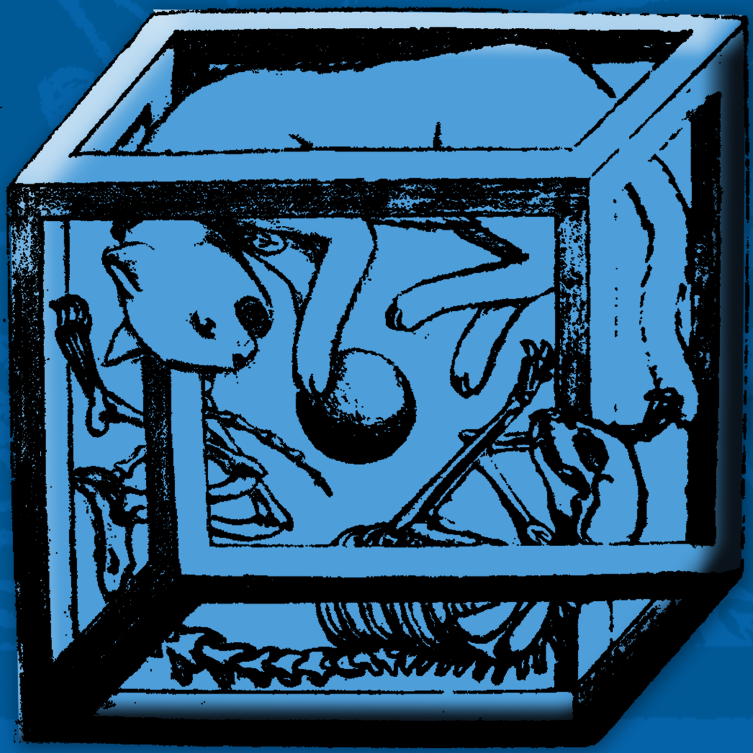
البحث عن قطة شرودنجر

فيزياء الكم والواقع



جون جريبين

البحث عن قطة شرودنجر

فيزياء الكم والواقع

تأليف

جون جريبين

ترجمة

فتح الله الشيخ

مراجعة

أحمد عبد الله السماحي

هنـــداوي

البحث عن قطة شرودنجر

In Search of Schrödinger's Cat

جون جريبين

John Gribbin

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

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

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

تصميم الغلاف: إيهاب سالم

الترقيم الدولي: ٢ ٠٠٢٦ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ١٩٨٤.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٢.

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

Copyright © John and Mary Gribbin 1984, 2012.

المحتويات

شكر وتقدير	٩
مقدمة	١٣
تمهيد	١٥
الجزء الأول: الكَمُّ	١٩
١- الضوء	٢١
٢- الذرات	٣٣
٣- الضوء والذرات	٤٧
٤- الذرة لدى بور	٦٣
الجزء الثاني: ميكانيكا الكَمِّ	٨٩
٥- الفوتونات والإلكترونات	٩١
٦- المصفوفات والموجات	١١١
٧- مطبخ الكَمِّ	١٣١
الجزء الثالث: ... وفوق ذلك	١٥٩
٨- الفرصة وعدم اليقين	١٦١
٩- المفارقات والاحتمالات	١٨١
١٠- الحكم بعد التجربة	٢١٥
١١- عوالم كثيرة	٢٣٣
خاتمة	٢٥١

كلمة أخيرة ٢٧١
المراجع ٢٧٧

«إنَّه لا يروق لي، معذرةً لا دخلَ لي به مطلقًا.»

إرفين شرودنجر
١٨٨٧–١٩٦١

«لا شيءَ حقيقي.»

جون لينون
١٩٤٠–١٩٨٠

شكر وتقدير

ترجع معرفتي بنظرية الكَمِّ إلى أكثرَ من عشرين سنةً مضت منذ أيام الدراسة، وذلك عندما اكتشفتُ الطريقة السحرية التي فسَّر بها الجدول الدوري للعناصر نموذجَ الأغلفة الإلكترونية في الذرة، والمفترض بذلك أنه يُفسِّر كلَّ الكيمياء التي ناضلتُ من أجلها وتحملتُ الكثيرَ من الدروس المضجرة. وبتتبُّع هذا الاكتشاف بمساعدة كتبٍ من المكتبة تَدَّعي أنها «متقدمة أكثر من اللازم» بالنسبة إلى المستوى الدراسي المتواضع الذي كنتُ عليه، اكتشفتُ في الحال البساطةَ الرائعة التي تفسِّر بها نظريةُ الكَمِّ الطيفَ الذري، وقد اكتشفتُ بنفسي للمرة الأولى أن أفضلَ الأمور في العلم تتمتَّع بمزيجٍ من الجمال والبساطة، وهي الحقيقة التي يُخفيها كثيرٌ جدًّا من المعلمين عن تلاميذهم، إما عن قصدٍ وإما عن غير قصد. وقد شعرتُ بنفس شعور بطل رواية «البحث» للكاتب سي بي سنو — التي قرأتُها بعد ذلك بكثير— والذي اكتشفَ الشيء نفسه:

> لقد شاهدتُ مزيجًا من الحقائق المبعثرة تتَّخذ نسقًا منظَّمًا ومرتَّبًا ... فقلت لنفسي: «لكنه مزيجٌ حقيقي.» «إنه جميل جدًّا وحقيقي.»
>
> (طبعة ماكميلان ١٩٦٣، صفحة ٢٧)

يرجع السبب جزئيًّا إلى هذا الكشف فيما اتخذته من قرار بالتخصُّص في مادة الفيزياء أثناء دراستي الجامعية. وفي غضون فترةٍ وجيزة، تَحقَّق الطموح وأصبحتُ طالبًا جامعيًّا في جامعة ساسكس في برايتون. غير أن بساطة الأفكار الأساسية هناك وجمالها قد اختنقا في فيضٍ من التفاصيل والصيغ الرياضية المتعلِّقة بحل مسائلَ بعينِها بمساعدة معادلات

ميكانيكا الكَمِّ. ويبدو أن تطبيق هذه الأفكار في عالَم الفيزياء اليوم أمرٌ يتعلَّق بالحقيقة والجَمال، شأنه شأن قيادة طائرة طراز ٧٤٧ مقارنةً بالطيران الشراعي، ومع ذلك فإن ما توصلتُ إليه من كشفٍ مبدئي ظل يمارس تأثيره الجوهري في حياتي المهنية، فقد أهملتُ عالَم الكَمِّ فترةً طويلة، ورُحت أستكشف مناحيَ علميةً أخرى.

توقَّدت جذوة هذا الاهتمام الأول على أثرِ عدة عوامل مجتمعة. في نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات من القرن العشرين، بدأت تظهر كتبٌ ومقالات تحاول تقديمَ عالَمِ الكَمِّ الغريب إلى جمهورٍ غير المختصين علميًّا، وذلك بدرجاتٍ متفاوتة من التوفيق. وكان بعض الكتب التي تزعم أنها «تبسِّط العلم وتُروِّج له» مفرطًا في الخيال ومبتعِدًا عن الصدق، لدرجةِ أنني أتصوَّر أن أيَّ قارئ لا يمكن أن يكتشف حقيقةَ العلم وجماله بقراءة هذه الكتب، وبدأ يحدوني شعورٌ نحو إنجاز هذه المهمة على النحو اللائق. في الوقت نفسه، بدأت ترِدُ أنباءٌ حول سلاسل التجارب المستمرة التي أثبتت حقيقةَ عددٍ من أكثر السمات غرابةً في نظريةِ الكَمِّ، وقد حمَّستني هذه الأنباء أن أعود إلى ارتياد المكتبات للتنقيب والبحث وإنعاش استيعابي لهذه الأفكار الغريبة. وأخيرًا وفي أحد أعياد الميلاد طلبت مني قناة «بي بي سي» الإخبارية أن أشارك في برنامجٍ إذاعي كنوعٍ من الاتجاه المقابل لاتجاه مالكولم موجريدج الذي أعلن حديثًا تحوُّله إلى المذهب الكاثوليكي، وكان هو الضيف الرئيسي خلال هذا الموسم. وبعد أن أدلى هذا الرجل الشهير بدلوه مؤكدًا وجودَ جوانبَ ملغزةٍ في المسيحية، استدار ناحيتي وقال: «غير أنه يوجد هنا رجل يعرف كل الإجابات أو يدَّعي أنه يعرفها.» وخلال الوقت المحدود الذي أُتيح لي، حاولتُ أن أجيب بهدوء، مشيرًا إلى أن العلم لا يدَّعي معرفةَ جميع الإجابات، وأن الدِّين — وليس العلم — هو الذي يعتمد بالأساس على الإيمانِ المطلَق والقناعة المطلَقة بأن الحقيقة معروفة. وقلت: «أنا لا أومن بأي شيء»، وكنت بصدد الاستطراد في شرح هذه الفلسفة بينما انتهى وقت البرنامج. وقد احتفى بي الأصدقاء والمعارف طَوال أيام عيد الميلاد المجيد بترديد تلك الكلمات، وأمضيتُ ساعاتٍ في تفسيرِ ما مفاده أن عدمَ إيماني المطلَق بأي شيء لم يمنعني من ممارسة الحياة بصورةٍ عادية، مستفيدًا من الفرضيات المنطقية السارية مثل احتمال عدم اختفاء الشمس فجأةً.

بلورت هذه العمليةُ أفكاري حول ماهية العلم، وتضمَّنت الكثيرَ من النقاشات بشأن الحقيقة الكامنة وراء عالَمِ الكَمِّ وواقعيته أو عدم واقعيته، وذلك بما يكفي لإقناعي بأنني كنت في الواقعِ مستعدًّا لكتابة الكتاب الذي بين أيديكم الآن. وأثناء إعداد الكتاب راجعتُ الكثير من الحجج والأسانيد الدقيقة في مساهماتي العلمية المنتظمة في البرامج الإذاعية

التي استضافني فيها تومي فانس والتي بثَّتها خدمة الإذاعة التابعة للقوات البريطانية، وسرعان ما كشفتْ أسئلة توم الاستقصائية جوانبَ الخلل والقصور في طرحي، وأدَّت بدورها إلى تنظيمٍ أفضلَ لأفكاري. كانت مكتبة جامعة ساسكس المصدرَ الرئيسي للمادة المرجعية المستخدمة في إعداد الكتاب؛ ذلك حيث تضمُّ المكتبةُ واحدةً من أفضل مجموعات الكتب التي تناولت نظريةَ الكَمِّ في أي مكان، وقد جمعَ لي ماندي كابلين من مجلة «نيو ساينتست» عددًا من أكثرِ المراجع المغمورة، وهو يملك طريقةً مقنعة فيما يتعلَّق برسائل التلكس، وصحَّحتْ كريستين ساتون بعض مفاهيمي الخاطئة حول فيزياء الجسيمات ونظرية المجال. وأما عن زوجتي، فلم تزوِّدني بالدعم الأساسي فيما يتعلَّق بالبحث النظري وتنظيم المادة فقط، بل عالجت أيضًا كثيرًا من المشكلات وذلَّلت الكثير من العقبات. وأنا ممتنٌّ أيضًا للبروفيسور رودولف بيرلز الذي تجشَّم عناءَ الشرح التفصيلي للجوانب الصعبة في تجربة «الساعة في الصندوق» و«مفارقة إي بي آر».

ومن ثَم، فإنَّ أي إطراء على جودة هذا الكتاب يجب أن يُرفع إلى كتب الكيمياء «المتقدمة» التي نسيتُ أسماءها الآن، والتي عثرتُ عليها في مكتبة مقاطعة «كِنت» وأنا في السادسة عشرة من العمر، وإلى الكتب «المبسطة» المضلِّلة وما نُشر عن أفكارِ الكَمِّ، الأمر الذي أقنعني بأنني أستطيع تناول الموضوع بصورةٍ أفضل، وأخصُّ بالشكر هنا مالكولم موجريدج وهيئةَ الإذاعة البريطانية (بي بي سي)، ومكتبةَ جامعة ساسكس، وتومي وخدمةَ الإذاعة التابعة للقوات البريطانية (بي أف بي إس)، وماندي كابلين وكريستين ساتون، وأتوجَّه بشكرٍ خاصٍّ إلى مين. أما أي شكوى تتعلَّق بمواضعِ القصور في الكتاب فمرجعُها بالطبع إليَّ.

جون جريبين
يوليو ١٩٨٣

مقدمة

لو وُضعتْ كلُّ الكتب والمقالات التي كُتبتْ حول نظرية النسبية لغير المختصين جنبًا إلى جنب، فإنها قد تعانق عَنان السماء. و«الجميع يعرف» أن نظرية النسبية لأينشتاين هي أعظمُ إنجازٍ علمي في القرن العشرين، ولكن الجميع يجانبهم الصواب في ذلك. أما إذا وُضعت كلُّ الكتب والمقالات المكتوبة عن نظريةِ الكَمِّ لغير المختصين جنبًا إلى جنب، فإنها بالكاد تغطي سطح المكتب الذي أجلس إليه. ولا يعني ذلك أن نظريةَ الكَمِّ ليست معروفة خارج القاعات الأكاديمية. بل في الواقع أصبحت ميكانيكا الكَمِّ ذاتَ شعبيةٍ جارفة في بعض الأوساط؛ حيث استُعينَ بها لتفسيرِ ظواهرَ مثل التخاطر وانثناء الملاعق، وقدَّمت مادةً خصبة من الأفكار لرواياتٍ عديدة من روايات الخيال العلمي. وتُعرَف ميكانيكا الكَمِّ في الأساطير الشائعة، بقدرِ ما هي معروفة بأية حال، بالخفيانية والإدراك الحسي الخارجي، وهو فرعٌ غريب وخفي من العلوم لا يفهمه أحدٌ، وليس له أي استخدامٍ عملي.

إنَّ الغرض من هذا الكتاب هو التصدي لهذا الموقف تجاهَ ما هو في واقع الأمر أهم المجالات وأرسخها في الدراسة العِلمية. وقد قادت عدةُ عواملَ مجتمعة في صيف عام ١٩٨٢ إلى تأليف الكتاب. وأول هذه العوامل هو أنني كنت قد انتهيت لتوِّي من تأليف كتابٍ عن النسبية بعنوان «تحدُّب الفضاء»، وشعرت أنه من المناسب أن أقتحم الفرع العظيم الآخر من علوم القرن العشرين وأحاول فكَّ طلاسمه. والعامل الثاني هو أنني أصبحت مستاءً بصورةٍ متزايدة من المفاهيم الخاطئة المتداولة تحت اسم نظريةِ الكَمِّ في الأوساط غير العلمية. وقد أفرزَ كتاب «الطاوية والفيزياء» الرائع لمؤلِّفه فريتيوف كابرا عددًا من المقلِّدين الذين لم يفهموا الفيزياء ولا الطاوية، لكنهم توهَّموا إمكانيةَ تحقيقِ كسبٍ مادي من خلال ربط العِلم الغربي بالفلسفة الشرقية. أما العامل الأخير، فهو ورود أنباءٍ من

باريس في أغسطس ١٩٨٢ عن نجاحِ فريقٍ علمي في إجراءِ اختبارٍ حاسمٍ يؤكِّد دقة وجهة نظر ميكانيكا الكَمِّ عن العالَم، وذلك للذين لا يزالون يشكِّكون في نظريةِ الكَمِّ.

لا تبحث هنا عن «التصوُّف الشرقي» أو انثناء الملاعق أو الإدراك الحسي الخارجي. بل عليك أن تبحث هنا عن القصة الحقيقية لميكانيكا الكَمِّ، وهي حقيقة أغرب بكثير من أي قصةٍ خياليةٍ مختلَقة. وهكذا هو حال العلم؛ فهو لا يحتاج إلى أن نضعه في رداء فلسفةِ شخصٍ آخر؛ ذلك أنه مليء بمواضع الاستحسان الخاصة به وله أسراره ومفاجآته. والسؤال الذي يعالجه هذا الكتاب هو «ما الواقع؟» وقد تفاجئك الإجابة (أو الإجابات)، وقد لا تصدِّقها. ولكنك ستكتشف كيف يرى العِلمُ المعاصر العالَم.

تمهيد

لا شيء حقيقي

إنَّ القِطة المتضمَّنة في عنوان هذا الكتاب حيوانٌ خرافي، أما شرودنجر فشخصيةٌ حقيقية. كان إرفين شرودنجر عالِمًا نمساويًّا ساعد في منتصف عشرينيات القرن العشرين في وضْع معادلات فرعٍ من العلوم معروف الآن باسم ميكانيكا الكَمِّ. بيدَ أن تعبير «فرع من العلوم» ليس بالتعبير الصحيح هنا؛ لأن ميكانيكا الكَمِّ توفِّر الركيزة الأساسية لكل العلوم الحديثة. تصف هذه المعادلات سلوكَ الأجسام المتناهية الصِّغر — التي في حجم الذرات أو أصغر — وتزوِّدنا أيضًا بالطريقة الوحيدة لفهْم عالَم الأشياء المتناهية الصِّغر. ومن دون هذه المعادلات لم يكن للفيزيائيين أن يُصمِّموا محطات الطاقة النووية العاملة (أو القنابل النووية)، أو أن يحصلوا على أشعة الليزر، أو حتى أن يفسِّروا كيف تحتفظ الشمس بسخونتها. ولولا ميكانيكا الكَمِّ لظلَّت الكيمياء في عصورها المظلمة، ولولا ظهورُ علم البيولوجيا الجزيئية لما فهمنا قط الحمضَ النووي أو الهندسة الوراثية.

تمثِّل ميكانيكا الكَمِّ أعظمَ إنجازات العلم، وهي أهم بكثير من النظرية النسبية، وذات استخداماتٍ مباشرة وعملية أكثر منها. ومع ذلك، فقد قدَّمت بعض التنبؤات الغريبة للغاية. وفي الواقع، تتسم ميكانيكا الكَمِّ بالغرابة الشديدة، لدرجةِ أن ألبرت أينشتاين وجدها مبهمةً وغير مفهومة، ورفض أن يتقبَّل كل النتائج والآثار التي ساقها شرودنجر وزملاؤه بشأن النظرية. وجدَ أينشتاين وعلماءُ كثيرون غيره أنه من الأسلم الاعتقاد أن معادلات ميكانيكا الكَمِّ تمثِّل ببساطة نوعًا من الحِيَل الرياضية، الأمر الذي تصادف أنه قدَّم سبيلًا عمليًّا

معقولًا يرشدنا إلى سلوك الجسيمات الذرية ودون الذرية، لكنه يخفي حقيقةً أعمقَ تتوافق بصورةٍ أقربَ مع إدراكنا المعتاد للواقع. ذلك أن ميكانيكا الكَمِّ تنادي بأنه لا يوجد شيءٌ حقيقي، وبأننا لا يمكننا أن ندلو بدلونا في سلوك الأشياء ما دمنا لا نشاهدها بأعيننا. وقد استُخدِمت قِطة شرودنجر الخرافية لتوضيح الفرْق بين العالَم الكمومي والعالَم اليومي المعتاد.

في عالَم ميكانيكيا الكَمِّ، تتوقَّف قوانين الفيزياء المألوفة في حياتنا اليومية عن العمل. وتتحكَّم الاحتمالات في الأحداث عوضًا عن ذلك. فقد يحدث، على سبيل المثال، أن تتفكك ذرةٌ مُشعَّة وتطلق إلكترونًا، أو قد لا يحدث. ومن الممكن وضْع تجربة بحيث يكون هناك احتمال بنسبة ٥٠٪ أن تتفكَّك إحدى الذرات في كميةٍ كبيرة من مادةٍ مشعة في غضونِ فترةٍ زمنيةٍ معينة، ويسجِّل كاشِفٌ ما تفكُّكها في حال حدوثه حقًّا. وقد حاول شرودنجر — الذي كان استياؤه من نتائج نظريةِ الكَمِّ يضاهي استياء أينشتاين تمامًا — أن يوضِّح استحالةَ هذه النتائج وتعذُّرها، وذلك حيث تخيَّل أن مثل هذه التجربة قد أُجريت في غرفةٍ مغلقة، أو صندوقٍ مغلق، يوجد فيها أيضًا قِطةٌ حية وقِنِّينة بها سُمٌّ، واتخذت التدابير اللازمة بحيث إذا حدث وتفكَّكت الذرة المشعة فإن قِنِّينة السُّم تنكسر؛ ومن ثَم تموت القِطة. في عالَم الحياة اليومية، يوجد احتمال بنسبة ٥٠٪ أن تموت القطة، ومن دون النظر داخل الصندوق، يمكن القول بكل راحة إن القطة إما حية أو ميتة. ولكننا الآن نقف في مواجهةٍ مباشرة مع غرابة عالَمِ الكَمِّ. طبقًا للنظرية، لا يمكن لأيٍّ من الاحتمالَين الجائزِ حدوثُهما للمادة المشعة، ومن ثَم للقطة، أن يحدث في الواقع إلا إذا شاهدناه بأعيننا. لن يكون معروفًا هل حدث التفكُّك الذري أم لم يحدث، وهل قُتلت القطة أم لم تُقتَل حتى ننظر داخل الصندوق لنرى ما حدث. يقول المنظِّرون الذين يقبلون بالنسخة التجريدية الخالصة من ميكانيكا الكَمِّ إن القطة موجودةٌ في حالةٍ غير محدَّدة؛ فهي ليست حية ولا ميتة، حتى ينظر شخصٌ داخل الصندوق ليرى ما يجري. لا وجودَ لشيءٍ حقيقي حتى نشاهده بأعيننا.

رأى أينشتاين وآخرون غيره أن هذه الفكرة بغيضةٌ ومحرَّمة. وقال: «إنَّ الرب لا يلعب النرد.» مشيرًا إلى النظرية التي تنادي بأن العالَم تحكمه مجموعة النتائج المترتِّبة على «اختياراتٍ» عشوائية بالأساس لاحتمالاتٍ على المستوى الكمومي. وفيما يتعلَّق بعدم حقيقة الحالة التي عليها قطة شرودنجر، فقد رفضها أينشتاين؛ حيث افترض أنه لا بد من وجود «آليةٍ منضبطة» تعزِّز حقيقة الأشياء. وقد قضى سنواتٍ عديدة في محاولة تصميم

اختباراتٍ يمكن بواسطتها الكشف عن هذه الحقيقة الكامنة عمليًّا، لكنه مات قبل أن يتسنَّى له إجراءُ مثل هذا الاختبار. وربما أنه بالأحرى لم يمتد به العمر ليرى نتائج الحجة المنطقية التي ساقها بنفسه.

في صيف سنة ١٩٨٢ وفي جامعة جنوب باريس بفرنسا، أكمل فريقٌ يقوده آلان أسبكت سلسلةً من التجارب المصمَّمة لاكتشاف الحقيقة الكامنة وراء العالَم الكمومي غير الواقعي. وقد أطلقوا على الحقيقة الكامنة — الآلية المنضبطة — اسم «المتغيرات الخفية»، ورصدت التجربة سلوك فوتونَيْن أو جسيمَيْن من الضوء ينطلقان مبتعدَين أحدهما عن الآخر في اتجاهَين متضادَّين من مصدرٍ للضوء. وقد وُصِفَت التجربة بالتفصيل في الفصل العاشر، لكن يمكن تخيُّلها في الأساس كاختبار للحقيقة. ويمكن مشاهدة الفوتونَين المنطلقَين من المصدرِ نفسِه بواسطة كاشِفَين يقيسان خاصيةً تسمَّى الاستقطاب. وتبعًا لنظرية الكَمِّ، فإن هذه الخاصية لا تُعدُّ موجودةً حتى يتم قياسها. وتبعًا لفكرة المتغير الخفي، فإنه يكون لكل فوتون استقطابٌ «حقيقي» منذ اللحظة التي نشأ فيها. ونظرًا لأن الفوتونَين قد انطلقا معًا، فإن استقطابَيهما يكونان مترابطَين. ولكن تختلف طبيعة الارتباط المقيس بالفعل تبعًا لمنظورَي الحقيقة.

تتسم نتائجُ هذه التجربة الحاسمة بأنها قاطعة ولا الْتباس فيها. ذلك حيث لا يوجد نوع الارتباط الذي تنبأت به نظريةُ المتغير الخفي، بينما يوجد نوع الارتباط الذي تنبَّأت به ميكانيكا الكَمِّ، والأكثر من ذلك أنه طبقًا لما تنبأت به ميكانيكا الكَمِّ أيضًا فإنَّ القياس المستخدَم مع أحد الفوتونَين يكون له تأثيرٌ لحظي على طبيعة الفوتون الآخر. ويربط تفاعلٌ ما بين كلا الفوتونَين على نحوٍ معقَّد، على الرغم من اندفاعهما بعيدًا أحدهما عن الآخر بسرعة الضوء، وعلى الرغم مما تخبرنا به نظرية النسبية عن أنه لا يمكن لأي إشارة أن تنتقل بسرعة تفوق سرعة الضوء. أثبتت التجارب أنه لا توجد حقيقةٌ كامنة وراء العالَم. و«الحقيقة» بالمفهوم المعتاد ليست بطريقةٍ جيدة للتفكير في سلوك الجسيمات الأساسية التي يتكوَّن منها العالَم، ولكن في الوقت نفسه، تبدو هذه الجسيمات مرتبطةً على نحوٍ لا ينفصم في كلٍّ لا يتجزأ، بحيث يدرك كل جسيم منها ما يحدث للجسيمات الأخرى.

لم يكن البحث عن قطة شرودنجر سوى بحثٍ عن الحقيقة الكمومية. وقد يبدو من هذا العرْض الموجز أن البحث غير ذي جدوى؛ حيث لا توجد حقيقة بالمفهوم المتداول للكلمة. غير أن هذه ليست نهاية القصة، وقد يقودنا البحث عن قطة شرودنجر إلى فهمٍ جديدٍ للحقيقة يتجاوز التفسير المتعارف عليه لميكانيكا الكَمِّ ولكنه يشمله. بيد أن الطريق

طويل، ويبدأ بعالِم ربما يفوق أينشتاين في استيائه من الإجابات التي لدينا الآن عن الأسئلة التي حيَّرته وأمعن التفكير فيها. لم يكن لدى إسحاق نيوتن عندما عكف على دراسة طبيعة الضوء منذ ثلاثة قرون، أدنى فكرة بأنه كان بالفعل على الدرب الذي من شأنه أن يقوده إلى قطة شرودنجر.

الجزء الأول

الكَمُّ

«أي شخص لا تصدمه نظريةُ الكَمِّ فإنه لم يفهمها.»

نيلز بور
١٨٨٥–١٩٦٢

الفصل الأول

الضوء

استحدث إسحاق نيوتن الفيزياء، وجاءت كل العلوم لتعتمد عليها. ولا شك أن نيوتن قد أسَّس أبحاثه على أبحاثِ آخرين غيره، إلا أن نشر قوانينه الثلاثة عن الحركة ونظرية الجاذبية منذ أكثر من ثلاثمائة سنة هو الذي وضع العِلم على الطريق الذي أدَّى إلى انطلاق رحلات الفضاء، واكتشاف أشعة الليزر، والطاقة الذرية، والهندسة الوراثية، وتكوين فهمٍ للكيمياء، وبقية العلوم كافة. على مدى مائتَي عام، سادت فيزياء نيوتن (التي تسمَّى الآن «الفيزياء الكلاسيكية») بقوةٍ وتصدَّرت القمة، وفي القرن العشرين ظهرت آراءٌ ثوريةٌ جديدة أخذت الفيزياء إلى ما هو أبعد كثيرًا من نيوتن، إلا أنه من دون هذين القرنَين من التقدُّم العلمي لم يكن لهذه الآراء الجديدة أن تتحقَّق. لا يرصد هذا الكتاب تاريخ العلوم، وهو معنيٌّ بالفيزياء الجديدة — فيزياء الكَمِّ — أكثر من تلك الأفكار الكلاسيكية. إلا أنه حتى في أبحاث نيوتن منذ ثلاثة قرون كانت هناك إشارات عن التغيرات التي ستحدث لاحقًا، والتي لم تنشأ عن دراساته لحركة الكواكب ومداراتها، ولا عن قوانينه الثلاثة الشهيرة، ولكن عن أبحاثه حول طبيعة الضوء.

تُعزى أفكار نيوتن عن الضوء كثيرًا إلى أفكاره عن سلوك الأجسام الصلبة ومدارات الكواكب. أدرك نيوتن أن خبراتنا اليومية عن سلوك الأجسام قد تكون مضلِّلة، وأن جسمًا ما — وليكن جُسيمًا — غيرَ خاضع لأي قوًى خارجيةٍ لا بد أن يختلف كثيرًا في سلوكه عن جسيمٍ موجود على سطح الأرض. وتدُلنا خبرتنا اليومية على أن الأشياء تميل إلى البقاء في مكانٍ واحد ما لم تتعرَّض للدفع، وأنه بمجرد توقُّفك عن دفعها فإنها ستتوقف قريبًا. إذن لماذا لا تتوقَّف أجسامٌ مثل الكواكب أو القمر عن الحركة في مداراتها؟ وهل يدفعها شيءٌ ما؟ أبدًا على الإطلاق. الكواكب بطبيعتها لا تكون خاضعةً لأي تدخُّلٍ خارجي،

ولكنها تتدخَّل في الأجسام التي على سطح الأرض. إذا حاولتُ أن أجعل قلمًا ينزلق على سطح مكتبي، فإن دفعي القلمَ يقاومه احتكاكُ القلم بسطح المكتب، وهذا ما يجعل القلم يتوقَّف عن التدحرج عندما أتوقَّف عن دفعه. أما إذا لم يكن هناك احتكاك، فإن القلم يظل في حركةٍ دائمة. وينص القانون الأول لنيوتن على أن الجسم يظل في حالةِ سكون، أو يتحرك بسرعةٍ ثابتة، ما لم تؤثِّر عليه قوةٌ خارجية. ويخبرنا القانون الثاني بمدى التأثير الذي تمارسه قوةٌ خارجية — قوة دفع — على جسمٍ ما. فهذه القوة تغيِّر من سرعة الجسم، ويسمَّى التغيُّر الحادث في السرعة التسارع؛ وبقسمة القوة على كتلة الجسم الذي تؤثِّر فيه القوة الخارجية، يكون الناتج هو التسارع الناشئ عن تأثير القوة على الجسم. وعادة ما يُصاغ القانون الثاني بطريقةٍ مختلفة نوعًا ما: القوة تساوي حاصل ضرب الكتلة في التسارع. ويخبرنا قانون نيوتن الثالث بشيءٍ عن ردِّ فعلِ الجسم حال دفعه: لكل فعل ردُّ فعل مساوٍ له في المقدار ومضادٌّ له في الاتجاه. إذا ضربتُ كرة تنس بمضربي، فإن القوة التي يدفع بها المضرب كرة التنس تساوي تمامًا القوة التي تدفع المضرب إلى الخلف، والقلم الموجود على سطح مكتبي المنجذب لأسفل بفِعل الجاذبية تؤثِّر فيه قوة دفعٍ مساوية تمامًا لرد الفعل الذي يمارسه سطح المكتب نفسه، وقوة المادة المتفجرة التي تدفع الغازات إلى خارج غرفة الاحتراق في الصاروخ تُنتِج قوةً ذات ردِّ فعلٍ مساوٍ في مقداره ومضاد في اتجاهه لرد فعل الصاروخِ نفسِه، مما يدفعه في الاتجاه المضاد.

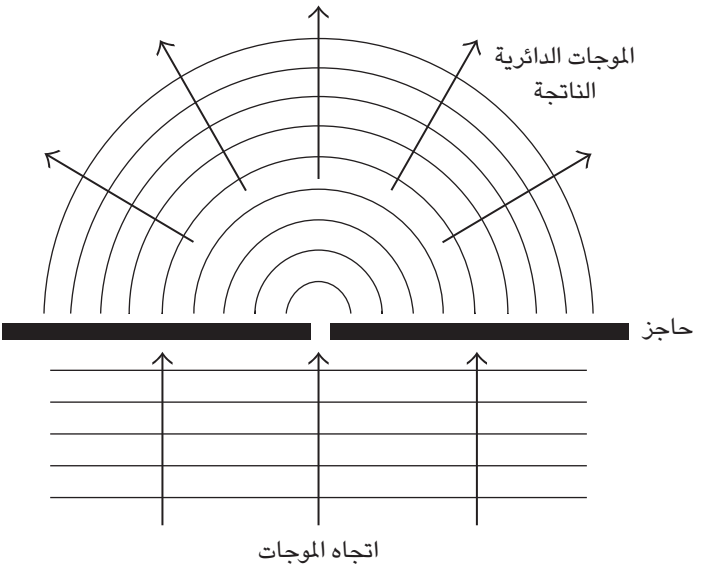
قدَّمت هذه القوانين، مع قانون الجاذبية لنيوتن، تفسيرًا لمدارات الكواكب حول الشمس ومدار القمر حول الأرض. وعندما يؤخَذ الاحتكاك في الاعتبار، فإن هذه القوانين تفسِّر كذلك سلوك الأجسام على سطح الأرض، وتكون بذلك قد شكَّلت أساس الميكانيكا. غير أنها اشتملت أيضًا على تضميناتٍ فلسفيةٍ محيِّرة. فتبعًا لقوانين نيوتن، يمكن التنبؤ بسلوك جُسَيمٍ ما بدقةٍ على أساس تفاعلاته مع الجسيمات الأخرى والقوى التي تؤثِّر عليه. ولو كان من الممكن معرفة موضعِ كلِّ جُسيم في الكون وحركته، لأصبح من الممكن إذن التنبؤ بدقةٍ تامةٍ بمستقبل كل جُسيم؛ ومن ثَم بمستقبل الكون. فهل يعني ذلك أن الخالق قد سيَّر الكون بوتيرةٍ منتظمة وأتمَّه وحرَّكه في مسارٍ يمكن التنبؤ به بدقةٍ تامة؟ أيَّدت الميكانيكا الكلاسيكية لنيوتن هذه النظرة الحتمية للكون ودعمتها كثيرًا، وهي نظرة لم تدَعْ للإنسان سوى القليل من حرية الإرادة أو المصادفة. فهل يمكن في الواقع أن نكون جميعًا دمًى نسير في مساراتنا المحدَّدة سلفًا في حياتنا، من دون أيِّ اختيارٍ حقيقي على

الإطلاق؟ كان معظم العلماء مقتنعين بترك هذه المسألة للفلاسفة يتجادلون بشأنها. غير أن الأمر تغيَّر؛ فعادت هذه المسألة بقوة في صميم الفيزياء الجديدة في القرن العشرين.

موجاتٌ أم جُسيمات

على ضوءِ ما حقَّقته فيزياء نيوتن عن الجُسيمات من نجاح، فإنه من غير المستغرَب تمامًا أن نيوتن عندما حاول تفسير سلوك الضوء قد فسَّره من حيث الجُسيمات. ففي النهاية، يُلاحَظ أن أشعة الضوء تنتقل في خطوطٍ مستقيمة، والطريقة التي يرتدُّ بها الضوء عن سطح المرآة تشبه كثيرًا الطريقةَ التي ترتدُّ بها الكرة عن جدارٍ صلب. وقد بنى نيوتن أول تلسكوبٍ عاكس، وفسَّر الضوء الأبيض على أنه تراكبٌ من كل الألوان في قوسِ قُزَح، وأجرى الكثير من الدراسات عن علم البصريات، إلا أن نظرياته ظلت تستند إلى افتراض أن الضوء يتألَّف من تدفُّقٍ من دقائقَ صغيرة، تُسمَّى الجسيمات. تنكسر أشعة الضوء عندما تجتاز السطح الفاصل بين مادتَين، إحداهما قليلة الكثافة والأخرى كثيرة الكثافة، كأن تمرَّ من الهواء إلى الماء أو الزجاج (ولهذا السبب يبدو عودُ مزجِ المشروبات وكأنه مثنيٌّ عند وضعه في شراب الكوكتيل)، وتفسِّر نظرية الجسيمات هذا الانكسار بجلاء، شريطة أن تتحرَّك الجسيمات الدقيقة بسرعةٍ أكبرَ في المادة ذات «الكثافة الضوئية» الأكبر. ومع ذلك، فحتى في عهد نيوتن كانت هناك طريقةٌ بديلة لتفسير كل ذلك.

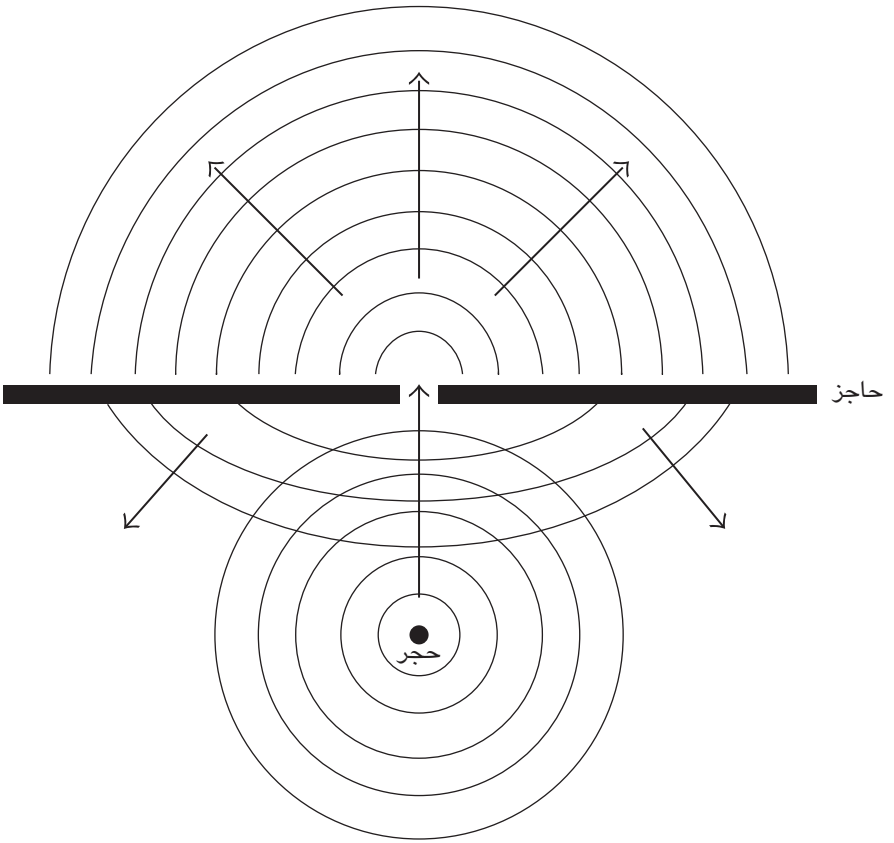
كان الفيزيائي الهولندي كريستيان هوجنس من معاصري نيوتن، لكنه كان يكبره بثلاثة عشر عامًا حيث وُلد سنة ١٦٢٩. وقد استحدث فكرة أن الضوء ليس تدفقًا من الجسيمات لكنه موجة، أقربُ شبهًا بالموجات التي تتحرَّك على سطح بحر أو بحيرة، إلا أنها تنتشر عبر مادةٍ غير مرئية تسمَّى «الأثير الناقل للضوء». وعلى غرار الموجات التي تحدثها حصاةٌ أُلقيت في بِركة، فإن موجات الضوء يمكن تصوُّرها على أنها تنتشر من مصدر الضوء في جميع الاتجاهات. وقد فَسَّرت النظريةُ الموجية الانعكاسَ والانكسار تمامًا مثل نظرية الجسيمات. وعلى الرغم مما قيل عن أن موجات الضوء تتحرك أبطأ خلال المادة ذات الكثافة الضوئية الأكبر بدلًا من أن تتحرك بسرعةٍ أكبر، فإنه لم تكن هناك وسيلةٌ متاحةٌ لقياس سرعة الضوء في القرن السابع عشر، ومن ثَم لم يستطِع هذا الاختلاف أن يحل التعارض بين النظريتَين. غير أن الفكرتَين تختلفان على نحوٍ ملحوظ في تنبؤاتهما، وذلك في جانبٍ أساسيٍّ واحد. فعندما يجتاز الضوء حافةً حادَّة، فإنه يُنتِج ظلًّا ذا حافةٍ حادة. وهذه هي بالضبط الطريقة التي يُفترض أن تسلكها



شكل ١-١: تمرُّ موجاتُ الماء المتوازية عبر ثقبٍ صغير في حاجز؛ حيث تنتشر من الثقب على هيئة دوائر، دون أن تترك «ظلالًا».

تدفُّقات الجسيمات التي تنتقل في خطوطٍ مستقيمة. أما الموجة فإنها تنكسر، أو تحيد، متخذة طريقها خلال الظل (تذكَّر الموجات المتكوِّنة على سطح البِركة حال انكسارها حول الحصاة). منذ ثلاثمائة سنة مضت، كان هذا الدليل يصبُّ بوضوح في صالح نظرية الجسيمات، واستبعدت النظرية الموجية، وإن كانت لم تُنسَ. ولكن، بحلول القرن التاسع عشر، انعكس الوضع تمامًا بالنسبة إلى النظريتَين.

في القرن الثامن عشر كان القليل جدًّا من الأشخاص يعلِّقون أهمية على النظرية الموجية للضوء. وكان أحد هؤلاء القلة والذي لم يعلِّق أهميةً على النظرية فحسب بل كتب مؤيدًا لها، العالِمَ السويسري ليونارد أويلر، رائد الرياضيات في عصره، الذي أسهم بمساهماتٍ كبيرة في تطوير الهندسة وحساب التفاضل والتكامل وحساب المثلثات. تُصاغ مبادئ الرياضيات والفيزياء في صورةِ حدودٍ حسابية باستخدام المعادلات، وقد طوَّر أويلر التقنيات التي يعتمد عليها هذا التوصيف الحسابي بصورةٍ كبيرة، وفي أثناء ذلك أدخل



شكل ١-٢: تنتشر أيضًا الموجات الدائرية، التي تشبه تلك الموجات الناتجة عن إلقاء حصاةٍ في بِركة، في صورة موجاتٍ دائرية عبر فتحةٍ ضيقةٍ حال مرورها عبرها (وتنعكس بالطبع الموجات التي تصطدم بالحاجز مرتدةً مرةً أخرى).

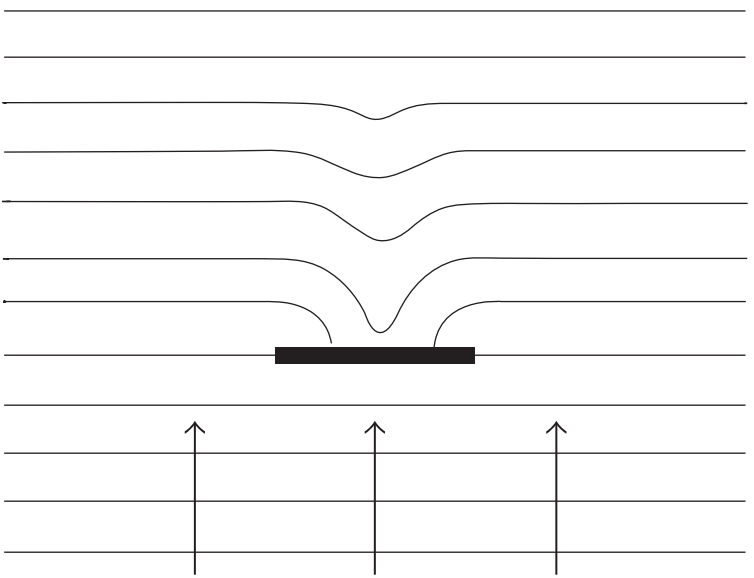
أويلر طرقَ الاختزال بالرموز التي ظلَّت مستخدَمة حتى الآن — يرجع إليه استخدام الاسم باي pi للإشارة إلى نسبة محيط الدائرة إلى قطرها، والحرف *i* للإشارة إلى الجذر التربيعي لسالب واحد (الذي سنقابله مرةً أخرى، مع باي pi)، وهو الذي أدخل الرموز التي يستخدمها علماء الرياضيات لشرح العملية المسماة بالتكامل. ومع ذلك، من الغريب أن دائرة المعارف البريطانية لا تذكر آراءه حول النظرية الموجية للضوء، وهي الآراء التي

قال عنها أحد معاصريه إنها لم يأتِ بها «فيزيائيٌّ واحد من علماء الفيزياء البارزين».[1] كان بنجامين فرانكلين الشخصية البارزة الوحيدة بين المعاصرين لأويلر التي شاركته آراءه تلك، في حين تجاهلها الفيزيائيون بكل بساطة حتى أجرى الفيزيائي الإنجليزي توماس يونج تجاربه الجديدة الحاسمة في بداية القرن التاسع عشر، وتبِعه الفرنسي أوجستين فرينل بعد ذلك بفترةٍ وجيزة.

نجاح النظرية الموجية

استخدم يونج معرفتَه بطريقة تحرُّك الموجات على سطح بِركة ليصمِّم تجربةً لاختبارِ ما إذا كان الضوء ينتشر بالطريقةِ نفسِها أم لا. ونحن نعرف جميعًا شكلَ موجات الماء، وإن كان من المهم أن نفكِّر في التموُّجات بدلًا من الموجات المتكسِّرة الكبيرة ليكون التشبيه دقيقًا. وما يميز الموجات هو أنها ترفع مستوى الماء إلى أعلى قليلًا ثم تخفضه بمرور الموجة، ويسمَّى ارتفاعُ قمَّة الموجة فوق مستوى الماء غير المضطرب سعةَ الموجة، وفي حالة الموجة المثالية تكون هذه السعة مساويةً تمامًا لمقدار الانخفاض في مستوى الماء عند مرور الموجة. وعلى غرار التموُّجات الناتجة عن إلقاء حجرٍ في البِركة، تتتابع التموُّجات واحدةً تلو الأخرى بمسافةٍ منتظمة، تسمَّى طول الموجة، ويُقاس بين قمتَين متتاليتين. وتنتشر الموجات على شكل دوائر حول النقطةِ التي سقطت فيها الحصاة في الماء، غير أن موجات البحر أو التموُّجات التي تحدث على سطح بحيرةٍ بفعل هبوب الرياح، قد تنتشر على شكل سلسلةٍ من خطوطٍ مستقيمة من موجاتٍ متوازية الواحدة تلو الأخرى. وفي كلتا الحالتين، فإن عدد قمم الموجات التي تعبُر نقطةً ثابتةً معينة — صخرة مثلًا — في كل ثانية يخبِرنا بتردُّد الموجة. والتردُّد هو عدد الأطوال الموجية التي تمرُّ كل ثانية، وبذلك فإن سرعة الموجة، أو السرعة التي تتقدَّم بها كل قمة، تساوي طول الموجة مضروبًا في التردُّد.

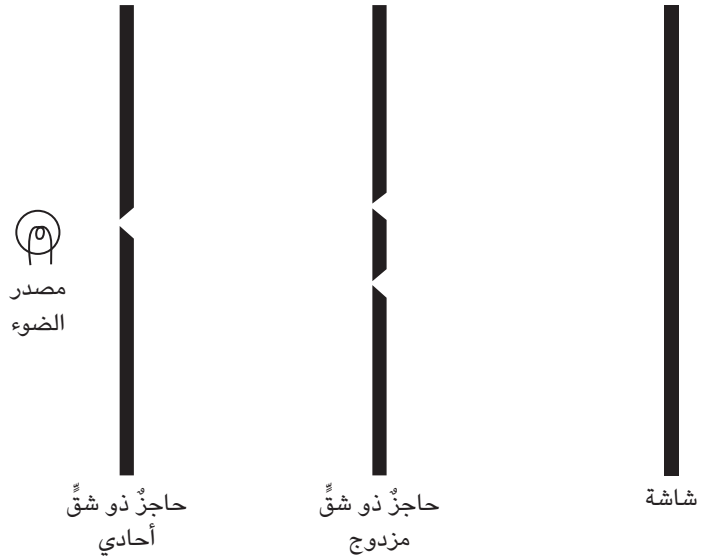
تبدأ التجربة الحاسمة بموجاتٍ متوازية، تشبه بالأحرى خطوطَ الموجات التي تتقدَّم نحو الشاطئ قبل تكسُّرها. ويمكنك تخيُّل هذه الموجات على أنها كالموجات الناتجة عن إلقاءِ جسمٍ كبير جدًّا في الماء على مسافةٍ كبيرة. تشبه «التموُّجات» المنتشرة في دوائرَ متناميةِ الموجات المتوازية أو المستوية إذا كنتَ بعيدًا بما يكفي عن مصدر التموُّجات؛ لأن من الصعب اكتشافَ انحناء الدوائر الكبيرة للغاية التي يقع مركزها في الموضع الذي يمثِّل بداية الاضطراب. ومن السهل التحقُّق مما يحدث لهذه الموجات المستوية في خزان



شكل ١-٣: تعني قدرةُ الموجات على الانحناء حول الأركان أنها تستطيع أيضًا ملء الظل خلف حاجزٍ ما، بشرط ألا يكون الحاجز أكبرَ كثيرًا من الطول الموجي للموجات.

مياهٍ عند وضع حاجزٍ في مسارها. إذا كان الحاجز صغيرًا، فإن الموجات ستنحني حوله وستملأ ما وراءه بواسطة الحيود، تاركةً «ظلًّا» صغيرًا جدًّا، أما إذا كان الحاجز كبيرًا جدًّا مقارنةً بالطول الموجي للتموُّجات، فإنها تنحني قليلًا باتجاه الظل المتكوِّن خلف الحاجز تاركةً مجالًا من المياه غير المضطربة. وإذا كان الضوء موجة، فلا يزال من الممكن الحصول على ظلالٍ ذات حوافَّ حادة، شريطة أن يكون الطول الموجي للضوء صغيرًا جدًّا مقارنةً بحجم الجسم الذي يلقي بظله.

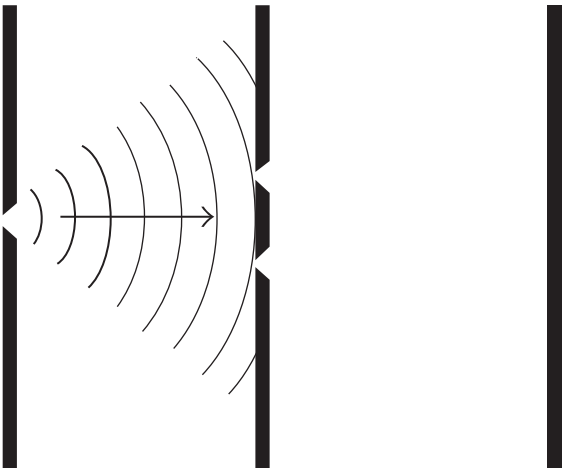
والآن لنشرحِ الفكرة من ناحيةٍ أخرى. تخيَّل مجموعةً جيدة من الموجات المستوية تتقدَّم عبْر خزانِ مياه وتقترب، لا من حاجزٍ صغيرٍ محاطٍ بالماء، بل من جدارٍ كامل يسدُّ مسارها، وبه فتحة في المنتصف. إذا كانت الفتحة أكبرَ كثيرًا من الطول الموجي للموجة المضطربة، فإن جزء الموجة المواجهَ لهذه الفتحة هو فقط ما سيمرُّ؛ حيث ينتشر إلى



شكل ١-٤: يمكن اختبار قدرة الضوء على الحيود حول الأركان وعبر الثقوب الصغيرة باستخدامِ شقٍّ أحاديٍّ لإحداث موجةٍ دائرية، وشقٍّ مزدوجٍ لإحداث تداخل.

حدٍّ ما تاركًا معظم الماء على الجانب الآخر من الحاجز دون أي اضطراب، مثل الموجات التي تضرب حاجزَ الأمواج في الموانئ وتدخل من فتحة الميناء. أما إذا كان الثقب في الجدار صغيرًا جدًّا، فإن الثقب سيكون بمثابةِ مصدرٍ جديد للموجات الدائرية، كما لو أن الحصى قد أُلْقِيَ في الماء عند هذا الموضع. وعلى الجانب الأبعد من الجدار، تنتشر هذه الموجات الدائرية (أو بتعبيرٍ أدقَّ نصف الدائرية) عبر سطح الماء دون أن تترك جزءًا دون اضطراب.

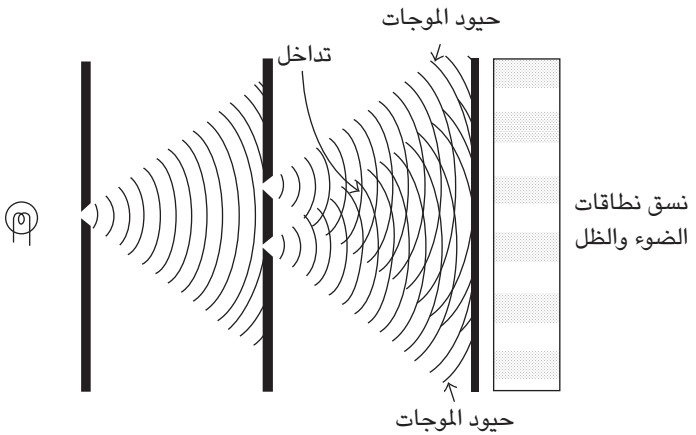
تبدو الأمور واضحةً حتى الآن. والآن نصل إلى تجربة يونج. لنتخيلِ التجربة بنفس النسق السابق، وهو خزان مياه تتحرَّك فيه موجاتٌ متوازية باتجاه حاجز، لكنه هذه المرة حاجزٌ به ثقبان صغيران. سيكون كل ثقب بمثابةِ مصدرٍ جديد للموجات نصف الدائرية في جزء الخزان الواقع خلف الحاجز، ولأن هاتين المجموعتَين من الموجات قد ولَّدتهما الموجاتُ المتوازية نفسُها على الجانب الآخر من الحاجز، فإنهما ستتحرَّكان في تناغمٍ أو



شكل ١-٥: على غرار التموُّجات المائية المارة عبْر ثقبٍ ما، تنتشر الموجات الضوئية في دوائرَ من الشق الأول، وتتحرَّك معًا في تناغم.

في الطَّور نفسه. عندنا الآن مجموعتان من التموُّجات المنتشرة عبر المياه، الأمر الذي ينتج عنه نسقٌ أكثرُ تعقيدًا من التموُّجات على السطح. بما أن كلتا الموجتَين ترفع سطح الماء إلى أعلى، فإننا نحصل على قمةٍ أكثرَ وضوحًا، وبما أن إحدى الموجتَين تحاول إنشاء قمة والأخرى تحاول إنشاء قاع، فإنهما تتلاشيان ويبقى مستوى الماء غير مضطرب. ويطلق على هذين التأثيرَين التداخل البنَّاء والتداخل الهدَّام، ومن السهل رؤيتهما بطريقةٍ أبسطَ إذا ألقيتَ بحصاتَين في بِركة ماء في نفس اللحظة. إذا كان الضوء موجة، فإنه يمكن من خلالِ تجربةٍ مكافئة إثباتُ حدوثِ تداخلٍ مماثل بين الموجات الضوئية، وهذا بالضبط ما اكتشفه يونج.

