُبلوا فيها على نحو أفضل من أستاذهم المسن. لذا أدعو فتًى قويًّا ضخم البنية كي يحاول بنفسه، وبعد أن يبذل قصارى جهده يحتقن وجهه ويصاب بصدمة. وهكذا، لم يُبلِ في ذلك أفضل مني إلا بقدرٍ يسير — بفارق لا يتعدى بضعة سنتيمترات.

اتضح أن هذا يبلغ تقريبًا الحد الأقصى للعمق الذي يمكننا أن نصل إليه ونحن نتنفس عبر الأنبوب – متر واحد فقط بصعوبة (نحو ٣ أقدام). ولا نستطيع أن نبقى في هذا العمق إلا لثوانٍ معدودة. ولذلك فإن معظم أنابيب التنفس يقل طولها عن متر واحد وعادة ما تبلغ قدمًا واحدًا. جرب أن تصنع أنبوب تنفس أطول من متر واحد بنفسك – تستطيع فعل ذلك باستخدام أي نوع من أنواع المواد – وانظر ماذا يحدث.

قد تتساءل عن مقدار القوة المؤثرة على صدرك عندما تغوص بغرض السباحة تحت الماء. على عمق متر واحد تحت سطح البحر يبلغ الضغط الهيدروستاتيكي جزءًا من عشرة أجزاء من الضغط الجوي، أو يمكننا أن نقول: جزء من عشرة أجزاء من الكيلوجرام في السنتيمتر المربع. تبلغ مساحة سطح صدرك نحو قدم مربع واحد، أي نحو ١٠٠٠ سنتيمتر مربع. ومن ثم فإن القوة المؤثرة على صدرك ستبلغ نحو ١١٠٠ كيلوجرام، أما القوة الواقعة على الجدران الداخلية لصدرك والتي يسببها الضغط الجوي الموجود في رئتيك فتبلغ نحو ١٠٠٠ كيلوجرام. ومن ثم فإن ذلك الجزء من عشرة أجزاء الذي هو الفارق في الضغط يترجم إلى فارق في القوة يبلغ ١٠٠ كيلوجرام، أو نحو ٢٠٠ رطل. عندما تنظر إلى السباحة تحت الماء باستخدام معدّات التنفس من هذا المنظور ستجدها أكثر صعوبة بكثير، أليس كذلك؟ وإذا غصتَ إلى عمق ١٠ أمتار فسيبلغ الضغط الهيدروستاتيكي ١ ضغط جوي كامل، أي كيلوجرامًا واحدًا لكل سنتيمتر مربع من سطح صدرك، وستبلغ القوة المؤثرة على صدرك المسكين نحو ١٠٠٠ كيلوجرام (١ طن) وهي أعلى من القوة الخارجية التي ينتجها الضغط في رئتيك، والذي يبلغ ١ ضغط جوي.

ولذلك فإن غواصي اللؤلؤ الآسيويون – الذين يغوص بعضهم بشكل روتيني لعمق ثلاثين مترًا — يخاطرون في الواقع بحياتهم. فلأنهم لا يستطيعون الغوص باستخدام معدات التنفس، يتعين عليهم حبس أنفاسهم، الأمر الذي لا يمكن أن يواصلوه إلا لدقائق قليلة، لذا فهم مضطرون لإنجاز مهمتهم على عجل.

الآن فقط تستطيع أن تقدر تلك العبقرية الهندسية للغواصة. افترض أن الغواصة تغوص إلى عمق عشرة أمتار، وكان ضغط الهواء فيها يساوي ١ ضغط جوي، هنا يبلغ الضغط الهيدروستاتيكي (والذي هو الفارق بين الضغط داخل الغواصة وخارجها) نحو ١٠٠٠٠ كيلوجرام في المتر المربع، أي نحو عشرة أطنان في المتر المربع الواحد، وهكذا ترى أنه حتى الغواصات بالغة الصغر التي لا تستطيع الغوص إلا إلى عشرة أمتار فقط لا بد أن تكون قوية جدًّا.

هذا هو السبب في أن ما حققه مخترع الغواصة في أوائل القرن السابع عشر — كورنيلس فان دريبل، الذي أفخر بكونه هولنديًّا مثلي – يعد إنجازًا خارقًا. لم يستطع وقتها أن يجعلها تحتمل الغوص إلى أكثر من خمسة أمتار تحت سطح البحر، لكن حتى مع هذا كان عليه أن يتحدى ضغطًا هيدروستاتيكيًّا يبلغ نصف ضغط جوي، وقد بنى غواصته من الجلود والأخشاب. وتَذكرُ مرويات من ذلك الزمن أنه نجح في التغلب على هذا الضغط بواحدة من النماذج التي شيدها في إحدى المحاولات التي أجراها في نهر التايمز بإنجلترا. قيل إن ذلك النموذج الذي استلزم ستة من الرجال المجدفين لكي يحركوه، كان قادرًا على حمل ستة عشر راكبًا، وكان قادرًا كذلك على البقاء في الماء لعدة ساعات. وقد استُخدمتْ عوامات لحمل أنابيب التنفس فوق سطح الماء بالكاد. كان هدف المخترع إبهار الملك جيمس، وحثه على إصدار أمرٍ ببناء عدد من تلك الغواصات لصالح سلاحه البحري؛ لكن الملك، مع الأسف، لم ينبهر، لا هو ولا قادته البحريون بالقدر الكافي، ولم يستعينوا بذلك النموذج في القتال. فغواصة فان دريبل لم تكن عبقرية من ناحية كونها سلاحًا سريًّا، لكنها كانت عملًا فذًّا من الناحية الهندسية. يمكنك أن تطلع على المزيد بشأن فان دريبل وبشأن الأجيال الأولى من الغواصات عبر هذا الموقع الإلكتروني:

.www.dutchsubmarines.com/specials/special_drebbel.htm

إن العمق الأقصى الذي يمكن أن تغوص إليه غواصات سلاح البحرية الحديثة لهو سر حربي، لكن الأغلب أنها تستطيع الغوص حتى عمق ١٠٠٠ متر (٣٣٠٠

قدم)، حيث يبلغ الضغط الهيدروستاتيكي نحو ١٠٠ ضغط جوي، أي مليون كيلوجرام (١٠٠٠ طن) في المتر المربع الواحد. ولهذا فلا عجب في أن الغواصات الأمريكية مصنوعة من صلب عالي الجودة للغاية. أما الغواصات الروسية فقد قيل إنها تستطيع الغوص لأعماق أكبر لأنها مصنوعة من نوع أقوى من التيتانيوم.

من السهل إجراء شرحٍ عملي لما يمكن أن يحدث لغواصة إذا لم تكن جدرانها بالقوة الكافية، أو إذا ما غطستْ إلى أعماق أكبر مما تحتمل. لعمل هذا أصل مضخة تفريغ Vacuum Pump بعبوة طلاء سعتها جالون واحد، ثم أشرع في شفط الهواء منها ببطء. حينها لا بد أن يبلغ الفارق بين ضغط الهواء خارج العبوة وداخلها ١ ضغط جوي (لك أن تقارن بينه وبين فارق الضغط لدى الغواصة). نعلم جميعًا أن عبوات الطلاء تلك قوية، لكننا مع ذلك نراها تتداعى أمام أعيننا كما لو كانت عبوة مياه غازية هشة. تبدو وكأن عملاقًا خفيًا اعتصرها بقبضته. ولعلنا جميعًا فعلنا ذات الشيء يومًا مستخدمين قارورة مياه بلاستيكية بعد أن شفطنا قدرًا كبيرًا مما بها من هواء، مما جعلها تنسحق. وربما يُهيأ لك أن القارورة انسحقتْ بسبب القوة التي شفطتَ بها الهواء منها، ولكن السبب الحقيقي هو أنني عندما شفطتُ الهواء من عبوة الطلاء، وشفطتَ أنت الهواء من قارورة الماء لم يجد الضغط الخارجي ضغطًا آخر داخليًا يعادله. ذلك ما يستطيع ضغط غلافنا الجوي أن يفعله في أي لحظة، أي لحظة كانت.

قد يرى القارئ عبوة الطلاء المعدنية أو قارورة الماء البلاستيكية أمورًا عادية جدًّا، أليس كذلك؟ لكنه لو نظر إليها كما يفعل الفيزيائيون لرأى أمرًا مختلفًا بالكلية، لرأى توازنًا بين قوى شديدة التأثير. لولا توازن هذه القوى غير المرئية لما كان من المحتمل أن توجد حياة على الأرض، وهي قوى ناتجة عن الضغط الهيدروستاتيكي والضغط الجوي وقوة الجاذبية الخارقة. هي قوى بالغة الشدة، لدرجة أنها إذا اختل توازنها فقد ينتج عن ذلك كوارث. تخيل أن تسريبًا حدث في إحدى وصلات جسم طائرة تطير على ارتفاع ٣٥,٠٠٠ قدم (حيث الضغط الجوي لا يتعدى ما يقرب من ٠,٢٥ ضغط جوي)، والطائرة تتحرك بسرعة ٨٨٥,١٣ كيلومتر في الساعة. أو أن تصدعًا رفيعًا حدث في سقف نفق ميناء بالتيمور الذي يقع تحت سطح نهر باتابسكو بما يتراوح بين خمسين إلى مائة قدم.

جرب في المرة القادمة التي تذرع فيها شوارع مدينتك سيرًا أن تفكر كما يفعل الفيزيائيون. ماذا ترى حقيقة؟ في نظره، ما يراه نتاج لمعركة عاصفة تحتدم داخل كل

مبنى يقع بصرك عليه، ولا أعني هنا المعارك السياسية التي تدور بين جنبات المكاتب. على أحد جانبي تلك المعركة تجد قوةَ جاذبيةِ الأرض تجاهد لتجذب كل شيء إلى الأسفل، ولا أعني بكل شيء الجدران والأرضيات والأسقف فقط، وإنما معها طاولات المكاتب وأنابيب أجهزة التكييف ومساقط صناديق البريد والمصاعد وموظفو السكرتارية والمديرون التنفيذيون، بل وحتى أكواب القهوة الصباحية والكرواسون. لكن من الجهة الأخرى، نجد القوة الجمعية للصلب والخرسانة والأرض نفسها تكافح لدفع المبنى نحو السماء.

بناءً على ما سبق، لنا أن ننظر إلى المعمار والهندسة الإنشائية على أنها فنون لقتال قوة الجاذبية لأسفل. وقد يظن أحدهم أن ناطحات السحاب الشاهقة قد أفلتتْ من قوة الجاذبية. لكن الحقيقة أنها لم تفعل، وإنما هي قد صعدتْ بالمعركة حرفيًّا إلى ارتفاعات جديدة. لكنك لو تفكرتَ في الأمر قليلًا لوجدتَ هذه المعركة مؤقتة. فمواد البناء تتآكل وتضعف وتضمحل، بينما لا يفتر عزم قوى الطبيعة أبدًا. المسألة مجرد وقت.

هذه التوازنات هي أشد تهديدًا في المدن الكبرى. تأمل ذلك الحادث المروع الذي حدث في مدينة نيويورك عام ٢٠٠٧، فأنبوب عمره ثلاثة وثمانون عامًا؛ ويبلغ عرضه قدمين، يمر تحت أحد الشوارع، لم يتمكن من مواصلة احتواء البخار عالي الضغط الذي يحمله. وكانت نتيجة ذلك أنه انفجر مطلِقًا نافورة ماء ساخن عرضها ٢٠ قدمًا في جادة لكسنجتون مبتلعةً شاحنة جر، وقاذفة مياهها لتعلو فوق بناية كرايسلر القريبة ذات السبعة والسبعين طابقًا. هذه القوة القادرة على إحداث الدمار، لو لم تسيطر عليها توازناتٌ محكمة طوال الوقت تقريبًا، لما استطاع أحدنا أن يسير في طرقات أي مدينة من مدن العالم.

لكن هذه التوازنات الحادثة بين تلك القوى الخارقة ليست كلها نتاجًا لمنجزات الإنسان العظيمة. فلتتأمل الأشجار على سبيل المثال؛ هادئة صامتة ثابتة بطيئة النمو، لا تشتكي وهي توظف عشرات من الاستراتيجيات البيولوجية كي تجاهد قوة الجاذبية، وكذلك الضغط الهيدروستاتيكي. إنه لإنجاز عظيم لتلك الشجرة عندما تبرعم أغصانًا جديدة كل عام، وتضيف حلقات جديدة إلى جذعها مما يزيد من قوتها في الوقت ذاته الذي تتنامى فيه قوة الجذب بينها وبين الأرض. وتظل الشجرة أيضًا ترفع العصارة إلى أعلى وصولًا لأعلى أفرعها. أليس من المذهل أن هذه الأشجار قد يبلغ طولها ما يزيد عن عشرة أمتار؟ فالماء لا يستطيع أن يرتفع إلى أكثر من عشرة أمتار في ماصتِي ولا

يتعداها؛ فلماذا (وكيف) يرتفع الماء إلى أكثر من ذلك في الأشجار؟ فأطول أشجار السيكويا تبلغ نحو ٣٠٠ قدم وبطريقة ما تستطيع هذه الأشجار أن توصل الماء إلى أكثر أوراقها ارتفاعًا.

ولهذا السبب أحزن كثيرًا لأي شجرة كبيرة تكسرها العواصف. فالرياح العاتية والجليد والثلوج الكثيفة التي تراكمت على أغصانها قد نجحت في الإخلال بتوازن القوى التي كانت الشجرة تحافظ عليه. وعندما أفكر في هذه المعركة التي لا تنتهي، أجد نفسي ممتنًا لذلك اليوم في الزمن السحيق، يوم قرر أسلافنا أن يقفوا على ساقين بدلًا من أربع ويحرزوا هذا الفتح العظيم.

## برنولي وخلفاؤه

قد لا يكون من بين إنجازات الإنسان إنجازٌ أكثر روعةً يتحدى قوة الجاذبية الراسخة وقادر على التغلب على تقلبات الضغط الجوي؛ مثل الطائرات. كيف تطير الطائرة؟ لعلك سمعتَ من أحدهم أن ذلك له علاقة بمبدأ برنولي وبالهواء الذي يتدفق أسفل الأجنحة وفوقها. سمي هذا المبدأ باسم العالم الرياضي دانييل برنولي الذي نشر ما نسميه اليوم باسم معادلة برنولي في كتابه الهيدروديناميكا، الذي أصدره عام ١٧٣٨. لتبسيط المبدأ، عند تدفق السوائل والغازات، كلما زادت سرعة التدفق قل ضغطه. لعله أمر يصعب عليك استيعابه لكنك تستطيع أن تراه على الطبيعة.

فلترفع ورقة واحدة أمام فمك (لا تضعها داخل فمك)، ورقة من القياس العادي (إيه ٤)، واجعل حافتها القصيرة قرب فمك. ستجد الورقة تنثني لأسفل بفعل الجاذبية. والآن فلتنفخ بقوة في قمة الورقة وراقب ما يحدث. سترى الورقة ترتفع، وكلما ازدادت قوة نفخك ازداد تقافز الورقة لأعلى. وهذا شرح عملي لمبدأ برنولي؛ وتساعد هذه الظاهرة البسيطة كذلك في تفسير الكيفية التي تطير بها الطائرة. ورغم أن الكثيرين منا اعتادوا رؤية الطائرة البوينج ٧٤٧ وهي تقلع، أو جلسوا مقيدين بأحزمة الأمان في مقاعد الطائرة وهي تقلع، فلا تزال هذه التجربة بالغة الغرابة. ما عليك إلا أن ترى سعادة الأطفال عندما يرونها تقلع لأول مرة. إن الحمولة القصوى لطائرة من طراز بوينج ٧٤٧ – ٨ تبلغ نحو ٥٠٠ طن. كيف لها أن تظل في الهواء بالله عليك؟

إن جناح الطائرة مصمم بشكل يجعل الهواء الذي يمر فوقه يتحرك بسرعة تفوق

مثيله الذي يمر من أسفله. تنص معادلة برنولي على أنه كلما زادت سرعة الهواء الذي يمر فوق الجناح انخفض الضغط هناك، ومن ثم فإن الفارق بين انخفاض الضغط أعلى الجناح وارتفاعه أسفله هو ما يولّد قوة الرفع لأعلى. لنطلق على هذه القوة قوة برنولي للرفع. تزعم الكثير من كتب الفيزياء أن قوة برنولي مسؤولة مسؤولية كلية عن رفع الطائرات لأعلى، بل إن هذه الفكرة شائعة في كل مكان. لكنك لو تفكرتَ فيها لدقيقة أو اثنتين لأدركتَ أنها لا يمكن أن تصح. لأنها لو صحتْ فكيف للطائرات أن تحلق مقلوبة رأسًا على عقب؟

لذا، من المؤكد، أن مبدأ برنولي لا يمكن أن يكون وحده السبب وراء قوة الرفع، وإنما هناك ما يتضافر مع قوة برنولي للرفع، يسمى بقوة الرفع الارتدادية. يصفه بي. سي. جونسون بالتفصيل في مقاله الممتع بعنوان: «قوة الرفع الإيروديناميكية، وتأثير برنولي، وقوة الرفع الارتدادية» (http://mb-soft.com/public2/lift.html).

قوة الرفع الارتدادية (التي اشتُقتْ تسميتها من قانون نيوتن الثالث، الذي ينص على أنه لكل فعل رد فعل مساوٍ له في المقدار ومضادٌّ له في الاتجاه) تحدث عندما يتحرك الهواء الذي يمر أسفل جناح الطائرة بزاوية لأعلى. فذلك الهواء الذي يتحرك من مقدمة الطائرة إلى مؤخرتها تقوم أجنحة الطائرة بدفعه لأسفل. ذلك هو «الفعل» والذي لا بد أن يُقابل برد فعل مساوٍ له في المقدار، يتمثل في دفع الهواء للجناح متجهًا لأعلى، ومن ثم تتولد قوة رافعة للجناح. وفي حالة الطائرة البوينج ٧٤٧ (التي تحلق بسرعة ٨٨٥,١٣ كيلومتر في الساعة على ارتفاع نحو ٣٠,٠٠٠ قدم) ينتج ما يزيد عن نسبة الـ ٨٠ بالمائة من طاقة الرفع من طاقة الرفع الارتدادية، في حين ينتج ما يقل عن الـ ٢٠ بالمائة منها من قوة رفع برنولي.

يمكنك أن تبرهن على وجود قوة الرفع الارتدادية بنفسك وبكل سهولة متى سافرت مستقلًا سيارة. بل لعلك جربت الأمر في صغرك. بينما تتحرك السيارة افتح النافذة وأخرج ذراعك منها. ثبتْ ذراعك في اتجاه تحرك السيارة ثم قم بإمالة زاوية يدك بحيث يكون اتجاه أصابعك إلى أعلى. حينها ستشعر بقوة تدفع يدك لأعلى. تلك هي قوة الرفع الارتدادية.

قد تظن أنك تدرك الآن كيف تستطيع بعض الطائرات أن تحلق وهي مقلوبة. لكن هل تدرك كذلك أن الطائرة عندما تنقلب بزاوية مائة ثمانين درجة فإن كلًّا من قوة برنولي للرفع وقوة الرفع الارتدادية تتجهان لأسفل؟ تذكر أنه في الرحلات العادية

تكون قوة الرفع الارتدادية متجهةً لأعلى، وذلك لأن الأجنحة تكون مائلة بزاوية إلى أعلى، لكنها لو انقلبتْ مائة وثمانين درجة فستصير مائلة بزاوية لأسفل.

فلتجر التجربة مرة أخرى، إذا ظللتْ تُميل أصابعك لأعلى فستشعر بقوة رفع لأعلى، لكن حين تغير زاوية ميل أصابعك وتجعلها لأسفل فستشعر بذات القوة ولكنها متجهة لأسفل.

فكيف لها إذن أن تطير مقلوبة؟ لا بد من توفر قوة الرفع اللازمة لذلك، بشكل أو بآخر، من قوة رفع ارتدادية متجهة لأعلى وذلك لأنه ما من سبيل آخر ممكن. يتأتى ذلك عندما يرفع الطيار (وهو يحلق رأسًا على عقب) مقدمة الطائرة بشكل كاف لجعل الأجنحة تعود لتتجه بزاوية لأعلى. لكنها عملية صعبة جدًّا ومحفوفة بالمخاطر، ولا يقدر عليها سوى الطيارين المحنكين. كما أن الاعتماد على قوة الرفع الارتدادية بالكلية أمر محفوف بالخطر لأنها ليست على درجة كبيرة من الثبات. ولك أن تشعر بعدم الثبات ذلك عندما تخرج يدك من نافذة السيارة؛ فتجد يدك تضطرب وتهتز بعض الشيء. بل إن صعوبة التحكم في قوة الرفع الارتدادية تلك هي المسؤولة عن غالبية حوادث تحطم الطائرات خلال إقلاعها أو هبوطها. فذلك النزر اليسير من قوة الرفع الناتجة عن قوة الرفع الارتدادية يزداد خلال الإقلاع والهبوط عنه أثناء تحليق الطائرة على ارتفاعات معتادة. وهو السبب وراء شعور التأرجح أحيانًا خلال هبوط الطائرة.

## لص الشراب

لا تنفك ألغاز الضغط تثير حيرتنا. فلنرجع إلى فيزياء الشرب بالماصة. إليك هذه الأحجية الأخيرة لتفكر فيها، وهي أحجية ممتعة محفزة للعقل.

ذات مرة بينما كنت أقضي عطلة نهاية الأسبوع في المنزل خطر ببالي هذا الخاطر: «تُرى، ما هي أطول ماصة يمكنني أن أشرب بها؟». كلنا رأينا ماصات شرب فائقة الطول، عادة ما يكون بها التفافات والتواءات يحبها الأطفال.

وقد رأينا فيما سبق أننا لا نستطيع أن نمتص الشراب فنحركه إلا لمتر واحد على الأكثر – ولثوانٍ معدودات فقط – بمعنى: لا يمكن أن نرفع الشراب لمستوى أعلى من متر واحد (نحو ٣ أقدام). ولذلك فقد قررتُ أن أصنع لنفسي ماصة بلاستيكية رفيعة طولها متر واحد؛ لأرى إن كان ذلك سينجح. لا مشكلة في ذلك؛ فأنا قادر على

امتصاص العصير إلى أعلى بصورة مثالية. لذلك فقد قررتُ أن أقتطع أنبوبًا بلاستيكيًّا يبلغ ثلاثة أمتار طولًا – نحو عشرة أقدام – ثم أقف على مقعد داخل مطبخ منزلي وأضع دلوًا مملوءًا بالماء على الأرضية، ولا بد أنني سوف أستطيع أن أمتص ذلك الماء وأرفعه إلى ذلك العلو. يا للروعة. ثم فكرتُ في نفسي أنني لو كنتُ أقف في الطابق الثاني من مبنايَ ونظرتُ إلى أسفل فوجدتُ شخصًا يقف على أرضية مرتفعة ويحمل في يده كأسًا ضخمًا به عصير أو نبيذ أو ما شابههما – لنفترض أنه كأس ضخم مملوء بعصير التوت البري والفودكا – هل أستطيع أن أرتشف هذا الشراب خلسة إذا ما حملت ماصة طويلة جدًّا؟ قررت أن أكتشف ذلك بنفسي، وهو ما قادني إلى تقديم أحد الشروح العملية المفضلة لديّ في قاعة الدراسة. وهي تجربة لا تفتأ تُذهل طلابي.

ما أفعله هو أنني آتي بأنبوب بلاستيكي طويل ملتف حول نفسه وأطلب متطوعًا من الطلاب الجالسين في الصف الأول. ثم أضع دورقًا زجاجيًّا مملوءًا بعصير التوت البري – بلا فودكا – على أرضية قاعة الدرس كي يراه الطلاب جميعًا. أحمل الأنبوب البلاستيكي في يدي وأرتقي سلمًا متحركًا يرتفع ستة عشر قدمًا طولًا، أي نحو خمسة أمتار. مكتبة سُر مَن قرأ

أقول وأنا ألقي بإحدى نهايتي الأنبوب البلاستيكي للطالبة المتطوعة: «ها هي ماصتي». تلتقط هي نهاية الأنبوب وتضعها داخل الدورق وأنا أشعر بترقب الطلبة جميعًا. لا يصدقون أنني واقف على هذا العلو. تذكَّر أنهم كانوا شهودًا عليَّ عندما لم أستطع أن أحرك عصير التوت البري إلا لمتر واحد فقط أو نحو ثلاثة أقدام. الآن أنا واقف على ارتفاع قدره حوالي ١٦ قدمًا عن الأرض. كيف لي أن أفعل ذلك؟

أشرع في الامتصاص مع بعض النخير في البداية، بينما يرتفع العصير ببطء داخل الأنبوب: لمتر واحد أولًا، ثم لمترين، ثم لثلاثة. ثم ينخفض مستوى السائل قليلًا لكنه سرعان ما يستأنف الارتفاع ببطء شديد مرة أخرى إلى أن يصل لفمي. هنا يعلو صوتي متلمظًا: «مممم» فينفجر الطلاب في التصفيق. ما الذي جرى؟ كيف استطعتُ امتصاص العصير إلى هذا العلو؟

أصدُقك القول، لقد غششتُ في هذه التجربة. وليس هذا بالأمر المهم طالما ليس لهذه اللعبة أي قواعد. ما أفعله هو أنني عندما أعجز عن امتصاص أي هواء إضافي أسدُّ فوهة الأنبوب بلساني. بعبارة أخرى، أُغلق الأنبوب كما رأينا سابقًا، وهو الأمر الذي

يحافظ على العصير داخل الأنبوب. ثم أزفر وأشرع في الامتصاص مرة أخرى، وأكرر السيناريو عدة مرات. هنا يتحول فمي إلى ما يشبه صمام الأمان.

لكي أجعل العصير يرتفع إلى الستة عشر قدمًا تلك، لا بد لي أن أخفض ضغط الهواء داخل الأنبوب بنحو نصف ضغط جوي واحد. ولو كنتَ تتساءل فإن جوابي هو نعم، كان بإمكاني أن أستخدم ذات الحيلة مع مقياس الضغط، وكنتُ سأستطيع امتصاص عمود أطول من عصير التوت البري. هل يعني ذلك أنني أستطيع أن أسبح في أعماق أكبر تحت أسطح البحيرات أو البحار؟

ماذا تظن؟ راسلني لتطلعني على الإجابة.

مكتبة
t.me/soramnqraa

# الفصل الخامس

# كل شيء عن قوس قزح

كثير جدًّا من العجائب الصغيرة التي تزخر بها حياتنا اليومية – وهي أمور أحيانًا تكون مذهلة جدًّا – تمر دون أن نلاحظها غالبًا، وذلك مرده إلى أننا لم نتعلم جيدًا كيفية رؤيتها. أذكر أنني، ذات صباح منذ أربعة أو خمسة أعوام، بينما كنت أحتسي قهوتي الإسبرسو الصباحية جالسًا على مقعدي المفضل طراز ريتفيلت ذي اللونين الأحمر والأزرق، لفتَ انتباهي فجأةً شكل جميل، ألَّفتْه نقاطٌ ضوئية مستديرة، سُلطتْ على الجدار من بين الظلال المتراقصة التي تعكسها أوراق شجرة خارج النافذة. أبهجني مرأى هذه الأضواء المتراقصة، حتى إن عيناي قد برقتَا. لا أدري كيف لاحظتْ زوجتي سوزان، ولكنها بما تتمتع به من دهاء سألتني عما هناك.

أجبتها بسؤالٍ، وأنا أشير إلى دوائر الضوء: «أتعلمين ما هذا؟ أتدركين لماذا يحدث ذلك؟» ثم شرحتُ لها الأمر: قد تظنين أن الضوء لا بد وأنه سيسلط وميضًا على الجدار لا دوائر، أليس كذلك؟ لكن كل فرجة من الفرجات الصغيرة التي بين أوراق الأشجار تقوم مقام الغرفة المظلمة بالكاميرا ذات الثقب، وهي الكاميرا التي تعيد إنتاج صورة لمصدر الضوء، الذي هو الشمس في حالتنا هذه. مهما كانت الأشكال التي تتخذها الفرجات التي يَنفذ الضوء منها، فطالما أنها فتحات صغيرة نجد شكل مصدر الضوء نفسه يتجسد على الجدار.

لذلك، عند حدوث الكسوف الشمسي الجزئي، لا أجد ضوء الشمس النافذ عبر نافذتي يشكل دوائر كما هو معتاد وإنما أجد تلك الدوائر منقوصة بعض الشيء؛ لأن شكل الشمس قد اقتُطِع منه جزء. أدرك أرسطو ذلك منذ أكثر من ألفي عام. ولشدّ ما أسعدتني رؤية نقاط الضوء تلك في غرفة نومي، فهي تُظهر خواص الضوء المذهلة.

# أسرار قوس قزح

الحقيقة أن التأثيرات الرائعة لفيزياء الضوء موجودة أينما نظرنا، وأحيانًا نجدها في أكثر المشاهد الحياتية اعتيادية، وأحيانًا في أجمل المخلوقات الطبيعية. فلنتأمل أقواس قزح على سبيل المثال، إنها من الظواهر المدهشة العجيبة. من العلماء العظام – مثل ابن الهيثم العالم والرياضي المسلم المعروف بأبي البصريات الذي عاش في القرن الحادي عشر، وكذلك الفيلسوف والرياضي والفيزيائي الفرنسي رينيه ديكارت، بل والسير إسحاق نيوتن نفسه – مَن رآها ظاهرة آسرة وحاول تفسيرها. ورغم هذا أجد كثيرًا من معلمي الفيزياء يتجاهلونها في صفوفهم الدراسية، لا أكاد أصدق ذلك، بل إنه يرقى في نظري إلى درجة الإجرام.

لا أقصد بالطبع أن فيزياء قوس قزح أمر بسيط، ولكن ماذا لو كان معقدًا؟ كيف لنا أن نرفض تناول أمر يثير خيالنا أيما إثارة؟ كيف لنا ألا نرغب في سبر أغوار ذلك اللغز المتواري وراء ما في تلك المخلوقات البديعة من جمال داخلي؟ لطالما أحببتُ أن أحاضر عن أقواس قزح، وكنتُ دائمًا أقول لطلابي: «في نهاية هذه المحاضرة لن تعود حياةُ أي منكم كما كانت، أبدًا». وذات الأمر ينطبق عليك أيها القارئ.

يداوم بعضٌ من طلابي السابقين، وغيرهم ممن يشاهدون محاضراتي عبر الشبكة العنكبوتية، على إرسال صور لأقواس قزح وغيرها من الظواهر الجوية على مدى عشرات السنين عبر البريد العادي أو البريد الإلكتروني، مما جعلني أشعر كما لو أن لدي شبكة من مستكشفي أقواس قزح منتشرة عبر أرجاء العالم. بعض تلك الصور مذهلة – وخاصة تلك التي التقطتْ من شلالات نياجرا، والتي يظهر بها قدر كبير من رذاذ الماء الذي يجعل انحناءات القوس خلابة المنظر. لربما ترغب أنت كذلك في إرسال بعض الصور لي؛ على الرحب والسعة.

لا شك أنك شاهدتَ المئات أو العشرات على الأقل من أقواس قزح على مدى حياتك. وإن كنتَ قضيتَ بعض الوقت في فلوريدا أو هاواي أو في أي من المناطق الاستوائية، حيث يكثر هطول الأمطار الغزيرة والشمس ساطعة، فلا شك أنك قد شاهدتَ المزيد منها. وإذا كنتَ تروي حديقتك بخرطوم مياه أو عن طريق الرشاشات والشمس ساطعة، فالأرجح أنك ستشكل أقواس قزح.

الغالب الأعم منا قد «نظر» إلى الكثير من أقواس قزح، لكن القليلين منا «رأوا» تلك الأقواس. كانت تلك الأقواس تسمى في الميثولوجيا القديمة بأقواس الآلهة، وكانت تعتبر جسورًا أو طرقًا بين بيوت الفانين والآلهة. ومن أشهر الأساطير الغربية عن أقواس قزح، تلك التي في الكتاب العبري والتي تقول بأنها تمثل وعد الرب بألا يرسل طوفانًا إلى الأرض فيدمر كل ما عليها مرة أخرى، كما جاء فيه: «وضعت قوسي في السحاب».

مما يضفي على أقواس قزح سحرًا، أنها واسعةُ الامتداد وتنتشر بجلال وبشكل سريع الزوال عبر السماء بكاملها. لكن كما هو الحال عادة في الفيزياء، تقبع أصولها في أعداد كبيرة جدًّا من أشياء دقيقة بشكل استثنائي، ألا وهي كرات مائية صغيرة جدًّا، أحيانًا يبلغ قطر الواحدة منها أقل من ملليمتر واحد (١\٢٥ من البوصة الواحدة)، تسبح في السماء.

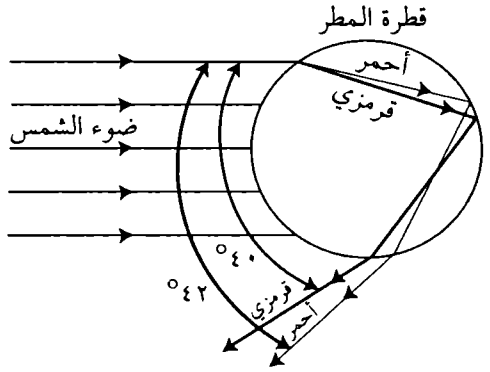
ورغم جهود العلماء على مدى ألف عام على الأقل في محاولة تفسير أصول أقواس قزح، كان إسحاق نيوتن هو الذي قدم أول تفسير مقنع للظاهرة؛ وكان هذا في كتابه «البصريات» الذي أصدره عام ١٧٠٤. أدرك نيوتن حقائق متعددة في وقت واحد وكلها أمور جوهرية في حدوث ظاهرة أقواس قزح. فقد برهن أولًا على أن الضوء الأبيض العادي مؤلَّفٌ من جميع الألوان (كنتُ سأقول «مؤلَّف من جميع ألوان قوس قزح» لكننا بهذا سنستبق الأمور). ثم استطاع عن طريق كسر (حني) شعاع الضوء مستخدمًا منشورًا زجاجيًّا أن يحلله إلى الألوان المؤلِّفة له. ثم استخدم منشورًا آخر ليمر به الضوء المنكسر فيجمع الألوان مرة أخرى لتعود وتؤلِّف شعاع الضوء الأبيض مرة أخرى، مثبتًا أن المنشور ليس هو ما يُشكِّل الألوان من تلقاء نفسه بشكل أو بآخر. كما أدرك أن الكثير من المواد الأخرى تستطيع كسر الضوء، ومن بينها الماء. ومن ذلك أدرك أن قطرات الماء التي تكسر الضوء وتعكسه هي المسؤولة عن إنتاج أقواس قزح.

وهكذا أصاب نيوتن في استنتاجه أن قوس قزح الذي يشق السماء ما هو إلا نتاج تضافر ناجح بين الشمس وأعداد لا حصر لها من قطرات المطر، وعيناك اللتان لا بد لهما أن تريا قطرات المطر تلك من الزوايا الصحيحة. ولكي نفهم كيف تنتج قطرة المطر لا بد لنا أن نركز انتباهنا على ما يحدث عندما يدخل شعاع الضوء في تلك القطرة. لكن تذكر أن كل ما سأقول عن قطرة المطر الضئيلة تلك ينطبق حقيقة على القطرات التي لا حصر لعددها، والتي تؤلف قوس قزح.

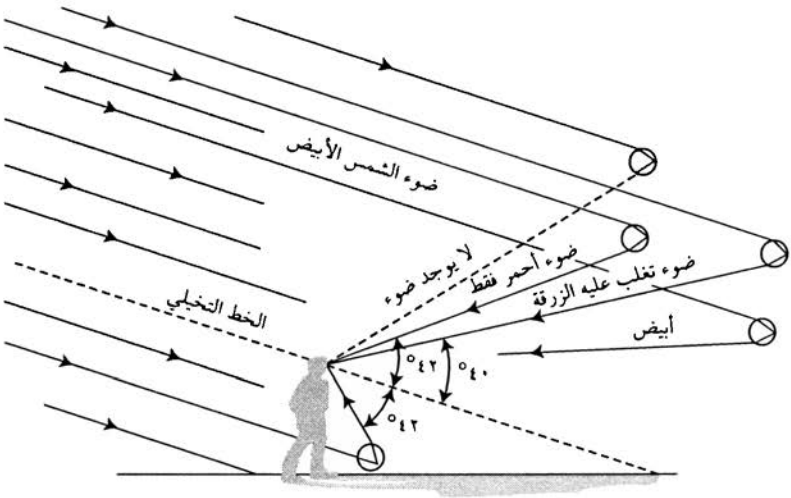
لكي ترى قوس قزح لا بد أن تتوفر لديك ثلاثة شروط؛ أولًا لا بد أن تكون الشمس وراءك. ثانيًا: لا بد أن تكون هناك قطرات مطر في السماء أمامك على مسافة قد تصل إلى كيلومترات وقد تقتصر على بضع مئات الأمتار. ثالثًا: لا بد أن يتمكن ضوء الشمس من الوصول إلى قطرات المطر دونما أي عائق، كالسحب مثلًا.

عندما يدخل شعاع الضوء قطرة المطر وينكسر، تتفرق الألوان المكونة له. يكون الضوء الأحمر هو الأقل انكسارًا، أو انحناءً، في حين يكون الضوء القرمزي هو الأكثر انكسارًا. جميع هذه الأشعة الملونة تواصل التحرك تجاه مؤخرة قطرة المطر. بعضها يواصل مسيره ويخترق القطرة بينما يرتد بعضها الآخر أو ينعكس بزاوية ما تجاه مقدمة قطرة المطر. بل إن بعض الأشعة الضوئية تنعكس أكثر من مرة، لكن هذا ستتضح أهميتُه لاحقًا. أما الآن فإن الضوء الذي نهتم به هو ذلك الذي ينعكس مرة واحدة فقط. وعندما يخرج الضوء من مقدمة قطرة المطر ينكسر مرة أخرى مما يزيد من تشتت الأشعة الملونة.

بعد أن ينكسر ضوء الشمس وينعكس، ثم ينكسر مرة أخرى وهو يتخذ طريقه إلى خارج قطرة المطر، يصير اتجاهه معكوسًا. من أهم الأسباب وراء رؤيتنا لأقواس قزح أن الضوء الأحمر يخرج من قطرة المطر بزوايا دائمًا ما تكون أصغر بـ ٤٢ درجة من الاتجاه الأصلي لشعاع الضوء الداخل إلى القطرة. يسري ذلك على جميع قطرات المطر، وذلك مردُّه إلى أن الشمس من الناحية العملية تبعد عنا مسافة سحيقة بشكل لا حدود له. وتلك الزاوية التي يتخذها الضوء الأحمر في خروجه تتراوح ما بين صفر و٤٢ درجة، غير أنها لا تتجاوز ٤٢ درجة أبدًا. لكن هذا الحد الزاوي الأقصى يتباين من لونٍ إلى آخر. فللون القرمزي تُحدد الزاوية القصوى بـ ٤٠ درجة. وهذا التباين في الحدود القصوى للزوايا في كل لون من الألوان هو الذي تعزى إليه خطوط الألوان في قوس قزح.



توجد طريقة سهلة لملاحظة قوس قزح متى تهيأت الظروف لذلك. كما يظهر في الشكل التالي، لو تتبعتُ الخط الممتد من الشمس عبر رأسي إلى نهاية ظلي على الأرض، فإن هذا الخط تحديدًا يوازي اتجاه شعاع الضوء المتجه من الشمس إلى قطرات المطر. وكلما ازداد علو الشمس في السماء، ازداد انحدار ذلك الخط وازداد قصر ظلي. كما أن العكس مهم. فذلك الخط القادم من الشمس عبر رأسي إلى ظلي الذي على الأرض سنسميه الخط التخيلي. هذا الخط مهم جدًّا إذ إنه ينبئك بالموضع الذي عليك أن تنظر إليه في السماء كي ترى قوس قزح.




جميع قطرات المطر التي تقع بزاوية ٤٢ درجة من «الخط التخيلي» ستكون حمراء. وتلك التي تسقط بزاوية ٤٠ درجة ستكون زرقاء. أما الأخرى التي تسقط بزاوية أقل من ٤٠ درجة فستكون بيضاء (كضوء الشمس). لكننا لن نرى أي ضوء من القطرات التي تسقط بزوايا أقل من ٤٢ درجة (انظر النص).

جميع قطرات المطر التي تقع بزاوية ٤٢ درجة من «الخط التخيلي» ستكون حمراء. وتلك التي تسقط بزاوية ٤٠ درجة ستكون زرقاء. أما الأخرى التي تسقط بزاوية أقل من ٤٠ درجة فستكون بيضاء (كضوء الشمس). لكننا لن نرى أي ضوء من القطرات التي تسقط بزوايا أقل من ٤٢ درجة (انظر النص).

إذا ابتعدتَ بنظرك عن ذلك الخط المتخيل بدرجة ٤٢ درجة – سواء أكان ذلك تجاه اليمين أم تجاه اليسار، لا فرق في ذلك – فسترى هنا الحزام الأحمر في قوس

قزح. وعند الدرجة ٤٠ بعيدًا عن الخط المتخيل ستجد الحزام القرمزي في قوس قزح. لكن الحقيقة أنه تصعب رؤية اللون القرمزي في قوس قزح، لذا فستراه أزرق. ولهذا من الآن فصاعدًا سوف نسميه اللون الأزرق. أليست تلك هي ذات الزوايا التي ذكرتُها سابقًا عندما تكلمتُ عن الحد الأقصى للزوايا التي يتخذها الضوء وهو يخرج من قطرة المطر؟ نعم هي، ليس في الأمر صدفة. انظر إلى الشكل مرة أخرى.

ماذا عن الشريط الأزرق في قوس قزح؟ تذكر رقمه السحري الذي يبلغ ٤٠ درجة، أي يقل عن الشريط الأحمر بمقدار درجتين. وهكذا فإننا قد نجد الضوء الأزرق ينكسر ثم ينعكس ثم ينكسر مرة أخرى خارجًا من عدد من قطرات المطر بزاوية لا يتعدى حدها الأقصى ٤٠ درجة. ولذلك نرى نحن الضوء الأزرق منحرفًا عن الخط التخيلي بزاوية مقدارها ٤٠ درجة. وبما أن الشريط ذا الـ ٤٠ درجة أقرب إلى الخط المتخيل من نظيره ذي الـ ٤٢ درجة، فإن الشريط الأزرق لا بد أن يكون تحت الشريط الأحمر في قوس قزح. أما بقية الألوان المكونة للقوس – البرتقالي والأصفر والأخضر - فهي تقع بين الشريطين الأحمر والأزرق. لقراءة المزيد عن هذا الموضوع يمكنك مطالعة محاضرتي عن أقواس قزح على شبكة الإنترنت على الموقع: http:// ocw.mit.edu/courses/physics/8-03-physics-iii-vibrations-and-waves-fall-2004/video-lectures/lecture-22/.

لعلك الآن تتساءل: عند الزاوية القصوى للضوء الأزرق هل نرى الضوء الأزرق فقط؟ على كل حال، فالضوء الأحمر أيضًا ينبعث عند زاوية الـ ٤٠ درجة؛ لأنها أقل من ٤٢ درجة. لو سألت ذلك السؤال فلتعلم أنه سؤال ذكي جدًّا. والإجابة هي أنه عند الزاوية القصوى لأي لون من الألوان، يهيمن ذلك اللون على أي لون آخر. لكن اللون الأحمر وحده لا ينازعه أي لون آخر في زاويته؛ لأنه الأعلى حدًّا.

لكن لماذا تتخذ تلك الظاهرة شكل قوس وليس خطًّا مستقيمًا؟ ارجعْ مرة أخرى إلى ذلك الخط المتخيل الذي يمتد من عينيك إلى ظل رأسك، وإلى الرقم السحري: ٤٢ درجة. إنك عندما تقيس ٤٢ درجة – في جميع الاتجاهات – بعيدًا عن الخط المتخيل، تجد نفسك تتبع قوسًا مؤلفًا من الألوان. لكنك تعلم أنه ليست أقواس قزح كلها أقواسًا كاملة، وإنما قد يقتصر بعضها على شذرات صغيرة في السماء. يحدث ذلك عندما لا توجد قطرات مطر كافية في جميع اتجاهات السماء، أو عندما تقع أجزاء معينة من قوس قزح خلف سحب عائقة.

كما أن هنالك ملمحًا مهمًّا آخر من ملامح هذا التضافر بين الشمس وقطرات المطر وعينيك، وهذا الملمح ما إن تراه فستدرك الكثير عن السبب في كون أقواس قزح – الطبيعي منها والصناعي – على ما هي عليه. فمثلًا لماذا نجد بعضها هائل الحجم بينما البعض الآخر نجده بالكاد يظهر في الأفق؟ وما أسباب تكوّن أقواس قزح تلك التي تراها عند ركوب الأمواج أو في النافورات أو شلالات المياه أو حتى عندما تروي حديقة منزلك بخرطوم المياه؟

لنرجع مرة أخرى إلى ذلك الخط التخيلي الذي يمتد من عينيك إلى ظل رأسك. ذلك الخط يبدأ من الشمس وراءك، ويمتد إلى الأرض. لكنك تستطيع أن تتخيل ذلك الخط يمتد إلى الحد الذي تريد بل قد تجعله يتجاوز ظل رأسك. هذا الخط التخيلي ذو فائدة عظيمة بالفعل، وذلك لأنك تستطيع أن تتخيله يخترق مركز دائرة ما (والذي يسمى النقطة المعاكسة للشمس) تقع في محيط قوس قزح. تمثل تلك الدائرة الموقع الذي سوف يتكون فيه قوس قزح إذا لم يعترض سطح الأرض طريقه. وموقع قوس قزح، ارتفاعًا وانخفاضًا في الأفق، يعتمد على علو الشمس وانخفاضها في السماء. عندما ترتفع الشمس جدًّا في السماء لا نجد قوس قزح يرتفع عن الأفق إلا طفيفًا، أما في وقت متأخر من فترة العصر قبل الغروب مباشرة، أو عقب الشروق مباشرة عندما يستطيل ظلك فحينها يصير قوس قزح هائل الحجم، يعلو حتى يكاد يغطي منتصف الأفق. لماذا منتصف الأفق؟ لأن الحد الأقصى للزاوية التي تعلو فوق الأفق هو ٤٢ درجة أي زاوية مقاربة لـ ٤٥ درجة والتي هي نصف الـ ٩٠ درجة التي تقع فوق رؤوسنا.

إذن كيف لك أن تفتش عن قوس قزح في السماء؟ أولًا عليك أن تثق في غرائزك التي تتنبأ بوقت تكون قوس قزح. فالغالب الأعم منا يمتلك قدرة حدسية على ذلك وهذه الأوقات هي وقت سطوع الشمس قبل حدوث العواصف المطرية مباشرة، أو وقت سطوعها عقب العاصفة مباشرة. أو عندما يهطل مطر خفيف مع استطاعة ضوء الشمس الوصول إلى قطرات المطر.

عندما تستشعر عاصفة مثل تلك قادمة فإليك ما يجب أن تفعل. أولًا، أدر ظهرك إلى الشمس. ثم ابحث عن ظل رأسك وانظر بزاوية ٤٢ درجة في أي اتجاه مبتعدًا عن الخط التخيلي. إذا توافر القدر الكافي من ضوء الشمس ولو توافر ما يكفي من قطرات المطر، فلسوف ينجح هذا التضافر، ولسوف ترى القوس الملون.

هب أنك لم تتمكن من رؤية الشمس على الإطلاق، فلعلها كانت متوارية خلف

غيوم أو مبان، لكن كان من الجلي أنها ساطعة. طالما لم تتوسط الغيومُ بين الشمس وقطرات المطر، فسيظل بإمكانك رؤية قوس قزح. فإنني أستطيع رؤية أقواس قزح في نهاية فترة العصر من غرفة معيشة منزلي وأنا أواجه الشرق، مع أنني لا أرى الشمس التي تكون في الغرب. والحقيقة أنك لا تحتاج في غالب الأحيان إلى الخط التخيلي وإلى حيل الـ ٤٢ درجة كي تحدد مكان قوس قزح، إلا أنه في موقف واحد قد يؤدي الانتباه إلى هذين الأمرين معًا إلى حدوث فارق كبير. يروق لي أن أسير على شاطئ جزيرة بلام في ساحل ماساتشوستس. في أواخر فترة العصر تكون الشمس جهة الغرب ويكون المحيط جهة الشرق. لو ارتفعت الأمواج بشكل كافٍ وأنتجت الكثير من قطرات الماء الصغيرة، فستعمل هذه النقاط المائية الصغيرة عمل قطرات المطر، ويتسنى لك حينها أن ترى قطعتين صغيرتين من قطع قوس قزح، واحدة منهما عند ٤٢ درجة جهة اليسار من الخط المتخيل والأخرى عند ٤٢ درجة إلى يمينه. قوسا قزح هذان لا يستمران إلا لجزء من الثانية، ولذلك فمعرفة الموضع الذي تبحث فيه عنهما مسبقًا ستساعدك كثيرًا. ومع توالي موجات المياه ستنجح في رؤية أقواس قزح لو تحليتَ بقدرٍ من الصبر. وسنستفيض في الحديث عن هذا الموضوع لاحقًا في هذا الفصل.

إليك هذا الأمر الآخر الذي تستطيع أن تجربه في المرة القادمة التي تحاول فيها إيجاد قوس قزح. أذكر نقاشنا حول الحد الأقصى للزاوية التي لا يستطيع شعاع ضوئي ما أن يتجاوزه عند انكساره خارجًا من قطرة المطر؟ لكن رغم أنك سترى الألوان الأزرق أو الأحمر أو الأخضر خارجة من بعض قطرات المطر، فإن القطرات نفسها ليست انتقائية إلى هذا الحد؛ فهي تكسر وتعكس ثم تكسر الكثير من الأشعة الضوئية بزوايا تقل عن ٤٠ درجة أيضًا. ذلك الضوء هو مزيج من جميع الألوان المختلفة ذات الكثافات المتساوية تقريبًا، وهو ما يجعلنا نراه ضوءًا أبيض. ولذلك نجد السماء بيضاء لامعة تحت الشريط الأزرق. وفي الوقت ذاته ليس هناك من الضوء الذي ينكسر وينعكس ثم ينكسر مرة أخرى ما يستطيع أن يخرج من قطرة المطر متخذًا زاوية تزيد عن الـ ٤٢ درجة ومن ثم نجد السماء خارج قوس قزح أكثر ظلمة منها داخله. يكون هذا التأثير في أوضح صوره إذا قارنتَ سطوع السماء على كلٍ من جانبي قوس قزح. لكنك لن تلحظه إذا لم تبحث عنه على وجه التحديد. ويمكنك الاطلاع على صور رائعة لأقواس قزح، حيث ترى فيها هذا التأثير، على موقع «ذي أتموسفيريك أوبتكس» عبر الرابط التالي: www.atoptics.co.uk.

ما إن شرعتُ أشرح أقواس قزح لطلابي حتى أدركتُ درجة ثراء هذا الموضوع ومدى ما ينبغي ليّ معرفتُه عنه. ولتنظر إلى أقواس القزح المزدوجة التي لا بد أنك تشاهدها بين الفينة والأخرى. الحقيقة أنه غالبًا ما يتكون قوسان في السماء، أولهما هو ما يسمى بالقوس الرئيسي، والآخر هو الذي كنتُ أناقشه، والذي نسميه القوس الثانوي.

لو كنتَ قد رأيتَ القوس المزدوج فلعلك لاحظتَ أن القوس الثانوي أكثر خفوتًا من نظيره الرئيسي. لكنك على الأرجح لم تلاحظ أن ترتيب الألوان في القوس الثانوي يبدأ بالأزرق من أعلى ثم ينتهي بالأحمر في الأسفل، على عكس نظيره الرئيسي. هناك في القسم الخاص بالصور في منتصف هذا الكتاب صورة ممتازة لقوس قزح مزدوج.

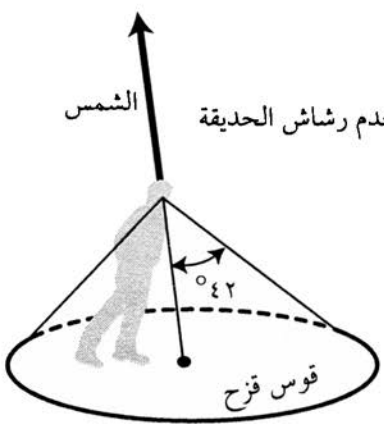
لكي نفهم جذور القوس الثانوي علينا أن نرجع إلى قطرة المطر المثالية – تذكر أن القوس الثانوي أيضًا يستلزم وجود قطرات لا حصر لها. بعض أشعة الضوء التي تدخل قطرة المطر تنعكس مرة واحدة، بينما ينعكس البعض الآخر مرتين قبل الخروج. وفي حين أن الأشعة الضوئية الداخلة للقطرة قد تنعكس أكثر من مرة داخلها، فإن القوس الرئيسي تخلقه الأشعة التي تنعكس مرة واحدة فقط. أما القوس الثانوي فعلى العكس تخلقه فقط تلك الأشعة التي تنعكس مرة أخرى قبل الانكسار والخروج من القطرة. وذلك الارتداد الإضافي داخل قطرة المطر هو المسؤول عن عكس ترتيب الألوان في القوس الثاني.

والسبب في أن القوس الثانوي يتكون في موقع يختلف عن موقع نظيره الرئيسي – دائمًا ما يكون خارجه – هو أن الأشعة الحمراء التي تنعكس مرتين تخرج من قطرات المطر من زوايا أكبر من نحو ٥٠ درجة، والأشعة الزرقاء المنعكسة مرتين تخرج من زوايا دائمًا ما تتجاوز الـ ٥٣ درجة. ومن ثم عليك أن تفتش عن القوس الثاني خارج الرئيسي بنحو ١٠ درجات. والسبب في خفوت ألوان القوس الثانوي هو أن قدرًا أقل بكثير من الضوء هو الذي ينعكس مرتين؛ لذا فلا يوجد إلا القليل فقط منه كي يخلق القوس الثانوي. لذلك فإن رؤية القوس الثانوي أمر صعب ولا شك، لكنك الآن بتَّ تعلم أنه عادة ما يصاحب القوس الرئيسي، وتعلم أين تفتش عنه، لذا فأنا واثق من أنك سترى الكثير من نوعه. كما أنني أنصحك بأن تقضي بعض الدقائق تتصفح موقع «ذي أتموسفيريك أوبتكس».

الآن وقد غدوتَ تعلم ما الذي يخلق أقواس قزح، فبإمكانك أن تصنع بعض السحر البصري في باحة منزلك الخلفية مستخدمًا خرطوم الحديقة فقط. لكن لأنك تستطيع أن تتحكم في قطرات الماء بخرطوم الحديقة وأن تلك القطرات تكون قريبة قربًا فيزيائيًا منك فالأمر به بعض الاختلافات الكبيرة عن حالة أقواس قزح في السماء. منها أنك تستطيع أن تخلق قوس قزح حتى والشمس عالية في السماء. لماذا؟ لأنك تستطيع أن تجعل قطرات الماء تتوسط بينك وبين ظلك على الأرض وهو أمر نادر الحدوث بشكل طبيعي. فطالما تواجدتْ قطرات مائية يستطيع ضوء الشمس أن يصل إليها، فستتكون أقواس قزح. لعلك قد صنعتَه بالفعل لكن دون قصد.

إذا كان لخرطوم حديقتك صنبور في نهايته، فاضبطه على وضع الرش الرفيع، مما يجعل القطرات صغيرة جدًّا، وعندما تعلو الشمس في السماء وجّه الصنبور تجاه الأرض وابدأ الرش. لن تستطيع حينها أن ترى الدائرة كاملة دفعة واحدة، وإنما سترى شذرات من أقواس قزح. ومع مواصلة تحريكك لصنبور المياه بشكل دائري سترى دائرة قوس قزح كاملة تتكون جزءًا جزءًا. لماذا يتعين عليك أن تفعلها بهذا الشكل؟ لأنك لا تملك عينان في مؤخرة رأسك.

سترى اللون الأحمر عند الدرجة ٤٢ تقريبًا من الخط المتخيل، ستكون الحافة الداخلية لقوس الدائري زرقاء، وفي داخل القوس ستجد ضوءًا أبيض. إنني أحب أن أخلق هذا القوس الصغير وأنا أروي حديقتي، وأحب بالأخص أن أدور دورة كاملة فأخلق قوسًا كاملًا ذا ٣٦٠ درجة. (لكن حينها لن تكون الشمس دائمًا وراءك بالطبع).



ذات يوم بارد من أيام شتاء عام ١٩٧٢، عزمتُ على أن ألتقط بعض الصور الجيدة لأقواس قزح التي شكلتها في المنزل، لأعرضها في صف الدراسة، لدرجة أنني طلبت من ابنتي المسكينة إيما التي كانت في السابعة من عمرها في ذلك الوقت أن تمسك بالخرطوم في حديقة منزلي الخلفية، وترش الماء في الهواء وأنا ألتقط الصور بكاميرتي من بعد. أظن أن أي ابنة لعالم لا بد أن تعانيَ بعض الشيء في سبيل العلم. ولقد تمكنتُ من التقاط بعض الصور الرائعة، بل إنني استطعتُ التقاط صور للقوس الثانوي مستخدمًا مدخل مرأبي المفترش بالأسفلت الأسود كخلفية مناقضة الألوان. كما يمكنك مشاهدة صورة لإيما في القسم الخاص بالصور في منتصف الكتاب.

آمل أن تحاول إجراء هذه التجربة، لكن جربها في الصيف. ولا تسمح للإحباط أن يتملكك إذا لم ترَ القوس الثانوي — فقد يكون شديد الخفوت لدرجة قد تحول دون ظهوره إذا لم يكن مرأبك مظلمًا بما يكفي.

ومن الآن فصاعدًا بعدما فهمت كيفية إيجاد أقواس قزح، ستجد نفسك تفتش عن المزيد منها رغمًا عنك. أنا نفسي لا أستطيع منع نفسي من ذلك. حتى إنني ذات يوم كنتُ أستقل السيارة مع سوزان متجهين إلى المنزل، عندما بدأت الأمطار تهطل، لكننا كنا نتجه مباشرة ناحية الغرب، تجاه الشمس. لذلك فقد توقفتُ على جانب الطريق رغم ازدحام الطريق، ثم خرجتُ من السيارة واستدرتُ، وهناك كان ذلك الجمال ماثلًا أمامي.

وأعترف أنني كلما مررتُ بنافورة وقتَ سطوع الشمس، أقف في موضع يتيح لي التفتيش عن قوس قزح الذي أوقن أنه موجود. ولو مررتَ أنت بجوار نافورة في يوم مشمس فلتجرب الأمر. قف بين الشمس والنافورة مولّيًا ظهرك للشمس وتذكر أن رذاذ النافورة يقوم مقام قطرات المطر المعلقة في السماء. ثم ابحث عن ظل رأسك وحدد مكان الخط المتخيل، ثم انظر بزاوية قدرها ٤٢ درجة بعيدًا عن ذلك الخط. إذا كان هناك ما يكفي من قطرات الماء في ذلك الاتجاه، فسترى حينها الشريط الأحمر، ثم ما يلبث باقي القوس في الاتضاح لك على الفور. من النادر أن يحدث ويرى المرء قوسًا نصف دائري تامًّا في النافورة – والسبيل الوحيد لتحقيق هذا هو أن تقترب جدًّا من النافورة – لكن المشهد جميل جدًّا ويستحق المحاولة.

لكنني أحذر من أنك ما إن تجده، فستشعر برغبة ملحة في أن تجعل المارة حولك يعرفون بوجوده. فإنني عادة ما أشير إلى هذه الأقواس في النافورة للمارين بجواري،

وأنا واثق من أن بعضهم يراني غريب الأطوار. لكن السؤال الذي يراودني هو لماذا أستمتع وحدي بهذه العجائب المخفية؟ لا بد أن أريها للناس. لو أيقن المرء بوجود قوس قزح أمامه فلماذا لا يفتش عنه؟ ولماذا لا يتأكد من أن الآخرين يرونه أيضًا؟ إنه قوس رائع.

كثيرًا ما يسألني طلابي عن احتمالية وجود قوس ثالث كذلك. الإجابة هي نعم ولا. فالقوس الثالث ينتج، كما لعلك خمنتْ، من الانعكاسات الثلاثية داخل قطرة المطر. وهذا القوس يتمركز على الشمس كما يتمركز القوس الرئيسي على النقطة المعاكسة للشمس، كما أنه ذو نصف قطر يقدر بنحو ٤٢ درجة، ويكون الشريط الأحمر فيه في الحد الخارجي. ومن ثم يتعين عليك أن تنظر جهة الشمس كي تراه، ولا بد أن يسقط المطر بينك وبين الشمس. لكن عندما يحدث ذلك لن تكاد ترى الشمس. لكن هناك مشكلات إضافية، إذ إن كثيرًا من أشعة الشمس ستخترق قطرات المطر دون أن تنعكس أبدًا، مما ينتج توهجًا كبيرًا براقًا حول الشمس يجعل رؤية القوس الثالث مستحيلةً من الناحية العملية. وذلك القوس الثالث أكثر خفوتًا حتى من القوس الثانوي. كما أنه أوسع نطاقًا من القوسين الرئيسي والثانوي؛ ومن ثم فإن ضوءه الخافتَ ذلك ينتشر في حيز أكبر من السماء، مما يزيد من صعوبة رؤيته. على حد علمي ليس هناك مِن صورٍ لقوس ثالث، ولا أعلم أحدًا رأى قوسًا ثالثًا. لكن هناك بعض التقارير التي وردت عن مشاهدات من ذلك النوع.

من المؤكد أن الناس يريدون معرفة ما إذا كانت أقواس قزح حقيقية. يتساءلون عما إذا كانت سرابًا يتلاشى كلما اقتربوا منه. فلماذا لا نستطيع رؤية نهاية قوس قزح؟ إذا كانت تلك الأفكار تخامرك، فلتلتقط أنفاسك وتهدأ. أقواس قزح ظواهر حقيقية ناتجة عن ضوء الشمس الحقيقي الذي يتفاعل مع قطرات المطر الحقيقية وعينيك الحقيقيتين. لكن لأنها نتاج لتضافر محدد بين عينيك والشمس وقطرات المطر فسوف ترى أنت قوس قزح مختلفًا عن القوس الذي يراه الشخص الذي يقف قبالتك على الجانب الآخر من الشارع، قوسًا حقيقيًّا لكنه مختلف.

وليس السبب في أننا لا نستطيع عادة رؤية طرف قوس قزح وهو يلامس الأرض هو أنه غير موجود، لكن لأنه شديد البعد عنا، أو يتوارى وراء المباني أو الأشجار أو الجبال، أو أنه لا توجد إلا القليل من قطرات المطر في الجو وأن القوس خافت للغاية. لكنك لو استطعت الاقتراب بالقدر الكافي من قوس قزح فإنك تستطيع حتى

أن تلمسه، وهو ما يمكنك القيام به عندما تصنع أقواس قزح باستخدام خرطوم المياه في حديقة منزلك.

بل إنني قد نجحتُ في الإمساك بأقواس قزح في يديَّ حينما كنت أتحمم. لقد اكتشفتُ ذلك عن طريق الصدفة. فعندما كنت أواجه رشاش الحمام رأيت فجأة اثنين (نعم اثنين) من أقواس قزح الرئيسية البراقة داخل حوض استحمامي، يبلغ طول الواحد منهما قدمًا كاملة، ويبلغ عرضه بوصة واحدة. كم كان هذا رائعًا جميلًا، أشبه بالحلم. لقد مددتُ يدي واستطعتُ الإمساك بهما، يا له من شعور. لقد ظللتُ ألقي محاضرات عن أقواس قزح أربعين عامًا، ولم يسبق لي قبلها أن رأيتُ قوسي قزح رئيسيين على بعد لا يتجاوز طول ذراعي.

إليك تفسير ما حدث. لقد نفذ إلى حوض استحمامي شعاعٌ من ضوء الشمس عبر النافذة. لم يكن الأمر كأنني أقف بالقرب من نافورة، وإنما كأنني أقف داخلها. ولأن الماء كان قريبًا جدًّا مني ولأن عيناي تفصل بينهما نحو ٧,٦ سنتيمترات، فقد صار لكل عين منهما خطها التخيلي المنفصل. كانت الزوايا مضبوطة وكانت المياه بالقدر الكافي مما جعل كل عين منهما ترى قوسها الرئيسي المنفصل. عندما أغلقتُ إحدى عينيَّ اختفى واحد من القوسين، وعندما أغلقت الأخرى اختفى الآخر، كم كنتُ أود لو التقطتُ صورة لهذا المشهد المذهل. لكنني لا أستطيع ذلك لأن لكاميرتي «عين» واحدة فقط.

جعلني قربي الشديد من هذين القوسين أرى أقواس قزح، وأرى كم هي حقيقية من منظور جديد. كنت كلما حركت رأسي تحركا معي، لكن عندما أبقي رأسي ثابتًا كانا يثبتان معه.

وصرت بين الحين والآخر أضبط مواعيد تحممي في الصباح على أوقات تشكل أقواس قزح كلما أُتيح لي ذلك، أوقات تكون فيها الشمس في المكان المناسب في السماء كي تتسلل أشعتها عبر نافذة حمامي بالزاوية المناسبة، وهذا لا يحدث إلا بين منتصف شهر مايو ومنتصف شهر يوليو. لعلك تعلم أن الشمس تشرق في وقت أبكر وتعلو أكثر في السماء في شهور معينة، وأنها في نصف الكرة الأرضية الشمالي تشرق أقرب إلى الجنوب (من الشرق) في شهور الشتاء، وتشرق أقرب إلى الشمال (من الشرق) في الصيف.

يواجه حمامي جهة الجنوب، وهناك مبنى في الجهة الجنوبية يجعل الضوء لا ينفذ أبدًا من الجنوب مباشرة. لذلك لا ينفذ الضوء إلا من جهة الجنوب الشرقي تقريبًا. وقت أن شاهدتُ هذين القوسين في حوض استحمامي كنتُ أتحمم في وقت متأخر نسبيًّا قرب العاشرة صباحًا. كي تشاهد أقواس قزح في حوض استحمامك لا بد أن تسمح نافذة حمامك لضوء الشمس بأن ينفذ، فيصل إلى رشاش الماء. الحقيقة أنك لو لم تتمكن من رؤية الشمس عندما تنظر من نافذة حمامك، فلا معنى لبحثك عن أقواس قزح في حمامك – فلن تجد أيًّا منها. لا بد أن يصل ضوء الشمس إلى رشاش الماء. وحتى لو نفذ إليه مباشرة فليس ذلك بضمانة، وذلك لأنه يتعين على الكثير من قطرات الماء أن توجد عند زاوية قدرها ٤٢ درجة من خطك المتخيل، وقد لا يتاح هذا في هذه الحالة.

لعل هذه الشروط صعبة التحقيق، لكن لماذا لا تجرب؟ ولو اكتشفتَ أن الشمس تدلف إلى حمامك في وقت متأخر من فترة العصر، فقد تفكر في تغيير مواعيد استحمامك.

## لِم يرتدي البحارة نظارات شمسية؟

متى قررتَ أن تفتش عن قوس قزح، فعليك أن تتأكد من نزع نظارتك الشمسية إذا ما كانت من النوع ذي الاستقطاب، وإلا فاتك المشهد. إنني قد مررتُ بتجربة طريفة تتعلق بذلك الأمر ذات يوم. فكما سبق أن ذكرتُ، أحب أن أتمشى بمحاذاة شاطئ جزيرة بلام. وقد بينتُ كيف يمكن للمرء أن يرى أقواسًا صغيرة في رذاذ الأمواج. منذ عدة سنوات كنتُ أمشي على طول الشاطئ؛ كانت الشمس ساطعة والريح تزأر، وعندما اصطدمت الأمواج بالشاطئ مع دنوها منه حدثت الكثير من زخات الماء، لذا وكما وضحتُ في بداية هذا الفصل رأيت شذراتٍ من أقواس قزح. هنا شرعت أشير إليها لصديقي الذي قال إنه لا يرى ما أتكلم عنه. ولعلنا قد قطعنا الشاطئ جيئة وذهابًا نحو ست مرات ونحن على ذات الحال. أصيح أنا منزعجًا بعض الشيء «ها هو واحد» فيصيح هو الآخر «لا أرى شيئًا». لكن فجأة خطر لي خاطر ذكي، فطلبت منه أن ينزع نظارته الشمسية التي علمتُ من النظر إليها أنها مستقطبة. وبالفعل نجح بعد تخليه عن نظارته الشمسية في رؤية أقواس قزح، بل إنه صار يشير إليها ليريني إياها. ما الذي حدث؟

أقواس قزح هي أمر ذو طبيعة غير معتادة وذلك لأن كل أشعتها الضوئية تقريبًا مستقطَبة. الآن صرتَ تعرف مصطلح «المستقطَب» الذي يصف النظارة الشمسية. لكنه مصطلح غير صحيح من الناحية التقنية، لكن سوف أستفيض في الشرح عن الضوء المستقطَب ثم سأرجع إلى النظارات الشمسية وأقواس قزح.

تنتج الأمواج عن اهتزاز شيء ما؛ شيء على غرار شوكة رنانة تتذبذب، أو وتر كمان من الذي ينتج موجات صوتية، وهو الأمر الذي سأتكلم عنه في الفصل التالي. أما الموجات الضوئية فتنتجها الإلكترونات المتذبذبة. وعندما تصير الذبذبات كلها متجهة اتجاهًا واحدًا ومتعامدة على اتجاه انتشار الموجات، نسمي نحن هذه الموجات موجات مستقطَبة خطيًا. ولأجل التبسيط سوف أتخلى عن مصطلح «خطيًا» فيما يلي لأنني في هذا الفصل لا أتكلم إلا عن هذا النوع من الضوء المستقطَب.

لا يمكن لموجات الصوت أن تُستقطب؛ وذلك لأنها دائمًا تنتشر في ذات اتجاه تذبذب جزيئات الهواء في موجات الضغط؛ كتلك الموجات التي تستطيع توليدها عن طريقة لعبة السلينكي[1] Slinky. أما الضوء فيمكن أن يُستقطَب. صحيح أن ضوء الشمس أو الضوء المنبعث من المصابيح الكهربائية التي في منزلك ليس مستقطَبًا، لكننا نستطيع بكل سهولة تحويل أي ضوء غير مستقطَب إلى ضوء مستقطَب. واحد من الطرق لفعل ذلك هو شراء نظارة مستقطَبة. لعلك الآن تعرف أن الاسم الذي يطلق على هذه النظارات ليس دقيقًا جدًّا. فهي في الواقع نظارات مستقطِبة بكسر الطاء لا بفتحها. والسبيل الآخر إلى ذلك هو شراء نظارة مستقطِبة خطية (النظارة التي اخترعها إدوين لاند مؤسس شركة بولارويد كوربوريشن) ثم تنظر للعالم من خلالها. ونظارة لاند المستقطِبة تلك يبلغ سمكها مليمترًا واحدًا ويباع منها جميع المقاسات. معظم الضوء الذي ينفذ من خلال هذه المستقطِبات (ومن بينها النظارات الشمسية المستقطِبة) يصير مستقطَبًا.

لو وضعتَ مستقطِبين مستطيلين أحدهما فوق الآخر (أُعطي كل طالب من طلابي اثنين كي يجروا هذه التجربة في منازلهم) وأدرتهما بزاوية ٩٠ درجة أحدهما من الآخر، فلن يمر أي ضوء منهما.

تُنتج الطبيعة مقدارًا كبيرًا من الضوء المستقطَب دون أي عون من مستقطِبات لاند.

(١) لعبة السلينكي هي لعبة يدوية ذاتية الحركة، مكونة من لفائف معدنية متصلة ببعضها بعض (المترجم).

فالضوء المنبعث من السماء الزرقاء الذي يأتي من زاوية قدرها ٩٠ درجة من اتجاه الشمس كله تقريبًا مستقطَب. كيف لنا أن نعلم ذلك؟ ما عليك إلا أن تنظر إلى السماء الزرقاء (بزاوية قدرها ٩٠ درجة من الشمس) من خلال مستقطِب خطي، ثم تديره ببطء وأنت تواصل النظر. سوف تلاحظ تغيرًا في سطوع السماء. عندما تصير السماء مظلمة بالكامل، ويكون الضوء القادم من ذلك الجزء من السماء مستقطَبًا استقطابًا شبه تام. ومن ثم فإنك كي تكتشف الضوء المستقطَب لا تحتاج إلا إلى مستقطِب واحد (لكنك لو امتلكتَ اثنين لغدا الأمر أكثر إمتاعًا).

في أول فصول هذا الكتاب، وضحتُ كيف أنني «أنتجتُ» في قاعة الدراسة ضوءًا أزرق عن طريق نشر ضوء أبيض نابع من دخان سيجارة. كنت أرتب ذلك بشكل يجعل الضوء الأزرق المنتشر في قاعة الدرس ينتشر في نطاق زاوية قدرها ٩٠ درجة؛ وهذا الضوء هو أيضًا مستقطَب بالكامل. ويستطيع الطلاب أن يروا ذلك عن طريق مستقطِباتهم الخاصة التي يحضرونها دائمًا معهم.

وضوء الشمس (أو ضوء المصباح الكهربي) الذي ينعكس عن الماء أو الزجاج يمكن أن يكون مستقطَبًا بالكلية تقريبًا إذا سقط على سطح الماء أو الزجاج بالزاوية المناسبة لذلك، وهي الزاوية التي نسميها زاوية بروستر. لذلك يرتدي قادة القوارب والبحارة نظاراتٍ شمسية مستقطِبة لأنها تعترض الكثير من الضوء الذي يعكسه سطح الماء. (ديفيد بروستر هو فيزيائي أسكتلندي عاش في القرن التاسع عشر وكانت له أبحاث كثيرة في مجال البصريات).

دائمًا ما أحمل في محفظتي – نعم دائمًا – مستقطِبًا واحدًا على الأقل، وأحث تلاميذي على ذات الفعل.

لماذا أخبرك بكل هذا عن الضوء المستقطَب؟ لأن الضوء النابع من أقواس قزح كله تقريبًا مستقطَب. وهذا الاستقطاب يحدث عندما ينعكس الضوء داخل قطرة الماء، وهو، كما صرتَ تعلم، شرط ضروري لتكون قوس قزح.

في قاعة الدراسة أصنع نوعًا خاصًا من أنواع قوس قزح (باستخدام قطرة ماء وحيدة رغم كونها كبيرة جدًا) ومنه أستطيع أن أبرهن على ما يلي: (١) اللون الأحمر يكون على الجانب الخارجي للقوس. (٢) اللون الأزرق يكون على الجانب الداخلي للقوس. (٣) في داخل القوس يكون الضوء لامعًا أبيض على النقيض منه خارج

القوس. (٤) الضوء النابع من القوس مستقطَب. إنني أرى في استقطاب أقواس قزح أمرًا مدهشًا للغاية (وهو أحد الأسباب التي تجعلني أحمل مستقطبًا معي). يمكنك مشاهدة برهاني الرائع ذلك في محاضرتي على موقع http://ocw.mit.edu/courses/03-physics-iii-vibrations-and-waves-fall-2004/video--physics/8./lectures/lecture-22

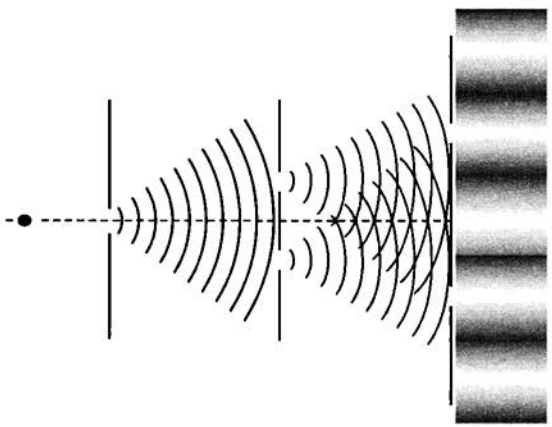
## ما وراء قوس قزح

إن أقواس قزح هي أكثر المخلوقات الجوية شهرة وأكثرها ازدحامًا بالألوان، لكنها ليست وحيدة أبدًا؛ فهنالك حشد كبير من الظواهر الجوية بعضها في منتهى الغرابة والإدهاش وبعضها الآخر يكتنفه الغموض. لكن لنبقَ مع أقواس قزح هنيهةً وننظر إلى أين تأخذنا.

عندما تمعن النظر إلى قوس قزح براق جدًّا، أحيانًا سترى عند حافته الداخلية سلسلة من الأشرطة الملونة التي يتغير حالها من اللمعان إلى القتامة بين الحين والآخر – وهي الأشرطة التي تسمى الأقواس الزائدة. هناك صورة لمثل هذه الأقواس الزائدة في فاصل الصور بمنتصف الكتاب. ولتفسير ذلك الأمر علينا أن نهجر تفسير نيوتن لأشعة الضوء. فقد ظن هو أن الضوء مؤلف من جسيمات، ولذلك فعندما تخيل هذه الأشعة المنفردة تدخل إلى قطرة الماء وترتد ثم تخرج منها، افترض أنها تتصرف كما لو كانت جسيمات صغيرة. لكننا لكي نفسر الأقواس الزائدة نحتاج لأن ننظر إلى الضوء على أنه يتكون من موجات. ولكي تتكون الأقواس الزائدة لا بد أن تمر موجات الضوء خلال قطرات المطر التي هي صغيرة جدًّا، يصغر عرضها عن ميلليمتر واحد.

واحدة من أهم التجارب التي تجرى في الفيزياء قاطبة (والتي تسمى عادة بتجربة الشق المزدوج) تبرهن على أن الضوء مؤلف من موجات. في هذه التجربة الشهيرة التي أجريتْ في وقت ما بين عامي ١٨٠١ و١٨٠٣، شق العالم الإنجليزي توماس يونج شعاعًا رفيعًا من ضوء الشمس إلى شعاعين، ثم راقب النمط الذي تشكل على الشاشة (مجموع الشعاعين) الذي لا يمكن أن يفسر إلا بأن الضوء مؤلف من موجات. لكن بعد مضي زمن على هذه التجربة أُجريتْ مرة أخرى بطريقة مختلفة باستخدام شقين هذه المرة (أو ثقبين). سأبدأ الافتراض هنا بأن شعاع الضوء الرفيع يرتطم بثقبين

صغيرين جدًّا (متقاربين معًا) مثقوبين في قطعة رفيعة جدًّا من الورق المقوى. يمر الضوء خلال الثقبين ثم يرتطم بشاشة. لو كان الضوء مؤلفًا من جسيمات حينها سيمر كل جسيم منها خلال واحد من الثقبين فقط (لا يمكن أن يمر من كليهما) ومن ثم فإنك سترى نقطتين براقتين على الشاشة. لكن النمط الذي يتكون في الحقيقة مخالف بالكلية. فهو يحاكي ما قد يتوقعه المرء إذا ما ارتطمتْ موجتان بالشاشة – أي لو جاءت واحدة منهما نافذة من أحد الثقبين ثم جاءت واحدة أخرى مطابقة لها نافذة في الوقت ذاته من الثقب الآخر. وإضافة الموجتين يخضع لما نسميه بالتداخل. عندما تصطف قمم الموجات النافذة من واحد من الثقبين بجانب قيعان الموجات النافذة من الثقب الآخر، تلغي الموجات إحداها الأخرى، وهو الأمر الذي يسمى بالتداخل المدمر، والأماكن التي يحدث فيها هذا التداخل على الشاشة (وهي أماكن كثيرة) تظل داكنة. أليس ذلك مدهشًا – ضوء زائد ضوء يساوي ظلمة. لكن من ناحية أخرى، نجد في الأماكن الأخرى من الشاشة، حيث تتناغم الموجتان فتعلوان معًا وتهبطان معًا، تداخلًا بنّاءً وفيها نجد نقاطًا براقة (وهناك الكثير منها). ومن ثم نجد نمطًا منتشرًا على الشاشة يتألف من نقاط تتناوب في اللمعان والإعتام، وذلك بالضبط هو ما رآه يونج في تجربته ذات الشق المزدوج.



أما أنا فأبرهن على ذلك في قاعة الدراسة مستخدمًا شعاع ليزر أحمر، وأيضًا باستخدام شعاع ليزر أخضر. إنه مشهد مذهل. يلاحظ الطلبة أن نمط الضوء الأخضر مشابه جدًّا لنظيره في الضوء الأحمر، عدا أن الفارق بين النقاط المعتمة والنقاط اللامعة يضيق في الضوء الأخضر. وهذا الفارق يعتمد على لون الضوء (ومن ثم الطول

الموجي) (سنستفيض في الطول الموجي في الفصل التالي).

لقد ظل العلماء قرونًا يتصارعون حول ما إذا كان الضوء يتألف من جسيمات أم موجات، ولقد خلصتْ هذه التجربة إلى تلك الخلاصة المذهلة التي لا مراء فيها، والتي تنص على أن الضوء عبارة عن موجة. لقد صرنا نعلم الآن أن الضوء يمكن أن يسلك سلوك الجسيمات أو سلوك الموجات، لكن هذه الخلاصة المذهلة كان عليها أن تنتظر قرنًا آخر إلى أن تظهر ميكانيكا الكم. لكننا حتى هذه اللحظة لا نحتاج لأن نخوض أكثر في هذا.

بالعودة إلى الأقواس الزائدة، نجد أن تداخل موجات الضوء هو الذي يخلق الأشرطة اللامعة والداكنة. تتضح هذه الظاهرة أكثر عندما يقترب نصف قطر قطرة الماء من ٠,٥ ميلليمتر. تستطيع أن تشاهد صورة لقوس زائد في قسم الصور، ويمكنك أن تشاهد صورًا أخرى لذات الظاهرة على موقع www.atoptics.co.uk/rainbows/supdrsz.htm.

تصير تأثيرات التداخل (كثيرًا ما يسمى الحيود) أكثر وضوحًا عندما يكون نصف قطر قطرات الماء أصغر من نحو ٤٠ ميكرونًا (٠,٠٤ ميلليمتر أو ١/٦٣٥ من البوصة). عندما يحدث ذلك تنتشر الألوان انتشارًا كبيرًا لدرجة أن موجات الألوان المختلفة تتداخل بالكامل؛ تختلط الألوان فيصير قوس قزح أبيض. وأقواس قزح البيضاء عادة ما يكون بها شريط قاتم أو اثنان (أقواس زائدة). إنها نادرة جدًّا ولم يسبق لي أن رأيت واحدًا. لكن واحدًا من تلاميذي ويدعى كارل وايلز، أرسل لي في منتصف سبعينيات القرن الماضي عددًا من الصور البديعة لأقواس قزح بيضاء. كان قد التقط تلك الصور في الصيف في الساعة الثانية صباحًا (نعم الثانية صباحًا) في جزيرة فليتشر آيس التي هي عبارة عن جبل جليدي كبير منجرف (حجمها نحو ٤,٨٢ × ١١,٢٦ كيلومتر). في ذلك الوقت كانت تبعد نحو ٤٨٢,٨٠ كيلومتر عن القطب الشمالي. يمكنك أن تشاهد صورة بديعة لقوس قزح أبيض في قسم الصور.

يمكن أن يُرى هذا القوس الأبيض كذلك في الضباب، وهو الذي يتألف من نقاط مياه صغيرة بشكل استثنائي. لكن أقواس الضباب البيضاء يصعب تحديدها؛ ولعلك قد شاهدتها من قبل دون أن تدرك ماهيتها. ويرجح ظهورها حين لا يكون الضباب كثيفًا للدرجة التي تسمح لضوء الشمس بأن يسطع خلاله. عندما أكون على ضفة نهر ما أو على أحد المواني في الصباح الباكر، عندما تكون الشمس منخفضة في السماء، وعندما

يكون الضباب منتشرًا، أشرع على الفور في البحث عنها ولقد رأيت منها الكثير.