سلَّط يونج ضوءًا على حائلٍ يعترض مسار الضوء وبه شقَّان رفيعان. خلف الحائل، انتشر الضوء من الثقبَين وتداخل. وعلى افتراض أن تشبيه الضوء بموجات الماء صحيح، لا بد أن يتكوَّن نسقُ تداخلٍ خلفَ الحائل يتضمَّن على التناوب مناطقَ شديدةَ الإضاءة وأخرى معتمة، وهو ما يرجع إلى التداخل البنَّاء والتداخل الهدَّام للموجات المارة عبْر كل شق. وهذا بالضبطِ ما شاهده يونج عندما وضع شاشةً بيضاء اللون خلف الشقَّين؛ حيث انتشرت نطاقاتٌ متناوبة من الضوء والظل على طول الشاشة.



شكل ١-٦: تتداخل الموجات الدائرية التي تتحرَّك خارجةً من كل ثقب في حاجز الشق المزدوج لتوليد نسقٍ من الضوء والظل على الشاشة، وهو ما يثبت بوضوح، في سياق هذه التجربة، أنَّ الضوء يماثل في سلوكه سلوكَ الموجات.

غير أن تجربة يونج لم تُشعِل حماس عالَم العلوم، لا سيَّما في بريطانيا. فقد كانت المؤسَّسة العلمية هناك تنظر إلى معارضةِ أي فكرة من أفكارِ نيوتن على أنها ربما تكون ضربًا من الهرطقة، وأنها بالتأكيد خيانةٌ للولاء الوطني. مات نيوتن سنة ١٧٢٧، وسنة ١٧٠٥ — أي قبل أن يُصرِّح يونج باكتشافه بأقلَّ من مائة عام — أصبح أولَ عالِمٍ يحصل على لقب «فارس». وكان من السابق لأوانه أن يُخلَع هذا الشخص المبجَّل لدى شعبه عن عرشه في إنجلترا، ومن ثَمَّ ربما كان من المناسب في عصر حروب نابليون أن يتبنَّى رجلٌ فرنسي، وهو أوجستين فرينل، هذه الفكرةَ «غير الوطنية» ويضع في نهاية المطاف التفسير الموجي للضوء. ومع أنه لم يفصِل بين أبحاث فرينل وأبحاث يونج سوى بضع سنوات، فإنها كانت أكثرَ اكتمالًا؛ حيث قدَّمت تفسيرًا موجيًّا لكل الجوانب تقريبًا المتعلقة بسلوك الضوء. على سبيل المثال لا الحصر، فسَّر فرينل ظاهرةً مألوفة لنا جميعًا اليوم، وهي الانعكاسات الملوَّنة الجميلة التي تحدُث عند سقوط الضوء على طبقةٍ رقيقة من الزيت. ويرجع السبب مجددًا في هذه الظاهرة إلى تداخل الموجات. ينعكس بعض الضوء من السطح العلوي لطبقة الزيت، بينما ينفُذ البعض الآخر وينعكس على السطح السفلي لطبقة الزيت. ومن ثَم، فهناك شعاعان مختلفان ينعكسان ويتداخلان أحدهما

مع الآخر. ونظرًا إلى أن كل لون من ألوان الضوء يقابله طولٌ موجيٌّ مختلِف، والضوء الأبيض يتألَّف من تراكبٍ من كل ألوان قوسِ قُزَح، فإن انعكاس الضوء الأبيض من طبقة الزيت سيولِّد كتلةً من الألوان؛ لأن بعض الموجات (الألوان) تتداخل على نحوٍ هدَّام، بينما يتداخل بعضها الآخر على نحوٍ بنَّاء، وذلك تبعًا للنقطة التي تنظر منها إلى طبقة الزيت.

وعندما توصَّل عالِمُ الفيزياء الفرنسي ليون فوكو — الذي اشتهر بالبندول الذي يحمل اسمه — في منتصف القرن التاسع عشر إلى أن سرعة الضوء أقلُّ في الماء عنها في الهواء، على عكس تنبؤات نيوتن في نظرية الجسيمات، لم يزِد ذلك عما توقَّعه أيُّ عالِم حَسن السمعة. وبحلول ذلك الوقت، كان «الجميع يعرف» أن الضوء شكلٌ من أشكال الحركة الموجية تنتشر خلال الأثير، أيًّا كان ما يعنيه الأثير. ومع ذلك، ربما كان من الجيد معرفة الشيء الذي «يسلك سلوك الموجة» في شعاع الضوء. وفي فترتَي الستينيات والسبعينيات من القرن التاسع عشر، بدا أن نظرية الضوء قد اكتملت أخيرًا عندما أثبت عالِم الفيزياء الاسكتلندي العظيم جيمس كلارك ماكسويل وجود موجات تتضمَّن مجالاتٍ كهربيةً ومغناطيسيةً متغيرة. وقد تنبَّأ ماكسويل بأن هذه الإشعاعات الكهرومغناطيسية تتضمَّن أنماطًا من مجالاتٍ كهربية ومغناطيسية أقوى وأضعف بالطريقة نفسِها التي تتضمَّن بها موجات الماء قممًا وقيعانًا في منسوب الماء. وقد نجح هاينريش هيرتز سنة ١٨٨٧ في بث واستقبال إشعاع كهرومغناطيسي على هيئة موجات راديو، تشبه موجات الضوء لكنها ذات أطوالٍ موجيةٍ أطول. وأخيرًا اكتملت النظرية الموجية للضوء، في فترةٍ انقلبت فيها المفاهيم من جرَّاء الثورة العظمى التي شهدها التفكير العلمي منذ عهد نيوتن وجاليليو. وبحلول نهاية القرن التاسع عشر، لم يكن ليقترح أحد أن الضوء عبارة عن جُسيمات إلا إن كان عبقريًّا أو أحمق. وكان اسم هذا الشخص ألبرت أينشتاين، ولكن قبل أن نفهم السبب الذي دفعه إلى اتخاذ هذه الخطوة الجريئة، لا بد لنا من معرفة المزيد عن أفكار الفيزياء في القرن التاسع عشر.

هوامش

(1) Quote from page 2 of *Quantum Mechanics*, by Ernest Ikenberry; see bibliography.

الفصل الثاني

الذرات

يقول كثير من المؤلفات الرائجة في تاريخ العلوم إن فكرة الذرات يرجع تاريخها إلى الحضارة الإغريقية القديمة، وهي فترة تمثِّل نشأة العِلم، وتمتدح هذه المؤلَّفات قدماء الإغريق على إدراكهم المبكِّر للطبيعة الحقيقية للمادة. ولكن، ينطوي هذا الرأي على قدرٍ من المبالغة. صحيحٌ أن ديومقريطوس من أبديرة، الذي توفِّي قرابة عام ٣٧٠ ق.م. قد افترض أن الطبيعة المعقَّدة للعالم يمكن تفسيرها إذا كانت كل الأشياء تتكوَّن من أنواعٍ مختلفة من ذراتٍ غيرِ قابلة للتغيُّر، لكلٍّ منها شكلُه وحجمه الخاص، وهي في حركةٍ دائمة. كتب ديموقريطوس أن «الأشياء الوحيدة الموجودة هي الذرات والفراغ، وما عدا ذلك فمجرَّد آراء»،[1] وقد تبنَّى كلٌّ من إبيقور من ساموس ولوكريتيوس كاروس الروماني هذه الفكرة بعد ذلك. ولكن لم تكن هذه هي الفكرة الرائدة في تلك الأيام بين النظريات الأخرى في تفسيرِ طبيعة العالم، بل كان اقتراح أرسطو بأن كل شيء في الكون يتألَّف من «العناصر» الأربعة: النار والأرض والهواء والماء، هو الذي حقَّق شعبيةً «أكبرَ كثيرًا» وظلَّ صامدًا. وقد نُسيت تمامًا فكرة الذرات بحلول عهد المسيح، ولاقت عناصرُ أرسطو الأربعة قبولًا ورواجًا على مدى ألفَي عام.

ومع أن الإنجليزي روبرت بويل قد استخدم مفهوم الذرات في أبحاثه في مجال الكيمياء في القرن السابع عشر، وأخذها نيوتن في الاعتبار في أبحاثه في مجال الفيزياء والبصريات، لم تصبح الذرات جزءًا من التفكير العلمي إلا في القسم الأخير من القرن الثامن عشر، عندما درس الكيميائي الفرنسي أنطوان لافوازييه سببَ احتراق الأشياء. وقد حدَّد لافوازييه عناصرَ حقيقيةً عديدة، وهي موادُّ كيميائيةٌ نقية، لا تتفكَّك إلى موادَّ كيميائيةٍ أخرى، وقد تحقَّق لافوازييه من أن الاحتراق هو ببساطة العملية التي يتَّحد من

خلالها أكسجين الهواء الجوي مع العناصر الأخرى. وفي السنوات الأولى من القرن التاسع عشر، تمكَّن جون دالتون من بلورة دور الذرات في الكيمياء ووضعه على أساسٍ راسخ. فقد ذكر أن المادة تتكوَّن من ذراتٍ غيرِ قابلة للانقسام، وأن ذرات كل عنصر متماثلة، ولكنَّ للعناصر المختلفة أنواعًا مختلفة من الذرات (ذات أحجامٍ وأشكالٍ مختلفة)، وأن الذرات لا تُستحدَث من العدم ولا تفنى، لكن يُعاد تنظيمها بواسطة التفاعلات الكيميائية، وأن المركَّب الكيميائي الذي يتكوَّن من عنصرَين أو أكثر، يتكوَّن من جزيئات، كلٌّ منها يتكوَّن من عددٍ بسيطٍ ثابت من ذرات كل عنصر من العناصر الداخلة في تركيب المركَّب. ومن ثَم، لم يأتِ المفهوم الذري للعالَم المادي إلى حيز الوجود، بالصورة التي يُدرَّس بها في الكتب الدراسية، إلا منذ ما يقرب من مائتَي عام.

الذرات في القرن التاسع عشر

ومع ذلك، لم تَحُز الفكرةُ استحسانَ الكيميائيين وتأييدهم إلا ببطء خلال القرن التاسع عشر. وقد أثبت جوزيف جاي-لوساك بالتجربة أنه عند اتحاد مادتَين غازيتَين فإن حجم أحد الغازَين لا بد دائمًا أن يتناسب تناسبًا بسيطًا مع حجم الغاز الآخر. وإذا كان المركَّب الناتج غازًا أيضًا، فإن حجم هذا الغاز الثالث لا بد أن يتناسب هو الآخر تناسبًا بسيطًا مع الغازَين الآخرَين. ويتَّفق ذلك مع فكرةِ أن جزيء المركَّب يتكوَّن من ذرةٍ أو ذرتَين من أحد الغازَين متحدةٍ بعددٍ قليل من ذرات الغاز الآخر. وقد استخدم الإيطالي أماديو أفوجادرو هذا البرهان سنة ١٨١١ ليضع فرضيته الشهيرة التي تنصُّ على أنه عند أي درجة حرارة وضغط ثابتَين تحتوي الحجوم المتساوية من الغاز على العددِ نفسِه من الجزيئات، مهما اختلفت الطبيعة الكيميائية لهذا الغاز. وقد أثبتت التجارب اللاحقة أن فرضية أفوجادرو صحيحة، ومن الممكن إثبات أن كل لتر من الغاز تحت ضغط واحد جو ودرجة حرارة صفر درجة مئوية، يحتوي تقريبًا على عدد ٢٧٠٠٠ مليار (٢٧ × ٢١٠[٢]) من الجزيئات. لكن لم تتطوَّر الفكرة إلا على يد الإيطالي ستانيسلاو كانيزارو في خمسينيات القرن التاسع عشر، على نحوٍ دفع ببعض الكيميائيين إلى أن يأخذوها مأخذَ الجِد. ولكن، حتى تسعينيات القرن التاسع عشر، كان لا يزال كثيرٌ من الكيميائيين لا يتقبلون أفكارَ دالتون وأفوجادرو. ولكن بحلول ذلك الوقت، كانت قد استحوذت عليهم الأحداث الدائرة في مجال تطوُّر الفيزياء؛ حيث قدَّم كلٌّ من الاسكتلندي جيمس كليرك ماكسويل والنمساوي لودفيج بولتزمان تفسيرًا تفصيليًّا لسلوك الغازات باستخدام مفهوم الذرات.

وخلال فترتَي الستينيات والسبعينيات من القرن التاسع عشر، استحدث هؤلاء الرواد فكرةَ أن الغاز يتكوَّن من ذراتٍ أو جزيئاتٍ كثيرةٍ للغاية (يمكن للعدد الذي استنتجته فرضية أفوجادرو أن يعطيك فكرةً عن عددها)، والتي يمكن تصوُّرها على أنها كراتٌ صلبةٌ متناهية الصِّغر ترتدُّ في كل الاتجاهات؛ حيث تصطدم إحداها مع الأخرى، ومع جدران الوعاء الذي يحتوي على الغاز. ويرتبط هذا ارتباطًا مباشرًا بفكرةِ أن الحرارة شكلٌ من أشكال الحركة؛ فعندما يُسخَّن الغاز تتحرَّك الجزيئات بمعدلٍ أسرع، الأمر الذي يزيد الضغط على جدران الوعاء، أما إذا لم تكن الجدران ثابتةً في مكانها فإن الغاز سيتمدَّد. وكانت السمة الرئيسية في هذه الأفكار الجديدة هي أن سلوك الغاز يمكن تفسيره بتطبيق قوانين الميكانيكا — قوانين نيوتن — بمفهومٍ إحصائي على عددٍ كبير للغاية من الذرات أو الجزيئات. فمن الممكن لأي جزيء أن يتحرَّك في أي وقتٍ في أي اتجاه، لكن التأثير الجَمعي للجزيئات العديدة المتصادمة مع جدران الوعاء كلَّ ثانية يُولِّد ضغطًا ثابتًا. وقد أدَّى ذلك إلى وضعِ توصيفٍ رياضي لعمليات الغازات يُسمَّى الميكانيكا الإحصائية. لكن ما يزال لا يوجد دليلٌ مباشر على وجود الذرات؛ وقد عارض بعض الفيزيائيين الرائدين في ذلك الوقتِ الفرضيةَ الذرية، وحتى في تسعينيات القرن التاسع عشر استشعر بولتزمان في نفسه (وربما جانبَه الصواب في ذلك) أنه شخصٌ يناضل ضد تيار الرأي العلمي. وفي عام ١٨٩٨، نشر عملياته الحسابية التفصيلية على أملِ أنه «عندما تروج نظرية الغازات مرةً أخرى، لن يكون هناك الكثير ليُعاد اكتشافه»،[2] وفي عام ١٩٠٦ أحاط به المرض والإحباط، وأحزنته المعارضة المستمرة التي شنَّها كثير من العلماء الرائدين على أفكاره حول النظرية الحركية للغازات؛ مما دفعه إلى الانتحار، دون أن يعلم أن منظِّرًا مغمورًا يُدعى ألبرت أينشتاين قد نشر قبل بضعة أشهر مقالًا علميًّا أثبت فيه حقيقةَ وجود الذرات بعيدًا عن أي شكٍّ محتمَل.

الذرات لدى أينشتاين

لم يكن هذا المقالُ سوى واحدٍ من ثلاثة مقالات نشرها أينشتاين في العددِ نفسِه من مجلة «أنال دي فيزيك» سنة ١٩٠٥، وأي مقال منها كفيلٌ بحجز مكانٍ له في سجل تاريخ العلوم. تناول أحدُ المقالات نظرية النسبية الخاصة، وهي خارج نطاق الكتاب الحالي، وعُني مقالٌ آخرُ بالتفاعل بين الضوء والإلكترونات، وقد أُقرَّ هذا المقال فيما بعدُ كأولِ بحثٍ علمي يتناول ما نسميه الآن ميكانيكا الكَمِّ، وقد نال عنه أينشتاين جائزة نوبل سنة

١٩٢١. أما المقال الثالث فقدَّم تفسيرًا بسيطًا بدرجةٍ خادعة لأُحجية حيَّرت العلماء منذ عام ١٨٢٧، وقد أثبت هذا المقال، بقدرِ ما تسنى لأي ورقةٍ بحثيةٍ نظرية، حقيقة وجود الذرات.

وقد صرَّح أينشتاين فيما بعدُ أن هدفه الأساسي في ذلك الوقت كان «اكتشاف الحقائق التي تؤكِّد بكلِّ وضوحٍ ممكنٍ وجودَ ذراتٍ بحجمٍ محدَّد»،[3] وهو الهدف الذي ربما يبيِّن أهميةَ البحث في مطلع القرن العشرين. عندما نُشرت هذه الأبحاث، كان أينشتاين يعمل فاحصًا للبراءات في برن؛ إذ لم يجعله نهجه غير التقليدي في تناول الفيزياء مرشحًا بديهيًّا لشغلِ وظيفةٍ أكاديمية عندما أنهى تعليمه الرسمي، ومن ثَم كانت الوظيفة في مكتب براءات الاختراع مناسبةً له. وقد أثبت عقله المنطقي أنه قادرٌ على التمييز بين الغثِّ والسمين في الاختراعات الجديدة، وتركت له مهارتُه وخبرته الوظيفية متسعًا من الوقت للتفكير في الفيزياء حتى أثناء ساعات عمله في المكتب. وحازت بعضُ أفكاره اهتمامَ عالِم النبات البريطاني توماس براون، فاستعان بها في اكتشافاته منذ ثمانين عامًا تقريبًا. لاحظ براون أن حبوب اللقاح التي تطفو في قطرة ماء عند فحصها مجهريًّا تتحرَّك حركةً عشوائية غير منتظمة فيما يُسمَّى الآن بالحركة البراونية. وقد أثبت أينشتاين أن هذه الحركة، على الرغم من أنها عشوائية، فإنها تخضع لقانونٍ إحصائيٍّ محدَّد، وأن نمط السلوك يماثل بالضبط ما ينبغي أن نتوقَّعه إذا افترضنا أن حبَّة اللقاح «تُحرِّكها» باستمرار جسيماتٌ لا تُرى بالعين المجردة وأصغر من أن يتم رصدها مجهريًّا، وتتحرَّك هذه الجسيمات وفقًا للإحصائيات التي استخدمها بولتزمان وماكسويل لوصف الطريقة التي تتحرَّك بها الذرات في مادةٍ غازية أو سائلة. ويبدو واضحًا جدًّا اليوم أنه من الصعب الوقوف بالضبط على الطفرة التي أحدثتها هذه الورقة البحثية. فيمكنني أنا وأنت، من منطلق الاعتياد على فكرة الذرات، أن نعرف في الحال أنه إذا كانت حبوب اللقاح تتحرَّك بواسطة عمليات اصطدام غير مرئية، فلا بد أن الذرات المتحركة هي التي تدفع بحبوب اللقاح في الأنحاء. ولكن قبل أن يوضِّح أينشتاين الفكرة، كان العلماء المبجَّلون ما زالوا يشكِّكون في حقيقة وجود الذرات، إلا أنه لم يَعُد هناك مجالٌ للشك بعد ظهور ورقته البحثية. لقد صار الأمر بسيطًا وسهلًا عند شرحه، مثل سقوط التفاحة من الشجرة، ولكن إذا كان الأمر بهذا الوضوح فلماذا لم تحظَ بالتقدير في العقود الثمانية الماضية؟

وكان من دواعي المفارقة أن نُشِر هذا المقال باللغة الألمانية (في مجلة «أنال دي فيزيك») لأنها كانت الجبهة المعارِضة لرواد العلماء المتحدثين بالألمانية مثل إرنست ماخ فيلهلم أوستفالد، الأمر الذي أقنع بولتزمان أن صوته كان صرخةً في وادٍ لم يستجِب لها أحد. وفي الحقيقة، مع بداية القرن العشرين كان هناك الكثير من الأدلة على حقيقة وجود الذرات، حتى لو قلنا إن هذه الأدلة يمكن بالأحرى وصفها بأنها ثانوية أو عَرَضية؛ وقد أيَّد علماء الفيزياء البريطانيون والفرنسيون النظريةَ الذرية باقتناعٍ أكثرَ بكثير من نظرائهم الألمان، وكان الإنجليزي جيه جيه طومسون هو مَن اكتشف الإلكترون — الذي نعلم الآن أنه أحد مكوِّنات الذرة — سنة ١٨٩٧.

الإلكترونات

دار كثيرٌ من الجدل والنقاش في أواخر القرن التاسع عشر بشأن طبيعة الإشعاع الناتج من سلكٍ يمرُّ به تيارٌ كهربي في أنبوبٍ مفرَّغ من الهواء. قد تكون أشعةُ الكاثود تلك — كما كانت تُسمَّى — صورةً من الإشعاع، ناتجةً من ذبذبات الأثير لكنها مختلفة في خواصها عن الضوء وعن موجات الراديو المكتشَفة حديثًا، أو قد تكون تدفُّقاتٍ من جسيماتٍ دقيقة. أيَّد معظم العلماء الألمان فكرةَ موجات الأثير، بينما رأى معظم العلماء البريطانيين والفرنسيين أن أشعة الكاثود لا بد أن تكون جُسيمات. وازداد الوضع تعقيدًا مع الاكتشاف العَرَضي للأشعة السينية (أشعة إكس) على يد فيلهلم رونتجن سنة ١٨٩٥ (حصل رونتجن سنة ١٩٠١ على أول جائزة نوبل في الفيزياء على هذا الاكتشاف)، ولكن تبيَّن أن ذلك لم يكن سوى مسألةٍ ثانويةٍ زائفة يُراد بها صرفُ الانتباه عن المسألة الحقيقية. وعلى الرغم من أهمية هذا الاكتشاف — كما ثبت سريعًا بعد ذلك — فإنه كان يوجد من قبلُ إطارٌ نظري للفيزياء الذرية يمكن أن تندرج تحته أشعة إكس. وسوف نتحدَّث عن أشعة إكس مرةً أخرى في سياقٍ أكثرَ منطقية أثناء تقدُّمنا في الكتاب.

عمل طومسون في مختبر كافنديش، وهو مركز أبحاث في كامبريدج أسَّسه ماكسويل حين كان أول أستاذ في قسم الفيزياء بالجامعة في سبعينيات القرن التاسع عشر. وقد صمَّم طومسون تجربةً تعتمد على الموازنة بين الخواص الكهربية والمغناطيسية لجسيمٍ مشحونٍ متحرك.[4] ومن الممكن تغييرُ مسار هذا الجسيم باستخدام المجال المغناطيسي أو المجال الكهربي، وقد صُمِّم جهاز طومسون بحيث يلغي أحدُ هذين المجالَين تأثيرَ الآخر ليمرَّ شعاعٌ من أشعة الكاثود في خطٍّ مستقيم من لوحِ فلزٍّ سالبِ الشحنة (أو كاثود) إلى

شاشةِ جهازٍ كاشف. ولا تصلح هذه الطريقة إلا مع الجسيمات المشحونة كهربيًّا؛ ومن ثَم أثبت طومسون أن أشعة الكاثود هي في الحقيقة جسيماتٌ سالبة الشحنة (تسمَّى الآن إلكترونات)، وقد تمكَّن طومسون من استخدام الاتزان بين القوى الكهربية والقوى المغناطيسية لحساب نسبة شحنة الإلكترون الكهربية إلى كتلته (e/m). وقد حصل دائمًا على النتيجةِ نفسِها أيًّا كان الفلز المصنوع منه الكاثود، ومن ثَم استنتج أن الإلكترونات أجزاءٌ من الذرات، وعلى الرغم من أن العناصر المختلِفة تتكوَّن من ذراتٍ مختلفة، فإن كل الذرات تحتوي على إلكتروناتٍ متطابقة.

لم يكن هذا الاكتشاف بمحض المصادفة مثلما حدث في اكتشاف أشعة إكس، لكنه كان نتاج التخطيط الجيد والتجارب المصمَّمة بمهارة. أنشأ ماكسويل مختبرَ كافنديش، لكنه لم يصبح مركزًا رائدًا في مجال التجريبية — وربما المعمل الرائد عالميًّا في الفيزياء — إلا في عهد طومسون وتحت قيادته؛ حيث كان يشكِّل جوهر الاكتشافات التي أدَّت إلى الفهْم الحديث للفيزياء في القرن العشرين. وكما حصل طومسون نفسُه على جائزة نوبل، حصل أيضًا سبعة ممن عملوا تحت قيادته في مختبر كافنديش على الجائزةِ نفسِها في الفترةِ ما قبل سنة ١٩١٤. ولا يزال هذا المختبر مركزًا عالميًّا للفيزياء حتى يومنا هذا.

الأيونات

اتضح أن أشعة الكاثود، الناتجة عن لوحٍ سالبِ الشحنة في أنبوبٍ مفرَّغ من الهواء، عبارة عن جسيماتٍ سالبة الشحنة، وهي الإلكترونات. أما الذرات فهي متعادلة كهربيًّا، ومن المنطقي تمامًا أن تكون هناك نظائرُ موجبةُ الشحنة للإلكترونات، والتي انفصلت عن الذرات المحتوية على جسيمٍ سالبِ الشحنة وقُذِفت خارجها. وقد كان فيلهلم فيين من جامعة فورتسبورج من أوائل مَن درسوا هذه الأشعة الموجبة سنة ١٨٩٨، وتوصَّل إلى أن الجسيماتِ المكوِّنة لهذه الأشعة أثقلُ كثيرًا من الإلكترونات، كما يُفترض بنا أن نتوقَّع ما إذا كانت هذه مجرَّدَ ذراتٍ فقدت إلكترونًا. وبعد أبحاثه على أشعة الكاثود أخذ طومسون على عاتقه تحدياتِ دراسة هذه الأشعة الموجبة في سلسلة من التجارب الصعبة امتدت حتى عشرينيات القرن العشرين. ويُطلَق على هذه الأشعة اليومَ ذراتٌ متأيِّنة، أو ببساطة «أيونات»، أما في أيام طومسون فكانت تُسمَّى الأشعةَ القنوية، وقد درس طومسون هذه الأشعةَ باستخدامِ أنبوبِ أشعةِ كاثود معدَّل، والذي كان يحتوي على قليل من الغاز الذي خلَّفته مضخة التفريغ. كانت الإلكترونات التي تتحرَّك خلال الغاز تتصادم مع ذراته،

وتقذف إلكتروناتٍ أخرى خارجها تاركةً الأيونات الموجبة الشحنة، التي يمكن التعامل معها بالمجالَين الكهربي والمغناطيسي بالطريقةِ نفسِها التي تعامل بها طومسون مع الإلكتروناتِ نفسِها. وبحلول سنة ١٩١٣ كان فريق طومسون يُجري قياساته على حيود الأيونات الموجبة للهيدروجين والأكسجين وغازاتٍ أخرى. وكان غاز النيون أحدَ الغازات التي استخدمها طومسون في هذه التجارب، ووجد أن مقدارًا ضئيلًا من النيون في الأنبوب المفرَّغ الذي يمرُّ خلاله تيارٌ كهربي يتوهَّج بشدة، ومن ثَمَّ كان جهاز طومسون رائدًا لأنبوب النيون الحديث. ولكن ما اكتشفه طومسون كان أهم بكثير من مجرد اكتشافِ نوعٍ جديد من اللافتات الإعلانية.

على عكس الإلكترونات، التي تتساوى جميعها في النسبةِ ما بين شحنة الإلكترون الكهربية وكتلته (e/m)، فقد اتضح وجود ثلاثة أيونات مختلِفة للنيون، لها جميعًا كميةُ الشحنةِ نفسِها مثل الإلكترون (لكنها $e+$ بدلًا من $e-$)، وتختلف في الكتلة. وكان ذلك أولَ دليل على أن العناصرَ الكيميائية تحتوي عادةً على ذراتٍ لها كتلةٌ مختلِفة (أوزانٌ ذريةٌ مختلِفة) لكنها لها جميعًا الخواص الكيميائية نفسها. يُطلَق الآن على هذه التغيرات الحادثة في العناصر اسم «النظائر»، إلا أنه قد مضى وقتٌ طويلٌ جدًّا قبل أن يُتوصَّل إلى تفسيرٍ لوجودها. ومع ذلك، كان لدى طومسون معلوماتٌ كافية ليبدأ أولى محاولات تفسير ماهية الذرة وشكلها من الداخل؛ فهي ليست جُسيمًا نهائيًّا غيرَ قابل للانقسام — كما كان يظن قليلٌ من الفلاسفة الإغريق — بل هي مزيج من شحناتٍ موجبة وسالبة، يمكن أن تنفصل عنها الإلكترونات وتُقذف خارجها.

تصوَّر طومسون الذرةَ شيئًا أشبهَ بالبطيخة، كرة كبيرة نسبيًّا تنتشر خلالها الشحنة الموجبة، والإلكترونات الصغيرة مضمَّنة داخلها مثل البذور، ويحمل كلٌّ منها مقدارًا ضئيلًا من الشحنة السالبة خاصًّا به. وقد اتضح خطؤه، لكنه قدَّم للعلماء هدفًا يوجِّهون إليه أبحاثهم، وقد أدَّت تجاربهم البحثية حول هذا الهدفِ إلى فهمٍ أكثرَ دقةً لتركيب الذرة. وحتى نرى كيف حدث ذلك، علينا أن نرجع خطوةً إلى الوراء في تاريخ العلوم، ثم نتقدَّم خطوتَين.

أشعة إكس

اتضح أن المدخل إلى معرفةِ سرِّ تركيبِ الذرة هو اكتشاف النشاط الإشعاعي سنة ١٨٩٦. وعلى غرار اكتشاف أشعة إكس قبل هذا العام ببضعة أشهر، كان هذا الاكتشاف مصادفةً

موفَّقة، وإن كان في كلتا الحالتَين مصادفةً موفَّقةً تحتَّم إجراؤها في مختبرٍ للفيزياء في غضون هذه الفترة. كان فيلهلم رونتجن يُجري تجاربَه على أشعة الكاثود مثل كثيرين من علماء الفيزياء في تسعينيات القرن التاسع عشر. وقد تبيَّن بالمصادفة أنه عند اصطدام هذه الأشعة — الإلكترونات — بجسمٍ مادي، فإن التصادم ينتج عنه أشعةٌ ثانوية. وهذه الأشعة غيرُ مرئية إلا أنه يمكن الكشف عنها من خلال تأثيرها في الألواح الفوتوغرافية أو الأفلام، أو من خلال تأثيرها في قطعةٍ من جهازٍ تسمَّى الشاشة الفلورسنتية، تُصدِر شررًا من الضوء عندما تصطدم بها الأشعة. وقد تصادف أن رونتجن كانت لديه شاشة فلورسنتية موضوعة على طاولة بالقرب من تجربته بأشعة الكاثود، وسرعان ما لاحظ أن هذه الشاشة تتوهَّج عندما يبدأ أنبوب التفريغ في تجربة أشعة الكاثود في العمل. وقد أدَّى به ذلك إلى اكتشاف الأشعة الثانوية التي أطلَق عليها «إكس»؛ لأن إكس يرمُز عادةً إلى الكَمِّية المجهولة في المعادلات الرياضية. وسرعان ما تبيَّن أن أشعة إكس تسلك سلوكَ الموجات (نحن نعرف الآن أنها صورة من الإشعاع الكهرومغناطيسي، تشبه إلى حدٍّ بعيدٍ موجاتِ الضوء، لكن أطوالها الموجيَّة أقصرُ منه بكثير)، وقد ساعد هذا الاكتشاف الذي تمَّ التوصُّل إليه في مختبرٍ ألماني في تأكيد وجهة نظر معظم العلماء الألمان في أن أشعة الكاثود لا بد أن تكون أيضًا موجات.

أُعلن عن اكتشاف أشعة إكس في ديسمبر سنة ١٨٩٥ وأحدث ذلك ثورةً في المجتمع العلمي. وقد حاول باحثون آخرون إيجادَ طرقٍ أخرى لإنتاج أشعة إكس أو أشكالٍ ذات صلة من الإشعاع، وكان أولَ مَن نجح في ذلك هو هنري بيكريل في باريس. وكانت أكثر السمات المثيرة للاهتمام في أشعة إكس هي الطريقة التي تمرُّ بها دون أي عوائقَ خلال الكثير من المواد المعتمة، مثل الورقة السوداء، لينتج عنها صورةٌ على لوحٍ فوتوغرافي لم يتعرَّض للضوء. وكان بيكريل مهتمًّا بظاهرة الفسفرة، أو الوميض الفسفوري، التي تعني انبعاث الضوء بواسطة مادةٍ سبق لها أن امتصَّت الضوء. ولا تبعث الشاشة الفلورسنتية — على غرار تلك التي وردت في اكتشاف أشعة إكس — بالضوء إلا إذا «أُثيرت» بواسطةِ إشعاعٍ ساقطٍ عليها؛ ذلك حيث يكون للمادة الفسفورية القدرةُ على اختزان الأشعة الساقطةِ عليها ثم إطلاقها على شكل ضوء، يخفت ببطء ويتلاشى، على مدى ساعات بعد وضعها في الظلام. وكان من الطبيعي البحث عن علاقةٍ بين ظاهرة الفسفرة وأشعة إكس، إلا أن ما اكتشفه بيكريل لم يكن متوقَّعًا، تمامًا مثلما حدث مع اكتشاف أشعة إكس.

النشاط الإشعاعي

في فبراير ١٨٩٦، غطَّى بيكريل لوحًا فوتوغرافيًّا بورقٍ أسودَ مزدوج السماكة، ثم غلَّف الورق بأملاح ثاني كبريتات اليورانيوم والبوتاسيوم، ثم عرَّضَ هذا كلَّه للشمس عدةَ ساعات. وعندما حُمِّضَ اللوح، ظهر إطار الطبقة الخارجية للعناصر الكيميائية. اعتقد بيكريل أن أشعة إكس قد جرى توليدُها في الطبقة الخارجية — أحد أملاح اليورانيوم — بفِعل ضوء الشمس، تمامًا كما في حالة الفسفرة. وبعد يومَين حضَّر لوحًا آخر بالطريقةِ نفسِها بغرض تكرار التجربة، إلا أن السماء كانت ملبَّدة بالغيوم في هذا اليوم واليوم الذي تلاه، فظل اللوح الذي أعدَّه بيكريل محفوظًا داخل خزانة. وفي الأول من مارس، حمَّض بيكريل اللوحَ على أية حال، فوجد مرةً أخرى الإطار الخارجي لملح اليورانيوم. وأيًّا كان الأمر الذي تسبَّب في تضبيب اللوحَين، فإنه لا علاقة له بضوء الشمس أو الفسفرة، ولكنه كان شكلًا غيرَ معروف مسبقًا من الإشعاع الذي اتضح أنه يصدُر من اليورانيوم نفسِه تلقائيًّا دون أيِّ مؤثرٍ خارجي. وتسمَّى الآن هذه القدرةُ على انبعاث الإشعاع تلقائيًّا بالنشاط الإشعاعي.

شرع علماءُ آخرون في دراسة النشاط الإشعاعي بعد أن أثار اكتشاف بيكريل اهتمامهم، وسرعان ما أصبحت ماري كوري وبيير كوري اللذان يعملان في السوربون خبيرَين في هذا الفرع الجديد من العلم. وقد حصلا على جائزة نوبل في الفيزياء سنة ١٩٠٣ عن أبحاثهما في مجال النشاط الإشعاعي وعن اكتشافِ عناصرَ مشِعَّةٍ جديدة، وحصلت ماري على جائزة نوبل ثانية، في الكيمياء، سنة ١٩١١ وذلك عن أبحاثها اللاحقة في المواد المشعة (كما حصلت إيرين، ابنة ماري كوري وبيير كوري، على جائزة نوبل عن أبحاثها في مجال النشاط الإشعاعي في ثلاثينيات القرن العشرين). وفي بداية العَقد الأول من القرن العشرين كانت الاكتشافات التجريبية في مجال النشاط الإشعاعي متقدمةً كثيرًا عن النظرية، مع حدوث سلسلةٍ من التطورات الجديدة التي لم يتم تضمينها في الإطار النظري إلا فيما بعدُ. وقد لمع اسم أحدِ العلماء خلال هذه الفترة في دراسة النشاط الإشعاعي، وهو اسم إرنست رذرفورد.

كان رذرفورد عالِمًا نيوزيلنديًّا عمل مع طومسون في مختبر كافنديش في تسعينيات القرن التاسع عشر. وفي عام ١٨٩٨ عُيِّن أستاذًا للفيزياء في جامعة ماكجيل في مدينة مونتريال، وهناك أثبت هو وفريدريك سودي سنة ١٩٠٢ أن النشاط الإشعاعي ينطوي على تحوُّل العنصرِ المشعِّ إلى عنصرٍ آخر. وكان رذرفورد هو مَن اكتشف إنتاج نوعَين

مختلفَين من الإشعاع بفِعل هذا «الانحلال» أو «الاضمحلال» الإشعاعي كما يُسمَّى الآن، وقد أطلَق عليهما أشعةَ ألفا وأشعة بيتا. وعندما اكتُشِف نوع ثالث من الإشعاع فيما بعدُ، كان من الطبيعي أن يُطلَق عليه أشعةٌ جاما. وقد ثبت أن أشعَّة ألفا وأشعَّة بيتا جسيماتٌ سريعةُ الحركة، وسرعان ما اتضح أن أشعة بيتا ما هي إلا إلكترونات، وهي المكافئ الإشعاعي لأشعة الكاثود، واتضح بعد فترةٍ وجيزة أن أشعة جاما شكلٌ آخرُ من الإشعاع الكهرومغناطيسي مثل أشعة إكس، لكنه ذو أطوالٍ موجيةٍ أقصرَ كثيرًا. ولكن تبيَّن أن جسيمات ألفا شيءٌ مختلِف تمامًا؛ فهي جسيمات تفوق في كتلتها ذرةَ الهيدروجين بمقدار أربع مرات تقريبًا، وتحمل شحنةً كهربية تساوي في مقدارها ضِعفَ شحنة الإلكترون، ولكنها موجبة وليست سالبة.

داخل الذرة

حتى قبل أن يعرف أحدٌ ماهيةَ جسيم ألفا بدقة، أو كيفية إطلاقه بسرعةٍ هائلة من ذرة بما يجعلها تتحوَّل أثناء هذه العملية إلى ذرةِ عنصرٍ آخر، تمكَّن باحثون من أمثال رذرفورد من استخدامه. ذلك حيث يمكن استخدامُ مثل هذه الجسيمات العالية الطاقة — التي هي نفسها نتاجُ تفاعلاتٍ ذرية — كمجسات لدراسة تركيب الذرات، وقد اكتُشف مصدر جسيمات ألفا في المقام الأول في بحثٍ علميٍّ دوريٍّ ومثير. انتقل رذرفورد سنة ١٩٠٧ من مونتريال ليصبح أستاذًا للفيزياء في جامعة مانشستر بإنجلترا، وحصل على جائزة نوبل في الكيمياء سنة ١٩٠٨ عن أعماله في مجال النشاط الإشعاعي، وهي الجائزة التي كان لها وقعٌ ساخر في نفسه. فمع أن لجنة نوبل كانت تَعتبر دراسةَ العناصر تندرج تحت الكيمياء، فإن رذرفورد كان يَعتبر نفسه فيزيائيًّا وليس له علاقة بالكيمياء إلا في أضيق الحدود، وكان يعتبرها فرعًا من العلوم أدنى كثيرًا. (ومع الفهم الجديد للذرات والجزيئات الذي زوَّدتنا به فيزياءُ الكَمِّ، فإن العبارة القديمة التي كان يردِّدها علماء الفيزياء من أن الكيمياء هي ببساطة فرعٌ من الفيزياء أصبحت صحيحةً بنسبةٍ تزيد كثيرًا عن ٥٠ في المائة). وسنة ١٩٠٩ أجرى كلٌّ من هانز جايجر وإرنست مارسدن، أثناء عملهما في قسم رذرفورد في مانشستر، تجاربَ وُجِّه فيها شعاعٌ من جسيمات ألفا على طبقةٍ رقيقة من فلزٍّ ما ليمرَّ خلالها. وانطلقت جسيمات ألفا من ذراتٍ ذاتِ نشاطٍ إشعاعيٍّ طبيعي؛ إذ لم يكن متاحًا في ذلك الوقت معجِّلٌ صناعي للجسيمات. وقد حُدِّد مصير الجسيمات الموجَّهة على رقاقة الفلز بواسطة العدادات الوميضية، وهي شاشات فلورسنتية تُصدِر

وهجًا عندما يصطدم بها مثل هذا الجسيم. عَبَرت بعضُ الجسيمات رقاقةَ الفلز في خطٍّ مستقيم، وانحرف البعض الآخر وخرج مكوِّنًا زاويةً مع الشعاع الأصلي، والمفاجأة كانت أن البعض ارتدَّ من الرقاقة عائدًا إلى الوراء على الجانبِ نفسِه الذي تسقط منه الأشعة، فكيف يمكن حدوث ذلك؟!

جاء رذرفورد بالإجابة. كتلة كل جسيم من جسيمات ألفا أكبرُ بمقدار ٧٠٠٠ مرة من كتلة الإلكترون (في الحقيقة جسيم ألفا يماثل ذرةَ هليوم أُزيل منها إلكترونان)، ويمكنه أن يتحرَّك بسرعةٍ تقارب سرعة الضوء. إذا اصطدم هذا الجسيم بأحد الإلكترونات، فإنه يزيحه جانبًا ويستمر في مساره دون أن يتأثَّر. ولا بد أن السبب وراء حدوث الحيود هو وجود شحناتٍ موجبة في ذرات رقاقة الفلز (تتنافر الشحنات المتشابهة، وكذلك الأقطاب المغناطيسية المتشابهة)، ولكن إذا كان نموذج البطيخة لطومسون صحيحًا لما ارتدت بعض الأشعة إلى الخلف. وإذا كانت كرة الشحنة الموجبة تملأ الذرة، فإن جسيمات ألفا كانت حتمًا ستمرُّ خلالها دون أن تنحرف، بما أن التجربة قد أثبتت أن معظم الجسيمات قد مرَّت في خطوطٍ مستقيمة خلال الرقاقة. وإذا كان نموذج البطيخة قد سمح بمرورِ جسيمٍ واحد، فلا بد أن يسمح لكل الجسيمات بذلك. ولكن إذا تركَّزت كل الشحنة الموجبة في حيزٍ صغير جدًّا وأصغر كثيرًا من الذرة ككل، فإن جسيم ألفا سيصطدم في بعض الأحيان فقط بهذا التركيز الدقيق للمادة وترتدُّ الشحنة مباشرةً إلى الخلف، بينما ستمر معظم جسيمات ألفا سريعًا خلال الفراغ الموجود بين هذه التركيزات المتناهية الصغر للمادة. وهذه هي الحالة الوحيدة التي يمكن أن تتنافر فيها أحيانًا الشحنةُ الموجبة للذرة مع جسيماتِ ألفا الموجبة الشحنة بما يجعلها ترتد في مساراتها، وفي بعض الأحيان تجعلها تحيد قليلًا عن مسارها الأصلي، وفي أحيانٍ أخرى تتركها تعبُر دون اعتراض مسارها تقريبًا.

وهكذا اقترح رذرفورد سنة ١٩١١ نموذجًا جديدًا للذرة، وهو النموذج الذي أصبح أساسَ فهمنا الحديث لتركيب الذرة. أشار رذرفورد إلى ضرورةِ وجودِ منطقةٍ مركزيةٍ صغيرةٍ في الذرة، وأطلق عليها اسم النواة. تحتوي النواة على كل الشحنة الموجبة للذرة وهي ذات مقدارٍ مساوٍ تمامًا ومضادة في شحنتها للشحنة السالبة الموجودة في سحابة الإلكترونات التي تحيط بالنواة؛ ومن ثَم تصنع النواة والإلكترونات معًا ذرةً متعادلةً كهربيًّا. وقد أثبتت التجارب لاحقًا أن حجم النواة يساوي واحدًا على مائة ألف جزء من حجم الذرة؛ إذ يبلغ قطر النواة عادةً حوالي $١٠^{-١٣}$ سم داخل سحابة إلكترونية

يبلغ قطرها عادة ١٠–٨ سم. ولتصوُّر هذه الأرقام، تخيَّل رأسَ دبوس يبلغ قطره حوالي ملِّيمترٍ واحد وموجود في منتصف كاتدرائية سان بول ومحاط بسحابةٍ من دقائقِ الغبار الميكروسكوبية تملأ قبَّة الكاتدرائية، ولنقل مثلًا إنها تمتد مسافة ١٠٠ متر من رأس الدبوس. يمثل رأسُ الدبوس هنا نواةَ الذرة وتمثِّل دقائقُ الغبارِ ما يحيط بها من الإلكترونات. يوضِّح ذلك كمَّ الفراغ الموجود في الذرة، ومن هذا الفراغ تتشكَّل كل الأجسام الصلبة في ظاهرها في العالَم المادي، ويتماسك بعضها مع بعض بواسطة الشحنات الكهربية. وقد حصل رذرفورد، لو نذكر، على جائزة نوبل عندما توصَّل إلى هذا النموذج الجديد للذرة (وهو نموذجٌ مبني على التجارب التي صمَّمها). غير أن مسيرته المهنية لم تكن قد بلغت نهايتها بعدُ؛ ذلك أنه أعلن سنة ١٩١٩ أولَ تحوُّلٍ صناعي للعنصر، وفي العام نفسه خلف جيه طومسون في منصبِ مدير مختبر كافنديش. وقد مُنِحَ لقب فارس (سنة ١٩١٤) أولًا، ثم مُنِحَ لقب البارون رذرفورد من نيلسون سنة ١٩٣١. ومع هذا كله، بما في ذلك جائزة نوبل، فإن أعظمَ إسهام له في العلم كان بلا شكٍّ النموذجَ النووي للذرة. وكان مقدَّرًا لهذا النموذج أن ينقل الفيزياء، ويؤدي كما حدث بالفعل إلى سؤالٍ بادي الوضوح: بما أن الشحنات المختلِفة تتجاذب فيما بينها بنفس شدة تنافُر الشحنات المتشابهة، فلماذا إذن لا تسقط الإلكترونات السالبة إلى داخل النواة الموجبة؟ وقد جاءت الإجابة من تحليلِ الطريقة التي تتفاعل بها الذرات مع الضوء، وهو ما أشار إلى قدوم عصر النسخة الأولى من نظريةِ الكَمِّ.

هوامش

(1) Quoted in many books, including *Invitation to Physics* by Jay M. Pasachoff and Marc L. Kutner (page 3).

(2) Quoted in *The Historical Development of Quantum Theory*, volume one, page 16, by Jagdish Mehra and Helmut Rechenberg.

(3) Quote from Einstein's "Autobiographical Notes", in *Albert Einstein: Philosopher Scientist*, edited by P. A. Schilpp, Tudor, New York, 1949 (page 47).

(4) "Devised" is exactly the right word here. J. J. Thomson was notoriously clumsy and planned brilliant experiments that other people carried

out; his son George is reported as saying that although J. J. (as he was always known) “could diagnose the faults of an apparatus with uncanny accuracy it was just as well not to let him handle it.” (See *The Questioners*, Barbara Lovett Cline, page 13.)

الفصل الثالث

الضوء والذرات

استندت المفارقة التي أثارها نموذج رذرفورد إلى الحقيقة المعروفة بأن الشحنة الكهربية المتحركة بتسارعٍ تشعُّ طاقةً على شكلِ إشعاعٍ كهرومغناطيسي؛ قد يكون في صورة ضوء، أو موجات راديو، أو شيءٍ من هذا القبيل. إذا كان الإلكترون يقبع دون حركة خارج نواة الذرة، فلا بد له من السقوط داخل النواة، وبذلك لن تصبح الذرة ثابتةً ومستقرة. وبانهيار الذرة، فإنها لا بد أن تطلِق حزمةً مفاجئةً من الطاقة تشبه الانفجار. والطريقة الواضحة للرد على ميل الذرة إلى الانهيار هي أن نتصوَّر أن الإلكترونات تدور في مداراتٍ حول النواة، مثل الكواكب التي تدور في مداراتها حول الشمس في مجموعتنا الشمسية. غير أن الحركة المدارية (الحركة في مدارات) تنطوي على تسارعٍ مستمر. وقد لا تتغير سرعة الجسم الذي يدور في مداره، إلا أن الاتجاه الذي يتحرَّك فيه يتغير، ويحدِّد كلٌّ من السرعة والاتجاه السرعةَ المتجهة، وهو الأمر الذي يعنينا. ومع تغيُّر السرعة المتجهة للإلكترونات، فإنها لا بد أن تشعَّ طاقة، ونظرًا لما تفقده من طاقةٍ من جرَّاء ذلك، فإنها لا بد أن تسقط في مسارٍ حلزوني إلى داخل النواة. ولم يستطِع الباحثون في الجانب النظري استبعاد احتمالية انهيار ذرة رذرفورد حتى بافتراض حدوث الحركة المدارية.

وعندما نُقِّح هذا النموذج، بدأ الباحثون في الجانب النظري من صورة الإلكترونات وهي تدور في مداراتٍ حول النواة، وحاولوا إيجادَ طرقٍ للاحتفاظ بهذه الإلكترونات في مداراتها دون أن تفقد طاقةً وتنهارَ في مسارٍ حلزوني إلى داخل النواة. ولم تكن تلك سوى نقطة بداية طبيعية تتواءم على نحوٍ جيدٍ مع التشبيه الواضح بالمجموعة الشمسية. إلا أن ذلك كان خطأً. وكما سنرى فيما بعدُ، فإن ذلك لا يختلِف عن التفكير في الإلكترونات على أنها تقبع دون حركةٍ في الفضاء على مسافةٍ معينةٍ من النواة، ولا تدور حولها. وتظل المشكلة قائمة: كيف نوقِف سقوطَ الإلكترونات إلى الداخل؟ ولكن الصورة التي أثارها

هذا التساؤل في الأذهان مختلِفة جدًّا عن صورة الكواكب التي تدور حول الشمس، وهو أمرٌ جيد تمامًا. وكانت الحيلة التي استخدمها الباحثون النظريون لتفسير عدم سقوط الإلكترونات واحدةً، سواء استخدمنا تشبيهَ الحركة المدارية للكواكب أم لا، وهو تشبيهٌ متكرِّر ومضلِّل. فالصورة التي لا يزال معظمُ الناس يحتفظون بها في أذهانهم، سواء من الدراسة أو من المقالات المبسَّطة، هي أن الذرة تشبه بالأحرى المجموعةَ الشمسية؛ حيث تتكوَّن من نواةٍ دقيقة في المركز تدور حولها الإلكترونات في مداراتٍ دائرية. وبناءً على هذا الافتراضِ ينبغي لنا أن نتخلَّص من تلك الصورة، ونحاول الاقتراب من العالَم الغريب للذرة — عالَم ميكانيكا الكَمِّ — بعقلٍ متفتِّح. لنفكِّرْ ببساطة في النواة والإلكترونات الموجودَين معًا في الفراغ، ونسأل: لماذا لا يتسبَّب التجاذب بين الشحنات الموجبة والسالبة في انهيار الذرة وإطلاق طاقةٍ في هذه الأثناء؟

في هذا الوقت الذي بدأ فيه الباحثون النظريون محاولاتهم لحل هذه المفارقة في العَقد الثاني من القرن العشرين، حدثت الاكتشافات الحاسمة التي قدَّمت لهم نموذجًا منقَّحًا للذرة. وقد اعتمدوا في ذلك على دراساتهم للطريقة التي تتفاعل بها المادة (الذرات) مع الإشعاع (الضوء).

وفي بداية القرن العشرين كانت أفضل وجهة نظر علمية حول العالَم الطبيعي تتطلَّب فلسفةً مزدوجة. فمن الممكن وصف الأجسام المادية بمدلول الجسيمات أو الذرات، لكن الإشعاع الكهرومغناطيسي، الذي يتضمَّن الضوء، لا بد من وصفه بمدلول الموجات. ومن ثَم، قدَّمت الطريقةُ التي يتفاعل بها الضوءُ والمادةُ أفضلَ فرصةٍ فيما يبدو لتوحيد الفيزياء في بداية القرن العشرين. غير أن النقطة التي انهارت عندها الفيزياء الكلاسيكية، التي كانت قد نجحت في كل مجالٍ آخر تقريبًا، هي محاولة تفسير الطريقة التي يتفاعل بها الإشعاع مع المادة.

إنَّ أبسطَ طريقة لمشاهدة الكيفية (حرفيًّا) التي تتفاعل بها المادة مع الإشعاع هي النظرُ إلى جسمٍ ساخن. يشع الجسم الساخن طاقةً كهرومغناطيسية، وكلما كانت حرارة الجسم أعلى أطلق كميةً أكبرَ من الطاقة، بأطوالٍ موجية أقصر (تردُّدات أعلى). وهكذا فإن عصا المدفأة الساخنة لدرجةِ الاحمرار تكون أقلَّ سخونة من تلك الساخنة لدرجة البياض، وعصا المدفأة الباردة للدرجة التي لا تشعُّ عندها ضوءًا مرئيًّا ربما لا تزال دافئة؛ وذلك لأنها تطلِق أشعةً تحت حمراء منخفضة التردُّد. وحتى في نهاية القرن التاسع عشر كان من الواضح إلى حدٍّ ما ضرورة الربط بين الإشعاع الكهرومغناطيسي وحركة

الشحنات الكهربية الدقيقة. كان الإلكترون نفسُه قد اكتُشِف حديثًا في ذلك الوقت، لكن كان من السهل رؤية الكيفية التي يتذبذب بها جزءٌ مشحون من ذرة (فيما نعرِّفه الآن بالإلكترون) للأمام وللخلف لينتج تدفقًا من الموجات الكهرومغناطيسية، بطريقةٍ لا تختلف كثيرًا عن الطريقة التي يمكنك بها صنْع تموجاتٍ مائية بتحريك إصبعك للأمام وللخلف في حوض الاستحمام. وكانت المشكلة أن أفضل النظريات الكلاسيكية — الميكانيكا الإحصائية والفيزياء الكهرومغناطيسية — تنبَّأت بشكلٍ من أشكال الإشعاع مختلِفٍ جدًّا عن النوع الذي شوهِد فعليًّا انبعاثه من الأجسام الساخنة.