إنك كذلك تستطيع أن تخلق قوس ضباب باستخدام أضواء سيارتك الأمامية. فإذا كنتَ تقود سيارتك يومًا والضباب يلف السيارة، فابحث عن مكان آمن وتوقف على جانب الطريق. أو إذا كنتَ في مرأب منزلك وأتاك الضباب، فاجعل سيارتك في مواجهته، وأشعل أضواءها الأمامية. ثم امش مبتعدًا عن سيارتك ناحية الضباب حيث أشعة أضواء سيارتك الأمامية. إذا كنتَ محظوظًا فستتمكن من رؤية قوس الضباب. إنها تجعل ظلمة الليلة الضبابية أكثر إثارة للفزع. تستطيع أن ترى صورًا التقطها زميل عثر في أقواس ضباب صنعتها مصابيح سيارته الأمامية على موقع www. htm.9-9-extremeinstability.com/0. هل لاحظتَ الأشرطة الداكنة في الأقواس البيضاء؟

كما أن حجم قطرات الماء وطبيعة موجة الضوء يفسران واحدة من أجمل الظواهر التي تزين السماء، ألا وهي هالة المجد (أو دائرة الضوء). وهالات المجد تلك تتجلى في أوضح صورها عندما يحلّق المرء فوق السحب، صدقني إنها تستحق الجهد الذي ستبذله لإيجادها. ولكي تجدها عليك بالطبع أن تجلس في مقعد ملاصق لنافذة الطائرة، وألا يكون عند منطقة الجناح؛ لأنه سيعيق رؤيتك. كما أن عليك أن تحرص على أن تكون الشمس في الجهة المقابلة لمقعدك لذا فعليك أن تحسب حساب وقت الطيران واتجاه الرحلة. إذا وجدتَ نفسك ترى الشمس من نافذة الطائرة فهذا يعني أن التجربة قد انتهت. (لا بد أن أطلب منك أن تثق بي، إذ إن التفسير المقنع لا بد له من حسابات معقدة). إذا توافرتْ كل هذه الشروط، فعليك حينها أن تفتش عن النقطة المعاكسة للشمس وتنظر إليها من أعلى. فإذا حالفك الحظ فسترى الحلقات الملونة في الغيوم، وإذا لم تكن طائرتك تحلق على مسافة بعيدة فوق السحاب فقد يمكنك حتى أن ترى هالة المجد تدور حول ظل الطائرة – لهالات المجد أقطار تتراوح ما بين درجات قليلة و ٢٠ درجة؛ فكلما صغرت قطرات المطر اتسعتْ هالات المجد.

لقد التقطتُ الكثير من الصور لهالات المجد تلك، ومن بينها صور كان ظل طائرتي فيها واضحًا جدًّا للعيان. والممتع في الأمر بحق هو أن موقع مقعدي كان في مركز هالة المجد، والذي هو النقطة المعاكسة للشمس. واحدة من هذه الصور مدرجة في فاصل الصور.

لكنك تستطيع أن تجد هالات المجد في أي مكان، لا من الطائرات فقط. عادة ما يراها من يمارسون المشي عندما يولون ظهورهم للشمس وينظرون إلى أسفل نحو الوديان المضببة. في تلك الحالات تحدث تأثيرات مرعبة جدًّا. إذ يرى هؤلاء السائرون ظلالهم مسلطة في وسط الضباب تحيطها هالة المجد، أحيانًا ما يحوطها عدد من الحلقات الملونة، تبدو كما الأشباح. تعرف هذه الظاهرة باسم شبح بروكن (وتسمى أيضًا قوس بروكن)، وقد اتُخذتْ تسميته من اسم قمة عالية بألمانيا تشيع فيها مشاهد هالات المجد. وهالات المجد التي تحوط ظلال الناس تبدو مثل هالات القديسين، والظلال نفسها تبدو كما لو جاءت من عالم آخر، حتى إنك لن تندهش عندما تعلم أن هالة المجد Glory هي في الواقع كلمة قديمة تعني حلقة الضوء التي تطوق رؤوس القديسين. وفي الصين تسمى هالاتُ المجد ضوءَ بوذا.

ذات مرة التقطتُ صورًا بديعة لظلي وهو محاط بهالة المجد، وأسميها صورة القديس والتر. ومنذ سنين عديدة كنت مدعوًّا لدى بعض أصدقائي من الفلكيين الروس لأزور تلسكوبهم الذي يبلغ ستة مترات طولًا والمشيد في جبال القوقاز. كان وقتها التلسكوب الأكبر في العالم. كان الجو مريعًا بالنسبة لشخص يريد المراقبة عن طريق التلسكوب. فكل يوم، عندما أكون هناك في حوالي الساعة الخامسة والنصف مساء أجد جدارًا من الضباب يسري من الوادي ويلف التلسكوب بالكامل؛ وعندما أقول بالكامل فأنا أعني ذلك بالمعنى الحرفي للكلمة، لدرجة أننا لم نستطع إجراء أي مراقبة طوال زيارتي للتلسكوب. في فاصل الصور ستجد صورة للضباب وهو صاعد من الوادي. لكن رفاقي الفلكيين أخبروني بأن ذلك أمر شائع الحدوث. ولذلك سألت: «فلماذا إذن شيد في هذا المكان؟». فقيل لي إنه شيد هنا لأن زوجة أحد مسؤولي الحزب أرادته هنا، فكان لها ما أرادتْ. لقد ذُهلتُ من الصدمة.

لكنني بعد عدة أيام خطرتْ ببالي فكرة أنني قد أتمكن من التقاط صورة رائعة؛ إذ كانت الشمس يوميًّا تظل قوية جهة الغرب وقت أن يأتي الضباب من الوادي جهة الشرق، وهي الظروف المثالية لحدوث هالات المجد؛ لذا ففي اليوم التالي أحضرتُ معي كاميرتي إلى المرصد، وكنتُ أخشى ألا يساعدني الضباب. لكن ما حدث أن جدار الضباب تضخم وظلت الشمس ساطعة فأوليتها ظهري. انتظرتُ وانتظرتُ ثم جاءت اللحظة، ووجدتُ هالة المجد تحوط ظلي فالتقطتُ الصورة. ما كنتُ أطيق الانتظار حتى أحمض فيلم الكاميرا – تذكر أن هذا كان قبل العصر الرقمي – وهناك

كانت صورتي، كان ظلي الشبحي الطويل وظل كاميرتي في مركز حلقات هالة المجد البديعة. تستطيع أن ترى الصورة في الفاصل.

لكنك لست مضطرًا للذهاب إلى مكان غريب كهذا لتشاهد تلك الهالة تحوط رأسك. فإذا ما نظرتَ في وقت باكر من نهار مشمس إلى ظلك الساقط على عشب نديٍّ (بالطبع لا بد أن تكون الشمس وراءك)، فستتمكن حينها من رؤية ما يسميه الألمان الهالة أو «الضوء المقدس» الذي هو وهج يحوط رأسك. (لكنه ليس ملونًا فهو ليس بهالة مجد). فقطرات الندى على العشب تعكس ضوء الشمس وتخلق ذلك التأثير. إذا جربت ذلك – وآمل أن تحاول – فستجدها أيسر في إيجادها من هالات المجد. ولأن الشمس في الصباح الباكر تكون منخفضة في السماء، فستجد ظلك طويلًا جدًّا وستبدو كرسوم العصور الوسطى الممطوطة للقديسين التي تحوطها الهالات.

لسوف يفاجئك كم الأنواع المختلفة من الأقواس والهالات التي توجد في أماكن غير متوقعة. لكن أروع مشهد رأيته كان ذات يوم مشمس من أيام يونيو من عام ٢٠٠٤ – أتذكر أنه كان يوم الانقلاب الصيفي ٢١ يونيو – عندما كنت أزور متحف دي كوردوفا في لنكولن بماساتشوستس بصحبة سوزان (التي لم تكن وقتها قد صارت زوجتي بعد) وابني وحبيبته. كنا نقطع المسافة نحو المدخل عندما ناداني ابني. وهناك أمامنا على الأرض كان قوس مذهل ملون دائري تقريبًا. (ولأنه كان وقت الانقلاب الصيفي فقد كانت الشمس في أقصى ارتفاع يمكن أن تصل إليه في بوسطن، ارتفاع يصل إلى نحو ٧٠ درجة فوق الأفق). كان مشهدًا يحبس الأنفاس.

أخرجتُ كاميرتي وشرعتُ ألتقط مجموعة كبيرة من الصور بسرعة شديدة. فقد كان ذلك بمثابة مفاجأة لي؛ إذ لم تكن هناك قطرات ماء على الأرض، وأدركت سريعًا أن هذا القوس لا يمكن أن يكون مكونًا من قطرات الماء تحت أي ظرف من الظروف؛ لأن نصف قطره كان أقل من ٤٢ درجة بكثير. لكن رغم ذلك بدا القوس مثل قوس قزح تمامًا، إذ كان الأحمر من الخارج والأزرق من الداخل، وكان هناك ضوء أبيض لامع داخل القوس. ما الذي تسبب في هذا؟ لقد أدركتُ أنه لا بد أن جسيمات شفافة كروية لشيء ما قد تسببت فيه، لكن أي شيء هذا؟

واحدة من الصور التي التقطتُها للقوس، تستطيع أن تراها في قسم الصور، كانت ممتازة الجودة لدرجة أن وكالة ناسا اتخذتها صورة اليوم الغامضة بتاريخ ١٣ سبتمبر

عام ٢٠٠٤[١]. (هو بالمناسبة موقع رائع أنصحك بمراجعته كل يوم على العنوان التالي: http://apod.nasa.gov/apod/astropix.html). تلقيتُ حوالي ثلاثة آلاف تخمين لماهية ذلك الشيء. لكن أفضل رسالة وصلتني كانت مكتوبة بخط يد وأرسلها لي بنجامين جايزلر ذو الأربعة أعوام، وكان نصها: «أظن صورتَك الغامضة صنعت بالضوء وألوان الشمع والأقلام الفسفورية وأقلام الرصاص الملونة». ولقد علقتُ هذه الرسالة على لوحة الإعلانات خارج مكتبي بالمعهد. ومن بين جميع الرسائل التي وصلتني كان نحو ثلاثين منها تسير في المسار الصحيح، لكن خمسة منها فقط أصابت كبد الحقيقة.

كان أول مفاتيح حل هذه الأحجية هو أنه كان هناك الكثير من أعمال البناء تتم في المتحف وقت زيارتنا؛ وبعبارة أكثر تحديدًا، كانت هناك كثير من عمليات السفع الرملي[٢] لجدران المتحف. أخبرني ماركوس هانكن الذي كان مسؤولاً عن العروض الفيزيائية العملية في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، والذي عملتُ معه لسنوات طوال، بأمر لم أكن أعرفه وقتها، وهو أنه أحيانًا ما كان يستخدم في عمليات السفع الرملي بعض الخرز الزجاجي. وكانت الأرض مفترشة بقدر كبير من الخرز الزجاجي حتى إنني اغترفت بعض حفنات منه وأخذتها معي إلى البيت. ما قد رأيناه هو قوس زجاج، وهو المصطلح الذي صار من فئات الأقواس الرسمية، أقواس يكونها خرز الزجاج، ولها نصف قطر يبلغ نحو ٢٨ درجة، لكن القيمة الدقيقة تعتمد على نوع الزجاج.

لم أطق أنا وماركوس الانتظار حتى نصنع واحدًا من هذه الأقواس لأجل محاضراتي. اشترينا بضعة كيلوجرامات من الخرز الزجاجي وألصقناها باستخدام الغراء على ألواح كبيرة من الورق الأسود، ثم ثبتنا الورق على لوحة الكتابة بقاعة الدراسة. ثم كنا في نهاية محاضرتي عن أقواس قزح نسلط ضوءًا على اللوح الورقي من مؤخرة القاعة. ولقد نجح الأمر إذ دعوت الطلاب لكي يأتوا الواحد تلو الآخر إلى مقدمة القاعة، إلى حيث يقفون أمام لوحة الدراسة السوداء ويجعلوا ظلالهم تسلط في منتصف القوس الزجاجي.

---

(١) لو أردت رؤية صورتي على شبكة الإنترنت ما عليك إلا أن ترجع إلى أرشيف الموقع بتاريخ ١٣ سبتمبر ٢٠٠٤. انظر النص أعلاه لعنوان الموقع بالكامل.

(٢) هي عملية تستهدف تنعيم الجدران عن طريق كشطها بالرمل (المترجم).

خلبتْ هذه التجربة لب الطلاب بشدة، لدرجة أنني أحثك على تجربتها بنفسك في منزلك؛ فصنع القوس الزجاجي ليس بالأمر العسير. فالأمر يتوقف على الأهداف التي ترمي إليها. فإذا كنت ترغب فقط في أن ترى ألوان القوس، فالأمر جد بسيط. أما إذا كنت ترمي إلى أن ترى القوس كاملًا يطوق رأسك، فالأمر يحتاج إلى مزيد من العمل.

لكي تشاهد قطعة صغيرة من القوس، لا تحتاج إلا إلى قطعة من الورق المقوى أسود اللون حجمها نحو قدم مربع واحد، ورشاش غراء شفاف (استخدمنا نحن رشاش غراء من نوع 3M's Spray Mount Artist's Adhesive، لكن أي رشاش غراء شفاف سيؤدي الغرض)، وخرز زجاجي كروي شفاف. لا بد أن يكون شفافًا كرويًا. استخدمنا «خرزًا زجاجيًا خشنًا مخصصًا للسفع» وهو خرز ذو قطر يتراوح ما بين ١٥٠ و٢٥٠ ميكرونًا، ويمكنك أن تجده على موقع: http://tinyurl.com/glassbeads4rainbow.

اشرعْ في رش الغراء على الورق المقوى، ثم انثرْ الخرز عليه. ليست المسافة التي تفصل حبات الخرز بالأمر المهم لكنها كلما تقاربت كان ذلك أفضل. كن حذرًا في استخدام الخرز، ولربما كان من الأفضل أن تقوم بالتجربة خارج المنزل حتى لا تسكب الخرز على أرضية منزلك. دع الغراء يجف، وإذا كان اليوم مشمسًا فلتخرج من المنزل.

قم بتحديد الخط التخيلي (الذي يمتد من رأسك إلى ظلها). ثم قم بوضع الورق المقوى في مكان ما على ذلك الخط، بحيث ترى ظل رأسك عليه (إذا كانت الشمس منخفضة في السماء، تستطيع أن تضع لوح الورق على كرسي ما، أما لو كانت الشمس مرتفعة فتستطيع أن تضعه على الأرض – تذكر أن حبات الخرز الزجاجي في متحف دي كوردوفا كانت أيضًا على الأرض). لك أن تختار المسافة التي تضع فيها لوح الورق المقوى بعيدًا عن رأسك. ولنفترض أنك وضعته على بعد ١,٢ متر (نحو ٤ أقدام). ثم أبعده لنحو ٠,٦ متر (قدمين) من الخط التخيلي في اتجاه عمودي عليه. تستطيع أن تحركه في أي اتجاه (يمينًا أو يسارًا أو إلى الأعلى أو إلى الأسفل) وحينها سترى ألوان القوس الزجاجي. وإذا فضَّلتَ أن تضع لوح الورق المقوى على مسافة أبعد، ١,٥ متر مثلًا (٥ أقدام)، هنا يتعين عليك أن تحركه لمسافة ٠,٧٥ متر (قدمين ونصف قدم) كي ترى ألوان القوس. قد تتساءل متعجبًا كيف توصلتُ أنا إلى تلك الأرقام، والإجابة على ذلك بسيطة تتلخص في أن نصف قطر القوس الزجاجي يبلغ نحو ٢٨ درجة.

عندما ترى الألوان تستطيع أن تحرك لوح الورق بشكل دائري حول الخط المتخيل كي تفتش عن بقية أجزاء القوس. وعندما تفعل ذلك فإنك تظهر كامل القوس قطعة قطعة، تمامًا كما فعلتَ بخرطوم مياه الحديقة.

إذا أردتَ أن تشاهد كامل القوس حول ظلك دفعة واحدة، فستحتاج قطعة أكبر حجمًا من الورق المقوى أسود اللون – قطعة حجمها متر مربع واحد ستفي بالغرض – يكون قدر أكبر من الخرز الزجاجي ملصقًا عليها بالغراء. اجعل ظل رأسك قرب مركز لوح الورق المقوى. إذا كانت المسافة التي تفصل لوح الورق المقوى عن رأسك تبلغ نحو ٨٠ سنتيمترًا (نحو قدمين ونصف قدم)، فستشاهد على الفور كامل قوس الزجاج. لكنك إذا أبعدتَ لوح الورق المقوى لمسافة بعيدة جدًّا، لنقل ١,٢ متر (٤ أقدام)، فلن تستطيع مشاهدة كامل القوس. لك الخيار، فلتستمتع بالأمر.

إذا لم يكن اليوم مشمسًا، فيمكنك أن تحاول إجراء التجربة داخل المنزل، تمامًا كما فعلتُ أنا في محاضراتي، عن طريق توجيه شعاع من الضوء القوي جدًّا – مثل كشاف قوي – على حائط ألصقتَ أنت عليه ورقًا مقوى. قف بحيث يكون الضوء خلفك ويكون ظل رأسك في مركز قطعة الورق المقوى التي يبلغ حجمها مترًا مربعًا واحدًا. إذا وقفتَ على بعد ٨٠ سنتيمترًا من لوح الورق فستتمكن من مشاهدة كامل القوس يطوق رأسك. مرحبًا بك داخل قوس الزجاج.

بالطبع، لسنا في حاجة إلى فهم سبب تكون قوس قزح أو قوس الضباب أو قوس الزجاج كي نقدر جمالها، لكن فهمنا لفيزياء أقواس قزح يمنحنا أعينًا جديدة نراها بها (أسمي أنا ذلك جمال المعرفة). إنها تجعلنا أكثر تنبهًا لتلك العجائب الصغيرة التي نستطيع أن نجدها ذات صباح يلفه الضباب، أو داخل الحمام، أو أثناء مرورنا بالقرب من إحدى النوافير، أو عندما نحدق من نافذة الطائرة أثناء تحليقنا بينما بقية الركاب يشاهدون الأفلام. آمل أنك في المرة القادمة التي تستشعر وجود قوس قزح ستولِّي الشمس ظهرك وتلتفت بدرجة ٤٢ درجة بعيدًا عن الخط التخيلي كي ترى الحافة العليا الحمراء لقوس قزح المجيد، ذلك الذي يشق السماء.

إليك ما أتنبأ به. في المرة القادمة التي ترى فيها قوس قزح، سوف تتأكد من أن اللون الأحمر خارج القوس واللون الأزرق داخله، ولسوف تحاول إيجاد القوس الثانوي، وستتأكد من أن الألوان فيه معكوسة؛ وسترى السماء ساطعة داخل القوس

الرئيسي وأكثر إعتامًا خارجه؛ وإذا كنتَ تحمل معك مستقطِبًا خطيًّا (كما يجدر بك دائمًا)، فستتيقن من أن القوسين كليهما مستقطَبان جدًّا. لن تستطيع مقاومة فعل ذلك. إنه مرض سيتلبسك طوال ما بقي من عمرك. إنه خطئي، لكنني لن أستطيع علاجَك، بل إنني لستُ آسفًا عليه، مطلقًا.

# الفصل السادس

# تناغمات الأوتار والرياح

في العاشرة من عمري أخذتُ دروسًا في العزف على الكمان، لكنني فشلتُ فشلًا ذريعًا، فتوقفتُ بعد عام واحد. ثم أخذتُ دروسًا في عزف البيانو عندما كنت في العشرينيات من عمري وفشلتُ فشلًا ذريعًا مرة أخرى. ما زلتُ حتى الآن لا أفهم كيف لبعض الناس أن يقرؤوا نوتات موسيقية ويحولوها إلى موسيقى مستخدمين أصابع يديهم العشرة. إنني أقدر الموسيقى تقديرًا كبيرًا، لكنني ورغم ارتباطي العاطفي بها قد فهمتها من خلال الفيزياء. بل إنني أحب فيزياء الموسيقى، والتي تبدأ بالطبع من فيزياء الصوت.

لعلك تعلم أن الصوت يبدأ بذبذبات أو ذبذبات سريعة جدًّا تحدث لآلة ما، على غرار سطح طبلة أو شوكة رنانة أو وتر كمان. تلك الذبذبات واضحة جدًّا، أليس كذلك؟ لكن ما يحدث حقيقة عندما تتذبذب هذه الأشياء ليس واضحًا جدًّا لأنه عادة ما يكون غير مرئي.

حركة الشوكة الرنانة إلى الأمام والخلف تقوم أولًا بضغط الهواء الأقرب إليها؛ ثم، عندما تتحرك في الاتجاه الآخر، تزيل الضغط عن الهواء القريب منها. وهذه الحركة التي يتبادل فيها الشد والجذب تخلق موجة في الهواء، موجة من الضغط نسميها موجة صوتية. تصل هذه الموجة إلى آذاننا بسرعة شديدة تبلغ نحو ٣٤٠ مترًا في الثانية (نحو ميل واحد في خمس ثوان، أو كيلومتر واحد في ثلاث ثوان). تلك هي سرعة الصوت في الهواء في درجة حرارة الغرفة. لكن هذه السرعة تتغير تغيرًا كبيرًا اعتمادًا على الوسيط الذي تنتقل الموجة خلاله. فسرعة الصوت في الماء أكبر من سرعتها في الهواء بأربع مرات، وهي في الحديد أسرع بخمس عشرة مرة.

أما سرعة الضوء (وجميع أنواع الإشعاع الإلكترومغناطيسي) في الفراغ فهي من الثوابت المشهورة ويشار إليها بالحرف $c$، وتبلغ نحو ٣٠٠,٠٠٠ كيلومتر في الثانية (قد

تكون تعرفها ١٨٦,٠٠٠ ميل في الثانية)، لكن سرعة الضوء المرئي تحت الماء تتباطأ بمقدار الثلث.

لنعد الآن إلى الشوكة الرنانة. عندما تصطدم الموجة التي تنتجها الشوكة بآذاننا، فهي تدفع طبلات آذاننا إلى الداخل والخارج في ذات الوقت بالضبط وبمعدل التذبذب ذاته، حسبما تضغط الشوكة على الهواء. ثم عن طريق عملية بالغة التعقيد، تذبذب طبلةُ الأذن عظامَ الأذن الوسطى التي تتألف من أقسام سُميتْ تسميات رائعة، هي: المطرقة والسندان والرِّكاب، وهي تنتج موجات داخل السائل الموجود في الأذن الداخلية. ثم تتحول هذه الموجات إلى نبضات كهربية عصبية ترسل إلى المخ، ثم يترجم مخك هذه الإشارات إلى صوت. يا لها من عملية.

للموجات الصوتية – أو بالأحرى لجميع أنواع الموجات – ثلاثة خصائص أساسية، ألا وهي: التردد والطول الموجي والسعة. أما التردد فهو عدد الموجات التي تمر بنقطة معينة خلال مدة زمنية معينة. لو كنت يومًا تراقب أمواج المحيط من فوق متن قارب أو سفينة، فقد تلاحظ أن عشر موجات تمر كل دقيقة، وهكذا نستطيع أن نقول إن لها ترددًا قدره عشرة في الدقيقة. لكننا عادة نقيس تردد التذبذب بالثانية، وهو ما يعرف أيضًا بالهرتز، أو Hz حيث تساوي الـ ٢٠٠ ذبذبة في الثانية ٢٠٠ هرتز.

أما عن الطول الموجي فهو المسافة بين قمتي موجتين أو قاعيهما. واحدة من أهم خصائص الموجات هي أنه كلما زاد ترددها، قصر طولها الموجي، وكلما طال طولها الموجي نقص التردد. إلى هنا قد وصلنا إلى مجموعة من العلائق المهمة جدًّا في الفيزياء، تلك التي بين السرعة والتردد والطول الموجي للموجات. فالطول الموجي للموجة هو سرعتها مقسومة على ترددها. ينطبق ذلك على الموجات الإلكترومغناطيسية (الأشعة السينية والضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء والموجات الراديوية) وكذلك على الموجات الصوتية في حوض الاستحمام، والموجات في المحيط. فمثلًا الطول الموجي في الهواء لنغمة قدرها ٤٤٠ هرتز (الـ A الأوسط في البيانو) يساوي ٣٤٠ مقسومًا على ٤٤٠ أي ٠,٧٧ متر (نحو ٣٠ بوصة).

إذا فكرتَ في الأمر دقيقة فستجده يتماشى جدًّا مع المنطق. فبما أن سرعة الصوت ثابتة في أي وسيط تنتقل خلاله (عدا في الغازات حيث يتوقف الأمر على درجة حرارتها)، وكلما ازداد عدد الموجات الصوتية في فترة معينة من الزمن ازداد قصر الموجات الصوتية؛ وذلك حتى يتسنى لكل واحدة منها أن تجد لها مكانًا في تلك

الفترة الزمنية المحددة. والعكس كذلك صحيح بالطبع، فكلما قل عدد الموجات في الفترة الزمنية المحددة ازداد طولها. ولأنواع الطول الموجي المتعددة مقاييس مختلفة. فمثلًا تقاس الأطوال الموجية لموجات الصوت بالأمتار، بينما تقاس نظيرتها لدى موجات الضوء بوحدة النانومتر (النانومتر الواحد يساوي ١ على مليار من المتر).

ماذا عن السعة؟ فلنرجع إلى مشهد مراقبة الأمواج من فوق متن قارب في المحيط. سوف ترى بعض الأمواج أعلى من غيرها، رغم أن لها جميعًا ذات الطول الموجي. وتلك الخصيصة الموجية تسمى السعة. وسعة الموجة الصوتية تحدد مدى علو الصوت ونعومته. بمعنى أنه كلما زادت سعة الموجة علا الصوت، والعكس صحيح. وذلك مرده إلى أنه كلما عظمتْ سعة الموجة، عظمت الطاقة التي تحملها. وكما قد يخبرك أي راكب للأمواج، كلما طال ارتفاع موجة البحر عظمتْ طاقتها. وعندما تداعب أنت أوتار الجيتار بقوة، تسلط عليها قدر أكبر من الطاقة؛ مما يسبب صوتًا أعلى. وسعة الموجات المائية تلك تقاس بالأمتار والسنتيمترات. وسعة الموجة الصوتية في الهواء هي المسافة التي تتحرك فيها جزيئات الهواء للأمام والخلف في موجة الضغط، لكننا لا نعبر عنها بهذه الصيغة أبدًا. ما نفعله هو أننا نقيس شدة الصوت، التي يعبر عنها بوحدة الديسيبل. صحيح أن مقياس الديسيبل معقد جدًّا، إلا أنك لحسن الحظ لا تحتاج للخوض فيه.

ونغمة الصوت، التي تعني مدى علوه أو انخفاضه على السلم الموسيقي، يحددها التردد. فكلما زاد التردد، علت النغمة؛ وكلما قل التردد، انخفضت النغمة. وأثناء عزف الموسيقى لا نفتأ نحن نغير التردد طوال الوقت.

للأذن البشرية قدرة على سماع نطاق هائل من الترددات يتدرج من نحو ٢٠ هرتز (أخفض النوتات الموسيقية على البيانو ترددها ٢٧,٥ هرتز) حتى يصل إلى نحو ٢٠,٠٠٠ هرتز. في قاعة الدراسة لديَّ طريقة توضيحية عملية رائعة، إذ إنني أُشغّل آلةً تنتج أصواتًا تسمى مقياس السمع، وهي الآلة التي تستطيع بث ترددات مختلفة بدرجات شدة مختلفة. ما أفعله هو أنني أطلب من الطلاب أن يظل كل منهم رافعًا يده طالما يسمع الصوت. ثم أقوم أنا بزيادة التردد تدريجيًّا. عندما نتقدم في السن يفقد معظمنا القدرة على سماع الترددات العالية. كان أعلى تردد سمعته يقترب من ٤٠٠٠ هرتز، أي أربعة أوكتافات فوق النوتة c الوسطى في نهاية لوحة مفاتيح البيانو. لكن طلابي كانوا قادرين على سماع ترددات أعلى بعد أن توقفتُ أنا عن سماع أي صوت

منذ فترة طويلة. ثم أرفع مستوى الترددات حتى ١٠,٠٠٠ و١٥,٠٠٠ هرتز، فأجد بعض الأيدي تتساقط. وعند تردد ٢٠,٠٠٠ هرتز لا أجد سوى نصف الأيدي فقط مرفوعة. ثم أتخذ في الأمر وتيرة أبطأ فأرفع الترددات على نحو: ٢١,٠٠٠ ثم ٢٢,٠٠٠ ثم ٢٣,٠٠٠. وعندما أصل إلى ٢٤,٠٠٠ هرتز لا أجد عادة إلا بضع أيادٍ مرفوعة. عند هذه النقطة أداعبهم أنا بمزحة صغيرة، فأوقف الآلة وأتظاهر بعدها برفع التردد إلى ٢٧,٠٠٠ هرتز. هنا يدعي واحد أو اثنان من الطلاب الشجعان أنهم يسمعون تلك النوتات الخارقة في ارتفاعها – لكنني بعدها أكشف عن الخدعة. تجربة يفعمها المرح.

والآن فلتفكر كيف تعمل الشوكة الرنانة. مهما كانت القوة التي تضرب بها الشوكة الرنانة يظل عدد ذبذبات أسنانها الذي يحدث في الثانية ثابتًا لا يتغير. ومن ثم فإن تردد الموجات الصوتية التي تنتجها يظل كذلك ثابتًا لا يتغير. ولذلك فهي دائمًا تعزف ذات النوتة الموسيقية. لكن رغم ذلك تزداد سعة تذبذب أسنانها عندما تضرب بقوة أشد. تستطيع أن ترى ذلك إذا قمت بتصوير الشوكة وهي تضرب ثم تشاهد الفيلم بالتصوير البطيء. سوف ترى أسنان الشوكة تتحرك أمامًا وخلفًا، وستزداد حركتها عندما تضربها بقوة أكبر. وبما أن السعة قد زادت فإن النوتة التي تنتجها لا بد أن تعلو، لكن لأن الأسنان تواصل تذبذبها بذات التردد تظل النوتة كما هي. أليس ذلك غريبًا؟ لو فكرتَ في الأمر دقيقةً لوجدتَ الأمر يشبه بالضبط حركة البندول (في الفصل الثالث)، حيث الفترة الزمنية (وقت اكتمال ذبذبة واحدة) لا علاقةَ لها بسعة تأرجح أسنان الشوكة.

## هل توجد موجات صوتية في الفضاء؟

هل تتحقق علائق الصوت تلك خارج الأرض؟ هل سمعتَ يومًا أنه لا صوت في الفضاء؟ يعني ذلك أنه مهما كانت الحيوية التي تعزف بها على البيانو فوق القمر، فلن ينتج عن ذلك أي صوت. أيمكن أن يكون ذلك صحيحًا؟ نعم، فليس للقمر غلاف جوي؛ فهو أساسًا فراغ. لذا فإن لك أن تستنتج حقيقة محزنة مفادها أنه حتى أعظم الانفجارات الناتجة عن تصادم النجوم والمجرات بعضها مع بعض تحدث في صمت تام. بل إن الانفجار العظيم نفسه، ذلك الانفجار الأول الذي خلق كوننا منذ ما يقرب من ١٤ مليار عام، قد تم في صمت تام. لكن تريث هنيهة؛ فالفضاء، مثله مثل معظم ما في هذه الحياة، أكثر فوضوية وتعقيدًا عما كنا نظن منذ عقود قلائل مضتْ.

رغم أن أيًا منا قد يهلك على الفور جراء نقص الأكسجين إذا حاولنا التنفس في الفضاء، لكن، في واقع الأمر، الفضاء الخارجي، بل والفضاء العميق، ليس فراغًا مثاليًا. لكن هذه المصطلحات نسبيةٌ. ففضاء ما بين النجوم وفضاء ما بين المجرات يفوق أي فراغ نستطيع صنعه على الأرض، من حيث قربه للفضاء المثالي. لكن رغم ذلك فالحقيقة أن المادة التي تطفو في الفضاء تتسم بخصائص هامة ومميزة.

معظم تلك المادة يسمى البلازما، والتي هي عبارة عن مجموعة من الغازات المؤينة – وهي غازات مؤلفة كليًا أو جزئيًا من جسيمات ذات شحنة، مثل نويات الهيدروجين (البروتونات) والإلكترونات – التي تتباين جدًا في كثافتها. والبلازما موجودة في نظامنا الشمسي ونسميها عادة الرياح الشمسية التي تنبعث خارجة من الشمس (وهي الظاهرة التي بذل برونو روسي مجهودًا كبيرًا كي يعمق من فهمنا لها). وتوجد البلازما أيضًا بين النجوم والمجرات (وحينها نسميها الوسيط بين النجمي) بل وحتى بين المجرات (وحينها نسميها الوسيط بين المجرات). يعتقد معظم الفيزيائيين أن أكثر من ٩٩,٩ من المادة القابلة للملاحظة في الكون هي بلازما.

فلتفكر في الأمر. متى توجد المادة، يمكن لموجات الضغط (ومن ثم الموجات الصوتية) أن تنتج وتنتقل. ولأن البلازما توجد في كل مكان في الكون (وفي نظامنا الشمسي أيضًا)، فهناك الكثير من الموجات الصوتية رغم أننا لا نستطيع سماعها. آذاننا المحدودة تستطيع أن تسمع نطاقًا واسعًا من الترددات – يبلغ أكثر من ثلاثة قيم أسية – لكننا لا نستطيع سماع موسيقى الأجرام السماوية.

دعني أضرب لك مثالًا. في عام ٢٠٠٣، اكتشف الفيزيائيون تموجات في الغاز المفرط في الحرارة (البلازما) الذي يحوط أحد الثقوب، الذي يقع في مركز إحدى المجرات التي تقع في عنقود برشيوس المجري، والذي هو عبارة عن مجموعة مؤلفة من آلاف المجرات تبعد عن الأرض بنحو ٢٥٠ مليون سنة ضوئية. كانت هذه التموجات تدل بكل وضوح على موجات صوتية سببها انبعاث كميات كبيرة من الطاقة بعد ابتلاع الثقب الأسود للمادة. (سوف أتطرق إلى الثقوب السوداء بتفصيل أكثر في الفصل الثاني عشر). قام الفيزيائيون بحساب تردد تلك الموجات فوجدوا نغمته B مسطحة، لكن نغمة B المسطحة منخفضة جدًا لدرجة أنها تبلغ ٥٧ أوكتافًا (حوالي معامل $10^{17}$) تحت نغمة الـ C الوسطى، التي يبلغ ترددها نحو ٢٦٢ هرتز. تستطيع أن ترى هذه الموجات الكونية على موقع:

http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/200309/sep_blackholesounds/.

والآن لنرجع إلى الانفجار العظيم. لو كان ذلك الانفجار الأول الذي أوجد كوننا قد أنتج موجات ضغط في المادة الأقدم – المادة التي تمددت بعدها ثم بردت خالقة المجرات والنجوم ثم الكواكب في النهاية – إذن فإنه يمكننا أن نرى بقايا هذه الموجات الصوتية. حسب الفيزيائيون مدى التباعد الذي كان يجدر بتموجات البلازما القديمة أن تكون عليه (نحو ٥٠٠,٠٠٠ سنة ضوئية) ومدى التباعد الذي يجب أن تكون عليه الآن بعد أن ظل الكون يتمدد لأكثر من ١٣ مليار سنة؛ فخلصوا إلى أن تلك المسافة قدرها ٥٠٠ مليون سنة ضوئية.

هنالك مشروعان كبيران لرسم خرائط المجرات يجريان اليوم – مشروع مسح سلون الرقمي للسماء في نيومكسيكو، ومشروع مسح الانزياح الأحمر المجرّي ذو الدرجتين في أستراليا. قام هذان المسحان بالتفتيش عن هذه التموجات في توزيع المجرات، واكتشف كل منهما مستقلًا ... خمن ماذا اكتشفا؟ اكتشفا «أن المجرات حاليًا تميل قليلًا لأن تكون متباعدة بعضها عن بعض بمسافة تقدر بـ ٥٠٠ مليون سنة ضوئية، لا أي مسافة أخرى». إذن فقد نتج عن الانفجار العظيم صوت كصوت الناقوس القرصي، صار طوله الموجي الآن نحو ٥٠٠ مليون سنة ضوئية، بلغ تردده نحو خمسين أوكتاف (معامل قدره $10^{10}$) أي إنه أدنى من الحد الذي يمكن لآذاننا سماعه. كان الفلكي مارك ويتل يعبث كثيرًا بما سماه بصوتيات الانفجار العظيم، وتستطيع أنت كذلك أن تفعل هذا عن طريق موقع: www.astro.virginia.edu/~dmw8f/BBA_web/index_frames.html.

على هذا الموقع تستطيع أن ترى وتسمع كيف قام هو بشكل متزامن بضغط الزمن (تحويل كل ١٠٠ مليون سنة إلى ١٠ ثوان) ورفع نغمة خمسين أوكتافًا الخاصة بالكون في بدايته بشكل اصطناعي، حتى تتمكن من الاستماع إلى «الموسيقى» التي خلقها الانفجار العظيم.

مكتبة
t.me/soramnqraa

## عجائب الصدى

تلك الظاهرة التي نسميها الصدى هي سبب أشياء كثيرة لم تكن لتوجد لولاه، أو

كانت ستصير أقل إثارة للاهتمام. ولا يقتصر الأمر على الموسيقى، بل يمتد أيضًا إلى أجهزة الراديو والساعات والترامبولين والأرجوحات والحواسيب وصفارات القطارات وأجراس الكنائس والتصوير بالرنين المغناطيسي، التي أجريتها على ركبتك أو كتفك (هل كنتَ تعلم أن حرف الـ "R" في اسم تلك الأشعة يشير إلى كلمة Resonance أي صدى؟).

فما هو الصدى على وجه الدقة؟ يمكن أن تشعر به قليلًا بينما تدفع طفلًا على أرجوحة. إنك تدرك بشكل طبيعي أنك تستطيع إنتاج سعات كبيرة للأرجوحة بمجهود قليل جدًّا. يُعزى ذلك إلى أن للأرجوحة — وهي في الأصل بندول — تردد محدد مميز (الفصل الثالث)؛ فإذا ضبطتَ توقيت دفعاتك بدقة بحيث تتزامن مع ذلك التردد، عندئذٍ دفعة أخرى بسيطة سيكون لها تأثير تراكمي على درجة الارتفاع الذي ستصل إليه الأرجوحة. ومن ثم، يمكنك زيادة الارتفاع الذي يصل إليه طفلك على الأرجوحة بلمسات خفيفة بإصبعين من أصابعك فقط.

عندما تفعل ذلك، فأنت تعتمد على ظاهرة الصدى. والصدى في الفيزياء هو نزوع شيء ما – سواء كان بندولًا أو شوكة رنانة أو وتر كمان أو كأس نبيذ أو ظهر طبلة أو كمرة معدنية أو ذرة أو إلكترونًا أو نواة أو حتى عمود من الهواء – إلى الذبذبة بقوة أكبر عند ترددات معينة، أكثر منها في غيرها. نسمي تلك الترددات بترددات الصدى (أو الترددات الطبيعية).

فالشوكة الرنانة، على سبيل المثال، مصنوعة بحيث تتذبذب دائمًا عند تردد الصدى. لو فعلتْ ذلك عند ٤٤٠ هرتز فإنها تخلق النوتة المعروفة باسم كونسرت إيه Concert A، والـ A تعلو الـ C في البيانو. مهما كانت الذبذبة التي تستطيع أن تصنعها بالشوكة فإن أسنانها لن تتذبذب أو تتحرك أمامًا وخلفًا إلا ٤٤٠ مرة في الثانية.

لكل المواد ترددات صدى، وإذا استطعتَ إضافة الطاقة إلى نظام ما أو جسم ما فستجده يتذبذب عند هذه الترددات، التي عندها تحتاج القليل من الطاقة المدخلة لإحداث نتيجة كبيرة. فمثلًا عندما تنقر على كوب فارغ رقيق بملعقة، أو تحك حافته بإصبع مبتل، فستجده يرن بنغمة معينة – وهو ما يعرف بتردد الصدى. ليس الصدى بالأمر المسلم بحدوثه دون مجهود، رغم أنه أحيانًا يبدو كذلك. لكن عند ترددات الصدى، تستفيد الأجسام أيما استفادة من الطاقة التي تدخل إليها.

حبال القفز كذلك تعمل بذات المبدأ. إذا أمسكتَ بأحد طرفي الحبل فإنك تعلم أن الأمر سيستلزم بعض الوقت كي تتمكن من أرجحة الحبل في شكل قوسي متناسق – على الرغم من أنك تشرع في تدوير يديك وأنت تحمل طرف الحبل محاولًا تكوين ذلك القوس، فإن الجزء الأساسي في الحركة هو حينما تقفز إلى أعلى وإلى أسفل أو إلى الأمام وإلى الخلف مذبذبًا الحبل. في لحظة معينة يبدأ الحبل في التأرجح في شكل قوسي بهيج؛ حتى إنك لا تحتاج إلا إلى حركة بسيطة جدًّا لتجعله يواصل التأرجح، ويستطيع أصدقاؤك أن يبدؤوا القفز في منتصف القوس، بعد أن يضبطوا قفزاتهم على تردد صدى الحبل.

هناك شيء ربما لم تكن على علم به وأنت تلهو في ساحة اللعب، وهو أن واحدًا فقط ممن يمسكان بالحبل هو الذي يتعين عليه تحريك يده – بينما لا يحتاج الآخر إلا إلى أن يمسك بالطرف الآخر فيتأرجح الحبل بشكل مثالي. السر يكمن في أنكما أنتما الاثنان قد وصلتما إلى أقل تردد لصدى الحبل، وهو ما يسمى أيضًا بالتردد الأساسي. لولا هذا فإن اللعبة التي نعرفها باسم اللعب على الحبلين، والتي يؤرجح فيها شخصان حبلين في اتجاهين متضادين؛ ستكون مستحيلة. أما ما يجعل الحبلين قابلين للحركة في اتجاهين متضادين بينما يمسكهما ذات الأشخاص، هو أن كلا الحبلين لا يحتاجا إلا إلى قدرٍ قليلٍ جدًّا من الطاقة ليستمرَا في الحركة. بما أن يديك هما القوة المحركة هنا، فإن حبل القفز يصير ما نسميه بالمذبذب المُحَرَك. ما إن تصل إلى صدى الحبل حتى تدرك بشكل بديهي أنك تحتاج إلى أن تظل على هذا التردد، ولذلك لا تحرك يديك بمعدل أسرع.

إذا حركتَ يدك فستجد ذلك القوس الأنيق الدوار ينكسر ويأخذ الحبل في التمايل، مما يزعج القافز. غير أن حبلك إذا كان طويلًا بما يكفي وتمكنتَ أنت من هز طرفه بسرعة أكبر، فسرعان ما سيشكل قوسين أحدهما ينزل إلى أسفل والآخر يصعد إلى أعلى، بينما تظل نقطة الوسط فيه ثابتة. نسمي نحن هذه النقطة الوسطى: نقطة التفرع. في تلك اللحظة، يستطيع اثنان من رفاقك القفز كل فوق واحد من القوسين. لعلك قد شاهدتَ مثل ذلك في السيرك. ما الذي يجري هنا؟ إنك في تلك اللحظة قد حققتَ تردد الصدى الثاني. فالحبل، كأي شيء، يمكن أن يكون له أكثر من تردد صدى، وهو الأمر الذي ما سآتي على شرحه تفصيلًا بعد لحظة. فلحبلك ترددات صدى عُليا كذلك، وذلك ما سأريك إياه.

إنني أستخدم حبال القفز في قاعة الدراسة لإظهار تتعدد ترددات الصدى، بأن أقوم بتعليق حبل وحيد يبلغ نحو عشرة أقدام طولًا بين قضيبين عموديين. عندما أحرك أحد طرفي الحبل لأعلى وأسفل (لبوصة واحدة أو ما نحوها)، مذبذبًا إياه على أحد القضيبين باستخدام محرك صغير أستطيع تغيير تردده، سرعان ما أجده يسير على أدنى مستويات تردده، والذي نسميه التردد الأول المتناغم (ويسمى أيضًا التردد الأساسي) ويصنع قوسًا واحدًا كما في حبل القفز. وعندما أقوم بذبذبة طرف الحبل بسرعة أكبر سرعان ما نرى قوسين كما لو كان كل منهما انعكاسًا لصورة الآخر في المرآة. نسمي ذلك التردد المتناغم الثاني، وهو التردد الذي يحدث عندما يصل التذبذب إلى ضعف تذبذب التردد المتناغم الأول. ومن ثم فإذا كان التردد المتناغم الأول يبلغ ٢ هرتز أي ذبذبتين في الثانية، فإن التردد المتناغم الثاني سيكون ٤ هرتز. وإذا واصلنا زيادة الذبذبة حتى نصل إلى ثلاثة أمثال التردد المتناغم الأول، أي إلى ٦ هرتز، فحينها سنكون قد بلغنا التردد المتناغم الثالث. سنرى الوتر ينقسم إلى ثلاثة أثلاث مع نقطتي تفرع لا تتحركان، في حين تتبادل الأقواس الارتفاع والانخفاض بينما يتحرك طرف الحبل لأعلى ولأسفل ست مرات في الثانية.

أتذكر حين قلنا إن أخفض نوتة نستطيع سماعها يبلغ ترددها ٢٠ هرتز؟ ولذلك لا تستطيع سماع أي موسيقى من العزف على حبل قفز؛ إذ إن تردده خفيض جدًّا. لكنك إذا عزفتَ على وتر من نوع آخر – كوتر كمان أو وتر تشيللو – فسترى أمرًا آخر بالكلية. فلتعزف على الكمان؛ صدقني، أنت لا ترغب في أن أعزف أنا؛ فعزفي لم يتحسن خلال الستين عامًا السابقة.

كي يتسنى لك أن تستمع إلى نوتة جنائزية عذبة طويلة على آلة كمان، هناك قدر كبير من الفيزياء لا بد أن يتحقق. إن الصوت الذي ينبع من وتر كمان أو تشيللو أو قيثارة أو جيتار – أو أي وتر أو حبل – يعتمد على عوامل ثلاثة، ألا وهي: طوله، وانشداده، ووزنه. كلما زاد طول الوتر قل توتره، وكلما ثقل الوتر قلت حدته. والعكس بالطبع صحيح؛ كلما قصر الوتر زاد توتره، وكلما خف وزنه زادت حدته. لذلك فكلما عاد الموسيقيون إلى آلاتهم بعد طول توقف عن العزف، يتعين عليهم أن يعيدوا تعديل انشداد أوتارها؛ حتى يتمكنوا من إنتاج الترددات الصحيحة، أو النوتات الصحيحة.

لكن هنا يكمن السحر. عندما تمسد عازفة الكمان وتر آلتها بقوسها تسلط عليه حينئذ طاقة، وذلك الوتر يقوم بشكل أو بآخر بانتقاء ترددات صداه بنفسه (من بين جميع

الذبذبات الممكنة). والأكثر إثارة للعجب أيضًا أن الوتر يتذبذب على أكثر من تردد بشكل متزامن (أكثر من تناغم). لا يشبه الأمر حالة الشوكة الرنانة التي لا تتذبذب إلا بتردد واحد.

هذه التناغمات الإضافية (ذات الترددات الأعلى من نظيراتها الأساسية) تسمى عادة النغمات الزائدة. ذلك التبادل بين ترددات الصدى المتنوعة، الأضعف منها والأقوى – خليط التناغمات – هو الذي يمنح نوتات الكمان أو التشيللو ما يعرف تقنيًا بلونه أو طابعه، الذي نعرفه نحن باسم الصوت المميز. ذلك هو الفارق بين الصوت الذي ينتجه تردد وحيد نابع من شوكة رنانة أو جهاز لقياس السمع أو رسالة طوارئ تُبث من المذياع، وذلك الصوت الأكثر تعقيدًا الذي تنتجه الآلات الموسيقية، التي تتذبذب بترددات متعددة متناغمة بشكل متزامن. وتلك الأصوات المميزة لآلات الترومبيت والأوبوي والبانجو والبيانو والكمان مردُّها إلى خليط الترددات المتناغمة التي تتفرد كل آلة بإنتاجها. لَكم أحب أن أتخيل ساقيًا كونيًّا غير مرئيّ خبيرًا في تخليق المئات من الأخلطة المتناغمة المختلفة، والذي يستطيع أن يقدم لأحد زبائنه البانجو ويقدم لآخر الطبلة ولثالث الإرهو أو الترومبون.

أولئك الذين صنعوا أولى الآلات الموسيقية كانوا عباقرة؛ لأنهم أبدعوا ميزة حيوية أخرى تتيح لنا الاستمتاع بأصواتها. ولكي يسمع المرء الموسيقى فعلى الموجات الصوتية أن تكون ضمن نطاق الترددات التي يستطيع المرء سماعها، ولا يقتصر الأمر على ذلك، بل لا بد أن تكون تلك الموجات عالية كذلك حتى يمكنك من سماعها. للتعبير عن الأمر ببساطة نقول إن نقر الوتر على سبيل المثال لا ينتج صوتًا عاليًا يجعلك تسمعه من بعد. تستطيع أن تسلط قدرًا أكبر من الطاقة (ومن ثم الموجات الصوتية التي ينتجها) عن طريق نقر الوتر نقرًا أقوى، لكنك قد لا تنتج صوتًا قويًّا. لكن لحسن الحظ أدرك البشر منذ أعوام عديدة، قبل ألف عامٍ على الأقل، كيفية صنع أوتار آلات صوتها مرتفع بما يكفي ليكون مسموعًا خلال أرض واسعة أو عبر الغرفة.

وبإمكانك إعادة تمثيل تلك المشكلة التي واجهها أسلافنا ثم حلها. فلتأخذ وترًا طوله قدم واحد، ثم اعقد أحد طرفيه بمقبض باب أو بمقبض أحد الأدراج، واجذب الطرف الآخر حتى يصير الوتر مشدودًا، ثم انقره بإصبعك. لا يُصدر صوتًا مرتفعًا، أليس كذلك؟ صحيح أنك تستطيع سماعه، وتستطيع كذلك بناء على طول الوتر وسمكه ومدى توتره أن تُصدر نوتة جيدة. لكن الصوت لا يكون بتلك القوة، أليس كذلك؟ لن

يسمعه أحد من الغرفة المجاورة. الآن فلتأت بكوب بلاستيكي وتمرر الوتر من داخل الكوب البلاستيكي، ثم أمسك بالحبل بزاوية بعيدة عن المقبض (حتى لا ينزلق ناحية يدك) ثم انقر الوتر، حينها سوف تسمع صوتًا أقوى. لماذا؟ لأن الوتر ينقل بعضًا من طاقته إلى الكوب، الذي صار الآن يتذبذب بذات التردد، إلا أنه ذو سطح أكبر بكثير فتُنقل من خلاله الذبذبات إلى الهواء. ونتيجة لذلك تسمع صوتًا أعلى.

إنك بكوبك ذلك قد برهنتَ على مبدأ لوحة الرنين، وهو مبدأ جوهري فيما يتعلق بجميع الآلات الوترية من الجيتار إلى الكونترباص إلى الكمان والبيانو. عادة ما تصنع تلك اللوحات من الخشب وهي تلتقط ذبذبات الأوتار وتنقل هذه الترددات إلى الهواء مما يعظم صوت الأوتار.

تسهُل رؤية لوحات الصوت في آلات الجيتار والكمان. وفي آلات البيانو الضخمة نجد لوحة الصوت مسطحة أفقية مستقرة تحت الأوتار الموضوعة بشكل رأسي على قائم يعتلي لوحة الصوت. وفي القيثارة نجد لوحة الصوت عادة هي القاعة التي تتصل بها الأوتار.

في قاعة الدرس، أقدم عرضًا عمليًا لأعمال لوحة الصوت بطرائق مختلفة. في واحدة من طرقي الإيضاحية أستخدم آلة موسيقية صنعتها ابنتي إيما في روضة الأطفال. وهي تتألف من وتر عادي متصل بصندوق ورق مقوى من صناديق دجاج كنتاكي المقلي. تستطيع تغيير انشداد الوتر عن طريق استخدام قطعة من الخشب. هو أمر ممتع للغاية؛ لأنني كلما غيرت انشداد الوتر ترتفع حدة الصوت. لقد كان صندوق دجاج كنتاكي المقلي لوحة صوت مثالية، وكان بإمكان طلابي سماع نقراتي على الوتر من مسافة بعيدة. واحدة أخرى من تجاربي المفضلة كنت أجريها باستخدام صندوق موسيقى ابتعته منذ سنين عديدة من النمسا؛ وهو صندوق لا يتعدى حجمه حجم علبة ثقاب ولا تتصل به أي لوحة صوت. عندما تدير ذراعه تصدر الموسيقى من أسنانه المتذبذبة. ما أفعله هو أنني أدير ذراع صندوق الموسيقى في قاعة الدراسة، لكن لا أحدَ ممن في القاعة يسمع شيئًا، ومن بينهم أنا. لكنني بعدها أضعه على طاولة المعمل وأديره مرة أخرى. الآن صار الجميع يسمع صوت الموسيقى ومن بينهم أولئك الطلاب الجالسين في مؤخرة قاعة الدرس الكبيرة. لا يفتأ ذلك الأمر يدهشني، فحتى أبسط لوحات الصوت لها تأثير كبير.

لكن ذلك لا يعني أن هذه اللوحات لا تنطوي أحيانًا على فن حقيقي. فصناعة لوحات الصوت ذات الجودة العالية التي تستخدم في الآلات الموسيقية يحوطه قدر كبير من السرية؛ فشركة ستاينواي آند سانس لن تفصح لك أبدًا عن طريقة صناعة لوحات صوت آلات البيانو ذائعة الصيت التي تنتجها. لعلك قد سمعت عن عائلة ستراديفاريوس التي اشتهرت في القرنين السابع عشر والثامن عشر، وهي العائلة التي كانت تصنع أروع آلات الكمان وأكثرها طلبًا. حاليًا هناك حوالي ٥٤٠ آلة من آلات ستراديفيروس فقط موجودة في العالم، واحدة منها بيعت عام ٢٠٠٦ في مقابل ٣,٥ مليون دولار. قام عدد من الفيزيائيين ببحوث موسعة على هذه الآلات محاولين إماطة اللثام عن «أسرار ستراديفيروس» آملين أن يستطيعوا صناعة آلات زهيدة الثمن لها ذات الصوت الساحر. تستطيع أن تقرأ عن هذه البحوث على موقع:

www.sciencedaily.com/releases/2009090122141228/01/.htm.

من مصادر الإمتاع في سماع بعض النوتات شطر كبير يتعلق بالترددات والتناغمات. ولعل أشهر أنواع المزاوجة بين النوتات، في الموسيقى الغربية على الأقل، هي تلك النوتات التي تكون إحدها ذات تردد يبلغ ضعف تردد النوتة التي تزاوجت معها بالضبط. نقول إن هذه النوتات يفصل بينها الأوكتاف. لكن هناك كثير من التوليفات الممتعة، بخلاف ما سبق، على غرار التآلفات والأثلاث والأخماس، وهلم جرًّا.

منذ عهد فيثاغورس في زمن الإغريق والرياضيون والـ «الفلاسفة الطبيعيون» مغرمون بالعلاقات الرقمية بين الترددات المختلفة. يختلف المؤرخون فيما بينهم حول قدر ما اكتشفه فيثاغورس وقدر ما اقترض من البابليين، وقدر ما اكتشفه أتباعه. ورغم ذلك، نُسِب إليه القدر الأكبر من الفضل في اكتشاف كيف أن الأوتار المختلفة الأطوال والمختلفة في درجات التوتر تُصدر درجات مختلفة من الحدة بنسب متوقعة وممتعة. والكثير من الفيزيائيين يحبون أن يطلقوا على فيثاغورس لقب مُنظّر الأوتار الأول.

ولقد استفاد صانعوا الآلات أيما استفادة من هذا الإدراك. فمثلًا لأوتار الكمان المختلفة أوزان ودرجات انشداد مختلفة، مما يمكنها من إنتاج ترددات وتناغمات عليا ودنيا، رغم أن لها جميعًا ذات الطول. يغير عازفوا الكمان أطوال هذه الأوتار من خلال تحريك أصابعهم صعودًا وهبوطًا على عنق الكمان. فعندما تجري أصابعهم في تجاه ذقونهم فإنهم يقصرون طول الوتر مما يعلي تردد التناغم الأول (ومن ثم حدته)

وكذلك بقية التناغمات العليا الأخرى. قد يصير ذلك الأمر معقدًا جدًّا. فبعض الآلات الوترية كالسيتار الهندي لها ما يسمى بالأوتار المساعدة، التي هي أوتار إضافية موازية أو تقع تحت الأوتار التي يعزف عليها، وهي أوتار تتذبذب عند العزف على ترددات الصدى الخاصة بها.

إنه من العسير إن لم يكن من المستحيل للمرء أن يرى ترددات تناغمية متعددة على أوتار الآلة الموسيقية، لكنني أستطيع أن أظهرها وأعرضها عرضًا دراماتيكيًّا عن طريق توصيل مايكروفون براسم إشارة، وهو الجهاز الذي لعلك قد شاهدته على شاشة التلفاز إذا لم تكن قد رأيته على الطبيعة. يظهر راسم الإشارة التذبذب وزمنه على شاشته في شكل خط يعلو ويهبط عن خط أفقي مركزي. تعج غرف العناية المركزة وغرف الطوارئ بالمستشفيات بمثل هذه الأجهزة التي تقيس معدل ضربات قلب المريض.

دائمًا ما أحث طلابي على أن يحضروا آلاتهم الموسيقية إلى قاعة الدرس؛ حتى يتسنى لنا جميعًا أن نرى خليط التناغمات المتنوع الذي تنتجه كل آلة منها.

عندما أرفع شوكة رنانة ذات تردد كونسرت A قرب ميكروفون، تظهر الشاشة منحنًى جيبيًّا بسيطًا يشير إلى ٤٤٠ هرتز. نجد الخط غير مشوش، ومعتادًا جدًّا وذلك لأن الشوكة الرنانة لا تنتج إلا ترددًا واحدًا. لكنني عندما دعوت إحدى الطالبات كي تأتي بكمانها لتعزف نفس نوتة الـ A وجدتُ ما يرتسم على الشاشة أمرًا أشد إثارةً للاهتمام. ما زال التردد الأساسي موجودًا – تستطيع أن تراه على الشاشة بصفته المنحنى الجيبي البسيط المهيمن – لكن المنحنى الآن صار أكثر تعقيدًا بسبب التناغمات العليا، وكذلك يختلف الأمر عندما تعزف الطالبة التشيلو. لك أن تتخيل ما سيحدث عندما تعزف الطالبة نوتتين في نفس الوقت.

عندما يشرع المطربون في استعراض فيزياء الصدى عن طريق تمرير الهواء من خلال أحبالهم الصوتية (مصطلح «الطيات الصوتية هو المصطلح الأدق وصفًا لها)، تتذبذب الأغشية، مولدةً موجات صوتية. حتى إنني أطلب من أحد الطلاب أن يغني، فأرى جهاز راسم الاهتزاز المهبطي يُبين شكل موجات صوته مع تراكم منحنيات معقدة بالمثل على شاشته.

حين تعزف على البيانو، ذلك المفتاح الذي تضغطه يعمل عمل مطرقة تطرق وترًا

– أو سلكًا – مصممًا بطول ووزن وتوتر بحيث يتذبذب على تردد من ترددات التناغم الأول المحدد مسبقًا. لكن بشكل ما، وكما هو الحال مع أوتار الكمان وأحبال الإنسان الصوتية، تتذبذب أوتار البيانو بشكل متزامن بتناغمات عليا.

والآن لنقفز قفزة فكرية هائلة إلى عالم ما دون الذرة، ونتخيل فيه أوتارًا غاية في الضآلة تشبه أوتار الكمان، تصغر كثيرًا جدًّا جدًّا عن نواة الذرة، وتتذبذب بترددات مختلفة وبتناغمات مختلفة. بعبارة أخرى نقول لك: تخيل أن المكونات الأساسية للمادة هي تلك الأوتار الصغيرة المتذبذبة التي تنتج ما يسمى بالجسيمات الأولية – مثل الكواركات والجلوونات والنيوترينوات والإلكترونات – والتي تتذبذب بترددات تناغمية مختلفة وفي أبعاد عديدة. إذا استطعتَ تخيُّل هذا الأمر، تكون قد أدركتَ الأطروحة الأساسية لنظرية الأوتار، والتي هي الملخص لجميع جهود الفيزيائيين النظريين على مدى الأربعين عامًا الماضية، الرامية للخروج بنظرية واحدة لتفسير جميع الجسيمات الأولية وجميع القوى في الكون. فهي بشكل أو بآخر نظرية «كل شيء».

لا أحدَ لديه أدنى فكرة عما إذا كانت نظرية الأوتار ستنجح أم لا، بل إن الفيزيائي الأمريكي الحائز على جائزة نوبل، شيلدون جلاشو يتشكك فيما إذا كانت تلك النظرية «فيزيائية أم فلسفية». لكن إذا صحتْ فكرة أن أكثر وحدات الكون أساسية هي مستويات الرنين المختلفة لأوتار لا يمكن تخيل صغرها، فإن الكون، وقواه وجسيماته الأولية، يمثل نسخة كونية من ألحان موزارت المكررة الرائعة بالغة التعقيد في أنشودة الأطفال «Twinkle. Twinkle, Little Star».

لجميع الأجسام ترددات رنينية، سواء أكان ذلك الجسم زجاجة الكاتشاب في ثلاجتك أم أطول مبنى في العالم؛ والكثير من هذه الترددات غامضة ومن الصعب التنبؤ بها. فلو كنتَ تمتلك سيارة فإنك قد سمعتَ بعض الرنين وهو رنين لم يسعدك. لقد مررتَ، بالتأكيد، بتجربة سماع صوت صادر من السيارة أثناء القيادة، لكن هذا الصوت يختفي عندما تزيد سرعة قيادتك.

في سيارتي السابقة، كانت العدادات تبلغ التردد الأساسي على ما يبدو لي عندما أبطئ سرعتي وأنا أقترب من إشارة المرور. لكن، إذا ضغطتُ بقدمي دواسة الوقود مُسرِّعًا المحرك، حتى دون تحرك السيارة، يغير ذلك من تردد ذبذبات السيارة فتختفي الضوضاء. أحيانًا كنتُ أسمع ضوضاء جديدة لبعض الوقت، فيما أُزيد سرعة السيارة

أو أبطئها. تُصدر السيارة — وما بها من آلاف القطع، والتي لم تكن بعضها محكمة الربط، للأسف — عند انطلاقها بمختلف السرعات، أو لعلنا نقول بمختلف ترددات الذبذبة، ترددَ رنين صادر من كاتم صوت السيارة مثلًا أو متاريس ربط المحرك، مما يجعل تلك الأجزاء تتكلم معي وتخبرني بماهية العطل. كل تلك القطع جميعًا تُردد ذاتَ الشيء: «خذني إلى الميكانيكي؛ خذني إلى الميكانيكي». الأمر الذي كثيرًا ما كنتُ أتجاهله، إلى أن اكتشفتُ لاحقًا كمَّ الضرر الذي أحدثته هذه الترددات الرنينية. لكنني عندما ذهبتُ بالسيارة إلى الصيانة، لم أستطع بعدها إعادة إنتاج تلك الأصوات المريعة، وشعرتُ بشيء من الحمق.

أذكر وأنا طالب أننا حين كان يأتينا بعد العشاء متحدث لا يروق لنا في رابطة الأخوية، التي كنتُ عضوًا فيها، كان كل منا يمرر إصبعه المبتل على حافة كأس نبيذه، وهو أمر تستطيع القيام به في المنزل بكل سهولة، مما يُنتج صوتًا. ذلك الصوت هو التردد الأساسي لكؤوس النبيذ التي نحملها. وعندما أقنعنا مئة طالب بفعل هذا الأمر في آن واحد، كان الصوت مزعجًا بحق (لكنه ليس بالأمر الغريب في دُور الأخويات)، لكنه كان تصرفًا سليمًا؛ إذ فهم المتحدث الرسالة.

سمعنا جميعًا بأن مغني الأوبرا الذي يغني على النوتة الصحيحة بصوت مرتفع بما يكفي، بإمكانه تهشيم كأس النبيذ. والآن وقد صرتَ تعرف الرنين، ففي رأيك كيف لذلك أن يحدث؟ الأمر بسيط، من حيث النظرية على الأقل، أليس كذلك؟ فإذا جئتَ بكأس نبيذ وقستَ تردده الأساسي، ثم قمتَ بإنتاج صوت على ذات التردد، فماذا سيحدث حينها؟ من واقع خبرتي لا يحدث شيء على الإطلاق عادة. فلم يسبق لي أن رأيتُ أي مغني أوبرا يفعلها. ومن ثم فإنني لا أستعين بمغني أوبرا في قاعة الدراسة. ما أفعله هو أنني أنتقي كأسًا وأطرقه بإصبعي ثم أقيس تردده الأساسي عن طريق راسم الإشارة، فأجده بالطبع يتباين من كأس لآخر، لكنه يتراوح في الكؤوس التي أستخدمها ما بين ٤٤٠ و٤٨٠ هرتز. ثم أقوم، إلكترونيًّا، بإنتاج صوت له ذات التردد الأساسي لكأس النبيذ بالضبط (إنتاج صوت بذات التردد بالضبط هو أمر غير ممكن، لكنني أحاول أن أقترب منه جدًّا). ما أفعله هو أنني أصل الكأس بمكبر صوت، ثم أشرع في رفع الصوت ببطء. لماذا أرفع الصوت؟ لأنه كلما ارتفع الصوت زادتْ طاقة الموجة الصوتية التي ترتطم بالكأس. وكلما زادت سعة الذبذبات في كأس النبيذ، ينثني قدر أكبر من الكأس إلى الداخل والخارج حتى ينكسر (كما نأمل).

ولكي أظهر الكأس وهو يتذبذب، أصوره بكاميرا مع تقريب الصورة، وأسلط عليه ضوء مصباح اضطرابي مضبوط على تردد يختلف اختلافًا طفيفًا عن تردد الصوت. يا له من مشهد مذهل؛ إذ إنك ترى قاع كأس الزجاج يبدأ يتذبذب؛ ويبدأ جانباه المتقابلان في التقلص، ثم التباعد، ثم يتزايد التباعد بينهما أكثر فأكثر مع قيامي برفع درجة مكبر الصوت، وأحيانًا أحتاج إلى زيادة التردد قليلًا ثم – على حين غرة – نجد الكأس يتهشم. يحب طلابي هذه المرحلة كثيرًا، فهم لا يطيقون الانتظار حتى يتحطم الكأس. (يمكنك مشاهدة ذلك على الإنترنت في الدقيقة السادسة تقريبًا من المحاضرة رقم ٢٧ من مقرر الكهرباء والمغناطيسية الذي أدرّسه ٨,٠٢ على موقع:

http://ocw.mit.edu/courses/physics/802--electricity-and-magnetism-spring-2002/video-lectures/lecture-27-resonance-and-destructive-resonance/.

كما أحب أن أعرض لطلابي شيئًا آخر يسمى بألواح كلادني، وهي التي توضح، بأغرب الطرق وأجملها، تأثيرات الرنين. تلك الألواح المعدنية يبلغ عرض الواحد منها قدمًا واحدًا، ويمكن أن تجدها مربعة أو مستطيلة أو حتى دائرية، لكن أفضلها المربعة. تُثبّت هذه الألواح عند مركزها على قضيب أو على قاعدة. ننثر مسحوقًا ناعمًا على اللوح، ثم نمرر قوس كمان بكامل طوله على أحد جانبي اللوح. حينها نجد القوس يشرع في التذبذب على واحد أو أكثر من ترددات رنينه. عند قمم الموجات الصوتية التي ترتطم باللوح وقيعانها نجد المسحوق ينتفض مبتعدًا عن المعدن ويتركه مكشوفًا؛ ونجده يتراكم عند نقاط التفرع حيث لا يتذبذب اللوح أبدًا. (للأوتار نقاط تفرع، لكن الأجسام ذات البعدين، مثل ألواح كلادني، لها خطوط تفرع).

وفقًا للكيفية التي «تعزف» بها على اللوح، وكذلك النقطة التي تعزف عندها بتمرير القوس منها، سوف تقوم بإثارة ترددات رنين مختلفة وستصنع أنماطًا مذهلة غير متوقعة بالكلية على سطح اللوح. في صف الدراسة أستخدم أسلوبًا أكثر كفاءة – لكنه أقل رومانسية بكثير – إذ إنني أصل اللوح بجهاز هزاز Vibrator. وعن طريق تغيير تردد الهزاز نرى أنماطًا مذهلة تظهر وتختفي. تستطيع أن ترى ما أعني على موقع YouTube على العنوان الإلكتروني: www.youtube.com/watch?v=6wmFAwqQB0g. حاول أن تتخيل الحسابات الرياضية التي تقف وراء هذه الأنماط.

في المحاضرات العامة التي ألقيها على الأطفال والعائلات، أحث الصغار على أن يمرروا قوسًا على حواف اللوح – ولكم يحبون أن يصنعوا مثل هذه الأنماط الجميلة الغامضة. ذلك هو ما أحاول إيصاله إلى الناس عن الفيزياء.

## موسيقى الرياح

في خضم انشغالنا بالأوتار، أغفلنا وصف آلات الأوركسترا. فماذا عن الفلوت أو الأوبوى أو الترومبون؟ فليس لهذه الآلات أوتار لتتذبذب، أو لوحة صوت لتضخم صوتها. رغم قِدم هذه الآلات النفخية – رأيت منذ فترة قصيرة في إحدى الصحف صورة لفلوت عمره ٣٥,٠٠٠ عامٍ، منحوتٍ من عظمة نسر – فإنها أكثر غموضًا من الآلات الوترية، وذلك معزو جزئيًا إلى أن آلياتها غير مرئية.

هناك بالطبع أنواع مختلفة من آلات النفخ. بعضها مثل الفلوت والريكوردر مفتوح من الطرفين، بينما البعض الآخر مثل الكلارينت والأوبوى والترومبون مغلقة عند أحد الطرفين (رغم أن بها فتحات كي ينفخ المرء فيها). لكنها كلها تنتج الموسيقى عندما يتخللها تيار هواء يأتي عادة من فمك فيسبب تذبذبًا لعمود الهواء داخل الآلة.

إنك عندما تنفخ الهواء أو تجبره على الدخول في الآلة النفخية فإن فعلك هذا يماثل ما يفعله نقرك لوتر جيتار أو تمريرك لقوس على وتر كمان – إنك عندما تسلط طاقة على عمود الهواء، فأنت تسكب أطيافًا متعددة من الترددات في التجويف الهوائي، ثم يقوم عمود الهواء نفسه باختيار التردد الذي يريد صداه، معتمدًا بشكل شبه كلي على طوله. قد يصعب تخيل الأمر بشكل أو بآخر، لكن بحسابات بسيطة نسبيًا لنا أن ندرك أن عمود الهواء ينتقي ترددات الأساسية، وبعض التناغمات العليا كذلك داخل الآلة الموسيقية، ويشرع في التذبذب على تلك الترددات. ما إن يبدأ عمود الهواء في التذبذب حتى يحدث شد وجذب للهواء، مثلما حدث في حالة أسنان الشوكة الرنانة، باعثًا موجات الصوت إلى آذان المستمعين.

في آلات الأوبوا والكلارينت والساكسفون، ينفخ المرء في مزمار ينقل الطاقة إلى عمود هواء ويجعله يرن. وفي آلات الفلوت والبيكولو والريكوردر، فإن الطريقة التي ينفخ بها العازف عبر الفجوة، أو في داخل قطعة الفم، هي التي تخلق الرنين. أما في آلات النفخ النحاسية، فيتعين على المرء أن يضيق ما بين شفتيه جدًا وينفخ مُصدرًا

بعض الضوضاء داخل الآلة – وإذا لم تكن قد تدربتَ على الأمر فستجد الأمر أقرب إلى المستحيل. فإنني شخصيًّا لم أستطع سوى البصق في تلك الآلة اللعينة.

إذا كانت الآلة الموسيقية مفتوحة من طرفيها، كما هو الحال في الفلوت والبيكولو، يستطيع عمود الهواء أن يتذبذب على تناغماته التي يكون كل واحد منها ضعفًا للتردد الأساسي كما هو الحال مع الأوتار. أما بالنسبة لآلات النفخ الخشبية المفتوحة من إحدى نهايتيها ومغلقة من الناحية الأخرى، فيكون لشكل الأنبوب فيها أهمية. فإذا كان تجويفها مخروطيًّا، كما في الأوبوا أو الساكسفون، فحينها ستنتج تناغمات كالتي في الفلوت. لكن إذا كان التجويف أسطواني الشكل كما في الكلارينت فلن يرن عمود الهواء إلا في أعدد فردية تفوق التردد الأساسي بمرات، على غرار ثلاثة أمثال أو خمسة أمثال أو سبعة أمثال، وهلم جرًّا. ولأسباب معقدة نجد آلات النفخ النحاسية ترن على جميع التناغمات كما هو الحال في الفلوت.

ومن البديهي هنا أنه كلما طال عمود الهواء، انخفض تردده وانخفضتْ حدة الصوت الذي ينتجه. إذا قل طول الأنبوب إلى النصف، فحينها سيتضاعف التناغم الأول. لذلك تصدر عن البيكولو تلك النوتات العالية، وتصدر عن الباسون تلك النوتات الخفيضة. وذلك المبدأ العام يفسر تدرج أطوال أنابيب الأرغن — بعض آلات الأرغن قادرة على إنتاج أصوات تتنوع ما بين تسعة من الأوكتافات. يتطلب إنتاج تردد أساسي قدره نحو ٨,٧ هرتز أنبوبًا ضخمًا يبلغ ٦٤ قدمًا طولًا (١٩,٥ متر مفتوح من طرفيه)، وهو التردد الذي يقع حرفيًّا تحت نطاق ما تستطيع الأذن البشرية سماعه، رغم أن بإمكانك الإحساس بالذبذبات. في العالم اثنتان فقط من تلك الأنابيب الضخمة؛ وذلك لأنها غير عملية على الإطلاق. والأنبوب الذي يقل طوله عن ذلك عشر مرات، ينتج ترددًا أساسيًّا أعلى بعشر مرات أي ٨٧ هرتز. والأنبوب الأقصر بمائة مرة، ينتج ترددًا أساسيًّا يبلغ نحو ٨٧٠ هرتز.

لا يقتصر دور عازفي آلات النفخ على النفخ في آلاتهم. وإنما يقومون أيضًا بفتح وغلق الثقوب في آلاتهم، مما له بالغ الأثر في تقصير أو إطالة عمود الهواء، ومن ثم زيادة أو تقليص التردد الذي تنتجه. ولذلك تجد نفسك عندما تلهو بصفارة أطفال تنتج نوتات خفيضة عندما تضع إصبعك على ثقب الصفارة؛ لأنك بذلك تطيل عمود الهواء. وذات المبدأ ينطبق على آلات النفخ النحاسية. كلما طال عمود الهواء، حتى إذا كان يدور في حلقات، انخفضتْ حدة الصوت أي انخفضتْ ترددات جميع التناغمات.

فأقل آلات التوبا في حدة الصوت، والتي تعرف باسم بي فلات B-flat أو بي بي فلات BB-flat، لها أنبوب يبلغ طوله ١٨ قدمًا بتردد أساسي قدره نحو ٣٠ هرتز؛ أما ما يسمى بالصمامات الدوارة الإضافية فتستطيع خفض النغمة إلى ٢٠ هرتز؛ كما أن أنبوب آلة الترومبي البي فلات يبلغ طوله ٤,٥ قدم. والأزرار الموجودة في الترومبيت أو التوبا هي التي تفتح أو تغلق الأنابيب الإضافية، والتي تغير حدة ترددات الرنين. أما عن آلة الترومبون، فهي الأسهل في إيضاح ذلك المبدأ بصريًّا، إذ إن الجزء الذي يحركه العازف فيها يزيد طول عمود الهواء مما يقلل من ترددات رنينه.

في قاعة الدرس، أعزف مقطوعة «Jingle Bells» على ترومبون خشبي منزلق، وهي مقطوعة يحبها طلابي – لكني لا أصارحهم بأنها اللحن الوحيد الذي يمكنني عزفه. بل أجد في ذلك مشقة لأنني مهما عزفتها مرارًا وتكرارًا، أجد نفسي في حاجة إلى التدرب قبل كل مرة أعزفها فيها. حتى إنني قد وضعتُ علاماتٍ على الجزء المنزلق – هي ملحوظات في الواقع – مرقمة على نحو ١، ٢، ٣ وهلم جرًّا؛ كما أنني لا أستطيع حتى أن أقرأ النوتات الموسيقية. لكنني كما قلتُ من قبل لم يمنعني افتقاري إلى الموهبة الموسيقية من تقدير جمال الموسيقى، أو من الاستمتاع كثيرًا بتجريبها.

وأثناء كتابتي لهذه السطور أستمتع بعض الشيء بتجريب عمود الهواء داخل زجاجة ماء سيلتزر، سعة لتر واحد. هو ليس بعمود هواء مثالي على الإطلاق؛ لأن عنق الزجاجة يتسع تدريجيًّا حتى يصل إلى كامل قطر الزجاجة. لك أن تتخيل أن فيزياء عنق الزجاجة يمكن أن تصير غاية في التعقيد. لكن المبدأ الأساسي الذي يحكم موسيقى آلات النفخ – الذي ينص على أنه كلما طال عمود الهواء انخفضت ترددات الرنين – ما زال ينطبق هنا. تستطيع أن تجرب ذلك بكل سهولة.

خذ قارورة مياه غازية أو نبيذ فارغة واملأها بالماء، حتى يكاد يبلغ قمتها، ثم جرب النفخ عبر قمتها. قد يتطلب الأمر منك بعض التدريب لكنك لن تلبث أن تتمكن من جعل عمود الهواء يتذبذب بترددات رنينه. سوف تعلو حدة الصوت في البداية لكنك كلما شربتَ بعضًا من ذلك الماء (لعلك أدركتَ الآن لماذا اقترحتُ عليك الماء دون غيره من المشروبات)، استطال عمود الهواء وانخفضتْ حدة التردد الأساسي. كما اكتشفتُ أنه كلما طال عمود الهواء صار الصوت أجمل. وكلما انخفض تردد التناغم الأول، ازدادت احتمالية القدرة على توليد تناغمات إضافية في ترددات أعلى، وسيصير للصوت جرس أكثر تعقيدًا.

قد تظن أن تذبذب القارورة، كتذبذب الوتر، هو الذي ينتج الصوت، بل إنك كذلك تشعر بتذبذب القارورة كما يتذبذب الساكسفون. لكن مرة أخرى، إنه عمود الهواء الذي يرن داخل القارورة. كي تدرك هذه الفكرة عليك أن تفكر في اللغز التالي. إذا أتيت بكأسي نبيذ متطابقين في كل شيء غير أن أحدهما فارغ والآخر نصف ممتلئ، ثم أثرتَ التناغم الأول فيهما عن طريق الطرق على كل واحد منهما طرقًا رفيقًا بملعقة أو بدعك حافتيهما بإصبع مبتل، أيهما سيكون أعلى ترددًا، ولماذا؟ ليس من العدل أن أسألك هذا السؤال، خاصة أنني كنت أُعِدّك لاختيار الإجابة الخاطئة – لذلك أعتذر! لكنك قد تتدارك الأمر.

ينطبق نفس المبدأ على تلك الأنابيب البلاستيكية المموجة المرنة التي يبلغ طول الواحدة منها ٣٠ بوصة التي تسمي الأنابيب الدوارة، أو أي اسم آخر على غرار ذلك، والتي لعلك رأيتها أو لهوت بها سابقًا. أتذكُر كيف تعمل؟ عندما تشرع تدير واحدة منها فوق رأسك تسمع أولًا نغمة ذات تردد منخفض. وبالطبع ظننتَ أنت أن ذلك هو التناغم الأول، تمامًا كما فعلتُ أنا في أول مرة لهوتُ بهذه اللعبة. لكنني بشكل أو بآخر لم أنجح في إثارة التناغم الأول. فدائمًا ما يكون التناغم الثاني هو الذي أسمعه أولًا. وكلما أسرعتَ في الحركة تستطيع إثارة تناغمات أعلى وأعلى. تزعم الإعلانات الدعائية على شبكة الإنترنت أنك تستطيع أن تعزف أربع نغمات من هذه الأنابيب، لكن، في الحقيقة، لا يمكنك أن تعزف إلا ثلاثًا فقط؛ وذلك لأن النغمة الرابعة التي هي التناغم الخامس تتطلب تدويرًا غاية في السرعة. ولقد قمتُ بحساب ترددات التناغمات الخمس الأولى لأنبوب يبلغ طوله ٣٠ بوصة فوجدتُها ٢٢٣ هرتز (لم أصل أبدًا إلى ذلك التردد) و٤٤٦ هرتز و٦٦٩ هرتز و٨٩٢ هرتز و١١١٥ هرتز. تعلو الحدة علوًا هائلًا وبسرعة هائلة.

## الرنين الخطر

تمتد فيزياء الرنين حتى تتجاوز الإيضاحات التي تتم في قاعة الدرس. فلك أن تفكر في تلك الأمزجة المختلفة التي تثيرها فيك الموسيقى التي تنبعث من تلك الآلات الموسيقية المختلفة. فالرنين الموسيقي يخاطب عواطفنا ويبعث فينا البهجة والقلق والسكون والرهبة والفزع والسعادة والحزن ومشاعر كثيرة غيرها. ولا عجب

أننا نتحدث كثيرًا عن الصدى (الرنين) العاطفي، وهو القادر على خلق علاقة ثرية عميقة يكتنفها التفاهم والحنان والرغبة. فليس من قبيل الصدفة أن نجد أنفسنا «متناغمين» مع شخص ما. وكم هو من المؤلم أن نفقد ذلك الصدى، سواء بشكل مؤقت أو إلى الأبد، حينها يتحول ما حسبناه تناغمًا إلى نشاز متداخل وضوضاء عاطفية. تأمل شخصيتَي جورج ومارثا في مسرحية «من يخاف فرجينيا وولف؟» للكاتب المسرحي إدوارد آلبي، فيها تجدهما يتشاجران بضراوة. تتصاعد حدة الشجار بينهما فيما يظل ضيوفهما في موقع المتفرج. لكنهما يكونان أكثر خطورة عندما يتحدان ويحاولان النيل من الضيف.

وقد يكون الرنين (الصدى) مدمرًا في الفيزياء كذلك. وأوضح مثال على الرنين المدمر في تاريخنا الحديث هو ما حدث في شهر نوفمبر من عام ١٩٤٠ عندما ضربتْ ريح متعامدة الجزء الرئيسي من جسر تاكوما نارووز ضربة مباشرة. هنا شرعتْ تلك الأعجوبة الهندسية (التي صارت تعرف بعدها باسم جيرتي الراكضة؛ بسبب تذبذبها لأعلى وأسفل) ترن بقوة. عندما زادت الريح المتعامدة سعةَ تأرجح الجسر، بدأتْ بنيته تتذبذب وتنثني، ومع زيادة الانثناء بشكل بالغ الشدة تكسر الجزء الرئيسي من الجسر وتساقط في الماء. تستطيع أن تشاهد هذا الانهيار المذهل على عنوان:

www.youtube.com/watch?j-zczJXSxnw

قبل تسعين عامًا انهار جسر معلق في أنجيه بفرنسا بينما كان يعبره تشكيل عسكري مؤلف من ٤٧٨ جندي يمشون مشية عسكرية. مشيتهم العسكرية تلك أثارت رنين الجسر، وهو الأمر الذي سبب كسر بعض أسلاكه المتآكلة مما سبب وفاة أكثر من مائتي جندي جراء سقوطهم في النهر أسفله. كان من تبعات هذه الكارثة منع بناء الجسور المعلقة في فرنسا لعشرين عامًا كاملة. وفي عام ١٨٣١، كانت مسيرة عسكرية لقوات بريطانية تشق طريقها على جسر بروتون المعلق، ما أدى إلى رنين سطحه وانخلاع متراس إحدى حافتيه وانهياره. لم يقتل أحد في تلك الواقعة، لكن بعدها صدرت التعليمات إلى جميع القوات التي تعبر الجسور بالتخلي عن الخطوة العسكرية وقت عبورها.