لغز الجسم الأسود

للتوصُّل إلى مثل هذه التنبؤات، استخدم الباحثون النظريون، كعادتهم دائمًا، مثالًا نموذجيًّا خياليًّا، وهو في هذه الحالة ماصٌّ أو باعث للإشعاع. ويُسمَّى مثل هذا الجسم بـ «الجسم الأسود»؛ لأنه يمتص كل الإشعاع الذي يسقط عليه. ولكنه اختيارٌ غير موفَّق للاسم؛ إذ يتضح أن الجسم الأسود هو أيضًا الأكثر كفاءة في تحويل الطاقة الحرارية إلى إشعاعٍ كهرومغناطيسي، كما أن الجسم الأسود يمكن أن يكون ساخنًا لدرجةِ الاحمرار أو البياض، وفي بعض الأحوال يكون سطحُ الشمس نفسُه بالأحرى بمثابةِ جسمٍ أسود. ولكن على عكس الكثير من المفاهيم المثالية للباحثين النظريين، فإن من السهل تحضيرَ جسمٍ أسود في المختبر. كلُّ ما عليك هو أن تأخذ كرةً مجوَّفة أو أنبوبًا مغلقًا من طرفَيه، وتصنع ثقبًا صغيرًا في جانب الكرة أو الأنبوب. فإذا دخل أي إشعاع، كضوء مثلًا، من خلال الثقب، فإنه سيُحتجَز بالداخل، وسيرتدُّ على الجدران حتى يُمْتص، ومن المستبعد أن يرتد الشعاع ليخرج من الثقب الذي دخل منه، وبذلك فإن الثقب يصبح في الواقع جسمًا أسود. ومن ثَم، صيغ الاسم الألماني البديل للإشعاع وهو إشعاع التجويف.

ومع ذلك، فإن ما يعنينا بالقدْر الأكبر هو ما يحدث للجسم الأسود عند تسخينه. ومثلما يحدث مع عصا المدفأة، فإنه يسخن أولًا ثم يتوهَّج لدرجةِ الاحمرار أو البياض حسب درجة حرارته. ومن الممكن دراسة طيف الإشعاع المنبعث — كمية الإشعاع عند كل طولٍ موجي — في المختبر، بملاحظةِ ما يصدر عن ثقبٍ صغير في جانبِ وعاءٍ ساخن، وقد أثبتت مثل هذه الدراسات أن الأمر يعتمد فقط على درجة حرارة الجسم الأسود. ويوجد القليل جدًّا من الإشعاع عند الأطوال الموجية الشديدة القصر (تردُّدات عالية)، والقليل جدًّا عند الأطوال الموجية المفرطة الطول، وستقع معظم الطاقة المنبعثة في نطاقٍ متوسط

من التردُّدات. وتُزاح النهاية العظمى للطيف (أي ذروته) تجاه الأطوال الموجية الأقصر كلما ازدادت سخونة الجسم وحرارته (من تحت الحمراء، إلى الحمراء، إلى الزرقاء، إلى فوق البنفسجية)، إلا أنه دائمًا ما يوجد انقطاع في الطيف عند الأطوال الموجية القصيرة للغاية. وهذا ما جعل قياسات إشعاع الجسم الأسود التي جرت خلال القرن التاسع عشر تتعارض مع النظرية.

وعلى الرغم من غرابة الأمر، فإن أفضل التنبؤات تبعًا للنظرية الكلاسيكية تتفق على أن التجويف المملوء بالإشعاع لا بد أن يحتوي دومًا على كميةٍ لا نهائية من الطاقة عند أقصر الأطوال الموجية؛ أي إنه بدلًا من النهاية العظمى في طيف الجسم الأسود والانخفاض إلى المستوى صفر من الطاقة عند طولٍ موجيٍّ مقداره صفر، من المفترض أن تزيد قيمُ القياسات زيادةً كبيرةً للغاية عند الطرف الخاص بالأطوال الموجية القصيرة. وقد صيغت العمليات الحسابية بناءً على الافتراض الذي يبدو طبيعيًّا في ظاهره بإمكانية التعامل مع موجات الإشعاع الكهرومغناطيسي في التجويف بالطرقِ نفسِها التي تُعامَل بها الموجات على الأوتار، كأوتار الكمان، وأنه من الممكن أن توجد موجات بجميع الأحجام؛ أي بأي طولٍ موجي أو تردُّد. ونظرًا لوجودِ أطوالٍ موجية (أنماط تذبذب) كثيرة للغاية للتعامل معها، فلا بد من الاستعانة بقوانين الميكانيكا الإحصائية والانتقال بها من عالَم الجسيمات إلى عالَم الموجات للتنبؤ بالمظهر العام للإشعاع في التجويف، الأمر الذي يؤدي مباشرةً إلى استنتاجِ أن الطاقة المشعَّة عند أي تردُّد تتناسب طرديًّا مع ذلك التردُّد. والتردُّد هو معكوس الطول الموجي، وبذلك فإن الأطوال الموجية القصيرة للغاية تكون ذات ترددات عالية للغاية. وعليه، فإن كل إشعاعات الجسم الأسود لا بد أن تنتِج كمياتٍ ضخمةً من الطاقة العالية التردد، في المنطقة فوق البنفسجية وما بعدها. فكلما زاد التردُّد زادت الطاقة. ويطلَق على هذا التنبؤ «الكارثة فوق البنفسجية»، وهي توضِّح أنه لا بد من وجودِ خطأ ما في الافتراضات التي بُنيت عليها هذه التنبؤات.

غير أنه لم يثبت خطأ كل شيء. فعلى الجانب الخاص بالترددات المنخفضة في منحنى الجسم الأسود، جاءت المشاهدات متوافِقةً بصورةٍ جيدة جدًّا مع التنبؤات القائمة على النظرية الكلاسيكية، المعروفة باسم قانون رايلي-جينز. وعلى الأقل، فإن النظرية الكلاسيكية ليست صحيحةً تمامًا. وتكمُن المشكلة في أنَّ طاقةَ التذبذبِ عند التردُّدات العالية لا تكون كبيرةً للغاية، بل إنها في الواقع تنقطع وتصبح صفرًا عندما يزداد تردُّد الإشعاع.

وقد اجتذبت هذه المشكلة اهتمامَ كثيرٍ من الفيزيائيين في العَقد الأخير من القرن التاسع عشر. وكان أحد هؤلاء الفيزيائيين هو ماكس بلانك، وهو عالِمٌ ألماني من المدرسة القديمة. كان بلانك في أعماقِ نفسِه من أنصار الاتجاه المحافظ في العلم، وليس الثوري، وكان مجتهدًا ودقيقًا جدًّا في عمله. وكان اهتمامه الخاص ينصبُّ على الديناميكا الحرارية، وكان أمله الأكبر في ذلك الوقت أن يحُلَّ الكارثة فوق البنفسجية بتطبيق قواعد الديناميكا الحرارية. وفي أواخر العَقد الأخير من القرن التاسع عشر كانت هناك معادلتان تقريبيتان معروفٌ عنهما أنهما تقدِّمان فيما بينهما تمثيلًا تقريبيًّا لِطَيف الجسم الأسود. تعاملت نسخةٌ مبكِّرة من قانون رايلي-جينز مع الأطوال الموجية الطويلة، ووضع فيلهلم فيين صيغةً توافقت تقريبًا مع المشاهدات المتعلِّقة بالأطوال الموجية القصيرة، و«تنبأت» كذلك بالطول الموجي الذي تقع عنده النهاية العظمى للمنحنى عند أي درجة حرارة. كانت نقطة الانطلاق التي بدأ منها بلانك هي النظر في الكيفية التي تشعُّ بها المذبذبات الكهربية الصغيرة وميضَ الموجات الكهرومغناطيسية وتمتصُّه، وهو نهجٌ مختلِف عما اتبعه رايلي في بداية القرن العشرين وجينز بعده بقليل، لكنه كان النهج الذي أعرب بدقةٍ عن المنحنى القياسي الذي اكتمل بالكارثة فوق البنفسجية. وقد عمل بلانك من سنة ١٨٩٥ وحتى سنة ١٩٠٠ على هذه المشكلة ونشر العديد من المقالات البحثية المؤثِّرة التي أرست العلاقة بين الديناميكا الحرارية والديناميكا الكهربية، لكنه لم يكن قد توصَّل بعدُ إلى حلٍّ للغز طيف الجسم الأسود. وسنة ١٩٠٠، أحدث طفرةً وأحرز تقدُّمًا مفاجئًا في هذا الصدد، ولم يكن ذلك نتيجةَ بصيرةٍ علمية تتسم بالتميز والرصانة والمنطقية، بل كان ذلك نتاج شعور باليأس امتزج فيه الحَظُّ والبصيرةُ مع ما حالفه به الحظُّ من فهمٍ خاطئ لواحدة من الأدوات الرياضية التي كان يستخدمها.

ولا شك أنه لا أحد اليوم يستطيع أن يجزم بصورةٍ قاطعة بما كان يدور في ذهن بلانك عندما اتخذ الخطوة الثورية التي أدَّت إلى ظهور ميكانيكا الكَمِّ، إلا أن أبحاثه قد خضعت للدراسة على نحوٍ مفصَّل على يد مارتن كلاين في جامعة يل، الذي كان في ذلك الوقت الذي شهِد نشأةَ نظريةِ الكَمِّ مؤرخًا متخصصًا في تاريخ الفيزياء. وقدَّم كلاين من خلال إعادة صياغته للأجزاء التي أسهم بها كلٌّ من بلانك وأينشتاين في نشأة هذه النظرية، تفسيرًا من أوثقِ التفسيرات التي يمكن الحصول عليها، ووضعَ الاكتشافاتِ في سياقِ تاريخٍ مقنع. جاءت الخطوة الأولى في أواخر صيف سنة ١٩٠٠ ولم يكن للحظ دور فيها على الإطلاق، بل كانت تُعزى برُمَّتها إلى بصيرةِ عالِم فيزياء رياضية متمرِّس.

فقد أيقن بلانك أن الوصفَين غير المكتملَين لِطَيْف الجسم الأسود يمكن دمجهما في صيغةٍ رياضيةٍ واحدةٍ بسيطة تصفُ شكل المنحنى بأكمله، وقد استخدم في الواقع قدْرًا ضئيلًا من الخداع الرياضي لسد الثغرة بين الصيغتَين: قانون فيين وقانون رايلي-جينز. وحقَّق في ذلك نجاحًا هائلًا. فقد توافقت معادلة بلانك على نحوٍ رائع مع مشاهدات إشعاع التجويف. ولكن على النقيض من القانونَين غيرِ المكتملَين اللذين بُنيتْ عليهما، لم تكن معادلة بلانك تستند إلى أساسٍ فيزيائي. وقد حاول كلٌّ من فيين ورايلي — بل بلانك أيضًا في السنوات الأربع السابقة على ذلك — وضْعَ نظريةٍ تبدأ من افتراضاتٍ فيزيائية معقولة لتصل في النهاية إلى منحنى الجسم الأسود. وهكذا استطاع بلانك أن يتوصَّل إلى المنحنى الصحيح، ولكن لم يعرِف أحدٌ ما الافتراضاتُ الفيزيائيةُ المرتبِطةُ بهذا المنحنى. وقد اتضح أنها لم تكن معقولةً بدرجةٍ كبيرة على الإطلاق.

ثورة ليست موضع ترحيب

أُعلنَ عن معادلة بلانك في اجتماعٍ للجمعية الفيزيائية في برلين في أكتوبر ١٩٠٠. وعلى مدى الشهرَين التاليَين، انشغل بلانك كليةً بمسألةِ إيجادِ أساسٍ فيزيائي للقانون؛ حيث حاول الدَّمج بين افتراضاتٍ فيزيائيةٍ مختلفة ليرى أيُّها يناسب المعادلات الرياضية. وقد صرَّح فيما بعدُ بأن هذه الفترة كانت أكثر الفترات التي شهِدت عملًا مكثفًا في حياته كلها. وقد باءت محاولاته العديدة بالفشل إلى أن أصبح بلانك أخيرًا أمامَ بديلٍ واحد فقط، لم يكن موضعَ ترحيب من جانبه.

وقد وصفتُ بلانك على أنه فيزيائيٌّ من المدرسة القديمة، وكان كذلك بالفعل. فقد كان في أبحاثه المبكِّرة يعارض تقبُّل الفرضية الجزيئية، وكان يرفض على وجه الخصوص فكرةَ التفسير الإحصائي للخاصية المعروفة بالإنتروبيا (القصور الحراري)، وهو تفسيرٌ أدخله بولتزمان في علم الديناميكا الحرارية. والإنتروبيا مفهومٌ أساسي في الفيزياء، وتتعلَّق في أساسها بالتدفُّق الزمني. ومع أن القوانين البسيطة للميكانيكا — قوانين نيوتن — تقبَل العكس تمامًا فيما يتعلَّق بالزمن، فإننا نعلم أن العالَم الواقعي لا يكون كذلك. لنفترض أن حجرًا سقط على الأرض. عندما يصطدم الحجر بالأرض تتحوَّل طاقة حركته إلى حرارة. لكن إذا وضعنا حجرًا مماثلًا على الأرض وسخنَّاه بنفس المقدار، فإنه لن يقفز في الهواء. فلماذا لا يقفز؟ في حالة الحجر الذي يسقط على الأرض تتحوَّل صورةٌ منسَّقة من الحركة (كل الذرات والجزيئات تسقط في نفس الاتجاه) إلى صورةٍ فوضوية

غير منسَّقة من الحركة (كل الذرات والجزيئات يتدافع بعضها تجاه بعض بقوةٍ هائلة ولكن بعشوائية). ويتَّفق ذلك مع أحد قوانين الطبيعة الذي يشترط فيما يبدو أن تزداد الفوضوية وعدم التناسق باستمرار، ويُعرَف عدمُ التناسق بهذا المفهوم بالإنتروبيا أو عشوائية النظام. وهذا القانون هو القانون الثاني للديناميكا الحرارية، وينصُّ على أن العمليات الطبيعية تتجه دائمًا نحو زيادة الفوضوية وعدم التناسق، أو على أن الإنتروبيا تزداد باستمرار. فإذا وضعت طاقةً حرارية مضطربة في حجر، فإنه في هذه الحالة لا يستطيع استخدام هذه الطاقة لإحداثِ حركةٍ منسقة لكل الجزيئات في الحجر بحيث تقفز معًا إلى أعلى.

أم تُرى من الممكن ذلك؟ أدخل بولتزمان تعديلًا مغايرًا في هذا الموضوع. قال بولتزمان إن مثل هذا الحدث الاستثنائي قد يحدث، لكنه بعيد الاحتمال للغاية. وبالطريقة نفسها، ونتيجة للحركة العشوائية لجزيئات الهواء، من الممكن أن يتركَّز هواء الغرفة كلُّه فجأةً في الأركان (لا بد أن يوجد أكثر من ركن؛ لأن الجزيئات تتحرَّك في الفراغ في ثلاثةِ أبعادٍ مكانية)، إلا أنه من المستبعَد أيضًا حدوث هذا الاحتمال حتى إنه يمكن تجاهله فيما يتعلَّق بكل الأغراض العملية. عارض بلانك هذا التفسير الإحصائي للقانون الثاني للديناميكا الحرارية معارضةً شديدةً وطويلة الأمد، واتخذت هذه المعارضة شكلًا علنيًّا كما ضمَّنها في مراسلاته مع بولتزمان. فقد كان القانون الثاني بالنسبة إليه قانونًا مطلقًا؛ إذ يجب أن تزداد الإنتروبيا دائمًا، دون تدخُّل من الاحتمالات في ذلك. وعليه، فمن السهل أن نتفهَّم الإحساس الذي ألمَّ ببلانك قرب نهاية العَقد الأول من القرن العشرين عندما حاول على مضضٍ — بعدما استهلك كلَّ الخيارات الأخرى — أن يُضمِّن نسخةَ بولتزمان الإحصائية للديناميكا الحرارية في حساباته لِطَيْف الجسم الأسود، وتبيَّن له أنها تصلح لذلك. ولكن ازدادت حدةُ المفارقة التي انطوى عليها الوضع بحقيقةِ أنه نظرًا لجهله بمعادلات بولتزمان، فقد طَبَّقها بطريقةٍ متضاربةٍ وغير متسقة. وهكذا حصل بلانك على الإجابة الصحيحة، ولكن للتفسير الخطأ. ولم تتضح الأهمية الحقيقية لأبحاث بلانك إلا عندما تناول أينشتاين الفكرة وتولَّى توضيحها.

ويجدُر بنا التأكيد على أن بلانك عندما أثبت أن تفسير بولتزمان الإحصائي لزيادة الإنتروبيا هو أفضل وصف للواقع كان ذلك بمثابةِ تطوُّرٍ كبير في العلوم. وتبعًا لأبحاث بلانك، فإن زيادةَ الإنتروبيا هي في الواقع أمرٌ لا يحتمل الشكَّ مطلقًا، ولكنه لا يمكن أن يؤخَذ على محمل اليقين المطلَق على الرغم من احتماليته الكبيرة في الحقيقة. ولهذا الأمر

نتائجُه المهمة في علم الكون، وهو علم دراسة العالَم ككلٍّ؛ حيث نتعامل مع امتدادات شاسعة للزمان والمكان. فكلما اتسع النطاق الذي نتعامل معه، زادت فرص حدوث الأشياء البعيدة الاحتمال في مكانٍ ما، وأحيانًا داخل هذا النطاق. بل من المحتمل أيضًا (وإن كان لا يزال احتمالًا بعيدًا للغاية) أن يمثِّل العالَمُ كلُّه، الذي هو مكانٌ منظَّم على العموم، نوعًا من التأرجحات الإحصائية الديناميكية الحرارية، وهو تراجعٌ هائل ونادر جدًّا أدَّى إلى نشوء نطاقٍ منخفضِ الإنتروبيا آخذ في التقلُّص حاليًّا. ومع ذلك، أوضحَ «خطأٌ» بلانك أمرًا أكثرَ أهميةً عن طبيعة الكون.

تضمَّن المدخل الإحصائي الذي انتهجه بولتزمان في الديناميكا الحرارية تقسيم الطاقة إلى مقاديرَ صغيرةٍ رياضيًّا، والتعامل مع هذه المقادير الصغيرة على أنها كمياتٌ حقيقية يمكن التعامل معها بواسطة معادلات الاحتمالات. بالنسبة إلى الطاقة التي قُسِّمت إلى أجزاء قبل هذه الخطوة من العملية الحسابية، لا بد من تجميعها (دمجها) بعد ذلك في مرحلةٍ لاحقة، للحصول على الطاقة الكلية؛ وهي في هذه الحالة الطاقة المقابلة لإشعاع الجسم الأسود. وفي منتصف هذه العملية الحسابية، أيقن بلانك أنه قد حصل بالفعل على الصيغة الرياضية التي كان يبحث عنها. وقبل أن يصل إلى مرحلة دمج أجزاء الطاقة ليحصُلَ على الطاقة الكلية المتصلة، كانت معادلة الجسم الأسود قابعةً هناك في الرياضيات. ومن ثَم استخدمها بلانك. وكانت هذه خطوةً متطرِّفة للغاية، وغير مبرَّرة بالمرة في سياق الفيزياء الكلاسيكية.

ولو أن أيَّ عالِم من علماء الفيزياء الكلاسيكية الأكفاء بدأ بمعادلات بولتزمان ليضعَ صيغةً لإشعاع الجسم الأسود لكان قد أتمَّ عملية الدمج والتكامل لأجزاء الطاقة. وعندئذٍ، كما أوضح أينشتاين فيما بعدُ، كان تجميع أجزاء الطاقة سيؤدي إلى إعادة الكارثة فوق البنفسجية في واقع الأمر. وأشار أينشتاين إلى أن أيَّ تعامُلٍ كلاسيكي مع المشكلة سيؤدي حتمًا إلى هذه الكارثة. وفقط لأن بلانك كان يعرف الإجابةَ التي يبحث عنها، فقد كان قادرًا على التوقُّف دون استكمال الحل الكلاسيكي الكامل للمعادلات، والذي بدا حلًّا صحيحًا. ونتيجةً لذلك، وجد نفسه أمام أجزاءٍ من الطاقة تستوجب تفسيرًا لها. وقد فسَّر بلانك هذا التقسيم الظاهر للطاقة الكهرومغناطيسية إلى أجزاءٍ فرديةٍ بأنه يعني أن المذبذبات الكهربية داخل الذرة يمكنها فقط أن تبعث الطاقة أو تمتصها على شكلِ أجزاءٍ كبيرة ذاتِ مقدارٍ معيَّن، تسمَّى الكوانتا (الكَمِّ). وبدلًا من تقسيمِ الكَمِّية المتاحة من الطاقة بعددٍ لا نهائي من الطرق، فإنه من الممكن فقط تقسيمُها إلى عددٍ محدَّد من

الأجزاء بين المذبذبات، وأن طاقة جزءٍ كهذا من الإشعاع (E) لا بد أن تعتمد على تردُّدها (ويُرمز له بالحرف الإغريقي نو ν) تبعًا للصيغة الجديدة:

$$E = h\nu$$

حيث h ثابتٌ جديد، يُسمَّى الآن ثابتَ بلانك.

ما هو h؟

من السهل معرفةُ الكيفية التي حلَّت بها هذه المعالجةُ الكارثةَ فوق البنفسجية. عند الترددات المرتفعة للغاية، تكون الطاقةُ اللازمة لإطلاقِ كَمٍّ واحد من الإشعاع كبيرةً جدًّا، ولن يملِك مثل هذه الطاقة الهائلة إلا عددٌ قليل من المذبذبات (تَبعًا للمعادلات الإحصائية)، وبذلك لن ينبعث سوى عددٍ قليل من الكَمَّات العالية الطاقة. أما عند الترددات المنخفضة للغاية (الأطوال الموجية الطويلة)، فتنبعث أعدادٌ كبيرة جدًّا من الكوانتات المنخفضة الطاقة، ولكنَّ كلًّا منها لا يملك إلا مقدارًا ضئيلًا للغاية من الطاقة؛ ومن ثَم فإن مجموعها إذا أُضيف بعضها إلى بعض لا يعطي قيمة تُذكَر. وبالنسبة إلى المذبذبات التي تمتلك طاقةً كافية لانبعاث الإشعاع بمقاديرَ متوسطةِ الحجم، تضاف معًا لينتج عنها النهاية العظمى في منحنى الجسم الأسود، ولا توجد هذه المذبذبات بأعدادٍ وفيرة إلا في النطاق الأوسط من الترددات.

غير أن اكتشاف بلانك، الذي أُعلِن عنه في ديسمبر ١٩٠٠، قد أثار من الأسئلة أكثرَ مما أجابَ عنه، وفشل في إثارة الحماس في عالَم الفيزياء. وليست المقالات العلمية المبكِّرة التي قدَّمها بلانك عن نظريةِ الكَمِّ بالقدْر الأمثل من الوضوح (وهو ما قد يعكس الطريقةَ المضطرِبةَ التي اضطُرَّ فيها إلى إقحام فكرته في الديناميكا الحرارية المحبَّبة إلى نفسه)، وعلى مدى فترةٍ طويلة كان كثير من الفيزيائيين الذين على علمٍ بأبحاثه — بل معظمهم — ينظرون إليها على أنها ببساطة حيلةٌ رياضية، وذريعة للتخلُّص من الكارثة فوق البنفسجية التي لا تحظى إلا بأهميةٍ فيزيائيةٍ محدودة أو تكاد تكون منعدمة. بل حتى ليس لها منه شيء، وبالتأكيد كان بلانك نفسه مشوَّشًا، وقد كتب في أحد خطاباته إلى روبرت ويليام وود سنة ١٩٣١ ملقيًا نظرةً على أبحاثه سنة ١٩٠٠ قائلًا: «يمكن أن أصفَ الإجراء برُمَّته على أنه ضربٌ من اليأس ... كان لا بد من إيجادِ تفسيرٍ نظري

بأي ثَمن، مهما بلغت فداحته.»[1] لكنه كان يعلم أنه قد عثر على شيءٍ ذي مغزًى، ووفقًا لهايزنبرج فإن ابن بلانك قد أخبره لاحقًا أن والده وصفَ بحثه في تلك الفترة أثناء تجولهما طويلًا في جرونفالد في ضواحي برلين، وشرح له كيف أن هذا الاكتشاف قد يرقى إلى مرتبةِ اكتشافات نيوتن.[2]

انشغل الفيزيائيون في العَقد الأول من القرن العشرين في استيعاب الاكتشافات الجديدة التي تضمَّنت الإشعاع الذري، ولا يبدو أن «الحيلة الرياضية» الجديدة لبلانك في تفسير منحنى الجسم الأسود كانت ذات أهميةٍ طاغية مقارنةً بهذه الاكتشافات. وفي الواقع، استغرق الأمرُ حتى سنة ١٩١٨ ليحصل بلانك على جائزة نوبل عن أبحاثه، وهي فترةٌ طويلة إذا قورنت بالسرعة التي حازت بها أبحاث آل كوري ورذرفورد هذا التقدير. (يرجع ذلك جزئيًّا إلى أن الإقرار بالإنجازات النظرية الجديدة والمثيرة يستغرق وقتًا أطول، فالنظرية الجديدة لا تكون محسوسةً مثل جسيمٍ جديد، أو أشعة إكس، ولا بد أن تثبت الأيامُ صحَّتها وتؤكدها التجارب قبل الإقرار الكامل بها.) كان هناك أيضًا شيء غريب بخصوص ثابت بلانك الجديد h. فهو ثابتٌ صغيرٌ جدًّا ٦٫٦ × ١٠⁻٣٤ جول ثانية، إلا أن ذلك لا يمثِّل أيَّ لغز لأنه لو كان أكبر كثيرًا لأمكن التوصُّل إليه بسهولةٍ قبل أن يبدأ الفيزيائيون في محاولة فهْم إشعاع الجسم الأسود بمدةٍ طويلة. في الواقع، الشيء الغريب بخصوص الثابت h هو الوحدات التي يُقاس بها؛ الطاقة (بالجول) مضروبة في الزمن (بالثواني). وتسمَّى مثل هذه الوحدات «الشغل» أو «الأثر»، ولم تكن سمةً مألوفة من سمات الميكانيكا الكلاسيكية؛ فليس هناك «قانون الحفاظ على الشغل» ليضاهي قانون الحفاظ على الكتلة أو الطاقة. ولكن للشغل خاصية مهمة للغاية يشترك فيها، ضمن أشياءَ أخرى، مع الإنتروبيا. فالشغل الثابت يكون ثابتًا ثبوتًا مطلقًا ويكون له نفس المقدار لكل المشاهدين في الزمان والمكان. وهو ثابتٌ رباعي الأبعاد، ولم تتضح أهمية ذلك إلا عندما كشف أينشتاين النقاب عن نظرية النسبية.

ونظرًا لأن أينشتاين هو الشخصية المحورية التالية التي ستدخل إلى مسرح ميكانيكا الكَمِّ، فقد يستحق الأمر أن نتحوَّل بحديثنا قليلًا إليه لنرى ما يعنيه ذلك. تتعامل نظرية النسبية الخاصة مع الأبعاد المكانية الثلاثة والبعد الزمني الواحد على أنها كِيانٌ واحدٌ رباعي الأبعاد، متوالية الزمن الفراغية. وعليه، فإن المشاهدين الذين يتحرَّكون في الفراغ بسرعاتٍ مختلِفة يرون الأشياء بمنظورٍ مختلف؛ فلن يتفقوا — على سبيل المثال — بشأن طول عصًا يقيسونها أثناء عبورها بجوارهم. ولكن يمكن النظر إلى العصا على

أنها موجودة في أربعة أبعاد، وتتحرك «خلال» الزمن لتصنع سطحًا رباعي الأبعاد؛ مستطيلًا زائديًّا ارتفاعه هو طول العصا وعرضه هو المدة الزمنية التي قطعها. وتُقاس «مساحة» هذا المستطيل بوحدات الطول × الزمن، وستصبح هذه المساحة هي نفسَها لجميع المشاهدين الذين يقيسونها، حتى مع عدم اتفاقهم بشأن قيم الطول والزمن التي يقيسونها. وبالطريقةِ نفسِها، فإن الشغل (الطاقة × الزمن) هو مكافئ رباعي الأبعاد للطاقة، ويكون الشغل هو نفسه لكل المشاهدين حتى عندما يختلفون بشأن مقدار الطاقة والزمن المكوِّنَين للشغل. وهناك قانون للحفاظ على الشغل في النسبية الخاصة، ويحظى بنفس أهمية قانون الحفاظ على الطاقة تمامًا. ومن ثَم لم يبدُ ثابت بلانك غريبًا إلا لأنه اكتُشِف قبل النظرية النسبية.

وربما يؤكِّد ذلك على الطبيعة الشاملة للفيزياء. وعندما ننظر إلى المساهمات العلمية الثلاث الجليلة لأينشتاين المنشورة عام ١٩٠٥، نجد أن نظرية النسبية الخاصة تبدو مختلفةً للغاية عن المساهمتَين الأُخريين، في مجال الحركة البراونية والظاهرة الكهروضوئية. لكنها جميعًا تشكِّل وحدةً مترابطة في إطار الفيزياء النظرية، وعلى الرغم من الشهرة التي حازتها النظرية النسبية، فإن أعظم مساهمات أينشتاين العلمية كانت تتمثَّل في أبحاثه حول نظريةِ الكَمِّ التي انطلقت من أبحاث بلانك عن طريق الظاهرة الكهروضوئية.

يتمثَّل التطور الجذري الذي قدَّمته أبحاث بلانك لسنة ١٩٠٠ في أنها أظهرت قصور الفيزياء الكلاسيكية. ولا يهمُّ الكشفُ عن ماهية هذا القصور بالضبط. فمجرَّدُ حقيقةِ وجودِ ظواهرَ لا يمكن تفسيرُها فقط بالأفكارِ الكلاسيكيةِ المبنيةِ على أبحاث نيوتن، كان كافيًا للتبشير بعصرٍ جديدٍ في الفيزياء. ومع ذلك، كانت النسخة الأصلية من أبحاث بلانك، محدودةً على نحوٍ أكبرَ بكثير مما تبدو عليه غالبًا من منظور الروايات الحديثة. هناك مدرسة في أدب المغامرات ينجو فيها البطل بأعجوبة من مواقفَ حابسةٍ للأنفاس في نهاية كل حلقة، فيما يمكن إيجازه في العبارة: «وفجأةً، تحرَّر البطل.» ويمكن قراءة العديد من الكتب المبسَّطة التي تحدَّثت عن نشأة ميكانيكا الكَمِّ على أنها كتاب مغامرات يتحدَّث عن مواقفَ خارقةٍ للعادة. «وصلت الفيزياء الكلاسيكية في نهاية القرن التاسع عشر إلى طريقٍ مسدود. وفجأة، اخترع بلانك الكَمَّ، وتحرَّرت الفيزياء.» ولكن كان الأمر على العكس من ذلك تمامًا. فكل ما هنالك أن بلانك أشار إلى أن المذبذبات الكهربية داخل الذرات يمكن تحديدُ كَمِّها. وكان يعني بذلك أن هذه المذبذبات يمكنها فقط أن تبعث

بجِزَم من الطاقة ذات أحجامٍ معيَّنة؛ لأن هناك شيئًا بداخلها يمنعها من امتصاص أو إشعاع كميات الإشعاع الواقعة «بين تلك الأحجام».

يشبه هذا كثيرًا فكرةَ عملِ ماكينة الصرَّاف الآلي في البنك. فعندما أُدخِلُ بطاقة الصرَّاف الآلي تُخرِج لي الماكينة أيَّ مبلغٍ ماليٍّ أريده، بشرط أن يكون أحد مضاعفات ١٠ جنيهات إسترلينية. ولكن لا يمكنها إخراجُ المبالغِ المحصورةِ قيَمُها بين هذه المضاعفات (ولا تستطيع إخراجَ ما هو أقل من ١٠ جنيهات إسترلينية)، ولا يعني ذلك أن قيمَ المبالغِ المحصورة بين هذه المضاعفات مثل ١٢,٤٧ جنيهًا إسترلينيًّا غير موجودة. ومن ثَم فإن بلانك نفسَه لم يقُل إن الإشعاع يمكن تحديدُ كَمِّه، ويبدو أنه كان عليه دائمًا أن يكون متحفِّظًا تجاه الآثار الأعمق لنظريةِ الكَمِّ. في السنوات التالية، ومع تقدُّمِ نظريةِ الكَمِّ أسهم بلانك في العلمِ الذي أسَّسه، لكنه قضى معظم حياته العلمية محاولًا التوفيقَ بين الأفكار الجديدة والفيزياء الكلاسيكية. ولم يكن ذلك عدولًا عن رأيه، لكنَّ كلَّ ما هنالك أنه لم يدرِك قط، بأيِّ حال، إلى أيِّ مدًى كانت معادَلة الجسم الأسود بعيدةً عن الفيزياء الكلاسيكية؛ فقد توصَّل إلى المعادلة عن طريق الدمج بين الديناميكا الحرارية والديناميكا الكهربية، وكلتاهما من النظريات الكلاسيكية. وبدلًا من انتهاجِ نهجٍ آخرَ، كانت جهود بلانك لإيجادِ حلٍّ وسط بين أفكارِ الكَمِّ والنظريات الكلاسيكية، تمثِّل في الواقع حيودًا مدويًا، من وجهة نظره، عن الأفكارِ الكلاسيكية التي شبَّ عليها. غير أن معرفته الأساسية بالأفكارِ الكلاسيكية كانت دقيقةً ومتعمقة بالدرجة التي لم يكن مستغرَبًا معها أن يكون التقدُّم الحقيقي على يدِ جيلٍ جديد من الفيزيائيين الذين لم يتوطَّد موقفهم بعدُ والذين هم أقلُّ التزامًا بالأفكار القديمة، والذين اشتعل حماسهم بالاكتشافات الجديدة في الإشعاع الذري، وكانوا يبحثون عن إجاباتٍ جديدة للأسئلة القديمة والجديدة على حدٍّ سواء.

أينشتاين والضوء والكَمُّ

كان أينشتاين يبلغ من العمر واحدًا وعشرين عامًا في مارس ١٩٠٠. وقد تقلَّد وظيفته الشهيرة في مكتب براءات الاختراع السويسري في صيف سنة ١٩٠٢، وقد كرَّس معظم اهتماماته العلمية في تلك السنوات الأولى من القرن العشرين للمسائل المتعلقة بالديناميكا الحرارية والميكانيكا الإحصائية. وكانت أولى المقالات العلمية المنشورة له تقليديةً في أسلوبها وفي المسائل التي عالجتها، على غرار المقالات المنشورة للجيل السابق بمَنْ فيهم بلانك. ولكن نجد أنه في أول بحث نشره أينشتاين وأشار فيه إلى أفكار بلانك حول طيف

الجسم الأسود (نُشر سنة ١٩٠٤)، شقَّ أينشتاين طريقًا جديدًا ووضع أسلوبًا مبتكرًا لحل المفارقات الفيزيائية خاصًّا به وحدَه. ويصف مارتن كلاين كيف أن أينشتاين كان أول شخص يأخذ الآثار الفيزيائية لأبحاث بلانك على محمل الجِد، ويتعامل معها على أنها أكثر من مجردِ حيلةٍ رياضية،[3] وفي غضونِ عامٍ واحد أدَّى قبولُ تلك المعادلات بوصفها لها أساس في الواقع الفيزيائي إلى وجهة نظر جديدة ومثيرة، وهي إعادة إحياء النظرية الجسيمية للضوء.

كانت نقطةُ الانطلاق الأخرى لأبحاثه المنشورة سنة ١٩٠٤، وكذلك أبحاث بلانك، هي دراسةَ الظاهرة الكهروضوئية على يد فيليب لينارد وجيه جيه طومسون، اللذين عملا كلٌّ منهما على نحوٍ مستقل عن الآخر، في نهاية القرن التاسع عشر. حصل لينارد، المولود سنة ١٨٦٢ في ذلك الجزء من المجر الذي أصبح الآن جمهورية التشيك، على جائزة نوبل في الفيزياء سنة ١٩٠٥ عن أبحاثه حول أشعة الكاثود. وقد أثبت سنة ١٨٩٩، من خلال التجارب التي أجراها في هذه الأبحاث، أن أشعة الكاثود (الإلكترونات) يمكن أن تتوَّلد بإسقاط ضوء على سطح فلز في الفراغ. وتتسبَّب طاقة الضوء بطريقة أو بأخرى في جعل الإلكترونات تقفز خارج الفلز.

تضمَّنت تجارب لينارد استخدامَ أشعةِ ضوءٍ أحادي اللون (ضوء متجانس)، بمعنى أن كل موجات الضوء لها التردد نفسه. وقد فحص الكيفية التي تؤثِّر بها شدة الضوء على الطريقة التي تنطلق بها الإلكترونات خارج الفلز، وتوصَّل إلى نتيجةٍ مفاجئة. باستخدامِ ضوءٍ أشدَّ سطوعًا (حرَّك في الواقع مصدر الضوء بحيث يقترب أكثر من سطح الفلز ليحدث التأثير نفسه) تسقط طاقةٌ أكثر على كل سنتيمترٍ مربَّع من سطح الفلز. وإذا امتص الإلكترون طاقةً أكثر، فإنه ينطلق خارجًا من الفلز بمعدلٍ أسرع، وينفصل عنها بسرعةٍ أكبر. غير أن لينارد قد اكتشف أنه ما دام الطول الموجي للضوء ثابتًا، فإن كل الإلكترونات المقذوفة تنطلق بالسرعةِ نفسِها. وبتقريب مصدر الضوء من الفلز ينطلق عددٌ أكبر من الإلكترونات، غير أن كل إلكترون منها سينطلق بالسرعةِ نفسِها التي تنطلق بها الإلكترونات المتولِّدة عن إسقاطِ شعاعِ ضوءٍ أضعفَ من اللون نفسه. ومن جهةٍ أخرى، تحرَّكت الإلكترونات بسرعةٍ أكبرَ عندما استخدم شعاع ضوء ذا تردٍد أعلى — الأشعة فوق البنفسجية مثلًا — بدلًا من الأشعة الزرقاء أو الحمراء.

وتوجد طريقةٌ بسيطة جدًّا لشرح ذلك، بشرط أن تكون مستعدًّا للتخلي عن أفكار الفيزياء الكلاسيكية المتأصِّلة، وأن تأخذ معادلات بلانك على أنها ذات مغزًى فيزيائي.

وتتضح أهمية هذه الشروط من حقيقةِ أن أحدًا لم يتخذ هذه الخطوة البسيطة فيما يبدو على مدى السنوات الخمس التي أعقبت أبحاث لينارد الأولى على الظاهرة الكهروضوئية وتقديم بلانك مفهومَ الكَمِّ. وفي الواقع، كان كلُّ ما فعله أينشتاين هو تطبيق المعادلة $E = h\nu$ على الإشعاع الكهرومغناطيسي، بدلًا من تطبيقها على المذبذبات الصغرى داخل الذرة. قال أينشتاين إن الضوء ليس موجةً مستمرة — كما كان يعتقد العلماء على مدى مائة سنة — ولكنه يجيء بدلًا من ذلك في صورةِ حِزَمٍ محدَّدة أو كموم. فكلُّ الضوءِ ذي التردُّد المحدَّد ν؛ أي الذي له لونٌ محدَّد، يجيء في صورة حِزَم لها الطاقة نفسها E. وفي كل مرة يصطدم فيها واحد من هذه الكموم الضوئية بإلكترون، تمنحه المقدارَ نفسَه من الطاقة؛ ومن ثَم المقدار نفسه من السرعة. ويعني الضوء الأكثر شدة أن هناك المزيد من الكموم الضوئية (وندعوها اليوم فوتونات) لها جميعًا الطاقة نفسها، غير أن تغيير لون الضوء يغيِّر من تردُّدها؛ ومن ثَم يغيِّر مقدار الطاقة التي يحملها كلُّ فوتون.

كان ذلك هو البحث الذي حصل بموجبه أينشتاين في النهاية على جائزة نوبل سنة ١٩٢١. ومرةً أخرى، كان لا بد للإنجاز النظري أن ينتظرَ الاعترافَ الكامل به. لم تحظَ فكرة الفوتونات بقبولٍ فوري، ومع أن تجارب لينارد جاءت متَّفقة مع النظرية بشكلٍ عام، فإن الأمر قد استغرق أكثرَ من عَقد للتنبؤ الدقيق بالعلاقة بين سرعة الإلكترونات والطول الموجي للضوء واختبارها وإثباتها. وتحقَّق ذلك على يدِ عالِم الفيزياء التجريبية الأمريكي روبرت ميليكان، الذي أرسى خلال هذه الفترة طريقةً في غاية الدقة لقياس قيمة h، ثابت بلانك. وقد حصل ميليكان بدوره سنة ١٩٢٣ على جائزة نوبل في الفيزياء عن هذه الأبحاث ولدقَّة قياساته لمقدار شحنة الإلكترون.

وهكذا قضى أينشتاين عامًا حافلًا للغاية. فهناك البحثُ الذي فاز عنه بجائزة نوبل، وبحثٌ آخرُ أثبت فيه بشكلٍ قاطعٍ حقيقةَ وجود الذرات، وبحثٌ ثالث شهِد ميلاد النظرية التي كانت من أكثرِ ما اشتُهر به أينشتاين؛ وهي النسبية. وفي الوقتِ نفسِه من عام ١٩٠٥، وعلى سبيل المصادفة تقريبًا، كان أينشتاين على وشك استكمال جزءٍ آخر من أبحاثه بخصوص حجم الجزيئات، وهو ما قدَّمه في شكل أطروحةٍ لنيل الدكتوراه من جامعة زيورخ. وقد مُنِحَ درجةَ الدكتوراه نفسها في يناير ١٩٠٦. ومع أن درجة الدكتوراه لم تكن تمثِّل نقطة انطلاق لحياةٍ حافلة بالبحث النشط على غرار ما تمثِّله الآن، فلا يزال من اللافت للنظر أن الأبحاث الثلاثة الكبرى لعام ١٩٠٥ منشورةٌ لرجلٍ لا يسعه التوقيع في ذلك الوقت إلا بلقبِ مستر ألبرت أينشتاين.

في السنوات القليلة اللاحقة، واصل أينشتاين العملَ على إدخال مفهومِ الكَمِّ لبلانك في مجالاتٍ أخرى من الفيزياء. وقد وجد أن الفكرةَ تفسِّر الإشكاليات الراسخة منذ زمنٍ بعيد فيما يتعلَّق بالحرارة النوعية (الحرارة النوعية لمادةٍ ما هي كمية الحرارة اللازمة لرفعِ درجةِ حرارةِ كميةٍ ثابتةٍ من المادة بمقدارِ درجةٍ واحدةٍ مختارة، وهي تعتمد على طريقة تذبذب الذرات واهتزازها داخل المادة، وقد اتضح أن هذه الذبذبات يمكن تمثيلها كَمِّيًّا). ويُعدُّ هذا الجزء من أبحاث أينشتاين هو الأقل إثارةً، وعادةً ما تغفُل عنه الكتاباتُ التي تتناول أبحاث أينشتاين، إلا أن نظريةَ الكَمِّ للمادة قد حظيت بالقبول أسرعَ كثيرًا من نظريةِ الكَمِّ لأينشتاين في الإشعاع، وبدأت تُقنِع الكثير من الفيزيائيين من أتباع المدرسة القديمة بأنه يجب أخذُ أفكارِ الكَمِّ على محمل الجِد. نقَّح أينشتاين أفكارَه حول الإشعاعِ الكَمِّي على مدى السنوات التالية وحتى سنة ١٩١١؛ حيث أثبت أن التركيبَ الكَمِّي للضوء نتيجةٌ حتميةٌ لمعادلة بلانك، وأشار إلى أن المجتمع العلمي لا يزال غيرَ مهيَّأ بعدُ، حتى إن السبيل إلى فهمٍ أفضلَ للضوء سيتضمَّن الدمج بين نظريتَي الموجات والجسيمات اللتين كانت المنافسة بينهما تدور على أشدِّها منذ القرن السابع عشر. وبحلول عام ١٩١١، تحوَّلت أفكاره إلى أمورٍ أخرى. فقد أقنع نفسه بحقيقةِ وجودِ الكَمِّ، ولم يكن يهمه سوى أفكاره الشخصية. فقد انصبَّ اهتمامه الجديد على مسألة الجاذبية، وعلى مدى السنوات الخمس التالية حتى سنة ١٩١٦ وضع نظريته حول النسبية العامة، وهي أعظم أعماله على الإطلاق. وقد استغرق الأمر حتى سنة ١٩٢٣ لإثبات حقيقة الطبيعة الكَمِّية للضوء بما لا يدَع مجالًا للشك، وقد أدَّى ذلك بدوره إلى جدالٍ جديد حول الجسيمات والموجات، وقد ساعد ذلك في تغيير نظريةِ الكَمِّ من هيئةٍ لأخرى، والإعلان عن النسخة الحديثة من النظرية، وهي ميكانيكا الكَمِّ. والكثيرُ من تلك الأفكارِ كان في محلِّه. جاء أول ازدهارٍ لنظريةِ الكَمِّ في العَقد الذي انصرف فيه أينشتاين عن الموضوعِ وركَّز على أمورٍ أخرى. وكان هذا الازدهار نتيجةَ ما حدث من دمجٍ بين أفكاره ونموذج رذرفورد للذرة، وكان في جزءٍ كبيرٍ منه نتاجَ أبحاثِ عالِمٍ دانماركي يُدعى نيلز بور الذي كان يعمل مع رذرفورد في مانشستر. وبعد أن وضع بور النموذجَ الخاص به للذرة، لم يَعُد أحدٌ يستطيع التشكيك في قيمة نظريةِ الكَمِّ باعتبارها تُقدِّم وصفًا للعالم الفيزيائي في المستوى المتناهي الصغر.

هوامش

(1) Quoted by Mehra and Rechenberg, volume 1.

(2) See *Physics and Philosophy*, page 35.

(3) See Klein's contribution to *Some Strangeness in the Proportion*, edited by Harry Woolf. In the same volume, Thomas Kuhn, of MIT, goes even further than most authorities in arguing that Planck "had no conception of a discrete energy spectrum when he presented the first derivations of his blackbody distribution law" and that Einstein was the first to appreciate "the essential role of quantization in blackbody theory". Kuhn says that "it is Einstein rather than Planck who first quantized the Planck oscillator". That debate we can leave to the academics; but there is no doubt that Einstein's contributions were crucial to the development of quantum theory.

الفصل الرابع

الذرة لدى بور

بحلول عام ١٩١٢، كانت قِطَع البازل الذري جاهزةً للتركيب بعضها مع بعض. فقد أثبت أينشتاين صحةَ فكرةِ الكَمِّ على نطاقٍ واسع، وأدخل فكرة الفوتون مع أنها لم تكن مقبولةً بشكلٍ عام بعدُ. وبتوسيع نطاق التشبيه الخاص بماكينة الصرف الآلي، فإن ما قاله أينشتاين هو أن الطاقة تأتي فقط في صورةِ حِزمٍ ذات مقدارٍ محدَّد؛ فالصراف الآلي يتعامل فقط بوحدات من مضاعفات ١٠ جنيهاتٍ إسترلينية لأن هذه هي أصغر فئات العملة الموجودة، وليس لأنه أمرٌ يخضع لهوى الشخص الذي برمجَ الآلة. قدَّم رذرفورد صورةً جديدة للذرة؛ حيث توجد لها نواةٌ مركزيةٌ صغيرة تحيط بها سحابة من الإلكترونات، وإن كانت هذه الفكرة لم تحظَ بعدُ بالدعم العام اللازم لها. ولكن، لم يكن من الممكن ببساطة لذرة رذرفورد أن تكون مستقِرةً طبقًا للقوانين الكلاسيكية للديناميكا الكهربية. وكان الحل هو استخدام قوانين الكَمِّ لوصف سلوك الإلكترونات في الذرة. ومرةً أخرى، جاء التقدُّم المفاجئ على يدِ باحثٍ شابٍّ انتهج أسلوبًا جديدًا ومبتكَرًا في التعامل مع المشكلة، وهو موضوع سنتطرق إليه باستمرار خلال سرد قصة تطور نظريةِ الكَمِّ.

كان نيلز بور فيزيائيًّا دانماركيًّا قد أكمل رسالة الدكتوراه في صيف ١٩١١ وتوجَّه إلى كامبريدج في سبتمبر من العامِ نفسِه ليعمل مع جيه طومسون في مختبر كافنديش. كان باحثًا ناشئًا وخجولًا ويتحدَّث الإنجليزيةَ بطريقةٍ غيرِ سليمة؛ ومن ثَمَّ وجد أن من الصعب عليه إيجادَ موقعٍ ملائمٍ في كامبريدج. ولكن أثناء زيارته مانشستر التقى برذرفورد ووجده شخصًا يمكن تبادلُ الحديث معه بسهولة، كما أنه مهتمٌّ ببور وأبحاثه. ولذا، انتقل بور في مارس ١٩١٢ إلى مانشستر ليبدأ العمل ضمن فريق رذرفورد، مُركِّزًا أبحاثه على مسألة تركيب الذرة.[1] وبعد ستة أشهر، عاد بور إلى كوبنهاجن، ولكن لفترةٍ قصيرة، وظلَّ مرتبطًا بفريق رذرفورد في مانشستر حتى سنة ١٩١٦.

الإلكترونات المتنقِّلة

كان بور صاحبَ عبقريةٍ فَذَّة، وهو ما كان مطلوبًا بالضبط لإحراز التقدُّم في الفيزياء الذرية على مدى السنوات العشر إلى السنوات الخمس عشرة التالية. لم يكن بور يهتمُّ بشرح كل التفاصيل في نظريةٍ واحدةٍ مكتمِلة، لكنه كان على استعدادٍ تامٍّ للتوفيق بين الأفكار المختلِفة لوضع «نموذج» تخيُّلي يتَّفق ولو على نحوٍ تقريبي مع مشاهدات الذرات الحقيقية. وبمجرَّد أن تكوَّنت لديه فكرةٌ تقريبية عما يجري، استطاع التلاعب بها بتركيب الأجزاء معًا على نحوٍ أفضل، والعمل بذلك على إعطاءِ صورةٍ أكثرَ اكتمالًا. وعليه، فقد تناوَل بور صورةَ الذرة على أنها مجموعةٌ شمسيةٌ مصغَّرة، تتحرَّك فيها الإلكترونات في مدارات تبعًا للقوانين الكلاسيكية للميكانيكا والكهرومغناطيسية، وقال إن الإلكترونات لا يمكنها أن تغادرَ تلك المدارات إلى الداخل، بما يجعلها تطلِق إشعاعًا أثناء ذلك؛ لأنه مسموح لها فقط بإطلاقِ أجزاءٍ كاملةٍ من الطاقة — كموم كاملة — وليس إشعاعًا متصلًا كما تستوجب النظرية الكلاسيكية. ويقابل المداراتِ «المستقرة» للإلكترونات كمياتٌ ثابتةٌ معيَّنة من الطاقة، كلٌّ منها هو أحد مضاعفاتِ كَمٍّ أساسي، ولا توجد مداراتٌ بينية؛ لأنها بذلك ستتطلَّب كمياتٍ كسريةً من الطاقة. واسترسالًا مع تشبيه المجموعة الشمسية، فإن ذلك مِثلُ القولِ بأنَّ مدار الأرض حول الشمس مستقِرٌّ، وكذلك مدار المريخ، وأنه لا يوجد مدارٌ آخرُ مستقِرٌّ في أيِّ موضعٍ بينهما.

لم يكن ما فعله بور يصلُح للتنفيذ. تقوم فكرةُ المدار بأكملها على الفيزياء الكلاسيكية، أما فكرةُ حالات الإلكترون التي تقابل كمياتٍ محدَّدة من الطاقة — مستويات الطاقة، كما أصبحت تُسمَّى — فتأتي من نظريةِ الكَمِّ. ولم يكن لنموذج الذرة، الذي يجمع بين أجزاءٍ من النظرية الكلاسيكية وأجزاءٍ من نظريةِ الكَمِّ، أن يقدِّم منظورًا حقيقيًّا عمَّا يجعل الذرات تؤدي عملها جيدًا، لكنه في الواقع قدَّم لبور نموذجًا عمليًّا بما يكفي للمضي قُدُمًا. وقد اتضح فيما بعدُ أن النموذج الذي قدَّمه كان يجانبه الصواب من كل النواحي تقريبًا، بيْد أنه قدَّم نموذجًا انتقاليًّا لوضعِ نظريةِ الكَمِّ الحقيقيةِ عن الذرة؛ ومن ثَم كان نموذجًا انتقاليًّا فائقَ القيمة. ولسوء الحظ، ظلَّ هذا النموذج متداولًا ليس فقط في الإصدارات العلمية المبسَّطة ولكن أيضًا في كثيرٍ من الكتب المدرسية والجامعية، وذلك بسببِ مزْجِه الرائع والبسيط بين أفكارِ الكَمِّ والأفكار الكلاسيكية، وبسبب التشبيه الجذاب للذرة على أنها مجموعةٌ شمسيةٌ مصغَّرة. وإذا كنتَ قد درستَ أيَّ شيء عن الذرة في مرحلة الدراسة،

فإنني على يقين من دراستك لنموذج بور، سواء أكان ذلك تحت هذا الاسم أم لا. ولن أطلب منك إغفالَ كلِّ ما عرفته، لكن عليك أن تهيئ نفسَك للاقتناع بأن ذلك لم يكن الحقيقة الكاملة. وينبغي أن تحاول طرحَ فكرةِ أن الإلكترونات «كواكب» صغيرة تدور حول النواة من ذهنك؛ فقد كانت هذه هي فكرةَ بور في البداية، لكنها في الواقع فكرةٌ مضلِّلة. فالإلكترون ببساطة هو شيءٌ ما يقبع خارج النواة ويمتلك كميةً معيَّنةً من الطاقة وبعض الخصائص الأخرى. ويتحرَّك بطريقةٍ غامضة كما سنرى.