في عام ٢٠٠٠، افتتح جسر الألفية في لندن، وبعدها اكتشف آلاف المارة أنه يتمايل بشدة (فقد أصابه ما يسميه المهندسون الرنين الجانبي)؛ وبعدها بأيام قليلة أغلقت السلطات الجسر لعامين كانا خزيًا على السلطات التي استغرقت العامين في تركيب مثبطات للاهتزازات، من أجل التحكم في الحركة التي تولدها خطوات المارة.

وحتى جسر بروكلين العظيم في مدينة نيويورك أفزع المارة الذين احتشدوا فوقه خلال انقطاع الكهرباء الذي حدث عام ٢٠٠٣ حين شعروا بتأرجح سطح الجسر يمينًا ويسارًا، حتى إن بعضهم أصيب بالغثيان.

في مثل تلك المواقف يؤثر المارة على الجسر بوزن يفوق ذلك الذي تؤثر به السيارات التي تعبر الجسر في الظروف العادية. كما أن مجموع حركات أقدامهم، حتى ولو لم تكن مشيتهم منتظمة، قادرة على إثارة تذبذب الرنين – وهو ما يعني تمايل سطح الجسر. وعندما يميل الجسر إلى أحد الجانبين، يوازن المارة ذلك بالانتقال إلى الناحية المقابلة، وهو الأمر الذي يعظم من سعة التمايل. المهندسون أنفسهم يقرّون بأنهم لا يعلمون ما يكفي عن تأثير الحشود على الجسور. لكنهم لحسن الحظ يعلمون الكثير عن بناء ناطحات السحاب التي تقاوم الريح العاتية والزلازل المهددة بتوليد ترددات رنين قادرة على تدمير ما يبنون تدميرًا. تخيل أن المبدأ الذي أنتج الألحان الحزينة التي كان أسلافنا، الذين عاشوا قبل ٣٥,٠٠٠ عام يعزفونها على الناي، هو ذاته المبدأ الذي يهدد جسر بروكلين العظيم الهائل وغيره من أكثر منشآت العالم طولًا.

# الفصل السابع

# عجائب الكهرباء

تتبدى هذه العجائب في أبهى صورها في الشتاء عندما يكون الجو جافًا. ولكي تراها، عليك أن ترتدي قميصًا من البوليستر أو كنزة صوفية، ثم تقف أمام المرآة في الظلام وتشرع في خلع ذلك القميص أو تلك الكنزة. تَعْلم حينها أنك سوف تسمع أصوات قرقعة تشبه الأصوات التي تسمعها حين تخرج ملابسك المغسولة من مخفف الغسيل (ما لم تكن تستخدم واحدة من أوراق التجفيف غير الرومانسية تلك المصممة بحيث تحد من كل تلك الكهرباء[1]). لكنك الآن سترى أيضًا توهج عشرات الشرارات الصغيرة جدًا. أحب هذه التجربة جدًا؛ لأنها تذكرني بمدى قرب الفيزياء من حياتنا اليومية، فقط لو عرفنا كيف نفتش عنها. وكما أحب أن أبين لتلاميذي، فإن هذه التجارب الصغيرة تصير أكثر إمتاعًا عندما يجريها المرء مع صديق له.

هل تعلم ما يحدث عندما تمشي على سجادة في الشتاء ثم تحاول الإمساك بمقبض أحد الأبواب – هل فزِعتَ؟ – قد تتعرض لصدمة محسوسة تعلم أنها جراء الكهرباء الاستاتيكية. بل لعلك قد سببت صدمة لإحدى صديقاتك عندما صافحتها، أو شعرتَ بذات الصدمة عندما ناولتَ معطفك لعامل استلام المعاطف. الحقيقة أنه أثناء فصل الشتاء يحس المرء بالكهرباء الاستاتيكية في كل مكان. فأحيانًا تجد شعرك ينفر بعضه من بعض عندما تمشطه، بل وتجده أحيانًا ينتصب واقفًا من تلقاء نفسه عندما تخلع قبعتك. ما السر في الشتاء ولماذا يتطاير به ذلك القدر من الشرر؟

إجابة كل هذه الأسئلة تبدأ مع الإغريق القدامى الذين كانوا أول من وضع تسمية وتسجيلًا مكتوبًا لتلك الظاهرة التي بتنا نعرفها اليوم باسم الكهرباء. فمنذ نحو ألفي عام، كان الإغريق يعلمون أنهم إذا صنعوا احتكاكًا بين الكهرمان – هو عبارة عن مادة صمغية متحجرة استخدموها واستخدمها المصريون في صناعة الحلي – وبين

---

(١) توضع داخل المجفف مع الملابس لتمتص جُل الكهرباء (المترجم).

القماش، فحينها يستطيع الكهرمان أن يجذب إليه شذرات من الأوراق الجافة. وبعد قدر كافٍ من الاحتكاك، يمكنه أيضًا أن يحدث صدمة.

كنتُ قد قرأتُ قصصًا تزعم أن نساء الإغريق عندما كان السأم يتملكهن في الحفلات كن يدعكن جواهرهن الكهرمانية في ثيابهن، ثم يمسسن الضفادع بتلك المجوهرات. على الفور كانت الضفادع تقفز بالطبع محاولةً الإفلات من هاته المحتفلات المجنونات، وهو الأمر الذي كان مصدر إمتاع كبير لهؤلاء الناس القدامى. لكن هذه القصص لا تتماشى مع المنطق مطلقًا. أولًا، كم من تلك الحفلات توافرتْ بها هذه الأعداد الكبيرة من الضفادع القابعة تنتظر أن تصعقها هاته المحتفلات السكارى؟ ثانيًا، ولأسباب سوف أفسرها لاحقًا، لا تعمل الكهرباء الاستاتيكية بشكل مثالي خلال الأشهر التي يرجح فيها توافر الضفادع، وخاصة عندما يكون الطقس رطبًا، وبخاصة في اليونان. أيًّا ما كانت الحقيقة في هذه القصة، فإن ما لا يمكن إنكاره هو أن الكلمة الإغريقية التي تعني «الكهرمان» هي الإلكترون، إذن فقد كان الإغريق هم من أسموا الكهرباء باسمها كما أسموا الكثير من الأشياء في هذا الكون، الكبير منها والصغير.

لم يكن الفيزيائيون الأوربيون، الذين عاشوا في القرنين السادس عشر والسابع عشر الميلاديين وقت أن كانت الفيزياء تسمى الفلسفة الطبيعية، يعلمون شيئًا عن الذرة أو عن أيٍّ من مكوناتها، لكنهم كانوا ملاحظين ومجربين ومخترعين أفذاذًا، كما كان بعضهم منظرين عباقرة. كان من بينهم تايكو براهي وجاليليو جاليلي ويوهان كبلر وإسحاق نيوتن ورينيه ديكارت وبليز باسكال وروبرت هوك وروبرت بويل وجوتفريد ليبنز وكريستيان هوجنس، كلهم يصنعون اختراعات، ويؤلفون الكتب ويختلف أحدهم مع الآخر، ويقلبون الحركة المدرسية في العصور الوسطى رأسًا على عقب.

مع حلول ثلاثينيات القرن الثامن عشر بدأت دراسات علمية حقيقية للكهرباء (في مقابل ألعاب الحفلات) في إنجلترا وفرنسا وبالطبع في فيلادلفيا. كان هؤلاء المجربون جميعًا يعلمون أنهم إذا فركوا قضيبًا زجاجيًّا بقطعة من الحرير فسوف يكتسب شحنة ما (لنطلقْ عليها الشحنة أ) – لكنهم إذا فركوا قطعة من الكهرمان أو المطاط بذات الطريقة فسوف تكتسب شحنة من نوع آخر (لنطلق عليها الآن الشحنة ب). كانوا يعلمون أن الشحنتين مختلفتان؛ لأنهم عندما فركوا قضيبين زجاجيين بقطعة من الحرير، اكتسب كلاهما الشحنة أ، وعندما وضعوهما متجاورين وجدوهما يتنافران بفعل قوة غير مرئية بالمرة مع أنها ملموسة. وعندما وضعوا جسمين آخرين مشحونين بالشحنة ب

وجودهما أيضًا يتنافران. لكن الجسمين ذوي الشحنات المختلفة، كقضيب من الزجاج ذي الشحنة أ، وقضيب من المطاط ذي الشحنة ب، يتجاذبان ولا يتنافران.

ظاهرة شحن الأجسام عن طريق فركها هي ظاهرة مثيرة للاهتمام بحق، حتى إن لها اسمًا بديعًا، وهو تأثير «كهرباء الاحتكاك»، وهو اسم مشتق من اللفظة الإغريقية التي تعني «فرك». قد يخيل للمرء أن الاحتكاك بين الجسمين هو الذي ينتج الشحنة، لكن ليست تلك هي الحقيقة. فقد اتضح أن بعض المواد تجذب الشحنة ب بِنَهم، بينما يحاول بعضها الآخر طرد تلك الشحنة باستماتة، مما يجعلها تكتسب الشحنة أ. وفعالية الفرك في هذه العملية تنبع من كونه يزيد من عدد نقاط الاتصال بين المادتين، مما يسهل نقل الشحنة. هنالك قائمة مرتّبة (تستطيع أن تجدها بكل سهولة على شبكة الإنترنت) للكثير من المواد التي تصنع تأثير «الاحتكاك بالكهرباء». ذلك، وكلما تباعدتْ المادتان في القائمة كانتا قادرتين على شحن إحداهما الأخرى بسهولة أكبر.

لنتأمل مثلًا البلاستيك أو المطاط الصلب اللذين تصنع منهما أمشاط الشعر. إنهما بعيدان كل البعد عن مادة شعر الإنسان في سلسلة الاحتكاك بالكهرباء، وهو الأمر الذي يجعل شعرك يصدر الشرارات وينتصب عندما تمشطه في الشتاء بكل سهولة – وخاصة شعري أنا. فلتفكر في الأمر قليلًا؛ لا يتوقف الأمر على الشرارات التي تصدر من الشعر وإنما لأنني أمشطه بقوة فإنني أشحن شعري ومشطي كليهما، لكن لأن الشعرات كلها تكتسب ذات الشحنة أيًا كانت تلك الشحنة نجد كل شعرة منها تتنافر مع الشعرات الأخرى ذات الشحنات المطابقة، وأصير أبدو كعالِم مجنون. وعندما يحتك حذاؤك بالسجادة تجد نفسك قد شحنت بواحدة من الشحنتين أ أو ب، وذلك يتوقف على المادة المصنوع منها باطن قدمك وكذلك مادة السجادة. وعندما تتلقى صدمة كهربائية من أقرب مقبض باب تلمسه فإن يدك إما تتلقى شحنة من مقبض الباب، أو تقذف بإحدى الشحنات إليه. أما عن نوع الشحنة التي تتلقاها فليس ذلك بالأمر الهام هنا؛ فالكهرباء تصدمك في كل الأحوال.

كان بنيامين فرانكلين – الدبلوماسي ورجل الدولة والمحرر الصحفي والفيلسوف السياسي ومخترع النظارات ثنائية البؤر وعداد المسافات وموقد فرانكلين – هو أولَ من توصل إلى الفكرة القائلة بأن جميع المواد مخترقة بما يسمى «السائل الكهربي»، أو النار الكهربية. ولأن تلك الفكرة بدتْ مفسرةً للخلاصات التجريبية التي خلص إليها رفاق فرانكلين من الفلاسفة الطبيعيين فقد كانت مقنعة جدًّا. فعلى سبيل المثال،

أوضح الإنجليزي ستيفن جراي أن الكهرباء قابلةٌ لأن توصل على مدى مسافات كبيرة داخل الأسلاك المعدنية، لذا فقد كانت فكرة السائل غير المرئي أو النار غير المرئية (فالشرارات تشبه النار) تتماشى مع المنطق كثيرًا.

زعم فرانكلين أن المرء إذا اكتسب قدرًا كبيرًا جدًّا من النار، فحينها سيكون مشحونًا شحنًا إيجابيًّا، أما إذا كان لديه نقص في هذه النار، فحينها يكون مشحونًا شحنًا سلبيًّا. كما أنه كان أول من استخدم الإشارات الموجبة والسالبة، وأكد أنه إذا فُركتْ قطعة من الزجاج بقطعة من الصوف أو الحرير (وهو ما ينتج الشحنة أ) فسيسبب هذا فيضًا من النار، ومن ثم يسمى ذلك شحنًا إيجابيًّا.

لم يعلم فرانكلين سبب وجود الكهرباء، لكن فكرته المتعلقة بالسائل الكهربي كانت عبقرية ومثمرة حتى مع كونها ليست صحيحة تمامًا. فقد أكد على أن المرء إذا أخذ السائل ونقله من مادة إلى أخرى فستصير المادة ذات الفيض مشحونة شحنًا موجبًا، وفي الوقت ذاته تصير المادة التي تأخذ منها السائل مشحونة شحنًا سلبيًّا. اكتشف فرانكلين قانون الحفاظ على الشحنة الكهربية القائل بأنه لا يمكن خلق الشحنة الكهربية أو التخلص منها. فإذا قام المرء بخلق قدر معين من الشحنة الموجبة فهو كذلك يقوم بشكل أوتوماتيكي بخلق ذات القدر من الشحنة السلبية. يقول الفيزيائيون إن الشحنة الكهربية هي لعبة ذات مجموع صفري، إذ إن الشحنة باقية.

أدرك فرانكلين، كما صرنا ندرك الآن، أن الشحنات المتماثلة (الموجبة مع الموجبة، والسالبة مع السالبة) تتنافر، وأن الشحنات المتعارضة (الموجبة مع السالبة) تتجاذب. وأظهرتْ تجاربه أنه كلما زاد قدر النار التي تحملها الأجسام، تقاربتْ أكثر وصارتْ قواها أكثر شدة سواء أكانت تلك القوى جاذبة أو نافرة. كما أنه توصل، كما توصل جراي وغيره من الذين عاشوا في ذات العصر، إلى أن بعض المواد توصل السائل أو النار – نسمي نحن هذه المواد «الموصلات» – وبعضها لا يوصله، ومن ثم فهي تسمى غير الموصلات أو «العوازل».

لكن ما لم يعلمه فرانكلين هو ما تتكون منه النار. فلو لم تكن نارًا أو سائلًا فما هي إذن؟ ولماذا يبدو أن هناك فيضًا كبيرًا منها خلال فصل الشتاء – على الأقل في المكان الذي أعيش به، شمال شرقي الولايات المتحدة – يصدمنا من اليمين أو اليسار؟

وقبل أن نلقي نظرة داخل الذرة كي نشتبك مع طبيعة النار الكهربية، علينا أن

ندرك أن الكهرباء تتخلل عالمنا تخللًا طاغيًا يفوق ما أدركه فرانكلين، ويفوق ما يعتقده غالبيتنا. فهي ليستْ فقط تصبغ غالبية ما نراه في حياتنا اليومية بصبغة المنطق؛ وإنما تجعل كل ما نراه ونعلمه ونفعله ممكنًا. فإننا لا نستطيع أن نشعر ونتأمل ونتعجب فقط لأن الشحنات الكهربية تتقافز بين ملايين لا حصر لها من بين حوالي المائة مليار خلية الموجودة في أمخاخنا. في الوقت ذاته لا نستطيع أن نتنفس إلا لأن النبضات الكهربية التي تولدها الأعصاب تسبب انقباض عدد من عضلات صدورنا وانبساطها في سمفونية معقدة من الحركات. فمثلًا، وبكل بساطة، عندما ينقبض حجابك الحاجز ويهبط داخل قفصك الصدري، يوسع ذلك من تجويف صدرك ويسحب الهواء إلى داخل رئتيك. وعندما ينبسط الحجاب الحاجز يتمدد لأعلى مرة أخرى ويدفع الهواء إلى خارج رئتيك. ولم تكن لأي من تلك الحركات أن تتأتى إلا عن طريق عدد غير قابل للحصر من النبضات الكهربية الصغيرة التي لا تفتأ ترسل الإشارات إلى جميع أجزاء الجسم بشكل لا ينقطع، وهذه الإشارات في حالتنا تلك تأمر بعض العضلات بأن تنقبض ثم تكف عن الانقباض، بينما تأخذ عضلات أخرى دورها. وتستمر هذه العملية جيئة وذهابًا جيئة وذهابًا طوال عمرك كله.

وعيوننا ترى لأن الخلايا الدقيقة الموجودة في شبكيات عيوننا، وهي الخلايا العصوية والخلايا المخروطية التي تلتقط الأبيض والأسود والألوان الأخرى، تقوم على التوالي بالتحفز عن طريق ما تلتقط أو تبعث من الإشارات الكهربية من خلال الأعصاب البصرية إلى أمخاخنا. حينها تستطيع أمخاخنا أن تحدد إذا ما كنا ننظر إلى ثمار فاكهة موضوعة على حامل أم إلى ناطحة سحاب. غالبية سياراتنا تعمل بالجازولين رغم أن السيارات الهجين تستخدم كميات متزايدة من الكهرباء، لكن لن يصل الجازولين إلى المحرك دون تلك الكهرباء التي تجري من البطارية عن طريق الاشتعال إلى الأسطوانة، حيث الشرارات الكهربية تبدأ آلاف الانفجارات المحكومة في كل دقيقة. ولأن الجزيئات تتكون بسبب القوى الكهربية التي تلصق الذرات بعضها ببعض فإن التفاعلات الكيميائية – مثل احتراق الجازولين – سيستحيل حدوثها من دون الكهرباء.

وتلك الحقائق تصدق كذلك على أشياء تتعدى في صغرها حتى خلايا أجسادنا الميكروسكوبية. إن كل جزء من أجزاء أي مادة على ظهر الأرض مؤلف من ذرات؛ ولكي نفهم الكهرباء بحق علينا أن نغوص داخل الذرة وننظر نظرة مختصرة إلى

مكوناتها: لن ننظر إلى جميع مكوناتها؛ لأن ذلك قد يصير أمرًا غاية في التعقيد، لكننا سننظر إلى المكونات التي نحتاجها فقط.

الذرات ذاتها غاية في الضآلة، لدرجة أن أقوى الآلات وأكثرها تقدمًا – ميكروسكوبات المسح النفقي وميكروسكوبات القوى الذرية وميكروسكوبات انتقال الإلكترون – هي وحدها القادرة على رؤيتها. (هناك بعض الصور المذهلة التي التقطت بواسطة هذه الآلات موجودة على شبكة الإنترنت. تستطيع أن ترى بعضها على هذا الرابط: www.almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html.)

إنني لو أخذت ٦,٥ مليار ذرة، وهو العدد الذي يعادل تقريبًا عدد البشر على ظهر الأرض، ثم صففتها في صف واحد، كل واحدة منها تلمس الأخرى لبلغ طول الصف نحو قدمين. لكن في كل ذرة نواة تصغرها في الحجم بنحو عشرة آلاف مرة، وتحتوي على بروتونات مشحونة شحنًا موجبًا ونيوترونات. وتلك النيوترونات هي، كما خمنتَ أنت، في الأغلب محايدة كهربيًّا. والبروتونات (والتي تعني باليونانية «الأول») لها كتلة تماثل كتلة النيوترونات تقريبًا – كتلة لا يمكن تصور صغرها إذ إنها تبلغ اثنين على مليار من مليار من مليار ($٢ \times ١٠^{-٢٧}$) من كيلو جرام واحد تقريبًا. لذا فمهما كان عدد البروتونات والنيوترونات التي تضمها الذرة – وبعضها يضم مائتين منها – يظل وزنها غاية في الخفة بحق. كما أن حجمها صغير جدًّا؛ إذ يبلغ قطرها واحد على تريليون من السنتيمتر الواحد.

لكن أهم ما يتعلق بفهم الكهرباء هو أن البروتون موجب الشحنة. ليس هناك من سبب حقيقي لتسمية تلك الشحنة موجبة، لكن الفيزيائيين منذ فرانكلين دأبوا على تسمية تتلك الشحنة التي يكتسبها القضيب الزجاجي بعد أن يفرك بالحرير شحنة موجبة، لذا فالبروتونات موجبة الشحنة.

واتضح أن الأكثر أهمية هو بقية ما في الذرة، الذي يتألف من الإلكترونات، وهي الجسيمات المشحونة سلبيًّا التي تحوم في شكل سحابة حول النواة من بعد بالمقاييس دون الذرية. إنك لو حملتَ كرة بيسبول في يدك وكانت تلك الكرة تمثل نواة الذرة فإن سحابة الإلكترونات ستكون على نطاق نصف ميل حولها. ومن الواضح أن معظم الذرة هو عبارة عن فراغ خالٍ.

إن شحنة الإلكترون السالبة تساوي في قوتها قوة الشحنة الموجبة للبروتون.

ونتيجة لذلك فإن الذرات والجزيئات التي لها ذات العدد من البروتونات والإلكترونات تصير محايدة كهربيًا. وعندما لا تكون تلك الذرات والجزيئات محايدة، أي عندما يعتريها فائض أو نقص في الإلكترونات، تصير وقتها أيونات. والبلازما، كما تناولناها في الفصل السادس، هي غازات مؤيَّنة كليًا أو جزئيًا. غالبية الذرات والجزيئات التي نتعامل معها في هذا الكوكب محايدة كهربيًا. ففي الماء النقي وفي درجة حرارة الغرفة العادية لا تجد إلا ١ فقط من كل ١٠ ملايين جزيء هو المؤيَّن.

بناء على مفهوم فرانكلين فإننا عندما نجد بعض الأجسام تحظى بفيض من الإلكترونات نقول حينها إنها ذات شحنة سالبة، أما إذا وجدناها ذات نقص فيها فهي ذات شحنة موجبة. وإننا عندما نفرك الزجاج بقطعة من الحرير فإننا «ننقل منه» (نوعًا ما) الكثير من الإلكترونات مما يجعل الزجاج يكتسب شحنة موجبة. وعندما نفرك الكهرمان أو المطاط الصلب بذات قطعة الحرير فإنه يكتسب شحنة سالبة.

في غالبية المعادن نجد أعدادًا كبيرة من الإلكترونات هاربةً من ذراتها، ونجدها تتجول بحرية حول الذرات أو بينها. وهذه الإلكترونات بالذات هي عرضة لشحنة خارجية موجبة كانت أو سالبة، وعندما تتعرض لتلك الشحنة الخارجية تتحرك إما نحوها أو مبتعدة عنها، وهو الأمر الذي يخلق تيارًا كهربيًا. إن لديَّ الكثير لأقوله حول ذلك التيار الكهربي، لكنني الآن سأكتفي بالإشارة إلى أننا نسمي تلك المواد الموصلات المادية؛ وذلك لأنها توصل بكل سهولة (أي تسمح بحركة) الجسيمات المشحونة، التي هي في حالتنا هذه: الإلكترونات. (يمكن للأيونات أيضًا أن تخلق تيارات كهربية، لكن في غير المواد الصلبة وبالطبع في غير المعادن).

إنني أحب فكرة كون الإلكترونات جاهزة دومًا للهو وللحركة، وللاستجابة للشحنات الموجبة منها والسالبة. أما في غير الموصلات فليس هناك من هذا النوع من الحركة غير القليل؛ وذلك لأن جميع الإلكترونات ملتصقة بذراتها. لكن ذلك لا يعني أننا لا نستطيع أن نحظى ببعض المرح مع غير الموصِلات – خاصة مع البالونات المطاطية منوعة الأشكال التي تعلق في الحدائق والتي هي غير موصِلة.

ولكي تتمكن من البرهنة العملية على كل شيء أتحدث عنه هنا، عليك أن تأتي بمجموعة من البالونات المطاطية غير المنفوخة (وأفضَلها الأنواع الرقيقة التي تستطيع تشكيلها بأشكال حيوانات). ولأنه قد يتعذر على غالبيتنا الحصول على قضبان زجاجية،

فإنني كنت آمل أن تستطيع كؤوس الماء أو زجاجات النبيذ أو حتى المصابيح الزجاجية أن تحل محلها، لكنها رغم محاولاتي المستمية لم تفعل ذلك. لذا فلماذا لا نجرب قطعة كبيرة من البلاستيك أو مشطًا مطاطيًا؟ كما أنه قد يكون من المفيد أن يكون لدى المرء قطعة من الحرير أو ربما ربطة عنق أو وشاح قديم، أو قميص من قمصان هاواي، الذي ظلّ شريك حياته يحاول إقناعه بالتخلص منه. وإن لم تكن تمانع في أن ينتفش شعرُك – ومن يمانع في ذلك إذا كان في سبيل العلم؟ – فيمكنك أن تستخدمه. وسيكون عليك أن تمزق بعض الورق فتحوله إلى عشرات القطع أو ما نحوها. لا يهم عدد تلك القطع، وإنما المهم هو أن تكون صغيرة الحجم، في حجم عملة معدنية.

ومثلها مثل كل تجارب الكهرباء الاستاتيكية، تكون هذه التجربة في أفضل صورها خلال فصل الشتاء (أو وقت الظهيرة في جو الصحراء) عندما يكون الجو جافًا غير رطب. لماذا؟ لأن الهواء نفسه ليس بموصل بل إنه في الحقيقة عازل ممتاز. لكن لو كان في الجو ماء فمن الممكن أن تتسرب الشحنة لأسباب معقدة لن نناقشها. فالجو الرطب لا يجعل الشحنة تتراكم على القضيب أو قطعة القماش أو البالون أو شعرك، وإنما يجعلها تتسرب بالتدريج. ولذلك لا تصدمك الكهرباء عندما تلامس مقبض الباب إلا عندما يكون الجو جافًا جدًا.

## الخلق غير المرئي

فلتجمع كل المواد التي لديك، واستعد لكي تشهد بعض عجائب الكهرباء. قم أولًا بشحن مشطك عن طريق فركه بشعرك فركًا شديدًا بعد أن تتأكد من أنه جاف تمامًا، أو عن طريق فركه بقطعة من الحرير. صرنا نعرف الآن من كهرباء الاحتكاك أن المشط سوف يكتسب شحنة سالبة. والآن توقف للحظة وفكر في ما سيجري عندما تقرب المشط من كومة قصاصات الورق، ولماذا. أعرف أنا بكل تأكيد أنك ستقول «لن يحدث شيء على الإطلاق».

ثم ضع المشط فوق تل قصاصات الورق الصغير ذلك ببوصات قليلة. ثم اخفض المشط ببطء وراقب ما يحدث. إنه أمر مدهش، أليس كذلك؟ جرب الأمر مرة أخرى لتعرف أن الأمر ليس محض مصادفة. ستجد بعض شذرات الورق تقفز نحو المشط، بعضها يلتصق به للحظات ثم يسقط مرة أخرى، والبعض الآخر يظل ملتصقًا. بل إنك

إذا عبثتَ بالمشط والشذرات قليلًا، فقد تتمكن من جعل الشذرات تقف على حافتها بل وترقص على سطح الطاولة. ما الذي يحدث بالله عليك؟ لماذا يلتصق بعض شذرات الورق بالمشط بينما يقفز بعضها ويلتصق به ثم يسقط مرة أخرى؟

تلك أسئلة ممتازة ذات إجابات ماتعة للغاية. إليك ما يحدث بالضبط. تصد الشحنة السالبة في المشط إلكترونات ذرات الورق ولذلك فهي، رغم أنها ليستْ حرة، لا تقبع إلا برهة قصيرة عِلى الجانب الأقصى من ذراتها. وهي عندما تفعل ذلك تكون جوانب الذرات الأقرب للمشط موجبة بشكل أكبر بقليل مما كانت عليه من قبل. لذا تنجذب الحافة أو ينجذب جانب الورقة ذو الشحنة الموجبة إلى الشحنة السالبة في المشط، وتقفز الورقة ذات الوزن الخفيف جدًّا ناحية المشط. لماذا تهزم القوة الجاذبة نظيرتها الصادة القائمة بين شحنة المشط السالبة والإلكترونات الموجودة في الورقة؟ لأن قوة الصد الكهربي – والجذب كذلك – تتناسب مع قوة الشحنات، لكنها تتناسب عكسيًّا كذلك مع مربع المسافة بينهما. نسمي نحن ذلك قانون كولوم، الذي سمي على اسم شارل أوجستين دي كولوم Charles-Augustine de Coulomb الفيزيائي الفرنسي الذي اكتشف ذلك الاكتشاف الهام، ولسوف تلاحظ أنت تشابهه المذهل مع قانون نيوتن للجاذبية الكونية. لاحظ كذلك أننا نسمي الوحدة الأساسية للشحنة كولوم أيضًا ونسمي وحدة الشحنة الإيجابية + ١ كولوم (نحو ٦ × ١٠$^{١٨}$ بروتون)، بينما نسمي الشحنة السالبة – ١ كولوم (نحو ٦ × ١٠$^{١٨}$ إلكترون).

يقول قانون كولوم بأن أي تغيير مهما كان صغيرًا في المسافة بين الشحنات الموجبة والأخرى السالبة قادر على إحداث تأثير كبير. ولنا أن نعبر بعبارات أخرى فنقول: إن القوة الجاذبة الكامنة في الشحنات القريبة تطغى على القوة الصادة في الشحنات الأبعد.

نسمي هذه العملية بأسرها باسم عملية الحث؛ لأن ما نفعله عند تقريب جسيم مشحون من جسيم محايد هو تخليق شحنات على الجانبين الأقرب والأقصى من الجسيم المحايد، خالقين نوعًا من استقطاب الشحنة في شذرات الورق تلك. يمكنك أن تشاهد أكثر من عرض لهذه التجربة في محاضرتي التي ألقيتها للأطفال وذويهم، والتي سميتها «عجائب الكهرباء والمغناطيسية» في جامعة إم آي تي ورلد، والتي تستطيع مشاهدتها على موقع: http://mitworld.mit.edu/video/319.

أما بخصوص سبب سقوط بعض شذرات الورق عن المشط في حين يظل البعض الآخر ملتصقًا به فهو أمر لا يقل إثارة للاهتمام. فعندما تمس شذرة الورق المشط تنتقل بعض الإلكترونات الفائضة في المشط إلى الورقة. وعندما يحدث ذلك قد تتبقى قوة كهربية جاذبة بين المشط وشذرة الورق، لكنها قد لا تكون بالشدة الكافية لتغلب قوة الجاذبية الأرضية، ومن ثم تسقط الشذرة. إذا كان انتقال الشحنة عاليًا فقد تصير الشحنة الكهربية شحنة صادة، وفي كلتا الحالتين ستقوم قوة الجاذبية والقوة الكهربية بزيادة سرعة شذرة الورق في الاتجاه الأسفل.

الآن قم بنفخ أحد البالونات واعقد طرفه حتى يظل منفوخًا ثم اعقد وترًا بطرفه. ثم جد في منزلك مكانًا تستطيع أن تعلق البالون فيه بحرية. تستطيع تعليقه في مصباح ما. أو تستطيع أن تضع ثقلًا ما على طرف الوتر وتترك البالون يتدلى من فوق منضدة مطبخك بمقدار ست بوصات إلى قدم. اشحن المشط مرة أخرى عن طريق فركه بقوة بقطعة حرير أو في شعرك – تذكر أن المزيد من الفرك ينتج شحنة أقوى. والآن فلتقرب المشط من البالون ببطء شديد. ماذا سيحدث في رأيك؟

جربها الآن. أمر غريب جدًّا أليس كذلك؟ ستجد البالون يتحرك تجاه المشط. فكما كان الحال مع شذرات الورق، صار مشطك ينتج نوعًا من أنواع فصل الشحنة تجاه البالون (الحث). إذن فماذا سيحدث عندما تحرك المشط لبعد أكبر – ولماذا؟ قد تخمن تخمينًا بديهيًّا مفاده أن البالون سوف يرجع إلى وضعه العمودي. لكنك بت الآن تعرف السبب، أليس كذلك؟ فعندما يتلاشى التأثير الخارجي، لا يعود هناك سبب يجعل الإلكترونات موجودة على الجانب الأقصى من ذراتها. انظر ماذا استطعنا أن نستنتج من مجرد فرك لمشط واللهو بشذرات من الورق وبالون.

والآن لتنفخ المزيد من البالونات. ماذا يحدث عندما تفرك أحدها بشدة في شعرك؟ بالفعل، يشرع شعرك يفعل أمورًا غريبة. لماذا؟ لأنه في سلسلة الاحتكاك يكون الشعر الآدمي عند نهايتها الموجبة بينما يكون البالون المطاطي على النقيض منه في الجانب السالب. بعبارة أخرى نقول إن المطاط يلتقط الكثير من الإلكترونات من شعرك مما يجعل شعرك يصير مشحونًا شحنًا موجبًا. فلما كانت الشحنات المتماثلة تتنافر، فماذا بوسع شعرك أن يفعل عندما تكتسب كل خصلة منه شحنة موجبة وتريد أن تفر بعيدًا عن بقية الخصلات ذات الشحنة نفسها؟ تتنافر جميع خصلات شعرك مما يجعلها تنتصب. وهو بالضبط ما يحدث عندما تنزع قبعتك المحكَمة عن رأسك

في الشتاء. فعندما تحتك القبعة بشعرك وهي تنتزع عنه تتركه مشحونًا شحنًا موجبًا فينتصب.

والآن لنعد إلى البالونات؛ فإنك بعد أن فركتَ أحدها بشعرك فركًا شديدًا (وقد يكون فركه بقميصك المخيط من البوليستر ذا نتائج أفضل). أظنك تعلم ما سأقترحه عليك، أليس كذلك؟ فلتضع البالون ملاصقًا لحائط أو ملاصقًا لقميص أحد أصدقائك. ستجده يلتصق به. لماذا؟ إليك السر في ذلك. إنك عندما تفرك البالون تقوم بشحنه. عندما تقرّب البالون من الجدار، الذي هو ليس بموصل إلى هذه الدرجة، تتأثر الإلكترونات الحائمة حول ذرات الجدار بالقوة الصادة للشحنة السالبة للبالون فتقبع لوقت أطول قليلًا في جانب الذرة الأبعد عن البالون وتقضي وقتًا أقصر قليلًا في الجانب الأقرب للبالون – وذلك هو الحث.

بعبارة أخرى نقول إن سطح الجدار عند النقطة التي يلامسها البالون والذي يصير مشحونًا شحنًا موجبًا يتجاذب مع البالون المشحون شحنًا سالبًا. تلك نتيجة مدهشة للغاية. لكن لماذا لا تقوم الشحنتان – الموجبة والسالبة – بتحييد إحداهما الأخرى أثناء انتقال الشحنات مما يجعل البالون يسقط على الفور؟ إنه سؤال ممتاز. من الأسباب أن البالون المطاطي يلتقط بعض الإلكترونات الإضافية، لكن هذه الإلكترونات لا تتحرك بكثير من السهولة في المواد غير الموصلة مثل المطاط، لذا تميل الشحنات لأن تظل مكانها ثابتة. ولا يتوقف الأمر عند ذلك، ولكنك عندما تفرك البالون في الجدار فإنك تخلق المزيد والمزيد من الاتصال. تجده قابعًا هناك يقوم بذلك الجذب الذي يفعله دومًا. لكنه كذلك مثبت بفعل الاحتكاك. أتذكر ركوب لعبة الملاهي الدوارة التي ذكرناها في الفصل الثالث؟ هنا تؤدي القوة الكهربية ذات الدور الذي تؤديه القوة المركزية في لعبة الملاهي الدوارة. ويظل البالون على الجدار لبعض الوقت إلى أن تتسرب الشحنة منه بالتدريج بفعل ما في الجو من رطوبة. (إذا لم يلتصق بالونك أبدًا فمردّ هذا إما إلى أن الجو مفرط في الرطوبة، أو أن بالونك ثقيل الوزن جدًّا – وقد اقترحت عليك استخدام البالونات الرقيقة لهذا السبب).

لَكَم أتمتع بإلصاق البالونات بالأطفال الذين يحضرون محاضراتي العامة. ولطالما فعلتُ هذا لأعوام عديدة في أعياد ميلاد أطفال، ولك أن تحظى بذات المرح بنفسك.

والحث ينجح مع جميع أنواع الأجسام المواصلات منها والعوازل. تستطيع أنت أن تجري تجربة المشط تلك باستخدام واحدة من البالونات المصنوعة من ورق مايلار

المكسو بالألومنيوم المليئة بالهيليوم والتي تستطيع شراءها من محال البقالة أو محال الحاجيات زهيدة الثمن. فما إن تقرب المشط حتى تنزع الإلكترونات الحرة إلى التباعد عن المشط ذي الشحنة السالبة، تاركة الأيونات المشحونة شحنًا موجبًا قرب المشط، وهو الأمر الذي يجذب البالون تجاهه.

رغم أننا نستطيع شحن البالونات المطاطية عن طريق فركها بشعرنا أو قمصاننا، فإن المطاط في الواقع يكاد يكون عازلًا مثاليًا – ولذلك فهو يستخدم في لتغليف الأسلاك الموصلة. يحول المطاط دون تسرب الشحنة من الأسلاك إلى الهواء الرطب أو أن تقفز تجاه أي جسم مجاور محدثةً شررًا. فإنك لا ترغب بكل تأكيد في أي شرر يتقافز حول موجودات قابلة للاشتعال، مثل جدران منزلك. المطاط قادر على حمايتنا من الكهرباء، ويفعل ذلك طوال الوقت. لكن ما لا يقدر على فعله هو حمايتنا من أقوى مصدر نعرفه للكهرباء الاستاتيكية ألا وهو البرق. لسبب ما لا يفتأ الناس يرددون تلك الخرافة التي تتحدث عن أن الأحذية الرياضية المطاطية والإطارات المطاطية قادرةٌ على حمايتنا من البرق. لا أدري ما السبب في استمرارية تصديق هذه الأفكار، لكن يجدر بك أن تنساها على الفور. فضربة البرق من القوة أنها لا تعبأ أبدًا بقطعة المطاط الصغيرة تلك. صحيح أنك قد تكون في أمان من ضربة البرق لو كنت داخل سيارتك – ربما ليس ذلك واقعيًا – لكن لا علاقة لذلك بالإطارات المطاطية. سوف أتناول تلك النقطة لاحقًا.

## الحقول الكهربية والشرر

قلتُ سابقًا إن البرق ما هو إلا شرارة كبيرة، شرارة معقدة، لكنه لا يزال شرارة. لكنك قد تتساءل ما هو الشرر؟ كي نفهم الشرر لا بد أن نفهم أمرًا غاية في الأهمية يتعلق بالشحنة الكهربية. فالشحنات الكهربية كلها تنتج حقولًا كهربية غير مرئية، تمامًا كما تنتج الكتل جميعها حقول جاذبية غير مرئية. تستطيع الإحساس بالحقول الكهربية عندما تأتي بجسمين ذوي شحنتين متعارضتين وتقرب أحدهما من الآخر وترى التجاذب الذي يحدث بينهما. وكذلك فإنك عندما ترى القوة الصادة، التي تنشأ بين جسمين ذوي شحنتين متماثلتين فيتنافران، إنما ترى تأثيرات الحقول الكهربية الناشئة بين الأجسام.

نقيس قوة ذلك الحقل عن طريق وحدات الفولت لكل متر. ليس من اليسير حقيقة أن أفسر لك ما هو الفولت، ناهيك عن الفولت في كل متر، لكنني سوف أحاول. الجهد الكهربي Voltage لجسم ما هو مقياس لما يسمى بالكمون الكهربي Electric Potential. سوف نعين الكمون الكهربي للأرض بصفر. ومن ثم فإن الجهد الكهربي للأرض يساوي صفرًا. والجهد الكهربي للجسم المشحون شحنًا موجبًا موجب؛ ويعرف بكونه كم الطاقة الذي يتعين عليَّ أن أنتجه كي آتي بالوحدة الموجبة للشحنة (+١ كولوم والتي هي شحنة قدرها نحو ٦ × ١٠^١٨ بروتون) من الأرض أو من أي جسم موصل متصل بالأرض (كصنابير المياه الموجودة في منزلك) إلى ذلك الجسم المشحون شحنًا موجبًا. لماذا يتعين عليَّ أن أنتج طاقة كي أحرك وحدة الشحنة تلك؟ تذكر أن ذلك الجسم لو كان مشحونًا شحنًا موجبًا فلسوف يتنافر مع وحدة الشحنة الموجبة. ومن ثم يتعين عليَّ أن أولّد طاقة (في الفيزياء نقول يتعين عليَّ أن أقوم بعمل ما) كي أتغلب على تلك القوة الصادة. ووحدة الطاقة هي الجول Joule. إذا تعين عليَّ أن أولّد قدرًا من الطاقة يساوي ١ جول فإن الكمون الكهربي لذلك الجسم يساوي +١ فولت. وإذا تعين عليَّ أن أولد ١٠٠٠ جول فإن الجهد الكهربي يساوي +١٠٠٠ فولت (لتعريف الجول انظر الفصل التاسع).

ماذا إذا كان الجسم مشحونًا شحنًا سالبًا؟ حينها يكون الكمون الكهربي سالبًا ويعرف بأنه الطاقة التي يتعين عليَّ توليدها كي أنقل وحدة الشحنة السالبة (-١ كولوم أي نحو ٦ × ١٠^١٨ إلكترون) من الأرض إلى ذلك الجسم. إذا كان قدر الطاقة ١٥٠ جول، فإن الكمون الكهربي للجسم يساوي – ١٥٠ فولت.

ومن ثم فإن الفولت هو وحدة الكمون الكهربي. ولقد سُميت هذه الوحدة على اسم الفيزيائي الإيطالي آليساندرو فولتا Alessandro Volta الذي صنع في عام ١٨٠٠ أول خلية كهربية من نوعها والتي نسميها اليوم بالبطارية. لاحظ أن الفولت ليس وحدة للطاقة؛ وإنما هو وحدة الطاقة لكل وحدة شحنة (جول/كولوم).

يسري التيار الكهربي من الكمون الكهربي الأعلى إلى مثيله الأسفل. أما مقدار قوة ذلك التيار فيعتمد على الفارق في الكمون الكهربي وعلى المقاومة الكهربية بين الجسمين. فالعوازل ذات مقاومة كبيرة، أما المعادن فهي ذات مقاومة منخفضة. كلما زاد الفارق في الجهد الكهربي، وكلما انخفضت المقاومة، زاد التيار الكهربي الناتج. يبلغ فارق الكمون بين فتحتي مخرج الكهرباء في جدر منازل الولايات المتحدة ١٢٠

فولت (يبلغ ٢٢٠ فولت في أوروبا)؛ لكن هذا التيار متردد (سوف نتناول موضوع التيار المتردد في الفصل التالي). نسمي وحدة التيار الأمبير (amp Ampere) على اسم الرياضي والفيزيائي الفرنسي آندري ماري أمبير André-Marie Ampère. إذا كان التيار الذي يمر في سلك ما هو ١ أمبير، فهذا يعني أن شحنة قدرها ١ كولوم تمر في كامل السلك في كل ثانية.

ماذا عن الشرر إذن؟ كيف لكل ذلك أن يفسره؟ لو حككت حذاءك حكًّا شديدًا في السجادة، فإنك خلقت فارقًا كبيرًا في الكمون الكهربي، بينك وبين الأرض، أو بينك وبين مقبض الباب المعدني الذي يفصلك عنه نحو ستة أمتار، فارقًا قدره نحو ٣٠,٠٠٠ فولت. هذه الفولتات الـ ٣٠,٠٠٠ تغطي مسافة الأمتار الستة، أو يكون في كل متر ٥٠٠٠ فولت. إذا اقتربتَ من الباب، فلن يتغير فارق الكمون الذي بينك وبين مقبض الباب، لكن المسافة ستقصر ومن ثم ستزداد قوة الحقل الكهربي. لكن عندما تكون على وشك أن تلمس المقبض، سيصير الفارق ٣٠,٠٠٠ فولت في مسافة تبلغ نحو ١ سنتيمتر. أي نحو ٣ ملايين فولت في المتر الواحد.

عند هذه القيمة العالية للحقل الكهربي (في هواء جاف عند ١ جو) يحدث ما نسميه بالانهيار الكهربي. سوف تقفز الإلكترونات تلقائيًا إلى فجوة قدرها ١ سنتيمتر مؤينة الهواء مع فعلها ذلك. وهو الأمر الذي سيخلق بدوره المزيد من الإلكترونات التي ستصنع القفزة التي سينتج عنها الانهيار مسببًا شررًا. سيندفع التيار الكهربي خلال الهواء تجاه إصبعك قبل أن تلمس مقبض الباب. أراهن على أنك الآن ترتجف متذكرًا آخر مرة أصابتك فيها تلك الصدمة الصغيرة الجميلة. وذلك الألم الذي أحسستم به من تلك الشرارة يحدث لأن التيار الكهربي يجعل أعصابك تنقبض بشكل سريع غير محبب.

ما مصدر تلك الضوضاء، صوت القرقعة ذلك، الذي تسمعه عندما تصاب بتلك الصدمة؟ الإجابة سهلة. يقوم التيار الكهربي بتسخين الهواء بسرعة شديدة جدًّا، وهو الأمر الذي ينتج موجة ضغط صغيرة، موجة صوتية تصل إلى مسامعنا. لكن الشرارات تصدر الضوء أيضًا – رغم أنك قد لا تتمكن من رؤية ذلك الضوء خلال النهار، وأحيانًا تراه. لكن الكيفية التي ينتج بها هذا الضوء أكثر تعقيدًا بعض الشيء. فهو ينتج عندما تعود الأيونات التي خلقتْ في الهواء لتندمج مع الإلكترونات الموجودة في الهواء وتبث بعض الطاقة المتاحة في صورة ضوء. وحتى إذا لم تستطع أن ترى ضوء الشرر (لأنك لا تواجه مرآة في غرفة مظلمة) فسوف تستطيع سماع صوت القرقعة عندما

تمشط شعرك في يوم ذو طقس جاف جدًّا.

لو فكرت في الأمر لوجدت أنك، دون جهد كبير، عندما تمشط شعرك أو تنضو قميصك المصنوع من البوليستر، تخلق عند نهايات شعرك أو على سطح قميصك حقولًا كهربية بها ثلاثة ملايين فولت في كل متر. لذا فإنك إذا اقتربت من مقبض الباب وشعرت بالصدمة الكهربية من بعد ٣ ملليمترات مثلًا فإن الفارق في الجهد بينك وبين المقبض سيبلغ نحو ١٠,٠٠٠ فولت.

قد يبدو ذلك فارقًا كبيرًا، لكن معظم الكهرباء الاستاتيكية غير خطيرة على الإطلاق، وذلك مرده في الأساس إلى أن التيار الكهربي (عدد الشحنات التي تمر خلالك في فترة معينة من الزمن)، حتى وهو ذو جهد كهربي عال، تيار صغير جدًّا. فلو لم تكن تتأذى من تلك الصدمات الصغيرة، يمكنك أن تجري التجارب باستخدامها، وتحظى ببعض المرح، وتجري العروض الفيزيائية في ذات الوقت. لكن لا تقم أبدًا بإيلاج أي معادن في منافذ الكهرباء بمنزلك. قد يكون ذلك في منتهى الخطورة، بل إنه قد يهدد حياتك.

جرب أن تشحن نفسك عن طريق فرك جلدك بالبوليستر (بينما تنتعل حذاءً ذا نعل مطاطي، أو تنتعل خفًّا حتى لا تتسرب الشحنة إلى الأرض). أطفئ الضوء وقرب إصبعك ببطء من المصباح المعدني أو مقبض الباب. سوف يتسنى لك أن ترى شرارة تقفز في الهواء بين المعدن وإصبعك قبل أن يتلامسا. وكلما زاد شحنك لنفسك ازداد الفارق في الجهد الكهربي الذي ستخلقه بينك وبين مقبض الباب، وهو الأمر الذي سيقوم بدوره بتعظيم الشرر وتعلية الصوت.

واحد من تلاميذي كان لا يفتأ يشحن نفسه طوال الوقت دون أن يعي ذلك. فقد أبلغني أنه يملك رداء حمام مصنوع من البوليستر لا يرتديه إلا في الشتاء. وقد اتضح أن ذلك كان خيارًا غير موفق؛ لأنه كان كلما خلع رداءه يشحن نفسه ثم يصاب بالصدمة عندما يطفئ مصباحه المعدني الموجود بجوار سريره. فقد اتضح أن جلد الإنسان هو واحد من أكثر المواد ذات الشحنة الموجبة في سلسلة الاحتكاك الكهربي، والبوليستر واحد من أكثر المواد ذات الشحنة السالبة. لذلك يجدر بك أن ترتدي قميصًا من البوليستر إذا أردت أن ترى الشرارات تطير أمام المرآة في غرفتك المظلمة لا رداء حمام من البوليستر.

ولتبيان الكيفية التي بها يشحن الناس بطريقة دراماتيكية (ومرحة للغاية أيضًا)، أدعو أحد تلاميذي الذي يرتدي سترة من البوليستر كي يجلس على كرسي بلاستيكي مقابلًا لبقية الصف (البلاستيك عازل ممتاز). ثم أقوم، وأنا أقف على سطح زجاجي كي أعزل نفسي عن الأرض، بضرب التلميذ بفراء قطة. وأستمر في ضربه لنصف دقيقة أو نحوها وسط قهقهات بقية التلاميذ. بسبب بقاء الطاقة أصير أنا وذلك التلميذ مشحونين بشحنات متناقضة، وكذلك سوف يتراكم فارق الكمون الكهربي بيننا. هنا أظهر لتلاميذ الصف أنني أحمل في يدي أحد طرفي مصباح نيون يدوي، ثم نقوم بإطفاء جميع الأضواء في قاعة الدرس فيسود الظلام الدامس، ثم ألمس التلميذ بطرف المصباح الأنبوبي الآخر، هنا يسطع الضوء (ويصاب كلانا بالصدمة الكهربية). لا بد أن فارق الكمون الكهربي بيني وبين التلميذ لم يقل عن ٣٠,٠٠٠ فولت. وذلك التيار الذي سرى خلال المصباح وخلال جسدينا أفقدنا الشحنة. إنه عرض غاية في الطرافة وغاية في الفاعلية.

إذا بحثتَ في منصة يوتيوب عن عنوان «أستاذ جامعي يضرب تلميذًا»، فستجد ذلك الجزء من المحاضرة الذي أشرع فيه في ضرب التلميذ: www.organic-chemistry.com/videos-professor-beats-student-%5BP4XZ-.hMHNuc%5D.cfm

وللاستزادة في سبر أغوار الكمون الكهربي، أستخدم جهازًا رائعًا يسمى مولد فان دي جراف، الذي يبدو ككرة معدنية بسيطة موضوعة فوق عامود أسطواني. والواقع أنه جهاز عبقري في إنتاجه إمكانات كهربية هائلة. والجهاز الذي أملكه في قاعة الدرس قادر على إنتاج ٣٠٠,٠٠٠ فولت بحد أقصى، لكن هناك من هذه المولدات ما يستطيع إنتاج كمونات أعلى بكثير. إذا شاهدتَ محاضراتي الست الأولى على شبكة الإنترنت في مقرر الكهرباء والمغناطيسية (٨,٠٢) فستشاهد عددًا من العروض المضحكة التي أستطيع إجراءها عن طريق الفان دي جراف. سوف تراني أخلق انهيارًا في الحقل الكهربي – في شكل شرارات هائلة تنتج بين قبة الفان دي جراف الكبيرة والكرة المؤرضة الصغيرة (أي المتصلة بالأرض). سترى طاقة الحقل الكهربي غير المرئي تضيء مصباحًا فلورسنت أنبوبيًا، وعندما يصير ذلك الأنبوب متعامدًا على الحقل الكهربي ستراه «ينطفئ». بل إنك سترى أنه حتى في الظلام الدامس قمت أنا (لبرهة قصيرة) بلمس أحد طرفي الأنبوب، صانعًا دائرة كهربية مع الأرض، فيتوهج الضوء

بشدة أكبر. ستجدني أصرخ قليلًا لأن الصدمة الكهربية كبيرة جدًّا رغم كونها غير خطيرة على الإطلاق. وإذا أردتَ أن تشهد مفاجأة حقيقية (كما فعل تلاميذي)، فلتنظر ماذا يحدث في نهاية المحاضرة السادسة، إذ إنني أعرض طريقة نابوليون المدهشة في اختبار غاز المستنقع. المحاضرة موجودة على العنوان الإلكتروني التالي:

http://ocw.mit.edu/courses/physics/802--electricity-and-magnetism-spring-2002/video-lectures/.

لحسن الحظ لا يكفي الجهد الكهربي وحده لقتلك أو حتى إصابتك بأذى، فالأمر يتوقف على التيار الذي يمر خلال جسدك. والتيار هو كمية الشحنة في كل وحدة زمن، وهو الذي، كما قلتُ آنفًا، يقاس بالأمبير. التيار هو القادر على قتلك أو إيذائك، خاصة إذا كان مستمرًا. لماذا هو خطير؟ بكل بساطة لأن الشحنات التي تتحرك خلال جسدك تجعل عضلاتك تنقبض. فالتيارات الكهربية إذا كانت متدنية المستويات جدًّا فستجعل عضلاتك تنقبض أو «تشتعل» بعض الشيء، وهو الأمر الجوهري للبقاء على قيد الحياة. لكن إذا كان مستوى التيار عاليًا فسيسبب انقباضًا شديدًا في العضلات والأعصاب، فيجعلها تنتفض بشكل مؤلم لا يمكن التحكم به. وإذا ازداد علو التيار أكثر فقد يجعل ذلك القلبَ يتوقف عن النبض.

لتلك الأسباب كان استخدام الكهرباء في التعذيب واحدًا من الجوانب المظلمة في تاريخها – فهي قادرة على إحداث ألم لا يحتمل – وكذلك استخدامها في القتل كما يحدث في حالات الإعدام بالكرسي الكهربائي. إذا كنتَ قد شاهدتَ فيلم مليونير العشوائيات Slumdog Millionaire فلعلك تذكر مشهد التعذيب الفظيع في قسم الشرطة، عندما وصّل أفراد الشرطة المتوحشون قضبانًا كهربائية بجسد الشاب جمال فجعلوه ينتفض بعنف.

لكن المستويات المنخفضة من التيارات الكهربية قد تكون مفيدة للصحة. فإذا كنت قد خضعت لعلاج طبيعي على ظهرك أو كتفك، فلعلك قد تعرضتَ لما يسميه أخصائي العلاج الطبيعي «التحفيز الكهربي Electrical Stimulation». فهم يضعون على العضلة المصابة وساداتٍ موصلة متصلة بمصدر للكهرباء، ثم يزيدون التيار بالتدريج. عندها تشعر بذلك الشعور الغريب، تشعر بعضلاتك تنقبض وتنبسط دونما أدنى مجهود منك.

تُستخدم الكهرباء كذلك في جهود علاجية أكثر دراماتيكية. فلقد شاهدنا جميعًا في المسلسلات التليفزيونية كيف يستخدم أحدهم الوسائد الكهربائية المسماة بجهاز تنظيم ضربات القلب محاولًا تنظيم ضربات قلب مريض يعاني أزمة قلبية. حتى إنني في لحظة من لحظات جراحة القلب التي خضعتُ لها العام الماضي عندما توقف قلبي استخدم الأطباء جهاز الصدمات الكهربائية كي يعيدوا لقلبي الخفقان مجددًا، ولقد نجح الأمر، ولولا هذا الجهاز لما كان لهذا الكتاب أن يرى النور.

يختلف الناس في القدر المحدد للتيار القاتل، وذلك الاختلاف مرده إلى أسباب جلية، منها أنه لا تتوافر لدينا الكثير من الخبرة التجريبية مع تلك المستويات الخطيرة من التيار. كما أن هناك خلافًا حول ما إذا كان ذلك التيار يمر من خلال يديك مثلًا أم من خلال مخك أو قلبك. قد تحترق يدك إذا مر التيار خلالها، لكن الجميع تقريبًا يجمعون على أنه لو مر أكثر من عُشر واحد من أمبير لفترة تقل عن ثانية واحدة خلال قلبك فهذا قادر على قتلك. فالكراسي الكهربائية تستخدم كميات متنوعة تدور حول كمية ٢٠٠٠ فولت وتتدرج ما بين ٥ و١٢ أمبير.

أتذكر حين كان الكبار يحذرونك وأنت طفل ألا تولج شوكة أو سكينًا في جهاز التحميص كي تستخرج قطعة الخبز منه، كي لا تصعقك الكهرباء؟ أهذا حقيقي؟ الحقيقة أنني راجعتُ نسب التيار في ثلاثة من الأجهزة التي في منزلي وهي الراديو (٠,٥ أمبير)، جهاز تحميص الخبز (٧ أمبير) وآلة صنع القهوة الاسبريسو (٧ أمبير). تستطيع أن تجد هذه النسب في قاعدة معظم تلك الأجهزة. بعضها لا تجد فيها مؤشرًا على قدر الأمبير، لكنك تستطيع دومًا أن تحسبها بقسمة الواط الذي هو قدر كهرباء الجهاز على الجهد الكهربي المقيس بالفولت، الذي يكون عادة ١٢٠ في الولايات المتحدة. معظم قواطع التيار في منزلي تتراوح نسبها ما بين ١٥ و٢٠ أمبير. وسواء أكان جهازك ذو الـ ١٢٠ فولت يسحب ١ أمبير أم ١٠ أمبير فليس هذا بالأمر المهم هنا. المهم هو أنه يتعين عليك أن تتجنب التسبب عرضًا في دائرة قصيرة، أو أن تلمس، على وجه الخصوص، ١٢٠ فولت بشيء معدني؛ ولو فعلت ذلك بعد أن تتحمم بوقت قصير فلسوف يتسبب في مقتلك. إذن فماذا نستنتج من كل هذه المعلومات؟ نستنتج ما قلناه لتونا، عندما تأمرك أمك ألا تضع السكين في جهاز تحميص الخبز وهو موصل بالكهرباء فهي على حق. ولو أردتَ إصلاح أي من أجهزتك الكهربائية فعليك أن تحرص على فصلها عن الكهرباء أولًا. لا تنس أبدًا أن التيار قد يكون خطيرًا جدًّا.

## الشرر المقدس

لا شك في أن البرق واحد من أشد أنواع التيار الكهربي خطورة، وهو أيضًا واحد من أروع الظواهر الكهربية. هو ظاهرة كاسحة لا يمكن التنبؤ بها تنبؤًا كاملًا، يشوبها الكثير من سوء الفهم، وغامضة، كلها في وقت واحد. وفي جميع الأساطير، من الإغريقية إلى أساطير قبائل المايا، ظل البرق يعتبر إما رمزًا للكائنات المقدسة، أو أنه من الأسلحة التي سبكتها تلك الكائنات. ولا عجب في ذلك. ففي المتوسط، هناك نحو ١٦ مليون عاصفة رعدية كل عام، أي أكثر من ٤٣,٠٠٠ عاصفة كل يوم، أي ١٨٠٠ كل ساعة من ساعات اليوم، وهي التي تنتج ١٠٠ ومضة برق في كل ثانية، أي ٨ مليون ومضة في اليوم تتوزع على الكوكب بأسره.

يحدث البرق عندما تُشحن السحابات الرعدية. عادة ما تصير قمة السحابة ذات شحنة موجبة بينما تصير قاعدتها ذات شحنة سالبة. أما السبب في ذلك فهو إلى الآن غير مفهوم بالكامل. صدق أو لا تصدق أن أمامنا الكثير لنتعلمه عن فيزياء الغلاف الجوي. لكنْ طلبًا للتبسيط سوف أتخيل الآن سحابة ذات شحنة سالبة في جانبها الأقرب إلى الأرض. بسبب الحث سوف تصير الأرض الأقرب للسحابة ذات شحنة موجبة مما يولد حقلًا كهربيًا بين الأرض والسحابة.

إن فيزياء ضربات البرق غايةٌ في التعقيد، لكن خلاصتها أن وميض البرق (الانهيار الكهربي) يحدث عندما يبلغ الكمون الكهربي بين السحابة والأرض عشرات الملايين من الفولتات. وبالرغم من ظننا بأن ضربة البرق تأتي من السحابة ضاربة الأرض فإنها في الحقيقة تسري من السحابة إلى الأرض ثم تسري مرة أخرى عائدة من الأرض إلى السحابة. يبلغ قدر التيار الكهربي خلال عاصفة متوسطة نحو ٥٠,٠٠٠ أمبير (رغم أنه قد يبلغ بضعة مئات الآلاف من وحدات الأمبير). والحد الأقصى للطاقة الذي يمكن أن تحظى به عاصفة متوسطة يبلغ نحو تريليون واط (١٠[١٢]). لكن ذلك لا يستمر إلا لنحو أعشار قليلة من المايكروثانية. ومن ثم يندر أن يزيد إجمالي القوة التي تبثها ضربة واحدة عن مئات الملايين من وحدات الجول. وذلك يساوي الطاقة التي يستهلكها مصباح كهربي بقوة ١٠٠ واط في شهر واحد. ومن ثم فإن جمع طاقة البرق هو ليس فقط بالأمر غير العملي وإنما هو كذلك غير ذي جدوى.

مكتبة
t.me/soramnqraa

قوس الزجاج يحيط بظل والتر لوين في متحف دي كوردوفا في ماساتشوستس، موقع الصورة الفلكية اليومية بتاريخ ١٣ سبتمبر ٢٠٠٤. بإذن من والتر لوين.

الجدار الضبابي يرتفع في موقع تلسكوب بي تي إيه (BTA) في جبال القوقاز في روسيا. بإذن من والتر لوين.

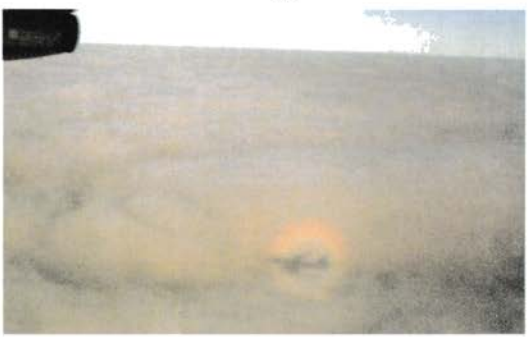
مع اقتراب الضباب (الذي يأتي وفق جدولٍ زمني)، تكون الشمس مشرقة، والنتيجة كما توضح الصورة، هالة من الضوء تحيط بوالتر، (القديس والتر). بإذن من والتر لوين.

قوس قزح أبيض التُقِطتْ صورته بالقرب من بايكس بيك في كولورادو. لاحظ الخط الداكن الزائد في الداخل. بإذن من فويتك ريتشليك.

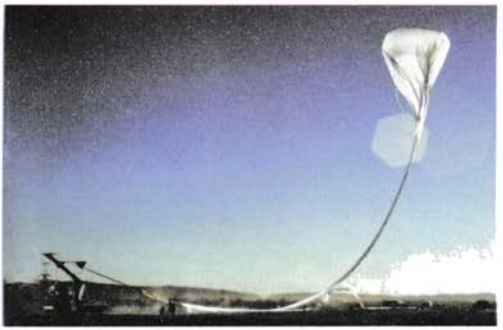
صورة قوس قزح مزدوج فوق مصفوفة المرصد الفلكي الراديوي الكبير في نيومكسيكو. لاحظ أن اللون الأحمر يقع خارج القوس الأساسي، بينما يقع داخل القوس الثانوي؛ لاحظ أيضًا سطوع السماء داخل قوس قزح الأساسي أكثر من خارجه. لكن، على نقيض ذلك، تبدو السماء أسطع خارج قوس قزح الثانوي منها داخله. ويطلق على هذه المنطقة شديدة الظلمة بين القوسين حزام ألكسندر المظلم. بإذن من كينيث آر لانج من جامعة تافتس، ودوجلاس جونسن، ومرصد باتيل في واشنطن.

أقواس زائدة متكررة باللونين الأخضر والأرجواني ملتصقة بقوس قزح. بإذن من أندرو دان.

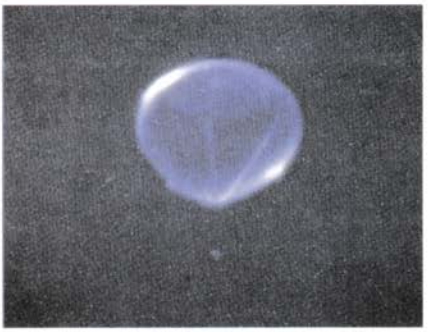
ابنة والتر لوين، إيما، بينما تساعد والدها ببسالة في يومٍ شتوي بارد في إحداث ظاهرة قوس قزح. بإذن من والتر لوين.



صورة التقطها والتر لوين لهالة المجد إذ تحيط بظل الطائرة التي كان راكبًا فيها في المقعد الواقع خلف جناح الطائرة مباشرة في مركز هالة المجد. بإذن والتر لوين.

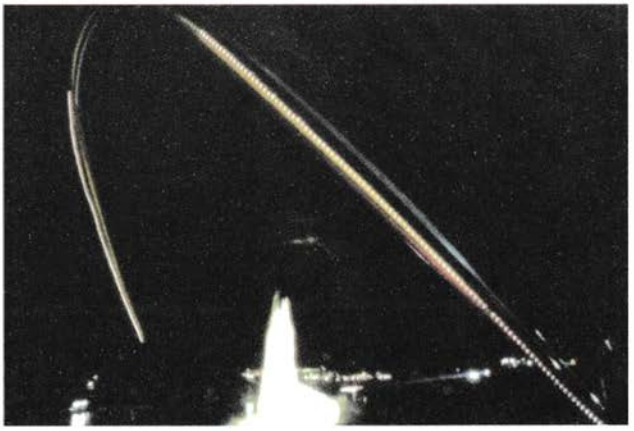


إطلاق منطاد بحجم ٤٠ مليون قدم مكعب من أليس سبرينجز؛ بإذن من والتر لوين.

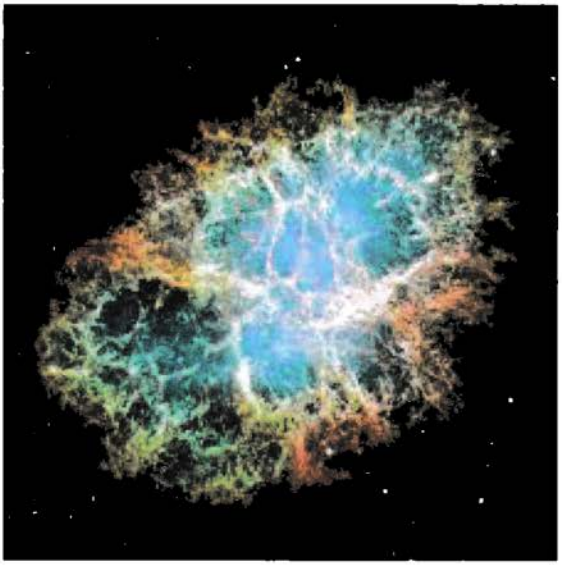


المنطاد البالغ حجمه أربعين مليون قدم مكعب على ارتفاع ١٤٥،٠٠٠ قدم كما بدا بعدسات التلسكوب؛ بإذن من والتر لوين.

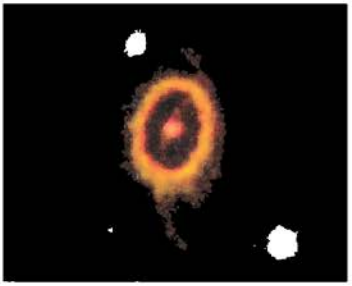
نفخ بالون بحجم ٣٤ مليون قدم مكعب، بعد وقت قصير من شروق الشمس في ميلدورا في أستراليا في الخامس عشر من أكتوبر عام ١٩٧٠. وقد اكتشف فريق لوين خلال تلك الرحلة 4+GX 1 ودورته التي تبلغ ٢،٣ دقيقة. بإذنٍ من والتر لوين.



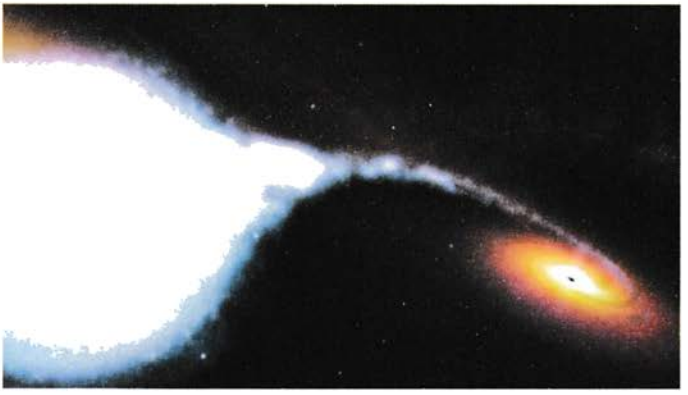
منطاد قوس قزح من الاحتفالات الختامية لدورة الألعاب الأوليمبية الصيفية لعام ١٩٧٢ التي أقيمت في ميونخ والتي تعاون فيها والتر لوين مع أوتو بيبنا (انظر الفصل الخامس عشر). بإذن من ولف هابر.



سديم السرطان، بقطره البالغ حوالي ١١ سنة ضوئية. ينبعث الضوء الأبيض من الإلكترونات المحيطة بالمجال المغناطيسي للسديم؛ أما تلك الشعيرات، فهي بقايا الغلاف الجوي لنجم انفجر في عام ١٠٥٤. عند النظر إليه من الأرض، يبدو السديم أصغر ست مرات من القمر. بإذن من ناسا وفريق هابل هيريتدج؛ مصدر الصورة ناسا/ وكالة الفضاء الأوروبية/مختبر الدفع النفاث/ جامعة ولاية أريزونا.



المستعر الأعظم 1987A. الحلقات الثلاثة هي مادة لفظها النجم قبل آلاف السنين من الانفجار. وقد ورد وصف الحلقة الداخلية شديدة السطوع في متن الكتاب بالتفصيل (انظر الفصل الثاني عشر). ويمكن رؤية الضوء المنبعث من النجم المنفجر في مركز الحلقة الداخلية. أما النجمان الأبيضان، فلا علاقة لهما بالمستعر الأعظم 1987A. بإذن من دكتور كريستوفر بوروز، وكالة الفضاء الأوروبية/معهد مراصد علوم الفضاء/وكالة ناسا.



رسم تخيلي لنظام Cygnus x-1 النجمي الثنائي؛ على اليسار النجم المانح المسمى HDE 226868، الذي تبلغ كتلته، بحسب التقديرات، ثلاثين مثل كتلة الشمس. أما الثقب الأسود المتنامي على اليمين، فيحيط بقرص التنامي الذي يتشكل بفعل تدفق الغاز من النجم المانح. وتفوق كتلة الثقب الأسود كتلة الشمس بـ١٥ مرة. بإذنٍ من وكالة الفضاء الأوروبية، تلسكوب هابل الفضائي.

يعلم الغالب الأعم منا أننا نستطيع حساب مدى بُعد ضربة البرق عن طريق ملاحظة الفاصل الزمني بين رؤية البرق وسماع هزيم الرعد. لكن السبب في ذلك يمنحنا نظرة عن كيفية عمل تلك القوى الكاسحة. ولا علاقة لها بذلك التفسير الذي سمعته ذات مرة من أحد تلاميذي حين قال لي: إن البرق يخلق منطقة من مناطق الضغط المنخفض بشكل أو بآخر، أما الرعد فينتج عن اندفاع الهواء داخل تلك المنطقة واصطدامه بالهواء الآتي من الجهة الأخرى. لكن الواقع هو أن العكس بالضبط هو ما يحدث. حيث تسخن طاقة الصاعقة الهواء حتى تصل درجة حرارته إلى ٢٠,٠٠٠ سلزيوس أي ما يزيد عن ثلاثة أضعاف حرارة سطح الشمس. حينها يخلق ذلك الهواء فائق الحرارة موجة ضغط كاسحة ترتطم بالهواء الأقل حرارة الذي يحيطه به خالقًا موجات صوتية تنتقل عبر الهواء. ولما كانت موجات الصوت تنتقل في الهواء بسرعة تبلغ نحو ميل كل خمس ثوان، فإنك تستطيع أن تحسب بسهولة نسبية مدى بُعد ضربة البرق عن طريق عد الثواني.

ما تفعله صواعق البرق من تسخين شديد للهواء يفسر كذلك ظاهرة أخرى لعلك قد وجدتها في عواصف البرق. هل لاحظت يومًا تلك الرائحة المميزة التي تعبق الهواء عقب حدوث العواصف الرعدية في الريف، رائحة بها نضارة من نوع ما، كما لو كانت تلك العاصفة قد غسلت الهواء من كل ما يشوبه؟ من العسير أن تلحظ تلك الرائحة في المدينة لكثرة ما بها من تلوث ناتج عن عوادم السيارات. لكن حتى ولو لم تلحظ تلك الرائحة الرائعة – وإذا لم تكن فعلت، فإني أنصحك أن تنتبه لها في المرة التالية التي تشهد فيها عاصفة برق في العراء – أراهن أنك لم تعلم أنها رائحة الأوزون الذي هو عبارة عن جزيء أكسجين مؤلف من ثلاث ذرات أكسجين. تتألف جزيئات الأكسجين العادية عديمة الرائحة من ذرتي أكسجين ونسميها $O_2$ . لكن حرارة البرق العظيمة تفصل بين جزيئات الأكسجين، ليست جميعها وإنما قدر كاف معتبر منها. وذرات الأكسجين المنفردة تلك لا تكون ثابتة وهي وحيدة لذا فإنها تلتصق بمثيلاتها العادية الـ $O_2$ مؤلفة الـ $O_3$ أو الأوزون.

رغم أن الكميات الصغيرة من الأوزون تفوح برائحة محببة، فإن الكميات المركزة تركيزًا كبيرًا منها ذات رائحة ليست بذات الطيب. تستطيع أن تجد تلك التركيزات العالية أسفل خطوط الجهد الكهربي العالي. ولو سمعت أزيزًا من تلك الخطوط فمعنى ذلك أن هناك بعض الشرر المنبعث، وهو ما نسميه التفريغ الهالي، وهو ما يعني

أن هناك أوزونًا يخلق. إذا كان الهواء ساكنًا فستتمكن من استنشاق الرائحة.

والآن لنتفكر في فكرة كون الأحذية الرياضية تحميك من ضربات البرق. إن صاعقة البرق التي تتراوح شدتها بين ٥٠,٠٠٠ و١٠٠,٠٠٠ أمبير، والقادرة على تسخين الهواء لدرجة حرارة تزيد عن ثلاثة أضعاف درجة حرارة سطح الشمس، إذا ما ضربتْ، فلا شكَّ أنها ستحرقك فتحيلك إلى هشيم يابس، أو تجعلك تتشنج من الصدمة الكهربية، أو تجعلك تنفجر عن طريق تحويل كل ما في جسدك من ماء إلى بخار فائق الحرارة، سواء كنت تنتعل حذاء رياضيًّا أم لا. وذلك بالضبط هو ما يحدث للأشجار، إذ تفجر عصارتها وتنزع عنها لحاءها. مئة مليون جول من الطاقة – وهو قدر يساوي نحو خمسين رطلًا من الديناميت – هو ليس بالكم القليل.

وماذا عن مدى أمانك داخل سيارتك ذات الإطارات المطاطية والبرق يضرب؟ في هذه الحالة قد تكون في مأمن – لا ضمانات هنا – لكن لسبب مختلف تمامًا. إذ إن التيار الكهربي يمر في الحدود الخارجية للموصلات، وهي الظاهرة التي تعرف باسم التأثير السطحي Skin Effect، وفي السيارة تكون أنت جالسًا فعليًا داخل صندوق معدني، وهو موصل جيد. بل إنك تستطيع أن تلمس باطن فتحة التهوية الموجودة في لوحة القيادة الأمامية دون أن تتأذى. لكنني أهيب بك ألا تحاول ذلك، وذلك لأن غالبية السيارات اليوم صارت تحتوي على أجزاء مؤلفة من ألياف زجاجية، وهي المادة التي لا يعمل بها التأثير السطحي. بعبارة أخرى أقول إن البرق لو ضرب سيارتك فقد تمر أنت – وسيارتك – بتجربة غير سارة بشكل غير مسبوق. قد ترغب في مشاهدة مقطع مصور قصير، به البرق يضرب سيارة، وقد ترغب أيضًا في الاطلاع على صور لشاحنة بعد أن ضربها البرق على هذه المواقع الإلكترونية: www.weatherimagery.com/blog/rubber-tires-protect-lightning/ و www.prazen.com/cori/van.html. من الجلي جدًّا أن ذلك ليس بالأمر الذي يجازف المرء به.

من حسن حظنا أن الأمر يختلف كثيرًا في حالة الطائرات التجارية. فتلك الطائرات تتلقى ضربات البرق فيما متوسطه أكثر من مرة في كل عام، لكنها تنجو منها بسبب التأثير السطحي. فلتشاهد هذا المقطع المصور على موقع: www.youtube.com/watch?v=036hpBvjoQw.

أمر آخر لا ينبغي لك أن تجازف به، متعلق بالبرق، هي تجربة شهيرة تنسب إلى بنيامين فرانكلين، والتي تتمثل في تعليق مفتاح في طائرة ورقية تحلق خلال عاصفة

رعدية. أراد بنيامين فرانكلين، كما افترض الناس، أن يختبر فرضية مفادها أن السحب الرعدية تخلق النيران الكهربية. استنتج هو أنه إذا كان البرق فعلًا مصدر الكهرباء، فإن الطائرة الورقية ما إن يبتل خيطها من جراء الأمطار حتى يصير موصلًا جيدًا لتلك الكهرباء (رغم أنه لم يستخدم تلك الكلمة) التي ستنتقل إلى ذلك المفتاح المربوط في قاعدة الخيط. إذا قرب برجم إصبعه من المفتاح فسيشعر بالشرارة. وبالضبط كما لم يتوافر من دليل معاصر على زعم نيوتن في وقت متأخر من حياته أن إلهامه جاء من رؤيته لتفاحة تسقط من شجرة إلى الأرض، فليس هناك من دليل معاصر على أن فرانكلين أجرى هذه التجربة، إلا من ذكرٍ لها جاء في خطاب أرسله إلى الجمعية الملكية في إنجلترا، وذكر آخر أعقبه بخمس عشرة سنة من قبل صديقه جوزيف بريستلي Joseph Priestly مكتشف الأكسجين.

وسواء أكان فرانكلين قد أجرى تلك التجربة أم لا – وهي تجربة غاية في الخطورة وقد تكون قاتلة – فإنه نشر وصفًا لتجربة أخرى صممها كي يجلب البرق إلى الأرض عن طريق وضع قضيب حديدي على قمة برج أو قبة كنيسة. بعد ذلك بسنوات قام الفرنسي توماس فرانسوا داليبار Thomas-Francois Dalibard الذي التقى فرانكلين وترجم أطروحته إلى الفرنسية، بإجراء نسخة مختلفة قليلًا من تلك التجربة، وعاش ليحكيها. فقد نصب قضيبًا حديديًا يبلغ طوله ٤٠ قدمًا مشيرًا نحو السماء واستطاع مراقبة الشرر في قاعدة القضيب التي كانت غير مؤرضة.

كان البروفيسور جورج فلهلم ريتشمان عالمًا مرموقًا، ولد في إستونيا وعاش في سانت بيترسبرج في روسيا، وكان عضوًا في أكاديمية سانت بيترسبرج للعلوم، وقد درس ظاهرة الكهرباء دراسة مستفيضة، وهناك من الدلائل ما يشير إلى أنه تلقى إلهامه من تجربة داليبار وقرر أن يجرب الأمر. ذكر مايكل برايان شيفر في كتابه البديع أن ريتشمان ثبّت قضيبًا حديديًا في سطح منزله، ومد سلسلة نحاسية بين القضيب وبين آلة قياس كهربية موجودة في معمله بالطابق الأول.

شاء الحظ – أو القدر – أن تحدث عاصفة رعدية أثناء اجتماع لأكاديمية العلوم في أغسطس من عام ١٧٥٣. على الفور هرع ريتشمان إلى منزله آخذًا معه الفنان الذي سيخط رسوم كتابه الجديد. بينما كان ريتشمان يراقب آلته ضرب البرق ضربته، فانتقل عبر القضيب والسلسلة وقفز نحو قدم ريتشمان ضاربًا رأسه، فصعقه وقذف به عبر الغرفة، وضرب الفنان أيضًا فأفقده وعيه. تستطيع أن تطلع على الكثير من الرسوم التي

تصور ذلك المشهد رغم أنه ليس من المؤكد أن راسمها هو ذلك الفنان نفسه.

كان فرانكلين قد اخترع أداة غريبة مشابهة لكنها كانت مؤرضة، وهي التي نعرفها اليوم باسم قضيب البرق. تؤدي هذه الأداة عملًا رائعًا في تأريض صواعق البرق، لكن يختلف عن ذلك الذي خمنه فرانكلين. فقد ظن هو أن قضيب البرق سيحدث تدفقًا متواصلًا بين السحابة المشحونة والمبنى، وهو الأمر الذي يحافظ على فارق الكمون منخفض المستوى، مما يزيل خطر البرق. كان واثقًا من تلك الفكرة إلى درجة أنه أوعز إلى الملك جورج الثاني بأن يقيم تلك القضبان الحادة فوق القصر الملكي وفوق مخازن الذخيرة. رأى خصوم فرانكلين أن قضبان البرق تلك لن تفعل، إلا أنها سوف تجذب البرق، وأن تأثير ذلك التدفق الذي سيخفض الكمون الكهربي بين المبنى والسحب الرعدية لن يكون ذا بال. لكن الملك صدق فرانكلين وأقام تلك القضبان كما تقول الرواية.

لم يمض وقت طويل حتى ضربت إحدى صواعق البرق أحدَ مخازن الذخيرة فلم تُحدث به من الضرر إلا القليل. إذن فقد نجح القضيب في تحقيق الهدف الذي أقيم لأجله، لكن لأسباب مختلفة تمامًا. كان منتقدو فرانكلين على حق، فقضبان البرق تجذب البرق بالفعل وذلك التدفق هو بالفعل غير ذي بال مقارنة بتلك الشحنة الهائلة الموجودة في السحب الرعدية. لكن القضيب ينجح فعلًا في تحقيق غرضه؛ لأنه إذا كان من السمك الكافي لاحتواء ما بين ١٠,٠٠٠ و١٠٠,٠٠٠ أمبير فإن التيار سيظل محصورًا في القضيب ولسوف تنتقل الشحنة إلى الأرض. لم يكن فرانكلين مجرد عبقري وإنما كان محظوظًا كذلك.

وستندهش أيما اندهاش لمعرفة أننا إذا فهمنا تلك القرقعة الضئيلة التي تحدث عند نزع المرء كنزته في الشتاء، فسنفهم أيضًا دقائق تلك العواصف البرقية العاتية التي تستطيع أن تضيء كامل السماء المظلمة، ونفهم كذلك واحدًا من أكثر أصوات الطبيعة علوًا وإثارة للرعب.

إننا بصورة أو أخرى نحذو حذو بنيامين فرانكلين في محاولتنا لاكتشاف أمور تتجاوز فهمنا. في أواخر ثمانينيات القرن الماضي تمكن العلماء من التقاط صور فوتوغرافية لأشكال من البرق تضرب في ارتفاعات تعلو السحب بمسافات بعيدة جدًّا جدًّا. أحد تلك الأنواع يسمى البرق الأحمر، ويتألف من تدفقات كهربية لونها برتقالي مائل إلى الحمرة، تعلو الأرض بمسافة تتراوح بين ٥٠ و٩٠ كيلومترًا. وهناك أيضًا

ما يسمى بالبرق النفاث الأزرق الذي يفوق سابقه في الحجم، لدرجة أن طوله يبلغ ٧٠ كيلومترًا أحيانًا، ويشق الجزء العلوي من الغلاف الجوي. ولأننا لم نعلم بهذه الظواهر المدهشة إلا منذ ما يزيد قليلًا عن العشرين عامًا فإن هناك الكثير جدًّا مما لا نعرفه عن أسبابها. ورغم كل ذلك الذي نعرفه عن الكهرباء فإن هناك ألغازًا حقيقية في كل عاصفة رعدية من الـ ٤٥,٠٠٠ التي تحدث يوميًّا.

# الفصل الثامن

# ألغاز المغناطيسية

يجد معظم الناس متعةً في اللعب بقطع المغناطيس، ويُعزى جزء من ذلك إلى أنه يؤثر بقوةٍ نشعر بها ونلهو بها، رغم أن تلك القوة غير مرئية. فحين نقرِّب قطعتين مغناطيسيتين إحداهما من الأخرى، فإنهما إما تتجاذبان أو تتنافران، شأنهما في ذلك شأن الأجسام ذات الشحنات الكهربية. يعتقد معظمنا بوجود علاقة وطيدة بين المغناطيس والكهرباء – فكل شخص مهتم بالعلوم تقريبًا ملمٌّ بكلمة «كهرومغناطيسي» على سبيل المثال — لكننا نعجز عن شرح سبب أو كيفية ارتباطهما على وجه الدقة. إنه موضوع ضخم، وقد أمضيتُ دورة دراسية تمهيدية بالكامل في دراسته، لذا سنكتفي هنا بدراسة قشور الموضوع. ومع ذلك، فإن فيزياء القوى المغناطيسية قادرةٌ على إثارة دهشتنا وكشْف أمور مستغلقة علينا.

## عجائب المجالات المغناطيسية

إذا تناولتَ قطعة مغناطيس ووضعتَها أمام شاشة تليفزيون قديمة غير مسطحة عند فتحها، فسترى أشكالًا نمطية وألوانًا لطيفة على الشاشة. ففي عصر ما قبل شاشات البلور السائل (إل سي دي) أو شاشات البلازما المسطحة، كانت سيول الإلكترونات المنطلقة من خلفية التليفزيون باتجاه الشاشة تنشّط الألوان، فتتلون الصورة على الشاشة بإتقان. وحين تُقرب مغناطيسًا قويًّا من إحدى تلك الشاشات، كما أفعل في قاعة التدريس، يؤدي ذلك إلى ظهور أشكال نمطية غريبة على الشاشة؛ تلك الأشكال النمطية جذّابة حتى إن الأطفال في سن الرابعة أو الخامسة يستمتعون بمشاهدتها. (يمكنك الاطلاع على صور لتلك الأنماط على الإنترنت).

ويبدو – في واقع الأمر — أن الأطفال يكتشفون هذه الظاهرة بأنفسهم طوال الوقت؛ إذ تمتلئ الشبكة العنكبوتية بالآباء الذين ينشدون المساعدة في إصلاح

تليفزيوناتهم التي تعطلتْ بعدما حرّك أطفالهم القطع المغناطيسية، التي تثبت بها الأوراق على الثلاجات، على شاشاتهم. من حسن الحظ أن أجهزة التليفزيون تُزود بجهاز إزالة المغنطة ليزيل مغنطة الشاشة، وعادة ما تُحل المشكلة من تلقاء نفسها بعد بضعة أيام أو أسابيع. لكن في حالة عدم حدوث ذلك، فستضطر إلى الاستعانة بفني لإصلاح المشكلة. ومن ثم، لا أنصح بوضع مغناطيس بالقرب من شاشة تليفزيونك (أو شاشة حاسوبك)، إلا إذا كان التليفزيون أو الشاشة قديمة ولا تكترث لأمرها؛ وهنا يمكنك أن تحظى ببعض التسلية. لقد أبدع الفنان الكوري العالمي، نام جون بايك، أعمالًا فنية كثيرة بتأثير تشويه مقاطع الفيديو باستخدام الطريقة نفسها تقريبًا. كذلك في قاعة التدريس، أشغل التليفزيون على أحد البرامج المملة من اختياري — وعادة ما تكون الإعلانات مناسبة جدًّا لهذا الشرح العملي — فنستمتع جميعًا بالطريقة التي يشوه بها المغناطيس الصورة تمامًا.

يعود تاريخ المغناطيسية إلى العصور القديمة، شأنها شأن الكهرباء؛ حيث يبدو أن اليونانيين القدماء، والهنود والصينيين كانوا يعرفون أن تلك الصخرة — التي باتت تُعرف اليوم بحجر المغناطيس — تجذب قطع الحديد الصغيرة (مثلما عرف الإغريقيون أن الكهرمان بعد فركه يجتذب أجزاءً من أوراق الشجر). واليوم نطلق على هذه المادة المغنتيت، وهو معدن مغناطيسي طبيعي، بل إنه في الواقع أقوى معدن مغناطيسي طبيعي على سطح الأرض. ويتركب المغنتيت من الحديد والأكسجين ($Fe_3O_4$)، ومن ثم، فإنه أحد أكاسيد الحديد.

لكن المغناطيس لا يقتصر على المغنتيت فحسب، إذ توجد أنواع كثيرة مختلفة من المغناطيس. وقد اضطلع الحديد بدور هائل في تاريخ المغناطيسية، وما زال مكونًا رئيسًا في كثير من المواد التي تتأثر بالمغناطيس، حتى إن تلك المواد الأكثر انجذابًا إلى المغناطيس يُطلق عليها المواد المغناطيسية الحديدية؛ وعادة ما تكون هذه المواد معادن أو مركبات معادن، ومنها الحديد نفسه بالطبع، والكوبلت، وأكسيد الكروم الرباعي (الذي كان يدخل بنسبة ثقيلة في صناعة الأشرطة المغناطيسية). بعض هذه المواد يمكن أن تكتسب مغنطة دائمة بإدخالها إلى مجال مغناطيسي. وثمة مواد أخرى تسمى المواد المغناطيسية المسايرة (أو البارامغناطيسية) التي تنجذب إلى المغناطيس بدرجة ضعيفة عند إدخالها لمجال مغناطيسي، ثم يزول عنها التمغنط باختفاء هذا المجال. تشمل تلك المواد الألمونيوم، والتنجستن، والماغنسيوم، صدق

أو لا تصدق، والأكسجين. تخلق بعض المواد، التي تسمى المواد الدايامغناطيسية، مجالات مغناطيسية ضعيفة متعاكسة في وجود مجالٍ مغناطيسي. وتتضمن تلك الفئة من المواد، البزموت والنحاس والذهب والزئبق والهيدروجين وملح المائدة، بالإضافة إلى الخشب والبلاستيك والكحول والهواء والماء. (أما السبب الذي يجعل بعض المواد فيرومغناطيسية، وبعضها بارامغناطيسية، وأخرى دايامغناطيسية، فيتعلق بكيفية توزيع الإلكترونات حول نواة الذرة — وهو أمر شديد التعقيد إلى حدٍّ يحول دون قدرتنا على التطرق له بالتفصيل).

بل إن هناك مواد مغناطيسية سائلة، وهي ليست مواد فيرومغناطيسية بالضبط، لكنها محاليل مواد فيرومغناطيسية تستجيب للمغناطيس بطرق فاتنة ومدهشة. يمكنك صنع واحدة من تلك المواد المغناطيسية السائلة بسهولة؛ ويمكنك الحصول على الإرشادات عبر الرابط التالي: http://chemistry.about.com/od/demonstrationsexperiments/ss/liquidmagnet.htm. إذا وضعتَ هذا المحلول، الذي يكون سميكًا، على قطعة من الزجاج ووضعتَ تحته مغناطيسًا، فاستعد لترى بعض النتائج المدهشة — سترى أمرًا أشد عجبًا من مشاهدة اصطفاف برادة الحديد على طول خطوط المجال المغناطيسي، كما ربما قد رأيتَ في المدرسة الإعدادية.

في القرن الحادي عشر، كان الصينيون يمغنطون الإبر من خلال ملامستها بحجر المغنتيت، ثم يعلقونها في خيط حريري. وهنا، كانت الإبر تصطف تلقائيًا من الشمال إلى الجنوب؛ إذ كانت تصطف مع خطوط المجال المغناطيسي للأرض. وفي القرن التالي، كانت البوصلات تستخدم في الملاحة في كلٍّ من الصين والقنال الإنجليزي. وكانت تلك البوصلات تتكون من إبرة ممغنطة طافية في وعاء به ماء. ألم يكن ذلك عبقريًا؟ مهما انعطف الوعاء مع انعطاف القارب أو السفينة، كانت الإبرة تظل مشيرةً لاتجاهي الشمال والجنوب.

لكن الطبيعة أكثر عبقرية؛ فكما نعرف، تحوي أجسام الطيور المهاجرة قطعًا دقيقة من المغنتيت تستخدمها على ما يبدو كبوصلات داخلية، مما يساعد في إرشادها عبر طرق هجرتها. بل يظن بعض علماء الأحياء أن المجال المغناطيسي للأرض يحفز مراكز بصرية في بعض الطيور وحيوانات أخرى، مثل السلمندر، ما يرجح أن تلك الحيوانات تستطيع رؤية المجال المغناطيسي للأرض إلى حدٍّ لا يُستهان به. كم رائع ذلك؟

وفي عام ١٦٠٠، نشر العالم والطبيب البشري البارز، ويليام جلبرت — الذي لم يكن طبيبًا عاديًّا، بل طبيب الملكة إليزابيث الأولى — كتابه «عن المغناطيس والأجسام المغناطيسية ومغناطيسية الأرض»، الذي يزعم فيه أن الأرض نفسها مغناطيس، وذلك بناءً على النتائج التي توصل إليها من خلال تجربته التي أجراها على كرة صغيرة ممغنطة، صممتْ لتكون نموذجًا لكوكب الأرض؛ ربما كانت تلك الكرة أكبر قليلًا من حجم ثمرة الجريب فروت، وقد كانت البوصلات الصغيرة المثبتة عليها تستجيب على النحو ذاته الذي تستجيب به على سطح الأرض. وادعى جلبرت أن البوصلات تشير شمالًا لأن الأرض مغناطيس، وليس لوجود جزر مغناطيسية في القطبين الشمالي والجنوبي، أو لأن البوصلات كانت تشير نحو النجم القطبي، بولاريس، حسبما كان يعتقد بعضهم.

وقد أصاب جلبرت بالتأكيد في اعتقاده أن للأرض مجالًا مغناطيسيًّا، وأن لها قطبين مغناطيسيين (كقطبي قطع المغناطيس التي تثبت على الثلاجات)، واللذَين لا يتوافقان تمامًا مع القطبين الشمالي والجنوبي الجغرافيين. ولا يقتصر الأمر على ذلك؛ إذ يتزحزح هاذان القطبان المغناطيسيان قليلًا، لمسافة تقدر بحوالي ١٥ كيلومتر تقريبًا سنويًّا؛ ومن ثم، فإن الأرض من ناحية تعمل عمل قطعة المغناطيس البسيطة – تلك القطعة المعدنية المستطيلة الممغنطة العادية التي يمكن أن تشتريها من متجر الأدوات الترفيهية للهواة، لكنها تختلف تمامًا من نواحٍ أخرى. وقد استغرق العلماء زمنًا طويلًا للوصول إلى نظرية معقولة تفسر وجود مجال مغناطيسي للأرض؛ إذ لم يكن واقع وجود كميات هائلة من الحديد في مركز الأرض كافيًا لتفسير ذلك، وذلك لأنه عندما تتعدى درجة الحرارة حدًّا معينًا (وهو ما يُطلق عليه درجة حرارة كوري) تفقد الأجسام خواصها الفيرومغناطيسية، ولا يستثنى الحديد من ذلك، حيث تبلغ درجة حرارة كوري للحديد ٧٧٠ درجة سيلزيوس، ومركز الأرض أشد قيظًا من ذلك كما نعلم!

تلك النظرية بالغة التعقيد، وتتعلق بالتيارات الكهربية السارية في مركز الأرض، وبدوران الأرض — ويطلق علماء الفيزياء عليها نظرية الدينامو. (يستعين علماء الفيزياء الفلكية كذلك بنظرية الدينامو لتفسير تولُّد المجالات المغناطيسية للنجوم، بما في ذلك الشمس، التي تتبادل أقطاب مجالها المغناطيسي مواقعها كل أحد عشر عامًا). قد يبدو الأمر مذهلًا لك، لكن العلماء ما زالوا يعملون على نموذج رياضي فيما يخص الأرض ومجالها المغناطيسي؛ بعبارة أوجز، المجال المغناطيسي أُمر بالغ التعقيد. وما

أسهم في زيادة عملهم تعقيدًا هو وجود أدلة جغرافية على أن المجال المغناطيسي للأرض قد تغير جذريًّا على مدار القرون؛ حيث انتقلت الأقطاب لمسافات أبعد كثيرًا من تزحزحها السنوي، ويبدو أن قطبي المجال المغناطيسي للأرض أيضًا قد تبادلَا مواقعهما — وذلك لأكثر من ١٥٠ مرة على مدار السبعين مليون عامًا الماضية فقط. ألا يبدو ذلك جنونيًّا؟

واليوم صار بإمكاننا رسم مخطط للمجال المغناطيسي للأرض بشيء من الدقة، بفضل الأقمار الصناعية (مثل القمر الصناعي الدنماركي أورستد) المزودة بأجهزة قياس حساسة للمغناطيسية. وقد ساعدنا ذلك على معرفة أن المجال المغناطيسي للأرض يمتد لمسافة مليون كيلومتر في الفضاء. كما صرنا نعلم أن المجال المغناطيسي يحدث أحد أجمل الظواهر الطبيعية في الغلاف الجوي في أقرب نطاقاته من الأرض.

ربما تذكر أن الشمس تبعث سيلًا عارمًا من الجسيمات المشحونة، التي تكون على الأرجح بروتونات وإلكترونات، فيما يُعرَف بالرياح الشمسية. هنا يعمل المجال المغناطيسي للأرض على توجيه بعض من هذه الجسيمات إلى الغلاف الجوي للأرض عند القطبين المغناطيسيين. عند اصطدام تلك الجسيمات السريعة، التي يبلغ متوسط سرعاتها ٤٠٠ كيلومتر في الثانية، بجزيئات الأكسجين والنتروجين في الغلاف الجوي، تتحول بعضٌ من الطاقة الحركية (طاقة الحركة) إلى طاقة كهرومغناطيسية في صورة ضوء – حيث يطلق الأكسجين الضوء الأخضر أو الأحمر، فيما يطلق النتروجين ضوءًا أزرق أو أحمر. ربما تخمن الآن ما أوشك على قوله، وقد أصبتَ التخمين: فهذا هو سبب ذلك العرض الضوئي الساحر المعروف بالشفق القطبي الشمالي، الأضواء الشمالية في النصف الأعلى من الكرة الأرضية، والشفق القطبي الجنوبي، الأضواء الجنوبية في النصف الأسفل من الكرة الأرضية. فلم لا تُرى تلك الأضواء سوى عند أقصى الشمال أو أقصى الجنوب؟ لأن الرياح الشمسية تدخل الغلاف الجوي للأرض بصفة أساسية بالقرب من القطبين المغناطيسيين، حيث يكون المجال المغناطيسي في أشد قوةٍ له. ويُعزى سبب ازدياد تأثيرات تلك الظاهرة في بعض الليالي مقارنة بالليالي الأخرى إلى أنه متى حدثت انفجارات شمسية، تزداد الجسيمات التي تصنع ذلك العرض الضوئي. ويمكن أن تتفاقم تلك التأثيرات عند حدوث انفجارات شمسية هائلة، مما يسبب ما يُطلق عليه العواصف الجيومغناطيسية، التي تؤدي إلى حدوث ظاهرة الشفق القطبي بعيدًا عن المناطق المعتادة، والتي قد تعوق البث الإذاعي وعمل

الحواسيب الآلية وعمليات الأقمار الصناعية، بل وقت تتسبب في انقطاع الكهرباء.

إذا لم تكن من سكان الدائرة القطبية (أنتاركتيكا)، فلن يتسنى لك رؤية تلك الأضواء كثيرًا. ولذا، إذا سافرت يومًا مساءً على متن طائرة متجهة إلى أوروبا من شمال شرق الولايات المتحدة (ومعظم تلك الرحلات تكون مسائية)، فلربما عليك أن تحاول حجز مقعد على الجانب الأيسر من الطائرة؛ ذلك لأنك ستكون على ارتفاع سبعة أميال في الغلاف الجوي، وهنا قد تسنح لك الفرصة برؤية بعض الأضواء الشمالية من نافذة الطائرة، ولا سيما إذا كانت هناك زيادة حادة في النشاط الشمسي حديثًا، وهو ما يمكن معرفته بالبحث على الإنترنت. لقد رأيتُ تلك الأضواء بالطريقة نفسها مرات عدة، لذلك أحجز مقعدًا على الجانب الأيسر من الطائرة وقتما أمكنني ذلك. أعتقد أن لديّ متسع كافٍ من الوقت لمشاهدة الأفلام في المنزل، أما على الطائرة فإنني أراقب الأضواء الشمالية ليلًا. وأستمتع بجمال الطبيعة الخلابة في أوقات النهار.

علاوة على ذلك، فإننا ندين للمجال المغناطيسي للأرض، لأننا دونه ربما عانينا بعضًا من العواقب الخطيرة للتدفق المستمر للجسيمات المشحونة التي تُمطر غلافنا الجوي. فلولا المجال المغناطيسي، لربما دمَّرت الرياح الشمسية الغلاف الجوي وقضتْ على المياه قبل ملايين السنوات، مما كان سيخلق ظروفًا تجعل تطور الحياة على الأرض أشد صعوبة، إن لم يكن مستحيلًا. ويفترض العلماء أن ضعف المجال المغناطيسي للمريخ مع ذلك القصف للرياح الشمسية هو سبب رقة سمك الغلاف الجوي للكوكب الأحمر وندرة المياه على سطحه مقارنة بالأرض، وهي بيئة لا يمكن للبشر العيش فيها إلا بمساعدة نظم قوية لحفظ الحياة.

## لغز الكهرومغناطيسية

في القرن الثامن عشر، شرع عدد من العلماء يظنون بأن الكهرباء مرتبطة بالمغناطيسية بنحو ما — فيما كان يظن آخرون، مثل الإنجليزي توماس يانج والعالم الفرنسي أندريه ماري أمبير أنهما لا ترتبطان إحداهما بالأخرى بأي نحو كان. كان ويليام جلبرت يعتقد بأن الكهرباء والمغناطيسية ظاهرتان منفصلتان تمامًا، لكنه درس كليهما في ذات الوقت وكتب عن الكهرباء في كتابه «عن المغناطيسية» كذلك. وقد وصف قوة الجاذبية التي يكتسبها الكهرمان بعد فركه بأنها «قوة كهربية» (تذكر أن

مرادف كهرمان في اللغة اليونانية القديمة هو «electron» [والتي اشتُقت منها كلمة «electricity» الإنجليزية]). كما ابتكر نسخةً من المقياس الكهرومغناطيسي، وهو أبسط طريقة لقياس الكهرباء الاستاتيكية والكشف عن وجودها. (المقياس الكهربائي عبارة عن قضيب معدني في نهايته مجموعة من أشرطة الزينة، بمجرد تمرير شحنة كهربية في القضيب، تنتصب تلك الأشرطة متباعدةً بعضها عن بعض، وكأنها نسخة معملية من الشعر الأشعث).

وقد دعت الأكاديمية البافارية للعلوم إلى كتابة مقالات حول العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسية خلال عامي ١٧٧٦ و١٧٧٧. وقد عرف الناس لزمن طويل أن التفريغ الكهربائي للبرق كان يُعطل البوصلات، وقد كان بنجامين فرانكلين بنفسه هو من مغنط الإبر لتفريغ قارورة ليدن. (وقارورة ليدن هي اختراع هولندي يعود إلى منتصف القرن الثامن عشر، وكانت تستخدم في حفظ الشحنات الكهربية. وهي تُعَد صورة بدائية من جهاز المكثف). لكن رغم ما شهده القرن التاسع عشر من تزايدٍ كبير في دراسات الكهرباء، لم يربط أي عالمٍ بوضوح بين التيار الكهربي والمغناطيسية إلى أن توصل الفيزيائي الدنماركي هانز كريستيان أورستد (من مواليد عام ١٧٧٧) إلى اكتشافه المحوري الذي أثبت العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسية. وحسبما ذكر المؤرخ فريدريك جريجوري، كانت تلك هي المرة الوحيدة في تاريخ الفيزياء الحديثة التي يُتوصَل فيها إلى مثل هذا الاكتشاف الهائل في قاعة تضج بالطلاب.

ففي عام ١٨٢٠، لاحظ أورستد أن تيارًا كهربائيًا يسري عبر سلكٍ يتصل ببطارية أثَّر في إبرة بوصلة بالقرب منه، حيث حولها إلى اتجاه عمودي على السلك بعيدًا عن القطبين المغناطيسيين الشمالي والجنوبي. وحين قطع تدفق التيار الكهربي بفصل السلك، عادتْ إبرة البوصلة لموضعها المعتاد. ولا نعرف على وجه اليقين إن كان أورستد يجري تلك التجربة عمدًا كجزء من محاضرة، أو إن كان لاحظ ذلك التأثير المذهل فيما تصادف وجود البوصلة بالقرب منه. فرواياته في هذا الشأن مختلفة — كما سبق أن رأينا أكثر من مرة في تاريخ الفيزياء.

وسواء أكان الأمر صدفةً أم عمدًا، فإن تلك التجربة ربما كانت أهم تجربة يجريها عالم فيزياء. وقد خلص، بحسب المنطق، إلى أن التيار الكهربي ولَّد مجالًا مغناطيسيًا عند مروره عبر السلك، وأن الإبرة المغناطيسية للبوصلة تحركت استجابةً لذلك التيار المغناطيسي. وقد كان ذلك الاكتشاف العظيم بمثابة إشارة البدء لما أعقبه من كم مهول

من الأبحاث في الكهرباء والمغناطيسية في القرن التاسع عشر، والتي كان أبرزها تلك التي أجراها كلٌّ من أندريه ماري أمبير، ومايكل فاراداي، وكارل فريدريتش جاوس، وأخيرًا الإطار النظري العظيم الذي وضعه جيمس كليرك ماكسويل.

نظرًا لأن التيار الكهربي هو شحنات كهربية متحركة، أوضح أورستد أن الشحنات الكهربية المتحركة تولِّد مجالًا مغناطيسيًّا. وفي عام ١٨٣١، اكتشف مايكل فاراداي أنه عند تمرير مغناطيس عبر ملف أسلاك، فإنه يولد تيارًا كهربائيًّا في الملف. وهكذا أثبتَ فاراداي أن ما أوضحه أورستد، أن التيارات الكهربية تولِّد مجالًا مغناطيسيًّا، يمكن أن تسري بالعكس أيضًا، حيث إن المجال المغناطيسي يولِّد تيارًا كهربيًّا كذلك. ومع ذلك، فالنتائج التي توصل إليها كلٌّ من فاراداي وأورستد ليستْ معقولة بداهةً، ألا يبدو لك ذلك صحيحًا؟ إذا مرّرت مغناطيسًا بالقرب من ملف موصِّل — والملفات النحاسية مناسبة جدًّا لهذا الغرض؛ لأن النحاس موصل جيد — فلِم يتولّد تيار في هذا الملف؟ لم تكن أهمية هذا الاكتشاف واضحةً منذ البداية؛ لكن حسبما تقول الرواية، بعد فترة وجيزة، سأل سياسي مشبوه فاراداي عما إن كان لاكتشافه هذا أيُّ قيمة عملية، ومن المفترض أن فاراداي قد أجابه قائلًا: «سيدي، لا أعرف لهذا الاكتشاف نفعًا؛ لكني على يقين من أنك ستفرض عليه ضريبة يومًا ما».

هذه الظاهرة البسيطة، التي يمكن استعراضها بسهولة في المنزل، قد لا يكون لها أي مغزى على الإطلاق، إلا أن اقتصادنا وكل ما بنته يد البشر يقوم عليها دون مبالغة. ولولا هذه الظاهرة لكنا نحيا اليوم مثلما كان يعيش أجدادنا تقريبًا في القرنين السابع عشر والثامن عشر، بلا هواتف أو حواسيب.

فكيف، إذن، نحصل على كل تلك الكهرباء التي نستخدمها اليوم؟ بصفة عامة، نحصل عليها من محطات الكهرباء، التي تولِّد الكهرباء باستخدام المولدات الكهربائية. تتمثل آلية عمل المولدات بالأساس في تحريك ملفات النحاس عبر مجالات مغناطيسية؛ وهكذا لم نعد نحرك المغناطيس. كان أول مولِّد يبتكره مايكل فاراداي عبارة عن قرصٍ نحاسي كان يحركه بذراع بين ذراعي مغناطيس على شكل حدوة حصان؛ وكانت فرشاة مثبتة على الحافة الخارجية للقرص تتصل بسلك، وأخرى مثبتة على الذراع الدوراني في قلب القرص الدوار تتصل بسلك آخر. وعند توصيله السلكين بجهاز أميتر، كان بإمكانه قياس التيار المتولد. لقد حوَّل اختراعُه الطاقةَ (المتمثلة في الطاقة العضلية في هذه الحالة!) التي ضخها في الجهاز إلى كهرباء. إلا أن ذلك المولد

لم يكن بالغ الفاعلية لأسباب مختلفة، من بين أهمها أن القرص النحاسي كان يُدار يدويًا. ويتعين إلى حدٍ ما تسمية المولدات بمحولات الطاقة؛ وذلك لأن كل ما تفعله هو تحويل شكل من الطاقة، وهي الطاقة الحركية في هذه الحالة، إلى طاقة كهربية. بعبارة أخرى، لا تتولد الطاقة من العدم. (سأتناول موضوع تحويل الطاقة بمزيد من التفصيل في الفصل التالي).

## تحويل الكهرباء إلى حركة

الآن وقد عرفنا كيفية تحويل الحركة إلى كهرباء، دعونا ننظر إلى القيام بالعكس، أي تحويل الكهرباء إلى حركة. اتجهتْ شركات السيارات، أخيرًا، إلى إنفاق مليارات الدولارات لتصنيع سيارات كهربائية تحول الكهرباء إلى حركة. تسعى تلك الشركات لابتكار محركات كهربية تتسم بالقوة والكفاءة لهذه السيارات. فما هي المحركات؟ إنها آلات تعمل على تحويل الطاقة الكهربية إلى حركة. وتقوم جميع المحركات على مبدأ يبدو بسيطًا لكنه بالغ التعقيد في واقع الأمر: إذا وضعتَ ملفًا من الأسلاك الكهربية (يسري فيه تيار كهربي) في وجود مجالٍ مغناطيسي، فسوف يدور الملف على الأرجح. وتتوقف سرعة دورانه على عوامل مختلفة، منها شدة التيار، وشدة المجال المغناطيسي، وشكل الملف، وما إلى ذلك. ويقول علماء الفيزياء إن المجال المغناطيسي يؤثر بعزمٍ على الملف الموصل كهربيًا. وتشير كلمة «عزم» إلى القوة التي تجعل الأجسام تدور.

بإمكانك تصور العزم بسهولة إذا سبق لك أن غيرت إطار عجلة سيارة؛ إذ لا بد أنك تعلم أن أصعب أجزاء هذه العملية هي فك الصواميل التي تثبت العجلة في محور الدفع. ويُعزى ذلك إلى أن تلك الصواميل تكون محكمة الربط، وأحيانًا ما يبدو أنها جامدة حتى إنك تؤثر بقوةٍ مهولة على مفتاح العجل الذي يُمسك بالصامولة. وكلما زاد طول مقبض مفتاح العجل، زاد العزم. وهكذا إذا كان المقبض بالغ الطول، فسيكون بإمكانك فك الصواميل بأقل جهدٍ ممكن. أما عند ربط الصواميل بعد استبدال الإطار الاحتياطي بالإطار المفرغ من الهواء، فإنك تؤثر بعزم في الاتجاه المعاكس.

في بعض الأحيان، قد تجد أن الصواميل لا تتزحزح مهما بذلتَ من جهد؛ في تلك الحالة، عليك إما رش بعضٍ من WD-٤٠ (وهو منتج لا ينبغي أن يخلو منه

الصندوق الخلفي للسيارة لهذا الغرض ولغيره)، ثم انتظر قليلًا حتى تنفك الصامولة، أو بإمكانك الدق على ذراع مفتاح العجل بمطرقة (وهو الأداة الأخرى التي لا ينبغي أن تخلو منها السيارة!).

لسنا مضطرين أن نخوض في تعقيدات العزم هنا. كل ما ينبغي أن تعرفه هو أنك إذا مرّرت تيارًا كهربيًّا عبر ملف كهربي (وبإمكانك استخدام بطارية في هذه الحالة)، ثم وضعتَ هذا الملف في مجالٍ مغناطيسي، فسيؤثر عزمٌ على الملف، ومن ثم سيبدأ في الدوران. وكلما زادت شدة التيار وشدة المجال المغناطيسي، يزيد العزم. وهذا هو القانون الذي يقوم عليه محرك التيار المستمر، وهو نسخة بسيطة يسهل إعدادها.

إذن، ما وجه الاختلاف بين التيار المستمر والتيار المتردد؟ إن قطبية الطرفين الموجب والسالب في البطارية ثابتة لا تتغير (حيث يظل الموجب موجبًا ويظل السالب سالبًا)؛ وهكذا، عند توصيل بطارية بسلك موصل، يتدفق تيار كهربي باستمرار في اتجاه واحد، وهذا ما نطلِق عليه التيار المستمر. ومع ذلك، في المنازل (في الولايات المتحدة)، يتردد فرق الجهد بين فتحتي مخرج الكهرباء بتردد يبلغ ٦٠ هرتز. وفي هولندا، ومعظم البلدان الأوروبية، يبلغ التردد ٥٠ هرتز. ومن ثم، عند توصيل سلك كهربي، ولنقل لمصباح كهربي متوهج أو ملف تسخين، بمخرج كهرباء منزلي، فإن التيار يتردد (من اتجاه إلى الاتجاه المعاكس) بتردد ٦٠ هرتز (أي إن التيار يتردد بين الاتجاهين ١٢٠ مرة في الثانية)، وهذا ما يُطلَق عليه التيار المتردد.

كل عام، في مادة الكهرباء والمغناطيسية التي أدرسها، نُقِيم مسابقةً لإعداد محرك كهربي. (وكانت المرة التي تجرى فيها تلك المسابقة أمامي قبل سنوات طويلة بين زميلَيَّ وصديقَيَّ الأستاذين فيت بوشا وفكتور وايسكوف). يتسلم كل طالب مظروفًا يحتوي على المواد البسيطة التالية: مترين من سلك نحاسي معزول، ومشبكي ورق، ودبوسَي رسم، وقطعتَي مغناطيس، وقطعة خشب صغيرة. ويتعين عليهم إحضار بطارية مقاس AA بجهد ١,٥ فولت. وبإمكانهم استخدام أية أدوات، ويجوز لهم قطع الخشب أو حفر ثقوب؛ لكن المحرك لا بد أن يُعد من المواد الموجودة في المظروف (ولا يجوز استخدام شريط لاصق أو صمغ). وكانت مهمتهم تتمثل في بناء محرك يعمل بأقصى سرعة ممكنة (أي ينتج أكبر عدد ممكن من الدورات في الدقيقة) باستخدام تلك المواد البسيطة. والغرض من مشابك الأوراق هو أن تستخدم كدعامات للملف خلال دورانه، وأما السلك فهو ضروري لصنع الملف، وأما المغناطيس، فلا بد أن يوضع كي

يؤثر بعزمٍ على الملف عند مرور التيار الكهربي فيه من البطارية.

لنفترض أنك ترغب في الاشتراك في المسابقة، وأنه بمجرد توصيلك البطارية بالملف الذي صنعته، بدأ الملف في الدوران باتجاه عقارب الساعة؛ لا بأس إلى الآن. لكن ربما تندهش إذا لم يستمر الملف في الدوران. والسبب وراء ذلك أن العزم الذي يؤثر على الملف يعكس الاتجاه كل نصف دورة؛ ويكون انعكاس العزم عكس اتجاه دوران عقارب الساعة؛ ومن ثم، قد يبدأ الملف الذي صنعته في الدوران عكس اتجاه عقارب الساعة. ولا حاجة لقول إن ذلك ليس المطلوب من المحرك؛ فنحن نريد دورانًا مستمرًا في اتجاه واحد (سواء أكان في اتجاه عقارب الساعة أو عكسها). ويمكن التغلب على هذه المشكلة من خلال عكس اتجاه التيار الساري عبر الملف كل نصف دورة. وعلى ذلك النحو، سيظل العزم يؤثر في الملف في اتجاه واحد فقط، ومن ثم، يستمر الملف في الدوران في ذلك الاتجاه فحسب.

هكذا، يتعين على طلابي حتمًا التغلب على مشكلة انعكاس العزم خلال بنائهم المحركات، وقلةٌ منهم تنجح في بناء ما يُطلق عليه المبادل الكهربائي، وهو وسيلة تعكس اتجاه التيار بعد كل نصف دورة. لكنه معقد الصنع. ومن حسن الحظ أن ثمة حلًا ذكيًا ويسيرًا لتلك المشكلة دون عكس اتجاه التيار، ويتمثل الحل في التالي: إذا استطعتَ وقف سريان التيار (ومن ثم العزم المبذول على الملف) بعد كل نصف دورة، فلن يؤثر عزمٌ على الملف على الإطلاق خلال نصف كل دورة، وهكذا يظل العزم يؤثر في اتجاه واحد في النصف الآخر من كل دورة. والنتيجة النهائية لذلك هو استمرار دوران الملف في نفس الاتجاه.

في هذه المسابقة، أمنح درجة واحدة لكل مئة دورة في الدقيقة ينتجها المحرك الذي صممه الطالب، بحيث تكون الدرجة النهائية عشرين درجة؛ ويحب الطلاب هذا المشروع، ونظرًا إلى أنهم طلاب معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، فقد أتوا عبر السنوات بتصميمات مذهلة. وربما عليك أن تجري هذه التجربة بنفسك؛ وبإمكانك إيجاد التعليمات بالنقر على رابط ملف بصيغة pdf الملحق بملاحظاتي للمحاضرة الحادية عشرة على 02-http://ocw.mit.edu/courses/physics/8 ./electricity-and-magnetism-spring-2002/lecture-notes-

ويستطيع جميع الطلاب تقريبًا بناء محرك قادر على إنتاج ٤٠٠ دورة لكل دقيقة بسهولة تامة. فكيف يجعلون الملف يدور في الاتجاه نفسه؟ أولًا: بما أن السلك

معزول تمامًا، فعليهم كشط الغطاء العازل عن أحد طرفي السلك، وذلك لكي يظل موصلًا بأحد طرفي البطارية — ولا يهم بالطبع أي الطرفين يختارون؛ إلا أن التعامل مع الطرف الآخر من السلك هو الأصعب. فالطالب يريد أن يسري التيار في اتجاه واحد عبر الملف لنصف دورة – بعبارة أخرى، يريد أن يقطع الدائرة الكهربية في منتصف دورتها. ومن ثم، فإنه يكشط نصف العزل فقط عن الطرف الآخر من السلك. وهذا يعني أن السلك العاري يعادل نصف محيط السلك. وهكذا، خلال توقف التيار الكهربي (أي كل نصف دورة)، يواصل الملف الدوران رغم عدم وجود عزم يؤثر عليه (وذلك لعدم وجود ما يكفي من احتكاك لإيقافه خلال نصف الدورة). ولضبط كشط العزل المحيط بالسلك ومعرفة نصف السلك الذي ينبغي أن يكون عاريًا لا مفر من إجراء تجارب — لكن كما سبق أن ذكرتُ، ليس بإمكان أي شخص تقريبًا أن يحصل على ملف يحقق أكثر من ٤٠٠ دورة في الدقيقة. وهذا ما فعلتُه – لكني لم أستطع الحصول على محرك ينتج أكثر من ٤٠٠ دورة في الدقيقة.

بعد ذلك، أخبرني بعض طلابي بمشكلتي. فما إن يبدأ الملف في الدوران لما يزيد قليلًا عن بضع مئات من الدورات في الدقيقة، حتى يشرع في الاهتزاز على دعامتيه (مشبكي الأوراق)، مما يقطع الدائرة الكهربية بنحو متكرر، ومن ثم، يعرقل عزم الدوران. وهكذا، فقد عرف الطلاب الأذكياء كيفية أخذ قطعتين من السلك لتثبيت طرفي الملف على مشبكي الورق مع الحفاظ على دورانه بأقل قدر من الاحتكاك. وقد أدى ذلك التعديل إلى دوران الملف، صدق أو لا تصدق، ٤٠٠٠ دورة في الدقيقة!

هؤلاء الطلاب شديدو الإبداع. ففي جميع المحركات تقريبًا، يكون محور دوران الملف أفقيًا؛ إلا أن أحد الطلاب بنى محركًا محور دورانه رأسي؛ وقد وصل أفضل محرك بناه هؤلاء الطلاب على الإطلاق إلى ٥٢٠٠ دورة في الدقيقة — تذكر أن تلك المحركات تعمل ببطارية صغيرة بجهد ١,٥ فولت! أتذكر الطالب الفائز؛ كان طالبًا في السنة الأولى، وقد قال لي وهو يقف معي بعد المحاضرة أمام قاعة المحاضرات: «الأمر سهل يا أستاذ لوين. بإمكاني أن أبني محركًا ينتج ٤٠٠٠ دورة في الدقيقة في عشر دقائق تقريبًا». وقد عمد إلى تنفيذ ذلك، أمام عيني.

لكن ليس عليك محاولة بناء أحد تلك المحركات. فهناك محرك أبسط يمكن بناؤه في بضع دقائق، وبمكونات أقل: بطارية قلوية، وقطعة سلك نحاسي صغيرة، وبرغي (أو مسمار)، وقطعة مغناطيس مستديرة صغيرة. ويُطلق عليه المحرك المتجانس. يمكن

الاطلاع على خطوات بناء محرك متجانس بالتفصيل، ومقطع فيديو لمحرك متجانس أثناء عمله على الموقع التالي: www.evilmadscientist.com/article.php/HomopolarMotor (اترك لي رسالة إذا فاقت سرعة محركك ٥٠٠٠ دورة في الدقيقة).

وفي عرض تقديمي أجريه في قاعة المحاضرات، لا يقل تسلية عن مسابقة المحركات، ولكن بطريقة مختلفة تمامًا، أستعين بملف كهربي يبلغ قطره قدمًا وبلوحٍ موصِل. يولّد التيار الكهربي المار في الملف مجالًا مغناطيسيًا، كما صرتَ تعرف؛ يولد التيار الكهربي المتردد في الملف مجالًا مغناطيسيًا مترددًا. (تذكر أن التيار الكهربي الذي تولده البطارية تيار مستمر). وبالنظر إلى أن تردد التيار الكهربي في القاعة التي ألقي بها محاضراتي يبلغ ٦٠ هرتز، كشأن كل مكان آخر في الولايات المتحدة، فإن التيار ينعكس في الملف كل ١/١٢٠ ثانية. فإذا وضعتَ هذا الملف على لوح معدني، فإن المجال المغناطيسي المتغير (وأطلق عليه المجالَ المغناطيسي الخارجي) سيخترق اللوح الموصل. ووفقًا لقانون فاراداي، سيؤدي هذا المجال المغناطيسي المتغير إلى سريان التيارات الكهربية في اللوح المعدني؛ هذه التيارات نسميها التيارات الدوامية. تلك التيارات الدوامية بدورها ستولد مجالاتها المغناطيسية المتغيرة. وهكذا، يصبح لدينا مجالان مغناطيسيان: المجال المغناطيسي الخارجي والمجال المغناطيسي الذي تولده التيارات الدوامية.

خلال نصف الزمن في الدورة التي تستغرق ١/٦٠ من الثانية، يكون اتجاهَا المجالين المغناطيسيين متعاكسين، وسينفر اللوح من الملف، أما خلال النصف الآخر من زمن الدورة، فسيكون اتجاه المجالين المغناطيسيين واحدًا وسيجذب اللوحُ الملفَ. ولأسباب دقيقة نوعًا ما وتقنيةٍ للغاية لدرجة يصعب معها مناقشتها هنا، هناك محصلة قوى تنافرية تؤثر على الملف، وتلك القوى شديدة بما يكفي لرفع الملف. يمكنك أن تشاهد ذلك في مقطع الفيديو الملحق بالدورة ٨,٠٢، محاضرة ١٩ على الموقع: http://videolectures.net/mit802s02_lewin_lec19/. شاهد الدقيقة ٤٤ و٢٠ ثانية من المحاضرة.

أرى أنه ينبغي لنا استغلال هذه القوة لرفع شخص، وقد قررت أن أرفع امرأة في الصف الذي أدرسه، كما يفعل السحرة، وذلك من خلال بناء ملف عملاق، وحثها على الرقود فوقه، ومن ثم رفعها. وهكذا، اجتهدتُ أنا وصديقاي ماركوس هانكِن

وبيل سانفورد (من مجموعة العروض العملية الفيزيائية) بتمرير ما يكفي من تيار عبر الملفات، ولكننا في كل مرة كان الأمر ينتهي بانصهار قواطع الدائرة الكهربائية. ومن ثم، تواصلنا مع إدارة مرافق معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا وأخبرناهم بما نحتاج إليه — بضعة آلاف أمبير من التيار الكهربي — فضحكوا منا؛ وأخبرونا قائلين: «علينا إذن أن نعيد تصميم معهد ماساتشوستس من جديد للحصول على هذا القدر من التيار الكهربي!». لقد كان ذلك مؤسفًا جدًّا؛ إذ إن عددًا من النساء كنَّ قد راسلنني عبر البريد الإلكتروني، عارضات أن تُرفعن على الملف. فكان عليّ أن أرد عليهن جميعًا برسائل اعتذار. لكن ذلك لم يُثننا عن المحاولة، وهو ما ستراه بمشاهدة فيديو المحاضرة عند الدقيقة ٤٧ و٣٠ ثانية. وقد أوفيتُ بوعدي؛ لكن تبين أن المرأة كانت أخف وزنًا بكثير مما خططتُ له في البداية.

## الكهرومغناطيسية تمد يد العون

إن تجربة رفع امرأة مناسبة جدًّا لتقديم عرض عملي جيد ومضحك، لكن الرفع المغناطيسي له العديد من الاستخدامات الأروع والأنفع؛ فهو الأساس الذي تقوم عليه تقنيات جديدة مسؤولة عن أمتع آليات النقل في العالم وأسرعها وأنظفها.

ربما سمعت عن القطارات المغناطيسية المعلقة فائقة السرعة؛ إنها تلك القطارات التي أسرت لب الكثيرين بما تجمعه من مميزات تشمل الاعتماد على سحر القوى المغناطيسية الخفية، والتصميم الإيروديناميكي الانسيابي المعاصر، بالإضافة إلى سرعتها الفائقة. تُعرف هذه القطارات بقطارات ماجليف، وهو اختصار للمصطلح الإنجليزي «magnetic levitation» أي الرفع المغناطيسي. كما تَعرِف بالتأكيد أنه عند تقريب قطبين مغناطيسيين معًا فإنهما إما يتجاذبان أو يتنافران. وهكذا فإن الرؤية المذهلة التي تقوم عليها قطارات الماجليف هي أنك إذا استطعتَ أن تجد طريقة للتحكم في قوة التقارب أو التنافر، فستتمكن بالتأكيد من تعليق قطار فوق مسارات، ثم جذبه أو دفعه بسرعةٍ فائقة. في أحد أنواع القطارات، التي تعمل بالتعليق الكهرومغناطيسي، يعمل الكهرومغناطيس على رفع القطار بقوة الجذب المغناطيسي؛ إذ يزود جسم القطار من الأسفل بذراع على شكل حرف C، بحيث يكون الجزء العلوي من الذراع مثبتًا في القطار، بينما الجزء السفلي المعشق تحت المسار، مزود بمغناطيس على سطحه العلوي يعمل على رفع القطار باتجاه القضبان المصنوعة من مادة فيرومغناطيسية.

وبما أنه ينبغي ألا يعلق القطار بالقضبان، وبما أن القوة الجاذبة غير مستقرة بطبيعتها، يلزم وجود نظام رد فعل تصحيحي معقد للحرص على أن يظل القطار بعيدًا عن القضبان بالمسافة المناسبة والتي تقل عن ٢,٥٤ سم! يتمثل ذلك في نظام كهرومغناطيسي منفصل ينفتح وينغلق بصورة تزامنية، مُمدًا القطار بقوة الدفع، أي «يجذب» القطار إلى الأمام.

أما النظام الرئيسي الآخر للقطارات الكهرومغناطيسية المعلقة، والذي يُعرف بقطارات التعليق الكهروديناميكي، فتعتمد آليته على قوة التنافر المغناطيسي، باستخدام مواد استثنائية تُعرَف بالموصلات الفائقة؛ والموصل الفائق هو مادة تنعدم مقاومتها الكهربية حين تظل شديدة البرودة. ونتيجة لذلك، لا يحتاج الملف فائق البرودة المصنوع من مادة فائقة التوصيل إلا قليلًا جدًا من الطاقة الكهربية لتوليد مجال مغناطيسي شديد القوة. والأمر الأعجب أن المغناطيس فائق التوصيل يمكن أن يعمل كمصيدة مغناطيسية؛ إذ في حالة تقريب مغناطيس آخر منه، يعمل التفاعل بين الجاذبية والمادة فائقة التوصيل على تثبيت المغناطيس على مسافة محددة. ومن ثم، فإن القطارات الكهرومغناطيسية المعلقة التي تعتمد على الموصلات الفائقة أكثر استقرارًا بطبيعة الحال من القطارات التي تعتمد على نظم التعليق الكهرومغناطيسي. فإذا حاولتَ تقريب الموصل الفائق والمغناطيس أحدهما من الآخر أو إبعاد أحدهما عن الآخر، فستجد صعوبة بالغة في فعل ذلك؛ حيث سيظل الاثنان ثابتين على نفس المسافة من أحدهما الآخر. (ستجد مقطع فيديو قصير رائع يشرح العلاقة بين المغناطيس والموصل الفائق على الموقع: http://www.youtube.com/watch?v=nWTSzBWEsms).

وهكذا، إذا اقترب القطار، المزود بمغناطيس في قاعدته، أكثر من اللازم من المسار، المزود بموصلات فائقة، فإن قوة التنافر الزائدة ستدفع القطار بعيدًا. وإذا ابتعد القطار أكثر من اللازم، فستعمل الجاذبية على جذبه محركةً إياه تجاه المسار. وسيترتب على ذلك ارتفاع عربات القطار بنحو متزن. وهنا يكون دفعُ القطار للأمام، الذي يعتمد في الغالب على القوة التنافرية، أسهلَ منه في أنظمة التعليق الكهرومغناطيسي.

ولكلا الآليتين مميزاتها ومساوئها، إلا أن كلتاهما قلصتا بفاعلية مشكلة الاحتكاك الشهيرة في عجلات القطارات التقليدية — وهو أحد عوامل الإتلاف الرئيسة — وفي الوقت نفسه تتيحان الاستمتاع برحلة أكثر استقرارًا وهدوءًا، وفوق كل هذا أسرع. (لكن مازال من الضروري أن تعالج مشكلة مقاومة الهواء، التي تتزايد بمعدل كبير

مع سرعة القطار. وهذا هو سبب مراعاة جانب الانسيابية الإيروديناميكية في تصميم تلك القطارات). يستغرق قطار شانغهاي المغناطيسي المعلق، الذي يعمل بنظام التعليق الكهرومغناطيسي وافتُتح عام ٢٠٠٤، حوالي ثمان دقائق لقطع مسافة ٣٠,٥٧ كيلومتر، الفاصلة بين المدينة والمطار، بمتوسط سرعة يتراوح (حسبما كان في عام ٢٠٠٨) ما بين ٢٢٤ و٢٥١ كيلومتر تقريبًا في الساعة – رغم أن الحد الأقصى لسرعته ٤٣١,٣٠ كيلومتر في الساعة، أي أسرع من أي خط سكة حديد فائق السرعة آخر في العالم. يمكنك مشاهدة مقطع فيديو قصير لقطار شانغهاي من إعداد مصنعي القطار من الرابط التالي: www.youtube.com/watch?v=weWmTldrOyo.
أما أعلى سرعة سجلها قطار مغناطيسي معلق على الإطلاق فكانت للقطار الياباني التجريبي، حيث سجَّل جي آر ماجليف الياباني ٥٨١ كيلومتر في الساعة تقريبًا. وإليك فيما يلي رابط لمقطع فيديو قصير عن القطار الياباني: www.youtube.com/watch?v=VuSrLvCVoVk&feature=.

يضم موقع يوتيوب كثيرًا جدًّا من مقاطع الفيديو الممتعة والزاخرة بالمعلومات التي توضح تكنولوجيا القطارات المغناطيسية المعلقة. فذلك الفيديو الموجود على الرابط التالي، الذي يرفع فيه صبي قلمًا رصاصًا يدور على ست قطع مغناطيس وقطع صلصال صغيرة، يعرض تجربة عملية يمكنك إعادة إجرائها في المنزل بسهولة: https://www.youtube.com/watch?v=rrRG38WpkTQ.
وألق نظرة كذلك على الفيديو الموجود على الرابط التالي الذي يستعين بتصميم موصل فائق؛ حيث يظهر نموذج عربة قطار تتحرك بسرعة على المسار. كما يحتوي المقطع على جزءٍ توضيحي بالرسوم المتحركة: www.youtube.com/watch?v=GHtAwQXVsuk&feature=.

لكن أفضل صور تقنية التعليق المغناطيسي بالنسبة لي هو ذلك المغناطيس الطائر الصغير ذو الرأس الدوَّار. يمكنك مشاهدة نسخٍ مختلفةٍ منه على الموقع www.levitron.com. كما أنني أحتفظ بنسخة قديمة منه في مكتبي يستمتع مئات الضيوف بمشاهدتها.

تنطوي أنظمة القطارات المغناطيسية المعلقة على مزايا بيئية حقيقية؛ وذلك بالنظر إلى الانخفاض النسبي في استهلاكها للكهرباء، وعدم انبعاث الغازات الدفيئة في العادم. لكن القطارات المغناطيسية المعقدة لا تمنحنا هذه الميزة بلا مقابل؛ بالنظر

إلى أن معظم مسارات القطارات المغناطيسية المعلقة لا تتوافق مع خطوط السكك الحديدية، لذا فإن أنظمة القطارات المغناطيسية المعلقة تتطلب رؤوس أموال ضخمة، وهو ما حال دون انتشار استخدامها تجاريًّا إلى الآن. ورغم ذلك، فإن ابتكار نظم نقل جماعي أكثر فعالية وأمانًا على البيئة مما نستخدمها اليوم أمر لا غنى عنه لمستقبلنا إذا لم نكن نريد تدمير هذا الكوكب.

## إنجاز ماكسويل العظيم

يعتقد فيزيائيون كثيرون أن جيمس كليرك ماكسويل كان أحد أهم علماء الفيزياء عبر التاريخ، بل إن مكانته ربما تأتي بعد نيوتن وآينشتاين. فإسهاماته تمتد إلى نطاق مذهل من مجالات الفيزياء المختلفة، بدايةً من دراسة الحلقات المحيطة بكوكب زُحل وحتى دراسة سلوك الغازات، وسبر أغوار الديناميكا الحرارية، ووضع النظرية اللونية. إلا أن أعظم إنجازاته على الإطلاق كان وضع المعادلات الأربع التي تشرح الكهرباء والمغناطيسية وتربط بينهما، والتي صارت تُعرف بعد ذلك بمعادلات ماكسويل. قد تبدو تلك المعادلات الأربع بسيطة ظاهريًّا؛ إلا أن الرياضيات التي تقوم عليها بالغة التعقيد. لكن إذا لم تكن لديك مشكلة مع معادلات التكامل والتفاضل، فأرجو منك أن تلقي نظرة على محاضراتي أو البحث على الإنترنت للتعرف عليها. لكن من أجل تحقيق أهداف هذا الكتاب، سنشرح عمل ماكسويل بكلمات مبسطة.

إن أهم ما حققه ماكسويل على الإطلاق هو توحيد نظرية الكهرباء والمغناطيسية من خلال إثبات أن هاتين الظاهرتين ليستا إلا ظاهرة واحدة — وهي الكهرومغناطيسية — ولكن بوجهين مختلفين. إن تلك المعادلات الأربع التي وضعها ماكسويل ليستْ «قوانينه» أو من ابتكاره، مع استثناء واحدٍ مهم؛ فتلك المعادلات موجودة بالفعل بشكل أو بآخر. لكن إنجاز ماكسويل الفعلي كان جمع المعادلات الأربع معًا فيما نطلق عليه نظرية حقل موحد كاملة.

وأول هذه المعادلات هي قانون جاوس للكهربية الذي يفسر العلاقة بين الشحنات الكهربية وشدة المجالات الكهربية التي تولدها وتوزيعها. أما المعادلة الثانية، فهي قانون جاوس للمغناطيسية، وهي أبسط المعادلات الأربعة، بالإضافة إلى أنها توضح عدة أشياء في آنٍ واحد؛ حيث توضح تلك المعادلة أنه ما من شيء يُسمى بأحاديات

القطب المغناطيسي؛ فالمغناطيس دائمًا ما يكون له قطب شمالي وقطب جنوبي (ونطلق على ذلك ثنائيات القطب) على عكس الكهربية التي تسمح بوجود أحاديات القطب الكهربائي (وأحادي القطب هو إما جسيم موجب الشحنة أو جسيم سالب الشحنة). فإذا كسرتَ قطعة مغناطيس (لديّ كثيرٌ منها على ثلاجتي) إلى قطعتين، فسيكون لكل قطعةٍ منها قطب شمالي وقطب جنوبي. وإذا كسرتها إلى ١٠,٠٠٠ قطعة، فسيكون لكل قطعة فيها قطب شمالي وقطب جنوبي. فمن المستحيل أن تحصل على قطعة بقطب شمالي في يدٍ وأخرى بقطب جنوبي في اليد الأخرى. ومع ذلك، إذا كسرتَ جسمًا يحمل شحنةً كهربية (لنقل موجب الشحنة) إلى قطعتين، فإن كلا القطعتين يمكن أن تكونا موجبَي الشحنة.

بعد ذلك تتخذ الأمور منحًى مثيرًا؛ فالمعادلة الثالثة هي قانون فاراداي الذي يصف كيف تولِّد المجالات المغناطيسية المتغيرة مجالات كهربية. بإمكانك أن ترى كيف تُشكِّل هذه المعادلة الأساس النظري للمولدات الكهربائية التي سبق أن تحدثتُ عنها. أما المعادلة الأخيرة، فهي قانون أمبير، الذي أجرى عليه ماكسويل تعديلات مهمة. لقد أوضح قانون أمبير الأصلي تولُّد مجالٍ مغناطيسي من تيار كهربائي. لكن بمجرد أن فرَغ أمبير من وضع القانون، أضاف إليه ماكسويل تعديلًا، وهو أن المجال الكهربي المتغير يولِّد مجالًا مغناطيسيًّا.

راح ماكسويل يجرب المعادلات الأربع ويضيف تعديلاته إليها، توقع ماكسويل وجود موجات كهرومغناطيسية تسافر عبر الفراغ. والأهم من ذلك أنه استطاع حساب سرعة تلك الموجات. وكانت نتيجة ذلك صادمة، إذ كانت سرعتها تفوق سرعة الضوء. بعبارة أخرى، خلص ماكسويل إلى أن الضوء نفسه لا بد أن يكون شكلًا من أشكال الموجات الكهرومغناطيسية!

كان هؤلاء العلماء — أمبير وفاراداي وماكسويل — يعرفون أنهم على شفا ثورة ستقلب الموازيين. فعلى مدار قرن، كان الباحثون يبذلون محاولاتٍ جادة من أجل فهم الكهربية، لكن هؤلاء الثلاثة كانوا يتقدمون بثبات نحو التوصل إلى اكتشاف مختلف. أحيانًا ما أتعجب كيف كانوا يستطيعون أن يناموا في الليل.

لقد كانت معادلات ماكسويل بمنزلة الإنجاز المكلل لفيزياء القرن التاسع عشر— وكل ما انطوى تحت علم الفيزياء خلال الفترة ما بين عهدي نيوتن وآينشتاين — وذلك بفضل ما جمعته معًا في عام ١٨٦١. وكحال كل الاكتشافات

العميقة، مهدتْ تلك المعادلات الطريق لمزيدٍ من الجهود الهادفة لتوحيد نظريات علمية أساسية.

ومنذ عهد ماكسويل، بذل العلماء جهودًا لا حصر لها في محاولة وضع نظرية واحدة موحدة لقوى الطبيعة الأساسية الأربع: الكهرومغناطيسية، والقوة النووية الشديدة، والقوة النووية الضعيفة، وقوى الجاذبية. وقد قضى ألبرت آينشتاين الثلاثين عامًا الأخيرة من حياته في محاولة فاشلة للتوحيد بين الكهرومغناطيسية والجاذبية فيما صار يُعرف بنظرية الحقل الموحد.

وما زال السعي مستمرًا للتوحيد. فقد نال عبد السلام، وشيلدون جلاشو، وستيفن واينبرج جائزة نوبل في عام ١٩٧٩ عن جهودهم لتوحيد الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة فيما يُعرف بالقوة الكهروضعيفة. كما يسعى كثيرٌ من الفيزيائيين لتوحيد القوة الكهروضعيفة والقوة النووية الشديدة فيما يعرف بالنظرية الموحَّدة العظمى، أو يُطلق عليها اختصارًا GUT. وبلوغ هذا المستوى من توحيد النظريات سيكون إنجازًا مذهلًا، يضاهي في مستواه إنجاز ماكسويل. وإن استطاع عالم فيزياء، بطريقة ما وفي مكان ما، التوحيد بين الجاذبية والنظرية الموحدة العظمى للحصول على ما يطلق عليها الكثيرون نظرية كل شيء — فسيكون هذا قمة الغايات المنشودة في علم الفيزياء. إن توحيد النظريات حلم كبير.

ولذلك، في محاضرات مادة الكهربية والمغناطيسية، حين نرى أخيرًا جميع معادلات ماكسويل بكل عظمتها وبساطتها، فإنني أعرضها على جميع جدران قاعة المحاضرات، ومن ثم أحتفي بذلك الإنجاز عظيم الشأن مع الطلاب بتوزيع الورود عليهم. وإذا كان بإمكانك أن تتحمل قليلًا من التشويق، يمكنك قراءة المزيد عن هذا الأمر في الفصل الخامس عشر.

# الفصل التاسع

## قانون حفظ الطاقة: كلما تغيرت الأشياء ازدادت ثباتًا...

في أحد أشهر العروض العملية التي قدمتُها على مدار سنوات، خاطرتُ بحياتي بوضع رأسي مباشرةً في مسار كرة الهدم – يجب أن أقول إنها كانت نسخة مصغرة من كرة الهدم، لكنها كانت قادرة على قتلي بسهولة. وبينما تُصنع كرات الهدم، التي تستعين بها طواقم الهدم، من ثقل موازنة، أو ثقل كروي يبلغ وزنه آلاف الكيلوجرامات، فإنني أصنع كرة الهدم التي استخدمها بوزن ١٥ كيلوجرامًا — حوالي ٣٣ رطلًا. أقف في أحد أطراف قاعة المحاضرات، ورأسي مستند إلى الحائط، ممسكًا ثقل الموازنة في يدي، مؤمّنًا جسدي بالكامل. عند تحرير الثقل الكروي، يجب أن أكون شديد الحذر لئلا أعطيها أي دفعة، وإن كانتْ ضربة بسيطة؛ فأي دفعة بسيطة من شأنها أن تصيبني — أو ربما تقتلني، كما أقول. كما أطلب من طلابي ألا يشتتوني، أو يحدثوا ضجيجًا، بل وأن يتوقفوا عن التنفس لبرهة — وأؤكد إنهم إن لم يفعلوا ذلك فلربما تكون تلك آخر محاضرة ألقيها عليهم.

ينبغي أن أقرَّ أن كل مرة أقدّم فيها هذا العرض العملي؛ أشعر بارتفاع معدل الأدرينالين لدي حين تتأرجح الكرة عائدةً إليّ؛ وبقدر ما أكون مطمئنًا أن الفيزياء ستنقذني، أقف ساكنًا والكرة تطير وتقف على قيدِ أنملة من ذقني. أطبق أسناني لاإراديًا. ولا أكذبكم القول، أغلق عينيّ أيضًا. وقد تتساءل عما يدفعني إلى القيام بمثل هذا العرض العملي؟ والإجابة هي ثقتي المطلقة في أحد أهم مفاهيم الفيزياء — إنه قانون حفظ الطاقة.

من أبرز السمات في عالمنا أن كل شكلٍ من أشكالِ الطاقة يمكن أن يتحول إلى شكل آخر، وشكل ثالث ورابع، وقد يرجع إلى الشكل الأصلي. فالطاقة يمكن أن تتحول ولكنها لا تتبدد. وفي الواقع، هذا التحول يحدث طوال الوقت. وجميع الحضارات، بما فيها أقل الحضارات تطورًا تكنولوجيًا، تعتمد على هذه العملية وبصور

مختلفة. وهذا بلا شك ما تفعله لنا عملية تناول الطعام؛ حيث تحول الطاقة الكيميائية في الطعام، التي غالبًا ما تكون مختزنةً في الكربون، إلى مركب يُسمى بالأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP)، الذي يختزن الطاقة التي تستعين بها خلايانا للقيام بأنشطة مختلفة. وهذا عينه ما يحدث عند إشعال نيران المخيم، إذ تتحول الطاقة الكيميائية المختزنة في الخشب أو الفحم (يتحد الكربون في كليهما مع الأكسجين) إلى حرارة وثاني أكسيد الكربون.

وهذا القانون ما يدفع السهم عبر الهواء بعد إطلاقه من القوس، بحيث تتحول الطاقة الكامنة، التي تنشأ عند سحب وتر القوس، إلى طاقة حركية، مما يدفع السهم إلى الأمام. وفي البنادق، تتحول الطاقة الكيميائية في البارود إلى طاقة حركية لغاز سريع التمدد يدفع الرصاص من ماسورة البندقية. وعند ركوب الدراجة، تتحول الطاقة الكيميائية المختزنة في الإفطار أو الغداء الذي تناولته، والتي حولها جسدك بدوره إلى شكل مختلف من الطاقة الكيميائية، وهو الأدينوسين ثلاثي الفوسفات، إلى تلك الطاقة التي تدفع بها البدالات؛ حيث تستعين عضلاتك بتلك الطاقة الكيميائية، محولةً بعضًا منها إلى طاقة ميكانيكية لقبض وبسط عضلاتك، مما يمكّنك من دفع البدالات. كذلك تتحول الطاقة الكيميائية في بطارية السيارة إلى طاقة كهربية عند إدارة مفتاح التشغيل؛ إذ تتجه بعض تلك الطاقة الكهربية إلى الأسطوانات حيث تشعل وقود السيارة، ومن ثم تتحرر الطاقة الكيميائية من الوقود وهو يحترق. بعد ذلك، تتحول تلك الطاقة إلى حرارة، وهو ما من شأنه أن يرفع ضغط الغاز في الأسطوانات، وذلك بدوره ما يضغط المكابس. تدير المكابس عمود المرفق، ومن ثم يرسل ناقل الحركة الطاقة إلى العجلات، مما يجعلها تدور. هكذا، من خلال هذه العملية المدهشة تُستغل الطاقة الكيميائية للوقود لتمكننا من القيادة.

تعتمد السيارات الهجين جزئيًا على هذه العملية لكن بصورة معكوسة؛ حيث تحول تلك السيارات بعضًا من الطاقة الحركية للسيارة — عند ضغط المكابح — إلى طاقة كهربية تُختَزَن في البطارية وتدير المحرك الكهربي. وفي الأفران التي تُشعل بالزيت، تُحوَّل الطاقة الكيميائية في الزيت إلى حرارة، مما يرفع درجة حرارة المياه في نظام التدفئة، ثم تدفعها مضخةٌ بعد ذلك عبر أجهزة التدفئة. وفي مصابيح النيون، تتحول الطاقة الحركية للشحنات الكهربية التي تسري عبر أنبوب غاز النيون إلى ضوءٍ مرئي.

وتطبيقات هذا القانون لا حصر لها. ففي المفاعلات النووية، تُحول الطاقة النووية المخزنة في نويات اليورانيوم أو البلوتونيوم إلى حرارة تُحوِّل بدورها المياه إلى بخار، والبخار بدوره يدير التوربينات التي تولِّد الكهرباء. تُحوَّل الطاقة الكيميائية المُختَزنة في الوقود الحفري — في الفحم والغاز الطبيعي إضافة إلى النفط والجازولين — إلى حرارة، في محطات الطاقة، وفي النهاية تُحوَّل إلى طاقة كهربية.

كما يمكنك مشاهدة عجائب تحول الطاقة جليةً عند صناعة البطارية؛ وللبطاريات أنواع كثيرة مختلفة، بدءًا من تلك الموجودة في السيارات التقليدية أو الهجين، إلى تلك التي تُشغِّل فأرة الكمبيوتر اللاسلكية أو الهاتف الخلوي. صدق أو لا تصدق، يمكنك أن تصنع بطارية من ثمرة بطاطا وعملة معدنية ومسمار مجلفن وقطعتين من سلك نحاسي (كل منها بطول ست بوصات، مع كشط العزل بسمك نصف بوصة عند كل طرف). اغرس معظم المسمار في أحد طرفي ثمرة البطاطا، ثم افتح شقًّا في الطرف الآخر للعملة المعدنية، واغرس العملة في ذلك الشق. ثبِّت طرف إحدى قطعتي السلك فوق المسمار (أو لفها حول رأس المسمار)؛ ثم ثبت القطعة الأخرى من السلك على العملة أو دسها في الشق بحيث تلامس العملة. ثم لامس طرفي السلك الحرين بالأسلاك الصغيرة لمصابيح تزيين شجرة عيد الميلاد. هنا من المفترض أن يرتعش المصباح قليلًا. خالص التهاني! يمكنك الاطلاع على عشرات من تلك الابتكارات على موقع يوتيوب — جرب محاكاتها.

لا حاجة لذكر أن تحولات الطاقة تحدث حولنا طوال الوقت، لكن بعضها يكون أوضح من بعض. وأحد أكثر تلك التحولات مخالَفةً للبديهة هو ما نطلق عليه طاقة وضع الجاذبية. إننا نعتقد أن الأجسام الساكنة بصفة عامة لا طاقة لها، إلا أن الأجسام الساكنة لها طاقة؛ بل مقدار كبير منها. فنظرًا لأن الجاذبية تجذب الأجسام دائمًا نحو مركز الأرض، فإن كل جسم تلقيه من ارتفاع محدد يكتسب سرعة. وبهذا النحو، تفقد تلك الأجسام طاقة وضع الجاذبية مكتسبةً طاقة حركية — فهنا ما من طاقةٍ فانية ولا طاقة مستحدثة من عدم؛ إنها معادلة صفرية. وهكذا، عند سقوط جسم بكتلة محددة من ارتفاع محدد، فإن طاقة الوضع تقل بمقدار حاصل ضرب الكتلة في عجلة الجاذبية في الارتفاع، (بالأخذ في الاعتبار أن عجلة الجاذبية تساوي ٩,٨ متر في الثانية)، فيما تزداد طاقة الحركة بنفس المقدار. أما عند تحريك الجسم لأعلى إلى ارتفاع محدد، فإن طاقة وضعه الثقالية تزداد بمقدار حاصل ضرب كتلة الجسم في

عجلة الجاذبية في الارتفاع، وسيكون عليك توليد هذه الطاقة (ستضطر إلى بذل شغل).

ومن ثم، إذا كان كتاب بكتلة كيلوجرام واحد (ما يعادل ٢,٢ رطل) موضوعًا على رف على ارتفاع مترين (حوالي ٦,٥ قدم) من الأرض، ثم سقط على الأرض، فإن طاقة وضعه الثقالية ستقل بمقدار ١×٩,٨×٢=١٩,٦ جول، لكن طاقة حركته ستصبح ١٩,٦ جول عند وصوله إلى الأرض.

في رأيي أن مصطلح طاقة وضع الجاذبية مصطلح ممتاز؛ انظر إلى الأمر على النحو الآتي: إذا رفعتُ الكتاب عن الأرض ووضعتُه على الرف، فإن القيام بذلك سيتطلب بذل ١٩,٦ جول من طاقتي. فهل تفنى هذه الطاقة؟ لا! فبعد وضع الكتاب على الرف على ارتفاع مترين عن الأرض، سيكون لديه «القدرة» أن يعيد إلي تلك الطاقة في صورة طاقة حركة — حينما أسقطه على الأرض مرة أخرى، سواء أكان هذا في اليوم التالي أو العام المقبل! وكلما زاد ارتفاع الكتاب عن الأرض، فإن طاقة وضعه تزداد، لكن بالطبع، سيتعين عليّ بذل مثل هذا المقدار الأكبر من الطاقة لوضع الكتاب في مكان أعلى. بطريقة مماثلة، يتطلب الأمر طاقة لسحب وتر القوس للخلف عندما تريد إطلاق سهم. تلك الطاقة تكون مختزنةً في القوس ويمكنك، وقتما شئت، تحويل طاقة الوضع هذه إلى طاقة حركة، مما يَمد السهم بسرعته.

والآن، بالاستعانة بمعادلة بسيطة سأوضح لك شيئًا مذهلًا. إذا تحمَّلتَ معي بعض الرياضيات، سأوضح لك سبب نجاح أشهر تجربة لجاليليو. تتذكر أنه يُقال إن جاليليو كان يسقط كرات بكتلٍ مختلفة (ومن ثم أوزان مختلفة) من برج بيزا المائل ليثبت أن معدل سرعة سقوط الكرات لا يعتمد على كتلتها. فبناءً على قوانين نيوتن للحركة، تتناسب طاقة حركة جسم متحرك مع كلٍ من كتلة الجسم ومربع سرعته، والمعادلة التي تعبر عن هذا القانون هي: طاقة الحركة= ٢/١ الكتلة×السرعة$^{٢}$. وبما أننا نعلم أن التغير في طاقة وضع الجاذبية للجسم يُحوَّل إلى طاقة حركة، فبإمكاننا استنتاج أن الكتلة × عجلة الجاذبية ×الارتفاع = ٢/١ كتلة × السرعة$^{٢}$. فإذا قسمتَ طرفي المعادلة على الكتلة، تُحذَف الكتلة من كلٍ من طرفي المعادلة، فيصبح لديك عجلة الجاذبية × الارتفاع = ٢/١ السرعة$^{٢}$. وللتخلص بعد ذلك من الكسر، نضرب طرفي المعادلة في ٢، ليكون لدينا ٢× عجلة الجاذبية × الارتفاع= السرعة$^{٢}$. وهذا يعني أن السرعة، التي كان جاليليو يحاول قياسها، تساوي الجذر التربيعي لحاصل ضرب

٢ × عجلة الجاذبية × الارتفاع.[1] لاحظ أن الكتلة قد اختفت تمامًا من المعادلة! يُعزى ذلك إلى أنها ليست عاملًا — بمعنى أن السرعة لا تعتمد على الكتلة. ودعونا ننظر مثالًا محددًا، إذا أسقطت صخرة (بأي كتلةٍ كانت) من ارتفاع ١٠٠ متر، فسوف ترتطم بالأرض بسرعة ٤٥ مترًا في الثانية تقريبًا، أو ١٠٠ ميل في الساعة، في حالة انعدام مقاومة الهواء.

تصور صخرةً (بأي كتلةٍ كانت) تسقط من ارتفاع بضع مئات الآلاف من الأميال عن الأرض؛ فما سرعة اختراق تلك الصخرة للغلاف الجوي لكوكب الأرض؟ من المؤسف أننا لا نستطيع الاستعانة بالمعادلة البسيطة المذكورة بالأعلى: السرعة تساوي الجذر التربيعي لحاصل ضرب ٢ في عجلة الجاذبية في الارتفاع، وذلك لأن عجلة الجاذبية تعتمد اعتمادًا أساسيًّا على بُعد الجسم عن الأرض. فمثلًا، بحسب بُعد القمر عن الأرض (٢٤٠,٠٠٠ ميل)، يُفترض أن تكون عجلة الجاذبية إلى الأرض أقل بحوالي ٣٦٠٠ مثل عنها في حالة اقتراب الجسم من سطح الأرض. وثق في كلامي دون إدراج العمليات الحسابية المعبرة عن ذلك، ستكون السرعة حوالي ٢٥,٠٠٠ ميل في الساعة!

ربما بإمكانك الآن إدراك مدى أهمية طاقة وضع الجاذبية في علم الفلك. كما سأوضح بالشرح في الفصل الثالث عشر، حين تسقط مادة من على مسافة كبيرة على نجمٍ نيتروني، فإنها تصطدم بالنجم النيتروني بسرعة تُقدر بـ ١٠٠,٠٠٠ ميل في الثانية، نعم في الثانية! إذا كانت كتلة الصخرة كيلوجرام واحد، فإن طاقة حركتها ستكون ١٣ ألف تريليون (١٣×١٠ ^١٥) جول، وهو ما يضاهي مقدار الطاقة التي تنتجها محطة طاقة ضخمة (بقدرة ١٠٠٠ ميجاواط) في نصف عام.

إن فكرة أن أنواع الطاقة المختلفة يمكن أن يُحوَّل بعضها إلى بعض، ثم تعود إلى أصلها مرة أخرى، فكرة مذهلة بلا شك، لكن الأكثر إثارة للدهشة أنه لا يوجد أبدًا فاقد في الطاقة. أمر مذهل بحق. ولهذا السبب، لم تقتلني كرة الهدم.

فحين أسحب الكرة التي تزن ١٥ كيلوجرامًا باتجاه ذقني على مسافة رأسية محددة، فإنني بذلك أزيد طاقة وضعها الثقالية بمقدار حاصر ضرب الكتلة × عجلة الجاذبية × المسافة الرأسية. حين أسقط الكرة، فإنها تتأرجح عبر القاعة بفعل قوة

(١) إذا أردت تجربة هذه المعادلة في المنزل، فعوّض عن عجلة الجاذبية بـ ٩,٨، وعوض عن الارتفاع بالمتر، ومن ثم، ستكون السرعة بالمتر لكل ثانية. فإذا كان الارتفاع ١,٥ متر (عن الأرض)، فإن الجسم سيرتطم بالأرض بسرعة ٥,٤ متر في الثانية، وهو ما يعادل ١٢ ميلًا في الساعة.

الجاذبية، وهكذا تُحوَّل طاقة وضع الجاذبية إلى طاقة حركة؛ وبحسب القانون، التغير في طاقة وضع الجاذبية = الكتلة × عجلة الجاذبية × الارتفاع، فإن الارتفاع هنا هو المسافة العمودية بين ذقني وأدنى موضع لكرة الهدم المعلقة في طرف الحبل. وهكذا، حين تصل الكرة إلى أدنى نقطة خلال تأرجحها، تصبح طاقة حركتها مساوية لمقدار حاصل ضرب الكتلة × عجلة الجاذبية × الارتفاع. أما حين تتم الطاقة قوس التأرجح بالِغةً أعلى نقطة لها، تعود طاقة الحركة إلى طاقة وضع الجاذبية — لهذا السبب عند أعلى نقطة للبندول في تأرجحه، تتوقف الكرة للحظة. وانعدام طاقة الحركة، يعني عدم وجود حركة. لكن هذا لا يكون إلا لوهلة قصيرة، لأن الكرة تعود للانخفاض مرة أخرى، في عكس اتجاه تأرجحها، مما يحوِّل طاقة الوضع إلى طاقة حركة مرة أخرى. ويُطلق على مجموع طاقتي الحركة والوضع الطاقة الميكانيكية، وفي غياب الاحتكاك (وفي حالتنا هذه يتمثل الاحتكاك في مقاومة الهواء للكرة)، لا تتحول الطاقة الميكانيكية إلى شكل آخر من الطاقة — لكنها تُحفَظ.

وهذا يعني أن الكرة لا يمكن أن تتعدى ارتفاع النقطة التي أُطلقتْ منها — وذلك طالما لم تُعطَ لها أي طاقة إضافية خلال تأرجحها. إن مقاومة الهواء بمنزلة وسادة أمان بالنسبة لي؛ إذ تمتص مقاومة الهواء مقدارًا ضئيلًا من الطاقة الميكانيكية للبندول، مُحولةً إياه إلى حرارة. ومن ثم، تتوقف الكرة على بعد بُمن بوصة من ذقني، كما يمكنك أن ترى في مقطع فيديو المحاضرة ١١ من المسار التعليمي ٨,٠١. وقد شاهدتْني سوزان أثناء قيامي بذلك العرض العملي ثلاث مرات — وفي كل مرة ترتعد فرائصها خوفًا. كما سألني أحدهم يومًا عما إذا كنتُ أتمرن كثيرًا على هذا العرض العملي، ودائمًا ما كنت أجيب بالحقيقة؛ وهي أنني لست مضطرًا للتمرن؛ لأنني أثق في حفظ الطاقة تمام الثقة.

لكن لو أنني أعطيتُ الكرة أقل دفعة ممكنة وأنا أحررها — لنفترض مثلًا أنني سعلتُ فدفعتُ الكرة دفعةً بسيطة — لعادت متأرجحة إلى نقطةٍ أعلى قليلًا من تلك التي أطلقتها منها، ومن ثم كانت ستصطدم بذقني.

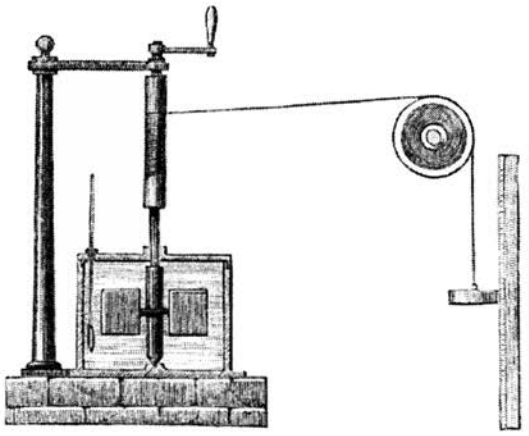
يرجع جزء كبير من الفضل في اكتشاف قانون حفظ الطاقة إلى عمل جيمس جول، ابن صانع الجعة، خلال منتصف القرن التاسع عشر. فقد كان عمله محوريًّا لفهم طبيعة الطاقة، لدرجة أن الوحدة الدولية لقياس الطاقة، الجول، قد سُميت باسمه. كان

والد جيمس جول قد أرسله مع أخيه للتتلمذ على يد العالم التجريبي المشهور جون دالتون؛ ومن الواضح أن دالتون لم يألُ جهدًا في تعليم جول. وحين ورث جول مصنع الجعة من والده، أجرى عددًا كبيرًا من التجارب الفذة في قبو المصنع، سابرًا أغوار خواص الكهرباء والحرارة والطاقة الميكانيكية بتجارب عبقرية؛ ويرجع إليه الفضل في اكتشاف أن التيار الكهربي يولد حرارة في الموصل، وهو ما توصل إليه من خلال وضع ملفات من معادن مختلفة يسري فيها تيار كهربي في برطمانات زجاجية مملوءة بالماء وقياس التغيرات في درجة حرارتها.

كان عمل جول يستند إلى الرؤية الجوهرية بأن الحرارة شكل من أشكال الطاقة، وهو ما جاء ليدحض المفهوم واسع النطاق عن الحرارة لسنوات طويلة؛ إذ كان من المعتقد أن الحرارة نوعٌ من الموائع، وكان يُطلق عليها السيال الحراري (أو الكالوريك) — وهي الكلمة التي اشتُق منها التعبير المعاصر سُعر حراري — وقد كان المعتقد الشائع في ذلك الوقت أن هذه الحرارة المائعة تتدفق من المناطق عالية التركيز إلى المناطق منخفضة التركيز، وهذا السيال الحراري لا يُمكن أن يُستحدث أو يفنى. لكن جول سجّل ملاحظته لأن الحرارة تتولد في عدة أشكال، مما رجح أنها ذات طبيعة مختلفة. على سبيل المثال، درس جول الشلالات، ووجد أن الماء في القاع أدفأ منه في الأعلى، وخلص إلى أن الفرق في طاقة وضع الجاذبية بين أسفل الشلال وأعلاه تتحول إلى حرارة. كما لاحظ أن درجة حرارة المياه ترتفع حين تُحركها عجلة التجديف، وهي إحدى تجارب جول المشهورة؛ وقد توصل في عام ١٨٨١ إلى نتائج شديدة الدقة فيما يتعلق بتحويل طاقة حركة عجلة التجديف إلى حرارة.

في هذه التجربة، وضع جول مجموعةً من المجاديف في حاوية مملوءة بالمياه، وربطها بحبل يمر فوق بكرة، وعلق في طرفه ثقلًا. عند انخفاض الثقل، كان الحبل يلف عمود المجاديف، ومن ثم تدور البدالات في حاوية المياه. بتعبير أكثر دقة، أنزل جول كتلة «ك» معلقة بحبل على ارتفاع «ع»؛ ومن ثم، فإن مقدار التغير في طاقة الوضع هو حاصل ضرب الكتلة في عجلة الجاذبية في الارتفاع، وهو المقدار الذي حوله هذا الاختراع إلى الطاقة الدورانية (الحركية) للمجداف، وهو ما رفع درجة حرارة المياه. وفيما يلي رسم توضيحي لهذا الجهاز.

ترجع عبقرية هذه التجربة إلى تمكُن جول من حساب مقدار الطاقة التي كان ينقلها للمياه بدقة، وهو ما كان يساوي مقدار حاصل ضرب الكتلة في عجلة الجاذبية



في الارتفاع. وكان الوزن ينخفض ببطء؛ لأن الماء كان يحول دون دوران البدال بسرعة. ومن ثم، يهبط الوزن إلى الأرض بمقدار لا يُذكر من طاقة الحركة. وهكذا نُقِلتْ كل طاقة وضع الجاذبية المتاحة إلى الماء.

إذن، كم يبلغ مقدار وحدة الجول؟ إذا أسقطتَ جسمًا وزنه كيلوجرام من ارتفاع ٠,١ متر (١٠ سنتيمترات)، فإن طاقة حركة الجسم تزداد بمقدار الكتلة في عجلة الجاذبية في الارتفاع، وهو ما يبلغ حوالي جول واحد. قد لا يبدو ذلك مقدارًا كبيرًا، لكن وحدات الجول سرعان ما تزداد. فعلى سبيل المثال، يحتاج لاعب دوري كرة القاعدة الرئيسي إلى ١٤٠ جول من الطاقة لكي يضرب كرة القاعدة بسرعة أقل قليلًا من ١٠٠ ميل في الساعة، وهو نفس مقدار الطاقة الذي يستلزمه رفع وعاء يمتلئ بـ ١٤ كيلو من التفاح لارتفاع متر كامل.[١]

كذلك، ١٤٠ جول من طاقة الحركة كافية لقتل إنسان في حالة إطلاق الجسم بسرعة، بحيث يكون تركيز الطاقة عاليًا. بعبارة أخرى، إذا امتد إطلاق الجسم لساعة أو ساعتين، فقد لا تلاحظ اصطدامه بك من الأساس؛ كما أن إطلاق كل تلك الجولات في صورة وسادة تصطدم بك بشدة، لن يقتلك. لكن، ماذا يحدث عند إطلاقها بسرعة مكثفة في رصاصة، أو صخرة أو كرة قاعدة في جزء من الثانية؟ لا شك أن الأمر سيكون مختلفًا تمامًا.

وهذا يعيدنا من جديد إلى كرات الهدم. لنفترض أن لديك كرة هدم بوزن ١٠٠٠ كيلوجرام (أي طن) ألقيتها من ارتفاع خمسة أمتار؛ فستحوِّل هذه الكرة حوالي ٥٠,٠٠٠

(١) للتبسيط، عوضتُ هنا عن عجلة الجاذبية g بـ١٠ أمتار لكل ثانية، وكثيرًا ما نفعل ذلك في الفيزياء.