كان النجاح الباهر الذي حقَّقته أبحاثُ بور في وقتٍ مبكِّر، سنة ١٩١٣، يرجع إلى تفسيره الموفَّق لِطيْفِ الضوء المنبعث من الهيدروجين، وهي أبسط الذرات. يَرجِع علمُ التحليل الطيفي إلى السنوات الأولى من القرن التاسع عشر، عندما اكتشف ويليام ولاستون خطوطًا معتمة في طيفِ الضوء المنبعث من الشمس، غير أن اكتشافه هذا لم يتبلور إلا مع أبحاث بور فقط ليصبحَ أداةً قائمةً بذاتها لسبْرِ أغوار تركيب الذرة. وعلى غرار ما فعله بور من مزجٍ بين النظرية الكلاسيكية ونظريةِ الكَمِّ لإحراز التقدُّم الذي بلغه، علينا أن نَرجع خطوةً إلى الوراء انطلاقًا من أفكارِ أينشتاين حول الكموم الضوئية لفهْم فكرةِ علم التحليل الطيفي وآلية عمله. ومن غير المنطقي في هذا النوع من الأبحاث أن نفكِّر في الضوء إلا على أنه موجاتٌ كهرومغناطيسية.[2]

يتكوَّن الضوء الأبيض، كما أثبت نيوتن، من كل ألوان قوسِ قُزَح، وهي الطيف. ويقابل كلَّ لونٍ طولٌ موجيٌّ مختلِفٌ للضوء، وباستخدامِ منشورٍ زجاجي لتحليل الضوء الأبيض إلى الألوانِ المكوِّنة له نكون في الواقع بصددِ تحليلِ الطيف بحيث تصطفُّ الموجات ذات الترددُات المختلِفة بعضها بجوار بعض على شاشةٍ أو لوحٍ فوتوغرافي. يقع كلٌّ من الضوء الأزرق والضوء البنفسجي، وكلاهما ذو طولٍ موجيٍّ قصير، على أحدِ طرفَي الطيف الضوئي، ويقع الضوء الأحمر ذو الطول الموجي الطويل على الطرف الآخر، إلا أن الطيف يمتد على كلا الطرفَين إلى ما أبعد من نطاق الألوان المرئية لعيوننا. وإذا حلَّلنا ضوء الشمس بهذه الطريقة فسيتميَّز الطيف الناتج بوجودِ خطوطٍ معتمة وواضحة للغاية في مواضعَ محدَّدةٍ بدقةٍ في هذا الطيف، وهذه الخطوط تقابل ترددات محددةً بدقَّة. ودون الإلمام بكيفية تكوُّن هذه الخطوط، أثبت باحثون — من أمثال جوزيف فراونهوفر، وروبرت بنزن (الذي خُلِّد اسمُه بإطلاقه على المَوقِد المعروف المستخدَم في المختبرات)، وجوستاف كيرشوف في القرن التاسع عشر — بالتجاربِ أن كلَّ عنصر ينتج فئةً خاصة به من خطوط الطيف. فعند تسخين عنصر (مثل الصوديوم) في لهبِ مَوقِد بنزن، ينتج

عن ذلك ضوءٌ ذو لونٍ مميَّز (لون أصفر في هذه الحالة)، وهو ينتج عن انبعاثٍ قوي للإشعاع على شكل خط أو عدة خطوط شديدة التوهُّج في جزءٍ معيَّن من الطيف. وعند مرور الضوء الأبيض خلال سائل أو غاز يحتوي على العنصرِ نفسِه، حتى لو كان العنصر متحِدًا مع عناصرَ أخرى في مركَّبٍ كيميائي، فإن طيف الضوء يُظهِر خطوطَ امتصاصٍ معتمة، مثل تلك الموجودة في الضوء المنبعث من الشمس، وعند الترددات نفسِها المميزة لهذا العنصر.

ويُفسِّر ذلك وجودَ الخطوط المعتمة في طيفِ الشمس. ولا بد أن تكون هذه الخطوط قد نتجت عن سُحبٍ أكثرَ برودةً من المواد الموجودة في الغلاف الجوي للشمس؛ حيث تمتص الإشعاع عند الترددات المميزة من الضوء العابر خلالها من سطحِ الشمسِ الأكثرِ سخونةً بكثير. وقد قدَّمت هذه التقنية للكيميائيين وسيلةً مفيدةً لتحديدِ العناصر الموجودة في أي مركَّب. إذا ألقيتَ بملح الطعام على النار مثلًا، فإن اللهب سيتوهَّج باللون الأصفر المميز لعنصر الصوديوم (وهو اللون المألوف أيضًا لمصابيح الصوديوم الصفراء في الشوارع حاليًّا). وفي المختبر، يمكن مشاهدة الطيف المميز عن طريقِ غمسِ سلكٍ في المادة موضع الاختبار ثم تعريض السلك للهب مَوقِد بنزن. يعطي كل عنصر النسق الخاص به من خطوط الطيف، وفي كل حالةٍ يظل النسق واحدًا على الرغم من تغيُّر شدته، حتى لو تغيَّرت درجةُ حرارة اللهب. ويتَّضح من حِدة خطوط الطيف ووضوحها أن كل ذرة من ذرات العنصر تبعث الضوء أو تمتصُّه عند التردد نفسه بالضبط، دون حيود أيِّ ذرة منها. وبالمقارنة مع اختبارات اللهب، تمكَّن علماء التحليل الطيفي من تحديد معظم الخطوط في طيف ضوء الشمس، وفسَّروها بأنها راجعةٌ إلى وجود العناصر المعروفة على الأرض. وفي خطواتٍ عكسيةٍ لهذه الطريقةِ اكتشف عالِم الفلك الإنجليزي نورمان لوكير (مؤسِّس مجلة «نيتشر» العلمية) خطوطًا في طيف الشمس لم يتمكَّن من تفسيرها من حيث كونها طيفًا؛ أي عنصرًا معروفًا، وقرَّر أنها لا بد أن ترجع إلى عنصرٍ لم يكن معروفًا من قبلُ، وأسماه عنصر الهيليوم. وبعد فترةٍ وجيزة، اكتُشِف الهيليوم على الأرض، وثبتَ أن له نفسَ الطيف بالضبط الذي يتناسب مع خطوط طيف الشمس.

وبمساعدةِ علمِ التحليل الطيفي، يمكن لعلماء الفلك رصدُ المجرَّات والنجوم البعيدة لمعرفةِ الموادِّ المكوِّنة لها. ويمكن لعلماء الفيزياء الذرية حاليًّا اختبارُ التركيب الداخلي للذرة باستخدام الأدوات نفسِها.

يتميَّز طيف الهيدروجين بأنه بسيط للغاية، وطبقًا لما نعرفه الآن فالأمر يُعزى إلى أن الهيدروجين هو أبسط العناصر، ولا تحتوي ذرته إلا على بروتون موجب الشحنة هو النواة، وإلكترون واحد سالب الشحنة مرتبِط معها. وتسمَّى خطوط الطيف التي تمثل البصمة المتفرِّدة للهيدروجين باسم خطوط بالمر، على اسم يوهان بالمر، وهو معلِّمٌ سويسري وضع معادلةً تصفُ هذا النسق سنة ١٨٨٥، وهو العام الذي تصادف أن يشهد ميلاد نيلز بور. تربط معادلةُ بالمر ترددات الطيف التي تظهر عندها خطوط الهيدروجين بعضها ببعض. فبدءًا من تردُّد أول خطوط الهيدروجين، في الجزء الأحمر من الطيف، تعطي معادلة بالمر تردُّد خط الهيدروجين التالي في الجزء الأخضر من الطيف. وبدءًا من الخط الأخضر، تُطبَّق المعادلةُ نفسُها على هذا التردُّد لتعطي تردُّد الخط التالي في الجزء البنفسجي، وهكذا.[3] ولم يكن بالمر عندما صاغ معادلتَه يعرف سوى الخطوط الأربعة للهيدروجين الموجودة في الطيف المرئي، لكنَّ خطوطًا أخرى اكتُشِفت وتوافقت تمامًا مع المعادلة، وعندما حُدِّدَت خطوطٌ أكثر في طيف الهيدروجين في المنطقة تحت الحمراء وفوق البنفسجية، فإنها توافقت هي الأخرى مع هذه العلاقة العددية البسيطة. ومن الواضح أن معادلة بالمر كانت تقدِّم شيئًا ذا قيمةٍ عن تركيب ذرة الهيدروجين، لكن ما هو؟

كانت معادلة بالمر أمرًا معروفًا بين الفيزيائيين، وجزءًا من مقرَّر الفيزياء الجامعي، عندما ظهر بور على الساحة. لكن ذلك كان جزءًا من مجموعةٍ كبيرةٍ من البيانات المعقَّدة عن الأطياف، ولم يكن بور من علماء التحليل الطيفي. وعندما بدأ بور العملَ على فكِّ طلاسم تركيب ذرة الهيدروجين، لم يفكِّر على الفور في سلسلة خطوط بالمر بوصفها دليلًا واضحًا لحل هذا اللغز وسِرْ أغواره، ولكن عندما أشار أحد زملائه المختصين في علم التحليل الطيفي إلى مدى البساطة التي تتَّسم بها معادلة بالمر في الواقع (بغض النظر عن التعقيدات في أطياف الذرات الأخرى)، وعندها فطَن بور سريعًا إلى قيمةِ هذه المعادلة. في هذا الوقت، في أوائل عام ١٩١٣، كان بور قد اقتنع بالفعل بأن جزءًا من حلِّ اللغز يكمُن في إدخال ثابت بلانك h في المعادلات التي تصف الذرة. ولم يكن لذرَّة رذرفورد إلا نوعان فقط من الأعداد الأساسية المضمَّنة في تركيبها وهما: شحنة الإلكترون e وكتلة الجسيمات الداخلة في تركيب الذرة. ومهما حاولت التلاعبَ بهذه الأرقام، لا يمكنك الحصولُ على عددٍ له أبعاد طول من هذا الخليط من الكتلة والشحنة؛ ومن ثَم لم يكن لنموذج رذرفور وحدةٌ «مألوفة» للحجم. لكن بإضافة وحدة شغل، مثل ثابت بلانك h، إلى المعادلة، يصبح من الممكن التوصُّل إلى عددٍ له أبعادٌ خاصة بالطول، ويمكن النظر إليه

بصورةٍ مبدئية وتقريبية على أنه يعبِّر عن شيءٍ بخصوص حجم الذرة. التعبير h^2/me^2 يكافئ عدديًّا طولًا ما، حوالي ٢٠ × ١٠$^{-٨}$ سم، وهو يقترب كثيرًا من العدد المطلوب للتوافق مع خصائص الذرات، المستنتجة من تجارب التشتُّت والدراسات الأخرى. كان من الواضح لبور أن h ينتمي إلى نظرية الذرات. وقد أوضحت له سلسلة بالمر أين ينتمي هذا الثابت.

كيف يمكن لذرةٍ ما أن تُنتِج خطًّا شديدَ الوضوح من خطوط الطيف؟ هذا يكون إما بإطلاق أو امتصاص طاقة لها تردُّدٌ دقيق للغاية، ν. وتم ربط الطاقة بالتردد عن طريق ثابت بلانك ($E = h\nu$)، فإذا أُطلقَ إلكترون في ذرةٍ ما بكمٍّ من الطاقة $h\nu$، فإن طاقة هذا الإلكترون لا بد أن تتغيَّر بمقدارٍ مساوٍ تمامًا لمقدارِ الطاقة المقابل E. وأشار بور إلى أن الإلكترونات تظل مستقرةً في مكانها «في مدار» حول النواة لأنها لا تستطيع أن تشعَّ طاقة باستمرار، لكن من الجائز طبقًا لهذه الصورة أن تكون قادرةً على إشعاع (أو امتصاص) كوانتم كاملٍ من الطاقة — فوتون واحد — لتقفز من مستوى طاقةٍ (مدار، حسب الصورة القديمة) إلى مستوى طاقةٍ آخر. وفي الواقع، تُبيِّن هذه الفكرة التي تبدو بسيطة تعارضًا آخرَ مع الأفكار الكلاسيكية. إنها كما لو أن كوكب المريخ قد اختفى من مداره وظهر في مدار الأرض لحظيًّا، بينما يبعث في الفضاء بدفعة من الطاقة (إشعاع الجاذبية في هذه الحالة). ويمكنك أن تدرك في الحال كيف أن فكرة تشبيه الذرة بالمجموعة الشمسية كانت عقيمة في تفسيرِ ما يحدث، وكيف أن الأمر سيكون أفضلَ كثيرًا لو اعتبرت أن الإلكترونات موجودة ببساطة في حالاتٍ مختلفة، تقابل مستوياتٍ مختلفة من الطاقة، داخل الذرة.

ويمكن أن يحدث الانتقال من حالةٍ إلى أخرى في الاتجاهَين، إلى أعلى سُلَّم الطاقة أو إلى أسفله. فإذا امتصت ذرةٌ ما الضوء، فإن الكوانتم $h\nu$ يستخدم لنقل الإلكترون إلى مستوًى أعلى من الطاقة (إلى درجةٍ أعلى على السُّلم)، وإذا عاد الإلكترون إلى حالته الأصلية بالضبط، فسوف يشعُّ المقدارَ نفسَه من الطاقة $h\nu$. ويمكن بطبيعة الحال كتابة الثابت الغامض ٣٦,٤٥٦ × ١٠$^{-٥}$ في معادلة بالمر بمدلول ثابت بلانك، ويعني ذلك أن بور تمكَّن من حساب مستويات الطاقة الممكنة «المسموح بها» للإلكترون الواحد في ذرة الهيدروجين، ومن الممكن الآن تفسيرُ التردد المقيس لخطوط الطيف على أنه توضيح فرق الطاقة بين المستويات المختلفة.[4]

تفسير الهيدروجين

بعد أن ناقش بور أبحاثَه مع رذرفورد نشر نظريته عن الذرة في سلسلةٍ من الأوراق البحثية سنة ١٩١٣. توافقت النظرية على نحوٍ جيد للغاية مع الهيدروجين، وبدا أن من الممكن تطويرها بحيث تُستخدم أيضًا في تفسير أطياف الذرات الأكثر تعقيدًا. وفي سبتمبر، حضر بور الاجتماع السنوي الثالث والثمانين للجمعية البريطانية لتقدُّم العلوم، وشرح أبحاثه للحضور الذين كان من بينهم الكثيرُ من علماء الفيزياء الذرية البارزين في ذلك الوقت. بوجهٍ عام، لاقى تقريره قبولًا لدى الحاضرين، ووصفه السير جيمس جينس بأنه رائعٌ ومقنع ويحمل فكرة. وظلَّ جيه طومسون ضمن الذين لم يقتنعوا، ولكن بفضل هذا الاجتماعِ سمع الجميعُ ببور وأبحاثه عن الذرة، حتى العلماء الذين لم يقتنعوا بالحجج التي ساقها.

بعد ثلاثة عشر عامًا من محاولة بلانك اليائسة في إدخالِ الكَمِّ في نظرية الضوء، أدخل بور الكَمَّ في نظرية الذرة. غير أن الأمر قد استغرق ثلاثة عشر عامًا أخرى لوضعِ نظريةٍ حقيقية عن الكَمِّ. كان التقدُّم في ذلك الوقت يحدث بوتيرةٍ بطيئة على نحوٍ مزعج؛ فكل خطوة للخلف تقابلها خطوتان للأمام، وفي بعض الأحيان خطوتان للخلف لكل خطوة بدت أنها تسير في الاتجاه الصحيح. كانت ذرة بور عبارةً عن مزيج. فقد مزجت هذه الذرة بين الأفكار الكمومية وأفكار الفيزياء الكلاسيكية، مستخدمةً كل مزيج بدا ضروريًّا لمعالجة أي تعارضات والحفاظ على سلامة النموذج واستمراريته. وقد سمح ذلك بعددٍ من خطوط الطيف يفوق كثيرًا ما يمكن مشاهدته في الضوء المنبعث من الذرات المختلفة، ولا بد من تطبيقِ قواعدَ صارمةٍ حتى يمكن القول إن بعض الانتقالات بين مستويات الطاقة المختلفة داخل الذرة «غير مسموح بها». وحُدِّدت خصائصُ جديدة للذرة — الأعداد الكمومية — لتتوافق خصيصى مع المشاهدات، دون أن يكون لها أيُّ أساسٍ نظري مضمون يفسِّر السببَ في ضرورة الاستعانة بهذه الأعداد الكمومية، أو السبب في عدم السماح بحدوث بعض الانتقالات. في خضم ذلك كله، عمَّت الفوضى العالَم الأوروبي باندلاع الحرب العالمية الأولى، في السنة التي تلت إعلان بور لنموذجه الأول للذرة.

ومثل أي جانبٍ آخرَ من جوانب الحياة، لم يكن مقدَّرًا للعلم أن يظل كما هو بعد سنة ١٩١٤؛ فقد حالت الحرب دون سهولة انتقال الباحثين من بلدٍ لآخر، بل إنه منذ اندلاع الحرب العالمية الأولى وجد بعض العلماء في بعض البلدان صعوبة في الاتصال بكل زملائهم في مختلف أنحاء العالم. كما كان للحرب تأثيرٌ مباشر في البحث العلمي داخل

المراكز الكبرى حيث كان الفيزيائيون يُحرزون الكثيرَ من التقدُّم في السنوات الأولى من القرن العشرين. فقد ترك العلماء الشبان في الدول المشاركة في الحرب مَعاملَهم، وذهبوا إلى الحرب تاركين وراءهم الأساتذةَ الأكبرَ سنًّا، مثل رذرفورد، ليواصلوا العمل على قدرِ استطاعتهم، وقد لقي الكثيرون من هؤلاء الشبان حتفَهم أثناء القتال، وهم الجيل الذي كان منوطًا به جمع أفكار بور ومعالجتها في السنوات التي تلت سنة ١٩١٣. وقد تأثَّرت كذلك أبحاث العلماء في الدول المحايدة، مع أن بعضهم ربما يكون قد استفاد بطريقةٍ ما من سوء حظ الآخرين. فقد عُيِّن بور نفسُه «أستاذًا» في مادة الفيزياء بجامعة مانشستر، وفي جوتينجن أجرى مواطنٌ هولندي اسمه بيتر ديباي دراساتٍ مهمة عن البنية البلورية، مستخدمًا أشعةَ إكس كمسبار. وقد ظلَّت هولندا والدنمارك في الواقع واحتَين عِلميتَين في ذلك الوقت، وعاد بور إلى الدنمارك سنة ١٩١٦ ليشغل منصب أستاذ الفيزياء النظرية في كوبنهاجن، ثم ليؤسس معهد الأبحاث الذي يحمل اسمه سنة ١٩٢٠. واستطاعت الأخبار التي جاءت من باحثٍ ألماني مثل أرنولد سومرفيلد (أحد الفيزيائيين الذين نقَّحوا نموذج بور الذري لدرجةِ أن النموذج كان يشار إليه أحيانًا باسم ذرة «بور–سومرفيلد») المرور إلى دولة الدنمارك المحايدة، ثم بعد ذلك من بور إلى رذرفورد في إنجلترا. استمر التقدُّم لكنه لم يكن التقدُّم نفسه الذي كان في السابق.

بعد الحرب لم يكن العلماء الألمان والنمساويون يُدعون إلى المؤتمرات الدولية لسنواتٍ عديدة، وكانت روسيا تموج بالثورة، وفقد العلمُ بعضًا من عالميته وجيلًا من الشباب. وآل الأمر إلى أن جاء جيلٌ جديد تمامًا ليأخذ نظريةَ الكَمِّ من النموذج الانتقالي الذي قدَّمه مزيج ذرة بور كحلٍّ وسط (وهو ما جرى تنقيحه باعتراف الجميع من خلال الجهود المضنية للعديد من الباحثين بحيث أصبح نموذجًا فعَّالًا على نحوٍ لافت، وإنْ كان متداعيًا) إلى النموذج الرائع الكامل لميكانيكا الكَمِّ. ودوَّت أسماءُ هذا الجيل في عالَم الفيزياء الحديثة: فيرنر هايزنبرج، وبول ديراك، فولفجانج باولي وباسكوال جوردان، وآخرون. كانوا أعضاء في الجيل الأول لمفهومِ الكَمِّ، الجيل الذي وُلد ونشأ في السنوات التي تلت مساهمة بلانك العظمى (وُلِد باولي سنة ١٩٠٠، وهايزنبرج سنة ١٩٠١، وديراك وجوردان سنة ١٩٠٢)، ودخلوا إلى مجال البحث العلمي في عشرينيات القرن العشرين. لم يتلقوا تدريبًا راسخًا في الفيزياء الكلاسيكية ليتغلبوا على تأثيرها، وكانت حاجتهم إلى الاحتفاظِ بجانبٍ من الأفكار الكلاسيكية في نظرياتهم عن الذرة أقلَّ مما نجده في عالمٍ بارعٍ مثل بور حين قدَّم أنصاف حلول. وكان من المناسب تمامًا، وربما الأمر لم يكن من

قبيل المصادفة على الإطلاق، أن الزمنَ المستغرَقَ منذ اكتشافِ بلانك معادلةَ الجسم الأسود وحتى ازدهار ميكانيكا الكَمِّ هو ستة وعشرون عامًا فحسب، وهي فترةٌ زمنيةٌ كفيلة لأن يتطورَ جيلٌ من الفيزيائيين الجُدد ويصبحوا علماء باحثين. غير أن هذا الجيل كان قد ورث أمرَين عظيمَين من جيل السلف الذي ما زال فاعلًا، بعيدًا عن ثابت بلانك نفسه. الأمر الأول كان ذرة بور الذي زودهم بمؤشرٍ واضحٍ على أن الأفكارَ الكَمِّيةَ لا بد أن تُدمَج في نظريةٍ مقنعة عن العمليات الذرية، أما الأمر الثاني فقد جاء من عالِمٍ نابغةٍ في عصره، بدا أنه لم يتقيَّد بأفكارٍ في الفيزياء الكلاسيكية، وهو ما كان استثناءً من كل القواعد. سنة ١٩١٦ وفي أوج الحرب كان أينشتاين يعمل في ألمانيا، وقد أدخل مفهومَ الاحتمال في النظرية الذرية. وقد قام بذلك كوسيلة (مساهمة أخرى في المزيج الذي جعل آلية عمل ذرة بور مماثلة لسلوك الذرات الحقيقية المُلاحَظ)، إلا أن هذه الوسيلةَ عاشت فترةً أطولَ من ذرة بور لتصبح الركيزةَ الأساسية لنظريةِ الكَمِّ الحقيقية، وإن كان من دواعي المفارقة أن تبرَّأ منها أينشتاين فيما بعدُ في مقولته الشهيرة: «إن الرب لا يلعب النرد».

عنصر المصادفة: نَرْدُ الرَّب

بالعودة إلى العَقد الأول من القرن العشرين، عندما كان رذرفورد وزميله فردريك سودي يفحصان طبيعةَ النشاط الإشعاعي، اكتشفا خاصيةً مثيرةً وأساسية من خصائص الذرة، أو بالأحرى من خصائص نواة الذرة. لا بد أن يتضمَّن «التحلل» الإشعاعي، كما أصبح معروفًا بهذا الاسم، تغيُّرًا أساسيًّا في الذرة المفردة (معلوم لدينا الآن أنه يتضمَّن انشطار النواة وانطلاق أجزاء منها)، غير أنه فيما يبدو لا يتأثَّر بأيِّ مؤثرٍ خارجي. فسواءٌ جرى تسخين الذرات أو تبريدها، وسواءٌ وُضِعَت في فراغ أو في دلوٍ به ماء، فإن التحلُّل الإشعاعي سيستمر دون أيِّ مقاطعة. ويبدو أنه لا توجد طريقة للتنبؤ الدقيق بأن ذرةً بعينِها في مادةٍ مشعةٍ ما ستتحلَّل، وتبعث بجسيم ألفا أو بيتا وبأشعة جاما، إلا أن التجارب قد بيَّنت أن نسبةً معيَّنة من عددٍ كبير من الذرات النشطة إشعاعيًّا للعنصر نفسِه ستتحلل دائمًا في زمنٍ معيَّن. وعلى وجه التحديد، يوجد زمنٌ مميز لكل عنصرٍ مشع يسمَّى عمر النصف، تتحلل خلاله أنصافُ الذرات بالضبط في أي نموذجِ تحلُّل. يبلغ عمر النصف لعنصر الراديوم، على سبيل المثال، ٦٠٠ سنة، بينما يبلغ عمر النصف لعنصر الكربون-١٤ — وهو أحد نظائر الكربون المشعة — أقلَّ قليلًا من ٦٠٠٠ سنة، وهو ما جعله مفيدًا في

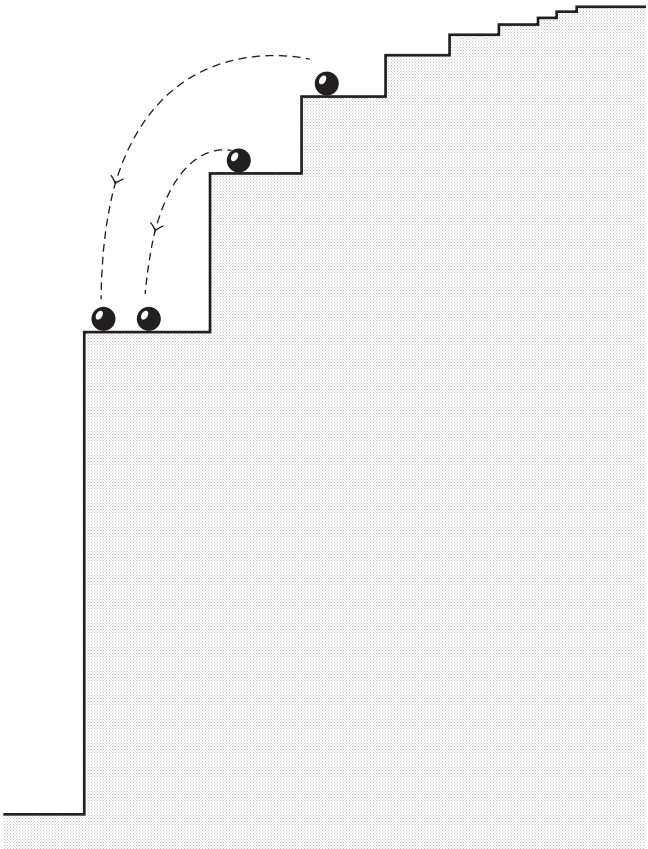
التأريخ الزمني للاكتشافات الأثرية، وأخيرًا يبلغ عمر النصف لتحلُّل عنصر البوتاسيوم المشع ١٣٠٠ مليون سنة.

ومن دون معرفةِ السبب الذي يجعل ذرةً ما ضمن عددٍ هائل من الذرات تتحلَّل ولا تتحلَّل الذرات المجاورة لها، استخدم رذرفورد وسودي هذا الاكتشاف كأساسٍ لوضعِ نظريةٍ إحصائية عن التحلُّل الإشعاعي، وهي نظرية تَستخدم أساليبَ أكتوارية كالمطبَّقة في شركات التأمين، التي تعرف أن بعض الأشخاص المؤمَّن عليهم سيموتون في سنٍّ مبكرة وأن ورثتهم سيتسلمون من شركةِ التأمين مبالغَ تفوق كثيرًا ما دفعوه، في حين أن عملاء آخرين سيعيشون طويلًا وسيدفعون مبالغَ كافيةً لتعويض ذلك. ودون معرفة الوقت الذي سيموت فيه أيٌّ من العملاء، تتيح الجداول الأكتوارية لموظفي الحسابات ضبطَ الموازنة. وبالطريقة نفسِها، تتيح الجداول الإحصائية للفيزيائيين ضبطَ موازنة التحلل الإشعاعي، بشرط أن يتعاملوا مع مجموعاتٍ كبيرة من الذرات.

إحدى السمات اللافتة لهذا السلوك هي أن النشاط الإشعاعي لا يختفي أبدًا من عينةِ أيِّ مادةٍ مشعَّة. ذلك حيث يتحلل نصف ملايين الذرات الموجودة في فترةٍ زمنيةٍ معينة. وعلى مدى عمر النصف التالي — الذي يستغرق الفترةَ الزمنيةَ نفسَها — سيتحلَّل نصف العدد المتبقي، وهكذا. وكلما اقتربنا من الصفر تناقصَ عددُ الذرات المشعة المتبقية دون تحلُّل، ولكن كل خطوة نحو الصفر تقلِّل عمر النصف بما يتناسب مع نصف العدد المتبقي.

في تلك الأيام الأولى، كان الفيزيائيون من أمثال رذرفورد وسودي يتصوَّرون أن شخصًا ما سيأتي في النهاية ويكتشف بالضبط السببَ وراء تحلُّل ذرةٍ بعينها، وأن هذا الاكتشاف سيُفسِّر الطبيعةَ الإحصائية للعملية. وعندما طبَّق أينشتاين الأساليبَ الإحصائية على نموذج بور لتفسيرِ تفاصيلِ الطيفِ الذري، استبق الأمر أيضًا بأن الاكتشافات اللاحقة ستلغي الحاجة إلى «الجداول الأكتوارية». وكانوا جميعًا على خطأ.

يمكن النظر إلى مستويات الطاقة للذرة، أو للإلكترون في ذرةٍ ما، على أنها درجات سُلَّم. ولا يتساوى عمق كل درجة والأخرى من حيث الطاقة؛ فالدرجاتُ العلوية تكون متقاربةً بعضها من بعض أكثرَ من الدرجات السفلية. وقد أوضحَ بور أنه في حالة ذرة الهيدروجين، بوصفها أبسطَ الذرات، يمكن تمثيل مستويات الطاقة كدرجات سُلَّم بحيث يتناسب عمقُ كلِّ درجةٍ أسفل أعلى الدَّرج مع $1/n^2$؛ حيث n هو رقم كل درجة بدءًا من أسفل الدَّرج. ويتطلَّب انتقال إلكترون من المستوى واحد إلى المستوى اثنين على هذا الدَّرج



شكل ٤-١: يمكن مقارنة مستويات الطاقة في ذرةٍ بسيطة مثل الهيدروجين بمجموعة من درجات السُّلَّم ذات أعماقٍ مختلفة. تمثِّل الكرةُ الموضوعة على الدرجات المختلِفة إلكترونًا في مستويات الطاقة المختلِفة في الذرة. وتقابل الحركة من درجةٍ أعلى إلى درجةٍ أدنى انطلاقَ كميةٍ محدَّدة من الطاقة، وهي المسئولة في ذرة الهيدروجين عن خطوطِ سلسلة بالمر في الطيف. ولا توجد خطوطٌ بينية؛ لأنه ليس ثمة درجاتٌ بينية لكي «يستقر» عليها الإلكترون.

كميةً من الطاقة مقدارها hv بالضبط ليتحرك أعلى هذه الدرجة من درجات السُّلَّم، وإذا عاد الإلكترون ليهبِط إلى المستوى الأول («الحالة الأرضية» للذرة)، فإنه يطلق الكَمِّيةَ نفسَها من الطاقة. ولا توجد وسيلة تجعل الإلكترون في الحالة الأرضية يمتصُّ طاقةً

أقلَّ؛ لأنه لا توجد «درجة» بينية يستطيع الإلكترون أن يستقر عليها، ولا توجد وسيلة تجعل إلكترونًا في المستوى اثنين يطلق مقدارًا أقلَّ من هذه الكَمِّية من الطاقة؛ لأنه لا يوجد موضعٌ آخر ليهبط إليه الإلكترون سوى الحالة الأرضية. ونظرًا لوجود العديد من الدرجات التي يمكن للإلكترون الاستقرار عليها، ولأنه يستطيع القفز أو الهبوط من أيِّ درجةٍ إلى أيِّ درجةٍ أخرى، يوجد العديد من الخطوط في طيف كل عنصر. وكل خطٍّ منها يقابل انتقالًا بين درجتَين، بين مستويَين للطاقة لهما أرقامٌ كَمِّية مختلِفة. وتؤدي كل الانتقالات التي تنتهي بالحالة الأرضية، على سبيل المثال، إلى مجموعةٍ من خطوط الطيف على غرارِ سلسلةِ بالمر، وتؤدي كل الانتقالات من الدرجات الأعلى التي تنتهي في المستوى اثنين إلى مجموعةٍ أخرى من الخطوط، وهكذا.[5] تتصادم الذرات في حالةِ الغازِ الساخنِ باستمرار بعضها مع بعض، وبذلك تثار الإلكترونات إلى مستوياتٍ أعلى من الطاقة ثم تعود لتهبط من جديد، وفي أثناء ذلك تشعُّ خطوطُ طيفٍ برَّاقة. أما عندما يمر الضوء خلالَ غازٍ بارد، فإن الإلكترونات في الحالة الأرضية ترتفع إلى مستوياتٍ طاقة أعلى، وفي أثناء ذلك تمتص الضوء تاركة خطوطًا معتمة في الطيف.

وعلى افتراض أن نموذجَ الذرة لدى بور كان يعني شيئًا على أية حال، فإن هذا التفسير لكيفيةِ إشعاعِ الذراتِ الساخنةِ للطاقة كان ينبغي حتمًا ربطه بقانون بلانك. ولكان ينبغي حتمًا أن يكون طيف إشعاع التجويف (إشعاع الجسم الأسود) ببساطةٍ هو التأثير المشترك لأعدادٍ كبيرة من الذرات التي تشعُّ طاقةً كلما قفزت الإلكترونات من مستوًى طاقةٍ إلى آخرَ.

أكمل أينشتاين نظريتَه عن النسبية العامة سنة ١٩١٦، ووجَّه اهتمامه مجددًا إلى نظريةِ الكَمِّ (قد يبدو ذلك تجديدًا أو إحياءً من جديد مقارنةً ببحثه الرئيسي). ولعل ما حمَّسه لذلك هو النجاح الذي حقَّقه نموذج بور للذرة، وكذلك نسخته الخاصة في ذلك الوقتِ من النظريةِ الجسيميةِ للضوء التي بدأت أخيرًا تكسب أرضًا وتحوز شيوعًا وتقدُّمًا. كان الفيزيائي الأمريكي أندرو ميليكان واحدًا من أشد المعارضين لتفسير أينشتاين للظاهرة الكهروضوئية، عندما ظهر هذا التفسير لأول مرة سنة ١٩٠٥. وقد استغرق عشرَ سنوات في اختبارِ الفكرةِ من خلال سلسلةٍ من التجارب المميزة، انطلاقًا من هدفه في إثبات خطأ أينشتاين وانتهاءً بالإثبات الذي توصَّل إليه سنة ١٩١٤ عن طريق التجربة المباشرة بصحةِ تفسيرِ أينشتاين للظاهرة الكهروضوئية بمدلولِ الكَمِّ الضوئي، أو الفوتون. وفي أثناء ذلك، استنتج طريقةً تجريبية لتحديد قيمة h بدقة، واكتمالًا للمفارقة حصل سنة ١٩٢٣ على جائزة نوبل عن أبحاثه وقياسه لشحنة الإلكترون.

أدرك أينشتاين أن تحوُّل ذرةٍ من حالة طاقة «مثارة» — يوجد فيها الإلكترون في مستوى طاقةٍ عالٍ — إلى حالةٍ ذاتِ طاقةٍ أقلَّ — يوجد فيها الإلكترون في مستوى طاقةٍ منخفض — يشبه كثيرًا التحلل الإشعاعي للذرة. وقد استخدم الأساليب الإحصائية التي طوَّرها بولتزمان (للتعامل مع سلوكِ مجموعاتٍ من الذرات) للتعامل مع حالات الطاقة المفردة، حيث توصَّل إلى حسابِ احتمالِ وجودِ ذرةٍ معينة في حالةِ طاقةٍ تقابل عددًا كموميًّا معينًا n، واستخدم «جداول التأمين الأكتوارية» الاحتمالية للنشاط الإشعاعي لحساب احتمال «تفكك» ذرةٍ ما في الحالة n أو «تحللها» إلى حالةٍ أخرى ذات طاقةٍ أقلَّ (أي ذات عددٍ كموميٍّ أقلَّ). وقد أدَّى ذلك ببساطة ووضوح إلى معادلة بلانك لإشعاع الجسم الأسود التي اشتقت بأكملها على أساسِ أفكارِ الكَمِّ. وفي فترةٍ قريبة من ذلك، تمكَّن بور باستخدامِ أفكارِ أينشتاين الإحصائيةِ من توسيع نطاق نموذجه الذري، مُقرًّا بالتفسير القائل بأن بعض الخطوط في الطيف تكون أكثر وضوحًا من غيرها لأن بعض الانتقالات بين حالات الطاقة تكون احتماليةُ — أرجحية — حدوثِها أكبرَ من غيرها. ولم يستطِع تفسيرَ السبب وراء ذلك، غير أن أحدًا لم يُولِ اهتمامًا كبيرًا بالأمر في ذلك الوقت.

كان أينشتاين، مثله مثل العلماء الذين درسوا النشاط الإشعاعي في ذلك الوقت، يعتقد أن الجداول الأكتوارية ليست كلمة الفَصْل الأخيرة، وأن الأبحاث القادمة ستحدِّد السبب وراء حدوثِ انتقالٍ بعينِه في اللحظةِ التي يحدث فيها بالضبط، وليس في أيِّ وقتٍ آخر. غير أن هذه هي النقطة التي بدأت عندها نظريةُ الكَمِّ تتحرَّر فعليًّا من سيطرة الأفكار الكلاسيكية، ولم يُكتشَف قط أيُّ «سبب كامن» وراء حدوثِ التحلُّل الإشعاعي أو انتقالات الطاقة الذرية حال حدوثها. وفي الواقع، يبدو أن هذه التغيرات تحدث كلها بمحض المصادفة، على أساسٍ إحصائيٍّ ما، وقد بدأ ذلك الأمر في إثارةِ تساؤلاتٍ فلسفيةٍ جوهريةٍ.

في العالَم الكلاسيكي لكلِّ شيءٍ سبب. ويمكنك تتبُّع سببَ أيِّ حدث بتسلسلٍ زمنيٍّ عكسي لاكتشافِ السببِ وراء ذلك السبب، والسبب الذي أدَّى إلى ذلك السبب، وهكذا حتى تصل إلى الانفجار العظيم (إذا كنت من علماء الكون)، أو حتى لحظة الخَلْق في السياق الديني، إذا كان ذلك هو النموذج الذي تقبل به. أما في عالَمِ الكَمِّ، فإن هذه السببية المباشرة تأخذ في الاختفاء بمجردِ فحصِ التحلُّل الإشعاعي والانتقالات الذرية. فالإلكترون لا يهبط من مستوًى معيَّن للطاقة إلى مستوًى آخر في زمنٍ معيَّن لأي سببٍ محدَّد. ومستوى الطاقة الأدنى هو الأكثرُ تفضيلًا لدى الذرة، بالمفهوم الإحصائي، ولذا فمن المرجَّح

(يمكن قياس مقدار الأرجحية كميًّا) أن يقوم الإلكترون بهذا الانتقال آجلًا أو عاجلًا. ولكن لا توجد وسيلةٌ تخبرنا متى سيحدث هذا الانتقال. فلا يوجد عاملٌ خارجي يدفع الإلكترون، ولا يوجد توقيتٌ داخلي يفرض على الإلكترون القفز في توقيتٍ محدَّد. وكلُّ ما هنالك أن الانتقال يحدث في هذا الحين وليس ذاك دون سببٍ معيَّن.

وليس ذلك خروجًا عن السببية الصارمة، ومع أن الكثيرين من علماء القرن التاسع عشر ربما هالتهم الفكرة، فإنني يخامرني الشك في أن يكون أيٌّ من قراء هذا الكتابِ يكترثون كثيرًا لها. ولكن ليست هذه سوى أولِ قطرةٍ في الغيث، وأولِ مفتاحٍ لفك الطلاسم الحقيقية لعالَمِ الكَمِّ، وإن كان جديرًا بالذكر أن أهميتها لم تحظَ بتقدير في ذلك الوقت. وكان مولد الفكرة سنة ١٩١٦ على يد أينشتاين.

الذرات وعلاقة بعضها ببعض

لعله من المضجر التوسُّع في شرحِ كلِّ التنقيحات المفصَّلة التي شهدها نموذج بور للذرة حتى سنة ١٩٢٦، ولعل الأكثرَ ضجرًا أن يُكتشَف عندئذٍ فقط أن معظم هذه المحاولات لتلمُّس الطريق نحو الحقيقة كان يجانبه الصواب على أيةِ حال. غير أن ذرة بور كانت تغلب على الكتب الدراسية وكتب تبسيط العلوم على نحوٍ لا يمكن إغفاله، وهي تمثِّل في شكلها النهائي آخرَ نموذجٍ للذرة يرتبط بأي صلة بالصور التي اعتدنا عليها في حياتنا اليومية. وقد تبيَّن أن الذرةَ التي رآها القدماء مثل كرة البلياردو ولا تنقسم، قابلةٌ للانقسام وتتكوَّن في معظمها من فراغ، تملؤه جسيماتٌ غريبة تسلك مسلكًا غريبًا. وقد قدَّم بور إطارًا وضع بعض هذه التصورات الغريبة في سياقٍ يحاكي حياتنا اليومية، ومع أنه من الأفضل استبعاد كل الأفكار المتعلقة بحياتنا اليومية قبل الانغماس كليةً في عالَمِ الكَمِّ، فإن معظم الأشخاص يَبدون أكثرَ سعادةً عندما يستعرضون نموذجَ بور قبل هذا الانغماس. الآن وقد بلغنا منتصفَ الطريق بين الفيزياءِ الكلاسيكيةِ ونظريةِ الكَمِّ، دعونا نتوقَّف لنلتقط أنفاسنا ونستريح لوهلةٍ قبل أن ندخل إلى منطقةٍ مجهولة. ولكن دعونا لا نضيِّع الوقت والطاقة في تتبُّع كلِّ الأخطاء وأنصاف الحقائق التي تضمَّنها مزيج الجهود المشتركة لوضع نموذج بور والنواة حتى سنة ١٩٢٦. وبدلًا من ذلك، سأستخدم منظور ثمانينيات القرن العشرين لإلقاءِ نظرةٍ إلى الوراء على ذرةِ بور ولوصفِ نوعٍ من التوليفِ الحديثِ لأفكارِ بور وأفكارِ رفاقه، بما في ذلك بعض قِطَع البازل التي لم تُوضَع حقيقةً في موضعها الصحيح إلا مؤخرًا.

إنَّ الذرات متناهيةُ الصغر. وعدد أفوجادرو هو عدد ذرات الهيدروجين في جرامٍ واحدٍ من الغاز. ولكن غاز الهيدروجين ليس من قبيل الأشياء التي نقابلها في حياتنا اليومية؛ ومن ثَم لكي نأخذ فكرةً عن مدى صِغَر الذرات، دعونا نفكِّر بدلًا من ذلك في قطعةٍ من الكربون؛ الفحم أو الماس أو السناج. ولأن كل ذرة كربون يزيد وزنها عن ذرة الهيدروجين بمقدار ١٢ مرة، فإن العدد نفسه من ذرات الكربون المماثل لعدد الذرات في جرامٍ واحد من الهيدروجين يزن ١٢ جرامًا. ويزيد وزن العشرةِ جراماتٍ قليلًا عن ثُلث أوقية، ويقل وزن الاثني عشر جرامًا عن نصف أوقية. وتزن كل ملعقةٍ كبيرة من السكر، أو ماسة كبيرة، أو قطعةٍ صغيرة من الفحم حوالي نصف أوقية. وهذه هي كمية الكربون التي يحتوي عليها عدد أفوجادرو من الذرات، ٦ × ٢٣١٠ (العدد ٦ متبوعًا بثلاثة وعشرين صفرًا). كيف نقيس القيمة الحقيقية لهذا العدد؟ يُطلق عادةً على الأعداد الضخمة «أعداد فلكية»، والكثير من الأعداد الفلكية تكون كبيرةً بالفعل؛ ولذا دعونا نحاول إيجادَ عددٍ كبيرٍ مكافئ لذلك في علم الفلك.

يقدِّر الفلكيون عمرَ الكَون بأنه يقل قليلًا عن ١٥ مليار سنة، ١٥ × ٩١٠ سنة. ومن الواضح أن العدد ٢٣١٠ أكبر كثيرًا من العدد ٩١٠. لنحوِّل الآن عمرَ الكَون إلى عددٍ أكبرَ من ذلك، مستخدمين أصغرَ وحدات الزمن التي ربما تكون مألوفةً لنا، وهي الثانية. تحتوي كل سنة على ٣٦٥ يومًا، وكل يوم على ٢٤ ساعة، وكل ساعة على ٣٦٠٠ ثانية. وبتحويل الأعداد تقريبيًّا، فإن كل سنة تحتوي تقريبيًّا على ٣٢ مليون ثانية أي نحو ٣ × ٧١٠ ثانية. وبذلك، فإن ١٥ مليار سنة تحتوي على ٤٥ × ١٦١٠ ثانية، بتطبيق قاعدة جمع الأسس في حالة ضرب الأعداد المرفوعة لأسٍّ مثل ٩١٠ و٧١٠ ليكون الناتج ١٦١٠. ومرةً أخرى، بتحويلِ الأعدادِ تقريبيًّا، فإن عمر الكَون بالثواني يصبح ٥ × ١٧١٠.

ولا يزال هذا العدد أقلَّ كثيرًا من ٦ × ٢٣١٠؛ فالأس المرفوع له الأساس ١٠ أقل بمقدار ٦. ولا يبدو ذلك سيئًا جدًّا عندما نكون بصدد التعامل مع عددٍ أساسه ١٠ مرفوعًا لأس ٢٣، ولكن ماذا يعني ذلك؟ نقسم ٦ × ٢٣١٠ على ٥ × ١٧١٠، وبطرح الأسسِ فإننا نحصل على عددٍ يزيد قليلًا عن ١ × ٦١٠؛ أي مليون. والآن تخيَّل كائنًا خارقًا يراقب تطوُّر عالمنا منذ لحظة الانفجار العظيم حتى لحظةِ الخَلق. ويحمل هذا الكائن معه نصف أوقية من الكربون النقي وملقاطًا فائقَ الصِّغر بحيث يمكنه التقاطُ ذرةِ كربون واحدة من هذه الكَمِّية. وبدءًا من لحظة بداية الانفجار العظيم التي شهدت نشأة الكَون، يزيل هذا الكائن ذرة كربون واحدةً من هذه الكَمِّية كل ثانية ويلقي بها بعيدًا. وحتى

الآن، يكون قد أزال ٥ × ١٠^{١٧} ذرة، فما هو المقدار المتبقي؟ بعد كل ذلك النشاط، والعمل على مدى ١٥ مليار سنة، سيكون الكائن الخارق قد أزال حوالي جزءٍ واحدٍ من مليون جزء من ذرات الكربون؛ ومن ثَم فإن ما تبقى في الكَمِّية التي معه لا يزال يزيد عن الجزء الذي أزاله بمقدار مليون مرة.

لعلك الآن قد استوعبت مدى صِغَر الذرة. وليس المستغرب في الأمر أن نموذج بور للذرة كان تقديرًا تقريبيًّا وسانحًا، ولا أن قوانين الفيزياء للحياة اليومية لا تنطبق على الذرات. المعجزة هي أن نفهم أيَّ شيء عن الذرات، وأن نستطيع إيجاد طرق لاجتياز الفجوةِ ما بين الفيزياءِ الكلاسيكيةِ لنيوتن وفيزياءِ الكَمِّ الذرية.

وبقدرِ الصورة الفيزيائية التي يمكن تكوينها لأي شيءٍ متناهي الصِّغَر، فهكذا هو مدى الصِّغر الذي تكون عليه الذرة. وكما أوضح رذرفورد، فإن النواة المتناهية الصِّغر التي تقع في مركز الذرة تكون محاطةً بسحابةٍ من الإلكترونات التي تدور حولها بزخم كالنحل. في البداية، كان الاعتقاد السابق هو أن النواة تتكوَّن من بروتونات فقط، وكل بروتون منها يحمل شحنةً موجبةً بنفس مقدار الشحنة السالبة للإلكترون، وبذلك فإن العدد المتساوي من البروتونات والإلكترونات يجعل كل ذرة متعادلة كهربيًّا، وقد اتضح فيما بعدُ أن هناك جسيمًا أساسيًّا آخرَ في الذرة يشبه البروتون لكنه لا يحمل شحنةً كهربية. إنه النيوترون، وفي كل الذرات باستثناء ذرة الهيدروجين، التي هي أبسط الذرات على الإطلاق، توجد النيوترونات إلى جانب البروتونات في النواة. ولكن عدد البروتونات يكون مساويًا حقًّا لعدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة. يحدِّد عددُ البروتونات في النواة نوعَ العنصر الذي تمثِّله هذه الذرة، ويحدِّد عددُ الإلكترونات في السحابة (المساوي تمامًا لعدد البروتونات) الخصائصَ الكيميائية لهذه الذرة، وهذا العنصر. ولكن، نظرًا لأن بعض الذرات التي يتساوى فيها عدد البروتونات والإلكترونات قد تحتوي على عددٍ مختلِف من النيوترونات، فإن العناصر الكيميائية يمكن أن تجيء في صورٍ مختلِفة تُسمَّى النظائر. وقد أدخل سودي هذا الاسم سنة ١٩١٣ مستعيرًا إياه من لفظةٍ إغريقيةٍ تعني «الموضع نفسه»، وذلك بسبب اكتشاف وجود ذرات ذات أوزانٍ مختلفة تنتمي إلى الموضعِ نفسِه في جدول الخصائص الكيميائية؛ الجدول الدوري للعناصر. وقد حصل سودي على جائزة نوبل (في الكيمياء) سنة ١٩٢١ عن أبحاثه حول النظائر.

إنَّ أبسط نظير لأبسطِ عنصرٍ هو الصورة الأكثر شيوعًا للهيدروجين التي تحتوي فيها الذرة على بروتونٍ واحدٍ مصحوبٍ بإلكترونٍ واحد. وفي الديوتيريوم، تحتوي كل ذرة على

بروتونٍ واحد ونيوترونٍ واحد مصحوبَين بإلكترونٍ واحد، إلا أن الخصائص الكيميائية لذرةِ الديوتيريوم تكون مماثلةً للخصائص الكيميائية لذرة الهيدروجين العادية. ولأن كتلة البروتونات والنيوترونات تكون متساوية تقريبًا، وكلٌّ منها أثقل ٢٠٠٠ مرة تقريبًا من الإلكترون، فإن العدد الكلي للبروتونات والنيوترونات في النواة يحدِّد الكتلةَ الكليةَ للذرةِ بفارقٍ ضئيل للغاية. ويرمز إلى هذا العدد عادةً بالعدد A، ويُطلق عليه العدد الكتلي. ويُطلَق على عدد البروتونات في النواة الذي يحدِّد خصائص العنصر، العدد الذري Z. وتُسمَّى الوحدة التي تُقاس بها كتلة الذرة وحدة الكتلة الذرية، وهو اسمٌ منطقي جدًّا وفي محله، وتُعرَّف بأنها جزء من اثني عشر جزءًا من كتلة نظير الكربون، يحتوي على ستة بروتونات وستة نيوترونات في نواته. ويُسمَّى هذا النظير الكربون-١٢، أو يكتب اختصارًا ^{12}C، ويوجد نظيران آخران للكربون هما ^{13}C و^{14}C، ويحتوي كلٌّ منهما على التوالي على سبعة نيوترونات وثمانية نيوترونات في نواته.

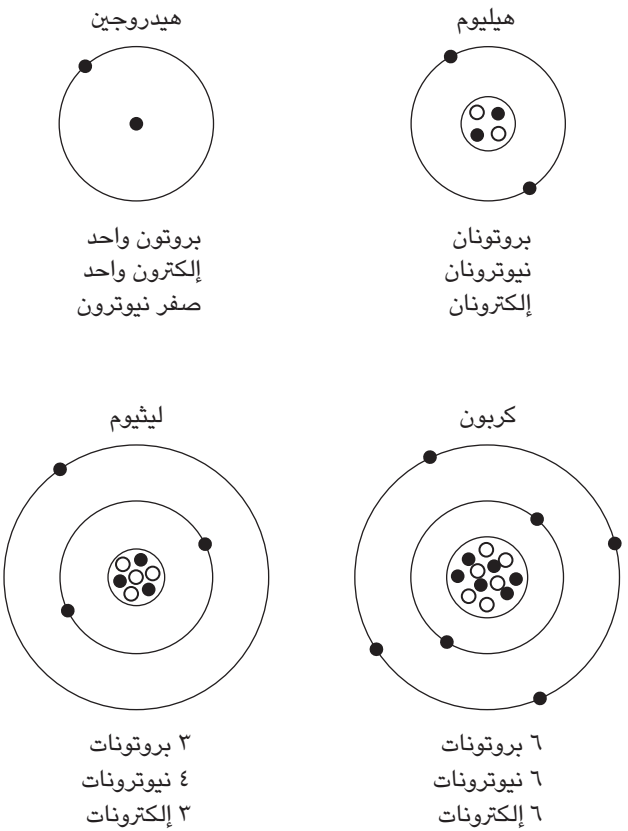
تزيد النظائر بزيادة كتلة النواة (زيادة عدد البروتونات التي تحتويها). فالقصدير — على سبيل المثال — يحتوي على خمسين بروتونًا في نواته ($Z = ٥٠$) وله عشرة نظائر مستقرة يتراوح العدد الكتلي لكلٍّ منها من $A = ١١٢$ (٦٢ نيوترونًا) إلى $A = ١٢٤$ (٧٤ نيوترونًا). في الأنوية المستقرة (باستثناء ذرة الهيدروجين التي هي أبسط الذرات على الإطلاق) يكون عدد النيوترونات مساويًا دائمًا على أقل تقدير لعدد البروتونات، وتساعد النيوترونات المتعادلة في تماسك البروتونات الموجبة معًا التي تميل إلى التنافر فيما بينها. يرتبط النشاط الإشعاعي بالنظائر غير المستقرة التي تتحوَّل إلى صورةٍ مستقرةٍ وتبعث بالأشعة أثناء ذلك. وما أشعة بيتا سوى إلكترون انبعث لدى تحوُّل نيوترون إلى بروتون، وجسيمات ألفا هي أنويةٌ ذريةٌ قائمة بذاتها، فهي عبارة عن زوج من البروتونات وزوج من النيوترونات (نواة ذرة الهيليوم-٤) انبعث من نواة غير مستقرة أثناء تعديلها لتركيبها الداخلي، أما الأنوية غير المستقرة ذات الكتلة الكبيرة للغاية، فإنها تنشطر إلى اثنتين أو أكثر من الأنوية المستقرة الأخفِّ وزنًا، وذلك عن طريق العملية المعروفة بالانشطار النووي أو الذري، التي يصاحبها أيضًا انطلاق جسيمات ألفا وبيتا من هذا الوسط. ويحدث كل ذلك في حيزٍ ضئيل للغاية يصعب تخيُّله من الذرة نفسها. يبلغ قطر الذرة العادية $١٠^{-١٠}$ مترًا، بينما لا يزيد نصف قطر النواة عن $١٠^{-١٥}$ مترًا؛ أي أصغر من الذرة بمقدار $١٠^{٥}$ مرة. ولأن الحجم يساوي مكعب نصف القطر، فعلينا أن نضرب الأس في ثلاثة لنجدَ أن حجم النواة أصغرُ بمقدار $١٠^{١٥}$ مرة من حجم الذرة.

التفسير من منظور الكيمياء

تقدِّم سحابةُ الإلكترونات الجانبَ الخارجي للذرة والوسائل التي تتفاعل بها مع الذرات الأخرى. أما ما يرقد عميقًا في قلب السحابة الإلكترونية، فإنه على الأغلب ليس ماديًّا؛ ذلك أن ما «تراه» ذرة أخرى و«تشعر به» هو الإلكترونات نفسها، والتفاعلات بين سُحب الإلكترونات هي المسئولة عن الخصائص الكيميائية. وبشرح السمات العامة للسحابة الإلكترونية، وضع نموذج بور للذرة الخصائصَ الكيميائية على أساسٍ علميٍّ راسخ. كان الكيميائيون يعرفون بالفعل أن بعضَ العناصر كانت متشابهة جدًّا في خصائصها الكيميائية مع أن لها أوزانًا ذريةً مختلفة. وعندما جرى ترتيب العناصر في جدول تبعًا لأوزانها الذرية (ولا سيَّما عندما سُمِحَ بالنظائر المختلفة)، اتضح أن العناصر المتماثلة كانت تتكرَّر على فتراتٍ منتظمة، وكان أحد هذه الأنماط هو تكرار العناصر بحيث تفصل بينها ثمانية أعدادٍ ذرية. ولهذا السبب، عندما رُتِّبَ الجدول بحيث توضَع العناصر ذات الخصائص المتماثلة في مجموعاتٍ ما، سُمِّي الجدول «الدوري».

زار بور جامعة جوتينجن في ألمانيا في شهر يونيو سنة ١٩٢٢، ليلقي سلسلةً من المحاضرات حول نظريةِ الكَمِّ وتركيب الذرة. وكانت جوتينجن على وشك أن تصبح واحدة من ثلاثةِ مراكزَ رئيسيةٍ في تطوير النسخة الكاملة من نظريةِ الكَمِّ، تحت إشراف ماكس بورن، الذي أصبح أستاذًا للفيزياء النظرية هناك سنة ١٩٢١. وُلِد بورن سنة ١٨٨٢، وكان ابنًا لأستاذ تشريح بجامعة بريسلاو، وصار طالبًا في أوائل القرن العشرين عندما ظهرت أفكار بلانك لأول مرة. وقد درس الرياضيات في البداية، ولم يتحوَّل إلى الفيزياء (ويعمل لفترة في مختبر كافنديش) إلا بعد أن أتمَّ رسالةَ الدكتوراه سنة ١٩٠٦. وقد تبيَّن أن ذلك كان تدريبًا مثاليًّا للسنوات القادمة كما سنرى فيما بعدُ. كان بور يتصف دائمًا بالدقةِ الرياضية بوصفه خبيرًا في النسبية، وذلك على نقيضٍ واضح من مزيج التصوُّرات النظرية لبور الذي أسَّسه بمساعدةِ آرائه الثاقبة وحدْسه الفيزيائي، لكنه غالبًا ما يترك للآخرين أمرَ إدراك التفاصيل الرياضية وفهْمها. وقد كان كلا النوعين من النبوغ ضروريًّا للوصول إلى فهْم جديد للذرات.

كانت محاضرات بور في يونيو سنة ١٩٢٢ حدثًا رئيسيًّا في تجديد الفيزياء الألمانية بعد الحرب، وكذلك في تاريخ نظريةِ الكَمِّ. حضر هذه المحاضرات علماءُ من جميع أنحاء ألمانيا، وقد أصبحت تُعرف (دون تلاعبٍ مُبالَغ فيه بالألفاظ في بعض الاحتفاليات الألمانية المشهورة الأخرى) باسم «مهرجان بور». وقد قدَّم بور في تلك المحاضرات، بعد أن جهَّز



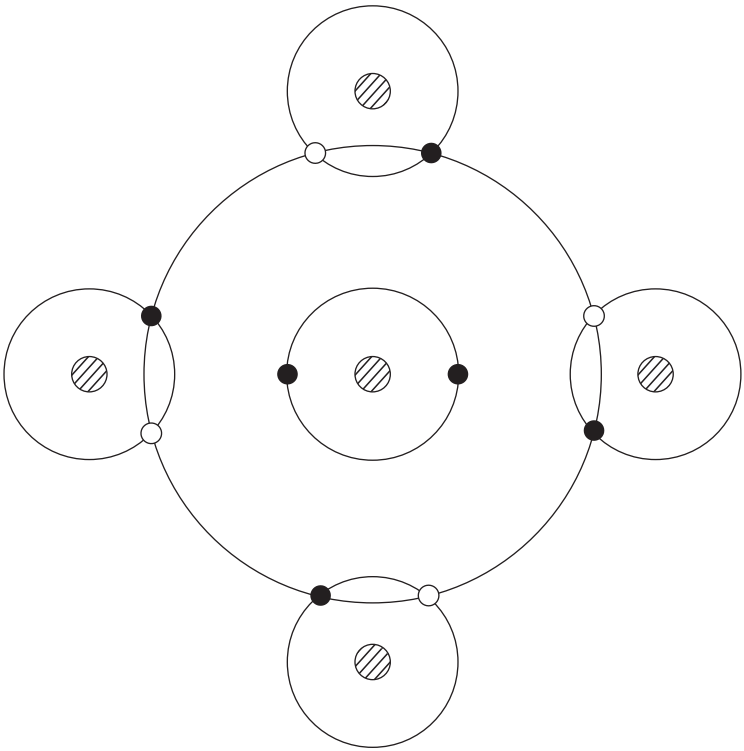
شكل ٤-٢: يمكن تمثيلُ ذراتِ بعضِ أبسطِ العناصرِ لأغراضٍ عديدةٍ كنواةٍ تحيط بها إلكترونات في أغلفةٍ تُقابِل الدرجاتِ في سُلَّم مستويات الطاقة. وطبقًا لقواعدِ الكَمِّ، فإنه لا يُسمَح إلا بوجود إلكترونَين فقط في المستوى الأدنى؛ ومن ثَم فإن الليثيوم الذي يحتوي على ثلاثة إلكترونات لا بد أن ينقل إلكترونًا منها إلى الدرجةِ التي تعلوه في سُلَّم الطاقة. وهناك «متَّسع» في هذا الغلاف الثاني لثمانية إلكترونات، وهكذا فإن للكربون غلافًا ممتلئًا حتى نصف سعته بالضبط، وهو السبب وراء خصائص الكربون الكيميائية المهمة كأساسٍ للحياة.

حجَّته بعناية، أولَ نظريةٍ ناجحة للجدول الدوري للعناصر، وهي النظرية التي ظلَّت قائمةً بنفس صورتها في المقام الأول حتى يومنا هذا. وقد نشأت فكرةُ بور من صورة

الإلكترونات التي تضاف إلى نواة الذرة. ومهما يكن العدد الذري لهذه النواة، فإن أول إلكترون سينتقل إلى حالة الطاقة التي تقابل الحالة الأرضية للهيدروجين. وسينتقل الإلكترون التالي إلى حالةِ طاقةٍ مماثلة؛ حيث يعطي مظهرًا خارجيًّا يشبه بالأحرى ذرة الهيليوم، التي تحتوي على إلكترونَين. إلا أن بور قد صرَّح بأنه لا يوجد متَّسع للمزيد من الإلكترونات في ذلك المستوى في الذرة، وسيتعيَّن على الإلكترون التالي الذي سيُضاف الانتقالُ إلى نوعٍ جديد من مستوى الطاقة. وبذلك، فإن الذرة التي تحتوي على ثلاثة بروتونات في نواتها وثلاثة إلكترونات خارجها لا بد أن تحتوي على زوجٍ من هذه الإلكترونات يكون مرتبطًا بقوةٍ مع النواة وإلكترون واحد مطروحًا خارجها، ولا بد أن تسلك الذرة كما لو كانت ذرةً لديها إلكترونٌ واحد (الهيدروجين) وذلك فيما يتعلَّق بالخصائص الكيميائية لها. والعنصر الذي فيه $Z = 3$ هو الليثيوم، وهو يُظهِر بالفعل بعضَ الخصائص الكيميائية المشابهة للهيدروجين. والعنصر التالي في الجدول الدوري الذي له خصائصُ مماثلةٌ لليثيوم هو الصوديوم الذي فيه $Z = 11$، ويشغل المرتبة الثامنة بعد الليثيوم. وهكذا دفع بور بأنه لا بد من وجودِ ثمانية مواضعَ متاحة في مستويات الطاقة الموجودة خارج الإلكترونَين الداخليَّين، وأنه عند امتلائها لا بد أن ينتقل الإلكترون التالي — الإلكترون الحادي عشر — إلى حالةٍ أخرى من حالاتِ الطاقةِ أقلَّ ارتباطًا بالنواة، ومن ثَمَّ تحاكي الذرةُ مرةً أخرى مظهر ذرة لها إلكترونٌ واحد فقط.

تسمَّى هذه الحالات من الطاقة بـ «الأغلفة»، وقد تضمَّن شرحُ بور للجدول الدوري امتلاءَ الأغلفةِ بنجاح بالإلكترونات مع زيادة Z. ويمكن التفكيرُ في الأغلفة على أنها طبقاتُ قشرة البصل الخارجية التي تُغلِّف إحداها الأخرى، وما يهمُّ من الناحية الكيميائية هو عدد الإلكترونات في الغلاف الخارجي الأكثر بُعدًا للذرة. أما ما يقع عميقًا داخل الذرة، فإنه يلعب دورًا ثانويًّا فقط في تحديد الكيفية التي تتفاعل بها الذرة مع الذرات الأخرى.

ومع التدرُّج إلى الخارج عبْر أغلفةِ الإلكترونات، وتضمين الأدلة المستخلصة من علم التحليل الطيفي، تمكَّن بور من تفسير العلاقات بين العناصر في الجدول الدوري من حيث التركيب الذري. لم تكن لديه أيُّ فكرة عن السبب الذي يستوجب النظر إلى الغلاف المحتوي على ثمانية إلكترونات على أنه غلافٌ ممتلئ (مغلق)، لكنه جعل جميع الحضور على يقين بأنه قد اكتشف الحقيقة الأساسية، ولم يترك مجالًا للشك لدى أيٍّ منهم. وكما قال هايزنبرج لاحقًا، فإن بور «لم يبرهن على أيِّ شيء رياضيًّا ... وكلُّ ما هنالك أنه كان يعرف أن هذه هي الصلةُ بطريقةٍ أو بأخرى».[6] وقد علَّق أينشتاين في كتابه



شكل ٤-٣: عندما تتَّحد ذرة كربون واحدة بأربع ذرات من الهيدروجين، فإنهما يتقاسمان الإلكترونات بحيث تبدو كل ذرة من ذرات الهيدروجين في ظاهرها وكأن لها غلافًا داخليًّا ممتلئًا (به زوج من الإلكترونات) و«ترى» ذرة الكربون ثمانية إلكترونات في غلافها الثاني. ويُعدُّ هذا تكوينًا ذريًّا مستقرًّا للغاية.

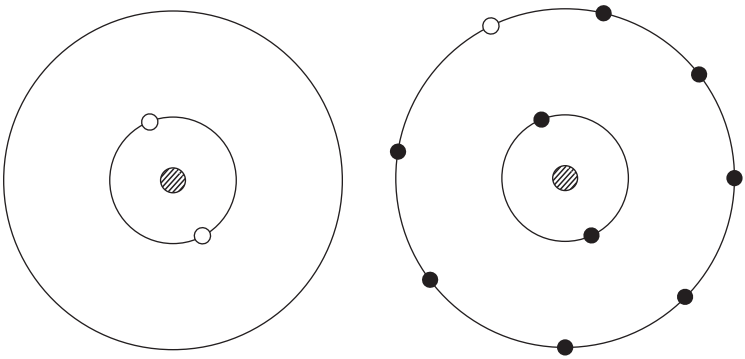
«ملاحظات السيرة الذاتية» سنة ١٩٤٩ وهو يصف نجاحَ أبحاث بور القائمة على نظريةِ الكَمِّ بقوله: «إن هذا الأساس غيرَ المحكَم والمتناقض كان كافيًا ليُمكِّن رجلًا مثل بور له هذا الحسُّ المتفرد والبراعة المتميزة من اكتشافِ القوانين الرئيسية لخطوطِ الطيف وأغلفة الإلكترونات في الذرات، إلى جانبِ اكتشافِ أهميتها للكيمياء، الأمر الذي بدا لي أنه معجزة، وما زال يبدو لي معجزةً حتى اليوم».[7]

تُعنى الكيمياء بالطريقةِ التي تتفاعل بها الذرات وتتَّحد لتصنع الجزيئات. فلماذا يتفاعل الكربون مع الهيدروجين بحيث ترتبط أربع ذرات من الهيدروجين بذرةٍ واحدة من الكربون لتصنعَ جزيء الميثان؟ ولماذا يوجد الهيدروجين في صورةِ جزيئات، كل جزيء منها يتكوَّن من ذرتَين، بينما لا يكوِّن الهيليوم أيَّ جزيئات؟ وهكذا. جاءت الإجابات ببساطةٍ مذهلةٍ من نموذج الأغلفة. فكلُّ ذرة هيدروجين بها إلكترونٌ واحد، بينما الهيليوم به إلكترونان. يمتلئ الغلاف «الداخلي» الأقرب إلى النواة بإلكترونَين، (ولسببٍ غيرِ معروف) تكون الأغلفة الممتلئة أكثرَ استقرارًا؛ فالذرات «تميل» إلى أن تكون لها أغلفةٌ ممتلئة. عندما تتَّحد ذرتان من الهيدروجين لتكوينِ جزيءٍ ما، فإنهما تتقاسمان الإلكترونَين بحيث تستشعر كلُّ ذرة ميزةَ الغلاف المغلق (الممتلئ). أما الهيليوم، الذي به غلافٌ ممتلئ بالفعل، فإنه لا يكترث بأيِّ عَرَض من هذا القبيل، ويمتنع عن التفاعل كيميائيًّا مع أي شيء.

يحتوي الكربون على ستة بروتونات في نواته وستة إلكترونات خارجها. ويشغل اثنان من هذه الإلكترونات الغلافَ الداخلي المغلق، ليتبقى بذلك أربعة إلكترونات مرتبطة بالغلاف التالي، الذي هو نصف فارغ. وتستطيع الذرات الأربع من الهيدروجين طلبَ مشاركة واحد من الإلكترونات الأربعة الخارجية لذرة الكربون والمساهمة بإلكترونها الخاص في هذه العملية. وتنتهي كلُّ ذرة هيدروجين بغلافٍ شبهِ ممتلئ بإلكترونَين داخليين، بينما يصبح الغلاف الثاني لكل ذرة كربون شبهَ ممتلئ بثمانية إلكترونات.

ووفقًا لما قاله بور، فإنَّ الذرات تتَّحد بحيث تقرُب قدْر المستطاع من الحصول على غلافٍ خارجيٍّ مغلق. وفي بعض الأحيان، كما في حالة جزيء الهيدروجين، يكون من الأفضل أن نفكِّر في زوجٍ من الإلكترونات تتقاسمه نواتان، وفي حالاتٍ أخرى تكون الصورة المناسبة أن نتخيَّل ذرةً تحتوي على إلكترونٍ زائد في غلافها الخارجي (ربما ذرة الصوديوم مثلًا) وتتخلَّى عن هذا الإلكترون لصالحِ ذرةٍ يحتوي غلافها الخارجي على سبعة إلكترونات وبه مكانٌ شاغر لإلكترونٍ واحد (في هذه الحالة، قد تكون هذه هي ذرة الكلور). وتصبح كل ذرة سعيدة؛ الصوديوم سعيد بفقد إلكترون؛ مما يجعل الغلاف الداخلي الممتلئ «مرئيًّا»، والكلور سعيد باكتساب إلكترون يجعل غلافه الخارجي ممتلئًا. ولكن تكون المحصلة بذلك أن ذرةَ الصوديوم تصبح أيونًا موجبَ الشحنة بفقدها وحدةً واحدة من الشحنة السالبة، بينما تصبح ذرة الكلور أيونًا سالبًا. وحيث إن الشحنات

المتضادة تتجاذب، فإن الأيونَين يتَّحد أحدهما بالآخر ليكوِّنا جزيئًا متعادلَ الشحنة من كلوريد الصوديوم؛ ملح الطعام.



شكل ٤-٤: تتوصَّل ذرة الصوديوم بتخلِّيها عن إلكترونها الخارجي الوحيد إلى التكوين المرغوب وفقًا لميكانيكا الكَمِّ، وتصبح الذرة موجبةَ الشحنة. ويملأ الكلور غلافه الخارجي بقبوله إلكترونًا إضافيًّا، ليصبح به ثمانية إلكترونات ويكتسب شحنةً سالبة. وتتماسك الأيونات المشحونة معًا لتصنع الجزيئات وبلورات ملح الطعام (NaCl) بواسطة القوى الكهروستاتيكية.

يمكن تفسير كل التفاعلات الكيميائية بهذه الطريقة؛ إما مشاركة إلكترونات أو مقايضتها بين الذرات بغرضِ الوصول إلى الاستقرار الذي يميِّزه امتلاء الأغلفة الإلكترونية. ويترتَّب على انتقالات الطاقةِ المتضمِّنة للإلكترونات الخارجية بصمةُ الطيف المميِّزة للعنصر، أما الانتقالات المتضمِّنة للأغلفة الداخلية (ومن ثَم المشتمِلة على كميَّةٍ أكبرَ من الطاقة، في جزء أشعة إكس من الطيف)، فلا بد أن تكون واحدة لكل العناصر، كما ثبت بالفعل. ومثل أفضل النظريات، تأكَّد نموذجُ بور بواسطة تنبؤٍ مُوفَّق. فمن خلال ترتيب العناصر في جدولٍ دوري، وحتى سنة ١٩٢٢، كانت هناك فراغاتٌ تُقابل عناصرَ لم تُكتشَف بعدُ بالأعداد الذرية ٤٣ و٦١ و٧٢ و٧٥ و٨٥ و٨٧. وتنبَّأ نموذجُ بور بالخصائص التفصيلية لهذه العناصرِ «الناقصة» واقترح أن يكون للعنصر ٧٢ على وجه

التحديد، خصائصُ مماثلة للزركونيوم، وهو التنبؤ الذي يتعارض مع التنبؤات القائمة على النماذج البديلة للذرة. وقد تأكَّدت صحةُ هذا التنبؤ في غضونِ عامٍ واحد مع اكتشافِ الهافنيوم، العنصر ٧٢، الذي اتضح أن له خصائصَ طيفيةً متطابقةً تمامًا مع تلك التي تنبَّأ بها بور.

كانت هذه هي ذروة نظريةِ الكَمِّ القديمة. وقد أُطيحَ بهذه النظريةِ في غضون ثلاث سنوات، وإن كان يتوجَّب عليك فيما يتعلَّق بالكيمياء معرفةُ ما هو أكثر قليلًا من فكرة الإلكترونات على أنها جسيماتٌ دقيقةٌ تدور حول نواة الذرة في أغلفةٍ «تميل» إلى أن تصبح ممتلئة (أو فارغة، ولكن من المفضَّل ألا تكون في حالةٍ بين الوضعَين).[8] وإذا كنت من المهتمين بفيزياء الغازات، فأنت تحتاج إلى ما هو أكثر قليلًا من صورةِ الذرات على أنها كرات بلياردو صلبةٌ غير قابلة للإتلاف. وسوف تصلح فيزياء القرن التاسع عشر للأغراض الحياتية اليومية، بينما ستصلح فيزياء سنة ١٩٢٣ لمعظم النواحي المتعلِّقة بالكيمياء، في حين تأخذنا فيزياء الثلاثينيات من القرن العشرين إلى ما هو أبعد من أي نقطةٍ بلغها حتى الآن أيُّ شخص خلال البحث عن الحقائق المطلقة. وعلى مدى أكثر من خمسين عامًا، لم تحدث أيُّ طفرة يمكن أن تضاهي ثورةَ الكَمِّ، وطَوال هذا الوقت كانت بقيةُ العلوم تحاول اللَّحاق برَكْب حَفنةٍ من العباقرة وإدراكَ الآراء والأفكار التي قدَّموها. وقد جاء نجاح تجربة «أسبكت» في باريس في بداية ثمانينيات القرن العشرين لتعلن عن بداية نهاية هذه الفترة من اللَّحاق بالرَّكْب، وذلك مع أول إثبات عن طريق التجربة المباشرة على أنه حتى أكثر السمات غرابة لميكانيكا الكَمِّ تكون عبارةً عن وصفٍ حرفي للحالة التي عليها الأشياء في العالم الواقعي. وقد حان الوقت لنكتشف مدى الغرابة التي عليها حقًّا عالَمُ الكَمِّ.

هوامش

(1) One version of the story has it that the move was a result of a disagreement between Bohr and Thomson about Thomson's model of the atom, which Bohr didn't like, and that J. J. quietly suggested that Rutherford might be more receptive to Bohr's ideas. See E. U. Condon, quoted by Max Jammer on page 69 of *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*.

(2) The full quantum theory tells us that light is both particle *and* wave, but we haven't got there yet.

(3) A simple version of the formula says that the wavelengths of the first four hydrogen lines are given by multiplying a constant (36.456×10^{-5}) by 9/5, 16/12, 25/21, and 36/32. In this version of the formula, the top of each fraction is given by the sequence of squares (3^2, 4^2, 5^2, 6^2); the denominators are differences of squares, $3^2 - 2^2$, $4^2 - 2^2$, and so on.

(4) When dealing with electrons and atoms everyday energy units are rather too large for convenience, and the appropriate unit is the electron Volt (eV), which is the amount of energy an electron would pick up in moving across an electric potential difference of one Volt. The unit was introduced in 1912. In more everyday terms, an electron Volt is 1.602×10^{-19} joule, and one Watt is one joule per second. An ordinary light bulb burns energy at a rate of 100 Watts, which if you want to you can express as 6.24×10^{20} eV per second. It certainly sounds more impressive to say my light radiates six and a quarter hundred million trillion electron volts a second, but the energy is the same as when it was a hundred-watt lamp. The energies involved in electron transitions that produce spectral lines are a few eV—it takes just 13.6 eV to knock the electron right out of a hydrogen atom. The energies of particles produced by radioactive processes are several millions of electron Volts, or MeV.

(5) In fact, the Balmer series in hydrogen's spectrum does correspond to the transitions that end on level two.

(6) Quoted in Mehra and Rechenberg, volume 1, page 357.

(7) *Op. cit.*, page 359.

(8) I am, of course, exaggerating the simplicity of chemistry here. The "little more" that is needed to explain more complex molecules was developed in the late 1920s and early 1930s, using the fruits of the full development of quantum mechanics. The person who did most of the work

was Linus Pauling, more familiar today as a peace campaigner and proponent of vitamin C, who received the first of his two Nobel Prizes for the work, being cited in 1954 “for his research into the nature of the chemical bond and its application to the elucidation of the structure of complex substances”. Those “complex substances” elucidated with the aid of quantum theory by Pauling, a physical chemist, opened the way to a study of the molecules of life. The key significance of quantum chemistry to molecular biology is acknowledged by Horace Judson in his epic book *The Eighth Day of Creation*; the detailed story, alas, is beyond the scope of the present book.

الجزء الثاني

ميكانيكا الكَمِّ

«كلُّ العلوم إما فيزياء وإما ضربٌ من جَمْع الطوابع.»

إرنست رذرفورد
١٨٧١–١٩٣٧

الفصل الخامس

الفوتونات والإلكترونات

على الرغم من نجاح بلانك وبور في بيان السبيل إلى فيزياء تختص بالأشياء المتناهية الصغر، والتي تختلف عن الميكانيكا الكلاسيكية، فإن ميكانيكا الكَمِّ كما نعرفها اليوم لم تبدأ إلا مع تقبُّل فكرةِ أينشتاين عن الكَمِّ الضوئي (الفوتون)، والتحقُّق من أن الضوء لا بد أن يُفسَّر بمدلولِ كلٍّ من الجسيمات والموجات. ومع أن أينشتاين ذكرَ الكَمَّ الضوئي (الفوتون) لأول مرة في ورقته البحثية لسنة ١٩٠٥ عن الظاهرة الكهروضوئية، فإن الفكرة لم تحظَ بالقبول والاحترام حتى سنة ١٩٢٣. وكان أينشتاين نفسُه يمضي في أبحاثه بحرص، وهو مدركٌ تمامًا للتبعات الثورية المترتِّبة على هذا البحث، ومن ثَمَّ أخبر المشاركين في مؤتمر سولفاي الأول سنة ١٩١١ بذلك قائلًا: «إنني أصرُّ على الطابع المؤقَّت لهذا المفهوم، الذي لا يبدو قابلًا للتوفيق مع النتائج المترتبة على النظرية الموجية التي أثبتت التجارِب صحتَها.»[1]

ومع أن ميليكان قد أثبت سنة ١٩١٥ صحةَ معادلةِ أينشتاين للظاهرة الكهروضوئية، فإن تقبُّل حقيقةِ وجودِ جسيمات الضوء كان فيما يبدو لا يزال غير منطقي، وبالنظر إلى أبحاثه في أربعينيات القرن العشرين قائلًا: «لقد اضطُررت سنة ١٩١٥ أن أؤكِّد على صحتها القاطعة على الرغم من عدم معقوليتها ... وقد بدت وكأنها تتعارض مع كلِّ ما نعرفه عن تداخل الضوء.» وقد عبَّر عما يجول في نفسه في ذلك الوقت بقوة. وفي أثناء تصريحاته عن التحقُّق من دقة معادلة أينشتاين للظاهرة الكهروضوئية تجريبيًّا، راحَ يقول: «يبدو أن النظرية شبه الجسيمية التي وصل أينشتاين من خلالها إلى معادلتِه لا يمكن الدفاعُ عنها كليًّا في الوقت الراهن.» كتب ذلك سنة ١٩١٥، وفي سنة ١٩١٨ علَّق رذرفورد بأنه لا يوجد فيما يبدو «تفسيرٌ فيزيائي» للعلاقة بين الطاقة والتردُّد التي شرحها أينشتاين منذ ثلاثة عشر عامًا ضمْن فرضيتِه عن الكَمِّ الضوئي. ولم يكن الأمر

أن رذرفورد لا يعرف اقتراح أينشتاين، بل إنه لم يقتنع به. وبما أنَّ كل التجارب التي صُمِّمت لاختبار النظرية الموجية للضوء قد أوضحت أن الضوء يتكوَّن من موجات، فكيف إذن يمكن أن يتكوَّن الضوء من جسيمات؟[2]

جسيماتُ الضوء

سنة ١٩٠٩، وبينما كان أينشتاين يوشك أن يترك العملَ كموظفٍ في مكتب براءات الاختراع، وتَقلَّد أولَ منصبٍ أكاديمي له كأستاذٍ مشارك في زيورخ، أخذ خطوةً صغيرة ولكنها مهمةٌ وذاتُ مغزًى، عندما أشار لأول مرة إلى «الكَمِّ النقطي والطاقة $h\nu$». في الميكانيكا الكلاسيكيةِ تُمثَّل الجسيماتُ مثل الإلكترونات بأجسامٍ تشبِه «النقطة»، وهذا يختلف تمامًا عن أي وصف بمدلول الموجات، باستثناء أن تردُّد الإشعاع ν يخبِرنا بطاقةِ الجسيم. وقد قال أينشتاين سنة ١٩٠٩: «في رأيي أن المرحلةَ القادمة في تطوُّر الفيزياء النظرية سوف تتمخَّض عنها نظريةٌ للضوء يمكن تفسيرُها كضربٍ من الدمج بين نظريتَي الموجات والانبعاث».

يضرِب هذا التعليق، الذي قلَّما لاحظه أحدٌ في ذلك الوقت، نظريةَ الكَمِّ الحديثة في الصميم. وقد عبَّر بور في عشرينيات القرن العشرين عن هذا الأساس الجديد للفيزياء بمصطلح «مبدأ المكاملة» الذي ينصُّ على أن النظريتَين الموجية والجسيمية للضوء (في هذه الحالة) لا تستبعد أيٌّ منهما الأخرى، ولكن إحداهما تكمل الأخرى. وكلا المفهومين ضروريٌّ لتقديمِ وصفٍ شامل، ويتضح ذلك بشدةٍ في الحاجة إلى قياس طاقة «جسيم» الضوء من حيث تردُّده، أو طوله الموجي.

ومع ذلك، بعد فترةٍ وجيزة من التصريح بهذه الملاحظات، كفَّ أينشتاين عن التفكيرِ بشكلٍ جادٍّ في نظريةِ الكَمِّ فيما وضع نظريته عن النظرية العامة. وعندما عاد إلى مُعترَكِ الكَمِّ سنة ١٩١٦، كان في جَعبته تطورٌ منطقيٌّ آخرُ لموضوع الضوءِ والكَمِّ. وقد ساعدت أفكاره الإحصائية، كما رأينا، في تنظيم الصورة الخاصة بذرة بور وتحسين وصف بلانك لإشعاع الجسم الأسود. وقد فسَّرت أيضًا هذه العملياتُ الحسابيةُ لآليةِ امتصاصِ المادةِ للإشعاعِ أو إطلاقِه، كيفيةَ انتقال الزخم من الإشعاع إلى المادة وهي الحسابات، وذلك بشرط أن كلَّ كَمٍّ من الإشعاع $h\nu$ يحمل معه زخمًا $h\nu/c$. ويرجع هذا البحث إلى موضوعِ بحثٍ آخرَ من الأبحاث العظيمة التي صدرت سنة ١٩٠٥، حول الحركةِ البراونية. وكما

أن ذرات الغاز أو السائل تضرب حبوب اللقاح لتبرهنَ حركتَها على حقيقةِ وجود الذرات، كذلك تضرِب «جسيمات» إشعاعِ الجسمِ الأسودِ الذراتِ نفسَها. ولا يمكن رصد «الحركة البراونية» للذرات والجزيئات بالملاحظة المباشرة، بيْد أن عمليات التصادم تتسبَّب في حدوثِ تأثيراتٍ إحصائية يمكن قياسها بمدلولِ خصائصَ مثل ضغط الغاز. وقد فسَّر أينشتاين هذه التأثيرات الإحصائية بمدلول جسيمات إشعاع الجسم الأسود التي تحمل الزخم.

ومع ذلك، فإن التعبير نفسه الموضوع لحساب زخم جسيم الضوء مأخوذ مباشرةً من النسبية الخاصة، بطريقةٍ بسيطةٍ جدًّا. في نظرية النسبية، تُصاغ العلاقة بين الطاقة (E) والزخم (p) وكتلة السكون (m) للجسيم بالمعادلة البسيطة:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

وحيث إن جسيم الضوء ليست له كتلة سكون، فإن هذه المعادلة تُختزل مباشرةً إلى:

$$E^2 = p^2c^2$$

أو بصورةٍ أبسط: $p = E/c$. وقد يبدو مستغرَبًا أن أينشتاين استغرقَ كلَّ هذا الوقت ليصل إلى هذه العلاقة، بيدَ أن ذهنه كان مشغولًا حينئذٍ بأمورٍ أخرى، مثل النسبية العامة. ولكن لا شك أنه بمجرَّد أن توصَّل إلى هذه العلاقة، اكتسبت القضية قوةً أكبرَ بكثير من خلال التوافق بين الأدلة الإحصائية ونظرية النسبية. (ومن وجهةِ نظرٍ أخرى، بما أنَّ الإحصاءات توضِّح أن $p = E/c$، يمكنك الدَّفع إذن بأن المعادلات النسبية قد أثبتت بذلك أن جسيم الضوء له كتلة سكون تساوي صفرًا.)

وكان هذا البحثُ هو الذي أقنع أينشتاين نفسَه بأن الكَمَّ الضوئيَّ له وجودٌ حقيقي. ولم يظهر مسمًّى «فوتون» للإشارة إلى جسيم الضوء إلا سنة ١٩٢٦ (على يد جيلبرت لويس المقيم في بيركلي بكاليفورنيا)، ولم يُدرَج ضمن المصطلحات العلمية إلا بعد مؤتمر سولفاي الخامس الذي عُقِدَ تحت عنوان «الإلكترونات والفوتونات» سنة ١٩٢٧. لكن مع أن أينشتاين انفردَ سنة ١٩١٧ باعتقاده في حقيقةِ ما يُسمَّى الآن بالفوتونات، يبدو أن هذا هو الوقت المناسب لتقديم الاسم. وقد استلزم الأمرُ ست سنوات أخرى قبل تقديمِ دليلٍ تجريبيٍّ مباشر لا يقبل الجدل على حقيقةِ وجودِ الفوتونات على يد الفيزيائي الأمريكي آرثر كومبتون.

عكفَ كومبتون على إجراء أبحاثٍ عن أشعة إكس منذ سنة ١٩١٣. وقد عمل في عدة جامعاتٍ أمريكية وفي مختبر كافنديش بإنجلترا. وقادته سلسلةٌ من التجارب في بداية عشرينيات القرن العشرين إلى استنتاجِ أن التداخل بين أشعة إكس والإلكترونات لا يمكن تفسيره إلا إذا جرى التعامل مع أشعةِ إكس بطريقةٍ أو بأخرى على أنها جسيمات؛ أي فوتونات. كانت التجاربُ الأساسية تُعنى بالطريقة التي تتشتَّت بها أشعة إكس بواسطة الإلكترون، أو بلغة الجسيمات، الطريقة التي يتداخل بها الفوتون والإلكترون عندما يصطدمان. فعندما يضرب فوتون أشعةِ إكس إلكترونًا ما، يكتسب الإلكترون طاقةً وزخمًا وينحرف بزاوية معيَّنة عن مساره السابق. أما الفوتون نفسُه، فيفقد طاقةً وزخمًا وينحرف بزاوية مختلِفة، يمكن حسابها من خلال القوانين البسيطة لفيزياء الجسيمات. ويشبه هذا التصادم تأثيرَ كرةِ البلياردو المتحرِّكة على كرة ثابتة، ويحدث انتقال الزخمِ بالطريقةِ نفسِها بالضبط. ولكن في حالةِ الفوتون يعني فقدُ الطاقةِ تغيُّرَ تردُّد الإشعاع بمقدار $h\nu$ التي اكتسبها الإلكترون. ونحتاج إلى الوصفَين، الجسيم والموجة، للتوصُّل إلى تفسيرٍ كامل للتجربة. عندما أجرى كومبتون هذه التجارب، اكتشف أن التداخل يحدث على نحوٍ متوافقٍ تمامًا مع هذا الوصف؛ ذلك حيث جاءت زوايا التشتُّت وتغيُّرات الطول الموجي وارتداد الإلكترون متوافقةً تمامًا مع فكرةِ أن أشعة إكس تأتي في صورة جسيمات طاقتها $h\nu$. وتُسمَّى هذه العملية الآن بـ «تأثير كومبتون»، وقد حصل كومبتون سنة ١٩٢٧ على جائزة نوبل عن هذه الأبحاث.[3] بعد سنة ١٩٢٣، كانت حقيقةُ أن الفوتونات جسيماتٌ تحمل الطاقةَ والزخم قد أُثبِتت (على الرغم من أن بور ظلَّ فترةً يناضل بشدة ليجد تفسيرًا بديلًا لظاهرة كومبتون، ولم يدرك على الفور ضرورةَ تضمينِ كلٍّ من وصفَي الجسيمات والموجات في نظريةٍ جيدة عن الضوء، ورأى نظريةَ الجسيمات على أنها منافسٌ لنظرية الموجات المتضمَّنة في النموذج الذي وضعه للذرة). ولكن، ظلت كلُّ الأدلة على الطبيعة الموجية للضوء قائمة. وكما قال أينشتاين سنة ١٩٢٤: «وبذلك، توجد الآن نظريتان للضوء، وكلتاهما لا غنَى عنها ... بلا أي ارتباطٍ منطقي».

وقد شكَّلت العلاقة بين هاتَين النظريتَين الأساسَ الذي تطوَّرت به ميكانيكا الكَمِّ في السنوات المضطربة التالية. وكان التقدُّم يحدث على عدةِ جبهاتٍ مختلِفة في آنٍ واحد، وكانت الأفكارُ والاكتشافات الجديدة لا تأتي بالتنسيق والترتيب اللازمَين لبناء الفيزياء الجديدة. وحتى نقدِّم قصةً مترابطةً ومتسقة، لا بد أن تكون روايتي أكثرَ ترتيبًا عمَّا كان عليه العِلمُ نفسُه في ذلك الوقت، وإحدى الطرق إلى ذلك هي تمهيد الطريق بسردِ المفاهيمِ

ذاتِ الصلة قبل وصف ميكانيكا الكَمِّ نفسِها، مع أنَّ نظريةَ الكَمِّ كانت قد بدأت تتطور، ولم تكن بعض هذه المفاهيم قد فُهِمَت بعدُ. كما أن النتائجَ الكاملة لازدواجية الجسيم والموجة لم تكن قد حظيت بتقديرٍ بعدُ عندما بدأت ميكانيكا الكَمِّ في التبلور واتخاذِ شكلٍ واضح، إلا أنه في أي وصفٍ منطقي لنظريةِ الكَمِّ لا بد أن تكون الخطوةُ التالية بعد اكتشاف الطبيعة الازدواجية للضوء هي اكتشافَ الطبيعة الازدواجية للمادة.

ازدواجية الجسيم والموجة

انبثقَ هذا الاكتشافُ من اقتراحٍ قدَّمه نبيلٌ فرنسيٌّ يُدعَى لويس دي بروي. ومع أنه اقتراحٌ بسيط، إلا أنه يضرِب في صميم المادة. ويمكننا تخيُّل دي بروي وهو يتفكَّر: «إذا كانت موجات الضوء تسلك مسلكَ الجسيمات، فلماذا لا تسلكُ الإلكترونات أيضًا مسلكَ الموجات؟» ولو أنَّه توقَّف عند هذا الحد، لما كان بالطبع أتى ذكرُه بوصفِه أحدَ مؤسِّسي نظريةِ الكَمِّ، ولم يكن ليحصل على جائزةِ نوبل سنة ١٩٢٩. فلو كانت الفكرةُ مجرَّد تخمينٍ تافه، لما كانت لها قيمةٌ تُذْكر؛ فقد وردت تخميناتٌ شبيهة حول أشعة إكس قبل أبحاث كومبتون بفترةٍ طويلة، سنة ١٩١٢ على أقلِّ تقدير، عندما قال الفيزيائي العظيم دبليو إتش براج (وهو الآخر حاصل على جائزة نوبل) عن حالة فيزياء أشعة إكس في ذلك الوقت: «إنَّ المشكلة، فيما يبدو لي، ليست في الفصل بين نظريتَين عن أشعة إكس، ولكن في إيجاد … نظرية تمتلك كفاءةَ النظريتَين.»[4] وكان إنجاز دي بروي الأكبرُ أنه تناول فكرةَ ازدواجية الجسيم والموجة وعالجها رياضيًّا؛ حيث وصف المسلك الذي ينبغي أن تسلكه موجات المادة واقترح طرقًا ربما يمكن من خلالها رصدُ الموجات ومشاهدتها. وحِيزَ له امتيازٌ كبيرٌ بوصفه عضوًا يافعًا نسبيًّا في جمعية الفيزياء النظرية، وهو أخوه الأكبر موريس، الذي كان عالِمًا موقرًا في الفيزياء التجريبية، والذي وجَّهه وقاد خطواته نحو هذا الاكتشاف. وقد قال لويس دي بروي فيما بعدُ إن موريس قد أكَّد له في محادثاتهم «أهمية السمات المزدوجة للجسيم والموجة وحقيقتها التي لا سبيل إلى إنكارها.» كانت هذه هي الفكرة التي آنَ الأوان لطرحها، وكان لويس دي بروي محظوظًا لوجوده وتأهُّبِه في ذلك الوقت الذي من الممكن فيه أن يؤدي حدْسٌ مفاهيميٌّ بسيط إلى تحوُّلٍ في الفيزياء النظرية. ولكنه كان بالطبع مَن أنجز معظمَ هذه الطفرةِ الحدْسية.

وُلِدَ دي بروي سنة ١٨٩٢. وكانت تقاليدُ الأسرة تقتضي توجيهه إلى تقلُّد وظيفةٍ في الخدمة المدنية، لكنه عندما التحق بجامعة باريس سنة ١٩١٠ توقَّد داخله اهتمامٌ

بالغٌ بالعلوم، ولا سيما ميكانيكا الكَمِّ، وهي العالَم الذي فتحه له جزئيًّا أخوه (الأكبر منه بسبعة عشر عامًا) الذي حصل على الدكتوراه سنة ١٩٠٨، ونَقل إلى لويس أخبارَ أول مؤتمراتِ سولفاي بوصفه أحدَ الأمناء العِلميين لهذا المؤتمر. لكن بعد عامَين توقَّفت دراسته للفيزياء بسبب الخدمة العسكرية الإلزامية سنة ١٩١٣، التي كان من المفترض أن تكون فترةً قصيرة، إلا أنها امتدت حتى سنة ١٩١٩ بسببِ الحربِ العالمية الأولى. وعندما عاود دي بروي نشاطه البحثي بعد الحرب، عاد إلى دراسة نظريةِ الكَمِّ، وبدأ في مواصلة العمل بالنهجِ نفسِه الذي قاده إلى اكتشافِ اتحادِ نظريتَي الجسيمات والموجات الأساسي. وحدث الإنجاز الحقيقي سنة ١٩٢٣ عندما نشر ثلاث ورقاتٍ بحثية حول طبيعةِ الكَمِّ الضوئي في مجلة «كومبت راندو» الفرنسية وكتب ملخَّصًا بالإنجليزية لهذه الأبحاث ظهر في مجلة «فيلوسوفيكال ماجازين» في فبراير ١٩٢٤. ولم تترك هذه المساهماتُ القصيرةُ أثرًا كبيرًا، إلا أن دي بروي بدأ على الفور في ترتيب أفكاره وتقديمها في صورةٍ أكثرَ شموليةً في رسالته للدكتوراه. وعُقِدَ امتحانه في السوربون في نوفمبر ١٩٢٤ ونُشِرَت الرسالةُ في أوائل سنة ١٩٢٥، في مجلة «أنال دي فيزيك». وكانت هذه هي الطريقةَ التي جعلت أساسَ أبحاثه واضحًا، وأحدثت شررَ أول التطورات الكبرى في الفيزياء خلال عشرينيات القرن العشرين.

بدأ دي بروي رسالتَه بالمعادلتَين اللتين وضعهما أينشتاين للكَمِّ الضوئي:

$$E = h\nu;\ p = h\nu/c$$

في هاتَين المعادلتَين، تظهر الخصائصُ التي «تخصُّ» الجسيمات (الطاقة والزخم) إلى اليسار، وتظهر الخصائصُ التي «تخصُّ» الموجات (التردد) إلى اليمين. وقد أشار إلى أن فشلَ التجاربِ في الإقرار القاطع بما إذا كان الضوءُ موجةً أو جسيمًا يرجع حتمًا إلى أن كلا النمطَين من السلوك متداخلٌ على نحوٍ معقَّد؛ فحتى لكي تقيس خاصية الزخم لدى الجسيم، لا بد أن تعرفَ خاصية التردُّد لدى الموجة. ومع ذلك، فإن هذه الازدواجية لا تنطبق على الفوتونات وحدها. كان من المعتقَد في ذلك الوقتِ أن الإلكترونات جسيماتٌ جيدة، تسلُك مسلكًا منضبطًا، باستثناء الطريقةِ الغريبةِ التي تشغل بها مستويات الطاقة المختلِفة داخل الذرة. ولكن، أدرك دي بروي أن حقيقةَ أن الإلكترونات لا توجد إلا في «مداراتٍ» محدَّدة بواسطةِ أعدادٍ كلية (صحيحة) تبدو شبيهةً أيضًا بطريقةٍ أو بأخرى لخاصية الموجات. وقد كتب في رسالته: «إن الظواهر الوحيدة التي تتضمَّن أعدادًا صحيحة

في الفيزياء هي تلك المتعلِّقة بالتداخل وبأنماط التذبذب العمودي». ثم أضافَ: «أوحت لي هذه الحقيقةُ بفكرةِ أن الإلكترونات هي الأخرى لا يمكن النظرُ إليها ببساطة على أنها جسيمات، لكنها لا بد أن تتصفَ كذلك بالتشابه الدوري للخصائص.»

«الأنماط العمودية للتذبذب» هي ببساطة التذبذبات التي تُحدِث النغمات في وترِ الكمان أو تُحدِث موجةَ الصوت في أنبوب الأرغن. فمن الممكن على سبيل المثال أن يتذبذب وترٌ مشدودٌ بقوةٍ بحيث يكون طرفاه مُثبَّتين بينما يتحرَّك منتصفه ذهابًا وإيابًا. وإذا لمستَ منتصفَ الوتر، فسيهتزُّ كلُّ نصفٍ متذبذبًا بالشكلِ نفسِه، ويَثبُت المنتصف، وهذا «النَّمط» الأعلى من التذبذب يقابل أيضًا نغمةً أعلى، إيقاعًا موسيقيًّا أعلى، للوترِ الكامل غير المتأثِّر. في الحالة الأولى، يكون الطول الموجي ضِعفَ ما هو عليه في الحالة الثانية، ويمكن أن تتوافق الأنماطُ الأعلى من التذبذبات — التي تقابل نغماتٍ أعلى بالتتابع — مع الوتر المهتز بشرط أن يكون طول الوتر دائمًا عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية (١ و٢ و٣ و٤ وهكذا). ومن ثَم فإن بعض الموجات فقط، بترددات معيَّنة، هي التي تتوافق مع الوتر.

يشبه هذا الأمرُ في الحقيقة الطريقةَ التي «تتوافق» بها الإلكترونات في الذرة مع الحالات المقابلة لمستويات الطاقة الكمومية ١ و٢ و٣ و٤ وهكذا. وبدلًا من وترٍ مستقيمٍ مشدود، تخيَّل وترًا قد انثنى على نفسِه على شكل دائرة، «مدار» حول الذرة. يمكن لموجةِ ذبذبةٍ ثابتةٍ أن تسري بنجاح على امتداد الوتر، بشرط أن يكون طولُ المحيط عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية. وبالنسبة إلى أي موجة لا «تتوافق» بدقةٍ مع الوتر على هذا النحو، فإنها لن تكون ثابتةً وستتلاشى عندما تتداخل مع نفسِها. ولا بد أن يكون طرفا الوتر متماسكَيْن جيدًا، وإلا فسينهار الوتر ويتفكَّك. فهل يفسِّر ذلك إمكانيةَ قياسِ حالات الطاقة في الذرة كميًّا، بحيث تقابل كلُّ حالةِ رنينِ موجةَ إلكترون له ترددٌ معيَّن؟ وعلى غرار التشبيهات العديدة القائمة على ذرة بور — بل في الحقيقة على غرارِ كلِّ التصوُّرات الفيزيائية للذرة — فإن هذا التصوُّرَ بعيدٌ كل البُعد عن الحقيقة، لكنه ساعدَ في التوصُّل إلى فهْمٍ أفضلَ لعالَمِ الكَمِّ.

موجات الإلكترونات

كان دي بروي يفكِّر في الموجات على أنها مرافِقةٌ للجسيمات، وأشار إلى أن جسيمًا مثل الفوتون تُوجِّهه في الحقيقة الموجةُ المرافقة المرتبِط بها هذا الجسيم. وكانت النتيجةُ تقديمَ

وصفٍ رياضيٍّ دقيقٍ وتفصيلي لسلوك الضوء، تضمَّن الأدلةَ المستقاة من التجارب التي شملت كلًّا من الموجات والجسيمات. وقد أُعجِبَ المشرفون الذين ناقشوا رسالة دي بروي بالشق الرياضي فيها، لكنهم لم يعتقدوا في وجودِ أيِّ معنًى فيزيائي لاقتراح أن هناك موجةً مشابهةً تكون مرافِقة لجسيمٍ مثل الإلكترون، وقد اعتبروا الأمر مجرَّد مراوغةٍ رياضية. لم يوافق دي بروي على ذلك. وعندما سأل أحدُ المشرفين على الرسالة عمَّا إذا كان من الممكن تصميمُ تجربةٍ للكشف عن موجات المادة، أجابَ بأنه من المفترض أنه يمكن الوصولُ إلى المشاهدات المطلوبة عن طريقِ حيودِ شعاعٍ من الإلكترونات الصادرة من بِلَّوْرة. وهذه التجرِبةُ تشبه تمامًا حيودَ الضوء عبْر مجموعةٍ من الشقوق وليس شقَّين اثنين فقط؛ حيث تكون الفجوات بين الذرات المتباعدة بمسافاتٍ منتظمةٍ في البلورة منظومةً كمجموعةٍ من «الشقوق» الضيقة بما فيه الكفاية لإحداثِ حيودِ موجاتِ الإلكترونات ذات الترددُّات العالية (التي يكون طولها الموجي قصيرًا بالمقارنة مع الضوء أو حتى مع أشعة إكس).

كان دي بروي يعلم الطول الموجي المناسب الذي ينبغي البحث عنه؛ حيث إنه بدمج معادلتَي أينشتاين لجسيمات الضوء، حصلَ على العلاقة البسيطة جدًّا $p = h\nu/c$، التي تناولناها من قبلُ. وحيث إن علاقة الطول الموجي بالتردُّد يُعبَّر عنها هكذا: $\lambda = c/\nu$، فإن ذلك يعني $p\lambda = h$، أو بعبارةٍ أبسطَ فإن الزخم مضروبًا في الطولي الموجي يعطينا ثابت بلانك. وكلما كان الطول الموجي أصغر، كان زخم الجسيم المقابل لذلك أكبر، الأمر الذي يجعل الإلكتروناتِ التي لها كتلة صغيرة، وبالتالي زخمٌ صغير، أكثرَ الجسيمات المعروفة وقتها «شبهًا بالموجات». وكما في حالة الضوء تمامًا، أو الموجات التي على سطح البحر، لا يظهر تأثيرُ الحيود إلا عندما تمرُّ الموجة عبْر ثقبٍ أصغرَ كثيرًا من طولها الموجي، ويعني ذلك في حالةِ موجات الإلكترونات وجودَ ثقبٍ صغيرٍ جدًّا في واقع الأمر، يقارب حجم الفجوات بين الذرات في البلورة.

ولكن ما لم يعلمه دي بروي أن التأثيرات التي يمكن تفسيرُها على أفضلِ نحوٍ بمدلول حيودِ الإلكترونات قد لوحظت عندما استُخدِمَت أشعةٌ من الإلكترونات لاختبار البلورات منذ سنة ١٩١٤. ففي عامَي ١٩٢٢ و١٩٢٣، في الوقت الذي كان دي بروي يصيغ فيه أفكاره، كان هناك اثنان من علماء الفيزياء الأمريكيين، هما كلينتون دافيسون وزميله تشارلز كونسمان، بصددِ دراسةِ هذا السلوكِ المتميز للإلكترونات التي تتشتَّت من البِلَّورات. وقد حاول دي بروي التدليلَ على صحَّةِ التجارب بإجراءِ اختبارٍ لفرضية «الإلكترونات والموجات» جاهلًا بأبحاثِ هذين الفيزيائيَّين الأمريكيَّين. وفي هذه الأثناء،

أرسل المشرفُ على رسالةِ دي بروي، ويُدعَى بول لونجفان، نسخةً من الأبحاث إلى أينشتاين الذي رأى فيها ما هو أكثر من مجرَّدِ حيلةٍ رياضيةٍ أو تشبيهٍ، وأيقن أن موجات المادة لا بد أن تكون حقيقية. وقد بعث بدوره بهذه الأخبارِ إلى ماكس بورن في جوتينجن؛ حيث علَّق رئيس قسم الفيزياء التجريبية جيمس فرانك على تجاربِ دافيسون قائلًا: «لقد أثبتَ بالفعل وجودَ التأثير المتوقَّع!»[5]

كان دافيسون وكونسمان يعتقدان على غرارِ غيرهم من الفيزيائيين أن السببَ وراء تأثير التشتُّت يكمُن في تركيب الذرات التي تُقذَف بالإلكترونات، وليس طبيعةَ الإلكتروناتِ نفسَها. وقد نشر فالتر إلزسار، أحدُ تلاميذ بورن، مذكرةً صغيرةً يشرح فيها نتائجَ هذه التجاربِ بمدلول موجات الإلكترونات سنة ١٩٢٥، إلا أن الباحثين التجريبيين لم يتأثروا بما قُدِّم من إعادةِ تفسير لبياناتهم على يد أحد الباحثين النظريين، لا سيَّما أنه كان طالبًا غيرَ معروف لا يتعدَّى عمره واحدًا وعشرين عامًا. وحتى سنة ١٩٢٥، على الرغم من الدليل التجريبي القائم، ظلَّت فكرةُ موجاتِ المادة مفهومًا مبهمًا ليس إلا. ولم يشعر التجريبيون بالضرورةِ المِلحَّة لاختبار فرضية الموجات والإلكترونات عن طريق تجارب الحيود إلا عندما توصَّل إرفين شرودنجر إلى نظريةٍ جديدةٍ عن تركيب الذرة تتضمَّن أفكارَ دي بروي لكنها تتجاوزها كثيرًا. وعندما أُنجزَت هذه التجارب سنة ١٩٢٧، ثبت أن دي بروي كان على صوابٍ تام؛ فالإلكترونات تحيد بواسطة الشبكة البلورية كما لو كانت شكلًا من أشكال الموجات. واكتُشِف ذلك على يدِ مجموعتَين مستقِلَّتين سنة ١٩٢٧؛ دافيسون ومساعدٍ جديدٍ يُدعى ليستر جيرمر في الولايات المتحدة، وجورج طومسون (ابن جيه طومسون) والطالبِ الباحثِ ألكسندر ريد اللذين كانا يعملان في إنجلترا ويستخدمان تقنيةً جديدة. وقد فوَّت دافيسون فرصتَه في الحصول منفردًا على إكليل المجد، واقتسم جائزة نوبل في الفيزياء لسنة ١٩٣٧ مع طومسون عن دراساتهما المستقلة. وذلك لأنه لم يتقبَّل حسابات إلزسار ويقيِّمها بما تستحق. ويمثِّل ذلك تعليقًا تاريخيًّا جيدًا، كان دافيسون نفسُه ليرحِّب بها، كما أنه يلخِّص بدقةٍ السمات الرئيسية لنظريةِ الكَمِّ.