جول من طاقة الوضع (التغير في طاقة الوضع = ١٠٠٠×١٠×٥ إلى طاقة حركة. يا لها من ضربةٍ قاضية، ولا سيما إذا أُطلقتْ على مدى زمني شديد القصر. وبالاستعانة بمعادلة الطاقة الحركية، يمكننا إيجاد السرعة أيضًا. تتحرك الكرة عند أدنى نقطة في تأرجحها بسرعة ١٠ أمتار في الثانية (حوالي ٢٢ ميلًا في الساعة)، وهي سرعة مهولة بالنسبة لكرة تزن طنًّا. ولمشاهدة مشهدٍ حي لهذا النوع من الطاقة، يمكنك مشاهدة فيديو رائع على الإنترنت لكرة هدم تصطدم بشاحنة صغيرة ضلت طريقها إلى منطقة أعمال بناء في مانهاتن، مما أطاح بالسيارة بعيدًا وكأنها لعبة أطفال: www.lionsdenu.com/wrecking-ball-vs-dodge-mini-van/.

## كم نحتاج من الطاقة المختزنة في الغذاء؟

والآن، دعونا نعرب عن تقديرنا للمزايا المذهلة لقانون تحول الطاقة الذي يُبقي على حضارتنا قائمة، وذلك من خلال حساب مقدار وحدات الجول التي تنطوي عليها عملياتنا الحيوية الأساسية. لنفترض، على سبيل المثال، أن جسم الإنسان ينتج حوالي ١٠ ملايين جول في صورة حرارة الجسم. باستثناء حالة الإصابة بالحمى، يعمل جسم الإنسان عند درجة حرارة ٣٧ درجة سيلزيوس (٩٨,٦ درجة فهرنهايت)، ويشع حرارة في صورة الأشعة تحت الحمراء بمعدل ١٠٠ جول في الثانية في المتوسط؛ بما يعادل عشرة ملايين جول يوميًّا تقريبًا. ومع ذلك، تعتمد هذه العملية على درجة حرارة الهواء وحجم جسم الإنسان. فكلما زاد جسم الشخص ضخامةً، زاد مقدار الطاقة التي يشعها في الثانية. ويمكنك مقارنة ذلك بالطاقة التي يشعها المصباح الكهربي؛ فالواط الواحد يساوي بذل ١ جول في الثانية، ومن ثم، فإن المائة جول في الثانية تساوي ١٠٠ واط، مما يعني أن الطاقة الحرارية التي تشع من البشر تعادل مصباحًا كهربيًّا بقوة ١٠٠ واط. لكنك لا تشعر أن حرارتك تضاهي حرارة المصباح الكهربي لأن حرارتك موزعة على منطقة أكبر كثيرًا. لذا حين تفكر في أن حرارة البطانية الكهربائية لا تتعدى ٥٠ واط، فأنت تدرك الآن، وأنا متأكد من أنك تعلم هذا، أن مشاركة شخص آخر الفراش أفضل كثيرًا من البطانية الكهربية.

توجد عشرات من الوحدات المختلفة لقياس الطاقة؛ فهناك الوحدة الحرارية البريطانية لأجهزة تكييف الهواء؛ والكيلوواط-ساعة للكهرباء؛ والإلكترون فولت

للفيزياء الذرية؛ والإرج لعلم الفلك. تبلغ الوحدة الحرارية البريطانية حوالي ١٠٥٥ جول؛ فيما يعادل الكيلوواط-ساعة ٣,٦×١٠^٦ جول؛ أما الإلكترون فولت فيساوي ١,٦×١٠^-١٩ جول، ويعادل الإرج ١٠^-٧. ومن أهم وحدات قياس الطاقة التي نعرفها جميعًا السُّعرُ الحراري. يساوي السُّعر الحراري الواحد حوالي ٤,٢ جول. وهكذا، بينما تولِّد أجسامنا حوالي عشرة ملايين جول يوميًّا، فإننا نستهلك أكثر قليلًا من مليوني سُعر حراري يوميًّا. لكن كيف لذلك أن يكون؟ فمن المفترض ألا نتناول أكثر من ٢٠٠٠ سُعر حراري في اليوم. حسنًا، في الواقع ما يقصده كتاب بطاقات التغليف بكلمة سُعر حراري (أو calorie) التي تقرأها على عبوات التغليف، هو كيلو سعر حراري، أي ١٠٠٠ سعر حراري، وأحيانًا ما يشار إليه من خلال تهجئة كلمة calorie بحرف C كبير؛ وذلك لغرض التسهيل، لأن السعر الحراري الواحد وحدة متناهية الصغر، ويعادل مقدار الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام من الماء درجة واحدة على مقياس سيلزيوس. ومن ثم، لكي ينبعث من الجسم عشرة ملايين جول في اليوم، فعليك أن تتناول ٢٤٠٠ كيلو سعر حراري من الطعام يوميًّا. وإذا تناولتَ من السعرات الحرارية أكثر من ذلك بكثير، فلا بد أن تدفع الثمن عاجلًا أم آجلًا. فالحساب في هذا الصدد لا يرحم، مثلما يعرف كثيرون منا، لكننا نحاول أن نتغافل عن الأمر.

وماذا عن النشاط البدني الذي نقوم به؟ ألا ينبغي لنا أيضًا أن نتناول من الطعام ما يزودنا بالطاقة اللازمة لبذل هذا المجهود؟ فماذا عن صعود الدرج ونزوله، مثلًا، أو التسكع حول المنزل أو تشغيل المكنسة الكهربائية؟ قد تكون الأعمال المنزلية مرهقة، وهكذا لا بد أن نبذل فيها مقدارًا كبيرًا من الطاقة، أليس كذلك؟ أخشى أن لديّ قولًا سيثير دهشتك؛ بل سيثير إحباطك في الواقع. إن نوعية النشاط التي نبذله جميعًا بصفة يومية لا يستلزم من الطاقة سوى قدرٍ لا يُذكر من الطاقة، حتى إن بإمكانك تجاهله إذا كنتَ تتوقع التعويض بكمية الطعام الذي تتناوله، إلا إذا كنت تذهب إلى صالة الألعاب لممارسة تمرينات رياضية شاقة.

لنفترض أنك تصعد الدرج للوصول إلى مكتبة في الطابق الثالث بدلًا من ركوب المصعد. أعرف كثيرون ممن يشعرون أنهم نشيطون لمجرد صعودهم الدرج، لكن دعونا نجري العمليات الحسابية. لنقل إن تلك الطوابق الثلاثة تمتد على ارتفاع حوالي عشرة أمتار، وأنت تصعد تلك الأمتار العشرة ثلاث مرات يوميًّا. وبما أنني لا أعرفك، دعني أفترض أنك تزن ٧٠ كيلوجرامًا — ١٥٤ رطلًا. كم مقدار الطاقة الذي يستلزمه

صعود تلك الدرجات ثلاث مرات يوميًا؟ ودعونا نكون نشيطين فعلًا — ماذا عن صعود ذلك الدرج خمس مرات يوميًا؟ لنفترض أنك تبذل مجهودًا كبيرًا بحق؛ حيث تصعد تلك الطوابق الثلاثة خمس مرات يوميًا. ومقدار الطاقة المبذولة هنا هو الكتلة × عجلة الجاذبية × الارتفاع، حيث الارتفاع يساوي الفرق في الارتفاع بين الطابقين الأول والرابع. وهكذا، نضرب ٧٠ كيلوجرامًا (الكتلة) في عشرة أمتار للثانية لكل ثانية (عجلة الجاذبية) في عشرة أمتار (الارتفاع) في ٥، لأنك تصعد الدرج خمس مرات يوميًا، وهكذا نحصل على ٣٥,٠٠٠ جول. قارن ذلك الرقم بالعشرة ملايين جول التي تنبعث من جسمك. فهل ما زالت تعتقد أن عليك أن تتناول مقدارًا أكبر قليلًا من الطعام لتعويض هذا المقدار اليسير من الطاقة البالغ ٣٥,٠٠٠ جول؟ تجاهل الأمر تمامًا، فهذا المقدار لا يتعدى ثلث الواحد من المائة من مجموع الطاقة المنبعثة من الجسم. إلا أن ذلك لا يثني المسوقين عن دعاياتهم الباطلة عن المعدات الحارقة للسعرات الحرارية. وقد فتحت لتوي هذا الصباح كتالوج يصلني عبر البريد يحتوي على أدوات باهظة الثمن، لأجد إعلانًا عن «أوزان قابلة للارتداء» «تعمل على حرق مزيدٍ من السعرات الحرارية أثناء مباشرة المهام اليومية العادية». ربما يروقك الشعور بأن ذراعيك وساقيك أثقل وزنًا (وإن لم أكن أعلم السبب في الإعجاب بمثل هذا الشعور)، كما أن ارتداء هذه الأوزان يبني العضلات، لكن لا تتوقع فقدان وزنٍ كبير إثر هذا الشكل من العقاب.

والآن، سيلاحظ القارئ الذكي أن المرء لا يمكنه صعود الدرج خمس مرات دون نزوله. عند نزول الدرج، ينبعث من الجسم ٣٥,٠٠٠ جول في شكل حرارة في العضلات، والحذاء، والأرض. فإذا قفزتَ، تتحول طاقة وضع الجاذبية التي اكتسبها الجسم خلال عملية الصعود إلى طاقة حركة — وربما تنكسر عظمة أو عظمتان من جسمك. ومن ثم، بينما تصعد الدرج بطاقة تبلغ ٣٥,٠٠٠ جول، فإنك لا تسترد هذه الطاقة في صورة نافعة حين تنزل الدرج، إلا إذا أمكنك التوصل إلى وسيلة عبقرية تمكنك من أخذ طاقة حركتك وتحويلها إلى كهرباء، على سبيل المثال، وهو بالضبط ما تفعله السيارات الهجين.

ولتنظر إلى الأمر بطريقة أخرى. لنفترض أنك تُقسّم عملية صعود الدرج على مدى عشر ساعات في اليوم، ربما مرة أو مرتين صباحًا، ومرتين بعد الظهيرة، ومرة في أول المساء. في تلك الساعات العشر، التي تساوي ٣٦,٠٠٠ ثانية، يولد جسمك ٣٥,٠٠٠ جول. وأصارحك القول هذا المقدار قليل جدًا — يساوي واط واحد في

المتوسط. قارن ذلك بمقدار الطاقة المنبعثة من جسمك والذي يبلغ ١٠٠ جول في الثانية، أو ١٠٠ واط. إذن يمكنك أن ترى أن الطاقة التي يحرقها جسمك خلال عملية صعود السلم لا تُذكر نهائيًّا؛ ولن تؤثر بأي حالٍ في فقدانك الوزن.

لكن، دعنا نفترض أنك تتسلق جبلًا بارتفاع ٥٠٠٠ قدم. لكي تفعل ذلك، لا بد أن يتمكن جسمك من توليد مليون جول، علاوة على إنتاجه العادي من الطاقة واستهلاكها. ومقدار مليون جول ليس مما يمكن تجاهله، قياسًا بالعشرة ملايين جول التي ينتجها الجسم يوميًّا. بعد تسلق الجبل، من الطبيعي أن تشعر بالجوع، وستصبح في حاجة إلى طعام. إذا استغرقتَ أربع ساعات في تسلق الجبل، فسيولد جسمك متوسط قدرة (تقاس القدرة بالجول لكل ثانية) مهولًا، وهو ما يعادل ٧٠ واط خلال الأربع ساعات بالطبع. وهكذا، يرسل الجسم إشارات توكيدية إلى المخ بأنه يرغب في مزيدٍ من الطعام.

وربما تظن أنه بما أنك استهلكتَ ١٠ بالمائة أكثر من الطاقة بالإضافة إلى إنتاجك اليومي من الطاقة البالغ عشرة ملايين جول، فإن عليك أن تتناول فقط ١٠ بالمائة أكثر (ومن ثم ٢٤٠ كيلو سعر حراري أكثر) من حصتك اليومية من الطعام، وذلك لأن مليون جول يساوي ١٠ في المائة من العشرة ملايين جول. إلا أن ذلك خطأ، حسبما قد يخبرك حدسك؛ حيث سيتعين عليك تناول مقدار أكبر كثيرًا من المقدار العادي الذي تتناوله من الطعام، وذلك لأن نظام تحويل الطعام إلى طاقة في جسم الإنسان ليس بالغ الدقة — من الناحية الفيزيائية. فأكفأ الأجسام البشرية تحتاج إلى ٤٠ في المائة أكثر من الطعام في المتوسط؛ بمعنى أننا نحول ٤٠ في المائة على الأكثر من مقدار ما تناولناه من سعرات حرارية إلى طاقة مفيدة، بينما يفقد الجسم بقية السعرات في صورة حرارة. فلا بد لهذه الطاقة أن توجه إلى مكان ما بحسب قانون حفظ الطاقة. ومن ثم، لكي يولد الجسم مليون جول إضافية من الطاقة ليدعم بها ممارستك لهواية تسلق الجبال، فسيكون عليك تناول حوالي ٦٠٠ كيلو سعر حراري إضافي من الطعام، وهو ما يعادل وجبة طعام إضافية في اليوم.

## أين تذهب للحصول على ما يلزمك؟

إن مقدار الطاقة اللازم لمباشرة أنشطتنا اليومية يذهلني. افترض أنني أريد الاستحمام،

وأرغب في حساب الطاقة اللازمة لتسخين الماء. المعادلة المعبرة عن ذلك في منتهى البساطة؛ فمقدار الطاقة اللازم بالسعرات الحرارية يساوي كتلة الماء بالكيلوجرامات في تغير درجة الحرارة بالسيلزيوس. وبما أن المغطس يسعُ ١٠٠ كيلوجرام من الماء — أي حوالي ٢٦ جالونًا — وإذا فرضنا أن الزيادة في درجة الحرارة حوالي ٥٠ درجة على مقياس سيلزيوس، فإن تسخين ماء الاستحمام يستهلك حوالي ٥٠٠٠ كيلو سعر حراري، أو ٢٠ مليون جول. إن الاستحمام ممتع، لكنه يستلزم مقدارًا لا بأس به من الطاقة. والشيء المذهل أن سعر الطاقة ما زال منخفضًا في الولايات المتحدة، ومن ثم، لا يُكلف الاستحمام أكثر من ١,٥٠ دولار تقريبًا. قبل مائتي عام، كانت ماء الاستحمام يُسخّن باستخدام الحطب. والحطب يحتوي على ١٥ مليون جول لكل كيلوجرام، ومن ثم، كانت كل أسرة تحصل على كل الطاقة اللازمة لحمام دافئ واحد من كيلوجرام واحد من الخشب. وفي حين تستطيع مواقد الخشب الحديثة حرق الخشب بكفاءة تبلغ ٧٠ في المائة، كانت النيران العارية أو المواقد الموجودة قبل ٢٠٠ عام تحول الخشب إلى طاقة بكفاءة أقل، وعلى فترة زمنية أطول، ومن ثم، ربما تأخذ من ٥ إلى ١٠ كيلوجرامات من الخشب لتسخين مغطس الاستحمام الذي يمتلئ بستٍّ وعشرين جالونًا من الماء. لا عجب أن أسلافنا كانوا يستحمون مرات أقل بكثير مما نفعل الآن، وكانت العائلة بأكملها تستخدم نفس ماء الاستحمام.

وإليك فيما يلي بعض الأرقام التي من شأنها أن تعطيك فكرة عن استهلاك الطاقة المنزلية. تستهلك المدفأة الكهربائية حوالي ١٠٠٠ واط؛ أي إنك تستهلك في خلال ساعة واحدة حوالي ٣,٦ مليون جول، أو، باستخدام المصطلح الشائع لقياس الكهرباء، واحد كيلوواط-ساعة. كما يستهلك الفرن الكهربي في المناخ البارد حوالي ٢٥٠٠ واط. أما وحدة مكيف هواء النافذة فعادة ما تستهلك ١٥٠٠ واط، فيما يستهلك نظام التكييف المركزي ما يتراوح بين ٥ إلى ٢٠ كيلوواط. وفي درجة حرارة ٣٥٠ فهرنهايت، يستهلك الفرن الكهربي حوالي ٢ كيلوواط، فيما تستهلك غسالة الأطباق حوالي ٣,٥ كيلوواط. وإليك هذه المقارنة المدهشة؛ يستهلك جهاز حاسب مكتبي بشاشة أنبوب أشعة المهبط قياس ١٧ بوصة ما يتراوح بين ١٥٠ إلى ٣٥٠ واط، فيما لا يستهلك جهاز الحاسب والشاشة في وضع السكون (sleep mode) سوى ٢٠ واط أو أقل. أما عند أقل مستوى لاستهلاك الطاقة المنزلية، فلا يتعدى استهلاك ساعة الراديو ٤ واط؛ وبما أن البطارية القلوية ٩ فولت تختزن ١٨,٠٠٠ جول تقريبًا، أو حوالي ٥ واط-ساعة، فإن

بطارية واحدة كافية لتشغيل ساعة الراديو لأكثر من ساعة كاملة بقليل.

يعيش على كوكب الأرض أكثر من ٦,٥ مليار نسمة، يستهلكون حوالي ٥×١٠^٢٠ جول من الطاقة سنويًا. بعد أربعين عامًا من قرار حظر النفط الذي أصدرته أوبك، ما زال ٨٥ في المائة من الطاقة المستهلكة على كوكب الأرض تأتي من الوقود الحفري: الفحم والنفط والغاز الطبيعي. استهلاك الولايات المتحدة - التي يبلغ عدد سكانها أكثر قليلًا من ٣٠٠ مليون نسمة، وهو ما يضاهي واحدًا على عشرين من التعداد السكاني العالمي، يعادل خُمسَ الاستهلاك العالمي للطاقة. وما من وسيلة للتحايل على ذلك؛ فنحن نستهلك الطاقة بنهم. وهذا أحد أسباب سعادتي البالغة بتعيين الرئيس أوباما عالمَ الفيزياء الحائز على جائزة نوبل، ستيفن تشو، وزيرًا للطاقة؛ وذلك لأننا إذا أردنا أن نحل مشاكل الطاقة التي نواجهها، يتعين علينا أن نهتم بفيزياء الطاقة.

على سبيل المثال، تُعلَّق آمال كبيرة على ما تنطوي عليه الطاقة الشمسية من فرص، وأنا أؤيد بشدة العمل بدأب على تطوير هذا الشكل من الطاقة. لكن علينا أن نحذر من التقييدات التي سنلاقيها. ولا جدال أن الشمس مصدر عظيم للطاقة؛ إذ إنها تنتج ٤×١٠^٢٦ واط — أي ما يعادل ٤×١٠^٢٦ جول في الثانية — من الطاقة، معظمها يكمن في الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء في الطيف الكهرومغناطيسي. وبما أننا نعلم المسافة بين الأرض والشمس (١٥٠ مليون كيلومتر)، فبإمكاننا حساب المقدار الذي يصل إلى الأرض من هذه الطاقة؛ تُقدَّر هذه الطاقة بـ١,٧×١٠^١٧ واط، أو حوالي ٥×١٠^٢٤ جول في السنة. إذا وجهتَ لوحًا مساحة سطحه متر مربع نحو الشمس مباشرةً (حين تكون السماء صافية!)، فسيستقبل هذا اللوح حوالي ١٢٠٠ واط من الطاقة الشمسية (وقد افترضتُ هنا أن الغلاف الجوي للأرض يعكس ١٥ في المائة من الطاقة الواردة ويمتصها). ولغرض تبسيط الأرقام التي تتعامل معها، لنقل إنك تحصل على طاقة تقدر بـ١٠٠٠ واط (كيلوواط) لكل متر مربع موجّهٍ مباشرة نحو الشمس في غياب السحب.

تنطوي الطاقة الشمسية على إمكانات هائلة. والحصول على الطاقة الشمسية الكافية لتلبية المتطلبات العالمية من الطاقة لا يستلزم سوى حوالي ٢×١٠^١١ متر مربع، وهو ما يعادل خمسة أمثال مساحة وطني الأم، هولندا — وهو ليس ببلد كبير على الإطلاق.

ومع ذلك، هنالك مشكلة؛ وهي أن النهار ينقضي ويعقبه الليل، وهو ما لم نأخذه بعين الاعتبار إلى الآن. فقد افترضنا أن الشمس ساطعة على مدار اليوم، وأن السماء

صافية أيضًا. بالإضافة إلى ذلك، إذا كانت ألواح الطاقة الشمسية ثابتة غير قابلة للحركة، فإنها لا يمكن أن تظل موجهة إلى الشمس طوال الوقت. كما أن موقعك على سطح كوكب الأرض مهم أيضًا. فالبلاد الواقعة على خط الاستواء تحصل على مقدار أكبر من الطاقة (فهي بلاد حارة على أي حال) من تلك البلاد الواقعة شمال الكرة الأرضية (في النصف الشمالي من الكرة الأرضية) أو بلاد الجنوب (الواقعة في النصف الجنوبي من الكرة الأرضية).

بعد ذلك، يتعين عليك أن تضع في الاعتبار كفاءة الوحدات التي تحصل بها على الطاقة الشمسية. توجد كثير من التقنيات المختلفة، والتي تظهر طوال الوقت، إلا أن أقصى درجات كفاءة الخلايا الشمسية العملية المصنوعة من السيليكون يبلغ ١٨ في المائة. وعند استخدام الطاقة الشمسية لتسخين المياه مباشرة (دون تحويلها أولًا إلى الطاقة الكهربية)، تكون كفاءتها أعلى. على الناحية الأخرى، قد تبلغ كفاءة الفرن الذي يوقَد بالزيت، حتى وإن لم يكن جديدًا، ٧٥ إلى ٨٠ في المائة. وبأخذ كل تلك العوامل المقيِّدة في الحسبان، فهذا يعني أننا سنحتاج إلى تريليون متر مربع، أي حوالي ٤٠٠,٠٠٠ ميل مربع، وهي مساحة تبلغ ثلاثة أمثال ألمانيا. لكننا لم نحسب بعد تكلفة بناء المصفوفات التي ستجمع كل الطاقة الشمسية وتحولها إلى كهرباء. وفي اللحظة الحالية، تبلغ تكلفة الحصول على الكهرباء من الشمس ضعف الحصول عليها من الوقود الحفري. ولا يقتصر الأمر على التكلفة المهولة للتحول إلى الطاقة الشمسية، بل إن مثل هذا المشروع يتجاوز حدود قدراتنا التقنية وإرادتنا السياسية في الوقت الحالي. ولذلك، سيظل دور الطاقة الشمسية في الاقتصاد العالمي صغيرًا وإن كان متناميًا لبعض الوقت.

على الناحية الأخرى، إذا بدأنا الآن، فسننجح في تحقيق تقدمٍ هائل على مدار العقود الأربعة القادمة. ففي عام ٢٠٠٩، قدَّرَت كل من منظمة السلام الأخضر الدولية (جرينبيس) ووكالة الطاقة الدولية، أن الطاقة الشمسية يمكن أن تلبي «ما يصل إلى ٧ في المائة من متطلبات الطاقة العالمية بحلول عام ٢٠٣٠، وربع المتطلبات العالمية من الطاقة بحلول عام ٢٠٥٠، وذلك في وجود دعم حكومي كبير». كما أشارت مجلة ساينتيفيك أمريكان بالدلائل قبل سنوات إلى أن وضع برنامج عاجل وتقديم دعم حكومي بواقع ٤٠٠ مليار دولار أو أكثر على مدار السنوات الأربعين القادمة يمكن أن يثمر عن الحصول على الطاقة الشمسية بمقدار يلبي ٦٩ في المائة من متطلبات

الولايات المتحدة من الكهرباء، و٣٥ في المائة من إجمالي متطلباتها من الطاقة.

وماذا عن طاقة الرياح؟ فعلى كل حال، رفع أشرعة المراكب عند هبوب الرياح شكل من أشكال الاعتماد على طاقة الرياح. كما أن طواحين الهواء عُرِفَتْ قبل زمن أبعد كثيرًا من الطاقة الكهربية، ربما قبل ١٠٠٠ عامٍ من ظهور الطاقة الكهربائية. إن مبدأ الحصول على الطاقة من الطبيعة وتحويلها إلى نوعٍ مختلفٍ من الطاقة يصلح لاستهلاك البشر هو مبدأ واحدٌ، سواء أكان ذلك في الصين خلال القرن الثالث عشر، أم في بلاد فارس القديمة، أم في أوروبا القرن الثاني عشر. ففي كل تلك الأماكن، كانت الطواحين تساعد البشر في أداء بعضٍ من أصعب الأعمال، مثل: رفع الماء للشرب، أو ري المحاصيل، أو طحن الحبوب بين أحجار الرحى للحصول على الدقيق. وتشغيل الطاحونة يتطلب طاقة الرياح، سواء أكانت تولد الكهرباء أم لا.

وبالنظر إلى أن طاقة الرياح منتجةٌ للكهرباء، فإنها تمثل مصدرًا جاهزًا ومتجددًا تمامًا للطاقة لا يصدر عنه انبعاثات للغازات الدفيئة. في عام ٢٠٠٩، بلغ إنتاج طاقة الرياح على مستوى العالم ٣٤٠ تيراواط-ساعة (والتيراواط تساوي تريليون واط-ساعة)، وهو ما يعادل حوالي ٢ في المائة من الاستهلاك العالمي للكهرباء؛ وهو في تزايدٍ مستمر؛ إذ تضاعف إنتاج الكهرباء من طاقة الرياح خلال السنوات الثلاث الماضية.

أما عن الطاقة النووية، فإنها أوفر كثيرًا مما ندرك عمومًا. فالطاقة النووية حولنا في كل مكان وكل يوم. فزجاج النوافذ يحتوي على عنصر بوتاسيوم ٤٠ المشع، الذي يبلغ عمر النصف له ١,٢ مليار سنة، وتسهم الطاقة الناتجة عن انحلاله في رفع درجة حرارة باطن الأرض. وقد تكوَّن الهيليوم الموجود في الغلاف الجوي بالكامل من الانحلال الإشعاعي للنظائر التي تتشكل طبيعيًّا في كوكب الأرض. وما نطلق عليه تحلل ألفا هو في الواقع انبعاث نواة الهيليوم من نواةٍ أكبر غير مستقرة.

لديّ مجموعةٌ ضخمة ومميزة من فيستاوير، وهي علامة تجارية أمريكية لأدوات المائدة – أطباق وسلطانيات وأطباق فناجين وفناجين – صُممتْ وصُنعتْ بدايةً من ثلاثينيات القرن العشرين؛ وأحب أن أحضر قطعًا قليلة من تلك الصحون إلى قاعة المحاضرات لأريها لطلابي. فالصحون البرتقالية على وجه الخصوص، والتي يُطلق عليها «أحمر فييستا»، تحتوي على أكسيد اليورانيوم، وذلك لأنه مكون تقليدي في مينا الخزف. فأمسك بصحنٍ منها بالقرب من عداد جايجر، فيبدأ العداد بالصفير بسرعة؛ ذلك لأن اليورانيوم الذي يحتوي عليه الصحن مشع وتصدر منه أشعة جاما. وبعد هذا

العرض العملي، عادةً ما أدعو طلابي لتناول العشاء في منزلي، لكن الغريب أنه ما من أحد منهم لبى الدعوة قط.

يولد الانشطار النووي، أو انشطار النوايا الثقيلة، طاقة هائلة، سواء أكان في المفاعلات النووية، حيث تكون التفاعلات المتسلسلة لانشطار نوايا اليورانيوم-٢٣٥ تحت السيطرة، أم في القنبلة الذرية، حيث تكون التفاعلات المتسلسلة خارجة عن السيطرة، مما يسبب دمارًا شاملًا. وتستهلك محطة الطاقة النووية التي تنتج حوالي مليار جول لكل ثانية ($10^9$ واط، أو ١٠٠٠ ميجاواط) حوالي $10^{27}$ من نوى اليورانيوم-٢٣٥ في السنة، وهو ما يعادل ٤٠٠ كيلوجرام فقط من اليورانيوم-٢٣٥.

ومع ذلك، ٠,٧ في المائة فقط من اليورانيوم الطبيعي يتكون من اليورانيوم-٢٣٥ (٩٩,٣ في المائة من اليورانيوم الطبيعي يتكون من اليورانيوم-٢٣٨). ولذلك تستخدم محطات الطاقة النووية اليورانيوم المخصب؛ ورغم اختلاف درجات التخصيب، فإن الرقم المعتاد هو ٥ في المائة. وهذا يعني أن قضبان الوقود النووي المستخدمة في تلك المحطات تحتوي على ٥ في المائة من اليورانيوم-٢٣٥ عوضًا عن نسبة ٠,٧ في المائة التي يحتوي عليها اليورانيوم الطبيعي. وهكذا، يستهلك المفاعل النووي الذي ينتج ١٠٠٠ ميجاواط حوالي ٨٠٠٠ كيلوجرام من اليورانيوم سنويًا، منها ٤٠٠ كيلوجرام تقريبًا من اليورانيوم-٢٣٥. وبالمقارنة، تستهلك محطات طاقة الوقود الحفري التي تنتج ١٠٠٠ ميجاواط من الطاقة حوالي ٥ مليارات كيلوجرام من الفحم سنويًّا.

وتخصيب اليورانيوم عملية مكلفة؛ كما أنها تُجرى باستخدام الآلاف من أجهزة الطرد المركزي. أما اليورانيوم المستخدم في صناعة الأسلحة فيخصب لنسبة تصل إلى ٨٥ في المائة من اليورانيوم-٢٣٥. ربما أدركتَ الآن سبب القلق العالمي البالغ إزاء البلدان التي تُخصِّب اليورانيوم لدرجات غير محددة لا يمكن التحقق منها.

وهكذا، تُحوِّل الحرارة الناتجة عن التفاعلات المتسلسلة المضبوطة، في محطات الطاقة النووية، الماء إلى بخار، والذي يعمل بدوره على تشغيل توربينات بخارية تولد الكهرباء. تبلغ كفاءة محطات الطاقة النووية في تحويل الطاقة النووية إلى كهرباء حوالي ٣٥ في المائة. ولا نعلم حين نقرأ أن محطة طاقة نووية تنتج ١٠٠٠ ميجاواط ما إذا كان إجمالي إنتاجها من الطاقة ١٠٠٠ ميجاواط (وهذا يعني أن ثلث هذا الرقم يتحول إلى طاقة كهربية وأن الثلثين الباقيين يتبددان في صورة حرارة)، أم أن هذا الرقم بالكامل هو إنتاج المحطة من الطاقة الكهربية، وفي هذه الحالة يكون إجمالي إنتاج

المحطة من الطاقة ٣٠٠٠ ميجاواط. إن الفرق شاسع بين الحالتين! وقد قرأتُ بالأمس في الأخبار أن إيران على وشك تشغيل محطة طاقة نووية تبلغ قدرتها الإنتاجية ١٠٠٠ ميجاواط من الكهرباء (هذه لغة لا لبس فيها!).

وفي خضم تفاقم أزمة الاحترار العالمي بدرجة هائلة خلال السنوات القليلة الماضية، عاد خيار الطاقة النووية ليتصدر المشهد من جديد — فعلى خلاف محطات الطاقة التي تحرق الوقود الحفري، لا تطلق محطات الطاقة النووية كثيرًا من انبعاثات الغازات الدفيئة في الجو. ويوجد بالفعل أكثر من مائة محطة طاقة نووية في الولايات المتحدة، تنتج حوالي ٢٠ في المائة من الطاقة التي نستهلكها. وفي فرنسا، تنتج محطات الطاقة النووية ٧٥ في المائة من الطاقة المستهلكة. وعلى مستوى العالم، تُولَّد نسبة ١٥ في المائة من الطاقة الكهربية المستهلكة في محطات الطاقة النووية. وتختلف السياسات المتعلقة بالطاقة النووية باختلاف الدول، لكن بناء مزيدٍ من محطات الطاقة النووية سيستلزم مفاوضات سياسية كثيرة نظرًا للخوف العالمي الذي أسفرت عنه الحوادث النووية الشهيرة في جزيرة «ثري مايل» ومفاعل تشرنوبل، ومفاعل فوكوشيما. كما أن المحطات تُكلِّف نفقات باهظة؛ إذ تتراوح التقديرات ما بين خمسة إلى عشرة مليارات دولار لكل محطة في الولايات المتحدة، وحوالي ملياري دولار لكل محطةٍ في الصين. وأخيرًا، ما زالت مسألة تخزين النفايات المشعة للمحطات النووية تشكل أزمة مهولة على المستويين التقني والسياسي.

ما زالت على الأرض كميات هائلة من الوقود الحفري، لكننا نستهلكها بمعدل هائل، وبمعدل أسرع من قدرة الطبيعة على تخليقها. بالإضافة إلى ذلك، يستمر التعداد السكاني العالمي في التزايد، فيما تحرز المشروعات التنموية المستهلِكة للطاقة تقدمًا بالغ السرعة في كثير من أكبر الدول التي تشهد معدلات نمو اقتصادي مرتفعة مثل الصين والهند. ومن ثم، فلا توجد طريقة فعلية لمعالجة هذه المشكلة. إننا نواجه أزمة طاقة خطيرة. فماذا ينبغي أن نفعل حيال الأمر؟

حسنًا، من المهم أن نرفع درجة وعينا بمقدار استهلاكنا اليومي من الطاقة، ومن ثم العمل على خفض هذا المقدار. أعتقد أن استهلاكي الشخصي من الطاقة معتدل، وإن كنت، رغم ذلك، أرى أن كوني مقيمًا في الولايات المتحدة يعني أنني أستهلك أربعة أو خمسة أمثال ما يستخدمه شخص عادي في أي مكان آخر من العالم. فأنا أستخدم الكهرباء؛ وأدفئ منزلي والمياه التي أستخدمها بالغاز، وأطهو بالغاز. كذلك

أستخدم سيارتي، وإن كان ذلك قليلًا، لكنني أستهلك بعض الوقود على أية حال. وعند جمع كل ذلك، أرى أنني استهلكتُ خلال عام ٢٠٠٩ حوالي ١٠٠ مليون جول (٣٠ كيلوواط-ساعة) يوميًا، نصفها تقريبًا في صورة طاقة كهربية. وهذا المقدار من الطاقة يضاهي الاستعانة بمائتي خادم يعملون بكدٍ على مدار اثنتي عشرة ساعة يوميًا. تأمل ذلك؛ في العصور القديمة، لم يكن يحيا بهذا النمط سوى العائلات الملكية الثرية. فما أترف هذا العصر الذي نعيش فيه وما أعجبه؛ فاليوم يخدمني ما يعادل مائتي خادم يوميًا، على مدار اثنتي عشرة ساعة، وهكذا أستطيع العيش بالنمط الذي أعيش به. وفي مقابل كل كيلوواط-ساعة من الكهرباء، وهو ما يعادل ٣,٦ مليون جول، أدفع ٢٥ سنتًا فقط. ومن ثم، يبلغ إجمالي فاتورة الطاقة التي أسددها (وقد أضفتُ إليها استهلاكي من الغاز والوقود، إذ إن سعرهما لكل وحدة طاقة لا يختلف كثيرًا) مقابل ما يقدمه لي هؤلاء الخدم المائتان؛ تبلغ الفاتورة حوالي ٢٢٥ دولارًا شهريًا في المتوسط؛ أي أنني أدفع دولارًا واحدًا تقريبًا مقابل كل خادم شهريًا! ومن ثم، لا مناص لنا من رفع درجة الوعي. إلا أن ذلك سيحيد بنا عن مقصدنا.

إن تغيير عاداتنا باتجاه استخدام أجهزة موفرة للطاقة، مثل مصابيح الفلورسنت المدمجة بدلًا من المصابيح المتوهجة يمكن أن يُحدث تغييرًا كبيرًا. وقد واتتني الفرصة لرؤية ما يمكنني إحداثه من تغيير بالغ التأثير. لقد كان استهلاكي من الكهرباء في منزلي في كمبريدج ٨٨٦٠ كيلوواط-ساعة في عام ٢٠٠٥ و٨٣١٧ كيلوواط-ساعة في عام ٢٠٠٦. وكان ذلك للإضاءة وتكييف الهواء، وغسالة الأطباق (وأستخدم الغاز للماء الساخن، والطهي، والتدفئة). وفي منتصف شهر ديسمبر من عام ٢٠٠٦، أهداني ابني تشاك (وهو مؤسس شركة نيو جينيريشن إنرجي) هدية رائعة؛ حيث استبدل جميع المصابيح الكهربية المتوهجة (وكان مجموعها ٧٥ مصباحًا) في منزلي بمصابيح فلورسنت. وهكذا، انخفض استهلاكي للكهرباء انخفاضًا كبيرًا في عام ٢٠٠٧ ليصل إلى ٥٢٥١ كيلوواط-ساعة، ثم إلى ٥١٨٤ كيلوواط-ساعة في عام ٢٠٠٨، وبلغ ٥٢٢٦ كيلوواط-ساعة في عام ٢٠٠٩. وقد أدى ذلك الانخفاض في استهلاكي للكهرباء والذي بلغ ٤٠ في المائة إلى انخفاض فاتورتي السنوية للطاقة بحوالي ٨٥٠ دولار. وبالنظر إلى أن الإضاءة وحدها تمثل ١٢ في المائة من استهلاك الطاقة الكهربية المنزلي في الولايات المتحدة و٢٥ في المائة من الاستهلاك التجاري، فإن السبيل إلى خفض الاستهلاك يبدأ منها!

وقد اتبعت الحكومة الأسترالية نهجًا مشابهًا حين شرعتْ في عام ٢٠٠٧ في وضع خططٍ لإحلال مصابيح الفلورسنت محل جميع المصابيح المتوهجة على مستوى البلاد. وسيثمر هذا عن انخفاض كبير في انبعاثات الغازات الدفيئة في أستراليا، بالإضافة إلى انخفاض فواتير الطاقة في كل منزل (كما حدث معي). ومع ذلك، ما يزال علينا اتخاذ مزيدٍ من الخطوات تجاه خفض استهلاك الطاقة.

وفي رأيي أن الطريقة الوحيدة التي يمكننا بها النجاة مع الاحتفاظ بنفس جودة حياتنا الحالية هي اعتماد الاندماج النووي كمصدر حقيقي يُعتمد عليه للطاقة.

وعلى عكس الانشطار — حيث تنشطر نوايا اليورانيوم والبلوتونيوم محررةً الطاقة التي تُشغِّل المفاعلات النووية — في عملية الاندماج النووي، تندمج ذرتا هيدروجين معًا مكونتين عنصر الهيليوم، مما يحرر الطاقة كذلك. إن الاندماج النووي هو العملية التي تستمد منها النجوم — والقنابل الهيدروجينية — طاقتها. ويمثل الاندماج النووي أقوى عملية منتجة للطاقة لكل وحدة قياس للكتلة نعرفها — باستثناء تصادم المادة والمادة المضادة (والتي لا يمكن أن تتولد عنها أي طاقة).

ولأسباب بالغة التعقيد، لا يصلح لتفاعلات الاندماج النووي سوى نوعين محددين من الهيدروجين (الديوتريوم والتريتيوم). بالنسبة للديوتريوم (الذي تحتوي نواته على نيوترون واحد وبروتون واحد)، فمن السهل الحصول عليه؛ إذ إن ذرةً واحدةً من كل ستة آلاف ذرة هيدروجين على سطح الأرض هي ذرة ديوتريوم. وبما أن المحيطات على كوكب الأرض تحوي مليار كيلومتر مكعب من الماء، فإن إمدادنا من الديوتريوم غير محدود. أما التريتيوم، فلا يتكون بصورة طبيعية على سطح الأرض (وهو نظير مشع بعمر نصفٍ يبلغ اثني عشر عامًا تقريبًا)، لكنه يُنتج بسهولة في المفاعلات النووية.

لكن المشكلة الحقيقية تتمثل في كيفية إنشاء مفاعل اندماج نووي عملي ومحكوم يعمل بكفاءة. وما من إشارات تدل على أننا سننجح في فعل ذلك أبدًا. فلكي ندمج نوايا الهيدروجين، علينا أن نهيئ ظروفًا — هنا على الأرض — تصل فيها درجات الحرارة إلى نطاق المائة مليون درجة حرارة، وهو ما يقارب درجة حَرارة باطن النجوم.

يعمل العلماء بدأب منذ سنوات عديدة على عملية الاندماج — بل وقد ازدادوا اجتهادًا في العمل عليه اليوم مع تزايد عدد الحكومات التي صارت تامة الاقتناع بأن أزمة الطاقة حقيقة واقعة. وهذه مشكلة كبيرة بالطبع. لكنني شخص متفائل. فرغم كل

شيء، شاهدت على مدار حياتي المهنية تغيرات مذهلة في مجالي قلبت كل مفاهيمنا عن الكون رأسًا على عقب. على سبيل المثال، علم الكونيات الذي طالما كان يقوم في غالبه على التخمينات وقليلٍ من العلم، أصبح الآن علمًا تجريبيًّا أصيلًا، وصرنا نعرف جانبًا كبيرًا عن نشأة الكون. بل إننا في الحقيقة نحيا اليوم فيما يصفه كثيرون بالعصر الذهبي لعلم الكونيات.

عندما بدأتُ أجري أبحاثي في علم فلك الأشعة السينية، اكتشفنا أكثر من عشرة مصادر للأشعة السينية في الفضاء العميق. واليوم صرنا نعرف عشرات الآلاف من المصادر. وقبل خمسين عامًا، كانت سعة حاسوبك الشخصي، الذي يزن الآن أربعة أرطال، تحتل الجانب الأغلب من مبني معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا حيث يوجد مكتبي. كذلك قبل خمسين عامًا كان علماء الفلك يعتمدون على تلسكوبات بصرية وراديوية مثبتة على الأرض — هكذا كان الأمر فحسب! أما اليوم، فبالإضافة إلى تلسكوب هابل الفضائي، صارت لدينا مجموعة من المراصد الفضائية للأشعة السينية، ومراصد فضائية لأشعة جاما؛ وهذا بالإضافة إلى أننا نستعين بمراصد نيوترينو ونشيد مراصد جديدة منها. كذلك، قبل خمسين عامًا، لم تكن احتمالية وقوع الانفجار العظيم قد باتتْ مسألة مفصولة بعد. أما الآن، فقد صرنا نعرف كيف كان يبدو الكون في أول واحد على مليون جزء من الثانية بعد وقوع الانفجار العظيم — وصرنا ندرس أجرامًا فلكية ترجع نشأتها إلى ١٣ مليار سنة، وأجرامًا تشكلتْ خلال الخمسمائة مليون سنة الأولى بعد ذلك الانفجار الذي انبثق منه الكون الذي نعيش فيه. وعلى خلفية كل تلك الاكتشافات والتحولات العظيمة، كيف يسعني ألا أؤمن أن العلماء سينجحون في حل مشكلة الاندماج النووي المحكوم؟ ولا أقصد هنا التقليل من شأن الصعوبات أو أهمية التوصل إلى ذلك الحل في أقرب وقتٍ ممكن، لكنني أرى أن الأمر مجرد مسألة وقت.

# الفصل العاشر

# أشعة سينية من الفضاء الخارجي

لطالما شكلت السماء ليلًا ونهارًا لغزًا مستعصيًا على البشر الراغبين في فهم الكون المحيط بهم، ولذا دائمًا ما كان علم الفلك يأسر ألباب الفيزيائيين؛ فنأخذ في التساؤل: «ما الشمس؟»؛ «ولِم تتحرك؟»؛ وماذا عن القمر والكواكب والنجوم؟ ونفكر إلام احتاج أسلافنا لإدراك أن الكواكب تختلف عن النجوم، وأنها تدور حول الشمس؛ وأن تلك الكواكب التي تدور حول الشمس يمكن مراقبتها ورسم خرائط لها وتفسير سلوكها وتوقعه. وكثيرٌ من العقليات العلمية الأعظم خلال القرنين السادس عشر والسابع عشر — من بينهم نيكولاس كوبرنيكوس، وجاليليو جاليلي، وتايكو براهي، ويوهانس كيبلر، وإسحاق نيوتن — كانت متحمسة للنظر في السماء لكشف غموض تلك الألغاز الليلية. تخيل مدى الإثارة التي شعر بها جاليليو حين وجه تلسكوبه نحو كوكب المشتري، الذي كان يبدو أكبر قليلًا من نقطة ضوء، ليكتشف أربعة أقمار صغيرة تدور حوله! وفي الوقت نفسه، لا بد أنهم شعروا بإحباط شديد لقصور معرفتهم عن تلك النجوم التي كانت تتلألأ في السماء ليلةً بعد أخرى. الأمر المذهل أن الفيلسوف الإغريقي ديموقريطوس، وعالم الفلك جيوردانو برونو، الذي عاش في القرن السادس عشر، اقترحَا أن تلك النجوم تشبه الشمس، لكن لم تُقدَّم أية أدلة تبرهن على صحة اقتراحهما. فماذا كانت تلك النجوم؟ وما الذي كان يمسك بها في السماء؟ وكم كانت تبعد عنا؟ ولِمَ يلمع بعضها أكثر من بعض؟ ولِمَ تختلف ألوانها؟ وماذا كان ذلك الشريط الضوئي الذي يمتد عبر الأفق في الليالي صافية السماء؟

يتمحور علم الفلك وعلم الفيزياء الفلكية منذ ذلك الوقت حول السعي للإجابة عن تلك الأسئلة، وعن الأسئلة الأخرى التي كانت تثار عند التوصل إلى بعض الإجابات. وعلى مدار الأربعمائة عامٍ الماضية تقريبًا، كانت قدرة علماء الفلك على الرؤية تتوقف على قوة تلسكوباتهم وحساسيتها. أما الاستثناء الأبرز، فكان تايكو براهي، الذي سجَّل

ملاحظات دقيقة التفاصيل بالاعتماد على العين المجردة، وبالاستعانة بأداة بسيطة، وهي نفسها التي مكَّنتْ كيبلر من التوصل إلى ثلاثة اكتشافات كبرى، وتُعرف اليوم بقوانين كيبلر.

لأغلب الوقت كان البشر يستعينون بالتلسكوبات البصرية. أعرف أن هذا قد يبدو غريبًا لكل غير مختص بعلم الفلك. فحين تسمع «تلسكوب»، فإن الصورة التي ترد لذهنك تلقائيًا، «أنبوب بعدسات ومرايا تنظر عبره»، أليس كذلك؟ وكيف يمكن ألا يكون التلسكوب بصريًا؟ حين أقام الرئيس أوباما ليلة علم الفلك في أكتوبر من عام ٢٠٠٩، وُضعَتْ مجموعة من التلسكوبات في حديقة البيت الأبيض، وقد كانت جميع تلك التلسكوبات بصرية.

لكن منذ ثلاثينيات القرن العشرين، حين اكتشف كارل جانسكي موجات الراديو التي تأتي من مجرة درب التبانة، راح علماء الفلك يسعون إلى توسيع نطاق الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يمكنهم من مراقبة الكون. وهكذا، أخذوا يفتشون عن الإشعاع الميكروي (ومن ثم اكتشفوه) (وهو موجات راديو عالية التردد)، والأشعة فوق الحمراء وتحت البنفسجية (وهي ذات ترددات أقل قليلًا أو أعلى قليلًا من ترددات الضوء المرئي)، والأشعة السينية، وأشعة جاما. ولرصد تلك الإشعاعات، ابتكرنا مجموعة من التلسكوبات المصممة خصوصًا كلٌّ لغرضه — بعضها كانت أقمارًا صناعية خاصة لرصد الأشعة السينية وأشعة جاما — بحيث تمكننا من الرؤية لمدى أبعد وعلى نطاق أوسع في الكون. بل توجد كذلك تلسكوبات نيوترينوية تحت الأرض، من ذلك واحد تحت الإنشاء حاليًا في القطب الجنوبي، ويسمى، آيس كيوب، وهي تسمية مناسبة تمامًا.

وعلى مدار السنوات الخمس والأربعين الماضية — وهي جل ما قضيتُه من حياتي في دراسة علم الفيزياء الفلكية — كنتُ أعمل في مجال علم فلك الأشعة السينية؛ أكتشف مصادر جديدة للأشعة السينية في الكون، وأضع تفسيرات للظواهر الكثيرة المختلفة التي نرصدها. وكما سبق أن ذكرتُ، كانت بداية حياتي المهنية قد تزامنتْ مع السنوات الأولى الزاخرة بالإثارة والتشويق لهذا المجال، وانخرطتُ فيه للعقود الأربعة التالية. لقد بدّل علم فلك الأشعة السينية حياتي، لكن الأهم أنه بدَّل وجه علم الفلك نفسه. وسوف يحملك هذا الفصل والفصول الأربعة التالية في رحلة عبر عالم الأشعة السينية، من منظور شخص عمل وعاش في ذلك الكون طوال سنوات مساره المهنيّ في العلوم. والآن، دعونا نبدأ بالتعرف على الأشعة السينية نفسها.

## ما هي الأشعة السينية؟

إن لمصطلح الأشعة السينية وقعٌ عجيب، وقد أطلق عليها ذلك لأنها كانت «مجهولة» (مثل «س» في المعادلات)، لكنها فوتونات — إشعاع كهرومغناطيسي — تشكل جزءًا من الطيف الكهرومغناطيسي الذي لا يمكننا رؤيته بين الأشعة فوق البنفسجية وأشعة جاما. وفي هولندا وألمانيا، لا يُطلَق عليها اسم الأشعة السينية، وإنما يطلق عليها اسم عالم الفيزياء الألماني، فيلهلم رونتغن، الذي اكتشفها عام ١٨٩٥. وبإمكاننا تمييز الأشعة السينية على النحو ذاته الذي نرصد به الأشعة الأخرى في الطيف الكهرومغناطيسي، وذلك بثلاث طرقٍ مختلفة لكنها مترابطة، وهي: التردد (عدد الدورات لكل ثانية، والتي تقاس بالهرتز)، والطول الموجي (طول الموجة الواحدة، بالمتر، وفي هذه الحالة بالنانومتر)، أو بالطاقة (بالإلكترون فولت، eV، أو ألف إلكترون فولت، keV).

وإليك بعض أوجه المقارنة السريعة. يبلغ الطول الموجي للضوء الأخضر حوالي ٥٠٠ من مليار جزء من المتر، أو ٥٠٠ نانومتر، وتبلغ طاقته حوالي ٢,٥ إلكترون فولت. وتبلغ طاقة أدنى فوتونات الأشعة السينية طاقةً حوالي ١٠٠ إلكترون فولت، أي عشرين ضعف طاقة فوتون الضوء الأخضر، ويبلغ طوله الموجي حوالي ١٢ نانومتر. أما أعلى فوتونات الأشعة السينية طاقةً، فتبلغ ١٠٠ ألف إلكترون فولت، وطولها ٠,٠١٢ نانومتر. (تبلغ طاقة الأشعة السينية التي يستخدمها طبيب الأسنان ٥٠ ألف إلكترون فولت). أما على الطرف الآخر من الطيف الكهرومغناطيسي، في الولايات المتحدة الأمريكية، فتبث محطات الراديو على الموجة المتوسطة بين ترددي ٥٢٠ كيلوهرتز (بطول موجي ٥٧٧ مترًا – حوالي ثلث ميل) و١٧١٠ كيلوهرتز (بطول موجي ١٧٥ مترًا - حوالي ضعف طول ملعب كرة قدم). وتقل طاقة تلك الموجات عن طاقة الضوء الأخضر مليار مرة، وعن طاقة الأشعة السينية تريليون مرة.

تُشكل الطبيعة الأشعة السينية بعدة طرق مختلفة؛ حيث تنبعث الأشعة السينية طبيعيًا من معظم الذرات المشعة خلال عملية التحلل النووي؛ حيث تقفز الإلكترونات من مستوى أعلى للطاقة إلى مستوى أدنى، وذلك الفرق في مستوى الطاقة ينبعث في صورة أشعة سينية. تختلف طاقات تلك الفوتونات اختلافًا بالغًا، وذلك لأن مستويات طاقة الإلكترونات مُكماة؛ أو، تغير الإلكترونات اتجاهها عند مرورها

بنوايا الذرات بسرعة عالية، وتطلق بعضًا من طاقتها في شكل أشعة سينية. هذا النوع من انبعاث الأشعة السينية، وهو النوع الشائع في علم الفلك وفي أجهزة الأشعة السينية المستخدمة في مجالي الطب وطب الأسنان، نطلق عليه اسمًا ألمانيًا معقدًا، bremsstrahlung، أو بالترجمة الحرفية «أشعة الانكباح». يمكنك مشاهدة نسخة بالرسوم المتحركة لعملية إنتاج أشعة الانكباح السينية من هنا: www.youtube.com/watch?v=3fe6rHnhkuY. يمكن إنتاج الأشعة السينية متفاوتة الطاقة كذلك في بعض من أجهزة الأشعة السينية الطبية، لكن أشعة الانكباح (التي تنتج طيفًا مستمرًا من الأشعة السينية) بوجه عام هي الأكثر شيوعًا. حين تدور الإلكترونات عالية الطاقة حول خطوط المجال المغناطيسي، يتغير اتجاه سرعتها طوال الوقت، ومن ثم، فإنها تشع بعضًا من طاقتها في صورة أشعة سينية. ونطلق على ذلك الإشعاع السينكروتوني، ويُطلق عليها أيضًا «أشعة الانكباح المغناطيسية (هذا ما يحدث في سديم السرطان — انظر بالأسفل).

تَنتج الأشعة السينية طبيعيًا عند ارتفاع درجة حرارة المواد الكثيفة لدرجات حرارة عالية جدًا، إلى ملايين الدرجات على مقياس كلفن. وهنا نطلق على ذلك إشعاع الجسم الأسود (انظر الفصل الرابع عشر). ترتفع درجة المادة لهذه الدرجة في ظروف قصوى، مثل انفجارات المستعر الأعظم — وهي انفجارات نجمية هائلة تحدث عند نهاية عمر بعض النجوم الضخمة — أو عند سقوط الغاز بسرعة هائلة باتجاه ثقب أسود أو نجم نيتروني (وسوف نتحدث عن ذلك بمزيد من التفصيل في الفصل الثالث عشر، أعدك بذلك!). على سبيل المثال، تُطلق الشمس التي تبلغ درجة حرارة سطحها حوالي ٦٠٠٠ كلفن أقل قليلًا من نصف طاقتها (٤٦ في المائة من طاقتها) في صورة ضوء مرئي. أما الباقي فيكون في صورة أشعة تحت حمراء (٤٩ في المائة) وأشعة فوق بنفسجية (٥ في المائة). ورغم أن درجة حرارة الشمس أبعد ما يكون عن درجة السخونة الكافية لانبعاث الأشعة السينية، تنبعث بعض الأشعة السينية من الشمس، ولا يوجد تفسير فيزيائي مفهوم لذلك. إلا أن الطاقة المنبعثة من الشمس في صورة أشعة سينية لا تربو على واحد من مليون من إجمالي الطاقة المنبعثة من الشمس. وجسم الإنسان يطلق أشعة تحت حمراء (انظر الفصل التاسع)؛ لكنه ليس بالسخونة الكافية لإطلاق ضوءٍ مرئي.

ومن الجوانب المثيرة للعجب — والمفيدة كذلك — للأشعة السينية أن بعض

أنواع المادة، مثل العظام، تمتص الأشعة السينية أكثر من غيرها، مثل الأنسجة اللينة، وهو ما يفسر ظهور مناطق فاتحة وأخرى داكنة في صور الأشعة السينية للفم أو اليد. وإن كان سبق لك إجراء أشعة سينية، فلا بد أنك خضت تجربة ارتداء مئزر الرصاص لحماية باقي أعضاء جسمك، وذلك لأن التعرض للأشعة السينية يمكن أن يرفع خطورة الإصابة بمرض السرطان. ولذلك من الجيد — على الأغلب — أن الغلاف الجوي للأرض يتمتع بقدرة جيدة على امتصاص الأشعة السينية. فعند مستوى البحر، يمتص سنتيمتر واحد من الهواء ٩٩ في المائة من الأشعة السينية منخفضة الطاقة (تبلغ طاقتها ألف إلكترون فولت). أما الأشعة السينية التي تبلغ طاقتها خمسة آلاف إلكترون فولت، فإن امتصاص ٩٩ في المائة منها يحتاج إلى حوالي ٨٠ سنتيمتر من الهواء، أي حوالي ثلاثة أقدام. يتطلب امتصاص ٩٩ في المائة من الأشعة السينية عالية الطاقة، بمعدل طاقة ٢٥ ألف إلكترون فولت، ٨٠ مترًا من الهواء.

## نشأة علم فلك الأشعة السينية

الآن بإمكانك فهم السبب وراء اقتراح برونو روسي في عام ١٩٥٩، حين خطرتْ له فكرة الذهاب إلى الفضاء الخارجي للبحث عن الأشعة السينية، استخدام صاروخ قادر على الخروج من الغلاف الجوي للأرض تمامًا. لكن فكرته للبحث عن الأشعة السينية كانت جامحة؛ إذ لم تكن توجد أية أسباب نظرية سليمة للاعتقاد بانبعاث أي أشعة سينية من مصادر خارج المجموعة الشمسية. لكن هكذا كان روسي، وقد أقنع مارتن أنيس، طالبه سابقًا، ومؤسس شركة «أمريكان ساينس آند إنجنيرينج»، بالإضافة إلى أحد أفراد طاقمه، ريكاردو جاكوني، بأن الفكرة جديرة بالتنفيذ.

هكذا، صمم جاكوني وزميله فرانك باوليني أنابيب جايجر مولر خاصة، بإمكانها رصد الأشعة السينية ويمكن تركيبها في المقدمة المخروطية لصاروخ. في الواقع، وضعوا ثلاثة من هذه الأنابيب في صاروخ. وقد أطلقوا عليها كواشف مساحات شاسعة، لكن المساحة الشاسعة في تلك الأيام كانت تعني حجم بطاقة الائتمان. وراح المسؤولون في شركة «أمريكان ساينس آند إنجنيرينج» يبحثون عن تمويل لدعم تلك التجربة ماديًا، إلا أن ناسا رفضتْ مشروعهم.

عدّل جاكوني في مقترح المشروع بوضع القمر كهدفٍ، ثم سلمه لمختبرات

كمبريدج للأبحاث التابعة للقوات الجوية. وكانت الحجة التي بُنِيَ عليها المقترح أن الأشعة السينية الشمسية يفترض أن تنتج ما يُعرف بانبعاث الفلورسنت من سطح القمر، مما يسهل تحليل سطح القمر كيميائيًا. كما توقعوا انبعاث أشعة انكباح من سطح القمر بفضل الإلكترونات التي تحتوي عليها الرياح الشمسية. وبالنظر إلى قرب مسافة القمر إلى الأرض، يمكن رصد الأشعة السينية. وقد كانت تلك حركة ذكية، وذلك لأن شركة «أمريكان ساينس آند إنجينيرينج» حصلتْ بالفعل على دعم لمشروعات أخرى كثيرة من القوات الجوية (بعضها مشروعات سرية)، وقد كانت الشركة على علم بأن الهيئة كانت مهتمة بالقمر. وعلى أية حال، هذه المرة قُبِل مقترح مشروعهم.

وبعد فشل إطلاق الصاروخ مرتين خلال عامي ١٩٦٠ و١٩٦١، كانت المهمة المحددة للصاروخ الذي أُطلق قبل دقيقة واحدة من منتصف ليلة الثامن عشر من يونيو من عام ١٩٦٢ هي محاولة رصد الأشعة السينية الواردة من القمر والبحث عن مصادر الأشعة السينية خارج المجموعة الشمسية. وقد قضى الصاروخ ست دقائق على ارتفاع أعلى من ٨٠ كيلومترًا (أعلى من ٢٥٠,٠٠٠ قدم)، حيث تمكنت أنابيب جايجر مولر من رصد أشعة سينية يتراوح مدى طاقتها ما بين ١,٥ وستة آلاف إلكترون فولت دون تداخل مع الغلاف الجوي للأرض. هكذا كانت طريقة مراقبة الفضاء بالصواريخ في ذلك الزمن؛ حيث ترسل صواريخ خارج الغلاف الجوي، بحيث تمسح السماء لخمس أو ست دقائق فقط، ثم تعود أدراجها إلى الأرض.

الأمر المذهل أن أنابيب جايجر مولر عثرتْ على أشعة سينية على الفور — لكنها لم تكن منبعثة من القمر وإنما من مكان ما خارج المجموعة الشمسية.

هل كانت أشعة سينية آتية من الفضاء العميق؟ ما السبب؟ ما من أحد يفهم هذا الاكتشاف. قبل هذه الرحلة، كان العلماء قد اكتشفوا للتو نجمًا محددًا تنبعث منه الأشعة السينية، وهو الشمس. وإذا كانت الشمس تقع على مسافة ١٠ سنوات ضوئية مثلًا، وهي مسافة قريبة جدًّا بمقاييس علم الفلك، فإن المعدات التي كانت داخل الصاروخ في تلك الرحلة التاريخية كانت أقل حساسيةً بمليون مِثل من المستوى اللازم لرصد الأشعة السينية. كانوا جميعًا على علمٍ بذلك. ومن ثم، أيًّا كان موقع ذلك المصدر، فلا بد أن الأشعة السينية المنبعثة منه كانت أعلى بمقدار مليون مِثل من تلك المنبعثة من الشمس على الأقل — وهذا لو أنه كان قريبًا من الأرض. إلا أنه لم يُسمع قط عن أجرامٍ فلكية تنبعث منها أشعة سينية بمقدار أعلى بمليون أو مليار مرة

من الشمس على الأقل. كما أن الفيزياء كانت تفتقر إلى تفسير لوصف مثل هذا الجرم. بعبارة أخرى، كانت تلك بمثابة ظاهرة جديدة في السماء.

وهكذا، ولد مجال علمي جديد في الثامن عشر والتاسع عشر من يونيو من عام ١٩٦٢، مجال علم فلك الأشعة السينية.

هنا، شرع علماء الفيزياء الفلكية يرسلون صواريخ كثيرة مزودة بكواشف لتحديد موقع مصدر الأشعة السينية بدقة، واكتشاف ما إذا كانت هناك مصادر أخرى. وبالنظر إلى أن هناك دائمًا عامل شك في قياس مواقع الأجرام السماوية، يتحدث علماء الفلك عن «مربع خطأ»، وهو عبارة عن مربع تصوري في قبة السماء تقاس أضلاعه بالدرجات، أو الدقيقة أو الثانية القوسية. ومن ثم، يوسِّع العلماء نطاق هذا المربع بحيث تبلغ احتمالية وقوع الجرم السماوي داخل ذلك المربع ٩٠ في المائة. وعلماء الفلك مولعون بمربعات الخطأ، وذلك لأسباب واضحة: فكلما صغر حجم المربع، كان موقع الجرم السماوي أدق. وهذا أمر بالغ الأهمية في علم فلك الأشعة السينية، بحيث كلما كان مربع الخطأ أصغر، زادت احتمالات القدرة على إيجاد النظير البصري لمصدر الأشعة السينية. ومن ثم، تصغير المربع لأقصى درجة ممكنة هو إنجاز مهم.

يكتب آندي لورانس، الأستاذ بجامعة إدينبرغ، مدونة في علم الفلك تحت اسم «The e-Astronomer»، التي نشر عليها ذكريات عمله على أطروحته، التي كانت تدرس مئات من مخططات لمواقع مصادر الأشعة السينية في الكون، فكتب يقول: «ذات ليلة حلمتُ أنني مربع خطأ، ولم أستطع إيجاد مصدر الأشعة السينية الذي كان من المفترض أن أشمله. فاستيقظتُ والعرق يتصبب مني». لا بد أنك تعرف السبب.

كان حجم مربع الخطأ لمصدر الأشعة السينية الذي اكتشفه كل من ريكاردو جاكوني، وهِرْب جورسكي، وفرانك باوليني، وبرونو روسي حوالي ١٠ درجات × ١٠ درجات، أو ١٠٠ درجة مربعة. والآن، ضع نصب عينيك أن الشمس تقع في الجهة الأخرى على بعد نصف درجة. وقد انطوى عامل الشك في تحديد مصدر الأشعة السينية على مربع خطأ مساحته تعادل مساحة الشمس ٥٠٠ مرة؛ وقد تضمن مربع الخطأ هذا أجزاءً من كوكبتي العقرب وكوكبة مسطرة النقاش وجزءًا بسيطًا من كوكبة المجمرة. ومن ثم، من الواضح أنهم كانوا عاجزين عن تحديد في أي من تلك الكوكبات يقع مصدر الأشعة السينية.

وفي أبريل من عام ١٩٦٣، أجرى فريق هربرت فريدمان في مختبر أبحاث البحرية الأمريكية في واشنطن العاصمة تعديلًا مهمًّا على موقع مصدر الأشعة السينية؛ لقد اكتشفوا أنه يقع في كوكبة العقرب. وهذا سبب تسمية Sco X-1 التي يُعرف بها هذا المصدر الآن؛ حيث يرمز حرف X إلى «X-rays» الأشعة السينية، ويرمز رقم ١ إلى أنه أول مصدر للأشعة السينية يُكتَشَف في كوكبة العقرب. إحدى المعلومات ذات الأهمية التاريخية، وإن لم تُذكَر قط، أن Sco X-1 يقع على بعد ٢٥ درجة من منتصف مربع الخطأ الوارد في الورقة البحثية لجاكوني وآخرين، والتي كانت إيذانًا بنشأة علم فلك الأشعة السينية. حين اكتشف علماء الفلك مصادر جديدة للأشعة السينية في كوكبة سيجنوس (أو الطائر)، أُطلق عليها Cygnus X-1 (أو Cyg X-1 اختصارًا)، أو Cyg X-2، إلى آخره؛ كما أطلق على أول مصدر اكتشف في كوكبة الجاثي (أو هرقل) اسم Her X-1؛ وأطلق على تلك التي اكتشفت في كوكبة قنطورس Cen X-1. وهكذا على مدار ثلاثة أعوام، اكتشف أكثر من عشرة مصادر للأشعة السينية بالاستعانة بالصواريخ، باستثناء مصدر واحد، وهو Tau X-1، الذي يقع في كوكبة الثور؛ إذ لم يعرف أحد ماهية ذلك المصدر، ولا الكيفية التي يطلق بها الأشعة السينية بتلك الكميات الضخمة التي مكنتنا من رصدها من على بعد آلاف السنين الضوئية.

وقد كان ذلك الاستثناء سديم السرطان، وهو واحد من أكثر الأجرام السماوية غرابةً. وإذا لم تكن لديك فكرة عن سديم السرطان؛ فالأمر يستحق أن تذهب إلى ملحق الصور لتلقي نظرة على صورته هناك الآن – وأعتقد أنك ستميزه على الفور. كما أن له صورًا كثيرة جدًّا على الإنترنت. إنه جرم سماوي مميز على بعد ٦٠٠٠ سنة ضوئية من الأرض، وهو عبارة عن بقايا خلابة المنظر لانفجار مستعر أعظم وقع في عام ١٠٥٤، سجله علماء فلك صينيون (وربما سجله الأمريكيون الأصليون في رسومهم الصورية، يمكنك إلقاء نظرة هنا: http://seds.org/messier/more/m001_sn.html#collins1999) في شكل نجم فائق السطوع يظهر في السماء فجأة، من العدم تقريبًا، في كوكبة الثور. (يدور بعض الخلاف حول موعده المحدد، رغم زعم كثيرين أنه وقع في الرابع من يوليو). في ذلك الشهر كان ذلك الجرم السماوي هو الأشد سطوعًا في السماء بعد القمر، حتى إنه كان يظهر في وضح النهار على مدار أسابيع، فيما ظل يسطع في سماء الليل على مدار العامين اللاحقين.

لكن، ما إن تلاشت رؤيته، حتى نسيه العلماء على ما يبدو حتى القرن الثامن

عشر، حين وجده عالمَا الفلك جون بيفس وشارل مسييه، كلٌّ على حدة. في ذلك الوقت، كانت بقايا المستعر الأعظم قد اتخذتْ شكل جسم سديمي (يشبه السحاب). وقد وضع مسييه فهرسَ صورٍ فلكيًّا مهمًّا يضم أجرامًا مثل المذنبات والسدم والعناقيد النجمية – وعلى رأس ذلك الفهرس سديم السرطان، M-1. في عام ١٩٣٩، اكتشف العالم نيكولاس مايال من مختبر ليك (في كاليفورنيا الشمالية) أن M-1 هو بقايا مستعر أعظم وقع في عام ١٠٥٤. واليوم، بعد نحو ألف عامٍ من الانفجار، ما زالت أشياءُ عجيبة تحدث داخل سديم السرطان حتى إن بعض علماء الفلك يُكرسون حياتهم المهنية بالكامل لدراسته.

عَلِم فريق هيرب فريدمان أن القمر كان سيمر أمام سديم السرطان مباشرة في السابع من يوليو من عام ١٩٦٤، خافيًا إياه عن الرؤية. ويستخدم علماء الفلك مصطلح «الحجب» للتعبير عن إخفاء الرؤية — أي أن القمر كان سيحجب سديم السرطان عن الرؤية. كان فريدمان يريد التأكد من أن سديم السرطان هو مصدر انبعاث الأشعة السينية، بالإضافة إلى أمله في إثبات شيءٍ آخر – شيءٍ أهم كثيرًا.

وفي عام ١٩٦٤، جدد علماء الفلك اهتمامهم بنوع من الأجرام النجمية التي افتُرِض وجودها للمرة الأولى في ثلاثينيات القرن العشرين، لكنها لم تُرصَد قط، وهي النجوم النيوترونية. وقد قُدِّر أن تلك الأجرام الغريبة، التي سآتي على شرحها بالتفصيل في الفصل الثاني عشر، هي إحدى المراحل الأخيرة في حياة النجم، والتي ربما تنشأ أثناء انفجار المستعر الأعظم ويتشكل أغلبها من النيوترونات. وإن كان لها وجود فعلي، فإنها ستكون بالغة الكثافة حتى إن النجم النيوتروني الذي تعادل كتلته كتلة الشمس لن يتعدى نصف قطره عشرة كيلومترات — أي إن عرضه ١٢ ميل، إن كان لك أن تتخيل شيئًا كهذا. في عام ١٩٣٤ (بعد عامين من اكتشاف النيوترونات)، استحدث فالتر بادي وفريتز زفيكي مصطلح «Supernova» أو المستعر الأعظم، وطرحَا أن النجوم النيوترونية ربما تشكلتْ في انفجارات المستعرات العظمى. وعليه، اعتقد فريدمان أن مصدر الأشعة السينية في سديم السرطان ربما لم يكن سوى نجم نيوتروني. ولو كان اعتقاده صحيحًا، لاختفت انبعاثات الأشعة السينية التي كان يراها على الفور عند مرور القمر أمام سديم السرطان.

قرر فريدمان أن يُطلق مجموعة من الصواريخ، واحدًا تلو الآخر تزامنًا مع مرور القمر أمام سديم السرطان. ونظرًا لمعرفتهم موقع القمر بدقة إذ يتحرك عبر السماء،

واستطاعتهم توجيه العدادات في ذلك الاتجاه، تمكنوا من مراقبة تراجع في الأشعة السينية عند اختفاء سديم السرطان. وهكذا خلال ذلك الحدث الفلكي، التقطت كواشفهم بالفعل تراجعًا، وكانت تلك الملاحظة أول عملية رصد بصري قاطع لمصدر أشعة سينية. لقد كانت تلك النتيجة بالغة الأهمية، وذلك لأنه بمجرد نجاحنا في هذا الرصد البصري، راودنا الأمل في اكتشاف الآلية التي يعمل وفقًا لها ذلك المصدر الغامض القوي للأشعة السينية.

ومع ذلك، أصيب فريدمان بخيبة أمل؛ فبدلًا من أن يختفي انبعاث الأشعة السينية فجأة بينما يمر القمر أمام سديم السرطان، راحت الأشعة السينية تختفي تدريجيًا، مما يدل على أنها كانت تأتي من السديم بأكمله وليس من جرم واحد في داخله. وهذا يعني أنه لم يكتشف نجمًا نيوترونيًا. ومع ذلك، يوجد نجم نيوتروني واحد مميز داخل سديم السرطان، لكنه لا يطلق أشعة سينية؛ فالنجم النيوتروني يدور حول محوره بمعدل ثلاثين دورة في الثانية! إذا أردت أن تحظى ببعض المتعة الحقيقية، زر الموقع الإلكتروني لمرصد تشاندرا الفضائي للأشعة السينية (http://chandra.harvard.edu/) وشاهد صور سديم السرطان؛ أؤكد لك أنها مذهلة. لكن قبل خمسة وأربعين عامًا لم يكن لدينا في الفضاء تلسكوب أشعة سينية مداري للتصوير، لذلك كان علينا أن نكون على درجة عالية من الإبداع. (فعقب اكتشاف جوسلين بيل النجوم النباضة الراديوية في عام ١٩٦٧، رصد فريق فريدمان أخيرًا نبضات الأشعة السينية — التي كانت تبلغ ثلاثين نبضة في الدقيقة – من النجم النيوتروني الواقع في سديم السرطان).

وبينما كان فريدمان يراقب حجب سديم السرطان، كان جورج كلارك (الذي صار صديقي فيما بعد) في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في تكساس يستعد لرحلة ليلية بالمنطاد على ارتفاع شاهق بحثًا عن أشعة سينية من المصدر Sco X-1. لكنه ما إن سمع عن النتائج التي توصل إليها فريدمان — إذ كانت الأخبار تنتشر بسرعة حتى بدون إنترنت — حتى غيَّر خطته بالكامل ليقرر أن تكون الرحلة في ضوء النهار بحثًا عن أشعة سينية بطاقة تربو على ١٥ ألف إلكترون فولت من سديم السرطان؛ وقد وجد ما أراد البحث عنه كذلك!

يصعب التعبير بالكلمات عن مدى ما انطوى عليه كل ذلك من إثارة؛ إذ كنا نستقبل فجر عهدٍ جديد في الاستكشاف العلمي. وكنا نشعر وكأننا نزيح ستارًا يخفي وراءه كل تلك العوالم العجيبة من الكون. وفي الواقع، بإطلاق كواشفنا بعيدًا إلى كل

ذلك الارتفاع، وبالسفر إلى الفضاء، وبالوصول إلى أعلى طبقات الغلاف الجوي حيث تخترق الأشعة السينية الغلاف دون أن يمتصها الهواء، كنا نزيل عن أعيننا تلك الحجب التي كانت تُغشيها منذ ميلاد التاريخ الإنساني. لقد كنا نعمل داخل نطاقٍ طيفي جديد تمامًا.

كثيرًا ما يحدث ذلك في تاريخ علم الفلك. ففي كل مرة نسمع عن أجرامٍ سماوية تطلق انبعاثات جديدة أو مختلفة، كان علينا أن نغير بعضًا من المفاهيم التي نعرفها عن النجوم، ودورات حياتها (كيفية نشأتها، وحياتها، وأسباب موتها)، وعن تشكل العناقيد النجمية وتطورها، وعن المجرات، وحتى عن العناقيد المجرية. بيَّن لنا علم الفلك الراديوي، على سبيل المثال، أن مراكز المجرات تطلق تدفقات من المادة المتأينة على بعد آلاف السنوات الضوئية؛ كما اكتشف أن النجوم النباضة، والكوازارات، والمجرات الراديوية هي سبب اكتشاف إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، الذي غيَّر رؤانا عن الأيام الأولى من عمر الكون تغيرًا جذريًا. كما اكتشف علمُ فلكِ أشعةِ جاما بعضًا من أقوى وأبعد الانفجارات (لحسن الحظ) في الكون، والتي تُعرف بانفجارات أشعة جاما، والتي ينبعث منها توهج يحتوي على أشعة سينية، وضوءٍ مرئي وكل أنواع الإشعاعات حتى الموجات الراديوية.

كنا نعي أن اكتشاف الأشعة السينية في الفضاء سيغير مفهومنا عن الكون، لكننا لم نكن نعرف كيف. في كل مكان ننظر إليه بمعداتنا الحديثة، كنا نرى أشياء جديدة؛ ربما لا يكون ذلك مفاجأةً. لكن حين شرع علماء الفلك البصري يستقبلون صورًا من تلسكوب هابل الفضائي، كانوا مفعمين بالرغبة وبأسباب الرهبة، وربما كانوا متعطشين للمزيد، وإن لم يكن ذلك واضحًا. إلا أنهم في الأساس كانوا في خضم توسيع نطاق أداة تعود إلى مئات السنين، في مجال يرجع إلى آلاف السنين. فقد كنا، نحن علماءَ فلكِ الأشعةِ السينيةِ، نشهد بزوغ فجر مجالٍ علمي جديد. وما من أحدٍ كان يعلم إلى أين سيؤدي، أو ما الذي سنكتشفه.

وكم كنتُ محظوظًا حين دعاني برونو روسي إلى معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في يناير من عام ١٩٦٦ قبيل ميلاد ذلك المجال، وقد التحقتُ بفريق جورج كلارك على الفور. وكان جورج عالِمَ فيزياء حاد الذكاء، وذا شخصية رائعة، وقد تشكلتْ بيننا علاقة صداقة لباقي سنوات حياتي. وإلى الآن، أكاد لا أصدق حظي الحسن الذي منحني صديقًا حميمًا ومسارًا مهنيًا جديدًا في شهرٍ واحد.

# الفصل الحادي عشر

## مطاردة الأشعة السينية بالمناطيد.. البداية

عند وصولي إلى معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، لم تكن فرق المناطيد النشطة في العالم كله تتعدى خمسة فرقٍ، وهي فريق جورج كلارك في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وفريق كين ماكراكن في جامعة أديليد في أستراليا، وفريق جيم أوربيك في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وفريق لاري بيترسون في جامعة كاليفورنيا في سان دييجو، وبوب هايمس في جامعة رايس. في هذا الفصل سأتحدث باستفاضة عن تجاربي الخاصة مع رحلات المناطيد للبحث عن الأشعة السينية، التي كان يقوم عليها بحثي على مدار السنوات العشر الفاصلة بين ١٩٦٦ و١٩٧٦. خلال تلك السنوات، أجريتُ مشاهدات من فلسطين في ولاية تكساس، وبيج في أريزونا، وكالاجاري في كندا، ومن أستراليا.

كانت المناطيد تحمل كواشف الأشعة السينية إلى ارتفاع يصل إلى ١٤٥,٠٠٠ قدم (حوالي ٣٠ ميل)، حيث يبلغ الضغط الجوي ٠,٣ في المائة من نسبته عند مستوى سطح البحر. فعندما يكون الغلاف الجوي رقيقًا إلى تلك الدرجة، ينفذ منه مقدار وافٍ من الأشعة السينية التي تربو طاقة فوتوناتها على ١٥ ألف إلكترون فولت.

وكانت رحلاتنا المنطادية تلازم المراقَبات التي تجري بالاستعانة بالصواريخ. فالكواشف التي تحملها الصواريخ كان ترصد الأشعة السينية التي تتراوح طاقتها ما بين ألف إلى ١٠ آلاف إلكترون فولت، ولم تكن مدة عملية المراقبة تتجاوز الدقائق العشر خلال الرحلة بالكامل. أما رحلات المنطاد فكان من الممكن أن تمتد لساعات (وصلتْ أطول رحلاتي ٢٦ ساعة) وقد رصدتْ كواشفي أشعةً سينية تزداد طاقتها عن نطاق خمسة عشر ألف إلكترون فولت.

لم يكن من الممكن كشف جميع المصادر التي اكتُشفتْ خلال الرحلات الاستكشافية للصواريخ عبر رحلاتنا الرصدية بالمناطيد، وذلك لأن المصادر غالبًا ما

تُطلق معظم طاقتها في صورة أشعة سينية منخفضة الطاقة. إلا أننا تمكننا من رصد مصادر تطلق أشعة سينية عالية الطاقة لم تكن مرئية خلال رحلات الصواريخ الاستكشافية. وهكذا، علاوة على اكتشاف مصادر جديدة، ومد نطاق المصادر المعلومة للأشعة السينية عالية الطاقة؛ استطعنا أيضًا رصد تباين في لمعان الأشعة السينية المنبعثة من المصادر على نطاق زمني يمتد من دقائق إلى ساعات، وهو ما لم يكن من الممكن تحقيقه بالاستعانة بالصواريخ. وقد كان هذا أحد نجاحاتي المبكرة في أبحاثي في مجال الفيزياء الفلكية.

في عام ١٩٦٧، اكتشفنا وهجًا من الأشعة السينية المنبعثة من المصدر Sco X-1 - وقد كان ذلك بمثابة مفاجأة صاعقة — وسأتحدث عن ذلك باستفاضة في موضع لاحق من هذا الفصل. كما اكتشف فريقي ثلاثة مصادر للأشعة السينية هي GX 301-2، GX 304-1، و GX 1+4، والتي لم تظهر إطلاقًا خلال رحلات الصواريخ الاستكشافية، وقد رُصد تغير في شدة الأشعة السينية المنبعثة من كل تلك المصادر خلال نطاق زمني يبلغ حوالي ٢,٣ دقيقة. في ذلك الوقت، لم تكن لدينا أدنى فكرة عن ذلك التغير السريع في شدة الأشعة السينية، ناهيك عن أن يكون ذلك خلال فترة زمنية تقارب ٢,٣ دقيقة؛ كنا ندرك حينئذٍ أننا على أعتاب اكتشاف جديد — على مشارف اكتشاف أرضٍ جديدة لم تطأها قدم.مكتبة سُر مَن قرأ

ومع ذلك، بعض علماء الفلك لم يكونوا يدركون، حتى في نهايات عقد الستينيات من القرن العشرين، أهمية علمِ فلكِ الأشعة السينية. ففي عام ١٩٦٨، التقيتُ عالِم الفلك الهولندي جان أورت في منزل برونو روسي؛ وقد كان روسي رجلًا صاحب رؤية مستقبلية من الدرجة الأولى؛ فقد أطلق برنامجًا كاملًا قائمًا على علم الفلك الراديوي في أعقاب الحرب العالمية الثانية في هولندا. وحين زارنا في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في ذلك العام، عرضتُ عليه البيانات التي جمعناها من رحلاتنا الرصدية بالمنطاد خلال عامي ١٩٦٦ و١٩٦٧؛ لكنه رد بقولٍ لن أنساه قط: «علم فلكِ الأشعةِ السينية ليس على قدرٍ كبيرٍ من الأهمية». أتصدق ذلك؟ «ليس على قدرٍ كبير من الأهمية. لقد جانبه الصواب تمامًا في ذلك. لقد كان ذلك أحد فطاحلة علم الفلك في ذلك الوقت، ومع ذلك لم يدرك إطلاقًا أهمية علم فلك الأشعة السينية. ولربما لأنني كنتُ حينئذ أصغر سنًّا وأكثر تعطشًا منه — فللإنصاف كان أورت في الثامنة والستين في ذلك الوقت — كنتُ أرى أننا نجني ذهبًا خالصًا ونحن لم نزل ننبش السطح.

وأذكر أنني في ستينيات وسبعينيات القرن العشرين، كنتُ أقرأ كل بحثٍ يصدر عن علم فلكِ الأشعةِ السينية. وفي عام ١٩٧٤، ألقيتُ خمس محاضرات في لايدن (وكان أورت من ضمن الحضور)، واستطعتُ أن أغطي علم فلك الأشعة السينية بالكامل. واليوم تُنشر الآلاف من أبحاث علم فلك الأشعة السينية في العديد من المجالات الفرعية، وما من أحد يستطيع الإلمام بالمجال بالكامل. فباحثون كثر يقضون سنوات عملهم بالكامل في دراسة واحدٍ من عشرات الموضوعات المتخصصة، مثل النجوم المنفردة، والأقراص المزوِّدة، وثنائيات الأشعة السينية، والتجمعات النجمية، والأقزام النجمية، والنجوم النيوترونية، والثقوب السوداء، وبقايا المستعر الأعظم، وانفجارات الأشعة السينية، وتدفقات الأشعة السينية، والنوايا المجرية، وعناقيد المجرات. لقد كانت تلك الفترة الأولى أروع سنوات حياتي؛ ومع ذلك كانت أيامًا مرهقة على كل المستويات، عقليًا وبدنيًا ولوجستيًا؛ فقد كان إطلاق المناطيد مسألة معقدة ومكلفة، ومستنزفة للوقت، ومثيرة للتوتر لدرجة لا يمكن وصفها. ومع ذلك سأحاول.

## التحليق عاليًا: المناطيد.. وكواشف الأشعة السينية.. وعملية الإطلاق

لكي يتمكن عالِم الفيزياء من القيام بأي شيء، فلا بد له من الحصول على المال اللازم لبناء المعدات، ودفع رواتب الطلاب، والسفر بعيدًا في بعض الأحيان (إلا إذا كنتَ عالِم فيزياء نظرية، فكل ما تحتاج إليه ورقة وشاشة حاسوب). فالجانب الأعظم مما يقوم به العلماء هو التقدم بمقترحات مشاريع قوية لبرامج شديدة التنافسية لأجل الحصول على الدعم اللازم لإجراء الأبحاث. أعلم أن ذلك يخلو من كل مظاهر الجاذبية والإثارة، لكن، صدق أو لا تصدق، لا شيء يمكن أن يحدث دون فعل ذلك.

قد تختمر في عقلك فكرة عبقرية لتجربة أو رحلة رصدية، فإذا لم تعرف كيف تحولها إلى مقترح مقنع، فإنها لن تؤدي إلى شيء. لقد كنا دومًا في تنافس شرس مع أفضل الفرق في العالم، لذا كان ذلك جهدًا قاسيًا، وما زال كذلك إلى الآن، لأي عالِم في أي مجال. فأينما تنظر إلى عالِم تجريبي ناجح — سواء كان عالم أحياء، أو كيمياء، أو فيزياء، أو علوم الحاسب، أو الاقتصاد، أو علم الفلك، لا يهم — فاعلم أنك ترى أمامك شخصًا أدرك كيف ينتصر على منافسيه مرةً بعد أخرى. وهذا لا يمكن أن يصنع شخصيات رقيقة مرتبكة في الأغلب؛ وهذا ما جعل زوجتي، سوزان، التي عملتْ

في معهد ماساتشوستس لعشر سنوات، مولعةً بقول: «ليس في معهد ماساتشوستس أشخاصٌ يعرفون نكران الذات».

والآن، بافتراض أننا حصلنا على التمويل، وهو ما كان يحدث عادةً (فقد حصلتُ على دعم كبير من المؤسسة الوطنية للعلوم، ومن ناسا)، فعملية إطلاق منطاد لارتفاع يبلغ ٣٠ ميلًا تقريبًا، حاملًا على متنه تلسكوبَ أشعةٍ سينية يزن ٢٠٠٠ رطلٍ [حوالي ٩٠٧ كيلوجرامات تقريبًا] (مربوطًا في مظلة)، وينبغي أن تستعيده سليمًا بلا خدشٍ، كانت عملية بالغة التعقيد. فكان ينبغي أن يكون الطقس وقت الإطلاق هادئًا تمامًا، وتلك المناطيد حساسة جدًّا، حتى إن أي هبة ريح خفيفة يمكن أن تؤدي إلى إفشال المهمة برمتها. كذلك، كنتَ تحتاج إلى بنية تحتية، كمواقع للإطلاق، ومركبات للإطلاق، وما إلى ذلك — لمساعدتك على إطلاق المنطاد عاليًا في الغلاف الجوي وتعقبه. ولأنني كنت أريد إجراء عملية الرصد باتجاه مركز مجرة درب التبانة، الذي يُطلق عليه المركز المجري، حيث تقع مصادر كثيرة للأشعة السينية، فكان عليّ أن أجري مهمة الرصد من النصف الجنوبي للكرة الأرضية. فقررت إطلاق المنطاد من ميلدورا وأليس سبرينجز في أستراليا. كنتُ أبتعد جدًّا عن موطني وعائلتي — وكان لديّ أربعة أبناء في ذلك الوقت — لبضعة أشهر في كل مرة عادةً.

كانت عملية الإطلاق باهظة التكاليف من كل النواحي. فالمناطيد نفسها كانت ضخمة؛ وكان أكبر منطاد أطلقته (وكان وقتها أكبر منطاد يُطلق على الإطلاق، وربما يظل كذلك إلى الأبد) بحجم ٥٢ مليون قدم مكعب؛ وعند نفخه بالكامل وإطلاقه إلى ارتفاع ١٤٥,٠٠٠ قدم، بلغ قطره ٢٣٥ قدمًا. كانت المناطيد تصنع من متعدد الإثيلين (بولي إثيلين) خفيف الوزن — بسمك نصف من واحد من ألف من البوصة، أي أرفع سمكًا من أكياس التغليف البلاستيكية وورق السجائر. ومن ثم إذا لمست الأرض خلال عملية الإطلاق فإنها تتمزق. وكانت تلك المناطيد العملاقة تزن حوالي ٧٠٠ رطلٍ. وعادةً ما كنا نسافر بمناطيد احتياطية وكانت تكلفة كل منها تبلغ ١٠٠,٠٠٠ دولار — وذلك قبل أربعين عامًا، حينما كان ذلك المبلغ مهولًا.

بالإضافة إلى ذلك، كان لا بد من تصنيع تلك المناطيد في مصانع ضخمة، فكانت ألواح المنطاد، تلك الأجزاء التي تشبه فصوص القشرة الداخلية لثمرة اليوسفي، تُصنع منفصلةً ثم تُلحَم معًا بلحام حراري. ولم يكن المصنع يثق إلا بالنساء لأداء مهمةِ اللحام؛ حيث كانوا يقولون: إن الرجال كانوا نافدي الصبر أكثر من اللازم ويرتكبون

أخطاءً كثيرة. بعد ذلك كان علينا شحن الهيليوم اللازم لنفخ المناطيد إلى أستراليا؛ وكانت تكلفة الهيليوم وحده تبلغ ٨٠,٠٠٠ دولار للمنطاد الواحد. وقياسًا بقيمة الدولارات اليوم، فإن تلك التكلفة لكل منطاد بما يلزمه من غاز الهيليوم تضاهي ٧٠٠,٠٠٠ دولار، وذلك دون أخذ المنطاد الاحتياطي، وتكاليف انتقالاتنا، وسكننا، وطعامنا. هنا حقًّا، لقد كنا نحاول كشف أسرار الفضاء العميق، نقيم في منتصف الصحراء الأسترالية معتمدين على الطقس تمام الاعتماد. ولكني لم أحكي لك عن جاك بعد، سوف أتحدث عنه عما قريب.

إلا أن تكلفة المناطيد كانت منخفضة مقارنة بالتلسكوب؛ تلك الآلة بالغة التعقيد التي يبلغ وزنها طنًّا، كان صنعها يستغرق عامين بتكلفة مليون دولار - أي ما يضاهي أربعة ملايين دولار بالقيمة الحالية للدولار. لم يتوفر لدينا قط المال الكافي للحصول على تلسكوبين في المرة الواحدة. ومن ثم، إن فقدنا التلسكوب الذي لدينا - وهو ما تعرضنا له مرتين - فإن الحظ يجانبنا لمدة عامين كاملين على الأقل؛ إذ لم يكن بإمكاننا تصنيع تلسكوب جديد حتى نحصل على التمويل. ولذا كان فقدان التلسكوب بمثابة الكارثة.

ولم تكن عاقبة ذلك تطالني بمفردي، بل كانت تسبب تعطيلًا طويلًا لطلاب الدراسات العليا المشاركين في بناء التلسكوب، والذين كانت أطروحاتهم لنيل درجة الدكتوراه تقوم على أدوات عمليات الرصد ونتائجها. لقد كانت شهاداتهم تحلق عاليًا مع المناطيد.

كذلك كنا نحتاج إلى طقس هادئ؛ فالرياح شديدة في طبقة الستراتوسفير، تهب من الشرق إلى الغرب بسرعة تبلغ ١٠٠ ميل في الساعة تقريبًا على مدار ستة أشهر من العام، ومن الغرب إلى الشرق في النصف الآخر من العام. هذه الرياح تعكس اتجاهها مرتين في العام الواحد، ونطلق على ذلك تحول الاتجاه. وبينما كانت الرياح تغير اتجاهها، تنخفض سرعة الرياح البالغة ١٤٥,٠٠٠ قدم إلى أقل درجة، مما كان يتيح لنا إجراء عمليات الرصد لساعات طويلة. ومن ثم، كان يتعين علينا الوجود في مكان يمكننا منه قياس سرعة تلك الرياح، وإطلاق المناطيد خلال الوقت الذي تعكس فيه اتجاهها. فكنا نتحقق من سرعة الرياح كل يوم تقريبًا بالاستعانة بمناطيد الطقس التي كنا نتعقبها بالرادار. وفي أغلب الأحيان، كانت تلك المناطيد تصل إلى ارتفاع ١٢٥,٠٠٠ قدم، حوالي ٢٤ ميلًا، قبل أن تنفجر. وتوقع الطقس لا يشبه دفع محامل الكرات عبر مسار في عرض عملي في المعمل. فالطقس أكثر تعقيدًا، لا يمكن توقعه

بسهولة، ومع ذلك، كان كل ما نقوم به يعتمد على دقة توقعاتنا.

لم يكن الأمر يقتصر على ذلك. فبين ارتفاعَي ٣٠,٠٠٠ قدم و٦٠,٠٠٠ من الغلاف الجوي، يوجد ما يُعرف بمنطقة التروبوبوز، التي يكون الجو فيها قارص البرودة، سالب ٥٠ درجة سيلزيوس (-٥٨ درجة فهرنهايت) — هنالك كانت المناطيد تصير بالغة الهشاشة. أيضًا، كانت هناك تيارات رياح نفاثة تصطدم بالمناطيد، مما كان من الممكن أن يتسبب في انفجارها. كثير من التفاصيل كان من الممكن ألا تسير على ما يرام. فذات مرة انفجر منطادي ثم غرق في البحر، وكانت تلك نهاية التلسكوب؛ ثم وجدتُ حمولته بعد تسعة أشهر على أحد شواطئ نيوزيلندا. وبمعجزة ما استطعنا بمساعدة شركة كوداك استرجاع البيانات التي كانت مسجلة على فيلم مثبت على متن المنطاد.

وبرغم من تكرار تجهيزاتنا لعمليات الإطلاق تلك، كنتُ دائمًا ما أقول بالرغم من استعداداتنا الكاملة، فإننا لا نزال في حاجة إلى قليلٍ من الحظ، وكثير منه أحيانًا. كنا نجلب معداتنا إلى تلك المحطة النائية، ثم نجري اختبارات للتلسكوب، ونضبط المعدات، ونتأكد من أن كل شيء يعمل بدقة. بعد ذلك، كنا نشرع في تجهيزات ربط التلسكوب في المظلة، التي ستُربَط أخيرًا في المنطاد. كنا نستغرق حوالي ثلاثة أسابيع للقيام بجميع الاختبارات في موقع إطلاق المنطاد والتجهز تمامًا لعملية الإطلاق، وعندئذٍ ربما لا يكون الطقس مناسبًا للإطلاق. حينها، لم يكن بأيدينا سوى الانتظار ونحن على أهبة الاستعداد. ومن حسن الحظ أن مدينة أليس سبرينجز، تلك البلدة الصحراوية الرائعة الواقعة في قلب أستراليا، كانت خلابة. كنا نشعر وكأننا في منتصف اللامكان، إلا أن السماء كانت صافية، وتلك الساعات الأولى من الصباح حين كنا نحاول الإطلاق كانت مذهلة، حيث تكون سماء الليل قد تحولت إلى ذلك اللون الأزرق الداكن الذي يسبق الفجر، ومع شروق الشمس، تصطبغ السماء والصحراء بالكامل بألوان وردية وبرتقالية زاهية.

وبمجرد أن نكون على أهبة الاستعداد للإطلاق، لا بد ألا تتعدى سرعة الرياح ثلاثة أميال في الساعة في اتجاه ثابت على مدار ثلاث أو أربع ساعات، وهي الفترة الزمنية اللازمة لإقلاع المنطاد (إذ كان نفخ المنطاد وحده يستغرق ساعتين). لذلك كنا غالبًا ما نطلق المناطيد في وقت الفجر، حيث تكون الرياح عند أدنى حدٍّ لها. لكن كان احتمال خطأ توقعاتنا قائمًا، وقتها لم يكن أمامنا سوى الانتظار لساعات وساعات إلى أن يصبح الطقس مواتيًا للإطلاق.

ذات مرة كنا في خضم عملية الإطلاق في ميلدورا - ولم نكن قد بدأنا نفخ المنطاد بعد - حين هبت الرياح، على عكس توقعات الأرصاد الجوية. فتمزق المنطاد، لكن التلسكوب لم يصبه سوء لحسن الحظ. وهكذا، كل التجهيزات التي أجريناها، بالإضافة إلى ٢٠٠,٠٠٠ دولار ضاعت هباءً في بضع ثوانٍ. لقد كان وقع ذلك مؤلمًا إلى أقصى درجة. لكن كل ما أمكننا القيام به هو انتظار تحسن الطقس، ثم إعادة الكرة بالاستعانة بالمنطاد الاحتياطي.

سَيُلازمك الإخفاق دائمًا. ففي آخر حملة استكشافية لي في آليس سبرينجز، فقدنا منطادَين على التوالي خلال عملية الإطلاق بسبب ارتكاب فريق الإطلاق بعض الأخطاء الجسيمة. وقد باءت الحملة برمتها بالفشل، إلا أن التلسكوب لم يصب بسوء، على الأقل فهو لم يغادر الأرض على الإطلاق. وفي آخر حملة استكشافية لي على الإطلاق في عام ١٩٨٠ في فلسطين بولاية تكساس، نجحتْ رحلة المنطاد التي استغرقتْ ثماني ساعات، لكن عند إنهائنا بأمر عبر اللاسلكي، فقدنا التلسكوب لأن المظلة لم تنفتح.

وحتى اليوم، نجاح إطلاق المناطيد ليس مضمونًا. ففي محاولة أجرتها وكالة ناسا لإطلاق منطاد من آليس سبرينجز في أبريل من عام ٢٠١٠، وقع خطأ ما أدى إلى سقوط المنطاد أثناء الإقلاع، مؤديًا بدوره إلى هلاك معدات بملايين الدولارات وإصابة المراقبين تقريبًا. يمكنك الاطلاع على الخبر من الرابط التالي: www.physorg.com/news191742850.html.

على مر السنوات، أطلقتُ حوالي عشرين منطادًا؛ خمسة فقط من تلك المناطيد أخفقتْ خلال عملية الإطلاق أو لم ترتفع (ربما كان الهيليوم يتسرب منها). وكان ذلك يُعتبر معدل نجاح معقول (٧٥ في المائة). وستجد في الملحق صورة لعملية نفخ منطاد بالهيليوم وصورة أخرى لإطلاق المنطاد.

قبل شهور من التوجه إلى موقع الإطلاق، كنا نجري اختبارًا للحمولة في شركة في ويلمنجتون في ماساتشوستس. وضعنا التلسكوب في حجرة فراغية ثم قللنا الضغط إلى نفس الدرجة التي سيكون عليها عاليًا في الغلاف الجوي، ما يضاهي ثلاثة أجزاء من ألف من الهواء. ثم عرضناه لهواء بارد يصل إلى سالب ٥٠ درجة على مقياس سيلزيوس (-٥٨ درجة فهرنهايت)، ومن ثم أدرناه - بتشغيل جميع كواشف الأشعة السينية، ثم مراقبة الأشعة السينية المنبعثة من مصدر مشع لعشر ثواني كل عشرين

دقيقة، وذلك على مدار أربع وعشرين ساعة متصلة. وكانت تلسكوبات بعضٍ من منافسينا - فقد كنا نشعر أن كل الفرق الأخرى التي تقوم بنفس عملنا فرقٌ منافسة لنا - تخفق في هذا الاختبار أحيانًا؛ نظرًا لأن بطارياتها تفقد الطاقة في درجات الحرارة المنخفضة، أو تتوقف عن العمل تمامًا. لكن هذا لم يحدث معنا قط؛ لأننا كنا نختبر بطارياتنا بدقة. فكنا إذا رأينا خلال فترة الاختبار أن البطاريات ستفقد الطاقة، نعرف كيف نسخنها إذا اقتضى الأمر لحفظ طاقة البطارية.

أو خذ على سبيل المثال مشكلة التفريغ الهالي - التي تنشأ في خطوط الجهد العالي؛ حيث تعمل بعضٌ من معداتنا بأسلاك الجهد العالي، والهواء الرقيق يُشكل بيئة مثالية لتطاير الشرر من الأسلاك إلى الهواء الطلق. هل تذكر صوت الأزيز المحيط بخطوط النقل التي سبق أن ذكرتها في الفصل السابع؟ هذه هي ظاهرة التفريغ الهالي. وأي عالِم فيزياء تجريبي يعتمد في عمله على خطوط الجهد العالي يعلم أنه قد يتعرض لمشكلة التفريغ الهالي. في محاضراتي أعرض على الطلاب أمثلة لظاهرة التفريغ الهالي؛ فهناك تكون هذه الظاهرة ممتعة؛ أما على ارتفاع ١٤٥,٠٠٠ قدم، فإنها كارثة.

فبعبارة بسيطة، ستبدأ المعدات في إصدار أصوات فرقعة، مما يتسبب في ضوضاء إلكترونات رهيبة ستحول دون التقاط فوتونات الأشعة السينية. يا لها من كارثة كبرى! ومن ثم، مجمل القول: لن تحصل على أي بيانات مفيدة على الإطلاق من الرحلة. فكان حل هذه الإشكالية هو تغطية كل سلوك الجهد العالي لمعداتنا بمطاط السيليكون. وقد قام آخرون بالإجراء ذاته، ومع ذلك تعرضتْ معداتهم لمشكلة التفريغ الهالي. لقد كانت اختباراتنا واستعداداتنا تؤتي ثمارها؛ إذ لم نتعرض أبدًا لمشكلة التفريغ الهالي. وتلك مشكلة من عشرات المشاكل الهندسية الدقيقة التي ينطوي عليها بناء تلك التلسكوبات المعقدة - ولذلك يستغرق بناؤها وقتًا طويلًا، ويستلزم تكاليف باهظة.

إذن، كيف نرصد الأشعة السينية ما إن يحلق التلسكوب عاليًا في الغلاف الجوي؟ إجابة هذا السؤال ليست بالبسيطة، لذا أرجو منك أن تتحمل معي. بدايةً، كنا نستعين بنوع خاص من الكواشف (بلورات يوديد الصوديوم)، وليس العدادات التناسبية (المملوءة بالغاز) التي تُستخدم في حالة الصواريخ، وإنما كواشف قادرة على رصد الأشعة السينية التي تربو طاقة فوتوناتها على ١٥ ألف إلكترون فولت. فعند اختراق فوتون الأشعة السينية أحد تلك البلورات، فإنه قد يُخرج أحد الإلكترونات عن مداره، ناقلًا له طاقة الأشعة السينية (وهذا ما يُطلق عليه الامتصاص الكهروفوتوني). فينتج هذا الإلكترون

بدوره خطًّا من الأيونات في البلورة قبل أن يتوقف. وعند تحييد تلك الأيونات، تطلق طاقة في شكل ضوءٍ مرئي، ومن ثم تنتج ومضة من الضوء — لقد تحولت طاقة فوتون الأشعة السينية إلى ومضة ضوء. وكلما زادت طاقة الأشعة السينية، كانت ومضات الضوء أشد. وكنا نستعين بمضخمات ضوئية لرصد ومضات الضوء وتحويلها إلى نبضات كهربية، وكلما زاد سطوع وميض الضوء، زاد الجهد الكهربائي للنبضة.

بعد ذلك، نضخم تلك النبضات ونرسلها إلى كاشف مُميِّز، يعمل على قياس جهد النبضات الكهربية ويصنفها تبعًا لحجمها — وهو ما يدل على مستويات طاقة الأشعة السينية. وفي الأيام الأولى، سجلنا أشعة سينية على خمسة مستويات طاقة مختلفة.

وهكذا يصير لدينا سجل بالمشاهدات المرصودة بعد رحلة البالون. في البداية، كنا نسجل تلك المشاهدات على لوحٍ، بمستوى الطاقة والوقت الذي رصدت فيه. وكنا نوصل الكاشف المميِّز بأسلاك لينقل تلك النبضات المصنفة إلى صمامات ثنائية باعثة للضوء، والتي كانت تُشكِّل نمطًا من الأضواء الوامضة على مستويات الطاقة الخمسة تلك؛ بعد ذلك، كنا نصور تلك الأضواء الوامضة بكاميرا فوتوغرافية مضبوطة على وضع التصوير التتابعي.

وفي حالة وجود إضاءة، كان ذلك سيتسبب في ظهور نمطٍ على شريط التصوير الفوتوغرافي؛ ومن ثم، كان شريط التصوير الضوئي سيبدو كسلسلة من الشرطات والخطوط، والخطوط والشرطات. في ذلك الوقت في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، كنا نقرأ الفيلم بالاستعانة بقارئ خاص، صممه جورج كلارك، كان يحول الخطوط والشرطات إلى شريط مثقب؛ شريط ورقي مثقَّب؛ ومن ثم، كنا نقرأ الشريط المثقب باستخدام ثنائيات حساسة للضوء ونسجل البيانات على شريط مغناطيسي؛ وكنا قد كتبنا برنامج على بطاقات حاسوبية بلغة فورتران (أعلم أن ذلك يبدو من عصور ما قبل التاريخ)، فكنا نستعين به لقراءة الشريط المغناطيسي على ذاكرة الحاسب، وهو ما كان أخيرًا يعطينا حساب الأشعة السينية في صورة دالة زمنية مضروبة في مستويات الطاقة الخمسة المختلفة.

أعلم أن ذلك يشبه آلة روب جولدبيرج؛ لكن انظر لما كنا نحاول القيام به؛ لقد كنا نحاول قياس معدل العد (عدد الأشعة السينية لكل ثانية) ومستويات طاقة فوتونات الأشعة السينية، بالإضافة إلى موقع المصدر الذي تنبعث منه — الفوتونات التي تسافر

لآلاف السنين الضوئية، منتشرة عبر المجرة والتي تقل باستمرار بمعدل مربع المسافة التي تسافرها. وعلى عكس التلسكوبات البصرية الثابتة التي توضع على قمم الجبال، ذات أنظمة التحكم التي تجعل التلسكوب موجهًا إلى بقعة محددة لساعات طويلة، وبإمكانها العودة إلى نفس البقعة ليلة بعد أخرى؛ كان علينا أن نستغل الوقت المتاح لنا أيًّا كان (وكان غالبًا مرة في العام) — والتي لم تكن تقدر إلا ببضع ساعات — بينما كانت المناطيد الهشة تحمل التلسكوب الذي نستعين به والذي كان يزن طنًّا على ارتفاع ١٤٥,٠٠٠ قدم فوق سطح الأرض.

أثناء تحليق البالون، كنت أتتبعه بطائرة صغيرة، وعادةً ما كنت أحرص على أن يكون تحت ناظري (خلال أوقات النهار، وليس في الليل)، محلقًا على ارتفاع يتراوح ما بين ٥٠٠٠ إلى ١٠٠٠٠ قدم. يمكنك تصور الحالة التي يسببها قضاء ساعات طويلة في كل مرة في هذا الوضع. ورغم أنني لست رجلًا ضعيف البنية، كان من الطبيعي جدًّا أن أصاب بالإعياء في تلك الطائرات الصغيرة ذات المقاعد الأربعة، محلقًا لثماني أو عشر أو اثنتي عشرة ساعة في كل مرة. أضف إلى ذلك أنني كنت أشعر بالتوتر طوال الفترة التي يكون فيها المنطاد محلقًا في السماء؛ إذ لا يمكنك أن تلتقط أنفاسك مسترخيًا إلا بعد حصولك على البيانات بين يديك.

كانت المناطيد هائلة الحجم لدرجة أنك تستطيع رؤيتها بوضوح وهي على ارتفاع ٣٠ ميلًا في السماء عند بزوغ الشمس. وكان الرادار يساعدنا على تتبعها بداية من انطلاقها من محطة الإطلاق وحتى يحول انبعاج الكرة الأرضية دون التمكن من رؤيتها. ولهذا السبب كنا نزود المنطاد بجهاز إرسال لاسلكي، وفي الليل كنا نعتمد في تتبع المنطاد على محطة إرسال لاسلكية فقط. كانت المناطيد تطير لمئات الأميال، وعندما تكون محلقة في الأعالي كنا نسمع تقارير إخبارية بكل الأشكال عن رصد أجسام طائرة مجهولة، وذلك بالرغم من الجهود التي كنا نبذلها لأجل نشر مقالات عن عملية الإطلاق في الصحف المحلية. ومع أن الأمر كان مثيرًا للضحك، إلا أنه كان معقولًا جدًّا. فماذا قد يعتقد الناس عدا ذلك حين يلمحون جسمًا غامضًا في السماء لا يمكن تحديد حجمه أو ارتفاعه؟ بالنسبة إلى هؤلاء كان المنطاد حقًّا جسمًا طائرًا مجهولًا. في ملحق الصور، يمكنك مشاهدة صورة التقطها تلسكوب لمنطاد يحلق على ارتفاع ١٤٥,٠٠٠ قدم.

وحتى بعد كل ذلك التخطيط وتوقعات الأرصاد، وحتى عند ترصد فترة انعكاس اتجاه الرياح، قد يتبين لنا أنه لا يمكننا الوثوق في سلوكيات الرياح على ارتفاع ١٤٥,٠٠٠ قدم. فذات مرة ونحن في أستراليا، توقعنا أن يتجه المنطاد من آليس سبرينجز شمالًا، لكنه أقلع مباشرةً في اتجاه الجنوب. فتتبعناه بنظرنا حتى غروب الشمس، ثم ظللنا على اتصال معه عبر اللاسلكي خلال ساعات الليل. وببزوغ ضوء النهار، كان المنطاد قد اقترب من ملبورن، ولم يكن مسموحًا لنا دخول المجال الجوي بين سيدني وملبورن. ورغم أنه ما من أحد كان سيُسقطه، فإنه كان علينا أن نفعل شيئًا. لذلك ما إن اقترب منطادنا الجامح من الوصول إلى مجال جوي مُحرَّم، أعطينا على مضض أمرًا لاسلكيًّا بتحرير الحمولة. وكان فصل التلسكوب سيؤدي إلى تمزيق المنطاد، ذلك لأنه لم يكن ليتحمل موجة الصدمة الناتجة عن تحرير حمولته فجأة. وهكذا يبدأ التلسكوب في السقوط، ثم تنفتح المظلة المثبت بها (باستثناء ما حدث عام ١٩٨٠) هابطةً ببطء، معيدةً التلسكوب بأمان إلى سطح الأرض. كذلك كانت أجزاء ضخمة من المنطاد الممزق تسقط على الأرض، وعادةً ما تنتشر على مساحة فدان أو أكثر. وكان ذلك يحدث آجلًا أم عاجلًا في كل رحلة منطاد، ودائمًا ما تكون لحظةً مؤسفة (وإن كان لا مفر منها)، لأننا كنا ننهى المهمة بذلك، قاطعين تدفق البيانات. لقد كنا نريد أن يظل التلسكوب محلقًا في الأعلى لأطول فترة ممكنة؛ فقد كنا في تلك الأيام في أشد حالات التعطش للمعلومات. تلك هي الفكرة برمتها.

## استعادة التلسكوب من وسط الصحراء: جاك صائد حيوانات الكنغر

كنا نبطن قاعدة التلسكوب ببطانة من الورق المقوى لحمايته من الاصطدام، وذلك لتأمين هبوطه بسلام. في أوقات النهار، كنا نتابع المنطاد بنظرنا (حيث كان يختفي عن الأنظار بمجرد إصدار أمر فصل التلسكوب)، وسرعان ما كنا نرى المظلة، وكنا نبذل قصارى جهدنا لتتبع هبوطها إلى الأرض، بحيث نطوف حولها بطائرتنا الصغيرة. وما إن تهبط حتى نحدد موقعها بأقصى دقةٍ ممكنة على خريطة تفصيلية دقيقة.

وهنا كان يبدأ الجزء الغريب من الرحلة؛ إذ كنا نحن هنا داخل طائرتنا، وحمولة منطادنا التي تضم البيانات، ثمار سنوات من العمل، مسجيةً على الأرض في متناولنا،

لكننا لم نكن نستطيع الهبوط في وسط الصحراء والحصول عليها. ومن ثم، كان ما باستطاعتنا القيام به أن نلفت انتباه السكان المحليين، وكنا نفعل ذلك عادة من خلال التحليق بالطائرة على ارتفاع قريب من منزل. وكانت المسافة بين المنازل القائمة في الصحراء شاسعةً؛ وكان السكان يعلمون معنى تحليق الطائرات على ارتفاعٍ منخفض، وكانوا عادةً ما يخرجون من المنزل ويتواصلون معنا بالتلويح. بعد ذلك، كنا نهبط على مهبط (وهو يختلف تمامًا عن المطار) في الصحراء وننتظر حضورهم.

وفي إحدى رحلات الطيران كانت المنازل قليلة في المنطقة، حتى إنه كان علينا البحث لوقت أطول قليلًا. وأخيرًا عثرنا على رجل يُدعى جاك، يعيش في الصحراء على مسافة ٥٠ ميلًا من أقرب جارٍ له. كان الرجل ثملًا ومخبولًا تمامًا، لكننا لم ندرك ذلك من الوهلة الأولى بالطبع. لكننا تواصلنا معه من الجو، ثم حلقنا بالطائرة إلى المهبط وانتظرنا هناك؛ وبعد انتظار ١٥ ساعة، ظهر الرجل بشاحنته، البالية المظهر بلا زجاج أمامي، كل ما هنالك سقفٌ على مقصورتها ومساحةٌ مفتوحة في الخلف. كان جاك يهوى قطع الصحراء بسرعة ٦٠ ميل في الساعة، لمطاردة حيوانات الكنغر ورميها بالرصاص.

ركبتُ مع جاك في الشاحنة أنا وأحد طلابي في الدراسات العليا، بينما كانت طائرة التتبع توجهنا إلى موقع الحمولة. وكان علينا أن نمر بالشاحنة عبر أرضٍ غير معلومة التضاريس. ظللنا على تواصل مع الطائرة عبر اللاسلكي؛ وقد حالفنا الحظ بالعثور على جاك؛ وذلك لأنه كان يدرك، من خلال صيد حيوانات الكنغر، أين يمكنه قيادة سيارته.

كما أنه كان يلعب تلك اللعبة التي أبغضها، لكننا كنا نعتمد عليه، ومن ثم، لم يكن بيدي فعل الكثير. فقد قدم لي عرضًا عمليًا لمرة واحدة؛ حيث وضع كلبه على سقف الشاحنة، وزاد سرعتها حتى ٦٠ ميلًا في الساعة، ثم ضغط بقدمه على المكابح فجأة ليطير الكلب فجأة عبر الهواء ساقطًا على الأرض؛ يا له من كلبٍ مسكين! ودخل جاك في نوبة ضحك منهيًا مزحته بقوله: «لا يمكنك أن تُعلم كلبًا عجوزًا خدعةً جديدة».

وقد استغرقنا نصف يوم في الوصول إلى الحمولة، التي كانت تحرسها إغوانا عملاقة يبلغ طولها ستة أقدام. ولأصدقك القول، ارتعدتُ خوفًا منها. لكني لم أشأ أن أظهر ذلك، لذا قلتُ لطالبي: «لا بأس. هذه الحيوانات غير مؤذية؛ اذهب أنت أولًا». وقد فعل، وتبين فعلًا أن تلك الحيوانات غير مؤذية، فعلى مدار الساعات الأربع التي استغرقناها في استعادة حمولة المنطاد وتحميلها على شاحنة جاك، لم تحرك تلك السحلية ساكنًا.

## أستاذ المناطيد

عدنا بعد ذلك إلى آليس سبرينجز، وقد تصدرنا الصفحة الأولى لصحيفة «سنترااليان أدفوكيت» مع صورة كبيرة لإطلاق المنطاد، تحت عنوان: «إطلاق مسبار فضائي»؛ وقد تحدث المقال عن عودة أستاذ المناطيد. لقد تحولتُ إلى شخصية محلية مشهورة، وألقيتُ محاضرات في نادي الروتاري ولطلاب المدرسة الثانوية، بل إنني ألقيتُ مرةً محاضرة في مطعم متخصص في أطباق اللحوم، والذي قدم لطاقمي عشاءً كأجرٍ لي. إلا أن كل ما كنا نريده أن نعيد شريط التصوير إلى أرض الوطن بأسرع وقت ممكن، ومن ثم إظهاره وتحليله، لنرى ما وجدنا. وهكذا، بعد بضعة أيام قضيناها في إزالة الفوضى الناتجة عن عملنا، كنا في طريق العودة. إذن، بات واضحًا لك مدى المشقة التي ينطوي عليها ذلك النوع من البحث. لقد كنتُ أبتعد عن بيتي حوالي شهرين (في كل عام تقريبًا). وما من شك أنني لاقيت مشاكل كثيرة في زواجي الأول بسبب ذلك.

في الوقت ذاته، وعلى الرغم من كل ذلك التوتر والقلق، كانت تلك التجارب مثيرةً وممتعة إلى أقصى ما يمكن تخيله، هذا علاوة على أنني كنتُ أتيه فخرًا بطلاب الدراسات العليا، وأبرزهم جيف ماكلينتوك وجورج ريكر. يعمل جيف الآن عالَم فيزياء فلكية أول في مركز هارفارد سميثونيان للفيزياء الفلكية، وقد نال جائزة روسي (خمن باسم من سُميت) لعام ٢٠٠٩ عن عمله في قياس كتل الثقوب السوداء في ثنائيات الأشعة السينية (وسنتناولها باستفاضة في الفصل الثالث عشر). أما جورج، فيسعدني أن أقول إنه ما زال يعمل في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. وهو بارع الذكاء في تصميم أدوات جديدة مبتكرة وبنائها. وأكثر إنجاز يشتهر به هو أبحاثه في انفجارات الأشعة السينية.

لقد كان إطلاق المناطيد أمرًا له متعته الخاصة؛ فكانت متعته تتجسد في الاستيقاظ في الرابعة فجرًا، والذهاب إلى المطار، وفي رؤية شروق الشمس وانتفاخ المنطاد المهيب — وتلك الصحراء الخلابة التي تحتضن السماء، ثم رؤية النجوم أولًا، وبعدها طلوع الشمس. بعد ذلك، بينما يحرر المنطاد نفسه محلقًا في السماء، تنتشر الألوان الفضية والذهبية في سماء الفجر. وكما تعلم، هناك الكثير من الأمور التي ينبغي أن تسير بدقة، ومن ثم، تظل أعصابك مشدودة طوال الوقت. يا إلهي. وياالسعادتك إذا سارت عملية الإطلاق كما ينبغي، بحيث تسير كل تفصيلة فيها من مئات التفاصيل

(والتي يمكن أن تتسبب كل منها في كارثة) على النحو الصحيح!

لقد كنا على المحك في تلك الأيام. لك أن تتصور أن نجاحنا كان يعتمد جزئيًا على كرم صائد الكنغر الأسترالي الثمل.

## انفجار الأشعة السينية المنبعثة من Sco X-1

ما من اكتشافٍ توصلنا إليه في تلك السنوات أروع في رأيي من اكتشافنا المذهل أن بعض مصادر الأشعة السينية تَخرُج منها ألسنةُ لهب مذهلة مع كمية الأشعة السينية المنبعثة منها. كانت فكرة تباين شدة الأشعة السينية المنبعثةِ من بعض المصادر حاضرةً في المشهد منذ منتصف ستينيات القرن العشرين. وقد قارن فيليب فيشر وفريقه من شركة لوكهيد ميسايلز آند سبيس كمباني، شدةَ الأشعة السينية لسبعة مصادر للأشعة السينية رُصدتْ خلال الرحلة الصاروخية التي أطلقوها في الأول من أكتوبر من عام ١٩٦٤، بنتائج رحلة فريق فريدمان الصاروخية في السادس عشر من يونيو من عام ١٩٦٤. وقد وجدوا أن شدة الأشعة السينية (التي نطلق عليها دفق الأشعة السينية) المنبعثة من المصدر Cyg XR-1 (الذي يُطلق عليها Cyg X-1) كانت أدنى خمس مرات في الأول من أكتوبر منها في الرابع عشر من يونيو. لكن لم يكن من الواضح ما إذا كانت هذه الملاحظة تدل على تباين حقيقي أم لا. وقد أشار فريق فيشر إلى أن الكواشف التي استخدمها فريق فريدمان أكثر حساسيةً بكثير للأشعة السينية منخفضة الطاقة من الكواشف التي استخدموها، وأن هذا قد يفسر الاختلاف.

إلا أن المسألة قد حُلَّتْ في عام ١٩٦٧، حين قارن فريق فريدمان دفق الأشعة السينية المنبعث من ثلاثين مصدرًا على مدار العامين السابقين، وقطع بأن شدة الأشعة السينية قد تتباين في كثيرٍ من المصادر. وكان تباين شدة الأشعة السينية في المصدر Cyg X-1 هو الأعجب.

في عام ١٩٦٧، أطلق فريق كين ماكراكن في أستراليا صاروخًا، واكتشف مصدرًا للأشعة السينية يضاهي Sco X-1 سطوعًا (أكثر مصادر الأشعة السينية سطوعًا على الإطلاق)، والذي لم يظهر للكواشف التي راقبت المنطقة ذاتها قبل عام ونصف من ذلك الوقت. وبعد عامين من الإعلان عن اكتشاف مستعر الأشعة السينية هذا (أو X-ray nova) كما أُطلق عليه خلال اجتماع الربيع للجمعية الفيزيائية الأمريكية في

واشنطن العاصمة، كنت في مكالمة هاتفية مع أحد أبرز رواد علمِ فلكِ الأشعة السينية، وقال لي: «هل تصدق هذا الهراء؟».

لقد انخفضتْ شدة الأشعة السينية المنبعثة منه في غضون أسابيع قليلة بمُعامل ٣، وبعد خمسة أشهر انخفضتْ شدته مرة أخرى بمعامل ٥٠. واليوم، نطلق على هذه المصادر الاسم الشائع «مصادر الأشعة السينية العابرة».

وقد حدد فريق ماكراكن موقع ذلك المصدر في كوكبة الصليب الجنوبي. لقد كانوا في حالة من الإثارة البالغة إزاء ذلك حتى إن الأمر اتخذ طابعًا عاطفيًا لديهم؛ وذلك لأن تلك الكوكبة مصورة على العلم الأسترالي. وحين اتضح أن موقع المصدر لم يكن كوكبة الصليب الجنوبي، وإنما في كوكبة قنطورس، وتغير الاسم من Crux X-1 إلى Cen X-2، أُصيب الأستراليون بخيبة أمل بالغة. إننا معشر العلماء يمكن أن نستشعر عاطفةً كبيرة قوية إزاء اكتشافاتنا.

وفي الخامس عشر من أكتوبر من عام ١٩٦٧، راقبنا أنا وجورج كلارك Sco X-1 في رحلة منطاد انطلقتْ من ميلدورا، في أستراليا، وقد توصلنا إلى اكتشاف مهم. لم يكن الاكتشاف كأي شيء يمكن أن تراه في صور مركز ناسا الفضائي في هيوستن، التي يهلل فيها العاملون هناك ويحتضن بعضهم بعضًا حين يحققون نجاحًا. إنهم يرون الأشياء في وقت حدوثها. فخلال وقت المراقبة لا يكون لدينا وسيلة للاطلاع على البيانات؛ كنا فقط نأمل في أن يظل المنطاد محلقًا وأن تعمل معداتنا على ما يرام. وبالطبع، لم نكن نكف عن القلق حيال الكيفية التي سنستعيد بها التلسكوب والبيانات. لقد كان ذلك محور توتراتنا وإثارتنا.

حللنا بياناتنا بعد شهور، في معهد ماساتشوستس. كنتُ في غرفة الحاسب ذات ليلة، وكان تيري ثورسوس يساعدني. وفي تلك الأيام، كانت أجهزة الحاسب في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا عملاقة. وكان لا بد أن تكون الغرف مكيفة الهواء؛ لأن أجهزة الكمبيوتر تولِّد حرارة عالية. وأذكر أن الساعة كانت حوالي الحادية عشرة؛ ذلك لأنك إذا أردت تشغيل بعض البرمجيات على الحاسب، فإن المساء هو أفضل وقت للعمل بهدوء وسرية في بعض الوظائف. وفي تلك الأيام، كنا دائمًا في حاجة إلى مسؤول تشغيل الحاسوب لتشغيل البرامج. فأخذتُ دوري في الصف وانتظرتُ بصبر.

وهنا كنتُ أنظر إلى البيانات التي جمعناها من رحلة المنطاد، حين رأيتُ فجأةً زيادة ضخمة في دفق الأشعة السينية المنبعثة من Sco X-1. فهناك على النسخة

المطبوعة زاد دفق الأشعة السينية بمُعامل أربعة في غضون عشر دقائق تقريبًا، وثبتْ عند ذلك الارتفاع لحوالي ثلاثين دقيقة، ثم راح ينخفض. لقد رصدنا توهج أشعةٍ سينية من المصدر Sco X-1 وكان توهجًا مهولًا. وهذا الأمر لم يكن رُصِد من قبل. في الأوقات العادية، كنتَ ستقول لنفسك شيئًا من قبيل: «هل هذا التوهج شيء يمكن تفسيره بطريقة مختلفة؟» هل يمكن أن يكون ناتجًا عن عطب في أحد الكواشف؟». في تلك الحالة، لم يراودني أي شك؛ فقد كنتُ ملمًّا تمامًا بحالة الأدوات، وكنتُ واثقًا في كل تجهيزاتنا واختباراتنا، كما أننا كنا نتفحص الكاشف باستمرار طوال الرحلة، ونقيس طيف الأشعة السينية من مصدر مشع كل عشرين دقيقة بهدف الضبط — وكانت الأداة تعمل جيدًا. كنتُ واثقًا في البيانات تمام الثقة. وبالنظر إلى النسخة المطبوعة، كان بإمكاني أن أرى أن دفق الأشعة السينية قد ارتفع وانخفض؛ ومن بين كل المصادر التي راقبناها في تلك الرحلة التي استغرقتْ عشر ساعات، لم يحدث هذا الارتفاع والانخفاض في دفق الأشعة السينية إلا في مصدرٍ واحد، وهذا المصدر هو Sco X-1. فهل كان ذلك حقيقيًّا!

في الصباح التالي، عرضتُ النتائج على جورج كلارك، فصُدم من هول المفاجأة. فكلانا كان ملمًّا جيدًا بذلك المجال؛ وكلانا كان في سعادة غامرة؛ إذ لم يسبق لأحدٍ أن لاحظ تغيرًا في دفق الأشعة السينية في مقياس زمني يُقدر بعشر دقائق. فدفق الأشعة السينية المنبعثة من Cen X-2 قلَّ بمُعامل ثلاثة في غضون أسابيع قليلة بعد عملية الرصد الأولى، أما هنا فقد كنا أمام تباين في دفق الأشعة السينية بمُعامل أربعة خلال عشر دقائق — أي أسرع حوالي ثلاثة آلاف مرة.

كنا نعلم أن Sco X-1 يُطلق ٩٩,٩٪ من طاقته في صورة أشعة سينية، وأن شدة لمعانها تبلغ حوالي ١٠,٠٠٠ مرة من إجمالي لمعان الشمس، وحوالي ١٠ مليارات مرة من إجمالي لمعان الأشعة السينية المنبعثة من الشمس. ببساطة لم يكن من أساس فيزيائي يمكنه تفسير تغير لمعان Sco X-1 بمُعامل أربعة في مقياس زمني يُقدر بعشر دقائق. فكيف يمكنك مثلًا تفسير زيادة توهج الشمس أربعة أمثال توهجها العادي في غضون عشر دقائق؟ إن حدثًا كهذا مخيف جدًّا.

إن اكتشاف تباين وهج الأشعة السينية خلال هذا الزمن ربما يكون أهم اكتشاف تتوصل إليه رحلات المناطيد في تاريخ علم الفيزياء الفلكية. وكما ذكرتُ في هذا الفصل، اكتشفنا أيضًا مصادر للأشعة السينية لم ترصدها الصواريخ، وقد كانت

اكتشافاتٍ بالغةَ الأهمية أيضًا. إلا أن كل الاكتشافات الأخرى لم يضاهي تأثيرُها تأثيرَ اكتشاف تباين شدة الأشعة السينية المنبعثة من Sco X-1 في غضون عشر دقائق.

كانت صدمة كبيرة في ذلك الوقت ألا يصدّق علماء كثيرون هذا الاكتشاف. فحتى العلماء لديهم تكهنات راسخة يصعب تغييرها. وقد أرسل إس تشاندرسكهار، المحرر الفذ في دورية «أستروفيزيكال جورنال ليترز» مقالنا عن Sco X-1 لمُحكّم علمي، فلم يصدق المُحكّم النتائج التي توصلنا إليها على الإطلاق. ما زلتُ أذكر ذلك رغم مرور أكثر من أربعين عامًا. وقد كتب يقول: «هذا هراء لا شك في ذلك، لأننا نعلم أن مصادر الأشعة السينية القوية كتلك لا يمكن أن تغير شدتها في غضون عشر دقائق».

كان لا بد أن نقنع الدورية بالنتائج التي اكتشفناها. كما اضطر روسي للقيام بالشيء نفسه في عام ١٩٦٢. فمحرر دورية فيزيكال ريفيو ليترز، صامويل جودسميت، قبِل المقال الذي كان يؤسس لعلم الفيزياء الفلكية فقط لأجل اسم روسي، ولأنه كان على استعداد، كما كتب لاحقًا، لتحمل المسؤولية الشخصية عن محتوى البحث.

أما اليوم، نظرًا لما صار لدينا من أدوات وتلسكوبات أكثر حساسية بكثير، فصرنا نعرف أن كثيرًا من مصادر الأشعة السينية تتباين في شدة وهجها على أي مدى زمني، بمعنى أنك إذا راقبتَ مصدرًا محددًا بصورة متواصلة يومًا بيوم، فستجد أن الدفق الصادر منه يختلف يوميًا. وإذا راقبته ثانيةً بثانية، فستجد أنه يتغير كذلك. وحتى إذا كنتَ تحلل بياناتك كل ميللي ثانية، فلربما تجد تباينًا في بعض المصادر. لكن، في ذلك الوقت، كان التباين على مدى زمني يُقدر بعشر دقاق أمرًا جديدًا وغير متوقع.

وقد ألقيتُ محاضرة عن هذا الاكتشاف في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في فبراير من عام ١٩٦٨، وقد سعدتُ جدًا لدى رؤية ريكاردو جاكوني وهِرْب جورسكي بين الحضور. حينها شعرتُ وكأنني قد بلغتُ مبلغًا في هذا المجال، وأنني قد قُبلتُ بين فطاحلة هذا المجال.

وفي الفصول القليلة التالية، سأقدم لك مجموعة الألغاز التي حلها علم فلك الأشعة السينية، بالإضافة إلى بعض الألغاز التي ما زلنا نحن علماء الفيزياء الفلكية نكافح من أجل العثور على حلول لها. سنسافر إلى النجوم النيوترونية ونغوص في أعماق الثقوب السوداء. فاستعدوا للمفاجآت القادمة.

# الفصل الثاني عشر

# الكوارث الكونية والنجوم النيوترونية والثقوب السوداء

تتخذ النجوم النيوترونية موقعها في قلب تاريخ علم فلك الأشعة الكونية مباشرةً؛ وتنطوي على كثير من المتعة. فكثيرًا ما تزيد درجات حرارة سطح هذه النجوم عن مليون كلفن؛ أي أنها أسخن من سطح الشمس بحوالي مائة مرة.

اكتشف جيمس تشادويك النيوترون في عام ١٩٣٢ (الإنجاز الذي تسلم عنه جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٣٥). عقب هذا الاكتشاف الاستثنائي، الذي رأى كثير من علماء الفيزياء أنه أكمل صورة البنية الذرية، افترض كل من فالتر بادي وفريتز زفيكي أن النجوم النيوترونية تشكلتْ خلال مستعرات عظمى. وقد تبين أنهما كانا على حق. فالنجوم النيوترونية تنشأ نتيجة أحداث كارثية في المراحل الأخيرة من عمر النجوم العملاقة، وهي أحد الأحداث الأسرع والأشد عجبًا والأعنف في الكون الذي نعرفه — إنه المستعر الأعظم من النوع الثاني (الذي ينهار فيه قلب النجم).

لا يبدأ النجم النيوتروني كنجم يشبه الشمس، وإنما في صورة نجم أكبر من حجم الشمس بثماني مرات على الأقل. وفي مجرتنا، يوجد حوالي مليار نجم نيوتروني، إلا أنه قياسًا بأعداد النجوم اللانهائية المختلفة الموجودة في مجرتنا، فإن العدد مليار هذا يمكن أن يدل عن ندرة وجود تلك النجوم في مجرتنا. وشأن كثيرٍ من الأشياء في عالمنا — وفي الكون بأكمله — لا يمكن للنجوم أن «تحيا» إلا بفضل قدرتها على تحقيق توازن معقول بين القوى بالغة الشدة. يولد الاحتراق النووي في النجوم ضغطًا في قلب النجم، حيث ينتج عن التفاعلات الحرارية النووية، التي تتم في درجات حرارة تصل إلى عشرات الملايين من الدرجات على مقياس كلفن، كمياتٌ هائلة من الطاقة. فدرجة حرارة قلب الشمس تبلغ ١٥ مليون كلفن، ومعدل إنتاجها للطاقة يعادل ما تنتجه مليار قنبلة هيدروجينية في الثانية.

في حالة النجوم المستقرة، يكون هذا الضغط متوازنًا بفعل الجاذبية الناجمة عن

ضخامة كتلة النجم. فإذا لم تكن هاتان القوتان — قوة دفع الفرن النووي الحراري إلى الخارج، وقبضة الجاذبية الجاذبة إلى الداخل — متوازنتين، فلن يكون النجم مستقرًا. على سبيل المثال، نعلم أن عمر الشمس إلى الآن يبلغ حوالي خمسة ملايين عامًا وأنها من المفترض أن تعيش خمسة ملايين عامًا أخرى. وتتغير النجوم إلى حد عجيب في المراحل الأخيرة من حياتها. فعندما تستنفذ النجوم معظم الوقود النووي في قلبها، فإن كثيرًا من تلك النجوم تبدأ المراحل الأخيرة من عمرها بعرض عنيف، وينطبق هذا بنحو خاص على النجوم العملاقة. وبشكل ما، يشبه المستعر الأعظم الأبطال التراجيديين على المسرح، الذين عادةً ما ينهون حياتهم العظيمة بنوبة تطهير وجداني، أحيانًا ما تكون عنيفة وصاخبة، وتثير مزيجًا من الشفقة والخوف لدى الجمهور، حسبما يقول أرسطو.

يمثل المستعر الأعظم من النوع الثاني (حيث ينهار قلب النجم) أشد حوادث هلاك النجوم على الإطلاق، وهو أحد أكثر ظواهر الكون نشاطًا على الإطلاق. وسأحاول هنا شرحها شرحًا منصفًا. بينما يخبو لهب المواقد النووية في قلب تلك النجوم الضخمة تدريجيًّا — فما من وقود يمكن أن يبقى إلى الأبد! — ويضعف الضغط الذي تولده، تتغلب قوة الجاذبية السرمدية الشديدة للكتلة الباقية من النجم عليه.

ورغم ما تنطوي عليه عملية نفاد الوقود من قلب النجم من تعقيد، فإنها لا تخلو من الروعة. فشأن معظم النجوم، تبدأ النجوم العملاقة بحرق الهيدروجين وتخليق الهيليوم. فالنجوم تعتمد على الطاقة النووية — بالاندماج النووي وليس الانشطار؛ حيث تندمج أربع نويات (بروتونات) هيدروجين معًا مُشكلةً نواة هيليوم في درجات حرارة عالية جدًّا، مما يولّد حرارة. وحين ينفد الهيدروجين من تلك النجوم، يتقلص قلب النجم (بفعل قوة الجاذبية)، مما يرفع درجة الحرارة إلى مستويات كافية لبدء تحول الهيليوم إلى عنصر الكربون. بالنسبة للنجوم التي تزيد كتلتها عن كتلة الشمس عشر مرات، بعد انتهاء مرحلة احتراق الكربون، تبدأ مرحلة احتراق الأكسجين، ثم احتراق النيون، ثم احتراق السيليكون، حتى لا يتبقى في قلب النجم في النهاية سوى الحديد.

بعد كل دورة احتراق، يتقلص قلب النجم، وترتفع درجة حرارته، لتبدأ الدورة التالية. تقل الطاقة الناتجة عن كل دورة عن الطاقة الناتجة عن الدورة السابقة، كما يقل زمن الدورة عن الدورة السابقة. على سبيل المثال، قد تستغرق دورة احتراق الهيدروجين عشرة ملايين عام في درجة حرارة ٣٥ مليون كلفن تقريبًا، أما دورة الاحتراق الأخيرة، وهي دورة احتراق السيليكون، فقد تستغرق بضعة أيام في درجة

حرارة ثلاثة ملايين كلفن! (وهذا يتوقف على الكتلة الدقيقة للنجم). خلال كل دورة، يحرق النجم معظم نتائج الدورة السابقة (في عملية إعادة تدوير مثالية!).

وتنتهي عملية الاحتراق حين ينتج الحديد عن انصهار السيليكون، ونواة الحديد هي النواة الأكثر استقرارًا بين كل عناصر الجدول الدوري. وانصهار الحديد إلى عنصر أثقل لا يولِّد طاقة، وإنما يستلزم طاقة، وهكذا يتوقف موقد إنتاج الطاقة عند هذا الحد. وسرعان ما ينمو القلب المشكل من الحديد الآن بينما ينتج النجم مزيدًا من الحديد.

وببلوغ كتلة القلب المُشكل من عنصر الحديد ١,٤ كتلة شمسية، يكون قد بلغ حدًّا سحريًّا من نوعٍ ما، ويُطلق على هذا الحد حد تشاندراسيخار (الذي سمي تيمنًا بالعالم العظيم تشاندرا). عند هذا الحد، لا يستطيع الضغط داخل القلب نفسه الصمود أمام الضغط الشديد الناتج عن قوة الجاذبية، فينهار القلب على نفسه، مسببًا انفجار مستعر أعظم للخارج.

تخيل جيشًا جرارًا يحاصر قلعة كانت شامخةً في يومٍ ما، ثم تبدأ جدرانها الخارجية في الانهيار. (تحضرني بعض من مشاهد المعارك في سلسلة أفلام «سيد الخواتم»، حين تقتحم جيوش الأورك، التي لا حصر لها على ما يبدو، جدران إحدى القلاع في الفيلم.) ينهار قلب النجم في زمن يُقاس بالميللي ثانية، وتسقط مادته — بل تندفع بسرعات مهولة، تعادل حوالي ربع سرعة الضوء — مما يرفع درجة الحرارة داخل النجم إلى درجة لا تُصدق قد تبلغ حوالي ١٠٠ مليون كلفن، أسخن من قلب الشمس بحوالي عشرة آلاف مرة.

أما إذا كان نجمًا فرديًا أقل ضخامة من الشمس بحوالي ٢٥ مرة (لكن كتلته أكبر من كتلة الشمس بحوالي عشر مرات) فإن الانهيار يُنتج في مركزه جرمًا جديدًا تمامًا؛ إنه النجم النيوتروني. كذلك ينتهي المطاف بالنجوم الفردية التي تتراوح كتلتها ما بين ثمانية إلى عشرة أمثال كتلة الشمس إلى نجوم نيوترونية، لكن عملية التطور النووي التي تحدث في قلبها (والتي لن نتطرق إليها هنا) تختلف عن السيناريو المذكور آنفًا.

وفي ظل ارتفاع كثافة القلب المنهار على نفسه، تندمج الإلكترونات والبروتونات؛ هكذا تُلاشي الشحنةُ السالبة للإلكترون الشحنةَ الموجبة للبروتون، ليتحد الجسيمان مكونَين نيوترونًا ونيوترينو. وهكذا تختفي النويات في كتلةٍ تُعرف بالمادة النيوترونية المتحللة (أخيرًا مصطلح معقد!). أنا أحب اسم الضغط المقابل: الضغط الانحلالي

النيوتروني. فإذا زادت كتلة هذا النجم النيوتروني المحتمل لتصبح أكبر من ثلاثة كتل شمسية، وهو ما سيكون عليه الحال إذا كانت كتلة النجم الفردي (ويُطلق عليه النجم السلف) أكبر من كتلة الشمس بخمسٍ وعشرين مرة، فإن الجاذبية تتغلب حتى على الضغط الانحلالي النيوتروني؛ ويمكنك تخمين ما سيحدث بعد ذلك.

حسنًا، أظن أنك خمنت. ماذا يمكن أن ينتج عن ذلك عدا ثقب أسود؟ ذلك المكان الذي لا توجد فيه المادة بأي صورة يمكننا فهمها؛ ذلك المكان الذي، حال اقترابك منه، تشتد فيه الجاذبية لدرجة لا يستطيع معها أي إشعاع أو ضوء، أو أشعة سينية، أو أشعة جاما، أو نيوترينوات، أو أي شيء النفاذ منه. أما عملية التطور في الأنظمة النجمية الثنائية (انظر الفصل التالي) فيمكن أن تكون مختلفة جذريًّا، وذلك أن في الأنظمة الثنائية قد يزول الغلاف المحيط بالنجم العملاق في مرحلةٍ مبكرة، ومن ثم لا يمكن أن يزداد حجم قلب النجم بنفس المعدل الذي يحدث في النجم الفردي. وفي هذه الحالة، حتى النجوم التي يبلغ حجمها أربعين مرة حجم الشمس قد تُخلّف وراءها نجمًا نيوترونيًّا.

وهنا أود أن أؤكد على أن الخط الفاصل بين النجوم السلف التي تشكل النجوم النيوترونية وتلك التي تُشكِّل الثقوب السوداء ليس واضحًا؛ بل يتوقف على عدة متغيرات غير كتلة النجم السلف وحدها؛ على سبيل المثال، يشكل الدوران النجمي عاملًا متغيرًا مهمًّا أيضًا.

لكن الثقوب السوداء موجودة فعلًا، وليستْ من ابتداع خيال العلماء المضطربين ومؤلفي الخيال العلمي، وهي آسرة إلى حدٍّ لا يُصدق. بالإضافة إلى ذلك، تُشكل الثقوب السوداء جزءًا محوريًّا من عالم الأشعة السينية، وأعد بأنني سأعود إلى الحديث عنها لاحقًا. أما الآن، فدعوني أقول إن الثقوب السوداء حقيقية، بل وربما تشكل نواة كل مجرة عملاقة إلى حد منطقي في هذا الكون.

دعونا الآن نرجع إلى انهيار قلب النجم. ما إن يتشكل النجم النيوتروني — تذكر أننا نتحدث هنا عن مدى زمني يُقدر بالميللي ثانية — حتى ترتد عنه المادة النجمية التي تكون مستمرة في محاولة الإسراع إلى داخله، مما يُشكل موجة صدمة باتجاه الخارج، والتي ستتوقف في النهاية بسبب استنزاف الطاقة بفعل عملية انشطار نويات الحديد المتبقية. (تذكر أن الطاقة تتحرر عند اندماج عناصر خفيفة مُشكلة نواة الحديد، ومن ثم فإن انشطار نواة الحديد يستهلك طاقة). وعند اندماج الإلكترونات والبروتونات

خلال عملية انهيار قلب النجوم لتصبح نيوترونات، تنتج النيوترينوات كذلك خلال هذه العملية. بالإضافة إلى ذلك، في درجة حرارة القلب شديدة السخونة التي تصل إلى حوالي ١٠٠ مليار كلفن، تنتج ما يُعرف بالنيوترينوات الحرارية. تحمل النيوترينوات حوالي ٩٩ في المائة من مجموع الطاقة المتحررة من انهيار قلب النجم (وهو ما يعادل $^{٦١٠}$ جول). أما نسبة الواحد في المائة المتبقية من الطاقة (والتي تعادل $^{٤٤١٠}$ جول) فغالبًا ما تكون في صورة طاقة حركية للمادة النجمية المقذوفة.

تَنفُذ النيوترينوات عديمة الكتلة ومحايدة الشحنة الكهربية عبر جميع أنواع المادة تقريبًا، لذا ينفُذ معظمها من قلبِ النجم. ومع ذلك، نظرًا للكثافة العالية جدًّا للمادة المحيطة، تنقل النيوترينوات واحدًا في المائة من طاقتها إلى المادة المحيطة، التي تُلفَظ بعيدًا فيما بعد بسرعات تصل إلى ٢٠,٠٠٠ كيلومتر في الثانية. ويُحتمل أن نظل نرى بعضًا من هذه المادة لآلاف السنين بعد الانفجار — نطلق على ذلك بقايا المستعر الأعظم (مثل سديم السرطان).

إن انفجار المستعر الأعظم مبهر؛ إذ يبلغ لمعانه الضوئي عند أقصى سطوع حوالي $^{٣٥١٠}$ جول في الثانية. وهذا يعادل لمعان الشمس ٣٠٠ مليون مرة، ومن ثم يمكنك رؤية أحد أروع المشاهد التي تقع في السماء عند حدوث هذا المستعر الأعظم في مجرتنا (وهو حدث لا يقع إلا بمتوسط مرتين في القرن). وفي يومنا هذا، وبالاستعانة بتلسكوبات آلية ذاتية التشغيل، تُكتَشَف مئات الآلاف من المستعرات العظمى سنويًّا في ذلك العالم الصاخب للمجرات القريبة منا نسبيًّا.

يطلق المستعر الأعظم من النوع الثاني مائتي مرة مثل الطاقة التي أطلقتها الشمس خلال الخمسة ملايين عام الماضية، وكل تلك الطاقة تتحرر في غضون ثانية تقريبًا — وتتشكل ٩٩ بالمائة من تلك الطاقة في النيوترينوات!

وهذا ما حدث عام ١٠٥٤، وقد نتج عن هذا الانفجار ألمع نجم في السماء خلال الألف عامٍ الماضية – نجم شديد السطوع لدرجة أنه ظل يُرى في وضح النهار لأسابيع. يخبو المستعر الأعظم، الذي يمثل ومضة كونية في الفضاء بين النجمي، في غضون سنوات قليلة مع انخفاض درجة حرارة الغاز وتبدده. ومع ذلك، لا يختفي الغاز تمامًا. فذلك الانفجار الذي حدث في عام ١٠٥٤ أنتج نجمًا نيوترونيًّا وحيدًا، بالإضافة إلى سديم السرطان، الذي ما زال إلى اليوم أحد الأجرام دائمة التغير، والأروع في السماء بأسرها، كما أنه مصدر متدفق بالبيانات الجديدة والصور الفريدة والاكتشافات

الرصدية. وبالنظر إلى أن كثيرًا من الأحداث الفلكية تقع على مدى زمني شاسع، كثيرًا ما نعتبره مدى زمنيًا جيولوجيًا – ملايين ومليارات السنين — فإن اكتشاف حدث يقع بسرعة بالغة، على مدى ثوانٍ أو دقائق أو حتى أعوام قليلة يكون مثيرًا جدًّا. ففي سديم السرطان أجزاء يتغير شكلها كل بضعة أيام، كما رصد تلسكوب هابل الفضائي ومرصد تشاندرا للأشعة السينية أن بقايا المستعر الأعظم 1987A (الذي يقع في سحابة ماجلان الكبرى) يتغير شكلها بطرق يمكننا رصدها.

كذلك، التقطتْ ثلاثة مراصد نيوترينو مختلفة على الأرض انفجاراتٍ نيوترينوية متزامنة من المستعر الأعظم 1987A، والذي وصلنا الضوء المنبعث منه في الثالث والعشرين من فبراير من عام ١٩٨٧. ورغم صعوبة التمييز ما بين النيوترينوات، فقد رصدتْ تلك المعدات الثلاث إجمالي خمسة وعشرين نيوترينو في ثلاث عشرة ثانية، من بين حوالي ٣٠٠ تريليون ($٣\times١٠^{١٤}$) نيوترينو انهمرتْ في تلك الثلاث عشرة ثانية على كل متر مربع من الكرة الأرضية يواجه موقع المستعر الأعظم مباشرة. لقد قذف المستعر الأعظم في الأساس ما يقرب من $٨١٠^{٥٨}$ نيوترينو، وهو عدد مهول لا يمكن تخيله — لكن بالنظر إلى بعده عن الأرض (بحوالي ١٧٠,٠٠٠ سنة ضوئية)، لم يصل منه إلى الأرض سوى $٤\times١٠^{٢٨}$ نيوترينو — أقل من إجمالي النيوترينوات بحوالي ٣٠ قيمة أسية. تنفُذ منها أكثر من ٩٩,٩٩٩٩٩٩ في المائة عبر كوكب الأرض. ويتطلب إيقاف نصف هذه النيوترينوات سنة ضوئية من الرصاص (أي حوالي ١٣١٠ كيلومترًا من الرصاص).

وكان النجم الأصلي للمستعر الأعظم 1987A قد نفث سحابةً من الغاز قبل حوالي عشرين ألف عامٍ من الانفجار، مما كوَّن حلقات حول النجم، وظلت الحلقات خفية حتى ثمانية أشهر من انفجار المستعر الأعظم. وكانت سرعة الغاز الملفوظ بطيئة نسبيًا — حوالي ثمانية كيلومترات في الثانية — لكن على مدار السنين بلغ نصف قطر سحابة الغاز مسافة ثلثي سنة ضوئية، أي حوالي ثمانية أشهر ضوئية.

وهكذا، وقع انفجار المستعر الأعظم، وبعد ثمانية أشهر التقت الأشعة فوق البنفسجية الناجمة عن الانفجار (والتي تتحرك بسرعة الضوء بالطبع) بحلقة المادة فأشعلتها — إن جاز التعبير — فبدأت الحلقة تصدر ضوءًا مرئيًا. يمكنك الاطلاع على صورة للمستعر الأعظم 1987A في ملحق الصور.

لكن الأمر لم يقتصر على الضوء المرئي، وإنما الأشعة السينية كذلك. فقد انتقل الغاز الملفوظ من المستعر الأعظم في الانفجار بسرعة ٢٠,٠٠٠ كيلومتر في الثانية، أقل من سرعة الضوء بخمس عشرة مرة. وبالنظر إلى أننا نعلم المسافة التي تبعدها الحلقة الآن، فيمكننا كذلك توقع متى تلتقي المادة الملفوظة من المستعر الأعظم بالحلقة بالتقريب، وهو ما حدث بعد أكثر من أحد عشر عامًا بقليل، مما أدى إلى انبعاث أشعة سينية. وبالطبع علينا أن نتذكر أننا رغم حديثنا عن هذا المستعر الأعظم كما لو أنه حدث خلال العقود القليلة الماضية، وبالنظر إلى وقوع المستعر الأعظم 1987A في سحابة ماجلان الكبرى، فهذا يعني أنه حدث منذ حوالي ١٧٠,٠٠٠ سنة.

وإلى يومنا هذا، لم يُرصَد أي نجم نيوتروني في بقايا المستعر الأعظم 1987A. لكن بعض العلماء يعتقدون أن ثقبًا أسود قد تشكل خلال انهيار قلب النجم بعد بدء تكون نجمٍ نيوتروني. في عام ١٩٩٠، تراهنتُ مع ستان وُوسلي، الأستاذ بجامعة كاليفورنيا، في سانتا كروز، وهو أحد الخبراء العالميين في المستعرات العظمى، على ما إذا كان نجم نيوتروني سيُكتشف هنا من عدمه خلال خمس سنوات؛ وقد خسرتُ الرهان الذي كان بقيمة مائة دولار.

كذلك ينتج عن تلك الظواهر المبهرة المزيد؛ ففي ذلك الأتون فائق الحرارة في قلب المستعر الأعظم، تعمل أشكال أكثر تعقيدًا من الاندماج النووي على تصادم النويات معًا مشكلةً عناصر أثقل كثيرًا من الحديد، ينتهي بها المطاف في سحب غازية، ربما تلتحم في النهاية وتصبح جزءًا من نجوم وكواكب جديدة. إن أجساد البشر وجميع الحيوانات مكونةٌ من عناصر تشكلتْ في النجوم. ولولا تلك الأفران النجمية، ولولا تلك الانفجارات بالغة العنف، التي بدأت بالانفجار العظيم نفسه، لما صار لدينا كل تلك العناصر الكيميائية التي يزخر بها الجدول الدوري. إذن، ربما يمكننا تشبيه المستعر الأعظم من النوع الثاني الذي ينهار فيه قلب النجم بنيران غابة سماوية (نيران محدودة النطاق بالطبع) يؤدي فيها احتراق نجم إلى تهيئة الظروف لميلاد نجوم وكواكب جديدة.

إن النجوم النيوترونية أجرام استثنائية بكل المقاييس؛ إذ يبلغ قطرها حوالي اثني عشر ميلًا (أصغر من بعض الكويكبات التي تدور بين المريخ والمشتري)، وأصغر بحوالي مائة ألف مرة من الشمس، ومن ثم أكثر كثافة بـ٣٠٠ مليار ($٣٠ \times ١٠^{١٤}$) مرة من متوسط كثافة الشمس. فقد يزن مقدار ملعقة شاي من النجم النيوتروني ١٠٠ مليون طن على الأرض.

من جوانب إعجابي بالنجوم النيوترونية أن مجرد ذكر اسمها أو كتابته يستحضر طرفي النقيض في الفيزياء، ضآلة الحجم وضخامته، تلك الأشياء الدقيقة لدرجة أننا نعجز عن رؤيتها، في أجسامٍ عالية الكثافة لدرجة أن عقولنا تقف عاجزة عن فهمها.

إن النجوم النيوترونية تدور، بل إن بعضها يدور بمعدلات مذهلة، ولا سيما في بداية نشأتها. والسبب هو نفسه الذي يجعل المتزلجات على الجليد يدرن بمعدل أسرع وأذرعهن مفرودة مما يفعلن وأذرعهن مضمومة إلى أجسادهن. يصف علماء الفيزياء هذا بحفظ الزخم الزاوي. وشرح الزخم الزاوي بالتفصيل لا يخلو من التعقيد، إلا أنه يمكن فهم الفكرة ببساطة.

فما علاقة كل هذا بالنجوم النيوترونية؟ الإجابة ببساطة أن كل الأجسام في الكون تدور؛ ومن ثم، فإن النجم الذي انهار متحولًا إلى نجمٍ نيوتروني كان يدور؛ لقد ألقى بمعظم مادته في الانفجار لكنه احتفظ بكتلة أو كتلين شمسيتين تركزتا بعد ذلك في جرم أصغر حجمًا من النجم الأصلي ببضعة آلاف مرة. وبما أن الزخم الزاوي محفوظ، يزداد التردد الدوراني للنجوم النيوترونية بمُعامل مليون كحد أدنى.

يكمل أول نجمين نيوترونيين اكتشفتهما جوسلين بيل (انظر بالأسفل) دورة كاملة حول محوريهما في غضون ١,٣ ثانية. أما النجم النيوتروني الواقع في سديم السرطان، فيدور حول محوره حوالي ٣٠ مرة في الثانية. أما أسرع نجم نيوتروني اكتُشف حتى الآن، فيكمل ٧١٦ دورة حول محوره في كل ثانية! وهذا يعني أن سرعة دوران النجم عند خط منتصفه تبلغ ١٥ في المائة من سرعة الضوء!

إن دوران جميع النجوم النيوترونية حول محاورها، والمجالات المغناطيسية الشديدة لكثيرٍ منها، تثمر عن ظاهرة نجمية بالغة الأهمية تُعرف بـ«النوابض» — وهي اختصار لمصطلح «النجوم النابضة». والنبّاض هو نجم نيوتروني تنبعث من قطبيه المغناطيسيين — اللذين يختلفان كما في حالة كوكب الأرض عن القطبين الجغرافيين، وهما النقطتان اللتان تقعان عند نهايتي المحور الذي يدور حوله النجم — حزمة من الموجات الراديوية. تسبح تلك الموجات الراديوية عبر الفضاء خلال دوران النجم. وهكذا، قد يرى المراقب للمسار الذي تسلكه الحزمة، أن النجم ينبض بانتظام، إذ إن المراقب لا يرى الحزمة إلا للحظة قصيرة. وأحيانًا ما يطلق علماء الفلك على ذلك تأثير الفنار، وذلك لسبب لا يخفى على أحد. ويوجد حوالي ستة نجوم نيوترونية فردية معروفة، ينبغي عدم خلطها بالنجوم النيوترونية في الأنظمة الثنائية، تطلق نبضات

تتضمن نطاقًا بالغ الاتساع من الطيف الكهرومغناطيسي، بما في ذلك موجات راديو، وضوء مرئي، وأشعة سينية، وأشعة جاما. والنجم النابض الواقع في سديم السرطان أحد هذه النجوم.

اكتشفتْ جوسلين بيل أول نبّاض في عام ١٩٦٧، حين كانت طالبة دراسات عليا في كمبريدج بإنجلترا. ولم تدرك هي ومشرفها، أنتوني هيويش، في البداية سبب انتظام نبضات النجم، التي لم تكن تمكث سوى ٠,٠٤ ثانية، وكانت الفترة الزمنية بين النبضات ١,٣٣٧٣ ثانية (الفاصل الزمني). وفي البداية، أطلقًا على النبّاض LGM-1 اختصارًا لاسم Little Green Men (بمعنى الكائنات الخضراء الصغيرة) في إشارة إلى أن تلك النبضات المنتظمة ربما تكون صادرة عن كائنات تعيش خارج كوكب الأرض. وسرعان ما اكتشفتْ بيل LGM آخر بفاصل زمني بين نبضاته يبلغ ١,٢ ثانية، وقد أصبح من الواضح أن تلك النبضات لم تكن صادرة عن كائنات فضائية — فلِم ترسل حضارتان مختلفتان تمامًا إشارات للأرض بالفاصل الزمني نفسه تقريبًا؟ وبعد فترة قصيرة من نشْر بيل وهيويش النتائج التي توصلَا إليها، أدرك توماس جولد الأستاذ في جامعة كورنيل أن النباضات ما هي إلا نجوم نيوترونية دوارة.

## الثقوب السوداء

أخبرتكم من قبل أننا سنأتي إلى الحديث عنها. لقد حان الوقت أخيرًا للحديث عن هذه الأجرام الغريبة. أتفهم تمامًا لِمَ قد يخاف الناس من هذه الأجرام — إذا قضيتَ بعض الوقت على موقع «يوتيوب»، فسترى عشرات التصورات لما يمكن أن تبدو عليه الثقوب السوداء، ومعظمها يندرج تحت فئة «نجوم الموت» أو «آكلات النجوم». وفي التصور الشهير للثقوب السوداء، تكون على شكل بالوعات كونية فائقة القوة تبتلع كل شيء بأفواهها النهمة.

إلا أن فكرة أن الثقوب السوداء تلتهم كل شيء قريب منها مغالطة تامة. فالأجرام بجميع أنواعها، والنجوم بصفة أساسية، تدور حول الثقوب السوداء ذات الكتلة النجمية، أو حتى الثقوب السوداء العملاقة، بثبات كبير. ولو كان الأمر خلاف ذلك، لاختفتْ مُجرة درب التبانة في الثقب الأسود العملاق الواقع في مركزها، والذي يبلغ أربعة ملايين كتلة شمسية.

إذن، ماذا نعرف عن هذه الوحوش غريبة الأطوار؟ قد تبلغ كتلة النجم النيوتروني ثلاث كتل شمسية قبل أن تتسبب قوة الجاذبية في انهياره ليشكل ثقبًا أسود. فإذا كانت كتلة النجم المنفرد الأصلي خلال عملية التخليق النووي أكبر من كتلة الشمس بخمس وعشرين مرة، فإن مادته لن تتوقف عن التساقط عند وصوله لمرحلة النجم النيوتروني، مما يسفر عن تكون الثقب الأسود.

وحين يكون للثقوب السوداء نجوم مرافقة لها في أنظمة ثنائية، يمكننا قياس تأثير جاذبيتها على شركائها المرئيين، وفي بعض الحالات النادرة، يمكننا تحديد كتلها. (وسآتي للحديث عن تلك الأنظمة في الفصل التالي).

يحيط بالثقب الأسود ما يطلق عليه العلماء أفق الحدث، وذلك بدلًا من السطح، وهو الحد الذي تكون فيه قوة جاذبية الثقب الأسود من الشدة بحيث لا يتمكن أي شيء، ولا حتى الأشعة الكهرومغناطيسية من الفرار من مجال جاذبيته. أعرف أن هذا ليس منطقيًا، لذا تصور أن الثقب الأسود يشبه كرةً ثقيلة مستقرة على منتصف طبقةٍ مطاطية. بالطبع، سيؤدي ذلك إلى تدلي منتصف الطبقة. فإذا لم يكن في متناولك، جرب استخدام جورب قديم، أو زوج مهمل من الجوارب الضيقة، قص منهما قطعة مربعة كبيرة بقدر المستطاع، ثم ضع حجرًا في منتصفها. ثم ارفع قطعة القماش المربعة من حوافها؛ سترى على الفور أن الحجر يُحدث تجويفًا أشبه بالقمع في منتصف المربع يشبه قمع الإعصار. لقد صممتَ لتوك نسخة ثلاثية الأبعاد لما يحدث في الزمكان رباعي الأبعاد. ويطلق العلماء على هذا التجويف «بئر الجاذبية»، وذلك لأنه يحاكي تأثير الجاذبية على الزمكان. وإذا أحللتَ صخرة أكبر حجمًا محل الحجر، فسيصبح لديك بئر أعمق، مما يرجح أنه كلما كان الجرم السماوي أضخم، فإن تأثيره المُشوِّه للزمكان يكون أكبر.

وبالنظر إلى أننا لا نستطيع التفكير إلا في ثلاثة أبعاد مكانية، فلا يمكننا تصور ما يعنيه أن يصنع نجم عملاق حفرةً في جدار الزمكان رباعي الأبعاد. وكان ألبرت آينشتاين هو من علمنا كيفية تصور الجاذبية بهذا النحو، تصورها على أنها التواء في جدار الزمكان. لقد حوَّل آينشتاين الجاذبية إلى مادة هندسية، وإن لم تكن تنتمي إلى الهندسة التي درستها في المدرسة الثانوية.

وليستْ تجربة الجورب بالتجربة المثالية — أعلم أن هذا من شأنه أن يريح كثيرين منكم — وذلك لعدد من الأسباب، لكن السبب الرئيسي هي أنك لا تستطيع

تصور كتلة رخامية تدور في مدار ثابت حول بئر جاذبي ناتج عن صخرة. أما في عالم الفلك الحقيقي، فتدور أجرام كثيرة حول أجرام عملاقة في مدارات ثابتة لملايين أو حتى مليارات السنوات. فكر في دوران القمر حول الأرض، ودوران الأرض حول الشمس، ودوران الشمس ومائة مليار نجم آخر في مجرتنا.

أما على الناحية الأخرى، فيساعدنا ذلك العرض العملي على تصور الثقب الأسود. على سبيل المثال، يمكننا رؤية أنه كلما زادت ضخامة الجرم، زاد البئر عمقًا وزادت الجوانب انحدارًا، ومن ثم زاد مقدار الطاقة اللازمة لتسلق البئر. حتى الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يفر من جاذبية نجم عملاق تقل طاقته، ما يعني انخفاض تردده وزيادة طوله الموجي. وكما صرتَ تعرف الآن، يُسمى الانزياح نحو الطرق الأقل نشاطًا من الطيف الكهرومغناطيسي بالانزياح نحو الأحمر. في حالة البقايا النجمية المضغوطة (سواء أكانت عملاقة أم صغيرة)، يحدث الانزياح الأحمر بفعل الجاذبية، والذي نطلق عليه الانزياح الأحمر الجذبوي (ولا ينبغي خلطه بالانزياح الأحمر الناتج عن انزياح دوبلر — انظر الفصل الثاني والفصل التالي).

للفرار من سطح كوكب أو نجم، تحتاج إلى الحد الأدنى من السرعة؛ لتضمن عدم عودتك إليه مرةً أخرى. ونطلق على ذلك سرعة الإفلات، وتعادل ١١ كيلومتر في الثانية (حوالي ٢٥,٠٠٠ ميل في الساعة) بالنسبة لكوكب الأرض. ومن ثم، فإن جميع الأقمار الصناعية التي تدور حول الأرض، لا يمكن أن تزيد سرعتها عن ١١ كيلومتر في الثانية. وكلما زادت سرعة الإفلات، زادت الطاقة اللازمة للإفلات، لأن ذلك يتوقف على كل من سرعة الإفلات، وعلى كتلة الأجرام الفارة (والطاقة الحركية اللازمة لذلك = ١/٢ الكتلة ×السرعة$^{٢}$).

لربما يمكنك الآن تصور أنه كلما زاد بئر الجاذبية عمقًا، صارت سرعة الإفلات من قاع البئر أكبر من سرعة الضوء نفسها. ولأن ذلك مستحيل، فلا شيء يستطيع الفرار من بئر الجاذبية العميق هذا، ولا حتى الإشعاع الكهرومغناطيسي.

كان عالم فيزياء يُدعى كارل شفارتسشيلد قد حل معادلات آينشتاين للنسبية العامة، وحسب نصف قطر الكرة محددة الكتلة التي من شأنها إحداث بئر بعمق لا يستطيع شيء الإفلات منه — الثقب الأسود. ويُعرف نصف القطر بنصف قطر شفارتسشيلد، ويعتمد حجمه على كتلة الجسم. وهذا هو نصف قطر ما نُطلق عليه أفق الحدث.

المعادلة نفسها شديدة البساطة، إلا أنها لا تنطبق إلا على الثقوب السوداء غير الدوارة، والتي غالبًا ما يُشار إليها بثقوب شفارتسشيلد السوداء.[1] وتتضمن المعادلة ثوابت معروفة، ونصف القطر الذي يُحسَب بأقل قليلًا من ثلاثة كيلومترات لكل كتلةٍ شمسية. هكذا يمكننا حساب أن الحجم — أيْ نصف قطر أفق الحدث — لثقبٍ أسود تبلغ كتلته، على سبيل المثال، عشر كتلٍ شمسية، يساوي ٣٠ كيلومترًا تقريبًا. كما يمكننا حساب نصف قطر أفق الحدث لثقبٍ أسود تعادل كتلته كتلة الأرض – سيكون أقل من سنتيمتر – لكن لا دليل على وجود مثل هذه الثقوب السوداء. إذن، لو أن كتلة الشمس كانت مُركزة في كرة يبلغ قطرها ستة كيلومترات، فهل كانت ستُشكِّل نجمًا نيوترونيًا؟ الإجابة لا، وذلك لأنه تحت تأثير جاذبية تلك الكتلة الضخمة المكدسة في كرة صغيرة إلى هذا الحد، كانت مادة الشمس ستتساقط مُحدثةً ثقبًا أسود.

قبل آينشتاين بوقتٍ بعيد، وفي عام ١٧٤٨ تحديدًا، أثبتَ الفيلسوف والجيولوجي الإنجليزي جون ميشيل احتمالية وجود نجوم بقوة سحب جاذبية شديدة جدًّا، لدرجة تحُول دون إفلات الضوء منها. وقد استعان بميكانيكا نيوتن البسيطة (يستطيع أي من طلابي في السنة الأولى من الجامعة القيام بذلك في ثلاثين ثانية) وانتهى إلى النتيجة عينها التي توصل إليها شفارتسشيلد، وهي أنه إذا كانت كتلة النجم (عدد الكتل الشمسية)، وكان نصف قطره أقل من حاصل ضرب ٣ في (عدد الكتل الشمسية للنجم)، فإن الضوء لا يمكنه الإفلات منه. وإنها لمصادفة مثيرةً للدهشة أن تعطي نظرية آينشتاين للنسبية العامة النتيجة نفسها التي أعطتها الطريقة المعتمدة على ميكانيكا نيوتن.