سنة ١٩٠٦ حصل جيه طومسون على جائزة نوبل عن إثباته أن الإلكتروناتِ هي جسيماتٌ، وسنة ١٩٣٧ شهِد بنفسه حصولَ ابنه على جائزة نوبل لإثباته أن الإلكترونات هي موجاتٌ. وقد كان الأب والابن كلاهما على صواب، وكانا يستحِقَّان الجائزتَين تمام الاستحقاق. فالإلكترونات هي جسيماتٌ وموجاتٌ. وبدءًا من سنة ١٩٢٨ فصاعدًا، أصبحت الأدلة التجريبية على ازدواجية الموجات والجسيمات لدى بروي هي السائدة. واكتُشِف

لاحقًا أن جسيماتٍ أخرى، بما في ذلك البروتون والنيوترون،[6] تمتلك خصائص الموجات بما فيها الحيود، وفي سلسلة من التجارب الممتعة في أواخر السبعينيات والثمانينيات من القرن العشرين، أعادَ توني كلاين وزملاؤه في جامعة ملبورن إجراءَ بعض التجارب الكلاسيكية التي برهنت على صحةِ النظرية الموجية للضوء في القرن التاسع عشر، ولكن باستخدامِ شعاعٍ من النيوترونات بدلًا من شعاع الضوء.

الانفصال عن الماضي

جاء الانفصال التامُّ عن الفيزياء الكلاسيكية مع إدراك أن مزيج الموجات والجسيمات لا ينطبق فقط على البروتونات والإلكترونات، بل يشمل أيضًا كلَّ «الجسيمات» وكلَّ «الموجات» التي هي في الواقع مزيجٌ من الاثنين. وكلُّ ما يحدث هو أن مكوِّن الجسيم يطغى بقوةٍ على الخليط في حالِ لو كنا نتحدَّث مثلًا عن كرة بولينج أو مبنًى. لكن ما زالت السِّمة الموجية هنالك تبعًا للعلاقة $p\lambda = h$، مع أنها مهمَلةُ القيمة. أما في عالَم الأشياء المتناهية الصِّغر، حيث تكون للسِّمتَين الجسيمية والموجية للواقع الفعلي الأهميةُ نفسُها، فتسلُك الأشياءُ بالطريقة التي يمكن أن نفهمَها من واقع خبرتنا في عالَم الحياة اليومية. وليس الأمر فقط أن ذرة بور بما فيها من «مدارات» للإلكترونات صورةٌ زائفة وغير حقيقية؛ ذلك أن كلَّ الصور زائفة، وليس في مقدورنا أن نسوِّغ تشبيهًا فيزيائيًّا لفهم ما يحدث داخل الذرات. فالذرات تسلُك مسلكَ الذرات، وليس غير ذلك.

لخَّص سير آرثر إدنجتون الوضع بطريقةٍ رائعة في كتابه «طبيعة العالَم الفيزيائي» المنشور سنة ١٩٢٩. ذلك حيث قال: «لا توجد تصوراتٌ مألوفة يمكن نسجها بخصوص الإلكترون.» وأفضلُ وصفٍ موجَز للذرة هو أن «شئيًا مجهولًا يفعل ما لا نعلمه.» وأشار إلى أن ذلك «لا يبدو نظريةً تنويريةً على وجه الخصوص».

غير أن الفكرة هي أنه على الرغم من عدم معرفتنا بما تفعله الإلكترونات داخل الذرات، فإننا نعرف أن عدد الإلكترونات مهم. فإضافة بعض الأعداد كفيلةٌ بأن تضفي معنًى واضحًا على بعض الكلمات التي قد تبدو جوفاء بلا معنًى.

هذه ليست ملاحظة على سبيل الطرفة. إذا علمنا أن الأعداد لا تتغيَّر، كما أشار إدنجتون منذ أكثر من خمسين سنة، فإن كلَّ أساسيات الفيزياء يمكن ترجمتها إلى مجرَّد «هذيان وثرثرة فارغة». لن يحدثَ فقدٌ للمعنى، بل من الجائز جني فائدةٍ عظيمة إذا أزلنا الترابط الفطري الذي نصنعه في أذهاننا بين الذرات والكرات الصلبة وبين الإلكترونات

والجسيمات الدقيقة. وتتضح الفكرة عن طريق الالتباس الذي يحيط بإحدى خصائص الإلكترون التي تسمَّى «الحركة المغزلية»، ولكنها لا تشبه بأي شكل لُعبة «نحلة الأطفال» (أو الخُذْروف) وحركتها المغزلية، أو دوران الأرض حول محورها أثناء دورانها حول الشمس.

يتضمَّن أحد ألغاز التحليل الطيفي الذري، الذي فشلَ نموذج بور البسيط للذرة في تفسيره، انقسامَ خطوطِ الطيف التي كانت «لا بد» أن تكون مفردة إلى عدة خطوط متقاربة. ولأن كلَّ خط من خطوط الطيف يصاحبه انتقالٌ من إحدى حالات الطاقة إلى حالةٍ أخرى، فإن عدد الخطوط في الطيف يوضح عددَ حالات الطاقة الموجودة في الذرة؛ عدد «الدرجات» الموجودة على سُلَّمِ الكَمِّ، وعمقَ كلِّ درجة. وقد توصَّل الفيزيائيون في أوائل عشرينيات القرن العشرين إلى عدة تفسيراتٍ محتمَلة للبنية التعددية لخطوط الطيف، وذلك من واقع دراساتهم للطيف. وكان أفضل تفسيرٍ هو ما قدَّمه فولفجانج باولي، وقد تضمَّن ذلك وصف الإلكترون بأربعة أعداد كمِّية منفصلة. وقد حدث ذلك سنة ١٩٢٤ عندما كان الفيزيائيون لا يزالون يفكِّرون في الإلكترون على أنه جسيم، ويحاولون تفسيرَ الخصائص الكمومية بمصطلحاتٍ مألوفةٍ مستقاةٍ من عالَم الحياة اليومية. وثلاثة من هذه الأعداد كانت متضمَّنة من قبلُ في نموذج بور، وكان الاعتقاد أنها تصف الزخم الزاوي للإلكترون (السرعة التي يدور بها في مداره) وشكل المدار واتجاهه. أما العدد الرابع فكان لا بد أن يرتبط بخاصيةٍ أخرى للإلكترون، وهي خاصية تجيء في احتمالَين اثنين فقط، لتفسيرِ الانقسامِ المُشاهَد في خطوط الطيف.

ولم يستغرقِ الأمرُ طويلًا ليتعلَّق الناسُ بفكرةِ العددِ الكَمِّي الرابع لباولي الذي يصفُ حركةَ الإلكترون «المغزلية» التي يمكن تصوُّرها على أنها تشير إلى أعلى أو إلى أسفل، مما يجعل العددَ الكَمِّي ذا قيمتَين. كان أول مَن اقترح ذلك هو الفيزيائي الشاب رالف كرونيج الذي كان يزور أوروبا بعد انتهائه من دراساته للدكتوراه في جامعة كولومبيا.[7] وقد اقترح أن يكون للإلكترون حركةٌ مغزلية ذاتية، وهي إما أن تكون موازية للمجال المغناطيسي للذرة أو في اتجاه عكس التوازي قيمته نصف الوحدات الطبيعية $(h/2\pi)$.[8] وممَّا أثار استغرابه أن باولي نفسَه قد عارضَ الفكرة بشدة، وذلك على الأغلب لأنها غيرُ متفقة مع فكرة الإلكترون بوصفه جسيمًا في إطار نظرية النسبية. وكما أن الإلكترون الذي يدور في مدارٍ حول النواة «يجب» ألا يكون مستقرًّا تبعًا للنظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية، فإن الإلكترون في الحركة المغزلية «يجب» ألا يكون مستقرًّا تبعًا لنظرية النسبية. وربما

كان على باولي أن يكون أكثرَ تفتحًا ذهنيًّا، لكن كانت النتيجة أن كرونيج تخلَّى عن الفكرة ولم ينشرها قط. وبعد أقلَّ من عام، طُرِحَت الفكرةُ نفسُها من كلٍّ من جورج أولنبيك وصمويل جودسميت من معهد الفيزياء النظرية في ليدن، وقد نشرا الاقتراحَ في المجلة الألمانية «ناتورفيسنشافتين» أواخر سنة ١٩٢٥، وفي مجلة «نيتشر» سنة ١٩٢٦.

وسرعان ما نُقِّحَت نظرية الإلكترون ذي الحركة المغزلية لتفسِّر نهائيًّا مسألةَ انقسام خطوط الطيف، وبحلول مارس ١٩٢٦ أصبح باولي نفسُه مقتنعًا بها. لكن ما المقصود بالحركة المغزلية؟ إذا حاولت تفسيرَ مفهومها باللغة العادية، فإنه مثل بقيةِ مفاهيمِ الكَمِّ سيراوغك كثيرًا. وقد يُقال لك في أحد «التفسيرات» مثلًا (على نحوٍ صحيح وفقًا للمعلومات المتوفِّرة) أن الحركة المغزلية للإلكترون ليست مثل الحركة المغزلية لِلعبة «نحلة الأطفال»؛ لأن الإلكترون لا بد أن يدور مغزليًّا مرتَين ليعود إلى نقطة البداية. ومرة أخرى، كيف يمكن لموجةِ الإلكترون أن تدور مغزليًّا على أية حال؟ لم يكن هناك مَن هو أسعد مِن باولي عندما تمكَّن بور سنة ١٩٣٢ من التوصُّل إلى أن الحركة المغزلية للإلكترون لا يمكن قياسها بواسطةِ أيِّ تجرِبة كلاسيكية، مثل انحراف أشعة الإلكترونات عن طريق مجال مغناطيسي. ولا تظهر هذه الخاصية إلا في التداخلاتِ الكَمِّية مثل تلك التي ينتج عنها انقسامُ خطوط الطيف، وليس لها أيُّ معنًى كلاسيكي على الإطلاق. وكم كان الأمر سيصبح سهلًا أمام باولي ورفاقه — الذين ناضلوا ليفهموا الذرة في عشرينيات القرن العشرين — لو أنهم تحدَّثوا عن الإلكترون بوصفه يتحرَّك حركةً «حلزونية» بدلًا من «مغزلية» في المقام الأول.

وللأسف فإننا ملتزمون الآن بمصطلح «الحركة المغزلية»، ولا تجدي على الأرجح محاولاتُ استخدام المصطلحات الكلاسيكية في فيزياءِ الكَمِّ. ومن الآن فصاعدًا، إذا صادفتك كلمةٌ غيرُ مألوفة في سياقٍ غيرِ مألوف، فما عليك إلا أن تحاول تغييرها إلى كلامٍ أجوفَ ثم تنظر إليها لترى ما إذا أصبحت أقلَّ جلبًا للهلع أم لا. فلا أحد يفهم ما الذي يحدث «حقًّا» داخل الذرات، إلا أن أعدادَ باولي الكَمِّيةَ الأربعة تفسِّر بالفعل بعضَ السمات المهمة لطريقة إدراج «الكلمات الجوفاء» في «سياقاتٍ أوضح».

باولي والاستثناء

كان فولفجانج باولي واحدًا من أبرزِ العلماء المرموقين الذين أسَّسوا نظريةَ الكَمِّ. وُلِدَ باولي في فينا سنة ١٩٠٠، والتحقَ بجامعة ميونخ سنة ١٩١٨، وقد رافقته سُمعتُه بأنه عالِمٌ

رياضيات ذو نبوغٍ مبكِّر، وأنهى بحثًا نشره في يناير ١٩١٩ عن النسبية العامة، الأمر الذي أثار انتباه أينشتاين في الحال. ونظرًا لإلمامه بالفيزياء من دروس الجامعةِ ومعهد الفيزياء النظرية، ومن قراءاته، كان تمكُّنه في النسبية عظيمًا حتى إنه كُلِّفَ بمهمةِ كتابة مقال مراجعة متخصص عن هذا الموضوع سنة ١٩٢٠ في موسوعةِ رياضياتٍ مميَّزة. وقد حقَّق هذا المقال المُتقن شهرةً عالمية واسعة للطالبِ ذي الواحد والعشرين ربيعًا في المجتمع العلمي؛ حيث لاقى هذا المقال إطراءً بالغًا من علماءَ من أمثال ماكس بورن، الذي انضمَّ إليه باولي مساعدًا له في جوتينجن سنة ١٩٢١. وانتقل بعدها بفترةٍ وجيزة من جوتينجن، التي ذهب إليها أولًا، ثم إلى معهد بور في الدنمارك. غير أن بورن لم يتأثَّر مِن فقْد باولي؛ حيث كان مساعده الجديد فيرنر هايزنبرج موهوبًا كذلك، ولعب دورًا محوريًّا في تطوير نظريةِ الكَمِّ.[9]

وحتى قبل أن يُسمَّى العددُ الكَمِّي الرابع لباولي «مغزليًّا»، تمكَّن باولي سنة ١٩٢٥ من استخدامِ حقيقة وجود الأعداد الأربعة ليحُلَّ واحدًا من أهم الألغاز في ذرة بور. في حالة الهيدروجين يستقر الإلكترون الوحيد بطبيعة الحال في أدنى حالةٍ متاحة من حالات الطاقة في أسفلِ سُلَّمِ الكَمِّ. فإذا أثيرَ هذا الإلكترون — ربما بتصادمٍ ما — فقد يقفز إلى درجةٍ أعلى من درجات السُّلَّم، ثم يسقط عائدًا إلى الحالة الأرضية مشعًّا كمًّا من الإشعاع أثناء ذلك. لكن عند إضافة المزيد من الإلكترونات إلى هذه المنظومة، وذلك في حالةِ الذرات الضخمة، فإنها لا تسقط كلها عائدةً إلى الحالة الأرضية، ولكنها تتوزَّع على درجاتِ السُّلَّم. كان بور يتحدَّث عن الإلكترونات على أنها تدور في «أغلفة» حول النواة؛ حيث تنتقل الإلكترونات «الجديدة» إلى الغلافِ الأقلِ طاقة حتى يمتلئ، ثم تنتقل إلى الغلاف التالي حتى يمتلئ، وهكذا. وبهذه الطريقة أنشأ بور الجدول الدوري للعناصر، وفسَّر الكثيرَ من الألغاز الكيميائية. لكنه لم يشرح لماذا أو كيف يصبح الغلاف ممتلئًا، ولماذا يحتوي الغلاف الأول على إلكترونَين فقط، بينما يحتوي الغلاف الثاني على ثمانية، وهكذا.

يقابل كل غلاف من أغلفة بور فئة من الأعداد الكَمِّية، وقد أدرك باولي سنة ١٩٢٥ أنه بإضافةِ عدده الكَمِّي الرابع للإلكترون، فإن عدد الإلكترونات في كل غلافٍ ممتلئ يقابل عدد الفئات المختلفة للأعداد الكَمِّية التي تخصُّ هذا الغلاف. وقد صاغ ما أصبح معروفًا الآن باسم مبدأ الاستثناء لباولي، الذي ينص على أنه لا يمكن لاثنين من الإلكترونات أن تكون لهما الفئةُ نفسُها من الأعداد الكَمِّية؛ ومن ثَم قدَّم لنا السبب وراء الطريقة التي تمتلئ بها الأغلفة في الذرات كلما ازدادت ثقلًا.

في الواقع، جاء كلٌّ من مبدأ الاستثناء واكتشاف الحركة المغزلية للإلكترون قبل أوانهما، ولم يبلغا حالةَ التوافق التام مع الفيزياء الجديدة إلا في نهاية العشرينيات من القرن العشرين، بعد أن تأسَّست الفيزياءُ الجديدة نفسُها. ونظرًا للتقدُّم الجامحِ في الفيزياء خلال عامَي ١٩٢٥ و١٩٢٦، فإن أهمية مبدأ الاستثناء تُغفَل أحيانًا، لكنه في الحقيقةِ مفهوم أساسي وذو تأثير بالغ يماثل مفهوم النسبية، وله تطبيقات واسعة في الفيزياء. ينطبق مبدأ باولي للاستثناء، كما يتضح، على سيمات التي تكون لها حركة مغزلية مقدارها نصف عدد صحيح فردي؛ $\hbar(1/2)$ و$\hbar(3/2)$ و$\hbar(5/2)$ وهكذا. أما الجسيمات التي ليست لها حركة مغزلية على الإطلاق (مثل الفوتونات) أو يكون مقدار حركتها المغزلية عددًا صحيحًا ($\hbar$ و$2\hbar$ و$3\hbar$ وهكذا)، فإن مسلكها يكون مختلِفًا تمامًا، وتتبع في ذلك مجموعةً مختلفة من القواعد. تسمَّى القواعد التي تخضع لها الجسيمات ذات الحركة المغزلية النصفية بإحصاء فيرمي-ديراك، نسبةً إلى إنريكو فيرمي وبول ديراك اللذين توصَّلا إليه خلال عامَي ١٩٢٥ و١٩٢٦. تسمَّى هذه الجسيمات «فرميونات»، وتسمَّى القواعد التي تخضع لها الجسيمات ذات الحركة المغزلية الكاملة بإحصاء بوز-أينشتاين نسبةً إلى الشخصين اللذين توصَّلا إليه، وتسمَّى هذه الجسيمات «بوزونات».

تزامَن العملُ على إحصاء بوز-أينشتاين عامَي ١٩٢٤ و١٩٢٥ مع الجلبة التي أُثيرت حول موجاتِ دي بروي، وظاهرة كومبتون، والحركة المغزلية للإلكترون. ويمثِّل هذا الإحصاء آخرَ مساهمات أينشتاين الكبرى في نظريةِ الكَمِّ (بل في الواقع آخر مساهماته الكبرى في البحث العلمي)، وتُمثِّل أيضًا انفصالًا تامًّا عن الأفكار الكلاسيكية.

وُلِدَ ساتيندرا بوز في كلكتا سنة ١٨٩٤، وعُيِّن أستاذًا في الفيزياء سنة ١٩٢٤ فيما كان يُعرف وقتَها بجامعة دكا الجديدة. وقد تابعَ أعمال بلانك وأينشتاين وبور وسومرفيلد عن بُعد، وكان مدركًا لافتقار قانون بلانك إلى الأساس السليم؛ ومن ثَم بدأ في توجيه قانون الجسم الأسود في طريقٍ جديد، وكانت البداية افتراض أن الضوء يأتي في صورة فوتونات، وهو الاسم المعروفة به هذه الجسيمات الآن. وقد توصَّل إلى صيغةٍ بسيطة للغاية للقانون تتضمَّن الجسيمات العديمة الكتلة التي تخضع لنوعٍ خاص من الإحصاء، وأرسل نسخةً بالإنجليزية من هذا البحث إلى أينشتاين وطلب منه أن يقدِّمها للنشر في مجلة الفيزياء الألمانية «تسايتشريفت فور فيزيك». انبهر أينشتاين كثيرًا بهذا البحثِ لدرجةِ أنه ترجمه إلى الألمانية بنفسِه وقدَّمه شخصيًّا مشفوعًا بتوجيهٍ قويٍّ منه للنشر، وقد نُشِرَ بالفعل في عدد أغسطس ١٩٢٤. وبإزالة كل عناصر النظرية الكلاسيكية واشتقاق قانون بلانك من

مزيجٍ من الكموم الضوئية — معتبرًا إياها جسيماتٍ نسبيةً عديمةَ الكتلة — والطرق الإحصائية، استطاع بوز أن يفصِل نظريةَ الكَمِّ أخيرًا عن سالفاتها الكلاسيكية وحرَّرها تمامًا. ومنذ ذلك الحين، أصبح من الممكن التعامل مع الإشعاع على أنه غازٌ كَمِّي، وتضمَّنت الإحصاءات حسابَ عدد الجسيمات، وليس حسابَ ترددات الموجات.

طوَّر أينشتاين هذه الإحصاءات أكثرَ من ذلك، وطبَّقها على الحالة الافتراضية لمجموعةٍ من الذرات — غاز أو سائل — التي تخضع للقواعدِ نفسِها. وقد اتضح أن هذه الإحصاءات لا تلائم الغازات الحقيقية في درجةِ حرارة الغرفة، ولكنها تصلح تمامًا للتعامل مع الخصائص الشاذة للمائع الفائق من الهيليوم، وهو سائل مبرَّد إلى ما يقرُب من درجة الصفر المطلق؛ −٢٧٣ درجة مئوية. ومع ظهور إحصاء فيرمي-ديراك على الساحة سنة ١٩٢٦، استغرق الأمر بعضَ الوقت حتى يتوصَّل الفيزيائيون إلى تحديدِ أيُّ القواعد يمكن تطبيقُها، وفي أيِّ حالة، وحتى يُقدِّروا أهميةَ الحركة المغزلية التي يكون مقدارها نصف عدد صحيح.

ما يعنينا الآن هو التمييز بين الفرميونات والبوزونات بطريقةٍ يسهُل فهمها. ذهبت منذ عدة سنوات لمشاهدةِ مسرحيةٍ بطولة الممثل الكوميدي سبايك ميليجان، وقبل رفع الستار مباشرةً ظهر هذا الممثِّل القدير بنفسه على خشبة المسرح، وألقى نظرةً شاحبة على عددِ المقاعد الشاغرة في الجزء الأغلى سعرًا من صالة العرض بالقرب من خشبة المسرح. وقال: «لن يجدوا أبدًا مَنْ يشتري هذه التذاكر الآن.» وأضافَ «يمكنكم جميعًا أن تتقدَّموا للجلوس في هذه المقاعد حتى أتمكَّن من رؤيتكم.» نفَّذ الجمهور ما اقترحه عليهم، وتحرَّك كلٌّ منهم إلى الأمام لتمتلئ المقاعدُ الشاغرة بالقرب من خشبة المسرح، بينما تُركت المقاعد شاغرةً في نهاية صالة العرض. إن سلوكنا يشبه سلوكَ الفرميونات الطيبة الحسنة السلوك؛ حيث يشغَل كلُّ فردٍ مقعدًا واحدًا فقط (حالة كَمِّية واحدة)، وبذلك تمتلئ المقاعد بدءًا من أكثرِ المقاعد استحسانًا بجوار خشبة المسرح «الحالة الأرضية»، ثم المقاعد الأبعد «إلى الخارج».

جاء ذلك على عكسِ ما حدث مع الجمهور في إحدى حفلات بروس سبرنجستين الموسيقية. كانت كلُّ المقاعد مشغولةً إلا أنه كان هنالك فرجةٌ صغيرة بين الصف الأول من المقاعد وخشبة المسرح. وعندما أُطفِئت أضواء المسرح وبدأت الفرقة تعزِف بداية مقطوعة «بُورن تو ران» (وُلِدَ ليجري)، هبَّ الجميع من مقاعدهم وتحرَّكوا إلى الأمام واحتشدوا أمامَ خشبة المسرح. احتشدت كل «الجسيمات» في «حالةِ الطاقةِ» نفسِها على نحوٍ لا يمكن

تمييزه، وهذا هو الفرْق بين الفرميونات والبوزونات. فالفرميونات تخضع لمبدأ الاستثناء، بينما البوزونات لا تخضع له.

جميع الجسيمات «المادية» المألوفة لنا — الإلكترونات والبروتونات — هي فرميونات، ولولا مبدأ الاستثناء، لما وُجِدت العناصرُ الكيميائية المختلِفة ولا كل المعالم التي يتكوَّن منها عالَمُنا الملموس. أما البوزونات فهي جسيمات شبحية، مثل الفوتونات، وقانون الجسم الأسود هو نتيجةٌ مباشرة لمحاولةِ كل الفوتونات شغْلَ حالةِ الطاقةِ نفسِها. يمكن لذرات الهيليوم أن تحاكي خصائص البوزونات، في ظل الظروف المناسبة، وتصبح مائعًا فائقًا؛ لأن كلَّ ذرة من ^4He تحتوي على بروتونَين ونيوترونَين، لهما حركةٌ مغزلية مقدارها نصف عدد صحيح تُنسَّق على نحوٍ معيَّن ليصبح المقدار صفرًا. تُحفَظ الفرميونات أيضًا في التفاعلات بين الجسيمات؛ فلا يمكن زيادة العدد الكلي للإلكترونات في الكون، بينما يمكن إنتاجُ البوزوناتِ بأعدادٍ هائلة، وهي حقيقة معروفة لأي شخص ينير ضوءًا.

ماذا عن الخطوة التالية؟

ومع أنَّ كل شيء يبدو الآن منسقًا ومرتَّبًا على نحوٍ معقول، فإنه بحلول عام ١٩٢٥ كانت نظريةُ الكَمِّ في حالةٍ من الفوضى. لم يكن هناك طريق رئيسي ممهَّد للمضي قُدُمًا، ولكن كان هناك بالأحرى الكثير من الأشخاص الذين يحاول كلٌّ منهم منفردًا أن يسلُك طريقًا منفصلًا عبر الأدغال. كان كبار الباحثين يعرفون ذلك إلى حدٍّ كبير، وصرَّحوا بمخاوفهم وتوجُّساتهم على الملأ، إلا أن القفزة الكبرى كانت في طريقها إلى الحدوث، مع استثناءٍ واحد، من الجيل الجديد الذي دخل عالَمِ البحثِ العلمي بعد الحرب العالمية الأولى، وربما لهذا السبب كانوا منفتحين على الأفكار الجديدة. وقد علَّق ماكس بورن سنة ١٩٢٤ بأنه: «في اللحظة الراهنة، لا يسعُ المرءَ إلا الإدلاءُ ببعض التلميحات القليلة غير الواضحة»، وذلك في حديثه حول الطريقة التي يتعيَّن بها تعديل القوانين الكلاسيكية لتفسيرِ الخصائص الذرية، وفي كتابه عن النظرية الذرية المنشور سنة ١٩٢٥ وعدَ بورن بإصدارِ جزءٍ ثانٍ لإتمام المهمة، وهو الجزء الذي كان يظن أنه «سيظل غير مكتوب لعدة سنوات».[10]

وبعد محاولةٍ فاشلة من هايزنبرج لحساب تركيب ذرة الهليوم، كتبَ إلى باولي عام ١٩٢٣ معلِّقًا بقوله: «يا للتعاسة»، وهي العبارة التي كرَّرها باولي في خطابه إلى سومرفيلد في يوليو من العام نفسِه، قائلًا: «إنَّ النظرية ... مع وجود أكثرَ من إلكترون واحد في

الذرات، مدعاةٌ كبيرة للتعاسة.» وقد كتبَ باولي إلى كرونيج في مايو ١٩٢٥ قائلًا: «صارت الفيزياء الآن مضطربةً ومشوَّشةً من جديد»، وبحلول عام ١٩٢٥ كان بور نفسُه متشائمًا مثلهم بشأن المشكلات العديدة التي أحدقت بنموذجه للذرة. وفي يونيو ١٩٢٦ كتبَ فيلهلم فيين — الذي كان قانونه عن الجسم الأسود بمثابةِ منصةِ وثبٍ للقفزة التي قام بها بلانك نحو المجهول — إلى شرودنجر عن «لغز عدم اتصال الأعدادِ الكَمِّية الصحيحة ونصف الصحيحة والاستخدام العشوائي للنظرية الكلاسيكية». كانت كل الأسماء الكبرى في نظريةِ الكَمِّ على درايةٍ بهذه المشكلات، وكانوا جميعًا على قيد الحياة سنة ١٩٢٥ (باستثناء هنري بوانكاريه، وكان لورنتس وبلانك وجيه جيه طومسون وبور وأينشتاين وبورن لا يزالون يمضون قُدُمًا في طريقهم البحثي، بينما بدأ كلٌّ من باولي وهايزنبرج وديراك وآخرين يسطعُ نجمهم ويحقِّقون شهرة كبيرة). كان أينشتاين وبور أبرزَ هذه الشخصيات، ولكن بحلول عام ١٩٢٥ بدأ يكون لكلٍّ منهما آراءٌ علمية مختلفة على نحوٍ لافت. في البداية، كان بور من أقوى المعارضين للكَمِّ الضوئي، ثم عندما بدأ أينشتاين يهتم بدور الاحتمال في نظريةِ الكَمِّ، أصبح بور مؤيده الرئيسي. صارت الطرقُ الإحصائية (التي كان من دواعي المفارقة أن أينشتاين هو مَن أدخلها) حجرَ الزاوية في نظريةِ الكَمِّ، إلا أن أينشتاين كتبَ إلى بورن سنة ١٩٢٠ يقول: «إنَّ مسألةَ السببية تُسبِّب لي الكثيرَ من المتاعب، أيضًا ... عليَّ أن أقرَّ بذلك ... إنني أفتقر إلى الشجاعة التي تجعلني أفعلُ ما أراه صوابًا.» وقد استمر التحاور بين أينشتاين وبور حول هذا الموضوع على مدى خمسٍ وثلاثين سنة، حتى وفاة أينشتاين.[11]

يصف ماكس جامير الوضعَ في بداية سنة ١٩٢٥ بأنه «مزيجٌ يبعث على الأسى من الفرضيات والمبادئ والنظريات والأساليب الحسابية»[11] ولا بد من حلِّ كلِّ مشكلةٍ في فيزياءِ الكَمِّ باستخدام الفيزياء الكلاسيكية أولًا، ثم تنقيحها وإعادة صياغتها عن طريقِ إدخال الأعدادِ الكَمِّية بوازعٍ من التخمين الملهم وليس التفكير الفاتر. لم تكن نظريةُ الكَمِّ مستقلةً بذاتها وكان يُعْوِزها الترابط المنطقي، إلا أنها ظهرت كما لو أنها كائن طفيلي على الفيزياء الكلاسيكية، نبتة دخيلة بلا جذور. ولا عجبَ أن بورن قد رأى أن الأمر قد يستغرق منه سنواتٍ قبل أن يتمكَّن من كتابة جزئه الثاني الحاسم عن الفيزياء الذرية. وتوافقًا مع القصة الغريبة لموضوعِ الكَمِّ، فإنه خلال بضعة أشهر من الأيام المضطربة التي شهدتها بداية عام ١٩٢٥، لم تُقدَّم إلى المجتمع العلمي المتحيِّر نظريةٌ واحدةٌ عن الكَمِّ، بل نظريتان كاملتان ومستقلتان ومنطقيتان ولهما جذور راسخة.

هوامش

(1) The Solvay Congresses were a series of scientific meetings sponsored by Ernest Solvay, a Belgian chemist who made a fortune from his method for manufacturing sodium carbonate. Because of his interest in more abstract science, Solvay provided funds for these meetings at which the leading physicists of the day were able to meet and exchange views.

(2) The quotes in this passage are taken from A. Pais's *Subtle Is the Lord*.

(3) The theorist Peter Debye calculated the "Compton effect" independently at about the same time, and published a paper suggesting an experiment to test the idea. By the time his paper was published, Compton had already done the experiment.

(4) Quotes from de Broglie's writings, and Bragg, are taken from Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*.

(5) See Jammer, *op. cit*.

(6) Which was first detected only in 1932, by James Chadwick, who received a Nobel Prize as a result in 1935, a full two years before the similar recognition of the work of Davisson and Thomson.

(7) Arthur Compton had, in fact, speculated that the electron might spin back in 1920, but this idea had been aired in a different context and Kronig was not aware of it.

(8) The 2π comes in because there are that many radians in a complete circle, 360°. The fundamental unit $h/2\pi$ is usually written as h. More of this later.

(9) See, for example, *The Born–Einstein Letters*. In a letter dated 12 February 1921, Born says, "Pauli's article for the Encyclopaedia is apparently finished, and the weight of the paper is said to be $2\frac{1}{2}$ kilos. This should give some indication of its intellectual weight. The little chap is not only

clever but industrious as well." The clever little chap received his PhD in 1921, shortly before his brief spell as Born's assistant.

(10) Quotes in this section taken from the epilogue to volume 1 of Mehra and Rechenberg.

(11) *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, page 196.

الفصل السادس

المصفوفات والموجات

وُلِدَ فيرنر هايزنبرج في فورتسبرج في ٥ ديسمبر سنة ١٩٠١. والتحقَ سنة ١٩٢٠ بجامعة ميونخ؛ حيث درسَ الفيزياء تحت إشراف أرنولد سومرفيلد، أحدِ علماء الفيزياء الرائدين في ذلك الوقت، الذي كان مشاركًا من كثَبٍ في تطوير نموذج بور للذرة. انهمك هايزنبرج مباشرةً في أبحاثِهِ حول نظريةِ الكَمِّ، ووضع نُصب عينيه مهمةَ اكتشاف أعدادٍ كَمِّية يمكنها تفسيرُ بعضٍ من حالات انقسام خطوط الطيف إلى أزواجٍ أو ثنائيات. وقد توصَّل إلى الإجابة خلال أسبوعَين؛ حيث أمكن تفسيرُ النمط بأكمله بمدلولِ الأعدادِ الكَمِّية نصفِ الصحيحة. لقد اكتشف هذا الطالبُ الشابُّ المتفتحُ الذهنِ أبسطَ الحلول للمشكلة، إلا أن زملاءَه ومشرفه سومرفيلد قد راعهم الأمر. بالنسبة إلى سومرفيلد الذي كان منغمسًا في نموذج بور، كانت الأعدادُ الكَمِّية الصحيحة عنده عقيدةً راسخة؛ ومن ثَم سرعان ما استُبعدَت تخمينات الطالب الشاب. وكان السبب وراء تخوُّفات الخبراء أن إدخال أنصاف الأعداد الصحيحة في المعادلات من شأنه أن يفتح الباب لإدخالِ كسورٍ أخرى من العدد الصحيح مثل الرُّبع والثُّمن والستة عشر جزءًا؛ مما ينقض الركائز الأساسية لنظريةِ الكَمِّ. ولكنهم لم يكونوا على صوابٍ في ذلك.

خلال بضعة أشهر، توصَّل عالِمُ الفيزياء الأكبرُ سنًّا والأقدمُ خبرة، ألفريد لاندي، إلى الفكرةِ نفسِها ونشرها، وقد اتضح فيما بعد، أن الأعدادَ الكَمِّية نصف الصحيحة ذاتُ أهمية محورية في نظريةِ الكَمِّ الكاملة، وتلعب دورًا رئيسيًّا في وصف خاصية الحركة المغزلية للإلكترونات. تخضع الأجسام التي يساوي مقدار حركتها المغزلية عددًا صحيحًا أو صفرًا، مثل الفوتونات، لإحصاء بوز-أينشتاين، بينما تخضع الأجسام التي يساوي مقدار حركتها المغزلية نصفَ عدد صحيح (١/٢، أو ٣/٢، وهكذا) لإحصاء فيرمي-ديراك. ويرتبط عددُ الكَمِّ المغزلي نصف الصحيح للإلكترون ارتباطًا مباشرًا بتركيب الذرة والجدول الدوري

للعناصر. ولا يزال عدمُ تغيير الأعدادِ الكَمِّية إلا بأعدادٍ صحيحة شرطًا قائمًا، بيْد أن الانتقال من ٢/١ إلى ٢/٣ أو من ٢/٥ إلى ٢/٩ جائزٌ تمامًا مثل الانتقال من ١ إلى ٢ أو من ٧ إلى ١٢. وهكذا ضاعت الفرصة على هايزنبرج في الحصول على شرفِ إدخال فكرة جديدة في نظريةِ الكَمِّ، لكن العبرة هنا أنه على غرارِ ما حدث في الماضي حين وضع شبابٌ في الجيل السابق أولَ نظريةٍ للكَمِّ، تكرَّر الأمر مجددًا في عشرينيات القرن العشرين حين أنجزت العقول الشابة غيرُ المثقلة بالأفكارِ «المعروفة للجميع» الخطوةَ التالية. ولا شك أن هايزنبرج قد عوَّض تفويتَ هذه الفرصةِ في أن يكون «أولَ» مَن يُنسَب إليه الفضل في اكتشافٍ علمي صغير، وذلك بأبحاثه في السنوات القليلة التي أعقبت ذلك.

وبعد فترةٍ من العمل في جوتينجن تحت إشراف بورن؛ حيث حضرَ «مهرجان بور» الشهير، عاد هايزنبرج إلى ميونخ وأكمل دراسته للدكتوراه سنة ١٩٢٣، ولم يكن قد بلغ الثانية والعشرين من عمره. في ذلك الوقت كان فولفجانج باولي، وهو الصديقُ المقرَّب إلى هايزنبرج، الذي أظهر هو الآخر نبوغًا مبكِّرًا وتتلمذ أيضًا على يد سومرفيلد، قد خرج لتوه من تأثير كونه مساعدًا لبورن في جوتينجن، وحلَّ هايزنبرج مكانه في هذه الوظيفة سنة ١٩٢٤. وقد منحته هذه الوظيفةُ الفرصةَ للعمل بضعةَ أشهر مع بور في كوبنهاجن، وبحلول عام ١٩٢٥ كان هذا الفيزيائي ذو النبوغ الرياضي المبكِّر قد تزوَّد على نحوٍ أفضلَ من أيِّ شخص آخر بالأدوات التي تؤهله للتوصُّل إلى نظريةِ الكَمِّ المنطقية التي كان كل الفيزيائيين يتوقَّعون التوصُّل إليها في النهاية، إلا أن أحدًا لم يتوقَّع التوصُّل إليها بهذه السرعة.

أسَّس هايزنبرج اكتشافَه على فكرةٍ كان قد التقطها من مجموعةِ جوتينجن — ولا يعرف أحدٌ اليوم مَن هو أول مَن اقترحها — وهي أن النظرية الفيزيائية لا بد أن تُعنى فقط بالأشياء التي يمكن رصدها فعليًّا عن طريق التجارب. يبدو هذا مبتذلًا، ولكنه في الحقيقة نظرةٌ ثاقبة للغاية. فالتجربة التي «ترصد» الإلكترونات في الذرة، مثلًا، لا تعرِض لنا صورةً بالكُرات الصغيرة الصلبة التي تدور حول النواة، ولا توجد طريقةٌ لمشاهدة «المدار»، وكلُّ ما هنالك أن الأدلة المستقاة من خطوط الطيف تخبرنا عما يحدث للإلكترونات عندما تنتقل من أحد مستويات الطاقة (أو أحد المدارات بلغة بور) إلى مستوًى آخر. ويتعلَّق كلُّ ما يمكن مشاهدته من سمات الإلكترونات والذرات بـ «حالتَين» فقط، وجاء ذكْر مفهوم المدار في المشاهدات المرصودة عن طريق تشبيهه بالطريقة التي تتحرَّك بها الأشياء في عالَم الحياة اليومية. وقد تخلَّص هايزنبرج من فوضى التشبيهات

المستقاة من الحياة اليومية، وعمل بصورةٍ مكثفة على الرياضيات التي لم تصِف «حالةً» واحدة للذرة أو للإلكترون، ولكن ترافق «أزواج» من الحالات.

الاكتشاف الجديد في هيليجولاند

عادةً ما تُروى قصةُ النوبة الشديدة لحمَّى القش التي أصابت هايزنبرج في مايو ١٩٢٥، وكيف أنه سافر إلى جزيرة هيليجولاند الصخرية بغرضِ التعافي؛ حيث ركَّز بعناية على مهمةِ تفسيرِ ما كان معروفًا عن السلوكِ الكَمِّي في هذه الآونة. تمكَّن هايزنبرج من العملِ بصورةٍ مكثَّفةٍ على هذه المشكلةِ بعد أن تماثل للشفاء من حمَّى القش؛ لأنه لم يكن هناك ما يلهيه على الجزيرة. وفي كتابه الذي يتحدَّث فيه عن سيرته الذاتية «الفيزياء وما بعدها»، وصفَ هايزنبرج مشاعرَه عندما بدأت الأعدادُ تتضح ويُفهَم مغزاها، وكيف أنه في الثالثة صباحًا — حسب قوله — «لم يَعُد لديه شكٌّ في الاتساق والترابط الرياضي لنوعِ ميكانيكا الكَمِّ الذي كانت تشير إليه حساباتي. في البداية، كنتُ مندهشًا بشدة. وكان لديَّ شعورٌ بأنني أشاهد عبْر سطح الظواهر الذرية عالَمًا داخليًّا جميلًا على نحوٍ غريب، ولم أتمالك نفسي عندما فكَّرت أن عليَّ الآن فحصَ هذه الثروة من البِنى الرياضية التي كشفتها الطبيعة أمامي بكرمٍ بالغ، واختبارها».

عندما عاد هايزنبرج إلى جوتينجن، استغرق ثلاثة أسابيع في إعدادِ بحثِه في صورةٍ مناسبةٍ للنشر، وأرسل نسخةً من البحث أولًا إلى صديقه القديم باولي، سائله عن رأيه في البحث وإن كان يراه ذا مغزًى. كان باولي متحمسًا، إلا أن هايزنبرج كان منهَكًا من جرَّاءِ ما بذله من جهد، ولم يكن متأكدًا بعدُ من أن البحث جاهزٌ للنشر. ترك البحث لدى بورن ليتصرَّف فيه بما يراه مناسبًا، وغادر في يوليو ١٩٢٥ لإلقاء سلسلةٍ من المحاضرات في ليدن وكامبريدج. ومن سخرية القدرِ أنه لم يتحدث عن بحثه الجديد أمام الحاضرين هناك، وكان عليهم أن ينتظروا حتى تصلهم الأخبارُ عن طريقِ قنواتٍ أخرى.

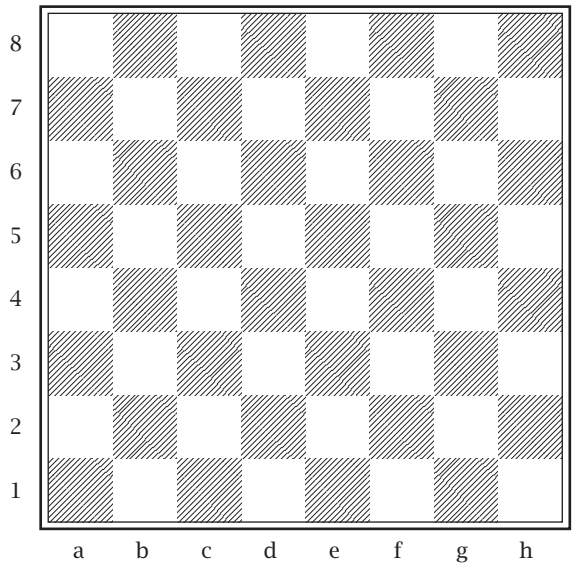
كان بورن سعيدًا بما يكفي لإرسالِ بحثِ هايزنبرج إلى مجلة الفيزياء الألمانية «تسايتشريفت فور فيزيك»، وأدركَ في لحظتها تقريبًا أهميةَ السَّبْق الذي حازه هايزنبرج بمحض المصادفة. لم يكن من الممكن التعامُل مع الرياضيات التي تتضمَّن حالتَين من الذرة بواسطة الأعداد العادية، ولكنها استلزمت مجموعاتٍ مرتَّبة من الأعداد، وهو ما فكَّر فيه هايزنبرج على أنه جداول. وأفضلُ تشبيهٍ لها هو لوحة الشطرنج. فهناك ٦٤ مربعًا على اللوحة، ويمكنك في هذه الحالة تحديدُ كل مربع بواسطة عددٍ في المدى من

١ إلى ٦٤. ولكن، يفضِّل لاعبو الشطرنج استخدامَ مجموعة رموزٍ تسمَّى فيها «أعمدة» المربعات الموجودة بعرض اللوحة بالحروف الهجائية الإنجليزية (a، b، c، d، e، f، g، h)، وتُرقَّم «الصفوف» من أسفل إلى أعلى (١، ٢، ٣، ٤، ٥، ٦، ٧، ٨). وبذلك، يمكن تحديدُ كل مربع على اللوحة بواسطةِ زوجٍ فريد من المسمَّيات المميِّزة: a١ هو المربع الخاص بالطابية (الرُّخ)، وg٢ هو المربع الخاص ببيدق الفرس، وهكذا. وتتضمَّن جداول هايزنبرج مجموعاتٍ مرتَّبة من الأعداد في بُعدين، مثل لوحة الشطرنج؛ لأنه كان يُجرِي حساباتٍ تتضمَّن حالتَين وتفاعلاتهما. وقد تضمَّنت تلك الحسابات — ضمن أشياء أخرى — ضرْبَ فئتين من هذه الفئات من الأعداد، أو مجموعتين مرتَّبتين من الأعداد معًا، وقد باشر هايزنبرج العملَ بجِد حتى توصَّل إلى الحِيَل الرياضية المناسبة لإنجاز المهمة. لكنه انتهى إلى نتيجةٍ غريبةٍ للغاية، ومحيِّرة لدرجةِ أنها كانت أحد أسباب عدم ثقته في نشر عملياته الحسابية. فعند ضرْب هذه المجموعات المرتَّبة معًا، اتضح أن «الناتج» الذي تحصَّل عليه يعتمد على الترتيب الذي أُجريت به عملية الضرب.

وهذا الأمر غريبٌ حقًّا. إنه مثل القول بأن ٢ × ٣ ليست هي ٣ × ٢، أو بمصطلحات الجبر $a \times b = b \times a$. كان بورن مشغولَ الذهن بهذه الغرابة ليلَ نهار، مقتنعًا أن شيئًا ما أساسيًّا يقبع وراءها. ثم فجأة تكشَّف له الأمر. فقد كانت المجموعات المرتَّبة وجداول الأعداد التي صمَّمها هايزنبرج بجهدٍ لا يَكل معروفةً في الرياضيات من قبل. كان هناك بالفعل فرعٌ كامل يختص بحساب التفاضل والتكامل لهذه الأعداد، وكانت هذه الأعداد تسمَّى فيه بالمصفوفات، وقد درسها بورن في السنوات الأولى من القرن العشرين عندما كان طالبًا في بريسلاو. ولم يكن من المستغرَب أن يتذكَّر هذا الفرع المغمور من الرياضيات بعد أكثرَ من عشرين سنة؛ لأن هناك خاصية أساسية للمصفوفات تجعلها دائمًا ذاتَ تأثير عميق على الطلاب عندما يدرسونها لأول مرة؛ ذلك حيث تعتمد الإجابة التي تحصل عليها عندما تضرب المصفوفات على الترتيب الذي أجريت به الضرب، أو بلغة الرياضيات، المصفوفات لا تقبل الإبدال.

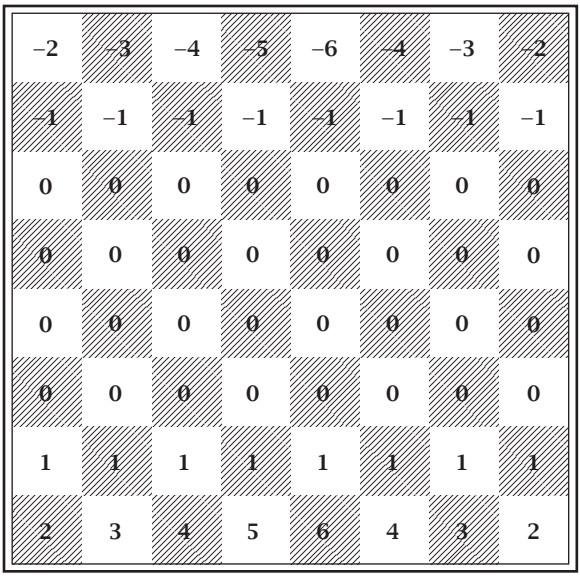
رياضياتُ الكَمِّ

في صيف ١٩٢٥، ومن خلال العمل مع باسكال جوردان، طوَّر بورن بداياتِ ما يُعرف إلى الآن بميكانيكا المصفوفات. وعندما عاد هايزنبرج إلى كوبنهاجن في شهر سبتمبر، انضم إليهما عن طريق المراسلات في كتابةِ بحثٍ علمي عن ميكانيكا الكَمِّ. وقد أكَّد



شكل ٦-١: يمكن تعريف كلِّ مربع على لوحة الشطرنج بزوجٍ من عددٍ وحرف مثل 4b أو 7f. كما يمكن تعريف حالات ميكانيكا الكَمِّ بزوجٍ من الأعداد.

الباحثون الثلاثة في هذا البحث العلمي الأهميةَ الرئيسية لخاصية اللاتبادلية في المتغيراتِ الكَمِّية، بصورةٍ أكثرَ وضوحًا وصراحةً من البحث الأصلي الذي كتبه هايزنبرج. وكان بورن قد اكتشف بالفعل في بحثه المشترك مع جوردان، العلاقة $pq - qp = \hbar/i$؛ حيث p وq مصفوفتان تمثِّلان متغيراتٍ كَمِّية، مكافئة في عالَمِ الكَمِّ للزخم والموضع. ويَظهر ثابتُ بلانك في المعادلة الجديدة مع i، الجذر التربيعي لسالب واحد، وذلك فيما أصبح معروفًا باسم «بحث الرجال الثلاثة»، وقد أكَّد فريق جوتينجن على أن هذه هي «العلاقة الأساسية في ميكانيكا الكَمِّ». لكن ما الذي تعنيه بمصطلحات الفيزياء؟ كان ثابت بلانك قد أصبح مألوفًا بما فيه الكفاية في ذلك الوقت، وكان الفيزيائيون على درايةٍ بمعادلاتٍ تتضمَّن i (وهو أحد مفاتيح الحلِّ للغزٍ سيظهر فيما بعدُ — لو أنهم فقط أدركوا ذلك — حيث تتضمَّن هذه المعادلات بصفةٍ عامة تذبذباتٍ أو موجاتٍ). أما المصفوفات، فلم تكن مألوفة بالمرة لمعظم الرياضيين والفيزيائيين سنة ١٩٢٥، وقد بدت لهم خاصية اللاتبادلية بنفسِ القدرِ من الغرابة التي كان عليها ثابت بلانك h بالنسبة إلى أسلافهم



شكل ٦-٢: تتحدَّد «حالة» كلِّ مربع على لوحة الشطرنج عن طريق قطعة الشطرنج التي تشغل المربع. وفي هذه الطريقة، يُعرَّف البيدق بالعدد ١، والطابية (الرُّخ) بالعدد ٣ وهكذا، وتحمل القطع البيضاء أعدادًا موجبة، وتحمل القطع السوداء أعدادًا سالبة. ومن الممكن وصف التغيُّر في حالةِ لوحة الشطرنج بأكملها عن طريقِ تعبيرٍ مثل: «البيدق إلى الوزير أربعة»، أو عن طريق الرموز الجبرية e2–e4. وتوصف الانتقالاتُ الكَمِّية بمجموعةٍ من الرموز المماثلة التي تربط أزواج الحالات (الأولية والنهائية)، ولا نعلم في كلتا الحالتين كيف حدثت عمليةُ الانتقال من حالةٍ إلى أخرى، وهي النقطة التي تظهر بقوةٍ من حركة الفَرس والبيات. وفي سياق التشبيه بالشطرنج، يمكننا تخيُّل أصغر التغيُّرات الممكنة على اللوحة، e2–e3، على أنها تُقابل إضافةَ كوانتم من الطاقة $h\nu$، في حين أن «الانتقالَ» e2–e3 سيقابل عندئذٍ إطلاقَ الكوانتمِ نفسِه من الطاقة. ومع أنه تشبيهٌ غيرُ دقيق، فإنه يلقي الضوء على الطريقة التي تصفُ بها صورٌ مختلِفةٌ من الرموز الحدثَ نفسَه. وبالطريقة نفسِها، اكتشفَ كلٌّ من هايزنبرج وديراك وشرودنجر صورًا مختلِفة من الرموز الرياضية لوصف الأحداثِ الكَمِّية نفسِها.

عندما عرَفوه لأول مرة سنة ١٩٠٠. وقد جاءت النتائج مفاجئةً ومثيرة لأولئك الذين يجيدون التعامل مع الرياضيات. وقد حلَّت معادلاتٌ مشابهةٌ تتضمَّن المصفوفاتِ محلَّ معادلات ميكانيكا نيوتن، يقول هايزنبرج: «كانت خبرة غريبة أن تكتشف أن العديد من

النتائج القديمة لميكانيكا نيوتن، مثل حفظ الطاقة وغيره من نتائج، يمكن استنباطه أيضًا في النظام الجديد.»[1] بعبارةٍ أخرى، «تضمَّنت» ميكانيكا المصفوفات في داخلها ميكانيكا نيوتن، تمامًا مثلما كانت معادلات أينشتاين النسبية تتضمَّن معادلات نيوتن بوصفها حالةً خاصة. وللأسف، لم يفهم هذه الرياضيات إلا عددٌ قليل من الناس، ولم يعترف معظم الفيزيائيين في الحال بمدى أهمية الإنجاز الذي قدَّمه هايزنبرج وفريق جوتينجن. ومع ذلك، كان هناك استثناءٌ وحيد في كامبريدج بإنجلترا.

كان بول ديراك يصغُر هايزنبرج ببضعة أشهر فقط؛ فقد وُلِد في ٨ أغسطس سنة ١٩٠٢. ويُعَدُّ ديراك العالِم النظري الإنجليزي الوحيد الذي يمكن أن يُوضَع في مَرتبة نيوتن، وقد قدَّم أكثرَ النسخِ اكتمالًا لما يُعرَف اليوم بميكانيكا الكَمِّ. إلا أنه لم يتجه نحو الفيزياء النظرية إلا بعد تخرُّجه في جامعة بريستول سنة ١٩٢١ وحصوله على بكالوريوس الهندسة. لم يجِد وظيفةً في مجال الهندسة، وعُرِضت عليه فرصة دراسة الرياضيات في كامبريدج، لكنه لم يقبلها نظرًا لقلة المال، وأثناء إقامته في بريستول مع والدَيه حصل على دورةٍ دراسية في الرياضيات مدتُها ثلاث سنوات أنهاها في عامَين فقط بفضل دراسته للهندسة، وحصلَ على بكالوريوس الرياضيات التطبيقية سنة ١٩٢٣. واستطاعَ بذلك التوجُّه إلى كامبريدج لإجراءِ أبحاثٍ مدعمة بمنحة من إدارة البحث العلمي والصناعي، وما إن وصل إلى كامبريدج حتى علِم لأولِ مرةٍ بنظريةِ الكَمِّ.

وهكذا كان ديراك طالبًا باحثًا غيرَ معروف وتُعْوِزه الخبرة عندما استمع إلى محاضرةِ هايزنبرج في كامبريدج في يوليو ١٩٢٥، ومع أن هايزنبرج لم يتحدَّث علنًا عن بحثه الجديد حينئذٍ، إلا أنه أشار إليه في حديثه مع رالف فاولر، المشرف على ديراك، ونتيجةً لذلك أرسل إلى فاولر نسخةً من مسوَّدة البحث في منتصف أغسطس قبل ظهوره في مجلة «تسايتشريفت». أعطى فاولر البحث إلى ديراك الذي اطَّلع عليه قبل أيِّ شخص آخر من خارج جوتينجن (ما عدا صديق هايزنبرج باولي)، فأُتيحت له الفرصة لدراسة النظرية الجديدة. في هذا البحث الأول، ومع أن هايزنبرج قد أشار إلى خاصية اللاتبادلية للمتغيِّرات في ميكانيكا الكَمِّ — المصفوفات — فإنه لم يطوِّر الفكرة، لكنه حاول أن يحوم حولها بحذرٍ. وعندما فهِم المعادلات وأتقنها، أدرك في الحال الأهمية الجوهرية للحقيقة البسيطة بأن $a \times b = b \times a$. وعلى عكس هايزنبرج، كان ديراك يعلم بالفعل كمياتٍ رياضيةٍ تسلُك هذا المسلكَ نفسَه، وفي غضون بضعة أسابيع كان في مقدوره إعادةُ معالجةِ معادلات هايزنبرج بمصطلحاتِ فرعٍ من الرياضيات كان قد طوَّره ويليام هاميلتون منذ قرن

من الزمن. وكان من أظرفِ المُفارقات العلمية أنَّ معادلات هاميلتون التي أثبتت أنها مفيدة للغاية في نظريةِ الكَمِّ الجديدة، التي تخلصت تمامًا من فكرة مدارات الإلكترونات، قد وُضِعَت في القرن التاسع عشر لتكون وسيلةً مساعِدةً في الحسابات المتعلِّقة بمدارات الأجسام في نظامٍ ما، مثل المجموعة الشمسية؛ حيث يوجد العديد من الكواكب التي تتفاعل بعضها مع بعض.