في مركز أفق الحدث الكروي، يقع ما يُطلق عليه الفيزيائيون «المتفرد»، وهي نقطة عديمة الحجم بكثافة غير محدودة، وهو شيء عجيب تعجز عقولنا عن فهمه، وإن كان يقدم الحل للمعادلات. فما من أحد يعلم شكل هذا المتفرد، رغم أن بعضهم يحاول تخيله. بالإضافة إلى ذلك، لا توجد قوانين فيزيائية إلى الآن يمكنها التعامل مع هذه المتفردات.

يمكنك أن تشاهد على الإنترنت كثيرًا من مقاطع الفيديو المصممة بالرسوم المتحركة للثقوب السوداء، جميعها خلابة ومتوعدة في الوقت نفسه، وعملاقة إلى حدٍّ

(١) في الثقوب السوداء الدوارة يكون أفق الحدث مفلطحًا — أضخم عند خط استوائه — وليس كرويًا.

لا يُصدق، منذرةً بإحداث دمار على نطاق كوني. لذا، حين شرع الصحفيون يكتبون عن احتمالية تسبب أكبر معجل جسيمات في العالم - مصادم الهدرونات الكبير التابع لمختبر سِرن، والذي يقع بالقرب من جنيف - في خلق ثقبٍ أسود، نجحوا في إثارة مخاوفَ كبيرة بين العوام من أن الفيزيائيين يغامرون بمستقبل الكوكب.

لكن، هل كان ذلك حقيقيًا؟ لنفترض أنهم تسببوا بمحض الصدفة في تكوُّن ثقبٍ أسود — فهل بدأ ذلك الثقب في التهام الأرض؟ بالطبع، مثل هذا الأمر لا يخفى على أحدٍ. لقد بلغ مستوى الطاقة التي تتصادم عنده حزم البروتونات المتقابلة في مصادم الهادرونات الكبير، في الثلاثين من مارس من عام ٢٠١٠، ٧ تيرا إلكترون فولت، أي ٧ تريليون إلكترون فولت، بواقع ٣,٥ تريليون لكل حزمة. ويخطط العلماء في مصادم الهدرونات الكبير إلى رفع مستوى طاقة المصادمات إلى ١٤ تيرا إلكترون فولت، وهو أمر من أبعد المستحيلات اليوم. فكتلة البروتون تبلغ $١,٦ \times ١٠^{-٢٤}$ جرامًا. كثيرًا ما يقول علماء الفيزياء إن كتلة البروتون $m$ تبلغ حوالي مليار إلكترون فولت، ١ جيجا إلكترون فولت. والجيجا إلكترون فولت وحدة قياس الطاقة وليس الكتلة بالطبع، لكن بما أن $E=mc^2$ (حيث تشير $c$ إلى سرعة الضوء)، فإن $E$ غالبًا ما يُشار إليها على أنها الكتلة. على طريق ماساتشوستس تيرنبايك، توجد لافتات مكتوبٌ عليها: «للمعلومات عن الرحلات اتصل بـ٥١١». وفي كل مرة أقرأ إحدى هذه اللافتات، تتبادر الإلكترونات إلى ذهني؛ إذ إن كتلة الإلكترونات تبلغ ٥١١ ألف إلكترون فولت.

وبافتراض أن طاقة المصادمة البالغة ١٤ تيرا إلكترون فولت أدت إلى تشكُّل ثقبٍ أسود، فستكون كتلة هذا الثقب ١٤,٠٠٠ مثل كتلة البروتون، أو حوالي $٢ \times ١٠^{-٢٠}$ جرامًا. وقد قيَّم عدد لا حصر له من الفيزيائيين ولجان المراجعة أعدادًا كبيرة من الأدبيات التي تناولت هذه المسألة، ونشروا نتائجهم، وقد خلصوا إلى أن الأمر لا ينطوي على تهديد. هل تريد معرفة السبب؟ حسنًا، هذا حقك. فيما يلي أورد لك الحجج التي قام عليها هذا الاستنتاج.

أولًا: احتمالات مصادم الهدرونات الكبير التي تتوفر فيها الطاقة الكافية لتشكيل ثقوب سوداء ضئيلةٍ (تعرف بالثقوب السوداء الدقيقة) تقوم على نظرية ما يُعرف بالأبعاد الإضافية الكبيرة، والتي ما زالت إلى اليوم مجرد نموذج تخميني، على أقل تقدير. فتلك النظرية تتجاوز حدود كل الأمور المثبتة بالتجربة. ومن ثم، فإن احتمالية تشكيل ثقوب سوداء دقيقةٍ هي احتمالية ضئيلة للغاية من الأساس.

لا جدال في أن منبع التخوف هو احتمال أن تكون تلك الثقوب السوداء الدقيقة أجرامًا متنامية ثابتة — أي أجرامًا تنمو بجذب المادة المحيطة بها وابتلاعها بداخلها — تبدأ في ابتلاع المادة القريبة منها، ومن ثم، تبتلع كوكب الأرض. لكن لو كان لتلك الثقوب السوداء الدقيقة وجود، لتشكلتْ بفعل أشعةٍ كونية نشطة إلى حد مهول (وهي موجودة فعلًا) ولارتطمت بالنجوم النيوترونية والأقزام البيضاء — حيث ستتخذ تلك الثقوب السوداء الدقيقة لنفسها مسكنًا. لكن، بالنظر إلى أن الأقزام البيضاء والنجوم النيوترونية تبدو مستقرة على مدى زمني يمتد إلى مئات الملايين من السنين، إن لم يكن مليارت السنين، فلا يبدو أن هناك أية ثقوب سوداء دقيقة تلتهمها من الداخل. بعبارة أخرى، يبدو أن الثقوب السوداء الدقيقة الثابتة لا تُشكل أي خطر.

على الناحية الأخرى، باستبعاد نظرية الأبعاد الإضافية، ليس للثقوب السوداء التي تقل كتلتها عن ٢×١٠ $^{-٥}$ جرامات (يُطلق عليها كتلة بلانك) وجود؛ بمعنى أنه لا توجد نظرية فيزيائية (إلى الآن) يمكنها تفسير وجود ثقوب سوداء بهذه الكتلة الضئيلة؛ ومن ثم، كنا سنحتاج إلى نظرية جاذبية كمية، وهي شيء لا وجود له. ومن ثم، فإن مسألة إيجاد نصف قطر شفارتسشيلد لثقب أسود دقيق بكتلة ٢×١٠ $^{-٢٠}$ جرامًا مسألة لا معنى لها.

كذلك، أثبت ستيفن هوكينج أن الثقوب السوداء يمكن أن تتبخر. وكلما قلت كتلة الثقب الأسود، كان تبخره أسرع. وهكذا، يتبخر الثقب الأسود الذي يبلغ ثقله ٣٠ كتلة شمسية في غضون ١٠ $^{٧١}$ عامًا تقريبًا؛ فيما يمتد عمر الثقب الأسود العملاق الذي يبلغ ثقله مليار كتلة شمسية إلى حوالي ١٠ $^{٩٣}$ عامًا! إذن، لربما تتساءل كم سيستغرق تبخر ثقبٍ أسود دقيق تبلغ كتلته ٢×١٠ $^{-٢٠}$ جرامًا؟ إنه سؤال عبقري، لكن ما من أحد يستطيع الإجابة عنه — فنظرية هوكينج لا تعمل في نطاق كتل الثقوب السوداء الأقل من كتلة بلانك. لكن لأجل الفضول، يصل عمر الثقب الأسود الذي تبلغ كتلته ٢×١٠ $^{-٥}$ جرامات إلى حوالي ١٠ $^{-٣٩}$ ثانية. بعبارة أخرى، الثقوب السوداء الدقيقة بهذا الحجم لا يمكن أن تنشأ من الأساس.

ومن ثم، من الواضح أننا لا ينبغي أن نتخوف من الثقوب السوداء الدقيقة التي يبلغ ثقلها ٢×١٠ $^{-٢٠}$ جرامًا التي يُحتمل أن تتشكل بفعل مصادم الهدرونات الكبير.

أعلم أن ذلك لم يثن الناس عن رفع الدعاوى القضائية لمنع مصادم الهدرونات الكبير من بدء العمل. ومع ذلك، يثير هذا في داخلي قلقًا بشأن تلك المسافة الكبيرة بين العلماء وبقية البشر، وفي إخفاقنا نحن العلماء في توضيح ما نفعله للعامة. وحتى

حين درس بعضٌ من نخبة علماء الفيزياء في العالم المسألة وأوضحوا أنها لا تشكل أية مخاطر، نجح الصحفيون والسياسيون في إثارة مخاوف العامة دون أي أساس. ويبدو أن الخيال العلمي أقوى من العلم نفسه إلى حدٍ ما.

لا شيء أغرب في هذا الكون من الثقوب السوداء على ما أعتقد. فالنجوم النيوترونية تعلن عن وجودها من خلال سطحها؛ فللنجم النيوتروني سطح يمكن رصده. أما الثقب الأسود، فلا سطح له، ولا انبعاث يصدر منه (باستثناء إشعاع هوكينج، الذي لم يُرصد أبدًا).

بعض الثقوب السوداء، المحاطة بحلقة مفلطحة من المادة والتي تُعرف بقرص التراكم (انظر الفصل القادم)، تُطلق تدفقات من جسيمات بمستويات طاقة بالغة الارتفاع عمودية على سطح قرص التراكم، وإن لم يكن من داخل أفق الحدث، فلماذا تُعد أحد الألغاز الكبرى التي لم تُحل بعد. انظر إلى تلك الصورة على الموقع التالي: www.wired.com/wired/spectacular-new/01/science/2009.

لا يمكننا التوصل إلى أي شيء يتعلق بما بداخل الثقب الأسود وداخل أفق الحدث إلا بالعمليات الحسابية. وعلى كل حالٍ، لا يمكننا الحصول على أي شي، ومن ثم فإننا لا نتلقى أية معلومات من داخل الثقب الأسود — الأمر الذي يصفه بعض الفيزيائيين من ذوي الحس الفكاهي بـ«الرقابة الكونية». إن الثقوب السوداء أجرام منغلقة على نفسها. فبمجرد سقوطك عبر أفق الحدث، لا يمكنك الخروج أبدًا — ولن يمكنك حتى إرسال إشارة. وإذا سقطتَ عبر أفق حدث ثقب أسود عملاق، فلن تعرف حتى أنك قد مررت من أفق الحدث. فأفق الحدث ليس له قناة أو جدار أو حافة. كما أن ما من شيء في محيطك يتغير فجأة عند عبورك أفق الحدث. فبالرغم من كل تلك المبادئ الفيزيائية النسبية التي ينطوي عليها الأمر، لن تجد أن عقارب ساعتك تتوقف أو تتحرك أسرع أو أبطأ من المعتاد.

أما من منظور شخص يراقبك عن بعدٍ، فإن الموقف سيكون مختلفًا تمامًا؛ فما يراه ذلك الشخص ليس أنت؛ وإنما تتلقى عيناه صورًا لك يحملها الضوء الذي يترك جسدك ويتسلق خروجًا من بئر جاذبية الثقب الأسود. وكلما اقتربتَ من أفق الحدث، يزداد البئر عمقًا. ويفقد الضوء مزيدًا من طاقته لأجل الخروج من البئر، متعرضًا لمزيدٍ من الانزياح الأحمر الجذبوي. كما ينزاح كل الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث منك

نحو أطوالٍ موجية أطول (ومن ثم يقل ترددها). هكذا، ستزداد احمرارًا، ثم ستختفي مع تزحزح انبعاثاتك نحو أطوال موجية أطول، كالأشعة تحت الحمراء، ثم نحو موجات راديوية أطول، إلى أن تصير الأطوال الموجية لا متناهية مع عبورك أفق الحدث. ومن ثم، حتى قبل عبورك ذلك المدخل إلى الثقب الأسود، فسيبدو للمراقب البعيد أنك اختفيتْ فعليًا.

كذلك يرصد المراقب البعيد شيئًا غير متوقع، وهو أن سرعة الضوء تقل حين يصدر من منطقة قريبة من ثقبٍ أسود! وهذا لا يتعارض مع أي من افتراضات النسبية: فالمراقب القريب من الثقب الأسود دائمًا ما يرى الضوء يتحرك بنفس سرعته المعتادة (حوالي ١٨٦,٠٠٠ ميل في الثانية)، أما المراقب عن بعد، فيرى أن سرعة الضوء أقل من c. ومن ثم، تستغرق صورك التي يحملها الضوء المنبعث منك باتجاه المراقب البعيد وقتًا أطول للوصول إليه مما كانت تستغرقه لو أن ذلك المراقب يقف بالقرب من ثقبٍ أسود. ويترتب على ذلك نتيجة بالغة الأهمية، وهي أن المراقب يراك تبطئ سرعتك بينما تقترب من أفق الحدث! وفي واقع الأمر، تستغرق صورك وقتًا متزايد الطول للوصول إليه، ومن ثم، فإن كل ما تفعله يبدو له بحركة بطيئة. أما بالنسبة لمراقب لك من على سطح الأرض، فإن سرعتك، وحركاتك، وساعتك، وحتى نبضات قلبك تبطئ مع اقترابك من أفق الحدث، وستتوقف تمامًا ما إن تصل إليه. ولولا أن الضوء المنبعث منك بالقرب من أفق الحدث يختفي بفعل ظاهرة الانزياح الأحمر الجذبوي، لرآك المراقب «متجمدًا» إلى الأبد عند سطح أفق الحدث.

وقد تجاهلتُ هنا - تجنبًا للتعقيد - الحديث عن انزياح دوبلر، الذي من شأنه أن يكون هائلًا بالنظر إلى سرعتك التي تتزايد باضطراد مع اقترابك من أفق الحدث. في الحقيقة، عند عبورك أفق الحدث، ستتحرك بسرعة الضوء. (وبالنسبة إلى المراقب من سطح الأرض، يشبه انزياح دوبلر تأثيرات الانزياح الأحمر الجذبوي).

بعد عبورك أفق الحدث، وعند انقطاع اتصالك بالعالم الخارجي، ستظل قادرًا على رؤية العالم خارج أفق الحدث. فالضوء القادم من خارج أفق الحدث ينزاح نحو تردد أعلى وطول موجي أقصر، ومن ثم، سترى الكون منزاحًا نحو الأزرق. (وهو نفس الشيء الذي كان سيحدث لو أنك وقفتَ على سطح نجمٍ نيوتروني، وذلك للسبب ذاته). ومع ذلك، نظرًا لأنك تسقط بسرعة هائلة، يأخذ الكون في الابتعاد عن ناظريك، ومن ثم ينزاح العالم الخارجي إلى اللون الأحمر (نتيجةً لتأثير دوبلر). إذن، ما النتيجة

التي سيسفر عنها ذلك؟ أيهما سيفوز في هذا السباق الانزياح الأزرق أم الانزياح الأحمر؟ أم أن كليهما سيخسر السباق؟

طرحتُ هذا السؤال على أندرو هاميلتون، الأستاذ في المعهد المشترك للفيزياء الفلكية المخبرية التابع لجامعة كولورادو، والخبير العالمي في الثقوب السوداء، وكما توقعتُ لم تكن الإجابة بسيطة. فالانزياح الأزرق والانزياح الأحمر يزولان تقريبًا في حالة السقوط الحر، لكن العالم الخارجي يبدو منزاحًا نحو الأحمر في الأعلى والأسفل، ومنزاحًا نحو الأزرق في الاتجاهات الأفقية. (وقد تستمتع بمشاهدة سلسلة أفلامه «رحلة إلى ثقب شفارتسشيلد الأسود» لترى كيف يبدو سقوط جسمٍ في ثقب أسود: http://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh/schw.html).

ومع ذلك، لن يوجد مكان يمكن الوقوف عليه، إذ لا يوجد سطح. فقد تكدست كل المادة التي شكلت الثقب الأسود في نقطة، وهي المتفرد. فماذا عن قوى المد والجذر — ألن يتمزق جسدك بفعل الفارق في شدة الجاذبية عند رأسك وعند أصابع قدميك؟ (وهو نفس ما يحدث عندما تكون الجاذبية في جانب الأرض المواجه للقمر أشد منها في الجانب الآخر من الكرة الأرضية البعيد عن القمر؛ وهو ما يتسبب في ظاهرة المد والجذر على سطح الأرض).

لا شك أنك ستتمزق إربًا؛ فثقب شفارتسشيلد الأسود الذي يبلغ ثلاثة كتل شمسية يمكن أن يمزقك في غضون ٠,١٥ ثانية قبل عبورك أفق الحدث. وتُعرف هذه الظاهرة نظريًا بتأثير المعكرونة، حيث يتمدد الجسد طوليًا إلى حدٍّ لا يمكن تخيله. وما إن تعبر أفق الحدث، تصل أشلاء جسدك إلى نقطة المتفرد في غضون ٠,٠٠٠٠١ ثانية، حيث تُعتَصر إلى نقطة لانهائية الكثافة. أما في حالة الثقوب السوداء التي يبلغ ثقلها أربعة ملايين كتلة شمسية، كذلك الثقب الواقع في مركز مجرتنا، فستعبر أفق الحدث بسلام دون مواجهة أية مشكلات، على الأقل في البداية، لكن آجلًا أم عاجلًا ستتمزق إربًا كقطع المعكرونة الإسباجيتي! (وصدقني، هذا سيحدث عاجلًا لأنه لن يكون أمامك سوى ١٣ ثانية قبل أن يحدث ذلك، ثم ستصل إلى المتفرد بعد ٠,١٥ ثانية).

إن فكرة الثقوب السوداء غريبة لأي شخص، لكنها بالغة الغرابة بالنسبة إلى كثيرين من علماء الفيزياء الفلكية الذين يراقبونها (كطالبَيَّ السابقين في الدراسات العليا جيفري ماكلينتوك، وجون ميلر). إن الثقوب السوداء ذات الكتلة النجمية موجودة في

الواقع كما نعلم؛ فقد اكتُشفتْ في عام ١٩٧١ حين أعلن علماء الفلك البصري أن Cyg X-1 نظام نجميّ ثنائي، وأن أحد النجمين ثقب أسود! وسأتحدث عن كل شيء يخص ذلك في الفصل القادم، فهل أنت مستعد؟

مكتبة
t.me/soramnqraa

# الفصل الثالث عشر

# رقصة باليه في أعالي السماء

الآن صرتَ تعلم أن كثيرًا من النجوم التي تراها في السماء، بالتلسكوب أو بدونه، أكثر تعقيدًا بكثير من الشمس. وربما لا تعرف أن ثلث ما تراه من النجوم ليستْ نجومًا فرديةً على الإطلاق، وإنما ما نطلق عليه أنظمة نجمية ثنائية: وهي أزواج من النجوم المترابطة بفعل الجاذبية، يدور أحدهما حول الآخر. بعبارة أخرى، حين تنظر إلى السماء ليلًا، فإن ثلث ما تراه من النجوم يكون أنظمة ثنائية — وإن بدا لك أنها نجوم فردية. كذلك توجد أنظمة نجمية ثلاثية، أي ثلاثة نجوم يدور بعضها حول بعض، وإن لم تكن بنفس الشيوع. ونظرًا لما تبين من أن كثيرًا من مصادر الأشعة السينية في مجرتنا أنظمة ثنائية، فإن لي باعًا طويلًا في التعامل معها. ويا لها من أجرام رائعة.

يدور كل نجم في النظام الثنائي حول ما نطلق عليه مركز كتلة الثنائي، وهي نقطة تقع بين النجمين. فإذا كان النجمان متساويين في الكتلة، يكون مركز الكتلة على مسافة متساوية من مركز كل نجم. أما إذا كانت كتلتاهما متفاوتتين، فيكون مركز الكتلة أقرب إلى النجم ذي الكتلة الأكبر. وبالنظر إلى أن كلا النجمين يُتم دورته المدارية في الفترة الزمنية نفسها تقريبًا، فلا بد أن السرعة المدارية للنجم الأضخم أقل من سرعة النجم ذي الكتلة الأقل.

دعونا نتخيل ذلك التصور المبدئي، تخيل وزنًا رياضيًّا (دمبل) من الحديد بقضيب يربط بين طرفين متساويي الكتلة، يدوران حول نقطة منتصفه. والآن، تخيل دمبل آخر، أحد طرفيه يزن رطلين، والطرف الآخر عشرة أرطال؛ هنا سيكون مركز كتلة هذا الوزن قريبة جدًّا من الطرف الأثقل، ومن ثم، حين يدور الثقل، يمكنك أن ترى أن مدار الكتلة الأكبر قصير مقارنةً بمدار الكتلة الأصغر. أما إذا كان هاذان نجمين وليسا طرفي وزن رياضي، فيمكنك أن ترى أن النجم الأقل كتلة يدور حول مداره بسرعة أكبر خمس مرات من رفيقه الأضخم والأثقل.

بالإضافة إلى ذلك، إذا كان أحد النجمين أضخم من الآخر إلى حد بعيد، فيمكن أن يقع مركز الكتلة داخل النجم الأضخم. في حالة كوكب الأرض والقمر (وهما يشكلان نظامًا ثنائيًا)، يقع مركز الكتلة تحت سطح الأرض بحوالي ١٧٠٠ كيلومتر (أكثر من ١٠٠٠ ميل). (وقد ذكرت ذلك في الملحق الثاني).

يشكل الشِعرى اليمانية، أكثر النجوم سطوعًا في السماء (يبعد عن الأرض مسافة ٨,٦ سنة ضوئية)، نظامًا ثنائيًا من نجمين يُعرفان بالشعرى اليمانية أ والشعرى اليمانية ب. ويُتم هاذان النجمان دورةً كاملة حول مركز كتلتهما كل خمسين عامًا تقريبًا (ونُطلق عليها الفترة المدارية).

فكيف إذن نعرف أننا ننظر إلى نجمٍ ثنائي؟ لا يمكن رؤية النجمين المُشكِّلَين لنظام ثنائي منفصلَين بالعين المجردة. وأحيانًا يمكننا التأكد بصريًا من أننا نرى ثنائيًا حين نرى النجمين منفصلَين، وهذا يتوقف على بعد هذا النظام عنا وقوة التلسكوب المستخدم.

تكهَّن عالم الرياضيات والفلك الألماني المشهور، فريدريش فيلهلم بيسل، أن أسطعَ نجمٍ في السماء، وهو الشعرى اليمانية، هو نظام ثنائي، مُكوَّن من نجمين أحدهما مرئي والآخر غير مرئي. وقد خلص إلى ذلك استنادًا إلى ملاحظاته الفلكية الدقيقة — وقد كان أول من يرصد التزيح النجمي في عام ١٨٣٨ (وبذلك فقد تغلب على هندرسن بفارق ضئيل. انظر الفصل الثاني). وفي عام ١٨٤٤، كتب بيسل خطابًا شهيرًا إلى ألكسندر فون هومبولت قائلًا: «إنني متمسك باعتقادي بأن نجم الشِّعرى اليمانية نظام ثنائي مكون من نجم مرئي وآخر غير مرئي. وما من سبب لافتراض أن اللمعان سمة أساسية للأجرام السماوية. فوضوح أعداد لا حصر لها من النجوم ليس حجة مفندة لوجود أعدادٍ أخرى لا حصر لها من النجوم الخفية». وتلك الجملة الأخيرة عميقة المعنى؛ فما لا يمكننا أن نراه، عادة ما يصعب علينا تصديقه. ومن ثم، فقد كان بيسيل هو من أسس ما نطلق عليه الآن «علم فلك الأجرام اللامرئية».

وفي الواقع، لم ير أحد الرفيق «اللامرئي» (المدعو الشعرى اليمانية ب) حتى عام ١٨٦٢، وذلك بينما كان ألفان كلارك يجرب تلسكوبًا جديدًا بفتحة قياس ١٨,٥ بوصة (وهو أكبر تلسكوب في ذلك الوقت، وكان من إنتاج شركة والده) في بلدتي، كمبريدج، بولاية ماساتشوستس. وجه ألفان التلسكوب صوب الشعرى اليمانية الذي كان ساطعًا عند خط أفق بوسطن، مجربًا التلسكوب، وهنالك اكتشف الشعرى اليمانية ب (وكان

أقل سطوعًا من الشعرى اليمانية أ بعشرة آلاف مرة).

## هبة المطيافية النجمية: الانزياح الأزرق والانزياح الأحمر

حتى الآن لا توجد وسيلة أكثر انتشارًا لمعرفة أن النجوم التي نراها ثنائية، لا سيما إذا كانت بعيدة، من المطيافية وقياس ما يُعرف بانزياح دوبلر. فلربما لا توجد أداة فيزيائية فلكية أقوى من المطيافية، ولا اكتشاف أهم في علم الفلك خلال القرون العديدة الماضية من انزياح دوبلر.

لقد صرت تعرف الآن أن الأجسام تصدر ضوءًا مرئيًّا عندما ترتفع حرارتها إلى حد معين (إشعاع الجسم الأسود). ومن خلال تحليل ضوء الشمس على نحو ما يفعل المنشور الزجاجي، تظهر قطرات المطر التي تشكل قوس قزح (الفصل الخامس) نطاقًا متصلًا من الألوان يبدأ أحد طرفيه باللون الأحمر وينتهي في الطرف الآخر باللون البنفسجي، ويسمى الطيف. كذلك إذا حللتَ الضوء المنبعث من نجم، فسترى طيفًا، لكن قوة الألوان قد لا تتساوى فيه. فكلما كانت حرارة النجم أقل، على سبيل المثال، زاد احمرار النجم (وطيفه). وتبلغ درجة حرارة نجم منكب الجوزاء (في كوكبة الجبار) ٢٠٠٠ كلفن فقط؛ وهو أحد النجوم الأكثر احمرارًا في السماء. على الناحية الأخرى، تبلغ درجة حرارة نجم المرزم، والذي يقع كذلك في كوكبة الجبار، ٢٨,٠٠٠ كلفن، ومن ثم فإنه أحد ألمع النجوم وأكثرها زرقةً في السماء وكثيرًا ما يطلق عليه أيضًا نجم الأمازون.

وبإلقاء نظرة عن كثب على الأطياف النجمية، تَظهر فجواتٌ ضيقة حيث تتقلص الألوان، أو تنعدم تمامًا، وهو ما نطلق عليه خطوط الامتصاص. ويوجد في طيف الشمس آلاف من خطوط الامتصاص هذه. وتنتج هذه الخطوط عن كثرة العناصر المختلفة الموجودة في الأغلفة الجوية للنجوم. تتكون الذرات، كما تعرف، من نويات وإلكترونات. وليس للإلكترونات أي طاقة، وإنما مستويات طاقة مختلفة، ولا يمكن أن يكون لها طاقة فيما بين هذه المستويات المختلفة. بعبارة أخرى، طاقة الإلكترونات «مكماة» — وهو التعبير الذي نشأتْ منه ميكانيكا الكم.

تحتوي ذرة الهيدروجين المحايدة على إلكترون واحد؛ فإذا اصطدم بها الضوء، يقفز هذا الإلكترون من مستوى طاقة إلى مستوى طاقة أعلى من خلال امتصاص

فوتون. لكن نظرًا لتكمية مستويات الطاقة للإلكترون، فإن هذا لا يمكن أن يحدث مع فوتونات بأي مقدار طاقة؛ وإنما يحدث فقط مع الفوتونات ذات الطاقة المناسبة (بالتردد والطول الموجي المناسب تمامًا) لهذا الإلكترون لكي يقفز قفزة كمية من مستوى طاقة إلى مستوى طاقة أعلى. تؤدي هذه العملية (التي يُطلق عليها الامتصاص الرنيني) إلى التهام تلك الفوتونات، ومن ثم تسبب فجوة عند ذلك التردد (فقدان اللون) من الطيف المتصل، وهو ما نطلق عليه خط الامتصاص.

يُنتج الهيدروجين أربعةَ خطوط امتصاص (عند أطوال موجية أو ألوان معروفة على وجه الدقة) في الجزء المرئي من الطيف النجمي. ومن الممكن أن تُحدث معظم العناصر خطوطًا أكثر كثيرًا، نظرًا لأنها تحتوي على عدد أكبر من الإلكترونات مقارنة بذرة الهيدروجين. في الواقع، لكل عنصر مجموعة فريدة من خطوط الامتصاص، والتي تعادل البصمة. نعلم ذلك تمام العلم من خلال دراسة تلك الخطوط وقياسها في المختبر. ومن ثم، بدراسة خطوط الامتصاص في الطيف النجمي دراسة ممعنة، يمكننا معرفة العناصر الموجودة في الغلاف الجوي لكل نجم.

ومع ذلك، عند ابتعاد النجم عنا، تؤدي الظاهرة المعروفة بانزياح دوبلر إلى انزياح طيف النجم بالكامل (بما في ذلك خطوط الامتصاص) إلى الجزء الأحمر من الطيف (وهو ما نطلق عليه الانزياح الأحمر). وعلى النقيض، إذا انزاح الطيف النجمي نحو الجزء الأزرق من النجم، نعرف أن النجم يقترب منا. وعند قياس مقدار الانزياح في الطول الموجي لخطوط الامتصاص النجمية بدقة، يمكننا حساب السرعة التي يتحرك بها النجم سواء أكان مبتعدًا عنا أم مقتربًا منا.

على سبيل المثال، إذا راقبنا نظامًا ثنائيًّا، نجد أن كل نجم من نجمي النظام يتحرك صوبنا خلال دورانه في النصف الأول من مداره، ثم يتحرك مبتعدًا عنا خلال دورانه في النصف الآخر، فيما يفعل النجم الآخر العكس تمامًا. فإذا كان كلا النجمين ساطعًا بما يكفي، فسنرى في طيفهما خطوط امتصاص منزاحة نحو الأحمر ونحو الأزرق. وهو ما يدل على أننا نرى نظامًا نجميًّا ثنائيًّا. لكن خطوط الامتصاص تتحرك على طول الطيف نظرًا للحركة المدارية للنجوم. فمثلًا، إذا كانت الفترة المدارية عشرين عامًا. فإن كل خط امتصاص يقوم برحلة كاملة تستغرق عشرين عامًا (عشرة أعوام في الانزياح نحو الأحمر، وعشر أعوام في الانزياح نحو الأزرق).

فإذا لم يكن بإمكاننا سوى رؤية خطوط امتصاص منزاحة نحو الأحمر فقط (أو نحو الأزرق فقط)، فسنعرف أننا ننظر إلى نظام ثنائي إذا كانت خطوط الامتصاص تتحرك في الطيف جيئةً وذهابًا؛ وبقياس الزمن الذي تستغرقه الخطوط لإتمام دورةٍ كاملة، سنعرف الفترة المدارية للنجم. فمتى يمكن أن يحدث ذلك؟ حين يكون أحد النجمين خافتًا لدرجة تحول دون رؤيته من الأرض في الضوء المرئي.

دعنا الآن نرجع إلى مصادر الأشعة السينية.

## شكلوفسكي وآخرون

في عام ١٩٦٧، قدم عالم الفيزياء الروسي جوزيف شكلوفسكي نموذجًا لـSco X-1 . «هذا النموذج بكل خصائصه يطابق النجم النيوتروني في حالة التراكم... ويأتي الإمداد الطبيعي والكافي من الغاز لتغذية حالة التراكم تلك في صورة تيار غاز متدفق من العنصر الثانوي في نظام ثنائي متقارب إلى العنصر الرئيسي في النظام والذي هو نجم نيوتروني».

أعرف أن تلك السطور السابقة تبدو غير ذات أهمية؛ ومما يزيد الأمر سوءًا أنها مكتوبة بتلك اللغة التقنية الجافة لعلم الفيزياء الفلكية. لكنها الطريقة التي يتحدث بها المحترفون في أي مجال، بعضهم إلى بعض. وهدفي في قاعة المحاضرات، وكذلك دافعي الأساسي من تأليف هذا الكتاب، هو ترجمة الاكتشافات المذهلة والرائدة، بل والتي أحيانًا ما تقلب موازيين الأمور، لزملائي الفيزيائيين إلى مفاهيمَ ولغةٍ يستطيع فهمَها الأشخاص الأذكياء الشغوفون بالمعرفة — أريد أن أبني جسرًا بين عالَم العلماء المحترفين وعالَمنا. فعلى ما يبدو أن الكثير مِنّا يؤْثر الحديث مع أقرانه، مُصعبًا على معظم العوام — حتى من يريد منهم فهم العلوم — الدخول إلى عالَمنا.

لذا دعنا نأخذ فكرة شكلوفسكي ونرى ما كان يقترحه: يتكون النظام النجمي الثنائي من نجم نيوتروني ومرافق آخر تتدفق منه المادة إلى النجم النيوتروني. وهكذا يكون النجم النيوتروني «في حالة تراكم» — بعبارة أخرى، يجمع النجم النيوتروني المادة المتدفقة إليه من مرافقه، النجم المتبرع. يا لها من فكرة غريبة.

إلا أنه اتضح أن شكلوفسكي كان على صواب؛ لكن المضحك أنه كان يتحدث عن Sco X-1 في ذلك الوقت، ولم يأخذ معظمُنا كلامَه على محمل الجد. وهذا هو

الحال دائمًا مع النظريات. ولستُ أظن أن في الأمر أي إهانة لزملائي المنظرين، إذ أقول إن الغالبية العظمى من النظريات في الفيزياء الفلكية يَثْبُت خطؤها. ولذلك، فإن كثيرين منا في الفيزياء النظرية الرصدية لا يولي اهتمامًا كبيرًا للنظريات.

لقد تبيَّن أن النجوم النيوترونية في حالة التراكم تشكل بيئةً مثالية لانبعاث الأشعة السينية. فكيف أدركنا أن شكلوفسكي كان مصيبًا في طرحه؟

لم يستقر علماء الفلك على الطبيعة الثنائية لمصادر الأشعة السينية — لكن هذا لم يكن يعني بالضرورة أنها كانت نجومًا نيوترونية في حالة التراكم. وكان Cyg X-1 أول مصدر يكشف عن أسراره، وقد اتضح أنه أحد أهم المصادر في علمِ فلكِ الأشعة السينية برمته. اكتُشِف Cyg X-1 خلال رحلة استكشاف صاروخية في عام ١٩٦٤، وبالنظر إلى أنه كان مصدرًا قويًّا شديد السطوع للأشعة السينية، فقد حاز اهتمام علماء فلك الأشعة السينية منذ ذاك الوقت.

وفي وقت لاحق، وتحديدًا في عام ١٩٧١، اكتشف علماء الفلك الراديوي موجاتِ راديو صادرة من Cyg X-1. وقد حددتْ تلسكوباتهم الراديوية موقع Cyg X-1 ضمن منطقة (مربع خطأ) من السماء تبلغ حوالي ٣٥٠ ثانية قوسية مربعة، أي أصغر بحوالي عشرين مرة تقريبًا من المساحة التي كانت ستُحدد له في حالة تتبع أشعته السينية. كما راحوا يبحثون عن نظيره البصري. بعبارة أخرى، أرادوا رؤية النجم الذي يولِّد الأشعة السينية الغامضة في الضوء المرئي.

في مربع الخطأ الراديوي كان يوجد عملاق أزرق فائق شديد السطوع يُعرف بـ HDE 226868. واستنادًا إلى نوعية النجوم التي كان ينتمي إليها، استطاع العلماء مقارنته بنجوم أخرى مشابهة له للتوصل إلى تقديرات دقيقة لكتلته. وقد خلص خمسة علماء فلك، من بينهم ألان ساندیج عالم الفلك الذي كانت شهرته تبلغ الآفاق عالميًّا في ذلك الوقت، إلى أن HDE 226868 كان مجرد «عملاق فائق عادي من النوع B0 بلا أي سمات مميزة»، واستبعدوا كونه النظير المرئي لـ Cyg X-1. كما درس علماء فلك بصري آخرون (وكانوا أقل شهرةً في ذلك الوقت) النجم بدرجة أكبر من التمعن، وتوصلوا إلى اكتشافات بالغة الأهمية.

فقد اكتشفوا أن النجم أحد نجمين في نظام ثنائي بفترة مدارية تبلغ ٥,٦ يوم. وقد أصابوا إذ أوضحوا أن دفق الأشعة السينية القوي المنبعث من النظام الثنائي يرجع إلى

مراكمة الغاز المتدفق من النجم المرئي (المتبرع) إلى جرمٍ بالغ الصغر — مضغوط. وبالفعل، لا شيء يمكنه تفسير ذلك الدفق الغزير من الأشعة السينية سوى تدفق الغاز إلى جرمٍ صغير الحجم وثقيل الكتلة.

وقد أجروا قياسات تأثير دوبلر لخطوط الامتصاص في طيف النجم المتبرع أثناء دورانه في مداره (تذكر أن الأطياف تنزاح نحو الأزرق أثناء تحركها باتجاه الأرض، وتنزاح نحو الأحمر عند تحركها بعيدًا عن الأرض) وخلصوا إلى أن النجم المرافق المولد للأشعة السينية كان أضخم من أن يكون نجمًا نيوترونيًا أو قزمًا أبيض (وهو نجم مضغوط بالغ الكثافة، مثل الشعرى اليمانية ب). حسنًا، إذا كان من المستحيل أن يكون ذلك الجرم نجمًا نيوترونيًا أو قزمًا أبيض، فماذا يمكن أن يكون غير ذلك؟ بالطبع — ثقب أسود! وهذا ما اقترحه هؤلاء العلماء.

ومع ذلك، بالنظر إلى أنهم علماء نظريون، فقد صاغوا استنتاجاتهم بصيغة أكثر حذرًا. فقد صاغ كل من لويس ويبستر وبول موردين، اللذان نُشِر اكتشافهما في مجلة نيتشر في السابع من يناير من عام ١٩٧٢، استنتاجهما على النحو التالي: «تزيد كتلة الجرم المرافق على كتلتين شمسيتين على الأغلب، ومن ثم لا بد لنا من الأخذ في الحسبان افتراض أنه قد يكون ثقبًا أسود». وهذا ما كتبه توم بولتون بعد شهرٍ من ذلك في مجلة نيتشر: «وهذا يثير الاحتمال القائم بأن يكون ذلك الجرم الثانوي [المتنامي] ثقبًا أسود». يمكن الاطلاع على صورة مرسومة بالأسلوب الانطباعي لـCyg X-1 في ملحق الصور.

وهكذا، تشارك علماء الفلك العباقرة هؤلاء، ويبستر وموردين في إنجلترا، وبولتون في تورنتو، اكتشاف ثنائيات الأشعة السينية، ووجدوا أول ثقب أسود في المجرة. (لقد كان بولتون يتيه فخرًا بهذا الاكتشاف، ولسنوات كانت لوحة ترخيص سيارته Cyg X-1).

ودائمًا ما كنت أتعجب من عدم حصول ثلاثتهم على جائزة مهمة تكريمًا لهذا الاكتشاف الاستثنائي؛ فقد كان لاكتشافهم تأثير مهم في المجال، بالإضافة إلى أنهم كانوا أول من سبق لذلك الاكتشاف! فقد اكتشفوا أول نظام ثنائي تنطلق منه الأشعة السينية. كما أشاروا إلى أن الجرم المتنامي ربما يكون ثقبًا أسود. فيا له من جهد رائع!

في عام ١٩٧٥، راهن ستيفن هوكينج بنفسه، عالِمَ الفيزياء النظرية كيب ثورن،

على أن Cyg X-1 لم يكن ثقبًا أسود على الإطلاق — على خلاف ما كان يعتقد معظم علماء الفلك في ذلك الوقت. وبعد خمسة عشر عامًا فاز هوكينج أخيرًا بالرهان، وهو ما أسعده كثيرًا على حد اعتقادي، ذلك أن جُل عمله كان يتمحور حول الثقوب السوداء. ويبلغ أحدث وأدق قياس (سيُنشر عما قريب) لكتلة الثقب الأسود في Cyg X-1 حوالي ١٥ كتلة شمسية (بحسب رسالة شخصية من جيري أوروز، وطالبي السابق جيف ماكلينتوك).

وإذا كنتَ قوي الملاحظة، فأعرف أنك تحدث نفسك الآن قائلًا شيئًا من قبيل: «لحظة! لقد قلتَ لتوك إن الثقوب السوداء لا ينبعث منها أي شيء، وإنه لا شيء يمكنه الإفلات من مجال جاذبيتها. فكيف يمكن أن تنبعث منها الأشعة السينية؟». وهذا سؤال رائع، أعد بأنني سأجيب عنه في النهاية، لكن إليكم هذا الاستعراض السريع: إن الأشعة السينية المنبعثة من الثقب الأسود لا تأتي من داخل أفق الحدث — وإنما تنبعث من المادة وهي في طريقها إلى الثقب الأسود. ورغم أن الثقب الأسود تفسير لما رصدناه من ملاحظات لـCyg X-1، فإنه لا يمكن أن يكون تفسيرًا لما نرصده من انبعاثات الأشعة السينية من نظم نجمية ثنائية أخرى؛ إذ لم يكن من تفسير ممكن لتلك الانبعاثات إلا أن تكون تلك النظم النجمية ثنائيات نجمية نيوترونية، وهو ما اكتُشف بالاستعانة بالقمر الصناعي الرائع أوهورو.

لقد شهد مجال علمِ فلكِ الأشعةِ السينية تغيرًا جذريًّا في ديسمبر من عام ١٩٧٠، تزامنًا مع إطلاق أول قمر صناعيّ مخصص لعلم فلكِ الأشعةِ السينية إلى مداره. وقد سُمي القمر، الذي أُطلق من كينيا في الذكرى السنوية السابعة لاستقلالها، باسم «أوهورو» وهي المقابل لكلمة «حرية» في اللغة السواحيلية.

وقد أحدث أوهورو ثورةً لم تخمد إلى يومنا هذا. فكّر في كل ما يمكن لقمر صناعي أن يفعله؛ عمليات رصد على مدار اليوم طوال أيام العام، وكل ذلك خارج الغلاف الجوي للأرض تمامًا! لقد تمكن أوهورو من تسجيل مشاهدات لم تكن إلا ضربًا من الأحلام قبل ست سنوات من ذلك. ففي مدة تزيد قليلًا عن عامين، أجرى أوهورو مسحًا لجميع مصادر الأشعة السينية في السماء، بعدادات قادرة على رصد مصادر أقل سطوعًا بخمسمائة مرة من سديم السرطان، وأقل سطوعًا بعشرة آلاف مرة من Sco X-1. وقد اكتشف ٣٣٩ من مصادر الأشعة السينية (وقبل ذلك لم نكتشف سوى بضع عشرات من تلك المصادر) وقدّم أول خريطةِ أشعةٍ سينيةٍ للسماء بالكامل.

لقد أعادت مراصد الأقمار الصناعية، التي حررتنا من قيود الغلاف الجوي، تشكيل رؤيتنا للكون مع تمكينها لنا من رؤية الفضاء العميق — وما يكتنفه من أجرام عجيبة — عبْر كل جزء من الطيف الكهرومغناطيسي. كما وسَّع تلسكوب هابل الفضائي نطاق رؤيتنا للكون المرئي، بينما أدتْ مجموعة من مراصد الأشعة السينية المهمة نفسها لفضاء الأشعة السينية. واليوم، تراقب مراصد أشعة جاما الكون عند مستويات طاقة أعلى كثيرًا.

في عام ١٩٧١، اكتشف أوهورو نبضات تتكرر كل ٤,٨٤ ثانية صادرة من Cen X-3 (في كوكبة القنطور). وخلال فترة يوم واحد، راقب أوهورو تغيرًا في دفق الأشعة السينية بمُعامل عشرة في غضون ساعةٍ واحدة. في البداية قلَّتْ فترة النبضات ثم زادت بحوالي ٠,٠٢ و٠,٠٤ في المائة، وكل من هاذين التغييرين يحدثان في حوالي الساعة. ورغم ما ينطوي عليه ذلك من إثارة بالغة فإنه كان كذلك يُشكل لغزًا محيرًا؛ إذ من غير الممكن أن تكون تلك النبضات ناتجة عن نجمٍ نيوتروني دوّار، وذلك لأن الفترات المدارية لها معروفة بأنها ثابتة لا تتغير. وما من نباض من النباضات المعروفة يمكن أن يغير فترته المدارية بحوالي ٠,٠٤ في المائة في الساعة.

وقد اتضحتْ ملامح الصورة الآسرة عندما اكتشف فريق أوهورو لاحقًا أن Cen X-3 نظام ثنائي تبلغ دورته المدارية ٢,٠٩ يوم. أما فترة النبضات التي تبلغ ٤,٨٩ ثانية فكانت تُعزى إلى دوران النجم النيوتروني المتنامي. كانت الأدلة على ذلك دامغةً. فقد رأوا أولًا ظواهر كسوف متكررة (كل ٢,٠٩ يوم) حين يختفي النجم النيوتروني وراء النجم المانح، حاجبًا الأشعة السينية عن الرؤية. وثانيًا: استطاع الفريق قياس انزياح دوبلر خلال فترات النبضات. فحين يتحرك النجم النيوتروني باتجاهنا، تقل فترة النبضات قليلًا، فيما تطول قليلًا عند تحركه موليًا عنا. وقد نُشرتْ تلك النتائج بالغة الأهمية في مارس من عام ١٩٧٢. وقد فسّر كل ذلك بشكل تلقائي الظواهر التي نُشرتْ في ورقة بحثية عام ١٩٧١ والتي بدتْ محيرة جدًّا. لقد كان الأمر مطابقًا تمامًا لما تكهن به شكلوفسكي بالنسبة لـSco X-1: نظام ثنائي يتشكل من نجمٍ مانح ونجم نيوتروني متنامٍ.

وفي وقت لاحق من ذلك العام، اكتشف فريق جاكوني مصدرًا آخر للأشعة السينية، Hercules X-1 (أو Her X-1)، كما نحب أن نطلق عليه)؛ وقد تبين أنه نظام ثنائي آخر لما رصدوا فيه من نبضات وظواهر كسوف!

لقد كانت تلك الاكتشافات مذهلة لدرجة أنها أحدثتْ ثورة في مجال علم فلك الأشعة السينية، مهيمنةً على المجال لعقود قادمة. إن ثنائيات الأشعة السينية نادرة الوجود في الكون، فربما توجد بمعدل واحدٍ في المائة مليون نظامٍ نجميٍ ثنائي في مجرتنا. ومع ذلك، فقد صرنا نعلم الآن أن في مجرتنا، مجرة درب التبانة، عدة مئات من ثنائيات الأشعة السينية. وفي معظم الحالات، يكون الجرم المضغوط، المتنامي، قزمًا أبيض أو نجمًا نيوترونيًا، لكن ثمة نحو عشرين نظامًا نجميًا معروفًا على الأقل يكون فيها الجرم المتنامي ثقبًا أسود.

هل تذكر الدورة الزمنية البالغة ٢,٣ دقيقة التي اكتشفها فريقي في عام ١٩٧٠ (قبل إطلاق القمر الصناعي أوهورو)؟ في ذلك الوقت، لم تكن لدينا أي فكرة عن السبب وراء ذلك التغير الزمني الدوري. حسنًا، اليوم نعرف أن GX 1+4 ثنائي أشعة سينية بدورة مدارية تستغرق حوالي ٣٠٤ أيام، ونجم نيوتروني متنامٍ دوار يتم دورته المدارية في غضون ٢,٣ دقيقة.

## ثنائيات الأشعة السينية: آلية عملها

حين يقترن نجم نيوتروني بنجم مانح بالحجم المناسب وعلى مسافة مناسبة منه، فمن الممكن أن ينتج عن هذا الاقتران ألعابٌ نارية رائعة. هناك في الفضاء البعيد، تؤدي نجوم - لم يكن إسحاق نيوتن ليتخيلها - رقصةً جميلة، فيما تخضع تمامًا لقوانين الميكانيكا الكلاسيكية التي يتسنى لأي طالب جامعي دارسٍ للعلوم أن يدركها.

ولاستيعاب الأمر على نحو أفضل، دعنا نبدأ بالقرب من موطننا؛ تُشكل الأرض والقمر نظامًا ثنائيًا. إذا رسمتَ خطًا يمتد من مركز الأرض إلى مركز القمر، فستوجد نقطة على هذا الخط تكون عندها شدة الجاذبية باتجاه القمر مساوية لشدة الجاذبية باتجاه الأرض، ولكن معاكسة لها في الاتجاه. فإذا كنتَ واقفًا عند هذه النقطة، فإن محصلة القوى المؤثرة عليك ستساوي صفرًا. أما إذا كنت تقف على أحد جانبي تلك النقطة، فستقع على سطح الأرض، فيما ستسقط على سطح القمر إذا كنتَ واقفًا على الجانب الآخر من تلك النقطة. ونطلق على هذه النقطة نقطة لاجرانج الداخلية. بالطبع، تقع تلك النقطة على مقربة من القمر، وذلك لأن كتلة القمر أقل بحوالي ثمانين مرة من كتلة الأرض.

دعنا الآن نعود إلى ثنائيات الأشعة السينية المكوَّنة من نجم نيوتروني متنامٍ ونجمٍ مانح أكبر حجمًا بكثير. إذا كان الجرمان قريبان جدًّا أحدهما من الآخر، فقد تقع نقطة لاجرانج الداخلية تحت سطح النجم المانح. فإذا كان الأمر كذلك، فستتأثر بعضٌ من مادة النجم المانح بقوة جاذبية باتجاه النجم النيوتروني أشدَ من قوة الجاذبية باتجاه مركز النجم المانح. ونتيجةً لذلك، تتدفق المادة — غاز الهيدروجين الملتهب — من النجم المانح إلى النجم النيوتروني.

وبالنظر إلى أن النجمين يدوران حول مركز كتلتيهما المشترك، فإن المادة لا يمكن أن تسقط مباشرةً باتجاه النجم النيوتروني؛ لكن، قبل وصولها إلى السطح، تسقط المادة في مدار حول النجم النيوتروني، مكونةً قرصًا دوارًا من الغاز الملتهب، نطلق عليه قرص التراكم. وفي النهاية، يشق بعض الغاز في الحلقة الداخلية من القرص طريقه إلى سطح النجم النيوتروني.

وهنا ينطوي الأمر على جانبٍ فيزيائي سبق أن عرّفتكَ عليه بالفعل في سياق آخر. بالنظر إلى أن الغاز يكون ملتهبًا، فهذا يعني أنه متأين، أي تكون من بروتونات موجبة الشحنة وإلكترونات سالبة الشحنة. إلا أنه بالنظر إلى أن المجالات المغناطيسية للنجوم النيوترونية شديدةُ القوة، فإن تلك الجسيمات تتبع إجباريًّا مساراتِ المجال المغناطيسي للنجم، ومن ثم، ينتهي المطاف بمعظم هذه الجسيمات إلى القطبين المغناطيسيين للنجم النيوتروني، مثل الشفق القطبي على الأرض. وهكذا، ترتفع درجة حرارة القطبين المغناطيسيين للنجم النيوتروني (حيث تصطدم المادة بالنجم النيوتروني) لتبلغ ملايين الدرجات بمقياس كلفن، فتنبعث منها الأشعة السينية. وحيث إن القطبين المغناطيسيين لا يتوافقان بصفة عامةٍ مع قطبي محور الدوران (انظر الفصل الثاني عشر)، فإننا هنا على الأرض لا نستقبل كميات كبيرة من دفق الأشعة السينية إلا عند مواجهة بقعة مرتفعة الحرارة من النجم لكوكب الأرض. وبما أن النجم النيوتروني يدور، فإنه يظهر لنا وكأنه ينبض.

إن لكل ثنائي أشعة سينية قرص تراكم يدور حول النجم المتنامي، سواء أكان نجمًا نيوترونيًّا، أم قزمًا أبيض، أم ثقبًا أسود كما في حالة Cyg X-1. وأقراص التراكم هي واحدة من أكثر الأجرام غرابةً في الكون، وغالبًا لم يسمع عنها إلا علماء الفلك المحترفون.

وتحيط أقراص التراكم بكل ثنائيات الأشعة السينية التي يكون الجرم المتنامي فيها ثقبًا أسود. بل تدور أقراص التراكم حول الثقوب السوداء الدوارة فائقة الضخامة الموجودة في مركز كثيرٍ من المجرات، وإن لم يكن هناك قرص تراكم، كما ثبت لنا، حولَ الثقب الأسود فائقِ الضخامة في مركز مجرتنا.

وتشكل دراسة أقراص التراكم اليوم فرعًا كاملًا من الفيزياء الفلكية. ويمكنك الاطلاع على بعض الصور الرائعة لأقراص التراكم عبر هذا الرابط: www.google.com/images? hl=en&q=xray+binaries&um=1&ie=UTF. وما زال كثير مما يتعلق بأقراص التراكم خافيًا علينا. ومن ضمن أكثر المشكلات تسببًا في الإحراج لنا أننا لا نفهم جيدًا بعد الكيفية التي تشق بها المادة في قرص التراكم طريقها إلى الجرم المضغوط. بالإضافة إلى ذلك، من ضمن المعضلات الأخرى، عدم فهمنا لحالات الاضطراب في أقراص التراكم، والتي ينتج عنها تغير في تدفق المادة إلى الجرم المضغوط، وتغير في لمعان الأشعة السينية.

تبلغ المادة التي ينقلها النجم المانح إلى النجم النيوتروني المتنامي $^{١٨}١٠$ جرامات لكل ثانية. وقد يبدو هذا المقدار كبيرًا، لكن حتى بهذا المعدل يستغرق الأمر مائتي عامٍ لنقل كمية من المادة تعادل كتلة الأرض إلى النجم النيوتروني المتنامي. تتدفق المادة من القرص إلى الجرم المتنامي بفعل مجال جاذبيته الشديد، مما يزيد من سرعة الغاز إلى حد هائل، لما يتراوح بين ثلث إلى نصف سرعة الضوء تقريبًا. وتتحول طاقة وضع الجاذبية التي تطلقها هذه المادة إلى طاقة حركة (حوالي $^{٣٠}١٠\times٥$ واط) وترتفع درجة حرارة غاز الهيدروجين المتسارع لملايين الدرجات.

وكما تعلم عند ارتفاع درجة حرارة المادة فإنها تطلق إشعاع الجسم الأسود (انظر الفصل الرابع عشر). وكلما ارتفعت الحرارة، زاد الإشعاع نشاطًا، وتقل الأطوال الموجية وتزيد الترددات. وعند وصول درجة حرارة المادة إلى ما يتراوح بين ١٠ إلى ١٠٠ مليون كلفن، يكون معظم الإشعاع الذي تطلقه أشعة سينية. غالبًا ما تكون جُل الطاقة المنبعثة التي تبلغ $^{٣٠}١٠\times٥$ واط في صورة أشعة سينية؛ قِس ذلك بإجمالي لمعان الشمس ($^{٢٦}١٠\times٤$ واط) والتي يكون $^{٢٠}١٠$ واط فقط منها في صورة أشعة سينية. إن درجة حرارة سطح الشمس تُعد بمثابة مكعب ثلج بالمقارنة.

إن النجوم النيوترونية في حد ذاتها أصغر كثيرًا من أن تُرى بصريًا — إلا أن بإمكاننا رؤية النجم المانح، الذي يكون أكبر حجمًا بكثير وكذلك أقراص التراكم،

بالتلسكوبات البصرية. فأقراص التراكم يمكن أن تشع مقدارًا متوسطًا من الضوء وذلك بفضل عملية تُعرف بالتسخين بالأشعة السينية؛ فعند ارتطام المادة المتدفقة من القرص بسطح النجم النيوتروني، تنطلق الأشعة السينية في كل الاتجاهات، وهكذا ترتطم كذلك بالقرص نفسه، مما يرفع درجة حرارة القرص إلى درجات حرارة أعلى. وسأخبرك عن ذلك بمزيد من التفصيل في الفصل التالي عن انفجارات الأشعة السينية.

لقد حل اكتشاف ثنائيات الأشعة السينية أولَ لغز للأشعة السينية المنبعثة من خارج المجموعة الشمسية. واليوم ندرك السبب وراء زيادة لمعان الأشعة السينية لمصدر مثل Sco X-1 عشرة آلاف مرة عن لمعانه البصري. تنبعث الأشعة السينية من النجم النيوتروني شديد الحرارة (الذي تصل درجة حرارته إلى عشرات الملايين على مقياس كلفن)، فيما يَصدر الضوء المرئي من النجم المانح وقرص التراكم الأقل حرارة إلى حد بعيد.

حين ظننا أننا صرنا ندرك جيدًا كيفية عمل ثنائيات الأشعة السينية، كانت الطبيعة تخبئ لنا مفاجأة جديدة. وشرع علماء فلك الأشعة السينية في التوصل لاكتشافات رصدية تتجاوز النماذج النظرية.

وفي عام ١٩٧٥، توصلتُ إلى اكتشاف غريب بلغتُ به ذروة مساري المهني العلمي؛ فقد صرتُ منغمسًا تمامًا في جهود رصد تلك الظواهر الرائعة والغامضة، التي تُعرف بانفجارات الأشعة السينية، ودراستها وتفسيرها.

تتضمن قصتي مع انفجارات الأشعة السينية جزءًا يتعلق بمعركة خضتها في مواجهة علماء روس أساءوا تمامًا تفسير البيانات التي حصلوا عليها، وكذلك في مواجهة بعضٍ من زملائي في هارفارد، الذين كانوا يعتقدون أن انفجارات الأشعة السينية تنبعث من الثقوب السوداء العملاقة (يا للثقوب السوداء البائسة، إنها تتلقى اللوم عن أشياء كثيرة). صدق أو لا تصدق، لقد دُعيتُ أكثر من مرة لئلا أنشر بعضًا من البيانات التي حصلتُ عليها بخصوص تلك الانفجارات لأسبابٍ تتعلق بالأمن القومي.

# الفصل الرابع عشر

## انفجارات الأشعة السينية!

إن الطبيعة مليئة بكثيرٍ من المفاجآت، وقد هزتْ مفاجأتها لنا في عام ١٩٧٥ مجتمع علماء فلك الأشعة السينية. استفحلت الأمور لدرجة أن الانفعالات أحيانًا ما كانت تخرج عن السيطرة، وكنتُ أنا في خضم كل ذلك. فقد ظللتُ لسنوات في جدل دائر مع زميلٍ لي في هارفارد (لكنه لم يُصغ إليّ أبدًا)، لكن الحظ حالفني مع زملائي الروس (الذين أحسنوا الإصغاء إليّ). ونظرًا لدوري المحوري في كل ذلك، فقد يتعذّر عليّ أن أكون موضوعيًا، لكني سأحاول قدر استطاعتي.

كان الاكتشاف الجديد هو انفجارات الأشعة السينية. وقد اكتُشفتْ في عام ١٩٧٥ بفضل الجهود المنفصلة لكل من جريندلاي وهايس بالاستعانة ببيانات من القمر الصناعي الفلكي الهولندي؛ وبِليان، وكونر، وإيفانز بالاستعانة ببيانات من قمري التجسس الأمريكيين فيلا ٥ "Vela-5" اللذين كان الهدف منهما رصد التجارب النووية. كانت انفجارات الأشعة السينية مختلفةً تمامًا عن التغاير الذي اكتشفناه في الأشعة السينية المنبعثة من Sco X-1، والتي كانت تتوهج بمُعامل أربعة على مدى عشر دقائق، وكانت تستمر لعشرات الدقائق. أما انفجارات الأشعة السينية، فقد كانت أسرع كثيرًا، وأعلى سطوعًا، ولم تكن تمكث إلا لعشرات الثواني.

كان لدينا قمر صناعيّ خاص في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (أُطلق في مايو من عام ١٩٧٥) ويُسمى بالقمر الصناعي الفلكي الصغير الثالث، SAS-3. وهو ليس بالاسم الرومانسي مثل «أوهورو»، لكن ذلك العمل كان الأكثر استحواذًا على انتباهي على مدار حياتي بأسرها. علمنا بأمر مفجرات الأشعة السينية، وشرعنا في البحث عنها في يناير من عام ١٩٧٦؛ وبحلول مارس من العام نفسه، كنا عثرنا على خمسة منها بأنفسنا. وبنهاية العام نفسه، عثرنا على إجمالي عشرة مفجرات. وبفضل حساسية القمر الصناعي SAS-3، وطريقة إعداده، تبين أنه الأداة الأمثل لاكتشاف مصادر انفجارات

الأشعة السينية ودراستها. بالطبع، لم يكن ذلك القمر الصناعي قد صمم خصوصًا لرصد انفجارات الأشعة السينية؛ ومن ثم، فقد كان الأمر ينطوي قليلًا على شيء من حسن الحظ. ربما ترى ذلك الدور المحوري الذي لعبه الحظ في حياتي! كنا نتلقى منه بيانات مذهلة – وكأن قطعًا من الذهب تنهال علينا من السماء كل يوم، على مدار أربعٍ وعشرين ساعة. وكنتُ أنا أعمل على مدار الساعة. وقد كنتُ مهووسًا بهذا العمل بقدر ما كنتُ مكرسًا نفسي له. لقد كانت فرصة لا يجود بها العمر مرتين، أن يكون لديك مرصد أشعة سينية يمكنك توجيهه في أي اتجاه تريد فيأتي لك ببيانات عالية الجودة.

والواقع أننا جميعًا أُصبنا بحالة أشبه بـ»حمى المفجرات»، الطلاب الجامعيون، وطلاب الدراسات العليا، وطاقم الدعم، وباحثو ما بعد الدكتوراه، وطاقم التدريس — وما زلت إلى اليوم أتذكر ذلك الشعور الذي كنا نشعر به، شعورًا أشبه بشعلة من الطاقة الإيجابية. وقد قُسمنا إلى فرق رصد مختلفة، وهو ما فرض علينا جميعًا الدخول في حالة تنافس، حتى إن أحدنا ينافس الآخر في كل فرقة. لم يكن ذلك الحال يروق لبعضنا، لكن دعني أقول إنني أعتقد أن هذه الحالة دفعتنا إلى الكد والاجتهاد في العمل، وقد كانت النتائج العلمية رائعة.

وقد كانت عواقب هذا المستوى من الهوس وخيمةً على حياتي الزوجية، وكذلك على عائلتي أيضًا. كانت مسيرتي العلمية تتحسن بدرجة مهولة، لكن زواجي الأول انهار. ولا شك أن هذا كان خطئي. لسنوات كنت أتغيب عن منزلي شهورًا لأجل إطلاق المناطيد في النصف الآخر من العالم. وحتى بعد أن صار لدينا قمر صناعي خاص بنا، لم يتغير الأمر كثيرًا عما كان حين كنت أسافر إلى أستراليا.

لقد صارت مصادر الانفجارات بمثابة العائلة لي؛ فعلى كل حال، كنا نعيش معها وننام ونحن نفكر فيها، وندرسها بالتفصيل. وعلى غرار الأصدقاء، كان كل مصدر من تلك المصادر فريدًا من نوعه، له سماته الخاصة. وحتى الآن، يمكنني تمييز كثيرٍ من تلك الملامح المميزة لتلك الانفجارات.

كانت معظم المصادر تقع على بعد ٢٥,٠٠٠ سنة ضوئية، مما مكننا من حساب إجمالي طاقة الأشعة السينية في كل انفجار (في أقل من دقيقة) والتي كانت تبلغ حوالي $^{٣٢}١٠$ جول، وهو رقم ربما يكون استيعابه مستحيلًا. لذا، تأمل الأمر على النحو التالي: تستغرق الشمس حوالي ثلاثة أيام لتطلق $^{٣٢}١٠$ من الطاقة بجميع الأطوال الموجية.

تقع بعض هذه الانفجارات على فترات منتظمة أشبه بانتظام الساعة، مثل تلك الانفجارات التي تقع في MXB 1659-29، الذي تقع فيه الانفجارات بفاصل زمني ٢,٤ ساعة، فيما تتغير الفواصل الزمنية بين الانفجارات في مصادر أخرى من ساعات إلى أيام، وثمة مصادر لم تقع فيها أي انفجارات للأشعة السينية على الإطلاق لعدة أشهر. يرمز حرف M في MXB إلى معهد ماساتشوستس للتقنية، وحرف X إلى الأشعة السينية، وحرف B إلى الحرف الأول من الكلمة الإنجليزية burster، «مفجر». أما الأرقام فتشير إلى الإحداثيات السماوية للمصدر طبقًا لما يُعرَف بنظام الإحداثيات السماوية. وهو نظام مألوف بلا شك بين هواة علم الفلك من بينكم.

كان السؤال المحوري بالطبع هو ما السبب وراء تلك الانفجارات؟ تملَّك الحماس اثنين من زملائي في جامعة هارفارد (أحدهما جوش جريندلاي، الذي شارك في اكتشاف انفجارات الأشعة السينية) فاقترحَا في عام ١٩٧٦ أن تلك الانفجارات ناتجة عن ثقوب سوداء تتجاوز كتلتها كتلة الشمس بعدة مئات من المرات.

وسرعان ما اكتشفنا بعد ذلك أن الأطياف خلال انفجارات الأشعة السينية تشبه الأطياف المنبعثة من جسمٍ أسود مبرِّد. والجسم الأسود ليس ثقبًا أسود. إنه بنية مثالية في الإحلال محل أي جسم، حيث تمتص كل الإشعاع المسلط عليها دون أن تعكس أيًّا منه. (وكما تعلم، يمتص الأسود الإشعاع، بينما الأبيض يعكسه — ولهذا السبب في فصل الصيف، إذا تركت سيارة سوداء في ميامي في باحة انتظار السيارات على أحد الشواطئ، فإن درجة الحرارة داخلها تكون دائمًا أعلى كثيرًا مقارنة بها في سيارة بيضاء). الأمر الآخر عن الجسم الأسود المثالي هو أن الإشعاع الوحيد المنبعث منه — بالنظر إلى أنه لا يعكس أي شيء — هو الإشعاع الناتج عن حرارته. فكر في عنصر التسخين في الفرن الكهربائي؛ عند بلوغه درجة حرارة الطهي، فإنه يبدأ في التوهج باللون الأحمر، مصدرًا ضوءًا أحمر منخفض التردد. ومع ارتفاع درجة حرارته أكثر، يتحول إلى اللون البرتقالي، ثم الأصفر، وعادة ما لا يتجاوز ذلك. وعند فصل الكهرباء، يبرد العنصر، ويصبح الإشعاع المنبعث منه أقرب شبهًا تقريبًا بذيل الانفجار. ومن المعروف عن أطياف الأجسام السوداء أنه عند قياس الطيف على مدار الوقت، يمكنك حساب درجة الحرارة وهي تنخفض.

وبالنظر إلى أننا ندرك آلية عمل الجسم الأسود جيدًا، يمكننا استنباط الكثير عن الانفجارات استنادًا إلى أساسيات الفيزياء، وهو أمر مدهش بحق. هكذا، كنا نحلل

أطياف انبعاث الأشعة السينية لمصادر مجهولة تبعد عنا بـ٢٥,٠٠٠ سنة ضوئية، وحققنا إنجازات علمية بالاستعانة بمبادئ الفيزياء ذاتها التي يتعلمها طلاب السنة الأولى في معهد ماساتشوستس للتقنية!

ونعلم أن إجمالي لمعان الجسم الأسود (مقدار الحرارة المنبعثة منه لكل ثانية) يتناسب مع القوة الأسية الرابعة لدرجة حرارته (وهذا ليس بالأمر البديهي على أي حال)، كما يتناسب مع مساحة سطحه (وهذا أمر بديهي — كلما زادت مساحة السطح، زاد مقدار الطاقة المنبعثة منه). وبذلك، إذا كان لدينا كرتان يبلغ قطر كل منهما مترًا، وإحداهما أعلى حرارة من الأخرى بمقدار الضعف، فإن الكرة الأعلى حرارة تطلق طاقة أكثر بست عشرة مرة (٢٤) لكل ثانية. وبما أن مساحة سطح الكرة تتناسب مع مربع نصف قطرها، فإننا نعلم كذلك أنه إذا ظلتْ درجة حرارة الجسم ثابتة مع تضاعف حجمه ثلاث مرات، فإن الطاقة التي يصدرها لكل ثانية تتضاعف تسع مرات.

إن طيف الأشعة السينية في أي لحظة من زمن الانفجار يخبرنا بدرجة حرارة الجسم الأسود للجسم الذي تنبعث منه الأشعة. فخلال الانفجار، ترتفع درجة الحرارة بسرعة إلى حوالي ٣٠ مليون كلفن، ثم تقل ببطء بعد ذلك. لكن بما أننا نعلم تقريبيًّا المسافة التي تبعدها تلك المفجرات عنا، فيمكننا أيضًا حساب لمعان المصدر في أي لحظة أثناء الانفجار. لكن ما إن تعلم درجة حرارة الجسم الأسود واللمعان، يمكنك حساب نصف قطر الجرم الذي تنبعث منه الأشعة السينية، وهذا أيضًا ممكن خلال أي لحظة من زمن الانفجار. وكان جان سوانك، من مركز جودارد لرحلات الفضاء التابع لناسا، أول من يفعل ذلك؛ ولم نلبث في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا أن خلصنا إلى أن مصدر تلك الانفجار جسم مُبرِّد بنصف قطر يبلغ حوالي عشرة كيلومترات. وقد كان ذلك دليلًا قويًّا على أن مصادر الانفجارات كانت نجومًا نيوترونية، وليست ثقوبًا سوداء عملاقة. وإذا كانت نجومًا نيوترونية، فمن المرجح أنها ثنائيات أشعة سينية.

كانت عالمة الفلك الإيطالية لورا مِريشي في زيارة لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في عام ١٩٧٦ حين دلفتْ إلى مكتبي ذات يوم من أيام فبراير، مقترحة عليّ أن تلك الانفجارات ناتجة عن ومضات نووية حرارية، وهي انفجارات نووية حرارية ضخمة على أسطح النجوم النيوترونية المتنامية. فعند التحام الهيدروجين بنجم نيوتروني، تتحول طاقة وضع الجاذبية إلى حرارة مهولة تؤدي إلى انبعاث الأشعة السينية (انظر الفصل السابق). لكن مع تراكم تلك المادة الملتحمة على سطح النجم

النيوتروني، بحسب اقتراح مِريشي، فإنها قد تخضع لاندماج نووي في عملية جامحة (مثلما يحدث في القنابل الهيدروجينية) وهذا قد ينتج عنه انفجار الأشعة السينية. وربما يحدث الانفجار التالي بعد ساعات قلائل عند تراكم ما يكفي من الوقود النووي للاشتعال. وقد أوضحتْ مِريشي بعملية حسابية بسيطة، كتبتها على سبورتي، أن المادة التي تتجه بمعدل يعادل نصف سرعة الضوء إلى سطح نجمٍ نيوتروني تطلق مقدارًا من الطاقة يفوق كثيرًا مقدار الطاقة التي تُطلق من الانفجارات النووية الحرارية، وهذا ما أثبتته البيانات.

وقد أذهلني ذلك الشرح؛ لقد بدا لي منطقيًّا. فالانفجارات النووية الحرارية تفسير مناسب جدًّا. فنمط التبريد الذي رصدناه خلال الانفجارات منطقي إذا كان ما نراه انفجارًا هائلًا على سطح نجمٍ نيوتروني. كما أن نظرية مِريشي فسرت الفاصل الزمني بين الانفجارات جيدًا بالنظر إلى أن المادة اللازمة للانفجار لا بد أن تتراكم على مر الوقت. وبالمعدل الطبيعي للتراكم، يستغرق الأمر بضع ساعات لمراكمة كتلة حرجة، وهو نفس الفاصل الزمني الذي رصدناه في كثير من مصادر الانفجار.

لديّ، في مكتبي، مذياع غريب دائمًا ما يثير اضطراب زائريَّ؛ حيث يعمل المذياع ببطارية تُشحن بالطاقة الشمسية، ومن ثم، يعمل المذياع حين تكون البطارية مشحونة بما يكفي من الطاقة. وهكذا، بينما يقبع المذياع هناك يمتص أشعة الشمس، يمتلئ بالطاقة تدريجيًّا (وهو ما يكون بمعدل أقل كثيرًا في فصل الشتاء)، ثم كل عشر دقائق تقريبًا — وأحيانًا أكثر إذا كان الطقس سيئًا — يبدأ في العمل فجأة، لبضع ثوانٍ فقط حيث إنه سرعان ما يستهلك إمداده من الكهرباء. هل بلغتك الفكرة؟ إن تنامي الطاقة في بطارية هذا المذياع أشبه بتنامي المادة المتراكمة على سطح النجم النيوتروني؛ فحين تصل إلى المقدار المناسب، يقع الانفجار، ثم يخمد بعد ذلك.

بعد زيارة مِريشي بعدة أسابيع، وتحديدًا في الثاني من مارس من عام ١٩٧٦، وفي خضم إحدى نوبات السباق المحموم لاكتشاف مصادر انفجارات الأشعة السينية، اكتشفنا مصدرًا للأشعة السينية أطلقتُ عليه MXB 1730-335 يُصدر بضعة آلاف من تلك الانفجارات في اليوم الواحد. وكانت الانفجارات تبدو كالنيران التي تطلقها البندقية الآلية — وكثير منها لم تكن تفصل بينه سوى ست ثوانٍ! ولا يمكنني وصف مدى ما بدا عليه ذلك لنا من غرابة. فذلك المصدر (الذي يُطلق عليه الآن المفجر السريع) كان شاذًّا عن القاعدة، ولم يلبث أن دحض فكرة مِريشي. وذلك للأسباب

التالية؛ أولًا: من المحال أن تتراكم على سطح نجمٍ نيوتروني في ست ثوانٍ كمية كافية من الوقود النووي لإحداث انفجار نووي حراري. والأمر لا يقتصر على ذلك، فلو كانت تلك الانفجارات نتيجةً ثانوية للتراكم، لرأينا بالتأكيد دفق أشعة سينية بسبب التراكم وحده (تحرير طاقة وضع الجاذبية) تتجاوز طاقتها طاقة تلك الانفجارات، لكن الأمر ليس كذلك. وهكذا، في أوائل مارس من عام ١٩٧٦، دُحضتْ نظرية الانفجار النووي الحراري لمِريشي لتلك الانفجارات تمامًا. في المقال الذي نشرناه عن 335-MXB 1730، اقترحنا أن تكون الانفجارات ناتجة عن «تراكم متقطع» على سطح النجم النيوتروني. بعبارة أخرى، ذلك التدفق الثابت في معظم ثنائيات الأشعة السينية للمادة الساخنة من قرص التراكم إلى النجم النيوتروني يكون غير منتظم مطلقًا في حالة «المفجر السريع».

عندما أجرينا قياسات الانفجارات على مدار الوقت، وجدنا أنه كلما كان الانفجار أكبر، كان الفاصل الزمني بينه وبين الانفجار التالي أطول. وقد يتراوح الفاصل الزمني بين الانفجار والانفجار الذي يليه ما بين ست ثوانٍ وثماني دقائق. ويتبع البرق نمطًا مشابهًا لذلك. فعندما تظهر صاعقة برق كبيرة، فإن التفريغ الكهربائي الكبير يعني أن الفاصل الزمني قبل صاعقة البرق التالية لا بد أن يكون أطول، وذلك حتى يستجمع المجال الكهربائي جهده وصولًا إلى نقطة تمكنه من التفريغ الكهربائي من جديد.

وفي وقت لاحق من ذلك العام، ظهرتْ ترجمة لورقة بحثية روسية عن انفجارات الأشعة السينية من العدم؛ وكانت الورقة البحثية تفيد برصد انفجارات في عام ١٩٧١ بمساعدة القمر الصناعي كوسموس ٤٢٨؛ أذهلتنا المفاجأة؛ فقد اكتشف الروسيون انفجارات أشعة سينية، وهكذا فازوا على الغرب! ومع ذلك، مع تزايد معلوماتي عن تلك الانفجارات، بدأتُ أتشكك. فقد كانت الانفجارات التي اكتشفها الروس تسلك مسلكًا مختلفًا عن كثيرٍ من الانفجارات التي رصدتُها بالاستعانة بالقمر الصناعي SAS-٣ مما جعلني أرتاب فيما إذا كانت الانفجارات التي ذكرها الروس حقيقية من الأساس. شككتُ في أنها إما انفجارات من فعل الإنسان أو أنها وقعتْ بالقرب من الأرض على نحو غريب وشاذ. لكن الستار الحديدي صعب عليّ مهمة تحري الأمر، لم تكن من وسيلة لإيجاد الحقيقة. ومع ذلك، حالفني الحظ بدعوة لحضور مؤتمر عالي المستوى في الاتحاد السوفيتي في صيف عام ١٩٧٧؛ ولم يُدع إلى المؤتمر سوى اثني عشر عالم فيزياء فلكية روسي واثني عشر عالم فيزياء فلكية أمريكيّ؛ وهناك

التقيتُ للمرة الأولى بالعلماء ذائعي الصيت على مستوى العالم: جوزيف شلوفسكي، وروال ساغديف، وياكوف زيلدوفيش، وراشد سنييف.

وقد ألقيتُ محاضرة — نعم كما خمنتَ — عن انفجارات الأشعة السينية، وقد سنحتْ لي الفرصة للقاء مؤلفي الورقة البحثية التي ذكرتُها سابقًا. وقد تفضلوا بعرض بيانات انفجارات كثيرة عليّ، أكثر بكثير من تلك التي نشروها في عام ١٩٧٥. وسرعان ما تيقنتُ أن الأمر برمته محض هراء، لكني لم أخبرهم بذلك، على الأقل ليس في المرة الأولى. فقد ذهبتُ أولًا لزيارة رئيسهم في العمل، روال ساغديف، الذي كان في ذلك الوقت يشغل منصبَ مدير معهد أبحاث الفضاء التابع لأكاديمية علوم الاتحاد السوفييتي في موسكو. أخبرته برغبتي في مناقشة مسألة دقيقة معه؛ فاقترح علي ألا نفعل في مكتبه (حيث كانت أجهزة التصنت في كل مكان من حولنا)، وهكذا خرجنا من المكان. عرضتُ عليه أسباب اعتقادي أن الانفجارات التي وردتْ في ورقتهم البحثية ليستْ كما يظنونها — وقد أعرب عن تفهمه على الفور. كما أعربتُ له عن خشيتي من أن إخبار العالم ربما يُعرض هؤلاء الباحثين لأزمة كبيرة في ظل النظام السوفييتي. فطمأنني إلى أن ذلك لم يكن ليحدث، وحثني على لقائهم وإخبارهم بما أخبرته به لتوي بالضبط. وقد فعلتُ، وكانت تلك هي المرة الأخيرة التي نسمع فيها عن اكتشافات روسية لانفجارات أشعة سينية. وأود أن أضيف أننا ما زلنا أصدقاء إلى اليوم!

ربما ينتابك الفضول لمعرفة مصدر تلك الانفجارات التي ذكرها العلماء الروس في بحثهم. لم أكن أعلم وقتها، لكنني صرتُ اليوم أعرف؛ لقد كانت الانفجارات مفتعلة، ولك أن تتخيل من فعلها — إنهم الروس أنفسهم! وسأكشف لك عن حل هذا اللغز بعد قليل.

لكن الآن، دعنا نعود إلى انفجارات الأشعة السينية الحقيقية، التي ما زلنا نحاول فهمهما إلى اليوم. عند اصطدام الأشعة السينية للانفجارات بقرص التراكم (أو بالنجم المانح) لثنائي الأشعة السينية، ترتفع درجة حرارة القرص والنجم، ويتوهجان بالضوء لبرهة في الجزء المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي. وبالنظر إلى أن الأشعة السينية ستنتقل أولًا إلى القرص والنجم المانح، فقد توقعنا أن أي وميض يصدر عن القرص كان سيصل إلينا في غضون ثوانٍ من انفجار الأشعة السينية. هكذا، رحنا نبحث عن انفجارات أشعة سينية وانفجارات مرئية منسقة. وقد كان طالبِي السابق في الدراسات العليا، جيف ماكلينتوك وزملاؤه، أولَ من حدد مصادر انفجارات

مرئية (MXB 1636-53 و MXB 1735-44) في عام ١٩٧٧. وقد صار هاذان المصدران هدفًا لنا.

هل أدركتَ الآلية التي يعمل بها العلم؟ إذا كانت النظرية صحيحة، فلا بد من وجود تبعات مشهودة لها. في صيف عام ١٩٧٧، رتبتُ مع زميلي وصديقي جيفري هوفمان عملية رصد لانفجارات أشعة سينية وموجات راديو وانفجارات مرئية وانفجارات أشعة تحت حمراء متزامنة على مستوى العالم.

كانت مغامرة ممتعة في حد ذاتها. وقد كان علينا أن نُقنع علماء فلك في أربعة وأربعين مرصدًا من أربعة عشر بلدًا بتخصيص فترة رصد طويلة خلال الساعات المفضلة (والتي تُعرف بـ«الوقت الحالك»، وذلك عند غياب القمر) للحملقة في نجم واحدٍ خافت — قد لا يتأتى عنه أي شيء. إن استعدادهم للمشاركة يعكس مدى أهمية لغز انفجارات الأشعة السينية بالنسبة للعلماء. وعلى مدار خمسة وثلاثين يومًا، رصدنا بالاستعانة بالقمر الصناعي SAS-3 ١٢٠ انفجار أشعة سينية من مصدر الانفجارات MXB 1636-53، إلا أن التلسكوبات الموجودة على الأرض لم ترصد أي انفجارات. يا لخيبة الأمل!

ربما تتصور أننا اضطررنا للاعتذار لزملائنا حول العالم، لكن الواقع أنه ما من أحد منهم رأى في الأمر مشكلة. وهذا هو جوهر العلم.

ومن ثم، عاودنا الكرة مجددًا في العام التالي بالاستعانة بتلسكوبات عملاقة فقط على الأرض. كان جيف هوفمان قد غادر إلى هيوستن ليصبح رائد فضاء، لكن لين كومينسكي، طالبِي في الدراسات العليا، وعالم الفلك الهولندي يوهانس فان بارادايس (الذي التحق بمعهد ماساتشوستس في سبتمبر من عام ١٩٧٧) شاركاني في عمليات رصد الانفجارات في عام ١٩٧٨.[1] في تلك المرة، وقع الاختيار على MXB 1735-44. وفي ليلة الثاني من يونيو من عام ١٩٧٨، نجحنا! فقد رصد جوش جريندلاي وزملاؤه (بما في ذلك ماكلينتوك) انفجارًا بصريًّا عبر التلسكوب ذي الفتحة البالغ قطرها ١,٥ متر في مرصد كرو تولولو في تشيلي، وذلك بعد ثوانٍ من رصدنا في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا انفجار أشعة سينية بالاستعانة بـSAS-3. وتصدرنا بذلك الصفحة الأولى من مجلة «نيتشر»، وهو ما كان شرفًا كبيرًا لنا. وقد دعم هذا العمل

(١) لم أكن أعلم في ذلك الوقت أنني أنا ويوهانس سنصبح صديقين مقربين جدًّا، وأننا سنشترك في تأليف حوالي ١٥٠ مؤلَّفًا علميًّا قبل موته المفاجئ في عام ١٩٩٩.

قناعتنا بأن انفجارات الأشعة السينية تأتي من ثنائيات الأشعة السينية.

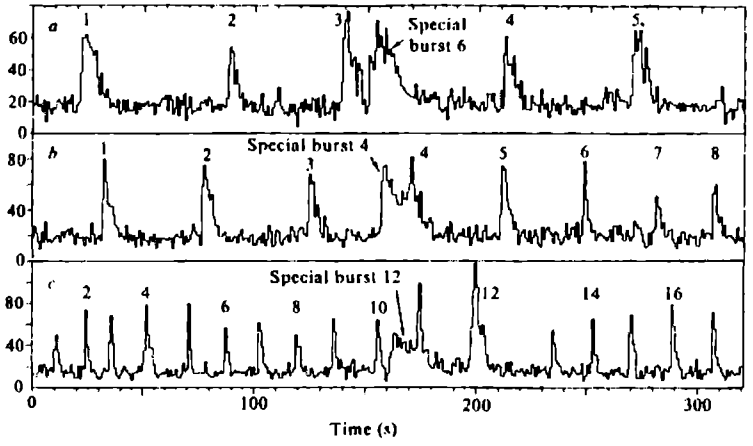
أما الأمر الذي استشكل علينا فهمه كثيرًا فهو السبب في أن جميع مصادر الانفجارات، باستثناء واحدٍ فقط، تُصدر عدة انفجارات على مدار اليوم الواحد، ولماذا كان «المفجر السريع» يتصرف على نحو مختلف تمامًا. وقد جاءتنا الإجابة مع أروع الاكتشافات على مدار مساري المهني وأعجبها.

إن «المفجر السريع» يندرج تحت ما نُطلق عليه مصدرًا عابرًا. كذلك Cen X-2 مصدر عابر (انظر الفصل الحادي عشر). لكن المفجر السريع من النوع الذي يُطلق عليه مصدر عابر متكرر. في سبعينيات القرن العشرين، كانت الانفجارات تنشط في المفجر السريع كل ستة أشهر، لكن هذا النشاط كان يستمر لعدة أسابيع فقط ثم يخمد بعدها.

بعد عام ونصف العام من اكتشافنا المفجر السريع، لاحظنا شيئًا في سمات انفجاراته حوَّل هذا المصدر اللغز إلى مفتاح لفك شفرات مفجرات الأشعة السينية. وفي خريف عام ١٩٧٧، حين نشط المفجر السريع مرة أخرى، درس طالبِي الجامعي، هيرمان مارشال، سمات انفجار الأشعة السينية دراسة تدقيقية، واكتشف نوعًا مختلفًا من الانفجارات بين الانفجارات بالغة السرعة، وهو نوع كان يتكرر بمعدل أقل بكثير، كل ثلاث أو أربع ساعات تقريبًا. وعلى تلك الانفجارات المميزة، حسبما أطلقنا عليها في البداية، ظهرتْ سماتٌ شبيهة بتبريد الجسم الأسود التي كانت تميز جميع الانفجارات المرصودة في كثيرٍ من مصادر الانفجارات الأخرى. بعبارة أخرى، ربما ما كنا نطلق عليه انفجارات مميزة — والتي أطلقنا عليها لاحقًا الانفجارات من النوع الأول، وأطلقنا على الانفجارات السريعة اسم الانفجارات من النوع الثاني — لم تكن مميزة على الإطلاق. كان من الواضح أن الانفجارات من النوع الثاني ناتجة عن التراكم المتقطع — لم يكن من شك في ذلك قط — لكن ربما كانت انفجارات النوع الأول الشائعة ناتجة عن انفجارات نووية حرارية على سطح النجوم النيوترونية على أية حال. وسأخبرك عما قريب عن كيفية فهمنا ذلك — اصبر معي قليلًا.

في خريف عام ١٩٧٨، أجرى زميلي بول جوس في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا بعض الحسابات الدقيقة المتعلقة بطبيعة الانفجارات النووية الحرارية على سطح النجوم النيوترونية. وقد خلص إلى أن الهيدروجين المتراكم يندمج أولًا في هدوء مكونًا الهيليوم، لكن الهيليوم، ما إن تبلغ كتلته وضغطه ودرجة حرارته نقطة حرجة، فإنه ينفجر انفجارًا عنيفًا مسببًا وميضًا نوويًّا حراريًّا (وهكذا تقع الانفجارات من

النوع الأول). وقد أدى هذا الاستنتاج بدوره إلى توقع أن طاقة الأشعة السينية التي تتحرر في التراكم الثابت تفوق الطاقة المتحررة في الانفجارات النووية الحرارية بمائة مرة تقريبًا. بعبارة أخرى، كان مقدار طاقة وضع الجاذبية المتاح أكبر بحوالي مائة مرة من الطاقة النووية المتاحة.




انفجارات الأشعة السينية من المفجر السريع المكتشفة بالاستعانة بالقمر الصناعي SAS-3 في خريف عام ١٩٧٧. يمثل ارتفاعُ الخط عددَ الأشعة السينية المرصود في حوالي ثانية، فيما يمثل المحور الأفقي الزمن. ويوضح كل قطاع من الشكل حوالي ٣٠٠ ثانية من البيانات. الانفجارات سريعة التكرار من النوع الثاني مرقمة ترقيمًا تسلسليًا. وفي كل قطاع يظهر «انفجار مميز» واحد؛ يتخذ كل منها رقمًا مختلفًا؛ وهي انفجارات من النوع الأول (انفجارات نووية حرارية). هذا الشكل من مقال هوفمان ومارشال ولوين، المنشور في نيتشر، عدد السادس عشر من فبراير لعام ١٩٧٨.

لقد قسنا إجمالي مقدار الطاقة المنبعثة في صورة أشعة سينية من المفجر السريع خلال عمليات الرصد التي قمنا بها في خريف عام ١٩٧٧، والتي استغرقتْ خمسة أيام ونصف اليوم، وقد وجدنا أن مقدار الطاقة المنبعثة من انفجارات النوع الثاني يفوق الطاقة المنبعثة من انفجارات النوع الأول بحوالي ١٢٠ مرة. وقد كانت تلك بمثابة نقطة فاصلة! فقد أدركنا هنالك أن المفجر السريع ثنائي أشعة سينية، وأن انفجارات النوع الأول ناتجة عن ومضات نووية حرارية على سطح نجم نيوتروني متنامٍ وأن انفجارات النوع الثاني ناتجة عن تحرر طاقة وضع الجاذبية للمادة المتدفقة من النجم المانح إلى النجم النيوتروني. لم يكن من شكوك بهذا الشأن بعد ذلك؛ ومنذ ذلك الوقت، أدركنا

أن كل مصادر انفجارات النوع الأول ثنائيات أشعة سينية ذات نجومٍ نيوترونية. وفي الوقت ذاته، كنا نعلم قطعًا أن الثقوب السوداء لا يمكن أن تكون مصدر الانفجارات. فالثقوب السوداء ليس لها أسطح، ومن ثم، لا يمكن أن تنتج انفجارات نووية حرارية.

ومع أنه بحلول عام ١٩٧٨ صار واضحًا لنا جميعًا أن مصادر الانفجارات كانت ثنائيات نجوم نيوترونية متنامية، كان جريندلاي، زميلي في هارفارد، ما زال مُصرًا على أن الانفجارات في الواقع كانت تنتج عن ثقوب سوداء ضخمة؛ حتى إنه نشر ورقة بحثية في عام ١٩٧٨ حاول فيها شرح الكيفية التي تُنتج بها الثقوب السوداء شديدة الضخامة الانفجارات. سبق أن أخبرتُك أن العلماء قد يرتبطون عاطفيًا بنظرياتهم. وقد نشرتْ صحيفة «ذا ريبل بيبر» التي تُنشر في كمبريدج مقالًا طويلًا بعنوان «هارفارد ومعهد ماساتشوستس للتقنية في موقف حرجٍ»، وقد ألحقتْ المقال بصورتين لي أنا وجريندلاي.

وقد وجدنا دليلًا على الطبيعة الثنائية لمصادر الانفجار في عام ١٩٨١ حين اكتشفتُ أنا وصديقي الدانماركي هولجر بيدرسون، ويوهانس فان بارادايس، أن الدورة المدارية لمصدر الانفجارات MXB 1636-53 تبلغ ٣,٨ ساعة. لكن جريندلاي لم يقر بصحة نظريتنا إلا مؤخرًا في عام ١٩٨٤.

وهكذا، كان أغرب مصادر الأشعة السينية، المُفجر السريع، هو ما ساعدنا في التحقق من صحة نظرية انفجارات الأشعة السينية العادية (النوع الأول)، والتي كانت محيرةً في حد ذاتها. فعلى الرغم من كل ما وُضِّح، ظل المفجر السريع لغزًا محيرًا تقريبًا. لقد ظل مصدر حيرة للمنظرين، وإن لم يكن كذلك بالقدر ذاته بالنسبة للمراقبين. أفضل ما أمكننا القيام به، بل أفضل ما كان بوسعنا القيام به على الإطلاق في بعض المناحي، هو التوصل إلى تفسير «التراكم المتقطع» — أعلم أنه يبدو وكأنه شيء يمكن أن تراه خلال قضائك إجازة في إحدى المناطق الطبيعية النائية. لكن الحقيقة، أن الأمر مجرد تفسيرات نظرية ولا تنبني على أي أساس فيزيائي. فبنحو ما، تمكث المادة المتدفقة إلى النجم النيوتروني مؤقتًا في قرص التراكم قبل تحرر فقاعة أو حلقة من المادة من قرص التراكم منطلقة إلى سطح النجم، مما يحرر طاقة وضع الجاذبية في شكل انفجارات. ونصِف هذا التحرر باضطراب القرص، لكن هذه مجرد نظرية، فما من أحد يعلم سبب حدوث ذلك أو كيفية حدوثه.

في الحقيقة، لا نفهم الميكانيكية التي يقوم عليها السلوك المؤقت المتكرر لمصادر الأشعة السينية. لِمَ تتوهج وتخفتْ ثم تتوهج ثم تخفتْ؟ لا نعلم الإجابة عن ذلك. في إحدى المرات في عام ١٩٧٧، شرعنا نرصد انفجارات متزامنة عبر جميع كواشف القمر الصناعي SAS-3. وقد كان ذلك غريبًا، وذلك لأن تلك الكواشف كانت تراقب السماء في اتجاهات مختلفة تمامًا. التفسير المنطقي الوحيد الذي أمكننا التوصل إليه كان أن أشعة جاما فائقة الطاقة كانت تخترق المركبة الفضائية بالكامل (وهو شيء تعجز الأشعة السينية عن القيام به) مخلفةً إشارات. ونظرًا لأن جميع الكواشف قد التقطت الإشارات في الوقت نفسه، فليس لدينا فكرة عن الاتجاه الذي كانت تأتي منه أشعة جاما تلك. ولم تلبث تلك الحوادث أن توقفتْ بعد رصدنا لها على مدى عدة أشهر؛ إلا أنها عادت لتتكرر من جديد بعد ثلاثة عشر شهرًا. لكن ما من أحدٍ في معهد ماساتشوستس للتقنية كانت لديه فكرة.

وبمساعدة إحدى طالباتي في الجامعة، كريستيان تِلفسون، بدأنا فهرسة تلك الانفجارات، حتى إننا صنفناها إلى انفجارات أ، وب، وج، بناءً على سماتها؛ ثم حفظتها في ملف بعنوان «الانفجارات اللعينة».

أذكر أنني قدمتُ عرضًا تقديميًّا لبعض الأفراد من وكالة ناسا (والذين كانوا يزورونا بصفة سنوية)، أخبرتهم فيه عن أحدث أخبارنا المثيرة حول انفجارات الأشعة السينية، وعرضتُ لهم بعضًا من تلك الانفجارات الغريبة. وقد شرحتُ لهم سبب رفضي للنشر عنها؛ وهو أنها تبدو غامضة بالنسبة إليّ. ومع ذلك، فقد حثوني على عدم التأخر في النشر. وهكذا شرعنا أنا وكرستيان في كتابة ورقة بحثية.

وذات يوم، تلقيتُ فجأة اتصالًا من طالبي السابق بوب سكارليت، الذي كان يجري بحثًا سريًّا في مكتبة لوس ألاموس الوطنية؛ وطلب مني في مكالمته عدم النشر عن تلك الانفجارات الغريبة. أردتُ منه تفسيرًا لذلك، إلا أنه لم يكن مصرَّحًا له بإخباري عن الأسباب. وطلب مني أن أخبره عن بعض أوقات حدوث تلك الانفجارات، وقد فعلتْ. وبعد يومين اتصل مرةً أخرى وحثني من جديد على عدم النشر لأسباب تتعلق بالأمن القومي. كان وقع كلامه علي كالصاعقة؛ فاتصلتُ على الفور بصديقتي فرانس كوردوفا، التي عملتْ معي لفترة في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، لكنها في ذلك الوقت كانت تعمل كذلك في لوس ألاموس. أخبرتها بمحادثاتي مع بوب وعبرتُ لها عن أملي في أن يكون بإمكانها أن توضح لي ما يجري. ولا بد أنها تناقشت مع بوب،

لأنها اتصلتْ بي بعد بضعة أيام وحثّتني كذلك على عدم النشر. ولكي تُطمئن بالي، أكدتْ لي أن تلك الانفجارات لا تتصل بعلم الفلك على الإطلاق. واختصارًا للقول، لم أنشر عن الأمر.

وبعد سنوات، علمتُ ما كان يحدث؛ لقد كانت «الانفجارات اللعينة» ناتجةً عن عدة أقمار صناعية روسية تعمل بمولدات كهربية نووية، كانت تحتوي على مصادر شديدة الإشعاع. وهكذا، متى كان القمر الصناعي SAS-3 يقترب من أي أقمار صناعية روسية، كانت تلك الأقمار تُمطر كواشفنا بوابلٍ من كواشف أشعة جاما المنبعثة من المصادر المشعة. والآن، هل تذكر تلك الانفجارات الغريبة التي رصدها الروس في عام ١٩٧١؟ اليوم أنا على يقين أن مصدر تلك الانفجارات كذلك كان الأقمار الروسية نفسها... فيا لها من مفارقة!

لقد كانت تلك الفترة من حياتي، والتي بدأت بأواخر السبعينيات وحتى عام ١٩٩٥، محمومة بالعمل. لقد كان علم فلك الأشعة السينية أحدثَ فروع علم الفيزياء الفلكية الرصدية في ذلك الوقت. لقد دفعني انخراطي في دراسة انفجارات الأشعة السينية إلى بلوغ قمة مساري المهني العلمي؛ فكنتُ أتحدث في أكثر من عشر ندوات أكاديمية سنويًا تقريبًا حول العالم، في أوروبا الشرقية والغربية، وأستراليا، وآسيا، وأمريكا اللاتينية، والشرق الأوسط، وعبر أرجاء الولايات المتحدة. كما دُعيتُ لإلقاء محاضرات في كثير من مؤتمرات الفيزياء الفلكية الدولية، كما كنتُ محررًا رئيسيًا لثلاثة كتب في علم فلك الفيزياء الفلكية، وآخرها كان «مصادر الأشعة السينية النجمية المكتنزة»، المنشور في عام ٢٠٠٦. كانت أيامًا رائعةً مفعمةً بالإثارة.

مع ذلك، رغم ما بلغناه من تطورات مذهلة، فقد ظل المفجر السريع معاندًا أمام جميع المحاولات المبذولة لحل ألغازه. إنني على يقين من أحدهم سيفهم آلية عمله ذات يوم. كما سيواجهون بدورهم شيئًا محيرًا. وهذا ما أحبه في الفيزياء، وللسبب نفسه أعرض في حجرة مكتبي دائمًا في معهد ماساتشوستس للتقنية ملصقًا بحجم كبير لملامح انفجار المفجر السريع. إن الفيزيائيين يتلقون بيانات جديدة كل يوم، ويأتون بنظريات عبقرية أكثر كل يوم، سواء أكان ذلك في مصادم الهادرونات الكبير، أو من حقل هابل العميق الفائق. والأمر الوحيد الذي أثق فيه تمام الثقة هو مهما كان ما يتوصلون إليه، ويقترحونه، وينظرون نحوه فسيكشف لهم عن مزيد من الألغاز. ففي الفيزياء، دائمًا ما يؤدي مزيد من الإجابات إلى مزيدٍ من الأسئلة.

# الفصل الخامس عشر

# الكون برؤى جديدة

يكره معظم طلاب المدرسة العليا وطلاب الجامعة دراسة الفيزياء لأنها عادةً ما تُدرس في صورة مجموعة معقدة من المعادلات الرياضية. لكن هذه ليست الطريقة التي أنتهجها في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، كما أنها ليست الطريقة التي أنتهجها في هذا الكتاب. إنني أقدم الفيزياء كمنهجية لرؤية عالمنا، تكشف لنا عن أشياء كانت ستظل خافيةً علينا لولا الفيزياء — وذلك بداية من أدق الجسيمات دون الذرية، وحتى اتساع الكون من حولنا. إن الفيزياء تمكننا من رؤية القوى اللامرئية الفاعلة من حولنا في كل مكان، من الجاذبية وحتى الكهرومغناطيسية، كما تساعدنا على التأهب لرؤية أقواس قُزح والهالات الضوئية والأقواس الضبابية والدوائر الضوئية، وربما حتى الأقواس الزجاجية.

لقد أسهم كل عالم فيزياء رائد في تغيير الطريقة التي ننظر بها إلى العالم. فبعد نيوتن، صار باستطاعتنا فهم حركات المجموعة الشمسية بالكامل، وصرنا نعرف العمليات الحسابية التي تساعدنا على ذلك — حساب التفاضل. بعد نيوتن، لم يكن بإمكان أحد أن يزعم أن ضوء الشمس لا يتشكل من ألوانٍ، أو أن ألوان قوس قُزح تصدر عن أي شيء سوى ضوء الشمس عند انكساره وانعكاسه على قطرات المطر. كذلك بعد ماكسويل، ارتبطت الكهرباء والمغناطيسية للأبد، حتى إنني وجدتُ صعوبة في مناقشتهما في فصلين مختلفين في هذا الكتاب.

ولذلك أرى علاقة مذهلة بين الفيزياء والفن؛ فالفن الريادي كذلك طريقة جديدة للرؤية، طريقة جديدة للنظر إلى العالم. وقد تندهش لمعرفة أنني كنت لمعظم سني حياتي مهووسًا بالفن بقدر هوسي بالفيزياء؛ كانت تربطني علاقة حب بكليهما! وقد سبق أن أشرتُ إلى مجموعتي الضخمة من أدوات المائدة من علامة فييستا التجارية؛ بالإضافة إلى ذلك، جمعتُ أكثر من مائة عمل فني من لوحات ومجموعات ملصقات

(كولاج)، وتماثيل، وسجاد، ومقاعد، وطاولات، وعرائس، وأقنعة — بدايةً من منتصف الستينيات، ولم يعد لديّ مساحة كافية على الجدران أو الأرض في منزلي لعرض كل تلك الأعمال الفنية.

أما في مكتبي في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، فالفيزياء هي المسيطرة، وإن كان لدي تحفتان فنيتان مستعارتان من الجامعة. لكن في المنزل، ربما لا أحتفظ إلا باثني عشر كتابًا في الفيزياء – وحوالي ٢٥٠ كتابًا في الفن. لقد كنتُ محظوظًا بذلك الولع المبكر بالفن.

كان والداي يجمعان الأعمال الفنية، وإن كانوا على المستوى الفكري لا يعرفون الكثير عن الفن. لقد كانوا ببساطة ينقادون وراء ما يروق لهم، وهو ما قد يؤدي إلى طرقٍ مسدودة. أحيانًا، كانوا يحصلون على بعض الأعمال العظيمة، وفي أحيانٍ أخرى، على أعمال ليست شديدة الروعة، أو أنها هكذا تبدو لي حين أنظر إليها الآن. ومن بين اللوحات التي تركتْ فيَّ انطباعًا قويًّا رسمٌ لوالدي (بورتريه) أعلقه الآن على مِدفأتي في كمبريدج. إنها بالغة الروعة بكل معنى الكلمة. لقد كان والدي رجلًا صاحب شخصية قوية — وعلى غراري، كان عنيدًا جدًّا. لقد أتقن الرسَّام — الذي كان يعرفه جيدًا — تصوير والدي من نصفه الأعلى، برأسه الحليق الضخم مستطيل الشكل، الذي يتوسط منكبيه العريضين القويين، وفمه الصغير المنفرج في ابتسامة تنم عن الرضا عن الذات. لكن نظارته هي التي كانت تبرز في الصورة، بإطارها الأسود السميك الذي يؤطر عينيه اللتين تكادان لا تُريان، واللتان تتبعانك في جميع أرجاء الغرفة، فيما يتقوس حاجباه في تساؤل فوق إطار النظارة. وقد كانت تلك شخصيته بالضبط؛ شخصية قادرة على النفاذ إلى أعماقك.

كان والدي يأخذني إلى المعارض والمتاحف الفنية وأنا في المدرسة العليا، وهو الوقت الذي بدأتُ أقع فيه في حب الفن، لأنه علمني طرقًا جديدة للرؤية. وقد أحببتُ في المعارض والمتاحف، على خلاف المدرسة، أنك تمضي وفقًا لاهتماماتك، وتتوقف حين تريد، وتمكث بقدر ما شئتَ من الوقت، وتتقدم وقتما يلائمك ذلك. وهكذا، تتطور علاقتك بالفن. وسرعان ما بدأتُ أذهب إلى المتاحف من تلقاء نفسي، ثم لم ألبث أن اكتسبتُ بعض المعرفة الفنية. وقد انغمستُ مع لوحات فان جوخ. (هل تعلم أن نطق اسمه في الواقع «فَن خوخ» — وهذا قد يكون صعب النطق إذا لم تكن هولنديًّا، فهما صوتان حلقوميان بينهما «واو» قصيرة). وهكذا، آل بي الأمر لإلقاء

محاضرات عن فان جوخ لفصلي الدراسي وأنا في الخامسة عشرة. كما كنتُ اصطحب أصدقائي في جولات للمتاحف أحيانًا. وهكذا، دخلتُ مهنة التدريس من بوابة الفن.

كانت تلك المرحلة التي عرفتُ فيها للمرة الأولى ذلك الشعور الرائع الذي ينتابك حين تُعلِّم آخرين — من أي عمر — بسْطَ نطاق عقولهم للاطلاع على عوالم جديدة. ومن المؤسف أن الفن يبدو غامضًا وعسيرًا بقدر ما تبدو الفيزياء للكثيرين ممن لا يحالفهم الحظ بمعلمي فيزياء مهرة. ولهذا السبب كنتُ على مدار السنوات الثماني الماضية أستمتع بوضع اختبار فنون على لوحة النشرات الخاصة بي في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا أسبوعيًّا — حيث أطبع صورة من الإنترنت، معلقًا عليها بالسؤال التالي: «من هذا الفنان؟»؛ وكنتُ أقدم جوائز — بعضها كان كتبًا فنية ممتعة — لثلاثة متسابقين ممن يجيبون إجابات صحيحة على مدار العام. بعض المشاركين النظاميين يقضون ساعات يبحثون على الإنترنت، وبذلك يكتسبون معرفةً بالفن! لقد استمتعتُ كثيرًا بذلك الاختبار الفني الأسبوعي، والآن أنشر اختبارًا كل أسبوعين على صفحتي على فيسبوك. يمكنك تجربة الأمر بنفسك إن شئت.

وبالإضافة إلى كل ما سبق، كنتُ محظوظًا بتلك الفرص الرائعة التي سنحتْ لي للتعاون مع بعض الفنانين الرواد المبدعين في حياتي. في أواخر ستينيات القرن العشرين، التحق الفنان الألماني المختص بفنون السماء، أوتو بينه، بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، زميلًا لمركز الدراسات البصرية المتقدمة، ثم انتهى به المطاف مديرًا للمركز على مدار عقدين من الزمان. ونظرًا لأنني كنتُ في ذلك الوقت أطلق بعضًا من مناطيدي العملاقة، فقد سنحتْ لي الفرصة لمساعدة أوتو في بعض من فنونه السماوية. كان أول مشروع لنا معًا بعنوان «تجربة خط الضوء»، وكان يتشكل من أنابيب من متعدد الإثيلين بطول ٢٥٠ قدمًا مملوءة بغاز الهيليوم، والتي حين تُثبّت من كلا طرفيها، كانت تشكل أقواسًا جميلة في نسمات الربيع في الملاعب الرياضية بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. وقد ربطنا الأنابيب الأربعة معًا لنصنع منطادًا بطول ألف قدم، ثم جعلنا أحد طرفيه يرفرف في أعالي السماء. وفي الليل، كنا نشعل الإضاءات التي كانت تنير أجزاءً من المناطيد التي تشبه الأفعى، وهي تتقلب وترفرف بطرقٍ رائعة دائمة التغير، على ارتفاع مئات الأقدام في الهواء؛ لقد كان منظرها ساحرًا!

لقد كان عملي في تلك المشروعات تقنيًّا في العادة؛ حيث كنت أدرس ما إذا كانت أفكار أوتو بالنسبة لأحجام المناطيد وأشكالها ستكون قابلة للتنفيذ. على سبيل

المثال، كم ينبغي أن يبلغ سمك متعدد الإثيلين؟ فقد كنا نريده أن يكون خفيفًا بما يكفي للارتفاع، وقويًّا بما يكفي لتحمل الرياح. وفي فعالية أقيمت عام ١٩٧٤ في أسبن بكولورادو، عقدنا حبات خرز زجاجية متعددة الأشكال في حبال تثبيت «خيمة إضاءة». وقد أجريتُ عمليات حسابية كثيرة فيما يتعلق بأحجام المناطيد المختلفة وأوزان حبات الخرز للتوصل إلى حلٍّ عملي فيما يتعلق بالفيزياء والجماليات. لقد أحببت إجراء الحسابات الفيزيائية لتحويل أفكار أوتو الفنية إلى واقع.

كما شاركتُ في إعداد ذلك المنطاد العملاق «رينبو» الملون بخمسة ألوان، المصمم للاحتفالات الختامية لأولمبياد عام ١٩٧٢ في ميونخ. بالطبع لم نكن نعلم أن الأولمبياد سينتهي تلك النهاية الكارثية، بذبح الرياضيين الإسرائيليين، وهكذا أصبح المنطاد «رينبو» الذي يبلغ ارتفاعه ١٥٠٠ قدم، والذي شكّل قوسًا على ارتفاع خمسمائة قدم تقريبًا فوق البحر الأولمبي، رمزًا للأمل في مواجهة الكوارث. ويمكنك الاطلاع على صورة للمنطاد في ملحق الصور. حين بدأتُ أطلق المناطيد لأرى الكون، لم يخطر ببالي أبدًا أنني سأشارك يومًا في مشاريع كهذه.

كما عرفني أوتو على الفنان الهولندي بيتر سترايكن، الذي أعرف أعماله جيدًا لأن والداي جمعًا أعماله في هولندا. فقد اتصل أوتو بي ذات يوم في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا وقال: «هذا الفنان الهولندي في مكتبي؛ هل ترغب في لقائه؟» فالناس دائمًا ما يفترضون أننا إذا كنا من بلد واحد صغير، فإننا سنحب أن نتحدث معًا، لكنني لا أحب ذلك في أغلب الأحيان. فأخبرتُ أوتو قائلًا: «ولِم أفعل، ما أسمه؟». ومع ذلك، حين ذكر لي أنه «بيتر سترايكن»، وافقتُ بالطبع؛ لكن توخيًا للحذر، أخبرتُ أوتو أنني لن أستطيع أن أقضي معه أكثر من نصف ساعة (وهذا ما لم يكن حقيقيًّا). وهكذا، أتى بيتر إلى مكتبي؛ وتحدثنا حوالي خمس ساعات (حقًّا، خمس ساعات!) ودعوته بعد ذلك لتناول المحار في مطعم ليجال سي فودز! لقد حدث بيننا توافق منذ البداية، وصار بيتر أحد أقرب أصدقائي لأكثر من عشرين عامًا. لقد غيرتْ تلك الزيارة حياتي إلى الأبد!

وخلال نقاشنا الأول، استطعتُ أن أجعل بيتر «يرى» أن سبب إشكاليته/سؤاله — «متى يكون الشيء مختلفًا عن غيره؟» — يتوقف على تعريف المرء للاختلاف. بالنسبة للبعض، قد يكون المربع مختلفًا عن المستطيل ومختلفًا عن الدائرة. لكن، إذا كنت تُعرِّف الخطوط الهندسية التي تنغلق على نفسها على أنها متشابهة، فإن هذه

الأشكال الثلاثة ستكون متشابهة بالنسبة لك.

وقد عرض علي بيتر أكثر من عشر رسومات رقمية، جميعها مصممة بنفس البرنامج، وقال لي: «إنها نفس الرسم». أما بالنسبة إليّ فقد بدتْ شديدة الاختلاف. الأمر برمته يتوقف على تعريف المرء لل«تشابه». وأضفتُ إن كانت جميعًا تبدو له متشابهة، فربما لا يمانع أن يترك لي واحدة. وقد فعل، وكتب عليها بالهولندية ما يعني حرفيًا: «مع الشكر على النِقاش». كانت تلك طبيعة بيتر: شخص بالغ الهدوء والبساطة. وفي الحقيقة، من بين لوحات سترايكن الكثيرة التي أقتنيها، فإن ذلك الرسم الصغير هو المفضل لدي.

بالإضافة إلى أن بيتر وجدني عالم فيزياء شديد الولع بالفن، كان بإمكاني أن أساعده كذلك في أعماله. إنه أحد الرواد العالميين في فنون الحاسوب. في عام ١٩٧٩، التحق بيتر (مع ليان ودانيال ديكرز) بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا لمدة عام، وهنا شرعنا في العمل معًا عن كثب. فكنا نلتقي يوميًا تقريبًا، وكنتُ أتناول العشاء في مقر إقامته مرتين أو ثلاث مرات في الأسبوع. قبل لقائي ببيتر، كنتُ «أنظر» إلى الفن، لكنّ بيتر جعلني «أرى» الفن.

أعتقد أنني لولاه لما تعلمتُ قط التركيز على الأعمال الرائدة، لنرى كيف أن بإمكانها تغيير طرق رؤيتنا للعالم تغييرًا جذريًا. لقد تعلمتُ أن الفن لا يعتمد على الجمال فحسب، وإنما على الاكتشاف كذلك؛ وهنا يلتقي الفن والفيزياء معًا.

ومنذ ذلك الوقت فصاعدًا، تغيرتْ نظرتي للفن تمامًا؛ فما كان يروق لي لم يعد يهمني؛ وإنما صرتُ أهتم بالجودة الفنية، وما تنطوي عليه من نظرة جديدة لرؤية العالم؛ وهو ما لا يمكن تقديره إذا كنتَ تعرف حقًا شيئًا عن الفن. كما بدأتُ أنظر عن كثب إلى السنوات التي أُنتجتْ فيها تلك الأعمال. فأعمال ماليفتش الفنية الرائدة في الفترة ما بين عامي ١٩١٥ و١٩٢٠ خلابة. ثمة لوحات مشابهة لآخرين في عقد الثلاثينيات من نفس القرن لم أعرها أي اهتمام. إن مقولة بول جوجيه: «الفن إما أن يكون سرقة فكرية أو عملًا ثوريًا»، وإن كانت لا تخلو من عجرفة جوجيه المعتادة، فإنها ليستْ عارية من الحقيقة.

لكم خلب لبي ذلك التطور الذي أدى إلى الأعمال الرائدة. على سبيل المثال، سرعان ما كان بإمكاني تحديد السنة التي رُسمتْ فيها إحدى أعمال موندريان — فتطوره خلال الفترة ما بين عامي ١٩٠٠ و١٩٢٥ كان مذهلًا — وحتى ابنتي بولين

يمكنها أيضًا فعل ذلك. وعلى مر السنوات، لاحظتُ أكثر من مرة أن المتاحف أحيانًا ما تدرج تاريخًا خطأ للوحة ما. وحين أشير إلى ذلك (كما أفعل دائمًا)، يشعر منسقو المتحف أحيانًا بالإحراج، ودائمًا ما يصححون التاريخ.

لقد عملتُ مع بيتر على أكثر من عشرٍ من أفكاره؛ كان مشروعنا الأول بعنوان «الفضاء السادس عشر»، عملًا فنيًّا بستة عشر بعدًا (متفوقين في ذلك على نظرية الأوتار بأبعادها الأحد عشر). كما أذكر سلسة «Shift» لبيتر؛ لقد وضع أساسًا رياضيًّا لبرنامج حاسوبي ينتج رسومًا فنية بالغة التعقيد والإثارة. لكن، بما أنه لم يكن ملمًّا بالرياضيات، فقد كانت معادلاته غريبة، كانت مضحكة بحق. لكن كان يرغب في إضفاء الجمال على العمليات الحسابية، لكنه لم يكن يعلم كيف يفعل ذلك.

لقد استطعتُ أن أتوصل إلى حلٍّ، وليس معقدًا من الناحية الفيزيائية على الإطلاق؛ إنها الموجات المتنقلة بالأبعاد الثلاثية. يمكنك تحديد الطول الموجي؛ ويمكنك تحديد سرعة الموجات، وكذا يمكنك تحديد اتجاهها. وإذا أردتَ لثلاث موجات أن تتداخل بعضها مع بعض، فيمكنك فعل ذلك؛ حيث تبدأ بكل موجة على حدة، ثم تتداخل الموجات بعضها مع بعض، مُشكِّلةً أنماط تداخل رائعة.

لقد كان الأساس الحسابي الذي يقوم عليه ذلك خلابًا، مما كان يشكل أهمية بالغة لبيتر. لا أقصد التباهي هنا — لكنه كان سيخبرك بالأمر ذاته. هذا هو الدور الذي اضطلعتُ به على الأغلب في حياته: أن أدله على كيفية جعل الأشياء جميلة ويسيرة من الناحية الرياضية. وقد كان دائمًا ما يتفضل بالسماح لي باختيار أحد أعماله الفنية من كل سلسلة. وهكذا، من حسن حظي أن صار لديّ ثلاثة عشر عملًا فنيًّا لسترايكن!

ونتيجةً لتعاوني مع بيتر، دعاني مدير متحف بويمانس فان بوينين في روتردام لإلقاء أول محاضرة عن موندريان في عام ١٩٧٩ تحت القبة الضخمة لمبنى كوبلكيرك في أمستردام. كان المكان مزدحمًا؛ إذ بلغ عدد الحضور حوالي تسعمائة شخص. وتلك المحاضرة رفيعة المستوى تُلقى مرة كل عامين في الوقت الحالي. في عام ١٩٨١، كان أومبرتو إيكو محاضرًا؛ وفي عام ١٩٩٣ كان دونالد جود محاضرًا، وفي عام ١٩٩٥ كان المحاضر رِم كولهاس، وفي عام ٢٠١٠ كان المحاضر تشارلز جنكس.

ولم يقتصر انخراطي في الفن على تعاوني مع أوتو وبيتر؛ فقد حاولتُ ذات مرة (من باب الهزل) إنتاج بعض من الأعمال التي تندرج تحت تصنيف الفن التصوري.

حين ألقيتُ محاضرتي «فن القرن الحادي والعشرين عبر عيني عالِم فيزياء» (http://mitworld.mit.edu/speaker/view/55)، أوضحتُ أن لديّ في منزلي اثني عشر كتابًا في الفيزياء، مقابل ما يزيد عن مائتين وخمسين كتابًا في الفن، أي إن النسبة بينهما حوالي عشرين إلى واحد. ووضعتُ عشرة كتب فنية على المكتب ودعوتُ الحضور إلى إلقاء نظرة عليها خلال الاستراحة. وحفاظًا على التوازن، قلتُ إنني سأحضر لهم نصف كتاب عن الفيزياء. في صباح ذلك اليوم، قطعتُ كتابًا في الفيزياء إلى نصفين، من منتصفه تمامًا. وهكذا، أمسكتُ به، مشيرًا إلى أنني سأقطعه بحذر شديد — لقد كان فعلًا نصف كتاب. وقلتُ للحضور وأنا أُلقي بالكتاب على الطاولة بصوت مرتفع: «لغير المهتمين بالفن، تفضلوا!»؛ للأسف لم يتقدم أحد لإلقاء نظرة عليه.

إذا ألقيتَ نظرة على فن عصر النهضة مرورًا بما يليه من عصور إلى عصرنا هذا، فستلاحظ اتجاهًا واضحًا. كان الفنانون يتخلصون تدريجيًّا من القيود التي فرضتها عليهم التقاليد السائدة؛ قيود على الموضوعات، والشكل، والمواد، والمنظور، والأسلوب، واللون. وبنهاية القرن التاسع عشر، تخلى الفنانون بالكامل عن فكرة أن الفن تصوير للطبيعة.

والحقيقة أننا نرى أن كثيرًا من تلك الأعمال الرائدة عظيمة، إلا أن مقصد الفنانين من تلك الأعمال كان مختلفًا بالكلية؛ لقد أرادوا أن يقدموا بتلك الأعمال طريقةً جديدة للنظر إلى العالم. وكثير من الأعمال التي تنال اليوم إعجابنا لكونها إبداعات رمزية خلابة — على سبيل المثال: لوحة ليلة النجوم لفان جوخ، أو لوحة الشريط الأخضر لماتيس (صورة لزوجته) — قوبلتْ بالسخرية والعدائية في ذاك الوقت. وحتى الفنانون الانطباعيون المحبوبون اليوم — مثل مونيه، وديجا، وبيسارو، ورينوار — من بين أشهر الفنانين في أي متحف، واجهوا استهزاءً وسخريةً حين بدأوا عرض لوحاتهم.

إن ما تناله تلك الأعمال اليوم من إعجابٍ معظمِنا يُثبت أن الفنانين قد تفوقوا على عصرهم؛ فطريقتهم الجديدة في الرؤية، وطريقتهم الجديدة في النظر إلى العالم، أصبحتْ عالمنا وطريقة رؤيتنا له. فما كان يبدو قبيحًا قبل سنوات صار اليوم جميلًا. ويروق لي أن أحد النقاد المعاصرين لقَّب ماتيس بـ«سفير القبح». كما أشار جامع اللوحات ليو ستاين إلى اللوحة التي رسمها للسيدة ماتيس، المرأة ذات القبعة، بأنها «أسوأ تلطيخًا رآه في حياته» — ومع ذلك اشترى اللوحة.

في القرن العشرين، استخدم الفنانون أي مواد جاهزة يعثرون عليها مع إضفاء تعديلات قليلة عليها — والتي كانت صادمة في بعض الأحيان، مثل مرحاض مارسيل دوشامب (الذي أطلق عليه «النافورة»)، وصورة موناليزا التي كتب عليها تلك الأحرف الاستفزازية L.H.O.O.Q. لقد كان دوشامب بمنزلة المخلِّص العظيم، فبعده صار أي شيءٍ متاحًا! لقد أراد أن يزلزل طريقتنا في النظر إلى الفن.

ما من أحد يمكن أن ينظر إلى الألوان بالطريقة ذاتها بعد فان جوج، وجوجان، وماتيس، وديرا. وكذا ما من أحدٍ يمكن أن ينظر إلى صورة لحساء كامبل المعلب أو لمارلين مونرو بنفس الطريقة بعد آندي ورهول.

قد تكون الأعمال الرائدة جميلة، بل آسرة، لكنها في أغلب الأحيان — في البداية بالتأكيد — تكون محيرة، بل قد تكون حتى قبيحة. أما جانب الجمال الحقيقي في العمل الفني الرائد، بغض الطرف عن مدى قبحه، فيكمن في معناه. إن الحَمَّام قارسَ البرودة — لا الفراشَ المريح الدافئ — هو ما يُشكل نظرةً جديدة إلى العالم. فالحمام البارد في رأيي ينعشك وينشطك ويحررك.

إن نظرتي للأعمال الرائدة في الفيزياء لا تختلف عن ذلك. فما إن تتخذ الفيزياء مزيدًا من الخطوات الملهمة المثيرة على طرقٍ كانت من قبل غامضة وخفية، لا يمكننا أبدًا العودة إلى النظر للعالم بنفس الطريقة مرة أخرى.

إن الاكتشافات الكثيرة المذهلة التي قدمتُها عبر صفحات هذا الكتاب كانت محيرة في بادئ الأمر. فلو تحتم علينا معرفة الرياضيات التي تقوم عليها تلك الاكتشافات، لربما وجدناها مرعبة. لكن آمل أن ذِكري لبعضٍ من أعظم الاكتشافات التي توصلتْ إليها الفيزياء قد سلَّط الضوء على مدى ما تنطوي عليه من إثارة وجمال. ومثلما شكَّل كل من سيزان، ومونيه، وفان جوخ، وبيكاسو، وماتيس، وموندريان، ومالفيتش، وكاندينسكي، وبرانكوشي، ودوشامب، وبولوك، وورهول؛ مسارات جديدة تحدثْ عالم الفن، فإن نيوتن وكل من جاء من بعده منحونا رؤيةً جديدة للكون.

إن رواد علم الفيزياء في بداية القرن العشرين — ومن بينهم أنطوان هنري بيكريل، وماري كوري، ونيلز بور، وماكس بلانك، وألبرت آينشتاين، ولويس دي بروي، وإروين شرودنجر، وولفجانج باولي، وفيرنر هايزنبرج، وبول ديراك، وإنريكو فيرمي — طرحوا أفكارًا قوضت الطريقة التي كان العلماء يرون بها الواقع على مدار

قرون، إن لم يكن آلاف السنين. فقبل ميكانيكا الكم، لم نكن نرى الجسيم سوى أنه مجرد جسيم يخضع لقوانين نويتن، وأن الموجة مجرد موجة تخضع لقانون فيزيائي مختلف. لكننا اليوم صرنا نعرف أن كل الجسيمات قد تسلك مسلك الموجات وأن كل الموجات قد تسلك مسلك الجسيمات. وهكذا، فإن إشكالية ما إذا كان الضوء يتشكل من جسيمات أم موجات التي أثيرتْ خلال القرن الثامن عشر (الأمر الذي حسمه توماس يونج في عام ١٨٠١ على ما يبدو لصالح الموجات – انظر الفصل الخامس)، لم تعد كذلك اليوم؛ نظرًا لما ثبتَ من أن الضوء مشكل من موجات وجسيمات.

كذلك قبل ميكانيكا الكم، كان يُعتقد أن الفيزياء حاسمة، بمعنى أنك إذا أجريت التجربة ذاتها مائة مرة، فستحصل على النتيجة نفسها مائة مرة. لكننا اليوم نعرف أن هذا الأمر ليس صحيحًا. فميكانيكا الكم تتعاطى مع احتمالات، وليس حقائق. وقد كان ذلك صادمًا حتى إن آينشتاين نفسه لم يتقبله. وكانت كلماته الشهيرة: «الله لا يلعب النرد». حسنًا، لقد جانبه الصواب في ذلك!

وقبل ميكانيكا الكم، كان من المعتقد أن وضع الجسيم وزخمه (الذي ينتج عن كتلته وسرعته)، يمكن من حيث المبدأ، تحديدهما معًا بأي درجة من الدقة. هذا ما علمتنا إياه قوانين نيوتن. لكننا اليوم نعرف أن هذا ليس صحيحًا. ورغم أن ذلك ليس بديهيًا، فإنه كلما زادت دقة تحديد وضع الجسيم، قلتْ دقتك في تحديد زخمه؛ وهو ما يعرف بمبدأ الريبة لهايزنبرج.

لقد أشار آينشتاين في نظرية النسبية الخاصة إلى أن المكان والزمان يشكلان حقيقة واحدة رباعية الأبعاد، وهي الزمكان. كما افترض أن سرعة الضوء ثابتة (٣٠٠,٠٠٠ كيلومتر في الثانية). حتى إذا كان شخص يقترب منك على متن قطارٍ فائق السرعة يسير بنصف سرعة الضوء (١٥٠,٠٠٠ كيلومتر في الثانية)، مسلطًا الأضواء الأمامية في وجهك، فإن سرعة الضوء بالنسبة لكليكما ستظل واحدة. وهذا غير بديهي، ذلك لأنك ستحسب أنه بما أن القطار يقترب منك أنت بينما تشاهد الضوء المسلط عليك، فإنك ستجمع سرعة الضوء ٣٠٠,٠٠٠، وسرعة القطار ١٥٠,٠٠٠، لتحصل في النهاية على ٤٥٠,٠٠٠ كيلومتر في الثانية. لكن الأمر ليس كذلك؛ فوفقًا لآينشتاين، ٣٠٠,٠٠٠ زائد ١٥٠,٠٠٠ ما زالت تساوي ٣٠٠,٠٠٠! ونظريته النسبية العامة مربكة للعقل، وقد قدمتْ إعادة تفسير للقوة التي تحافظ على تماسك عالَم الفلك معًا، وتزعم أن الجاذبية تؤدي وظيفتها عبر تشويه نسيج الزمكان نفسه، مما يدفع الأجسام إلى الدوران عبر

مسارات هندسية، بل تجبر الضوء على الانحناء عبر نفس نسيج الزمكان المعوج. لقد أثبتَ آينشتاين أن فيزياء نيوتن تحتاج إلى مراجعات مهمة، بالإضافة إلى أنه مهد الطريق للعلم الكوني الحديث: الانفجار العظيم والكون المتمدد والثقوب السوداء.

عندما بدأتُ إلقاء المحاضرات في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، في سبعينيات القرن الماضي، كان من صميم شخصيتي أن أركز على الجمال والإثارة في الأشياء، وليس على التفاصيل التي لم يكن الطلاب يستوعبونها على أية حال. وفي كل مادة كنتُ أدرّسها، كنتُ أحاول متى أمكن أن أربط المادة بعالم الطلاب، وأن أجعلهم يرون أشياء لم يكونوا يفكرون فيها رغم أنها قيد أناملهم. ومتى يطرح عليّ أحد الطلاب سؤالًا، دائمًا أقول له: «هذا سؤال ممتاز». فآخر ما تريد أن تفعل أن تجعلهم يظنون أنك ذكي وهم حمقى.

وأذكر لحظة عزيزة عليّ في تدريسي مادة الكهرباء والمغناطيسية؛ فخلال معظم الفصل الدراسي، نتناول معادلات ماكسويل واحدة تلو الأخرى، ذلك الوصف رفيع المستوى إلى حد مدهش لكيفية ارتباط الكهرباء والمغناطيسية — هاذان الجانبان المختلفان لنفس الظاهرة، ظاهرة الكهرومغناطيسية. إن الطريقة التي تتفاعل بها تلك المعادلات فيما بينها لها جانب جمالي أصيل لا يُصدق؛ إذ لا يمكن أن تفصل بعضها عن بعض؛ فهي تشكل معًا نظرية حقل موحد.

وهكذا، أعرض تلك المعادلات الأربع على أربع شاشات مختلفة على جدران قاعة المحاضرات. وأقول للطلاب: «انظروا إليها؛ تنفسوها؛ دعوها تسري إلى أدمغتكم. لمرة واحدة في حياتكم، يمكنكم أن تروا معادلات ماكسويل الأربع للمرة الأولى بطريقة تجعلكم ترون كمالها وجمالها وتفاعل بعضها مع بعض. هذا لن يحدث أبدًا مرة أخرى، لأنكم لن تكونوا نفس الأشخاص أبدًا. فبعد ذلك ستكونون قد فقدتكم براءتكم». وتكريمًا لهذا اليوم التاريخي في حياة الطلاب، للاحتفال بتلك القمة الفكرية التي بلغوها، أُحضر معي ستمائة زهرة نرجس، زهرةً لكل طالب.

يكتب لي الطلاب بعد سنوات طويلة من ذلك، بعد أن يكون وقت طويل قد ولى على نسيانهم تفاصيل معادلات ماكسويل، أنهم يتذكرون يوم زهور النرجس، يوم احتفيتُ بطريقتهم الجديدة في الرؤية بالزهور. بالنسبة لي فإن هذا أرقى مستويات التدريس. فالأهم عندي أن يتذكر الطلاب جمال ما رأوه وليس تذكر ما كتبته على السبورة. فالأهم ليس المنهج الذي تدرسه لهم، لكن العوالم التي تكشفها لهم!

إن الهدف الذي أرمي إليه غرس حب الفيزياء في طلابي، وأن آخذ بأيديهم للنظر إلى العالم بطريقة مختلفة، لبقية حياتهم! فهكذا تتسع آفاقهم، مما يمكنهم من طرح الأسئلة التي لم يطرحوها من قبل قط. وبيت القصيد هنا فتح مغاليق عالم الفيزياء على نحو يربطها باهتمامات الطلاب الجوهرية في هذا العالم. لذلك دائمًا ما أحاول أن أجعل طلابي يرون الصورة الكاملة، بدلًا من شغلهم بالتفاصيل الدقيقة. وهذا أيضًا ما حاولتُ أن أفعله في هذا الكتاب لأجلك. وآمل أن تكون قد استمتعتَ بالرحلة.

# الشكر والتقدير

لولا ما تتمتع به وكيلتنا الأدبية، وندي ستروثمان، من ذكاء وبصيرة وحس تجاري، ولولا ما قدمتْه لي من دعم معنوي، لظل هذا الكتاب مجرد أمنية. لقد عرفتنا أحدنا بالآخر، وعثرتْ على دار نشر فري برس التي كانت بمثابة دار النشر المناسبة لهذا الكتاب، وقرأتْ عدة مسوّدات للفصول بعين محررة مدربة بحكم سنوات خبرتها في مجال النشر، ووضعتْ للكتاب عنوانه، وعاونتنا على التركيز على المنتج النهائي. بالإضافة إلى أننا سعداء ومحظوظون بصداقتها المخلصة، التي كانت مصدرًا للدعم لنا على مدار الوقت الذي استغرقه المشروع.

كذلك من العسير علي تقدير جهود محررتنا، إميلي لوز، في دار نشر فري برس، على رؤيتها لهذا الكتاب التي جعلتنا نتبناها كذلك، واهتمامها بالغ الدقة بالسرد النثري الذي تعلمنا منه كثيرًا. ورغم الضغط الشديد في قطاع النشر لأجل اختصار العملية بهدف زيادة الربح، كانت إميلي تصر على تحرير هذا الكتاب، حائةً إيانا دائمًا على زيادة الوضوح، وسلاسة التنقل بين الأفكار، وتضييق نطاق تركيزنا. وبفضل مهارتها وعلو همتها، خرج هذا الكتاب بصورة أفضل كثيرًا. كما نعرب عن امتنانا لعمل آمي ريان الأنيق في تحرير مخطوطة الكتاب.

**والتر لوين:**

أتلقى كل يوم رسائل بريد إلكتروني رائعة، وغالبًا ما تكون مؤثرة، من عشرات الأشخاص حول العالم ممن يشاهدون محاضراتي على الإنترنت. ويُنسب الفضل في توفر هذه المحاضرات لبُعد رؤية ريتشارد (ديك) لارسون. ففي عام ١٩٩٨، حين كان ديك مديرًا لمركز الخدمات التعليمية وأستاذًا في قسم الهندسة الكهربية في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، اقترح عليّ تصوير محاضراتي غير التقليدية بالفيديو، وإتاحة مشاهدتها للطلاب من خارج معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. وقد حصل

على تمويل كبير لهذا الأمر من مؤسسة لورد فاونديشين أوف ماساتشوستس، ومؤسسة أتلانتك فيلانثروبيز الخيرية. لقد كانت مبادرة ديك بمثابة بادرة للتعلم الإلكتروني! وحين أُطلقت منصة OpenCourseWare لمناهج معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في عام ٢٠٠١، وصلتْ محاضراتي لكل أرجاء العالم، واليوم يشاهدها أكثر من مليون شخص سنويًا.

وفي التاسع عشر من ديسمبر من عام ٢٠٠٧، تصدرت أحد عناوين الصفحة الأولى لصحيفة نيويورك تايمز في مقال بقلم سارة ريمر. وكان عنوان المقال: «أستاذ فيزياء يحقق النجومية على شبكة الإنترنت في الحادية والسبعين من عمره». وقد أعقبتْ هذا المقال سلسلة من الفعاليات التي أدت في النهاية إلى تأليف هذا الكتاب. شكرًا لك سارة!

وخلال العامين الماضيين، بل خلال السبعين يومًا التي قضيتها في المستشفى (وكنتُ أحتضر تقريبًا)، كنتُ أفكر في هذا الكتاب. كنت أتحدث عنه مع زوجتي، سوزان كاوفمان، في المنزل على الدوام؛ وفي كثيرٍ من الليالي، كان النوم يجافي عيني من فرط التفكير فيه. وقد تحملتْ سوزان كل ذلك ونجحتْ في إبقاء معنوياتي مرتفعة. كما أنها مررتْ عينها ذات الخبرة التحريرية المدققة على عدد من الفصول، وقد أضافت لها تعديلات لا يمكن إغفالها.

كما أعرب عن بالغ امتناني لابنة خالي إيمي آربل كالوس، وأختي بيا بلوكسما لوين، لمشاركتي بعضًا من ذكرياتهما المؤلمة عن أحداثٍ وقعتْ خلال الحرب العالمية الثانية. أدرك مدى صعوبة هذا الأمر عليهما مثلما كان صعبًا عليّ. كما أتقدم بالشكر لنانسي ستيبر، صديقتي المقربة على مدار ثلاثين عامًا، لمداومتها على تصحيح لغتي الإنجليزية، ولكل ما تقدمه لي من تعليقات واقتراحات لا تُقدر بثمن. كما أود شكر صديقي وزميلي جورج كلارك، الذي لولاه لما صرتُ أبدًا أستاذًا في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا؛ فقد أتاح لي جورج قراءة المقترح الأصلي الذي تقدمتْ به شركة أمريكان ساينس آند إنجينيرينج لمختبرات كمبريدج البحثية التابعة للقوات الجوية، والذي أدى إلى ميلاد علم فلك الأشعة السينية.

وأُعرب كذلك عن بالغ امتناني لكلٍّ مِن سكوت هيوز، وإنكتالي فيجِروا فيليسيانو، وناثان سميث، وألكس فلبينكو، وأوين جينجريتش، وأندرو هاميلتون، ومارك ويتل، وبوب جافي، وإيد فان دين هوفل، وبول موردن، وجورد وودرو، وجيف ماكلينتوك،

وجون بيلشر، وماكس تيجمارك، وريتشارد ليو، وفريد راسيو، والراحل جون هوتشرا، وجيف هوفمان، وواتي تايلور، وفيكي كاسبي، وفريد باجانوف، ورون ريميلارد، ودان كليبنر، وبوب كيرشنر، وأمير رزق، وكريس دافلانتس، وكريستين شيرات، ومارك بيسيت، وماركوس هانكين، وبيل سانفورد، وأندرو نيلي؛ الذين قدموا لي يد العون متى احتجتها.

وأخيرًا، لا أستطيع أن أوفي وارن جولدستين الشكر لصبره ومرونته معي؛ ولا بد أنه أحيانًا ما كانت تنتابه مشاعر الارتباك (وربما الإحباط) من التعامل مع كل هذا الكم من الفيزياء في ذلك الوقت القصير.

مكتبة
t.me/soramnqraa

**وارن جولدستين:**

أود هنا أن أعرب عن شكري للأشخاص التالين لاستعدادهم للتحدث معي عن والتر لوين: لورا بلوكسما، وبيا بلوكسما لوين، وبولين بروبرج لوين، وسوزان كاوفمان، وإلين كريمر، وفايز دي هير، وإيمانول (تشاك) لوين، وديفيد بولي، ونانسي ستيبر، وبيتر سترايكن. ورغم أن أحاديثهم لم تُذكر في هذا الكتاب، فقد أسهم كل منهم إسهامًا كبيرًا في فهمي لشخصية والتر لوين. كما أشكر كلًّا من إدوارد جراي، وجيكوب هارني، ولورانس مارشال، وجيمس ماكدونالد، وبوب كيلمر لما بذلوه من جهود كبيرة لئلا نرتكب أنا ووالتر أخطاءً في مجالات خبرتهم؛ وبقدر رغبتنا في أن ننسب إليهم الفضل في كل هذا، فإننا نتحمل المسؤولية كاملةً عن أية أخطاء وردت في الكتاب. كما أريد أن أعرب عن شكري لويليام جيه ليو، الذي تخرج عام ٢٠١١ في جامعة هارتفورد، لما قدمه من مساعدة لنا في لحظة حرجة. كما قدم لي ثلاثةٌ من أذكى الكُتَّاب الذين أعرفهم — مارك جانثر، وجورج كانار، ولينارد دايفس — نصائحَهم النفيسة في مرحلة مبكرة من هذا المشروع. ولا يفوتني أن أذكر الطرق المختلفة التي أتاح بها كل من العميد جوزيف فولكر، ووكيل الشؤون الأكاديمية المساعد فريد سفايتسر في جامعة هارتفورد إيجاد الوقت الكافي لإنهاء هذا الكتاب. كما أشعر ببالغ الامتنان لزوجتي، دونا شيبر — وهي كاهنة وبارعة في التنظيم، هذا بالإضافة إلى أنها ألفتْ ثلاثين كتابًا بحسب آخر إحصاء — وذلك لتفهمها واحتفائها بانغماسي في مجتمع بلد غريب. وقد جاء حفيدنا كايلب بنجامين لوريا إلى العالم في الثامن عشر من أكتوبر من عام ٢٠٠٩؛ لقد

كان من المبهج أن أراقبه فيما يجري سلسلة من تجاربه الرائعة في فيزياء الحياة اليومية. وأخيرًا، أود أن أعرب عن عميق امتناني لوالتر لوين، الذي علمني في الفيزياء خلال تلك السنوات القليلة الماضية أمورًا لم يكن أي منا يتصور أنها ممكنة، وأشعل فيَّ من جديد شعلة شغف خبت نيرانها داخلي لزمن طويل.

# الملحق الأول

## عظام الفخذ لدى الثدييات

إنه لافتراض منطقي أن كتلة الحيوان الثدي تتناسب مع حجمه. على سبيل المثال، دعنا نقارن بين جرو وكلب تام البلوغ يبلغ حجمه أربعة أضعاف الجرو. وأفترض هنا أن جميع الأبعاد الخطية للكلب الأكبر حجمًا تفوق مثيلاتها لدى الجرو بأربع مرات — أي ارتفاعه، وطوله، وطول ساقيه وسمكهما، وعرض رأسه، إلى آخره. وإذا كان الأمر كذلك، فإن حجم الكلب الأكبر (ومن ثم كتلته) يفوق حجم الجرو بنحو أربعٍ وستين مرة.

ولاستيضاح الأمر، خذ، على سبيل المثال، مكعبًا بالأبعاد أ وب وج؛ وحجم هذا المكعب يساوي حاصل ضرب أ في ب في ج؛ إذا ضاعفنا حجم جوانب المربع أربع مرات، فإن الحجم سيساوي ٤ أ في ٤ ب في ٤ ج، وهو ما يساوي ٦٤ أ ب ج. وباصطلاح رياضي، يمكننا قول إن حجم الحيوان الثدي (ومن ثم كتلته) يتناسب مع طوله مرفوعًا للقوة الأسية الثالثة. فإذا كان الكلب الأكبر يفوق حجم الجرو بأربع مرات، فإن حجمه سيكون أكبر بنحو ٤ تكعيب (٤٣)، وهو ما يساوي ٦٤. وعليه، إذا كان طول عظمة الفخذ «ل»، فإنه، بمقارنة الثدييات من أحجام مختلفة، لا بد أن تتناسب كتلتها تقريبًا مع ل تكعيب (ل٣).

إذن، تلك هي الكتلة. والآن، ينبغي أن تتناسب قوة عظمة فخذ الثدييات التي تحمل كل هذا الوزن مع سمكها، أليس كذلك؟ فكلما زاد سمك العظمة، زادت قدرتها على تحمل المزيد من الوزن — هذا أمر بديهي. إذا حولنا هذه الفكرة إلى معادلة رياضية، فإن قوة عظمة الفخذ تتناسب مع مساحة المقطع العرضي للعظمة. وهذا المقطع العرضي يُشكل دائرة تقريبًا؛ وحسبما نعلم، فإن مساحة الدائرة تساوي $\pi r^2$، حيث r هي نصف قطر الدائرة. ومن ثم، فإن المساحة تتناسب مع $d^2$، حيث d هي قطر الدائرة.

دعنا نشير إلى سمك عظمة الفخذ بـ«d» (وهي الحرف الأول من الكلمة الإنجليزية diameter التي تعني القطر). إذن، بحسب فكرة جاليليو، تتناسب كتلة الحيوان الثدي مع $d^2$ (ومن ثم، تستطيع العظام حمل وزن الحيوان الثدي)، لكنها تتناسب كذلك مع $l^3$ (وهذا هو الحال دائمًا، بعيدًا عن فكرة جاليليو). وبذلك، إذا كانت فكرة جاليليو صحيحة، فلا بد أن تتناسب $d^2$ مع $l^3$ ، وهو ما يعني كذلك أن d تتناسب مع $l^{3/2}$ .

عند مقارنة حيوانين ثدييين أحدهما أكبر بخمس مرات من الآخر (من ثم، فإن طول عظمة فخذ l الحيوان الأول أكبر خمس مرات من عظمة فخذ الحيوان الأصغر حجمًا)، فربما أتوقع أن سمك عظمة فخذ، d، الحيوان الأكبر تساوي $٥^{٢/٣}$ أي أكبر بإحدى عشرة مرة من سمك عظمة فخذ الحيوان الأصغر. في محاضراتي، أوضحتُ أن طول l عظمة فخذ الفيل كانت أكبر بحوالي ١٠٠ مرة من طول عظمة فخذ الفأر؛ ولذا، يمكننا توقع أن يكون سمك عظمة فخذ الفيل حوالي $١٠٠^{٢/٣}$، أي أن سمكها يفوق ١٠٠٠ مرة سمك عظمة فخذ الفأر.

على هذا النحو، في بعض الحالات، ولا سيما الثدييات العملاقة، يتساوى سمك العظام مع طولها — بل قد يفوق سمك العظام طولها، وهو ما من شأنه أن يجعل من بعض الثدييات غير عملية ومستحيلة، وهذا هو تفسير وجود حد أقصى لحجم الثدييات.

# الملحق الثاني

## تطبيق قوانين نيوتن

يمكن صياغة قانون نيوتن للجذب العام على النحو التالي:

$$F_{grav} = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

تشير $F_{grav}$ هنا إلى قوة الجذب العام بين جسمين كتلتاهما $m_1$ و $m_2$ ، و$r$ هي المسافة بينهما. أما $G$ فترمز إلى ثابت الجاذبية.

لقد أتاحت قوانين نيوتن حساب كتلة الشمس وبعض الكواكب، مبدئيًا على الأقل.

دعنا نرى كيفية القيام بذلك، وسأبدأ هنا بالشمس. لنفترض أن $m_1$ هي كتلة الشمس وأن $m_2$ كتلة كوكب (أي كوكب). وسأفترض أن مدار الكوكب دائرة نصف قطرها $r$، ولنفترض أن الدورة المدارية هي $T$ (حيث $T$ تساوي ٣٦٥,٢٥ يوم في حالة كوكب الأرض، و٨٨ يومًا في حالة كوكب عطارد، و١٢ عامًا تقريبًا في حالة كوكب المشتري).

إذا كان المدار دائريًا أو شبه دائري (وهو الحال مع خمسة من الكواكب الستة التي اكتُشفت في القرن السابع عشر)، فإن سرعة الكوكب في المدار تكون ثابتة، لكن اتجاه سرعته دائمًا ما يتغير. ومع ذلك، حينما يتغير اتجاه سرعة أي جسم، إن لم تتغير السرعة نفسها، فلا بد من وجود عجلة، ومن ثم، وفقًا لقانون نيوتن الثاني، لا بد من وجود قوة تخلق هذه العجلة.

ويُطلق على هذه القوة قوة الجذب المركزي ($F_c$)، ودائمًا ما يكون اتجاهها في نفس اتجاه الكوكب المتحرك نحو الشمس. بالطبع لأننا نتحدث هنا عن نيوتن نفسه،

فقد عرف على وجه الدقة كيفية حساب هذه القوة (عن نفسي، أشتق معادلة لحساب هذه القوة في محاضراتي). مقدار هذه القوة يساوي:

$$F_c = \frac{m_2 v^2}{r} \qquad (٢)$$

ترمز $v$ إلى سرعة الكوكب في المدار. لكن هذه السرعة هي محيط المدار، $2\pi r$، مقسومًا على الزمن، $T$، الذي يستغرقه الكوكب لإتمام دورة واحدة حول الشمس. وهكذا، يمكن كتابة المعادلة على النحو التالي:

$$F_c = \frac{4\pi^2 m_2 r}{T^2} \qquad (٣)$$

فمن أين تأتي هذه القوة؟ أين يكمن منشأ هذه القوة على سطح الأرض؟ أدرك نيوتن أن تلك القوة تُعزى بالتأكيد إلى الجذب الثقالي للشمس. ومن ثم، فإن القوتين اللتين تعبر عنهما المعادلة المذكورة سابقًا هما في الأصل نفس القوة، ولهما نفس المقدار:

$$F_{grav} = F_c \qquad (٤)$$

فإذا أجرينا بضعة تغييرات على هذه المعادلة بإعادة ترتيب المتغيرات (هذه فرصتك لمراجعة سريعة لمقرر الجبر الذي درسته في المدرسة العليا)، فسنجد أن كتلة الشمس تساوي:

$$m_1 = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \qquad (٥)$$

لاحظ أن كتلة الكوكب $m_2$ لم تُذكر في المعادلة رقم ٥؛ ذلك لأنه لا حاجة إلى التعامل معها، فكل ما نحتاج إليه هو متوسط المسافة بين ذلك الكوكب والشمس، بالإضافة إلى دورته المدارية ($T$). ألا يفاجئك ذلك؟ فعلى كل حالٍ، تظهر $m_2$ في

المعادلتين ١ و٢. لكن وجود كتلة الكوكب في كلا المعادلتين هو سبب حذفها عند صياغة المعادلة $F_{grav}$ تساوي $F_c$؛ وهذا أحد أوجه جمال تلك الطريقة، والفضل في ذلك كله يعود إلى سير إسحاق نيوتن.

تشير المعادلة ٥ إلى أن $\frac{r^3}{T^2}$ تنطبق على جميع الكواكب. ورغم اختلاف المسافة بين كل كوكب والشمس، بالإضافة إلى اختلاف الدورات المدارية للكواكب، فإن $\frac{r^3}{T^2}$ تنطبق عليها جميعًا. وكان عالم الفلك والرياضيات الألماني يوهانس كيبلر قد اكتشف هذه النتيجة المذهلة في عام ١٦١٩، قبل نيوتن بوقتٍ طويل. لكن لم يكن سبب ثبات تلك النسبة — بين تكعيب نصف القطر ومربع الدورة المدارية — مفهومًا على الإطلاق. لقد كان العبقري نيوتن هو مَن أوضح بعد ٦٨ عامًا أن هذه النسبة الثابتة كانت نتيجة طبيعية لقوانينه.

باختصار، توضح المعادلة رقم ٥ أنه بمعلومية المسافة بين أي كوكب والشمس ($r$)، والدورة المدارية للكوكب ($T$)، وثابت الجذب العام ($G$)، يمكننا حساب كتلة الشمس ($m_s$).

كانت الدورات المدارية للكواكب معروفة بدرجة كبيرة من الدقة قبل وقت طويل من القرن السابع عشر. كانت المسافة بين الشمس والكواكب معروفة كذلك بدرجة كبيرة من الدقة قبل القرن السابع عشر لكن بنحو نسبي. بعبارة أخرى، كان علماء الفلك يعرفون أن متوسط المسافة بين كوكب الزهرة والشمس ٧٢,٤ في المائة من متوسط المسافة بين الأرض والشمس؛ ومتوسط المسافة بين المشتري والشمس أكبر بـ٥٢٠٠ مرة من متوسط المسافة بين الأرض والشمس. لكن القيم المطلقة لتلك المسافات كانت مسألة مختلفة تمامًا. ففي القرن السادس عشر، وتحديدًا في تلك الحقبة التي عاصرها عالم الفلك الهولندي العظيم تايكو براهي، كان علماء الفلك يعتقدون أن المسافة بين الأرض والشمس أقل بعشرين مرة مما هي عليه في الواقع (١٥٠ مليون كيلومتر، أي ما يعادل ٩٣ مليون ميل). وفي بدايات القرن السابع عشر، توصل كيبلر إلى تقدير أدق للمسافة من الأرض إلى الشمس، لكنها أيضًا كانت أقل من المسافة الفعلية بينهما بحوالي ٧ مرات.

وبما أن المعادلة رقم ٥ تشير إلى أن كتلة الشمس تتناسب مع مُكعب المسافة من الشمس إلى أي كوكب، فإذا كانت المسافة $r$ قصيرة جدًّا بمُعامل ٧، فإن كتلة

الشمس كذلك ستكون منخفضة بمُعامل ٢٧، أي ٣٤٣ — وهو مقدار غير منطقي على الإطلاق.

إلا أن العالم الإيطالي جيوفاني كاسيني حقق إنجازًا في عام ١٦٧٢ بقياس المسافة من الأرض إلى الشمس بدقة تبلغ ٧ في المائة (وهي نسبة مذهلة في تلك الحقبة)، وهو ما يعني أن الارتياب في $r$ تكعيب لم يكن يتعدى ٢٢ في المائة. وربما كان الارتياب في $G$ ٣٠ في المائة على الأقل. ومن ثم، فحسب اعتقادي أنه بنهاية القرن السابع عشر ربما كانت كتلة الشمس معروفة بدقة لا تتعدى ٥٠ في المائة.

وبالنظر إلى أن المسافات النسبية من الشمس إلى الكواكب كانت معروفة بدرجة كبيرة من الدقة، فإن معرفة المسافة المطلقة من الشمس إلى الأرض بدقة تبلغ ٧ في المائة كان يعني إمكانية حساب المسافات المطلقة من بقية الكواكب الخمسة المعروفة إلى الشمس بنفس تلك النسبة من الدقة، ٧ في المائة، بنهاية القرن السابع عشر.

ويمكن الاستعانة بنفس طريقة حساب كتلة الشمس لحساب كتلة المشتري وزُحل والأرض. تلك الكواكب الثلاثة لها أقمار معروفة تدور حولها؛ وفي عام ١٦١٠، اكتشف جاليليو جاليلي أربعة أقمار تدور حول المشتري، وتُعرف اليوم بأقمار جاليليو. فإذا كانت كتلة المشتري $m_1$، و$m_2$ هي كتلة أحد أقماره، فيمكننا حساب كتلة المشتري، بالاستعانة بالمعادلة رقم ٥، بنفس الطريقة التي يمكننا بها حساب كتلة الشمس، باستثناء أن المسافة r هنا سترمز إلى المسافة بين المشتري وقمره، فيما ستشير T إلى الدورة المدارية لذلك القمر حول المشتري. تبلغ الدورة المدارية لأقمار جليليو الأربعة (للمشتري ٦٣ قمرًا!) ١,٧٧ يوم، و٣,٥٥ يوم، و٧,١٥ يوم، و١٦,٩٦ يوم.

وقد ازدادتْ دقة حساب المسافات وثابت الجاذبية على مدار الوقت. وبحلول القرن التاسع عشر، كان ثابت الجذب العام معروفًا بدقة تبلغ ١ في المائة؛ واليوم يُعرف بدقة تبلغ حوالي ٠,٠١ في المائة.

دعني أعرض عليك مثالًا رقميًّا. بالاستعانة بالمعادلة رقم ٥، دعنا نحسب معًا كتلة الأرض ($m_1$) باستخدام مدار قمر الأرض (الذي تبلغ كتلته $m_2$). ولاستخدام المعادلة رقم ٥ على النحو المناسب، فلا بد أن تكون المسافة بالمتر وأن يكون الزمن بالثانية. عندئذ، إذا عوضنا عن $G$ بـ٦,٦٧٣× ١٠$^{-١١}$، فستصبح لدينا الكتلة بالكيلوجرامات.

يبلغ متوسط المسافة بين الأرض والقمر ($r$) ٣,٨٤٤٠× ١٠$^{٨}$ متر (ما يعادل

٢٣٩,٠٠٠ ميل)؛ وتبلغ دورته المدارية ($T$) ٢,٣٦٠٦ × ١٠^٦ ثانية (٢٧,٣٢ يومًا). إذا عوضنا في المعادلة ٥ بهذه الأرقام، فسنجد أن كتلة الأرض تساوي ٦,٠٣٠ × ١٠^٢٤ كيلوجرام؛ واليوم تقترب أفضل قيمة لكتلة الأرض من ٥,٩٧٤ × ١٠^٢٤ كيلوجرام، وهو ما يقل بحوالي ١ في المائة عن الرقم الذي حسبته! فما سبب هذا الفارق؟ يرجع أحد أسباب هذا الفارق إلى أن المعادلة التي استعنا بها تفترض أن مدار القمر دائري، في حين أنه ممدود في الواقع، أو ما نصفه بالمدار الإهليلجي. ونتيجةً لذلك، أقصرُ مسافة للقمر تبلغ ٣٦٠,٤٩٣ كيلومتر؛ أما أطول مسافة، فتبلغ ٤٠٥,٥٥٤ كيلومتر. بالطبع، بإمكان قوانين نيوتن التعامل بسهولة أيضًا مع المدارات الإهليلجية، لكن العملية الحسابية التي سيقتضيها ذلك ستثير ذهولك. ولربما قد فعلتْ بالفعل!

أما السبب الآخر في أن ناتج حسابنا لكتلة الأرض أقل قليلًا، فهو أننا افترضنا أن القمر يدور حول الأرض وأن مركز الدائرة هو مركز الأرض. ومن ثم، في المعادلتين ١ و٣، افترضنا أن $r$ هي المسافة بين الأرض والقمر. وهذا صحيح في المعادلة ١؛ لكن، كما سبق أن أوضحتُ بمزيد من التفصيل في الفصل الثالث عشر، يدور كل من الأرض والقمر حول مركز نظام القمر والأرض الثنائي، والذي يقع على عمق آلاف الكيلومترات من سطح الأرض. ومن ثم، فإن $r$ في المعادلة ٣ أقل قليلًا من $r$ في المعادلة ١.

وبما أننا نعيش على الأرض، فثمة طرق أخرى لحساب كتلة الأرض. تتمثل إحدى تلك الطرق في قياس عجلة الجاذبية بالقرب من السطح. عند إسقاط أي جسم كتلته $m$ (حيث $m$ يمكن أن يكون بأي قيمة) فإنه يتسارع بعجلة $g$، تبلغ حوالي ٩,٨٢ متر في الثانية لكل ثانية.(١) ويبلغ متوسط نصف قطر الأرض حوالي ٦,٣٧١ × ١٠^٦ متر (حوالي ٣٩٦٠ ميل).

والآن، دعنا نعود إلى معادلة نيوتن رقم ١؛ بما أن $F=ma$ (قانون نيوتن الثاني)، إذن:

---

(١) ولأن الشيء بالشيء يُذكر، هذه العجلة تكون أقل بنسبة ٠,١٨ في المائة عند خط الاستواء منها عند القطبين، وذلك لأن الأرض ليست كرة مكتملة الاستدارة. فالأجسام عند خط الاستواء تكون أبعد عن مركز الأرض بحوالي ٢٠ كيلومتر مقارنة بالأجسام عند القطبين. لذا فإن عجلة الجاذبية $g$ عند خط الاستواء تكون أقل. وعليه فإن ٩,٨٢ قيمة متوسطة.

$$G\frac{m_{earth}m}{r^2}=mg \qquad (٦)$$

هنا، تشير $r$ إلى نصف قطر الأرض. وبالتعويض عن كل من $G$ بـ٦,٦٧٣×١٠$^{-١١}$، و$g$ بـ٩,٨٢ متر في الثانية لكل ثانية، و$r$ بـ٦,٣٧١ × ١٠$^{٦}$ متر، يمكننا حساب $m_{earth}$ بالكيلوجرامات (يمكنك تجربة ذلك!). وبتبسيط المعادلة إلى حد ما، يكون لدينا الآتي:

$$m_{earth}=\frac{gr^2}{G} \qquad (٧)$$

يظهر لديّ أن $m_{earth}$ تساوي ٥,٩٧٣ × ١٠$^{٢٤}$ كيلوجرام (مدهش، أليس كذلك؟).

لاحظ أن كتلة الجسم $m$، الذي أسقطناه لم تظهر في المعادلة ٧! لا ينبغي أن يثير ذلك استغرابك، فكتلة الأرض لا يمكن بأي حال أن تعتمد على كتلة الجسم الذي أسقطته.

وقد يهمك كذلك معرفة أن نيوتن كان يعتقد أن كثافة الأرض كان تتراوح ما بين ٥٠٠٠ و٦٠٠٠ كيلوجرام لكل متر مكعب. ولم يكن يستند في هذا الاعتقاد على أي معلومات فلكية؛ كما كان ذلك الاعتقاد مستقلًا تمامًا عن قوانينه. لقد كان ذلك أفضل تخمينات نيوتن «المستنيرة». في الواقع، تبلغ كثافة الأرض ٥٥٤٠ كيلوجرام لكل متر مكعب. فإذا سمحتَ أن أكتب تخمين نيوتن بالصورة ٥٥٠٠±٥٠٠ كيلوجرام لكل متر مكعب، لم يتعد ارتيابه نسبة العشرة في المائة (أليس مذهلًا!).

لا أعرف إن كان تخمين نيوتن قد أُخذ على محمل الجد في وقته أم لا، لكن لنفترض أن الأمر كان كذلك. فبما أن نصف قطر الأرض كان معروفًا في القرن السابع عشر، فإن كتلتها كان من الممكن أن تُحسَب بدقة بلغتْ ١٠ في المائة (الكتلة تساوي حاصل ضرب الحجم في الكثافة). ومن ثم، يمكن استخدام المعادلة ٧ لحساب $G$ كذلك بدقة تصل إلى ١٠ في المائة. أذكر ذلك هنا لما أشعر به من إثارة بالغة، فبِقَبول تخمين نيوتن لمتوسط كثافة الأرض، في نهاية القرن السابع عشر، كان من الممكن معرفة ثابت الجذب العام، $G$، بالفعل بدقة تصل إلى ١٠ في المائة!

# نبذة عن المؤلفَين

**والتر لوين:** وُلد والتر ونشأ في هولندا. وفي عام ١٩٦٥، حصل والتر على درجة الدكتوراه في الفيزياء من جامعة دلفت للتكنولوجيا. وفي عام ١٩٦٦، التحق والتر بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا زميلًا ما بعد الدكتوراه. وفي العام نفسه، ترقى لمنصب أستاذٍ مساعد، وفي عام ١٩٧٤، أصبح أستاذًا. وهو عالم فيزياء فلكية ضليع، ورائد لعلم فلك الأشعة السينية، ونشر أكثر من أربعمائة وخمسين مقالًا علميًا. وقد ظل لوين يُدرس المقررات الثلاثة الأساسية للفيزياء في معهد ماساتشوستس طوال ثلاثين عامًا. وقد كانت محاضراته بالغة الشهرة، حتى إنها كانت تسجّل بكاميرا فيديو لتحصل على أعلى مشاهدات على منصة OpenCourseWare لمناهج معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وموقع يوتيوب، وعلى iTunes U، وAcademic Earth. أكثر من مليون شخص من جميع أنحاء العالم يشاهدون تلك المحاضرات سنويًا. وقد تلقتْ محاضراته إطراءات نُشرتْ في كثيرٍ من وسائل الإعلام، ومن ضمنها نيويورك تايمز، بوسطن جلوب، وإنترناشيونال هيرالد تريبيون، وجارديان، وواشنطن بوست، ونيوزويك، ويو إس نيوز آند وورلد ريبورت. وقد حاز عددًا من الأوسمة والجوائز ومنها ميدالية ناسا للإنجاز العلمي المميز عام ١٩٧٨، وجائزة هامبولت، وزمالة جاجنهايم في عام ١٩٨٤، وجائزة مجلس العلوم التابع لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا للتميز في التدريس الجامعي عام ١٩٨٤، وجائزة دبليو بيوكنر من قسم الفيزياء في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا عام ١٩٨٨، وجائزة ناسا للإنجاز الجماعي لاكتشاف النباض الانفجاري عام ١٩٩٧، وجائزة إيفيريت مور بيكر التذكارية للتميز في التدريس الجامعي عام ٢٠٠٣. كما حاز العضوية بالمراسلة في الأكاديمية الملكية الهولندية للفنون والعلوم، وزمالة الجمعية الفيزيائية الأمريكية في عام ١٩٩٣.

**وارن جولدستين:** أستاذ التاريخ ورئيس قسم التاريخ في جامعة هارتفورد، التي تسَلَّم فيها جائزة جيمس إي وفرانسيس دبليو بينت للإبداع الأكاديمي عام ٢٠٠٦.

بالإضافة إلى ذلك، على مدار حياته كان وارن مولعًا بالفيزياء. وبجانب كونه مؤرخًا وكاتب مقالات وصحفيًّا ومحاضرًا غزير الإنتاج وحائزًا على العديد من الجوائز، فقد ألَّف عددًا من الكتب، ومنها Playing for Keeps: A History of Early Baseball، وكتاب ترجمة السيرة الذي أطرى عليه النقاد William Sloane Coffin, Jr: A Holy Impatience. وقد نُشرتْ كتاباته عن التاريخ، والتعليم، والدين، والسياسة، والرياضة في نيويورك تايمز، وواشنطن بوست، وكرونيكل أوف هاير إديوكيشن، وبوسطن جلوب، ونيوزداي، وشيكاغو تريبيون، وفيلادلفيا إنكوايرر، ونيشن، وكريستيان سنشري، وييل ألومناي ماجازين، وتايمز ليتراري سابلمنت، وهافنجتون بوست.

مكتبة
t.me/soramnqraa

«لا بد أن تلك البهجة التي تغمر لوين وهو يشرح العمليات التي تجري في الكون من حولنا وأناقته وبهاءه المذهلين تنتقل إلينا كذلك. أثق أنك ستتعلم الكثير من هذا الكتاب».

**لوس أنجلوس تايمز**

«حين تفرغ من قراءة هذا الكتاب ستدرك مدى ما يفيض عليك من نعم، وتفتح عينيك على كل تلك المعجزات الصغيرة التي تحدث في كل مكان من حولك».

**ذا بوسطن جلوب**

على مدار سنوات عمله التي تربو على الأربعين، أستاذًا عزيزًا في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، راح والتر لوين يشحذ مهارته الفريدة في تقديم مادة الفيزياء في قالب ممتع سهل الفهم. وها هو لوين يصطحب القراء في رحلةٍ عبر صفحات هذا الكتاب، يفتح خلالها أعيننا على قدرة الفيزياء على أن تكشف لنا عن كل تلك العمليات الخفية التي تجري في الكون من حولنا بأسلوبٍ بهيٍّ متمكن.

وسواء أكان لوين يشرح سبب رائحة الجو المنعشة بعد عواصف البرق، أم يشرح التصور المحتمل لشكل الانفجار العظيم، فإنه لا يُعدَم أبدًا القدرة على إثارة الدهشة وبث البهجة مستعينًا بتلك القدرة الاستثنائية للفيزياء على الإجابة عن أكثر الأسئلة إثارةً للحيرة. لقد كتب لوين يقول: «الفيزياء عندي، طريقةٌ للرؤية — رؤية الأشياء المذهلة والأشياء الاعتيادية، والأشياء الضخمة وتلك الدقيقة — رؤيتها ككلٍ بهيٍّ منسوج معًا في نسيج واحدٍ مثير». إن طرقه المبتكرة المدهشة والواضحة لتعريفنا بالألغاز التي حلتها الفيزياء تنقل لنا شعورًا جديدًا بتقدير بهاء تلك القوى التي تتحكم في حياتنا والتناغمات الدقيقة فيما بينها.

«إذا لم يحالفك الحظ يومًا بمدرس علوم يتمتع بانطلاق والتر لوين ومرحه، فاقرأ هذا الكتاب لتتحسر على ذاتك... ذلك الكتاب يتفجر بالنشاط... إنه بمثابة مَقصِف زاخر بأصناف الأطعمة الشهية، تصطف عليه مقبلات فكرية، كلُّ صنفٍ منها وجبةٌ ممتعة في حد ذاته».

**ناتشورال هيستوري**

**والتر لوين:** درَّس الفيزياء في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا طوال ثلاثةٍ وأربعين عامًا. وقد حازتْ محاضراته ذائعة الشهرة على إشادات عظيمة، منها تقرير موجز في برنامج سيكستي مينتس، ومقالات في ذا نيويورك تايمز، وواشنطن بوست، وذا بوسطن جلوب، ومجلة أُو، ومجلة ذا أوبرا ماجازين، بالإضافة إلى أنها من أعلى الفيديوهات مشاهدةً على موقعي يوتيوب وآي تيونز يونيفرستي.

**وارن جولدستين:** أستاذ مادة التاريخ ورئيس قسم التاريخ في جامعة هارتفورد.

٣١٢ صفحة

ISBN 978-977-86533-0-4

telegram
@soramnqraa

بوك مانيا