وهكذا اكتشف ديراك — مستقِلًّا عن مجموعة جوتينجن — أن معادلاتِ ميكانيكا الكَمِّ ذاتُ بنيةٍ رياضية مماثلة لمعادلات الميكانيكا الكلاسيكية، وأنَّ الميكانيكا الكلاسيكية مضمَّنة في ميكانيكا الكَمِّ كحالة خاصة؛ حيث تُقابِل أعدادًا كَمِّية كبيرة أو تفترض أن ثابت بلانك يساوي صفرًا. وضعَ ديراك طريقةً أخرى للتعبير رياضيًّا عن الديناميكيات، متبعًا نهجه الخاص، باستخدامِ صورةٍ خاصة من الجبر، أطلقَ عليها الجبرَ الكَمِّي، وتتضمَّن عمليات جمع وضرب للمتغيراتِ الكَمِّية، أو «أعداد q»، وأعداد q هذه غريبة ومبهمة، ولا سيَّما أن من المستحيلِ في عالَم الرياضيات الذي طوَّره ديراك القولَ أيُّ العددَين a وb هو الأكبر، ولا مكان في هذا الفرعِ من الجبر لمفهومِ أن يكون عددٌ ما أكبرَ أو أصغرَ من عددٍ آخر. ولكن، مرة أخرى، تناسبت قواعدُ هذا النظامِ الرياضيةُ وجاءت مطابِقةً تمامًا لمشاهدات سلوك العمليات الذرية. وفي الحقيقةِ من الصواب القولُ إن الجبرَ الكَمِّي يتضمن ميكانيكا المصفوفات في داخله، غير أنه يقوم بما هو أكثر من ذلك بكثير.

أدركَ فاولر على الفور أهميةَ بحثِ ديراك، وبإيعازٍ منه نُشِرَ البحثُ في «وقائع الجمعية الملكية» في ديسمبر ١٩٢٥. وقد تضمَّن البحثُ ضمنَ أشياءَ أخرى، وكمُكوِّن أساسي في النظرية الجديدة، أعدادَ الكَمِّ نصف الصحيحة التي استحوذت على ذهن هايزنبرج منذ بضع سنوات مضت. أرسلَ هايزنبرج نسخةً من مخطوطة البحث الذي كتبه ديراك وكان سخيًّا في مديحه: «لقد قرأتُ بحثك الرائع للغاية عن ميكانيكا الكَمِّ باهتمامٍ بالغ، ولا يوجد شكٌّ على الإطلاق في صحةِ كل النتائج التي قدَّمتها ... و(البحث) مكتوبٌ عن جِدٍّ بأسلوبٍ أفضلَ وأكثرَ تركيزًا من محاولاتنا هنا.»[2] وفي النصف الأول من سنة ١٩٢٦ استأنف ديراك البحثَ في سلسلةٍ من أربع أوراق بحثية حاسمة ودقيقة، ليتكوَّن منها جميعًا رسالته التي مُنح على أساسها درجة الدكتوراه عن جدارة. وأثناء ذلك كله، استخدم باولي أساليبَ قائمة على المصفوفات للتنبؤ بطريقةٍ صحيحة بسلسلة بالمر لذرة الهيدروجين، وبحلول نهاية سنة ١٩٢٥ أصبح واضحًا أن انقسامَ بعض خطوط الطيف إلى ثنائيات يمكن تفسيره في الحقيقة بوضعِ خاصيةٍ جديدةٍ تسمَّى الحركةَ المغزلية للإلكترون. وقد

توافقت النتائج والآراء معًا على نحوٍ جيدٍ للغاية، وبات واضحًا أن الأدوات الرياضية المختلفة التي استخدمها مختلف أنصار ميكانيكا المصفوفات كانت مجرَّد جوانب مختلفة للحقيقة نفسِها.[3]

ومرة أخرى يمكن أن تساعد لعبةُ الشطرنج في إيضاح ذلك. هناك عدة طرق مختلِفة تصف مباراةً في الشطرنج في الصفحة المطبوعة. وإحدى هذه الطرق أن يُطبع شكلٌ يمثِّل «لوحة الشطرنج» مع توضيحِ مواقعِ كلِّ القطع، لكن ذلك سيشغل حيزًا كبيرًا إذا أردنا وصفَ مباراةٍ كاملة. وثمة طريقة أخرى وهي أن تُسمِّي القطع التي تتحرك: «بيدق الملك إلى بيدق الملك أربعة.» وفي أكثرِ الطرق اختصارًا تُستخدَم الرموز الجبرية لوصف الحركةِ نفسِها ببساطة d2–d4. وهكذا تعطينا طرقُ الوصف الثلاث المختلفة المعلوماتِ نفسَها عن حدثٍ حقيقي، وهو انتقال بيدق من «حالة» إلى أخرى (وكما في عالَمِ الكَمِّ تمامًا، فإننا لا نعرف شيئًا عن الكيفية التي انتقل بها البيدق من حالةٍ إلى أخرى، وهي النقطة التي تصبح أكثرَ وضوحًا إذا فكَّرنا في حركةِ الحصان في لعبة الشطرنج). وتكون الصياغات المختلفة لميكانيكا الكَمِّ على هذا النحو. ويُعتبر الجبر الكَمِّي لديراك الأكثر أناقةً و«جمالًا» بالمفهوم الرياضي، أما طريقةُ المصفوفات التي وضعها بورن ومعاونوه في أعقاب هايزنبرج، فهي أقل إتقانًا ولكنها ليست أقل فعالية.[4]

وقد جاء بعضٌ من أكثرِ نتائج ديراك المبكِّرة إثارةً عندما حاول تضمين النسبية الخاصة في ميكانيكا الكَمِّ الخاصة به. سعدَ ديراك كثيرًا بفكرةِ أن الضوء عبارة عن جسيمات (فوتونات)، وابتهجَ باكتشافِ أنه بإدخال الزمن في صورة عدد q مع بقية الأعداد في معادلاته سيتوصل حتمًا إلى «التنبؤ» بأن الذرةَ لا بد أن ترتد عندما تشع الضوء، وهو ما يجب أن تفعله إذا كان الضوء على شكلِ جسيماتٍ لها الزخم الخاص بها، وواصلَ ديراك أبحاثه ليضع تفسيرًا من ميكانيكا الكَمِّ لتأثير كومبتون. انقسمت حسابات ديراك إلى قسمين: الأول هو معالجة بارعة بالأعداد تضمَّنت أعداد q، أما الثاني فهو تفسير المعادلات من حيث ما يمكن مشاهدته فيزيائيًّا. وتتواءم هذه العملية تمامًا مع الطريقة التي يبدو أن الطبيعة «تُجري بها حساباتها» ثم تقدِّم لنا حدثًا يمكن مشاهدته فيزيائيًّا — مثل انتقال الإلكترون — لكن لسوء الحظ، بدلًا من مواصلة هذه الفكرة حتى النهاية في السنوات التي تلت ١٩٢٦، انشغل الفيزيائيون عن الجبرِ الكَمِّي باكتشافِ أسلوبٍ رياضيٍّ آخرَ يمكنه حلُّ المشكلات القائمة منذ فترة طويلة في نظريةِ الكَمِّ؛ الميكانيكا الموجية. بدأت ميكانيكا المصفوفات والجبر الكَمِّي من تصوُّر الإلكترون على أنه جسيم

ينتقل من حالةٍ كمومية إلى أخرى. لكن ماذا عن اقتراح دي بروي بأن الإلكترون، وغيره من الجسيمات، يجب التفكير فيه بأنه موجات؟

نظرية شرودنجر

عندما كانت ميكانيكا المصفوفات والجبر الكَمِّي يخطوان أولى خطواتهما على الساحة العلمية دون أن تَلقى الحفاوة والإطراء نسبيًّا، كان هناك الكثير من الأنشطة الأخرى في مجالِ نظريةِ الكَمِّ. ويبدو أن العِلم الأوروبي كان يجيش بخميرةٍ من الأفكار التي حان أوانها، وظهرت فجأةً أفكارٌ مختلِفة في أماكنَ مختلفة، وليست بالضرورة بالترتيب المنطقي المتعارف عليه الآن، والعديد منها «اكتشفه» أناسٌ مختلفون في الفترة الزمنية نفسِها. وبحلول نهاية عام ١٩٢٥، كانت نظرية دي بروي عن موجات الإلكترونات قد ظهرت بالفعل على الساحة، غير أن التجارب الحاسمة التي أثبتت الطبيعة الموجية للإلكترون لم تكن قد أُجريت بعد. وبعيدًا عن أبحاث هايزنبرج ورفاقه تمامًا، أدَّى ذلك إلى اكتشافٍ آخرَ وهو رياضياتُ الكَمِّ القائمة على فكرة الموجات.

جاءت الفكرة من دي بروي عن طريق أينشتاين. كان من الممكن أن تظل أبحاثُ دي بروي محجوبةً لسنوات، والنظر إليها بأنها ليست أكثرَ من مراوغة رياضية مثيرة ليس لها وجود فيزيائي، لولا أنها أثارت اهتمام أينشتاين. فقد كان أينشتاين هو مَنْ أخبر بورن بالفكرة، وبذلك أطلق قطار الأبحاث التجريبية التي برهنت على حقيقة موجات الإلكترونات، ثم قرأ إرفين شرودنجر في بحثٍ لأينشتاين منشورٍ في فبراير ١٩٢٥ تعليقَه على بحث دي بروي: «أعتقد أنه يتضمَّن ما هو أكثر من مجرد تشبيه.» كان الفيزيائيون في تلك الأيام يتلقفون كلَّ كلمة ينطق بها أينشتاين، وكانت إيماءة كهذه من أينشتاين كافيةً لحث شرودنجر على دراسة النتائج المترتبة على تقبُّل فكرة دي بروي دون تمحيص.

كان شرودنجر هو الاستثناء الوحيد بين الفيزيائيين الذين وضعوا نظريةَ الكَمِّ الجديدة. وقد وُلِد سنة ١٨٨٧ وكان في التاسعة والثلاثين من عمره عندما أكمل أعظم مساهماته في العِلم، وهو عُمرٌ متقدِّم على نحوٍ لافت بالنسبة إلى بحثٍ علمي أصيل على هذا القدْر من الأهمية. حصل على درجة الدكتوراه سنة ١٩١٠، وشغل منذ سنة ١٩٢١ منصبَ أستاذ الفيزياء في زيورخ، وهو منصبٌ جديرٌ بالاحترام العلمي وليس مصدرًا واضحًا لطرح الأفكار الثورية الجديدة. ولكن، كما سنرى، فإن طبيعةَ مساهمته في نظريةِ الكَمِّ كانت على القدْر المتوقَّع منه كواحد من الجيل الأكبر سنًّا في منتصف

العشرينيات من القرن العشرين. وعندما جعلت مجموعة جوتينجن، وديراك كذلك، نظريةَ الكَمِّ أكثرَ تجريدًا وفصَلاها عن الأفكار الفيزيائية اليومية، حاول شرودنجر استعادةَ المفاهيم الفيزيائية السهلة الفهم، ووصف فيزياءَ الكَمِّ بلغة الموجات، وهي سمات مألوفة في العالَم الفيزيائي، وظلَّ حتى نهاية حياته يحارب الأفكار الجديدة عن اللاحتمية والانتقال اللحظي للإلكترونات من حالة إلى أخرى. وقد منحَ الفيزياءَ أداة عملية قيمة لحل المشكلات، إلا أن الميكانيكا الموجية الخاصة به كانت بالمعنى المفاهيمي خطوةً إلى الوراء، وعودةً إلى أفكار القرن التاسع عشر.

حدَّد دي بروي الطريقَ من خلال فكرته بأن الإلكترونات عبارة عن موجاتٍ تدور «في مدار» حول نواة الذرة لا بد أن تتناسب مع عددٍ صحيح من الأطوال الموجية في كل مدار، وبذلك تكون المدارات البَينية «غير مسموح بها». وقد استخدم شرودنجر رياضيات الموجات لحسابِ مستويات الطاقة المسموح بها في مثل هذا الوضع، وقد أُصيب بالإحباط في البداية لحصوله على إجاباتٍ لا تتفق مع أنماط الطيف الذري المعروفة. وفي الحقيقة، لم يكن هناك خطأ في أسلوبه، والسبب الوحيد وراء فشله الأول هو أنه لم يأخذ في حسبانه الحركةَ المغزلية للإلكترون؛ ولم يكن من المستغرَب ذلك لأن مفهومَ الحركة المغزلية للإلكترون لم يكن قد بزغ بعدُ في ذلك الوقت سنة ١٩٢٥. وعادَ إلى الفكرة عندما طُلِب منه تنظيمُ حلقة دراسية لشرح أبحاث دي بروي، وعندئذٍ اكتشفَ أنه لو تخلَّص من التأثيرات النسبية في حساباته لأمكنه الحصول على توافق جيد مع مشاهدات الذرات في الأوضاع التي لم تكن فيها التأثيرات النسبية مهمة. وكما أوضحَ ديراك فيما بعد، فإن الحركةَ المغزلية للإلكترون هي خاصية نسبية في الأساس (ولا يوجد شيءٌ من قبيل خاصية الحركة المغزلية يرتبط بالأجسام الدوَّارة في عالَم الحياة اليومية). وهكذا نُشِرَت مساهمة شرودنجر الكبرى في نظريةِ الكَمِّ في سلسلةٍ من الأبحاث سنة ١٩٢٦، وذلك في أعقاب أبحاث هايزنبرج وبورن وجوردان وديراك مباشرةً.

إنَّ المعادلات في مساهمةِ شرودنجر عن موضوعِ الكَمِّ تندرج ضمن المجموعة نفسِها من المعادلات التي تصفُ موجاتٍ حقيقية في عالَمنا اليومي؛ مثل الموجات على سطح المحيط، أو موجات الصوت التي تحمل الضجيج عبر الغلاف الجوي. وقد رحَّبَ عالَمُ الفيزياء بكل حماسٍ بهذه المعادلات، وذلك على وجه التحديد لأنها بدت مريحة ومألوفة للغاية. ولم يكن لَمْدخلين إلى المشكلة أن يكونا مختلفَين أكثرَ من هَذين. فقد استبعد هايزنبرج متعمدًا أيَّ تصوُّر للذرة، وتعامل فقط بلغة المقادير التي يمكن قياسها

بالتجربة، وإنْ كانت نظريته تحوي في صميمها فكرةَ أن الإلكترونات عبارةٌ عن جسيمات. أما شرودنجر، فقد بدأ من تصوُّر فيزيائي واضح للذرة بأنها كِيان «حقيقي»، وكانت نظريته تحوي في صميمها فكرةَ أن الإلكترونات عبارةٌ عن موجات. وقد أنتج المَدْخلان مجموعاتٍ من المعادلات التي وصفت بدقة سلوكَ الأشياء التي من الممكن قياسها في عالَمِ الكَمِّ.

بدا الأمر للوهلة الأولى مذهلًا. ولكن قبل شرودنجر نفسِه بفترة طويلة، أثبت الأمريكي كارل إيكارت — ومن بعده ديراك — رياضيًّا أن المجموعات المختلفة من المعادلات كانت مكافئةً بعضها لبعضٍ في الحقيقة، وأنها مَشاهِد مختلِفة لعالَم رياضي واحد. تتضمَّن معادلات شرودنجر كلًّا من علاقة اللاتبادلية والعامِل الحاسِم $\hbar/i$، وذلك بالطريقة نفسِها التي يظهران بها في ميكانيكا المصفوفات والجبر الكَمِّي. وقد أدَّى اكتشافُ أن المداخل المختلفة للمشكلة كانت في الحقيقة متكافئة رياضيًّا إلى تعزيزِ ثقة الفيزيائيين بها جميعًا. ويبدو أنه عند التعامل مع المشكلات الرئيسية لنظريةِ الكَمِّ، فإنك تتوصَّل حتمًا إلى «الإجابات» نفسِها أيًّا كان نوع الصيغة الرياضية التي تستخدمها. وبلغة الرياضيات، فإن نسخة ديراك حول هذا الموضوع هي الأكثر اكتمالًا؛ حيث يتضمَّن الجبر الكَمِّي الخاص به كلًّا من ميكانيكا المصفوفات وميكانيكا الموجات كحالاتٍ خاصة. ولكن كان من الطبيعي أن اختار فيزيائيو العشرينيات من القرن العشرين أكثرَ النسخ المألوفة من المعادلات، وهي موجات شرودنجر، التي كان يمكنهم فهْمها من واقع العالَم اليومي، والتي كانت معادلاتها مفهومةً من واقع مشكلات الفيزياء اليومية؛ علم الضوء والديناميكا المائية وما شابه ذلك. غير أن نجاحَ نسخةِ شرودنجر نفسِها ربما أعاقَ أيَّ فهْمٍ أساسيٍّ لعالَمِ الكَمِّ عقودًا.

خطوة إلى الوراء

باسترجاعِ ما حدث آنذاك، يبدو من المستغرَب أن ديراك لم يكتشف (أو يبتكر) ميكانيكا الموجات؛ ذلك أن المعادلات التي وضعها هاميلتون وأثبتت جدواها في ميكانيكا الكَمِّ تمتد بجذورها إلى محاولةٍ في القرن التاسع عشر لدمج نظريتَي الموجات والجسيمات للضوء. وُلِد السير ويليام هاميلتون في دبلن سنة ١٨٠٥، وأصبح في نظر الكثيرين عالِمَ الرياضيات الأول في عصره. وكان أعظم إنجاز له (مع أنه لم يكن يُعَد كذلك في ذلك الوقت) هو توحيد قوانين الضوء والديناميكا في إطارٍ رياضي واحد؛ وهو مجموعة واحدة من المعادلات يمكن

استخدامها لوصف حركة الموجة وحركة الجسيم. نُشِر هذا البحث في أواخر العشرينيات وأوائل الثلاثينيات من القرن التاسع عشر، وقد تناوَل باحثون آخرون كلتا السمتَيْن. فقد كان كلٌّ من الميكانيكا والضوء مفيدًا للباحثين في النصف الثاني من القرن التاسع عشر، إلا أنَّ أحدًا لم يلاحظ نظام الميكانيكا/الضوء المزدوج الذي كان محلَّ الاهتمام الحقيقي لهاميلتون. تتمثَّل النتيجة الواضحة لبحث هاميلتون في ضرورةِ إحلال حركات الموجات في الميكانيكا محلَّ مسارات الجسيمات، وذلك على غرارِ ضرورةِ إحلال مفهوم الموجات في علم الضوء محلَّ «أشعة» الضوء. ولكن، يبدو أن فكرةً كهذه كانت دخيلةً على فيزياء القرن التاسع عشر حتى إنَّ أحدًا لم يأتِ على ذكرها، حتى هاميلتون نفسُه. ولم يكن الأمر أن الفكرة طُرِحت ورُفِضت بأنها غير منطقية ومستبعَدة، بل كانت حرفيًّا غريبةً وشاذة لدرجةِ أنها لم تطرأ حتى على ذهن أحد. وكان من الممكن أن يكون ذلك استنتاجًا من المستحيل أن يتوصَّل إليه أيُّ فيزيائي من القرن التاسع عشر، وكان من المحتم ألا يبرهن على صحةِ هذه الفكرة إلا بعد ثبوتِ عدم مواءمة الميكانيكا الكلاسيكية كوصفٍ للعمليات الذرية. ولكن، إذا أخذنا في الحسبان أن هاميلتون هو أيضًا مَن وضع الصيغة الرياضية التي فيها $a \times b \neq b \times a$، فلن يكون من المبالغة في شيء أن نصفَ السير ويليام هاميلتون بأنه مؤسِّسُ ميكانيكا الكَمِّ المسكوتُ عنه. ولو أنه كان على قيد الحياة وقتها، لأمكنَه أن يفطِن إلى الصلة بين ميكانيكا المصفوفات وميكانيكا الموجات، وكان ديراك في وسعه أن يفعل ذلك، بيد أنه من غير المستغرب في واقع الأمر أنه أخطأ في إدراك هذه الصلة في البداية. ففي النهاية، لم يكن إلا طالبًا منهمِكًا في أول بحثٍ كبير له، وهناك حدودٌ لما يمكن أن يقوم به المرء بمفرده في غضون بضعة أسابيع. ومع ذلك، ربما الأهم من ذلك أنه كان يتعامل مع أفكارٍ مجردة، ويحذو حذوَ هايزنبرج في محاولته فصْلَ فيزياءِ الكَمِّ عن الصورة المعتادة المألوفة للإلكترونات بكونها تدور حول النواة، ولم يكن يتوقَّع أن يتوصَّل إلى صورةٍ فيزيائية حدْسية رائعة للذرة. ولم يتقبَّل الناس على الفور أن ميكانيكا الموجاتِ نفسَها لا تقدِّم مثل هذه الصورة المألوفة على الرغم من توقعات شرودنجر.

ظنَّ شرودنجر أنه قد تخلَّص من الانتقالاتِ الكَمِّية من حالةٍ إلى أخرى بإدخال الموجات في نظريةِ الكَمِّ. وتخيَّل «انتقال» الإلكترون من حالةٍ إلى أخرى من حالات الطاقة بأنه يشبه التغيُّر في اهتزازِ وترِ الكمان من نغمةٍ إلى أخرى، وفكَّر في الموجة في معادلاته الموجية على أنها موجةُ المادة التي جاء بها دي بروي. ولكن مثلما سعى باحثون آخرون لاكتشافِ المغزى وراء المعادلات، تبدَّدت هذه الآمال في إعادة الفيزياء الكلاسيكية إلى مكانة

الصدارة لتكونَ محطَّ الاهتمام من جديد. وكان بور، على سبيل المثال، متحيرًا في مفهوم الموجة. فكيف يمكن لموجةٍ، أو لمجموعةٍ من الموجات المتداخلة، أن تجعل عدَّادَ جايجر ينقر كما لو أنه سجَّل جسيمًا مفردًا كان في الواقع «يموج» داخل الذرة؟ والأهم كيف يمكن تفسير طبيعة إشعاع الجسم الأسود من حيث موجات شرودنجر؟ ومن ثَم دعا بور شرودنجر لتمضيةِ بعض الوقت في كوبنهاجن سنة ١٩٢٦؛ حيث تناولا هذه المشكلات وتوصَّلا إلى حلولٍ لم تَرُق كثيرًا لشرودنجر.

في البداية، اتضح أن الموجات نفسَها — عند فحصها عن قرب — عبارةٌ عن شيء تجريدي مثل أعداد q لديراك. وأثبتت الرياضيات أن الموجات لا يمكن أن تكون موجاتٍ حقيقية في الفراغ، مثل التموُّجات التي تظهر على سطح بِركة، لكنها كانت تمثِّل صورةً معقَّدة من الذبذبات في فراغٍ رياضي تخيُّلي يُدعَى الفراغ التشكيلي. والأسوأ من ذلك أن كل جسيم (لِنقُل كلَّ إلكترون) يجب أن تكون له ثلاثة أبعاد. يمكن وصف إلكترون وحيد بواسطةِ معادلة موجية في فراغ تشكيلي ثلاثي الأبعاد، ويستلزم الأمر فراغًا تشكيليًّا سداسيَّ الأبعاد لوصف إلكترونَين، وتسعة أبعاد لوصف ثلاثة إلكترونات، وهكذا. أما إشعاع الجسم الأسود، فحتى عندما يتحوَّل كل شيء إلى لغة ميكانيكا الموجات، فإن الحاجةَ إلى كَمَّاتٍ منفصلة، وانتقالاتٍ كمومية، ستظل قائمة. كان شرودنجر مشمئزًّا وأبدى ملاحظته التي كثيرًا ما يُستشهَد بها مع تغييراتٍ طفيفة في الترجمة: «لو أنني كنت أعلم أننا لن نتخلَّص من عملية الانتقال الكمومي اللعينة، لما أقحمت نفسي في هذا الشأن.» وكما أوضحَ هايزنبرج في كتابه «الفيزياء والفلسفة»، فإنَّ «... هذه المفارقات المتعلِّقة بالازدواجية بين تصوُّر الموجات وتصوُّر الجسيمات لم تُحَلَّ؛ فقد كانت مخفيةً بطريقة أو بأخرى في النظام الرياضي».

ولا شك أن تصوُّر الموجات الحقيقية فيزيائيًّا التي تدور حول أنوية الذرات، والتي قادت شرودنجر إلى اكتشافِ المعادلةِ الموجيةِ التي تحمل اسمه، كانت خطأ. ولم تَعُد ميكانيكا الموجات دليلًا على حقيقةِ وجود عالَم الذرة أكثرَ من ميكانيكا المصفوفات، إلا أن ميكانيكا الموجات — على عكس ميكانيكا المصفوفات — تُوهِمنا بوجود شيءٍ مألوف ومريح. وقد صمد هذا التوهُّم الحميم المألوف حتى يومنا هذا، وأخفى حقيقةَ أن عالَم الذرة مختلِف كليةً عن عالمنا اليومي. وكان من الممكن أن تتوصَّل عدةُ أجيال من الطلاب، الذين أصبحوا هم أنفسهم الآن أساتذة، إلى فهْمٍ أعمقَ كثيرًا لنظريةِ الكَمِّ لو كانوا قد اضطُروا إلى التصدي للطبيعة التجريدية لأسلوب ديراك، بدلًا من أن يتصوروا أنَّ ما

عرفوه عن سلوك الموجات في العالَم اليومي قدَّم تصوُّرًا لسلوك الذرة. وهذا هو السبب في أنه يبدو لي أنه مع الخطوات الكثيرة التي اتُّخِذَت في تطبيق ميكانيكا الكَمِّ — على طريقة كتبِ الطهي — في كثير من المشكلات المهمة (تذكَّر الملاحظة التي أبداها ديراك عن الفيزيائيين من الدرجة الثانية الذين يُجرُون أبحاثًا من الدرجة الأولى)، فإنه بعد خمسين عامًا من بحث ديراك لم يبلغ الفيزيائيون مكانةً أفضلَ مما بلغها زملاؤهم في أواخر العشرينيات من القرن العشرين فيما يتعلَّق بفهْمنا الأساسي لفيزياءِ الكَمِّ. وقد أدَّى نجاح معادلة شرودنجر كأداةٍ عملية إلى توقُّف الناس عن إمعان التفكيرِ في آلية عمل هذه الأداة وسببِ نجاحها. ولم تتحسَّن الأمورُ إلا بقدرٍ ضئيلٍ للغاية منذ ثمانينيات القرن العشرين، وعلى الرغم من انشغالِ الكثيرِ من الأشخاص الآن بمعنى فيزياءِ الكَمِّ، فلا يوجد بديل مؤكَّد لتفسير كوبنهاجن.

فن الطهي الكَمِّي

اعتمدتْ أساسياتُ فن الطهي الكَمِّي — فيزياء الكَمِّ التطبيقية منذ عشرينيات القرن العشرين — على أفكارٍ وضعها بور وبورن في نهاية هذه الفترة. قدَّم لنا بور الأساسَ الفلسفي الذي يمكن به مراعاةُ الطبيعة الازدواجية (جسيمات/موجات) لعالَمِ الكَمِّ، بينما قدَّم لنا بورن القواعدَ الأساسية التي ينبغي اتباعها في إعدادِ وصفاتِ الكَمِّ.

قال بور إن التصورين النظريين، فيزياء الجسيمات وفيزياء الموجات، صحيحان بالدرجةِ نفسِها، وكلاهما يصفان الواقعَ نفسه. وعلى الرغم من أنه لا يوجد وصفٌ منهما كامل في ذاته، فثمَّة حالاتٌ يكون من الأنسب فيها استخدام مفهوم الجسيم، وحالات أخرى يكون من الأنسب فيها استخدام مفهوم الموجات. ولا يُعدُّ كيانٌ رئيسي مثل الإلكترون جسيمًا ولا موجة، لكنه في بعض الأحوال يسلك مسلكَ الموجات، وفي أحوال أخرى يسلك مسلكَ الجسيمات (وهو أمرٌ مراوغ ولا يمكن التحقُّق منه في الواقع). ولكن لا يمكنك في أي حال من الأحوال تصميمُ تجربة تُظهِر الإلكترون وهو يسلك كلا المسلكين في آنٍ واحد. وتُسمَّى فكرة الموجات والجسيمات بوصفهما وجهَيْن متمِّمَيْن لهوية الإلكترون المعقَّدة بالتكاملية.

اكتشفَ بورن طريقةً جديدةً لفهْمِ موجات شرودنجر. الشيء المهم في معادلة شرودنجر الذي يقابل التموُّجات المادية على سطح البِركة في العالم اليومي هو الدالة

الموجية التي يُرمَز إليها عادةً بالحرف الإغريقي ψ (بساي). ومن خلال العمل في جوتينجن إلى جانبِ علماء الفيزياء التجريبية الذين كانوا يُجرُون تجاربَهم الجديدة عن الإلكترونات التي تؤكِّد الطبيعة الجسيمية للإلكترون كلَّ يوم تقريبًا، لم يستطِع بورن ببساطة أن يتقبَّل أن دالةَ بساي هذه تقابل موجةَ إلكترونات «حقيقية»، مع أنه اكتشف منذ ذلك الوقت — حاله حال معظم الفيزيائيين في تلك الفترة — أن المعادلات الموجية هي الأنسب لحل الكثير من المشكلات. ومن ثَم حاول إيجادَ طريقةٍ لربط الدالة الموجية بوجود الجسيمات. وكانت الفكرةُ التي تناولها قد طُرِحت من قبلُ في النقاش الدائر حول طبيعة الضوء، إلا أنه أخذها على عاتقه ونقَّحها. صرَّح بورن بأن الجسيمات حقيقية، ولكن الموجة هي التي توجِّهها بطريقةٍ أو بأخرى، وكانت قوة الموجة (أو بدقة أكبر، قيمة ψ^2) في أي نقطة في الفراغ مقياسًا لـ «احتمال» العثورِ على الجسيم في هذه النقطةِ بعينها. ولا يمكننا أبدًا الجزم بمكانِ وجودِ جسيمٍ مثل الإلكترون، إلا أن الدالة الموجية تتيح لنا حساب احتمال العثور على الإلكترون في مكانٍ معيَّن عند إجراء تجربةٍ مصمَّمة خصيصًا لتحديد موضع الإلكترون. وأغرب ما في هذه الفكرة أنها تعني أن أيَّ إلكترون يُحتمَل أن يكون موجودًا في أي مكانٍ بأية حال، وكلُّ ما في الأمر أنه من المرجَّح جدًّا وجودُ الإلكترون في بعض المواقع، ومن غير المرجَّح مطلقًا وجوده في مواقعَ أخرى. ولكن على غرار قواعد الإحصاء التي تنص على أنه من «المُحتمَل» أن يتجمَّع كلُّ هواء الحجرة في أركانها، فإن تفسيرَ بورن لفكرة ψ قد قلَّل من حقيقةِ عالَمِ الكَمِّ غير المؤكَّدة بالفعل.

جاءت أفكار بور وبورن متوافقةً مع اكتشاف هايزنبرج، في نهاية سنة ١٩٢٦، حول كون الشك وعدم اليقين متأصلَيْن بالفعل في معادلات ميكانيكا الكَمِّ. فالرياضيات التي تنص على أنَّ $pq \neq qp$ تنصُّ أيضًا على أننا لا يمكن أبدًا أن نكون على يقينٍ بماهية p وq. فإذا أطلقنا على p زخم الإلكترون مثلًا، واستخدمنا q للإشارة إلى موضعه، فإننا نستطيع أن نتخيَّل قياسَ أيٍّ من p أو q بدقةٍ شديدة. ويمكننا أن نسمي مقدار «الخطأ» في قياساتنا Δp أو Δq، بما أن علماء الرياضيات يستخدمون الحرف الإغريقي Δ (دلتا) للإشارة إلى أجزاءٍ صغيرة من المقادير المتغيرة. أما ما أثبته هايزنبرج، فهو أنك إذا حاولت في هذه الحالة قياسَ «كلٍّ» من موضع الإلكترون وزخمه، فإنك لن تنجح أبدًا؛ لأن $\Delta p \times \Delta q$ لا بد أن تكون «دائمًا» أكبرَ من $\hbar$، ثابت بلانك مقسومًا على 2π. وكلما عرفنا موضعَ جسمٍ ما بدقةٍ أكبر، كنَّا أقلَّ تيقنًا من زخمه، أي المكان الذي ينتقل إليه. وإذا كنا نعرف زخمه بدقة شديدة، فلا يمكن عندئذٍ أن نكون متأكدين من مكانِ وجوده. ولهذه العلاقة

من عدم اليقين نتائجُ واسعةُ النطاق سنناقشها في الجزء الثالث من هذا الكتاب. ومع ذلك، فإن النقطة المهمة التي تستحق التقدير هي أن ذلك لا يمثِّل قصورًا في التجارب المستخدَمة لقياس خصائص الإلكترون. ولكن كلُّ ما هنالك أنه من القواعد الأساسية في ميكانيكا الكَمِّ أنه يستحيل من حيث المبدأ قياس أزواج معينة من الخصائص بدقة، بما في ذلك الموضع/الزخم، في آنٍ واحد. ولا توجد حقيقة مطلقة على المستوى الكَمِّي.[5]

تقيس علاقة عدم اليقين لهايزنبرج مقدارَ التداخل بين الأوصافِ التكميلية للإلكترون أو غيره من الكيانات الأساسية. فالموضعُ من خصائص الجسيم الرئيسية؛ إذ يمكن تحديد موضع الجسيمات بدقة. أما الموجات، على الجانب الآخر، فلا تكون لها مواضعُ دقيقة ولكنها ذات زخم. وكلما زادت معرفتك بالسمات الموجية للموضع، قلَّت معرفتك بالجسيم، والعكس صحيح. فالتجارب المصمَّمة لاكتشافِ الجسيمات دائمًا ما تكتشف جسيمات، أما التجارب المصمَّمة لاكتشافِ الموجات فدائمًا ما تكتشف موجات. ولا توجد تجربةٌ تثبت أن الإلكترون يسلك مسلكَ الموجة والجسيم في آنٍ واحد.

أكَّد بور أهميةَ التجارِب في فهمنا لعالَمِ الكَمِّ. ولا يمكننا سبْرُ أغوارِ عالَمِ الكَمِّ إلا بإجراء التجارب، وكل تجربة تَطرح في الواقع سؤالًا عن عالَمِ الكَمِّ. وتصطبغ الأسئلة التي نطرحها إلى حدٍّ كبير بخبراتنا اليومية، حتى إننا نبحث عن خصائص مثل «الزخم» و«الطول الموجي» ولكننا نحصل على «إجابات» نفهمها من منظور هذه الخصائص. والتجاربُ متأصلة في الفيزياء الكلاسيكية، مع أننا نعلم أن الفيزياء الكلاسيكية لا تصلح لوصف العمليات الذرية. علاوةً على ذلك، وحسب ما قاله بور، لا بد أن نتدخَّل في العمليات الذرية حتى يمكننا مشاهدتها بأية حال، وهو ما يعني أنه لا جدوى من التساؤل عما تفعله الذرات عندما لا نكون بصددِ النظر إليها ورصدها. وكلُّ ما نستطيع فعْله، كما شرحَ بورن، هو حسابُ احتمال التوصُّل إلى نتيجةٍ معينة من تجربةٍ معينة.

ويُشار إلى هذه المجموعة من الأفكار — عدم اليقين، والتكاملية، والاحتمال، وتأثُّر النظام المرصود بفِعل الرصد — باسم «تفسير كوبنهاجن» لميكانيكا الكَمِّ، مع أنه لا أحدَ في كوبنهاجن (أو في أي مكانٍ آخر) قد صاغ عبارةً محدَّدة على هذا النحو تسمَّى «تفسير كوبنهاجن»، ويُعزى في الواقع أحد المكوِّنات الأساسية — وهو التفسير الإحصائي للدالة الموجية — إلى ماكس بورن في جوتينجن. ويعني تفسير كوبنهاجن الكثيرَ للعديدِ من الأشخاص، إن لم يكن يعني كلَّ شيءٍ للجميع، وهو تفسير مراوغ يتناسب مع عالَم ميكانيكا الكَمِّ المراوغ كذلك. طرحَ بور المفهوم لأول مرة على الملأ في مؤتمرٍ في مدينة

كومو بإيطاليا في سبتمبر ١٩٢٧. ودلَّ ذلك على اكتمال نظرية ميكانيكا الكَمِّ المتسقة على النحو الذي يمكن به لأيِّ فيزيائي كفءٍ أن يستخدمها في حل المشكلات التي تتضمَّن الذرات والجزيئات، دون أن يتعيَّن عليه التفكير كثيرًا في الأساسيات، ولكن يكفي فقط السير وفقًا لكتاب الوصفات وتمحيص الإجابات.

في العقود التالية لذلك، قدَّم أنصار ديراك وباولي مساهماتٍ أساسية عديدة، وكرَّمت لجنة نوبل روادَ نظريةِ الكَمِّ الجديدة عن جدارة، إلا أن توزيع الجوائز قد خضعَ لمنطق اللجنة الغريب. حصل هايزنبرج على جائزة نوبل سنة ١٩٣٢، وشعر بشيءٍ من الخزي لأن الجائزة لم تذهب كذلك إلى زميليه بورن وجوردان، وقد ظلَّ بورن نفسُه يشعر بالمرارة لسنواتٍ بعدها، وكثيرًا ما كان يعلِّق بقوله إن هايزنبرج لم يعرف حتى ما المصفوفة حتى أخبرَه (بورن) بذلك، وقد كتب إلى أينشتاين سنة ١٩٥٣ يقول: «لم تكن لديه أي فكرة في ذلك الوقت عن ماهية المصفوفة. لكنه كان هو مَنْ حصد كل الجوائز عن أبحاثنا المشتركة، مثل جائزة نوبل.»[6] وقد اقتسمَ شرودنجر وديراك جائزةَ نوبل في الفيزياء سنة ١٩٣٣، وكان على باولي الانتظار حتى سنة ١٩٤٥ ليحصل على جائزته، وذلك عن اكتشافه مبدأَ الاستثناء، أما بورن فقد حصل في النهاية على هذا التكريم سنة ١٩٥٤ ونال جائزة نوبل عن أبحاثه حول التفسير الاحتمالي لميكانيكا الكَمِّ.[7]

ومع ذلك، فإن كلَّ هذا النشاط — الاكتشافات الجديدة في ثلاثينيات القرن العشرين، ومنح الجوائز، والتطبيقات الجديدة لنظريةِ الكَمِّ خلال العقود التي تلت الحرب العالمية الثانية — يجب ألا يخفي حقيقةَ أن عصر التقدُّم الأساسي كان قد انتهى في هذا الوقت. وربما نكون على أعتابِ عصرٍ آخر من هذا القبيل، وأن تقدُّمًا جديدًا سيحدث باستبعادِ تفسير كوبنهاجن والفهم المتوهَّم للدالة الموجية لشرودنجر. ولكن قبل النظر في هذه الاحتمالات المهمة، من الإنصاف أن نوضِّح مقدارَ ما تمَّ إنجازه باستخدام النظرية التي لم تُستكمَل بالأساس إلا قبل نهاية عشرينيات القرن العشرين.

هوامش

(1) *Physics and Philosophy,* page 41.

(2) Quoted by Mehra and Rechenberg, volume 4, page 159.

(3) In Dirac's version of quantum mechanics, a key expression in the Hamiltonian equations is replaced by the quantum mechanical expression

(ab – ba)/iħ, which is just another form of the expression Born, Heisenberg, and Jordan called the "fundamental quantummechanical relation", in their three–man paper, written before Dirac's first paper on quantum mechanics appeared, but published after Dirac's paper.

(4) With characteristic, and genuine, modesty Dirac has described how easy it was to make progress once it was known that the correct quantum equations were simply classical equations put into Hamiltonian form. For any of the little puzzles that beset quantum theory, all that was necessary was to set up the equivalent classical equations, turn them into Hamiltonians, and solve the puzzle. "It was a game, a very interesting game one could play. Whenever one solved one of the little problems, one could write a paper about it. It was very easy in those days for any second–rate physicist to do first–rate work. There has not been such a glorious time since then. It is very difficult now for a first–rate physicist to do second–rate work." (*Directions in Physics*, page 7.)

(5) In the everyday world, the same uncertainty relation applies, but because p and q are so much bigger than $\hbar$ the amount of uncertainty involved is only a tiny fraction of the equivalent macroscopic property. Planck's constant, h, is about 6.6×10^{-27} and is a bit bigger than three. In round terms, therefore, $\hbar$ is just about 10^{-27}. We can measure the position and the momentum of a pool ball as accurately as we like by tracking it as it rolls across a table, and the natural uncertainty of something comparable to 10^{-27} in either position or momentum won't show up in any practical way. As always, the quantum effects only become important if the numbers in the equations are about the same size as, or smaller than, Planck's constant.

(6) *Born–Einstein Letters*, page 203.

(7) Not before time, in his opinion (and, to be fair, that of many others). In the *Born–Einstein Letters*, he recalls (page 229) that "the fact that I did

not receive the Nobel Prize in 1932 together with Heisenberg hurt me very much at the time, in spite of a kind letter from Heisenberg". He explains the delay in receiving acknowledgement of his work on the statistical interpretation of the wave equation as due to the opposition of Einstein, Schrödinger, Planck, and de Broglie, to the idea—certainly not names for the Nobel Committee to dismiss lightly—and he makes passing reference to the "Copenhagen school, which today lends its name almost everywhere to the line of thinking I originated", meaning the Copenhagen interpretation incorporating the statistical ideas. These aren't just the crusty remarks of an old man, but have substantial foundation; everybody in the quantum-mechanical trade was delighted by the belated recognition of Born's contribution. Nobody more so than Heisenberg, who later commented to Jagdish Mehra, "I was so *relieved* when Born was awarded the Nobel Prize". (Mehra and Rechenberg, volume 4, page 281.)

الفصل السابع

مطبخ الكَمِّ

يحتاج الفيزيائيون إلى معرفةِ بضعةِ أمور بسيطة من أجل استخدام الوصفات الواردة في كتاب الطهي الخاصِّ بالكَمِّ. ولا يوجد نموذج معيَّن للشكل الذي تكون عليه الذرة والجسيمات الأولية، وليس هناك ما يخبرنا بما يحدث عندما لا نكون بصدد رصدها والنظر إليها. إلا أنه من الممكن استخدام معادلات ميكانيكا الموجات (وهي الصيغة الأشهر والأوسع استخدامًا في هذا الموضوع) للتنبؤ على أساس إحصائي. فإذا أجرينا رصدًا لمشاهدة نظامٍ كَمِّي وحصلنا على الإجابة (أ) لقياساتنا، فإن المعادلات الكَمِّية ستخبرنا باحتمال الحصول على الإجابة (ب) (أو الإجابة (ج) أو (د) أو أي إجابة أخرى) إذا أجرينا المشاهدة نفسَها بعد وقتٍ معيَّن. ولا تخبرنا نظريةُ الكَمِّ بالشكل الذي تكون عليه الذرات، أو ما تفعله حال عدم النظر إليها ورصدها. وللأسف فإن معظم الأشخاص الذين يستخدمون المعادلات الموجية اليوم لا يحبذون ذلك، وإنما يؤيدون بالكلام فقط دورَ الاحتمالات. ويعرف الطلاب ما أطلقَ عليه تيد باستين «صورةً متبلورة للتفنُّن في استخدام الأفكار السائدة في نهاية عشرينيات القرن العشرين ... ما الذي يستطيع عالِم الفيزيائي العادي، الذي لم يسأل نفسَه قط عن رأيه في المسائل الأساسية، العمل عليه لحل مشاكله التفصيلية.»[1] لقد تعلموا التفكيرَ في الموجات على أنها حقيقية، والقليل منهم اجتاز دورةً دراسية في نظريةِ الكَمِّ دون أن يخرج منه بتصوُّر في مخيلته لما تكون عليه الذرة. يتعامل الناس مع التفسير الاحتمالي دون أن يفهموه حقًّا، وهذا دليلٌ على قوة المعادلات التي وضعها شرودنجر وديراك على وجه التحديد، والتفسير الذي قدَّمه بورن، حتى إنه في مقدور الناس التلاعبُ بالكَمِّ وتحضيرُ وجباتٍ كميَّة ناجحة دون فهْم السبب وراء نجاح هذه الوصفات.

كان ديراك أول رئيس طهاةٍ للكَمِّ. تمامًا مثلما كان أول شخص من خارج جوتينجن يفهم ميكانيكا المصفوفات الجديدة ثم يطوِّرها بعد ذلك؛ ومن ثَم كان هو الشخص الذي تناوَل ميكانيكا الموجات لشرودنجر ووضعها على أساسٍ أكثرَ إحكامًا مع تطويرها لأبعد من ذلك. وأثناء تعديل المعادلات بما يتناسب مع متطلبات نظرية النسبية، بإضافة الزمن كبُعد رابع، وجد ديراك سنة ١٩٢٨ أنه لا بد من إدخالِ الحد الذي يُعتبر اليوم أنه يمثِّل الحركة المغزلية للإلكترون، وبذلك قدَّم على نحوٍ غيرِ متوقَّع تفسيرَ الانقسام المزدوج لخطوط الطيف الذي حيَّر العلماء النظريين على مدى عَقدٍ من الزمن. وقد أسفرت عملية تحسين المعادلات عن نتيجةٍ أخرى غيرِ متوقعة، وهي النتيجة التي مهَّدت الطريق أمام التطوير الحديث لفيزياء الجسيمات.

المادة المضادة

وفقًا لمعادلات أينشتاين، فإن طاقة الجسيم الذي كتلته m وزخمه p هي:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

وهي المعادلة التي تُختزَل إلى $E = mc^2$ عندما يساوي الزخم صفرًا. إلا أن هذه ليست كل القصة. ذلك لأن المعادلةَ الأكثرَ ألفة تأتي من حساب الجذر التربيعي للمعادلة كلها، وفي الرياضيات لا بد من الإشارة إلى أن E إما أن تكون موجبة أو سالبة. فكما أن ٢ × ٢ = ٤، فإن −٢ × −٢ = ٤، وعلى وجه الدقة $E = \pm mc^2$. عندما تظهر هذه «الجذور السالبة» في المعادلات، فإنها غالبًا تُستبعَد لكونها بلا معنًى، ومن «الواضح» أن الناتج الوحيد الذي يعنينا هو الجذر الموجب. لم يتخذ ديراك هذه الخطوة الواضحة لأنه عبقري، بل أخذ يفكِّر فيما يتضمَّنه ذلك من معانٍ. وعند حساب مستويات الطاقة في النسخة النسبية من ميكانيكا الكَمِّ، تظهر فئتان: إحداهما موجبة بالكامل، ويقابلها mc^2، والأخرى سالبة بالكامل ويقابلها $-mc^2$. وطبقًا للنظرية، فإن الإلكترونات لا بد أن تقع في أدنى حالة غير مشغولة للطاقة، ومعروف أنه حتى أعلى حالةِ طاقةٍ سالبةٍ تكون أقل من أدنى حالة طاقة موجبة. إذن، ما الذي تعنيه مستويات الطاقة السالبة؟ ولماذا لا تقع كل الإلكترونات الموجودة في العالَم في هذه الحالات وتختفي؟

اعتمدت إجابة ديراك على حقيقةِ أن الإلكترونات من الفرميونات، وأن إلكترونًا واحدًا فقط يستطيع الدخول إلى كل حالة ممكنة (إلكترونان لكل مستوًى، إلكترون واحد لكل

حركة مغزلية). واستنتج أنه لا بد وأن الإلكترونات لا تقع في حالات الطاقة السالبة؛ لأن كل تلك الحالات ممتلئة بالفعل. وما ندعوه «فضاءً فارغًا» هو في الحقيقة بحرٌ من الإلكترونات السالبة الطاقة. ولم يتوقف ديراك عند ذلك. فإذا أعطيت الإلكترون طاقة، فإنه سينتقل إلى أعلى سُلَّم حالات الطاقة. وهكذا إذا أعطينا إلكترونًا في بحر الطاقة السالبةِ ما يكفي من الطاقة، فإنه سينتقل حتمًا إلى أعلى العالم الحقيقي ليصبح مرئيًّا مثل إلكترون عادي. وللانتقال من الحالة $-mc^2$ إلى الحالة $+mc^2$، فإن الأمر يستلزم بوضوحٍ إدخالَ طاقةٍ مقدارها $2mc^2$، وهي بالنسبة إلى كتلة الإلكترون حوالي مليون إلكترون فولت، ويمكن الحصول عليها بسهولةٍ في العمليات الذرية أو عندما تتصادم الجسيمات بعضها مع بعض. وأما الإلكترون ذو الطاقة السالبة الذي ارتقى حتى وصلَ إلى العالَم الحقيقي، فسيصبح إلكترونًا حقيقيًّا بكل المقاييس، ولكننه سيخلِّف وراءه فجوةً أو ثغرة في بحر الطاقة السالبة، وهي غياب إلكترون سالب الشحنة. يقول ديراك إن مثل هذه الفجوة أو الثغرة لا بد أن تسلكَ مسلكَ جسيمٍ موجبِ الشحنة (كما أن سالب زائد سالب يساوي موجبًا، فإن غياب جسيم سالب الشحنة من بحرٍ سالبٍ لا بد أن يظهر كشحنة موجبة). وعندما واتته الفكرة لأول مرة، استنتج أنه نظرًا لتماثل الوضع، فلا بد أن تكون لهذا الجسيم الموجب الشحنة نفسُ كتلة الإلكترون. ولكن عندما نشر الفكرة، اقترح في لحظةِ ضعفٍ أن الجسيم الموجب يمكن أن يكون البروتون، وكان هذا هو الجسيم الآخر الوحيد المعروف في نهاية عشرينيات القرن العشرين. وكما يصف ذلك في كتاب «اتجاهات في الفيزياء»، كان الصواب يجانبه في ذلك، وكان لا بد له أن يتحلى بالشجاعة للتنبؤ بأن العلماء التجريبيين سيكتشفون حتمًا جسيمًا غيرَ معروف مسبقًا له نفسُ كتلة الإلكترون إلا أنه موجب الشحنة.

لم يكن أحدٌ متأكدًا كيف ستكون وجهات النظر تجاه أبحاث ديراك في البداية. رُفِضَت فكرةُ أنَّ البروتون هو النظير الموجب للإلكترون، ولم يأخذ أحدٌ الفكرةَ على محمل الجِد، إلى أن اكتشف الفيزيائي الأمريكي كارل أندرسون آثارَ جسيم موجب الشحنة أثناء مشاهداته الرائدة للأشعة الكَوْنية سنة ١٩٣٢. والأشعة الكَوْنية عبارة عن جسيماتٍ حاملة للطاقة تصل إلى الأرض قادمةً من الفضاء. وقد اكتشفها النمساوي فيكتور هيس قبل الحرب العالمية الأولى، واقتسم مع أندرسون جائزة نوبل سنة ١٩٣٦. وقد تضمَّنت تجارب أندرسون تتبُّع مسار الجسيمات المشحونة أثناء حركتها في غرفة الضباب، وهي عبارة عن جهازٍ تترك فيه الجسيمات ذيلًا مثل ذيل التكاثف في الطائرات، واكتشفَ

أنَّ بعض الجسيمات تنتج مسارات تنحني بفِعل المجال المغناطيسي بالمقدار نفسه الذي ينحني به مسار الإلكترون، ولكن في الاتجاه المضاد. وتكون لهذه الجسيمات نفسُ كتلة الإلكترون، ولكنها موجبة الشحنة، وقد أطلق عليها اسم «بوزيترونات». حصل أندرسون على جائزة نوبل عن هذا الاكتشاف سنة ١٩٣٦؛ أي بعد ثلاث سنواتٍ من حصول ديراك على جائزته، وقد غيَّر الاكتشافُ وجهةَ نظر الفيزيائيين لعالَم الجسيمات. فقد ظنوا لفترة طويلة وجودَ جسيم ذري متعادل، وهو النيوترون، الذي اكتشفه جيمس تشادويك سنة ١٩٣٢ (وحصل عنه على جائزة نوبل سنة ١٩٣٥)، وكانوا متقبلين إلى حدٍّ ما فكرةَ أن نواة الذرة تتكوَّن من بروتونات موجبة ونيوترونات متعادلة، تحيط بها إلكترونات سالبة. إلا أنه لم يكن هناك مكان للبوزيترونات في هذا التصوُّر، وغيَّرت فكرةُ أن الجسيمات يمكن أن تنشأ من الطاقة من مفهوم الجسيمات الأساسية كليًّا.

من حيث المبدأ، يمكن توليدُ أيِّ جسيمٍ من الطاقة عن طريق عملية ديراك، بشرط أن يكون ذلك مصحوبًا بتوليد الجسيم المضاد المناظر له، أو «الثغرة» في بحر الطاقة السالبة. ومع أن الفيزيائيين يفضِّلون النُّسخ الأكثر شمولًا من قصة نشوء الجسيمات اليوم، فإن القواعد لا تزال هي نفسها في معظمها، وإحدى هذه القواعد الرئيسية أنه عند التقاء جسيم بالجسيم المضاد له فإنه «يسقط في الثغرة»، مُطلِقًا طاقةً مقدارها $2mc^2$ ثم يختفي، ولا يكون ذلك في صورةِ حَفنة من الدخان بقدرِ ما هو دُفقة من أشعة جاما. وقبل سنة ١٩٣٢ كان الكثير من الفيزيائيين قد شاهدوا مسارات الجسيمات في غرف الضباب، وكان الكثير من المسارات التي شاهدوها يُعزى حتمًا إلى البوزيترونات، ولكن كان الافتراض السائد حتى بحْثِ أندرسون أنَّ هذه المسارات دائمًا تُعزى إلى حركة الإلكترونات باتجاه أنوية الذرات وليس إلى حركة البوزيترونات بعيدًا عنها. كان الفيزيائيون متحيزين ضد فكرة وجود جسيمات جديدة، أما اليوم فالوضع تغيَّر إلى النقيض، وكما يقول ديراك: «لا يميل الناس إلى التسليم بوجود جسيم جديد إلا إذا توفَّر أقلُّ دليل على ذلك، سواء كان نظريًّا أو تجريبيًّا.» («اتجاهات في الفيزياء»، صفحة ١٨). وكانت النتيجة أن حديقة الجسيمات لا تشتمل فقط على الجسيمَين الأساسيين المعروفَين في عشرينيات القرن العشرين، بل على أكثر من ٢٠٠ جسيم، يمكن إنتاجها جميعًا بتزويدِ مُعجِّلات الجسيمات بالطاقة الكافية، ومعظمها غير مستقر استقرارًا تامًّا، و«يتفكك» بسرعةٍ ليعطي وابلًا من جسيماتٍ أخرى وإشعاع. ووسط تلك الحديقة، ضاعَ تقريبًا البروتون المضاد والنيوترون المضاد اللذان اكتُشِفا في منتصف خمسينيات القرن العشرين، إلا أنهما رغم ذلك كانا تأكيدًا قويًّا لصحة الأفكار الأصلية لديراك.

صدرت كتبٌ كاملة عن حديقة الجسيمات، وبنى كثير من الفيزيائيين مسيراتهم المهنية بوصفهم مختصين في تصنيف الجسيمات. ولكن يبدو لي أنه لا يوجد شيء جوهري بشأن وجود الجسيمات بهذه الوفرة، ويشبه ذلك ما كان عليه الوضع في علم التحليل الطيفي قبل نظريةِ الكَمِّ، عندما كان في مقدور علماء التحليل الطيفي قياسُ العلاقات بين الخطوط في الأطياف المختلفة وتصنيفها، ولكن دون أن تكون لديهم أدنى فكرة عن الأسباب الكامنة وراء العلاقات التي رصدوها. ولا بد أن يزوِّدنا شيء يستند حقًّا إلى أسسٍ جوهريةٍ أكثرَ بالقواعد الأساسية لإنتاج هذه الوفرة من الجسيمات المعروفة، وهي وجهة النظر التي صرَّح بها أينشتاين لكاتِب سيرته الذاتية أبراهام بيه في خمسينيات القرن العشرين: «كان واضحًا أنه شعر بأن الوقت لم يَحِن بعدُ للانشغال بهذه الأمور، وأن هذه الجسيمات من شأنها أن تظهر في النهاية كحلول للمعادلات في نظرية المجال المُوحَّد.»[2] وعلى مدى ثلاثين عامًا، كان الأمر يبدو كما لو أن أينشتاين على صواب حقًّا، وسوف نتطرق في خاتمة الكتاب إلى وصفِ الخطوط العريضة التقريبية لنظريةٍ موحَّدة محتمَلة تتضمن حديقة الجسيمات. أما الآن، فيكفي أن نشير إلى أن الانطلاق الساحق لفيزياء الجسيمات منذ أربعينيات القرن العشرين يمتد بجذوره إلى التطور الذي أحدثه ديراك في نظريةِ الكَمِّ، أولى الوصفات في كتاب الطهي الكَمِّي.

داخل النواة

بعد الانتصارات التي حقَّقتها ميكانيكا الكَمِّ في تفسيرِ سلوك الذرات، كان من الطبيعي أن يحوِّل الفيزيائيون اهتمامهم نحو الفيزياء النووية، ولكن على الرغم من النجاحات الكثيرة على أرض الواقع (التي تتضمَّن المفاعلات النووية والقنبلة الهيدروجينية)، ومعرفتنا بسلوك الذرة، فإننا لا نزال نفتقر إلى وجودِ فكرةٍ واضحةٍ عمَّا يجعل النواة تنبض. وفي الواقع أنه أمرٌ غير مستغرب على الإطلاق. ذلك أنه بمعرفة نصف قطر النواة، يتَّضح أنها أصغر مائة ألف مرة من الذرة، وبما أن الحجم يتناسب مع مكعَّب نصف القطر، فإنه من الأجدى القول إن الذرة أكبر من النواة بمقدار ألف مليون (١٠١٠) مرة. ومن الممكن قياسُ أمورٍ بسيطة مثل كتلة النواة وشحنتها، وتقودنا هذه القياسات إلى مفهوم النظائر، وهي أنويةٌ لها العدد نفسُه من البروتونات، ومن ثَم فإنها تكوِّن ذراتٍ لها العددُ نفسُه من الإلكترونات (والخصائص الكيميائية نفسُها)، لكنها تحتوي على أعدادٍ مختلفة من النيوترونات؛ ومن ثَم تكون مختلِفة الكتلة.

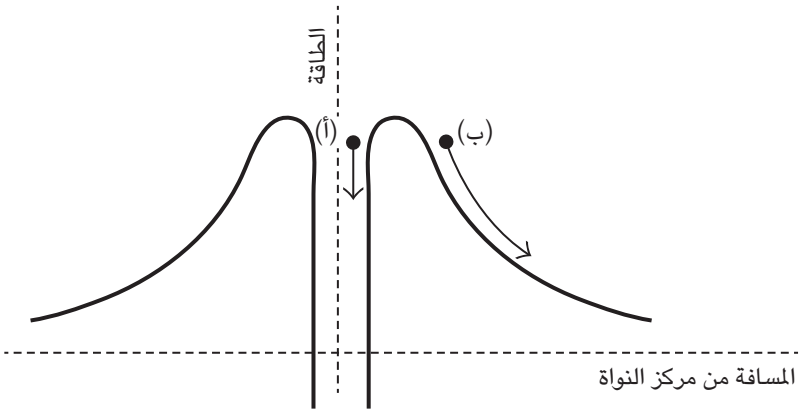
وبما أن البروتونات المكتظة داخل النواة تكون موجبة الشحنة؛ ومن ثَم فإنها تتنافر، فلا بد من وجود صورةٍ أقوى من «غراء» ما يجعلها تتماسك معًا، وهي قوة تعمل فقط عبر النطاقات المتناهية الصغر التي تقابل حجم النواة، وتسمَّى القوة النووية الشديدة (توجد أيضًا القوة النووية الضعيفة، وهي أضعف من القوة الكهربية لكنها تلعب دورًا مهمًّا في بعض التفاعلات النووية). ويبدو الأمر كما لو أن النيوترونات تلعب هي الأخرى دورًا في استقرار النواة؛ وذلك ببساطة لأنه بحساب أعداد البروتونات والنيوترونات في الأنوية المستقرة توصَّل الفيزيائيون إلى تصوُّرٍ أقربَ إلى تصوُّرِ أغلفة الإلكترونات حول النواة. وأكبر عدد من البروتونات الموجودة في أي نواة موجودة طبيعيًّا هو ٩٢، وذلك في اليورانيوم. ومع أن الفيزيائيين قد نجحوا في تصنيعِ أنويةٍ يصل فيها عدد البروتونات إلى ١٠٦، فإن هذه الأنوية غير مستقرة (باستثناء بعض نظائر البلوتونيوم التي يبلغ عددها الذري ٩٤)، وتتفكك هذه الأنوية إلى أنويةٍ أخرى. وإجمالًا، يوجد حوالي ٢٦٠ نواة مستقرة معروفة، ومعرفتنا بهذه الأنوية حتى اليوم أقلُّ توافقًا مما عليه نموذج بور كوصفٍ للذرة، إلا أن هناك إشاراتٍ واضحة إلى وجودِ تركيبٍ من نوعٍ ما داخل الأنوية.

إنَّ الأنوية التي تحتوي على أعداد ٢ و٨ و٢٠ و٢٨ و٥٠ و٨٢ و١٢٦ من النيوكليونات (نيوترونات أو بروتونات) تكون مستقرة بوضوح، والعناصر المقابلة لها تكون أكثر وفرةً بكثير في الطبيعة عن العناصر التي تقابل ذراتٍ تختلف قليلًا في أعداد النيوكليونات التي تحويها، ولذا تُسمَّى هذه الأعداد أحيانًا «الأعداد السحرية». لكن البروتونات تستحوذ على تركيب النواة، ويوجد لكل عنصرٍ مدًى محدودٌ من النظائر الممكنة التي تقابل أعدادًا مختلِفة من النيوترونات؛ فالعدد الممكن من النيوترونات يكون عمومًا أكبرَ قليلًا من عدد البروتونات، ويزداد في العناصر الأثقل. والأنوية التي تملك أعدادًا سحرية من كلٍّ من البروتونات والنيوترونات تكون مستقرة بوضوح، ويتوقَّع العلماء النظريون على هذا الأساس أن العناصر الفائقة الثِّقل التي تحتوي أنويتها على حوالي ١١٤ بروتونًا و١٨٤ نيوترونًا لا بد أن تكون مستقرة، إلا أن هذه الأنوية الثقيلة لم تُكتشف قط في الطبيعة ولم تُصنَّع في معجِّلات الجسيمات بتصادم المزيد من النيوكليونات مع أثقل الأنوية الموجودة في الطبيعة.

يُعتبر الحديد-٥٦ هو أكثر الأنوية استقرارًا على الإطلاق، و«تميل» الأنوية الأخف منه إلى اكتسابِ نيوكليونات لتصبح حديدًا، أما الأنوية الأثقل منه فإنها «تميل» إلى فقدِ نيوكليونات وتتحرَّك تجاه الصورة الأكثر استقرارًا. وفي داخل النجوم، تتحوَّل أخف

الأنوية، وهي الهيدروجين والهيليوم، إلى أنويةٍ أثقلَ في سلسلةٍ من التفاعلات النووية التي تدمج الأنوية الخفيفة معًا لتصنع عناصرَ مثل الكربون والأكسجين على طول الطريق وصولًا إلى الحديد، مع إطلاقِ طاقةٍ نتيجةً لذلك. وعندما تنفجر بعض النجوم كما في المستعرات العظمى، فإن قدرًا كبيرًا من طاقة الجاذبية يدخل في العمليات النووية، مما يدفع عملياتِ الدمج لأبعدَ من الحديد من أجل إنتاجِ عناصرَ أثقل، بما في ذلك اليورانيوم والبلوتونيوم. وعندما تتحرك العناصر الثقيلة باتجاه الصورة الأكثر استقرارًا، وذلك بإطلاق نيوكليونات في صورة جسيمات ألفا أو إلكترونات أو بوزيترونات أو نيوترونات مفردة، فإنها تطلق طاقةً كذلك، وهي الطاقة المختزنة أساسًا منذ انفجار المستعر الأعظم منذ زمنٍ بعيد. وجسيم ألفا هو بالأساس نواةُ ذرة هيليوم ويحتوي على بروتونَين ونيوترونَين. وبإطلاق هذا الجسيم، تتراجع كتلة النواة بمقدارِ أربع وحدات، ويقلُّ عددها الذري بمقدار اثنين. وتفعل الذرة ذلك طبقًا لقواعد ميكانيكا الكَمِّ وعلاقاتِ عدم اليقين التي اكتشفها هايزنبرج.

تتماسك النيوكليونات بعضها مع بعض داخل النواة بواسطة القوة النووية الشديدة، لكن إذا وُجِد جسيم ألفا خارج النواة مباشرةً فإنه يُطرَد بقوةٍ بفِعل القوة الكهربية. ويصنع التأثير المشترك للقوتَين ما يسميه الفيزيائيون «بئر الجهد». ولنتخيَّل قطاعًا عرضيًّا عبر بركانٍ له جوانب قليلة الانحدار وفوَّهة عميقة. إذا وُضِعت كرة خارج حافة الفوهة مباشرةً، فإنها ستتدحرج مبتعدةً إلى أسفل السطح الخارجي للجبل، أما إذا وُضِعت الكرة داخل حافة الفوهة مباشرةً، فإنها ستسقط في قلب البركان. وتكون النيوكليونات داخل النواة في وضعٍ مشابه؛ فتكون داخل البئر في قلب الذرة، ولكن إذا استطاعت أن تتخطَّى حتى الحافة — ولو بمقدارٍ ضئيل — فإنها «ستتدحرج بعيدًا»، مدفوعةً بالقوة الكهربية. وتكمن المشكلة، وفقًا للميكانيكا الكلاسيكية، في أن النيوكليونات أو مجموعات النيوكليونات مثل جسيمات ألفا، لا تملك الطاقة الكافية للتسلُّق إلى خارج البئر وتخطي حافتها، وإذا فعلت فلن تكون داخل البئر بأية حال. إلا أن الوضع يكون مختلِفًا من منظورِ ميكانيكا الكَمِّ. ومع أن بئر الجهد لا تزال تمثِّل حاجزًا، فإنها قابلة للتخطي، وهناك احتمال محدود — وإنْ كان صغيرًا — أن يوجد جسيم ألفا خارج النواة بالفعلِ وليس داخلها. ومن حيث عدم اليقين، تتضمَّن إحدى علاقات هايزنبرج الطاقة والزمن، وتنصُّ على أن طاقةَ أيِّ جسيم يمكن تعريفها فقط في مدى ΔE خلال فترة زمنية Δt بحيث يكون $\Delta t \times \Delta E$ أكبر من $\hbar$. وفي غضونِ فترةٍ زمنية وجيزة، يستطيع الجسيم



شكل ٧-١: تقع بئر الجهد في قلب نواة الذرة. وعلى الجسيم في الموضع (أ) أن يظلَّ داخل البئرِ إلا إذا تمكَّن من اكتسابِ ما يكفي من الطاقة لاجتياز «القمة» إلى الموضع (ب)؛ حيث يندفع مبتعدًا باتجاه «أسفل التل». وفي بعض الأحيان، يسمح عدم اليقينِ الكَمِّي للجسيم أن «يخترق نفقًا» من (أ) إلى (ب) (أو من (ب) إلى (أ)) دون أن يكون لديه ما يكفي من الطاقةِ نفسِها لتسلُّق التل.

«استعارة» طاقةٍ من علاقةِ عدم اليقين؛ حيث يكتسب ما يكفي من الطاقة لتخطي حاجز الجهد قبل أن يعيد هذه الطاقة. وعندما يعود إلى حالة الطاقة «المناسبة»، يصبح خارج الحاجز مباشرةً بدلًا من داخله، ويندفع مبتعدًا.

أو يمكنك النظرُ إليها من حيث عدم يقين الموضع. فالجسيم الذي «ينتمي» إلى داخل الحاجز قد يظهر خارجه؛ لأن موضعه لا يكون محددًا بوضوحٍ في ميكانيكا الكَمِّ. وكلما زادت طاقة الجسيم أصبح هروبُه أسهل، ولكن لا يشترط بالضرورة أن يكون لديه ما يكفي من الطاقة للتسلُّق إلى خارج بئر الجهد على النحو الذي تشترطه النظرية الكلاسيكية. وتبدو العملية كما لو أن الجسيم يخترق نفقًا عبر الحاجز للخروج منه، وهو تأثيرٌ كَمِّي تمامًا.[3] وهذا هو أساس الانحلال الإشعاعي، لكن لتفسيرِ الانشطار النووي علينا أن نتَّجه إلى نموذجٍ مختلف للنواة.

لننسَ الآن النيوكليونات المفردة في أغلفتها، ونفكِّر في النواة كنقطةٍ من سائلٍ ما. تمامًا مثل نقطةِ الماء حين تتذبذب بنمطٍ متغيِّر من الأشكال، فكذلك بعض الخصائص

المشتركة للنواة يمكن تفسيرها على أنها تُعزى إلى تغيُّر شكل النواة. ويمكن أن نفكِّر في النواة الكبيرة على أنها تتذبذب جَيئةً وذهابًا، مغيِّرة شكلها من كرةٍ إلى ما يشبه الدمبل الضخم، ثم تعود كرةً مرة أخرى. فإذا أضيفت طاقةٌ إلى مثل هذه النواة، فإن التذبذب قد يصبح هائلًا لدرجةِ أن النواة تنقسم إلى شطرين، فتنطلق نواتان صغريان، وتتناثر قطرات صغيرة جدًّا من جسيمات ألفا وبيتا والنيوترونات. وفي بعض الأنوية، من الممكن أن يُستحَث هذا الانشطارُ بواسطة اصطدام نيوترون سريع الحركة بالنواة، ويحدث تفاعل متسلسل عندما تنتج كل نواة منشطرة بهذه الطريقة عددًا كافيًا من النيوترونات ليضمن انشطار نواتَين أخريين على الأقل في الجوار. وأما اليورانيوم ٢٣٥– الذي يحتوي على ٩٢ بروتونًا و١٤٣ نيوترونًا، فإنه ينتج دائمًا نواتَين غير متساويتَين تتراوح أعدادهما الذرية ما بين ٣٤ و٥٨، بحيث يكون مجموعهما ٩٢، وتتناثر نيوترونات حرة. ويطلق كل انشطار نحو ٢٠٠ مليون إلكترون فولت من الطاقة، ويبدأ كل انشطار عدة انشطارات أخرى بشرط أن تكون كتلة اليورانيوم كبيرة بما فيه الكفاية حتى لا تهرب كل النيوترونات منها. ولو تُركت هذه العملية لتسيرَ بمعدلٍ تصاعدي هائل لتكوَّنت بذلك قنبلة ذرية، أما إذا أبطأنا من المعدَّل الذي تسير به هذه العملية باستخدامِ مادةٍ تمتص النيوترونات لتجعل العملية تسير بمعدلٍ متوسط، فإنه يكون مفاعل انشطار متحكَّم فيه يمكن استخدامه لتسخين الماء وتحويله إلى بخار ولتوليد الكهرباء. ومرة أخرى؛ الطاقة التي نستخلصها هي الطاقة المختزنة من انفجار نجم، منذ زمن طويل وعلى مسافة بعيدة للغاية.

في عملية الاندماج، يمكننا إجراءُ محاكاةٍ لإنتاج الطاقة من نجمٍ مثل الشمس هنا على الأرض. ولكننا حتى الآن لم نستطِع سوى محاكاة الدرجة الأولى من سُلَّم الاندماج، من الهيدروجين إلى الهيليوم، ولم نستطِع التحكم في التفاعل، وإنما تركناه يحدث حتى النهاية في القنبلة الهيدروجينية أو القنبلة الاندماجية. والفكرة وراء الاندماج عكس الفكرةِ وراء الانشطار. فبدلًا من تشجيعِ نواةٍ ضخمةٍ على الانقسام، عليك تضييق الخناق على نواتَين صغيرتَين — في اتجاهٍ معاكس للتنافرِ الكهروستاتيكي الطبيعي بين شحنتَيهما الموجبتَين — حتى تصبحَا قريبتَين للدرجةِ التي تتغلب فيها القوى النووية الشديدة القصيرة المدى على القوى الكهربية وتجذبهما إحداهما للأخرى. وبمجرد حصولك على عددٍ قليل من الأنوية لدمجها بهذه الطريقة، فإن الحرارة المتولدة أثناء العملية ستؤدي إلى اندفاع الطاقة إلى الخارج، والذي يميل إلى تشتيت أي أنوية أخرى على وشك الاندماج،

ويُوقِف العملية كلَّها في مساراتها.[4] ويعتمد الأمل في الحصول على طاقةٍ غيرِ محدودةٍ لمستقبل الاندماج النووي على إيجادِ طريقةٍ لدمج أنوية كافية معًا في مكانٍ واحد لفترة طويلة بما يكفي للحصول منها على كميةٍ نافعة من الطاقة. ومن المهم كذلك إيجادُ عملية تطلِق طاقةً أكثرَ من الطاقة المستخدَمة في ضغط الأنوية معًا في المقام الأول. والأمر سهل بما فيه الكفاية في القنبلة؛ فما عليك في الأساس سوى إحاطة الأنوية التي ترغب في دمجها باليورانيوم، ثم تُحفِّز اليورانيوم لبدء انفجار انشطاري. وسيدفع الضغط الداخلي الناتج عن الانفجار المحيط ما يكفي من أنوية الهيدروجين إلى التلامس لبدء الانفجار الثاني الأكثر ضخامة، وهو الانفجار الاندماجي. أما ما يلزم لمحطات الطاقة المدنية، فإنه أهون من ذلك، وتشمل التقنيات الخاضعة للبحث والدراسة الآن استخدام مجالات مغناطيسية قوية مشكَّلة على نحوٍ معيَّن بحيث تكون بمثابة وعاء يُحتفَظ فيه بالأنوية المشحونة، ونبضات الضوء الصادرة من أشعة الليزر التي تضغط الأنوية معًا. ويُصنَّع الليزر بالطبع وفقًا لوصفةٍ أخرى من كتاب الطهي الكَمِّي.

الليزر والميزر

مع أن الأمر تطلَّب رئيسَ طهاةٍ متمكِّن مثل ديراك ليكتشفَ وصفاتِ تحضيرِ جسيماتٍ جديدة في مطبخِ الكَمِّ، فإن العمليات النووية تُفهَم بأمورٍ أقلَّ اكتمالًا من نموذج بور للذرة. ومن ثَم، لعله من غير المستغرب إلى حدٍّ كبير أن نجد أن نموذج بور لا يزال له استخداماته. ومن الممكن فهْم واحد من أكثر التطورات العلمية الحديثة غرابةً وإثارة، وهو الليزر، عن طريقِ أيِّ طاهٍ للوجبات الكمية السريعة ذي خبرة يكون قد سمعَ بنموذج بور، ولا يتطلب الأمر عبقرية كبيرة لفهمه. (يُقصَد بالعبقرية هنا تكنولوجيا تصميم الليزر، ولكن لذلك قصة أخرى.)؛ ومن ثَم فإننا مع فائق الاعتذار لكلٍّ من هايزنبرج وبورن وجوردان وديراك وشرودنجر، سنتجاهل كلَّ المهارات الكَمِّية لوهلةٍ، ونتجه للوراء إلى النموذج المنظَّم للإلكترونات التي تدور حول نواة الذرة. تذكَّر أن الذرة عندما تكتسب كمًّا من الطاقة ينتقل أحد الإلكترونات لأعلى إلى مدارٍ مختلِف وفقًا لهذا التصور، وأنه إذا تُرِكَت مثلُ هذه الذرة المثارة وحدَها فإن الإلكترون سيسقط عاجلًا أو آجلًا عائدًا إلى الحالة الأرضية، وسيطلِق كمًّا من الأشعة محدَّدًا بدقةٍ بالغة وذا طول موجي محدَّد. وتسمَّى هذه العملية بالانبعاث التلقائي، وهي عكس الامتصاص.

عندما كان أينشتاين يفحص هذه العمليات سنة ١٩١٦ ويضع القواعد الإحصائية الأساسية لنظريةِ الكَمِّ، التي استاء بعد ذلك منها، أيقن أن هناك احتمالًا آخر. فمن الممكن أن تُستحَث ذرةٌ مثارة لتطلِق الطاقةَ الفائضةَ وتعود إلى الحالة الأرضية — إنْ جاز التعبير — إذا وكزها إلكترون يمرُّ بها. وتُسمَّى هذه العملية الانبعاث المُستحَث، وهي لا تحدث إلا إذا كان الطول الموجي للفوتون المار مساويًا تمامًا للطول الموجي الذي تكون الذرة جاهزةً لإشعاعه. وعلى غرار سلسلة النيوترونات الداخلة في تفاعل انشطار نووي متسلسل، يمكننا أن نتخيَّل مصفوفةً من الذرات المثارة التي يمر بها فوتون واحد بالطول الموجي المناسب فيستثير ذرةً واحدة لتشعَّ، ويستثير الفوتون الأول مع الفوتون الجديد الذي انبعث من الذرة ذرتَين أخريين لتشعَّا، وتستثير الفوتوناتُ الأربعة معًا أربعَ ذراتٍ أخرى، وهكذا. ويكون الناتج سلسلةً من الإشعاعات التي لها جميعًا نفسُ التردد بالضبط. وعلاوة على ذلك، فإنه نظرًا للطريقة التي يُستحَث بها الانبعاث تتحرك كلُّ الموجات متوافقةً تمامًا بعضها مع بعض؛ حيث ترتفع كل القمم معًا «لأعلى» وتنخفض كل القيعان معًا «لأسفل» لينتج شعاعٌ نقي تمامًا مما يُسمَّى الإشعاع المترابط. ونظرًا لأن القمم والقيعان لا يلغي أحدهما الآخرَ في مثل هذه الإشعاعات، تظل كل الطاقة المنبعثة من الذرات موجودةً في الشعاع، ويمكن إسقاطها على مساحةٍ صغيرة من المادة التي يوجَّه إليها الشعاع.

عندما تُثار مجموعةٌ من الذرات أو الجزيئات بفِعل الحرارة، فإنها تملأ نطاقًا من مستويات الطاقة، وإذا تُركت لحالها فإنها تشعُّ أطوالًا موجية مختلفة من الطاقة بطريقةٍ مضطربة وغير مترابطة، حاملةً بذلك طاقةً أقلَّ فاعلية بكثير مما تطلقها الذرات والجزيئات. ولكن هناك حِيَلٌ يمكن استخدامها لملء نطاقٍ ضيق من مستويات الطاقة على أساسٍ تفضيلي، ثم تحفيز عودة الذرات المثارة في هذا النطاق إلى حالتها الأرضية. ويكون الحافز لسلسلةِ الذرات هو إدخال إشعاع ضعيف بالتردُّد المناسب، ويكون الناتج هو شعاع مضخَّم أقوى كثيرًا بالتردد نفسِه. وُضِعَت هذه التقنيات لأول مرة في أواخر أربعينيات القرن العشرين على يد فريقَين يعمل كلٌّ منهما على نحوٍ مستقل من الآخر، في الولايات المتحدة وفي الاتحاد السوفييتي، وذلك باستخدام إشعاعٍ في نطاقِ موجات الراديو من الطيف، التي يتراوح طولها الموجي بين ١سم و٣٠سم، فيما يُسمَّى بنطاق الموجات الميكروية، وحصل الرواد على جائزة نوبل عن أبحاثهم سنة ١٩٥٤. ونظرًا لأن الإشعاع في هذا النطاق يُسمَّى بإشعاع الموجات الميكروية (أو إشعاع الموجات الصغرى)، ولأن العملية تتضمَّن تضخيمَ موجات الراديو بواسطة الانبعاث المستحث للإشعاع وفقًا لأفكار

أينشتاين سنة ١٩١٧، دمج الرواد بين مسمَّى تضخيم الموجات الميكروية والانبعاث المستحث للإشعاع، ليقدموا اختصارًا لهذه العملية يحمل الأحرف الأولى للإجراءين في الإنجليزية وهو «ميزر».

وقد استغرق الأمرُ عشر سنوات قبل أن ينجح أحدٌ في إيجاد طريقةٍ لتطبيق هذه التقنية على الترددات الضوئية من الإشعاع، ثم حدث سنة ١٩٥٧ أن طرأت الفكرةُ نفسُها على ذهن شخصَين في الوقت نفسه تقريبًا. كان الشخص الأول (الذي يبدو أنه أول مَن خطرت له هذه الفكرة) هو جوردون جولد طالب الدراسات العليا وقتها بجامعة كولومبيا، أما الآخر فكان تشارلز تاونز، أحد رواد الميزر الذي اقتسم جائزة نوبل لسنة ١٩٦٤. وقد ظلَّ الجدل حول ماهيةِ كل اكتشافٍ ومَن اخترعه ومتى، خاضعًا لمعركةٍ قانونية بشأن حقوق براءات الاختراع؛ وذلك لأن الليزر، وهو المكافئ الضوئي للميزر (من «تضخيم الضوء ...») قد أصبح الآن مجالًا كبيرًا ومصدرًا للأموال الطائلة، لكن لحسن الحظ أننا غير مضطرين إلى الخوض في هذا الموضوع. واليوم، يوجد العديد من أنواع الليزر المختلفة، أبسطُها الليزر الصلب بالضخ الضوئي.

في هذا التصميم، يُحضَّر قضيب من المادة (مثل الياقوت) ويُصقَل طرفاه المسطَّحان، ويُحاطان بمصدرِ وهج؛ أنبوب تفريغ غازيٍّ يومض بسرعة وينطفئ مولِّدًا نبضاتٍ من الضوء بطاقةٍ تكفي لإثارة الذرات في القضيب. ويُحافَظ على الجهاز كلِّه باردًا لضمان أقل تداخل من الإثارة الحرارية للذرات في القضيب، وتُستخدَم الومضات الساطعة من المصباح لحث (أو ضخ) الذرات إلى الحالة المثارة. وعند بدء تشغيل الليزر، تنطلق نبضةٌ من ضوء الياقوت الخالص، حاملةً معها كمياتٍ من الطاقة تبلغ آلاف الوحدات من الوات، من طرف الساق المسطَّح.

تتضمَّن أنواعُ الليزر الأخرى الليزرَ السائل، وليزر الصبغة الفلورسنتية، وليزر الغاز، وهكذا. وتشترك جميعُها في السماتِ الأساسيةِ نفسِها، وهي إدخال طاقة غير مترابطة وخروج ضوء مترابط في صورةِ نبضةٍ خالصةٍ حاملًا كميةً كبيرة من الطاقة. تُنتِج بعض أنواع الليزر، مثل ليزر الغاز، شعاعًا متصلًا نقيًّا من الضوء يمثِّل النهاية «الحافة المستقيمة» النهائية لأغراض المسح، ويُستخدَم هذا النوع على نطاق واسع في حفلات موسيقى الروك وفي مجال الإعلانات. وتُنتج أنواعٌ أخرى نبضاتٍ قصيرةَ الأجل ولكنها قوية من الطاقة، يمكن استخدامها لحفر الثقوب في الأجسام الصلبة (ولها استخداماتٌ عسكرية). وتُستخدم أدوات القطع بالليزر في حالاتٍ متنوِّعة مثل صناعة

الملابس والجراحات الدقيقة، ويمكن أن تُستخدَم أشعة الليزر في نقل المعلومات بكفاءةٍ أعلى من موجات الراديو؛ حيث تزداد كميةُ المعلومات التي يمكن تمريرها في الثانية الواحدة مع زيادة تردُّد الإشعاع المُستخدَم. ويُقرأ الباركود الموجودُ على كثير من منتجات المُجمَّعات التجارية (وعلى غلاف هذا الكتاب) بواسطةِ ماسِح ضوئي يعمل بالليزر، كما أن أقراص الفيديو وأقراص الصوت المُدمَجة التي ظهرت في الأسواق في بداية ثمانينيات القرن العشرين يُجرى لها مسحٌ ضوئي باستخدام الليزر، كما يمكن إنتاج الصور الثلاثية الأبعاد أو الصورة المُجسَّمة (الهولوجرام) بمساعدة الليزر، وهكذا.

والقائمة فعليًّا لا حصر لها، حتى قبل إدخال تطبيقات الميزر في مجال تضخيم الإشارات الضعيفة (من أقمار الاتصالات، على سبيل المثال) والرادار وغيرها، ولكنها جميعًا لا تنبُع من نظريةِ الكَمِّ، وإنما من النسخة الأولى لفيزياءِ الكَمِّ. عندما تشتري كيسًا من رقائقِ الذرة ويُجرى له مسح ضوئي بشعاع الليزر في المتجر، أو عندما تذهب إلى حفلٍ لموسيقى الروك بعروض الليزر الملوَّنة المذهلة، أو عندما تشاهد حفلًا موسيقيًّا في التليفزيون عبر رابطِ قمرٍ صناعي ينقل الإشارات حول العالم، أو عندما تستمع إلى حفلٍ لهذه الفرقةِ نفسِها أو تشاهده على أحدثِ أنظمةِ الفيديو، أو تشاهد بإعجابٍ عرضًا ساحرًا لاستنساخِ صور الهولوجرام المجسَّمة، وهو ما يرجع الفضل فيه جميعًا إلى ألبرت أينشتاين ونيلز بور، اللذين وضعا مبادئَ الانبعاث المُستحَث منذ ما يزيد على تسعين عامًا.

المَيكرو الجبَّار

لا شكَّ أن التأثير الأوسع انتشارًا لميكانيكا الكَمِّ في حياتنا اليومية يقع في مجال فيزياء الجوامد (فيزياء الحالة الصلبة). والاسم «الحالة الصلبة» نفسُه غير عاطفي؛ فحتى لو كنت قد سمعت به، فإنك على الأرجح لا تربطه بنظريةِ الكَمِّ. ومع ذلك، فإنه فرع الفيزياء الذي قدَّم لنا راديو الترانزستور ووُكمَان «سوني» والساعات الرقمية وحاسبات الجيب، والحواسيب الصغيرة والغسالات القابلة للبرمجة. ولا يُعزى تجاهل فيزياء الجوامد إلى كونها فرعًا من العلوم مقصورًا على فئةٍ معينة، ولكن إلى كونها مألوفةً لدرجةِ أننا نأخذها كأمرٍ مسلَّم به. ومرة أخرى، فإننا لم نكن لنتوصَّل إلى أيٍّ من هذه الأجهزة لولا مستوى الاستيعاب المُرضي لما يدور في مطبخِ الكَمِّ.

تعتمد كل الأجهزة المذكورة في الفقرةِ السابقة على خصائص أشباه الموصلات، وهي أجسامٌ صلبة ذات خصائص وسيطة بين خصائص الموصلات وخصائص العوازل. ودون

الخوض في التفاصيل، العوازل هي موادُّ غير موصلة للكهرباء، والسبب وراء عدم توصيلها للكهرباء أن الإلكترونات في ذراتها تكون مرتبطة ارتباطًا وثيقًا بالنواة، بما يتوافق مع قواعدِ ميكانيكا الكَمِّ. أما في الموصلات، مثل الفلزات، فإنه يتصادف أن يوجد في كل ذرة بعضُ الإلكترونات التي ترتبط ارتباطًا ضعيفًا بالنواة وتكون في حالاتٍ مرتفعة من الطاقة قربَ قمَّة بئر الجهد الذري. وعندما تتجمَّع الذرات معًا على صورةِ مادةٍ صلبة، تمتزج قمَّةُ إحدى آبار الطاقة في البئر التي تخصُّ الذرة التالية، وتصبح الإلكترونات في هذه المستويات المرتفعة طليقةً لتتجول من نواة إحدى الذرات إلى نواة ذرة أخرى؛ ومن ثَم فإنها لم تَعُد مرتبطة بأي نواة، ويمكنها أن تنقل تيارًا كهربيًّا عبر الفلز.

وفي النهاية، فإن خاصية التوصيل تعتمد على إحصاء فيرمي-ديراك الذي يمنع هذه الإلكترونات الضعيفة الارتباط من السقوط عميقًا في آبار الجهد الذري؛ حيث تكون كل حالات الطاقة للإلكترونات المرتبطة بقوةٍ مشغولةً بالكامل. وإذا حاولتَ ضغط الفلز، فإنه سيقاوم الضغط؛ لأن الفلزات قوية. والسببُ وراء قوة الفلزات ومقاومتها الشديدة للضغط أنه بناءً على مبدأ باولي للاستثناء الخاص بالفرميونات يستحيل ضغط الإلكترونات معًا بقوة.

تُحسَب مستويات الطاقة للإلكترونات في المادة الصلبة باستخدام المعادلات الموجية لميكانيكا الكَمِّ. ويُقال إن الإلكترونات المرتبطة بقوة بالنواة تكون في نطاق تكافؤ المادة الصلبة، في حين أن الإلكترونات الطليقة التي تتجوَّل من نواةٍ إلى أخرى يُقال إنها في نطاق التوصيل. جميع الإلكترونات في العوازل تقع في نطاق التكافؤ، بينما في حالة الموصلات تكون بعض الإلكترونات قد تدفَّقت إلى نطاق التوصيل.[5] أما في أشباه الموصلات، فيكون نطاقُ التكافؤ ممتلئًا، ولا توجد سوى فجوة صغيرة من الطاقة بين هذا النطاق ونطاق التوصيل، مقدارُها عادةً إلكترون فولت واحد. ومن ثَم، من السهل للإلكترون أن يدخل إلى نطاق التوصيل وينقل تيارًا كهربيًّا عبر المادة. وعلى عكس الوضع في الموصلات، فإن هذا الإلكترون الذي اكتسبَ طاقةً يخلِّف وراءه فجوةً في نطاق التكافؤ. وعلى غرارِ ما حدث عندما استنتج ديراك أن الإلكترونات والبوزيترونات تنشأ من الطاقة، فإن غياب إلكترون سالب الشحنة من نطاق التكافؤ يسلك مسلكَ الشحنة الموجبة، وذلك فيما يتعلَّق بالخصائص الكهربية. ولذا، فإن أشباه الموصلات الطبيعية عادةً ما تتضمَّن القليلَ من الإلكترونات في نطاق التوصيل الخاص بها، والقليل من الفجوات الموجبة الشحنة في نطاقِ تكافؤها، وكلاهما يمكنه توصيل التيار الكهربي. ويمكنك أن تتخيَّل الإلكترونات

المتتابعة وهي تسقط في الفجوة الموجودة في نطاق التكافؤ مخلِّفةً فجوةً وراءها ليقفز فيها الإلكترون التالي، وهكذا، أو يمكنك أن تتخيَّل الفجوات على جسيماتٍ موجبةٍ حقيقيةٍ تتحرك في الاتجاه المضاد. والتأثير سيان فيما يخص التيارات الكهربية.

قد تكون أشباه الموصلات الطبيعية مثيرةً للاهتمام بما فيه الكفاية، لا سيَّما بسببِ التشبيه المُحكَم الذي تقدِّمه لنشوء زوجٍ من الإلكترون والبوزيترون. غير أنه من الصعب جدًّا التحكُّم في خصائصها الكهربية، وهو ما جعل هذه الموادَّ على هذه الدرجة من الأهمية في حياتنا اليومية. ويمكن تحقيق التحكمِ بإنشاء أشباه موصلات صناعية؛ نوع تُهيمن عليه الإلكترونات الحرة، وآخر تُهيمن عليه «الفجوات» الحرة.

مرةً أخرى، من السهل فهْم الفكرة، ولكن من غير السهل تطبيقها عمليًّا. ففي بلورة من الجرمانيوم، على سبيل المثال، يكون لكل ذرة أربعة إلكترونات في غلافها الخارجي (هذه وصفة سريعة من مطبخِ الكَمِّ، ويناسبها نموذج بور)، و«تتقاسم» كل ذرة هذه الإلكترونات مع الذرات المجاورة لها لتصنع الروابط الكيميائية التي تجعل البلورة متماسكة. وإذا «عُولِج» الجرمانيوم بعاملِ إشابةٍ عبارة عن بضع ذراتٍ من الزرنيخ، فستظل ذرات الجرمانيوم هي المهيمنة على بنية الشبكة البلورية، وعلى ذرات الزرنيخ أن تنضغط على أفضلِ نحوٍ ممكن. وبلغة الكيمياء، فإن الفرق الأساسي بين الزرنيخ والجرمانيوم هو أن الزرنيخ يحتوي على إلكترون خامس في غلافه الخارجي، وأفضل طريقة لانضغاطِ ذرةِ الزرنيخِ نفسِها في الشبكة البلورية للجرمانيوم هي التخلص من الإلكترون الزائد وتكوين أربعة روابط كيميائية، متظاهرًا بأنه ذرة جرمانيوم. وتتجوَّل الإلكترونات الزائدة التي تطلقها ذرات الزرنيخ المنظومة عبر نطاق التوصيل الذي ينشأ لشبه الموصل بهذه الطريقة، ولا توجد فجوات في المقابل. وتُسمَّى مثل هذه البلورة شبه موصل سالب النوع.

والبديل هو معالجة الجرمانيوم (التزامًا بالمثال الأصلي) بعاملِ إشابةٍ هو الجاليوم، الذي يحتوي على ثلاثة إلكترونات فقط متاحة للارتباط الكيميائي. ويكون التأثير كما لو أننا ننشئ فجوةً في نطاق التكافؤ لكل ذرة جاليوم موجودة، وتتحرَّك إلكترونات التكافؤ عن طريق القفز في الفجوات، التي تسلك مسلكَ الشحنات الموجبة. وتُسمَّى هذه البلورة شبهَ موصل موجب النوع. وتصبح الأمور مثيرةً عندما يتلامس كلا النوعين من أشباه الموصلات بعضهما مع بعض. تؤدي زيادة الشحنة الموجبة على أحد جانبي الحاجز، والشحنة السالبة على الجانب الآخر، إلى توليد فرقِ جهدٍ كهربي يحاول دفع

الإلكترونات في اتجاه معيَّن ومقاومة حركتها في الاتجاه الآخر، ويُسمَّى هذا الزوج المتصل من البلورات شبه الموصلة «ديود»، ويسمح بمرور التيار الكهربي بكفاءة في اتجاه واحد فقط. وبصورةٍ أدقَّ قليلًا، يمكن تحفيز الإلكترونات للانتقال من n (السالب) إلى p (الموجب) ومنها إلى داخل الفجوة؛ حيث تنبعث عنها في تلك الأثناء شرارةٌ من الضوء. وتُسمَّى الديودات المُصمَّمة لإنتاج الضوء بهذه الطريقة ديودات باعثة للضوء، أو اختصارًا «لِيد»، وتُستخدَم في إظهار الأعداد على شاشات بعض الأجهزة. أما الديود الذي يعمل في الاتجاه المضاد، حيث يمتص الضوء ويضخ إلكترونًا خارج الفجوة إلى نطاق التوصيل، فهو الديود الضوئي، ويُستخدَم لضمان عدم سريان التيار الكهربي إلا عند سقوطِ شعاعٍ من الضوء على شبه الموصل. وهذا هو الأساس في أجهزةِ فتحِ الأبواب الأوتوماتيكية التي تؤدي وظيفتها عند التحرُّك أمام شعاع الضوء. إلا أن هناك المزيدَ من الاستخدامات لأشباه الموصلات بخلاف الصمامات الثنائية أو الديودات.

عند وضع ثلاثة أجزاء من أشباه الموصلات معًا على شكلِ طبقةٍ بينيةٍ (pnp أو npn)، يكون الناتج هو ترانزستور (كل جزء من الترانزستور يكون موصَّلًا عادةً بدائرة كهربية؛ ولذا يمكن تعريف الترانزستورات بأنها الأطراف العنكبوتية الثلاثة التي تخرج من الصفيحة المعدنية أو البلاستيكية التي تحوي شبهَ الموصلِ نفسِه). وباستخدام المواد المعالجة بعوامل إشابة مناسبة، يمكن إعداد تصميم يؤدي فيه تدفقٌ صغير من الإلكترونات عبر وصلة np إلى تدفُّقٍ أكبرَ بكثير عبر الوصلة الأخرى في الطبقة البينية، ويكون الترانزستور في هذه الحالة بمثابة مُكبِّر. وكما هو معروف لأيِّ شخص مُولَع بالإلكترونيات، فإن الديود والمكبِّر مكوِّنان يمثِّلان الأساسَ في تصميمِ أيِّ نظام صوتي. ولكن حتى الترانزستورات قد عفا عليها الزمن اليوم، ولن تجد أيَّ صفيحة ذات ثلاثة أطراف في جهاز الراديو إلا إذا كان «عتيق الطراز».

حتى الخمسينيات من القرن العشرين، كنا نعتمد على جهاز اللاسلكي المزعج القديم في التسلية، وعلى الرغم من اسمه فإنه جهاز مليءٌ بالأسلاك وصِمَامات التفريغ المتوهِّجة التي كانت تؤدي الوظيفةَ نفسَها التي تؤديها أشباه الموصلات الآن. وبحلول نهاية الخمسينيات، بدأت ثورة الترانزستور تلوح في الأفق، وحلَّت الترانزستورات محلَّ الصِّمَامات الكبيرة المتوهِّجة، في حين حلَّت اللوحات التي طُبعت عليها الدوائر الكهربية محلَّ الأسلاك، ولُحِمَت الترانزستورات في هذه اللوحات. ولم تكن الدوائر المتكاملة إلا على بُعد خطوة صغيرة حيث أصبحت كل الدوائر والمكبِّرات وأشباه الموصلات والديودات

وغيرها مُجمَّعةً معًا في قطعة واحدة، تُوصَل معًا ببساطةٍ لتشكِّل قلبَ جهاز الراديو، ومشغِّل جهاز التسجيل، أو أي شيء آخر، وفي الوقت نفسِه كانت ثورةٌ مماثلة بصدد الحدوث في صناعة الحواسيب.

كانت الحواسيب الأولى مثل أجهزة اللاسلكي القديمة كبيرةً ومزعجة. كانت مليئة بالصِّمَامات وتحتوي على أميال الأسلاك. وحتى عشرين عامًا مضت، وبينما كانت أول ثورة في الحالات الصلبة على أشدها، كان الحاسوب الذي يستطيع القيام بعمل أجهزة الكمبيوتر الصغيرة التي في حجم الآلة الكاتبة، يتطلَّب الطابَق الأرضي من المنزل لاستيعاب الأجزاء الخاصة بـ «عقل» الحاسوب، ويتطلب مساحةً أكبرَ لاستيعابِ مكيِّف الهواء المصاحِب له. والثورة التي وضعت ذلك النوع من قوة المعالجة المحاسبية في جهازٍ لوحي محمول باليد تبلغ تكلفته بضع مئات من الدولارات هي نفسُها التي حوَّلت جهاز الراديو اللاسلكي الذي كان أجدادنا يضعونه فوق المنضدة إلى راديو في حجم علبة السجائر، ونقلت ثورة الحالات الصلبة (الجوامد) من الترانزستور إلى الشريحة الإلكترونية.

يتعلَّق كلٌّ من العقول البيولوجية والحواسيب الإلكترونية بعمليات التحويل. يحتوي العقل البشري على حوالي ١٠ آلاف مليون محوِّل في صورةِ عصبونات مكوَّنة من الخلايا العصبية، أما الحاسوب فيحتوي على محوِّلات في صورةِ ديودات وترانزستورات. وسنة ١٩٥٠ كان من المفترض لحاسوبٍ يتألَّف من نفس عدد المحوِّلات الموجودة في العقل البشري أن يضاهي في حجمه جزيرةَ مانهاتن، أما اليوم فقد أصبح من الممكن تجميع العديد من المحوِّلات في حيزٍ يضاهي في حجمه العقلَ البشري، وذلك عن طريق لحام شرائح إلكترونية مصغَّرة معًا، ولكن تظل مسألةُ الوصلات السلكية الخاصة بهذه الحواسيب تمثِّل مشكلةً ولم يتم حسمُها بعد. وعلى أية حال، يوضِّح هذا المثال مدى صِغَر الشريحة الإلكترونية، حتى بالمقارنة مع الترانزستور.

إنَّ شبه الموصِّل المستخدَم اليوم في الشرائح الإلكترونية المصغَّرة القياسية هو السيليكات، وهو ببساطةٍ الرملُ المتعارف عليه. وإذا حُفِّزَت السيليكات بطريقةٍ سليمة، فإن الكهرباء ستسري خلالها، ولكنها لن تسري دون تحفيز. تُقطَّع البلورات الطويلة من السيليكات بعرضٍ حوالي ١٠سم إلى رقاقاتٍ تشبه الشفرات مكوِّنةً مئات الشرائح الصغيرة المستطيلة الشكل، بحيث تكون كل واحدة منها أصغرَ من رأس عود الثقاب، وتُضغَط كل شريحة منها على الأخرى، طبقات متتالية تشبه الفطائر الإغريقية الهشَّة، مكوِّنة مجموعةً معقَّدة وكثيفة من الدوائر الإلكترونية الدقيقة، المكافئة للترانزستورات

والديودات والدوائر المتكاملة مجتمعةً. وتكون الشريحة الإلكترونية الواحدة في واقع الأمر بمثابةِ حاسوب كامل، وتُعنى كلُّ العمليات الباقية للحواسيب المصغرة الحديثة بإدخال المعلومات إلى الشريحة وخارجها. وتكلفة تصنيعها زهيدة للغاية (بمجرد الوفاء بالتكاليف الخاصة بتصميم الدوائر وإعداد الأجهزة اللازمة لإعادة إنتاجها) حتى إنه يمكن إنتاجها بالمئات، واختبارها والتخلُّص ببساطةٍ من الشرائح التي لا تعمل. يمكن أن تصل تكلفةُ تصنيع شريحة واحدة من الصفر مليونَ دولار، ولكن كلُّ ما يلزم بعد ذلك لتصنيعِ أيِّ عددٍ من الشرائح المماثلة للشريحة الأولى هو بضعة بنساتٍ للشريحة الواحدة.

وهكذا، ثمَّة بعض الأمور الأخرى في العالَم اليومي التي يُعزى الفضل فيها إلى الكَمِّ. فقد قدَّمت لنا الوصفات المأخوذة من فصل واحد من كتاب الطهي الكَمِّي الساعات الرقمية، والحواسيب المنزلية، والعقول الإلكترونية التي توجِّه السفن الفضائية في مدارها (بل تقرِّر أحيانًا عدم السماح لها بالتحليق، مهما يكن رأي المشغِّلين البشريين)، والتلفزيون المحمول، والهواتف الجوالة، وأنظمة الاستريو الشخصية وأنظمة الصوت العالية الدقة (هاي فاي) القوية التي من الممكن أن تصيب الإنسانَ بالصمم، والأجهزة المساعدة لتعويضِ الصمم الناتج عن فقدِ السَّمْع. ولقد أصبحت الحواسيب المحمولة باليد أمرًا واقعًا، كما أصبحت الأجهزة الذكية احتمالًا واقعيًّا منطقيَّ الحدوث. وتُعدُّ الحواسيبُ التي تتحكَّم في مركَّبات الإنزال على سطح المريخ ومسابير النظام الشمسي الخارجي أبناءَ العمومة المباشرين للشرائح الإلكترونية التي تتحكَّم في الألعاب التي تعمل بالعُملات المعدنية، وكلُّها تَضرب بجذورها في السلوك الغريب للإلكترونات وفقًا لقواعدِ الكَمِّ الأساسية. ولكن حتى قصة المَيكرو الجبَّار لا تستنفد كلَّ ما تَعِد به فيزياء الحالة الصلبة.

المُوصِّلات الفائقة

للمُوصِّلات الفائقة اسمٌ منطقي على غرار أشباه الموصلات. فالمُوصِّل الفائق هو مادة موصِّلة للكهرباء دون أيِّ مقاومة ظاهرية على الإطلاق. وهذا يجعلنا أقرب إلى الحصول على الحركة الأبدية؛ وليس هذا بشيءٍ نحصل عليه دون مقابل، ولكنه مثالٌ نادر لحصولنا على كلِّ ما ندفع ثمنه في الفيزياء، دون بخسٍ أو نقص. ويمكن تفسير الأمر بحدوث تغيُّر يجعل أزواجًا من الإلكترونات تترافق وتتحرك معًا. ومع أن كل إلكترون له حركة مغزلية مقدارها نصف عدد صحيح؛ ومن ثَم تتَّفق مع إحصاء فيرمي-ديراك ومبدأ الاستثناء. فيمكن في بعض الحالات أن يسلك زوج الإلكترونات مسلكَ جسيمٍ واحد ذي حركة مغزلية

صحيحة. ولا يتقيَّد هذا الجسيم بمبدأ الاستثناء، ويخضع لإحصاء بوز-أينشتاين نفسِه الذي يصف سلوك الفوتونات بلغةِ ميكانيكا الكَمِّ.

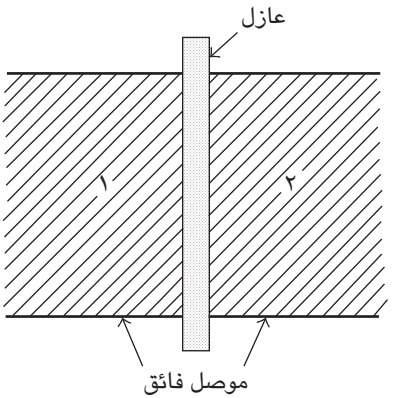
اكتشف عالِم الفيزياء الهولندي كامرلينج أونيس التوصيلَ الفائق سنة ١٩١١، عندما وجدَ أن الزئبق فقدَ كلَّ مقاومته الكهربية عند تبريده إلى ما دون ٤,٢ درجات على مقياس درجة الحرارة المطلقة (٤,٢ درجات كلفنية أو −٢٦٩ درجة مئوية). حصل أونيس على جائزة نوبل عن أبحاثه في درجات الحرارة المنخفضة سنة ١٩١٣، إلا أن ذلك كان عن بحثٍ آخر، وهو تحضير الهيليوم السائل، ولم يُقدَّم تفسيرٌ مقنع لظاهرة التوصيل الفائق إلا سنة ١٩٥٧ عندما وضعَ كلٌّ من جون باردين وليون كوبر وروبرت شريفر نظريةً حصلوا عنها على جائزة نوبل في الفيزياء سنة ١٩٧٢.[6] يعتمد التفسير على الطريقة التي تتفاعل بها أزواج الإلكترونات مع الذرات في شبكةٍ بلورية. يتفاعل إلكترونٌ مع البلورة، وعلى أثرِ هذا التفاعل يُعدَّل تفاعل البلورة مع الإلكترون الآخر في زوج الإلكترونات. وهكذا، فإنه على الرغم من أنها تميل بصورةٍ طبيعية إلى التنافر أحدها مع الآخر، فإن زوج الإلكترونات يكوِّن ارتباطًا ضعيفًا يكفي لتفسير التغيُّر من إحصاء فيرمي-ديراك إلى إحصاء بوز-أينشتاين. ولا تستطيع كلُّ المواد أن تصبح موصِّلات فائقة، وحتى في المواد التي تستطيع ذلك سيؤدي أيُّ اضطراب بسيط من الاهتزاز الحراري للذرات في البلورة إلى كسر إقران الإلكترونات، وهو السبب وراء عدم حدوث هذه الظاهرة إلا عند درجات الحرارة المنخفضة جدًّا، في نطاقٍ يتراوح بين ١ كلفن إلى ١٠ كلفن. وتصبح بعض المواد موصِّلاتٍ فائقةً تحت إحدى درجات الحرارة الحرجة التي تختلف من مادةٍ لأخرى لكنها لا تختلف في المادة الواحدة، وفوق درجة الحرارة الحرجة هذه ينكسر إقران الإلكترونات وتصبح المادة ذات خصائص كهربية عادية.

تتأكَّد النظرية بحقيقةِ أن المواد التي تكون موصِّلات جيدة في درجة حرارة الغرفة ليست هي أفضل الموصلات الفائقة. فالموصلات «العادية» الجيدة تسمح للإلكترونات بحرية الحركة؛ ويُعزى ذلك على وجه التحديد إلى أنها لا تتفاعل كثيرًا مع ذرات الشبكة البلورية، ومع ذلك فإنه من دون حدوثِ تفاعلٍ بين الإلكترونات والذرات فلا سبيل إلى اقتران الإلكترونات الذي يؤدي بدوره إلى توصيلٍ فائقٍ فعَّالٍ في درجات الحرارة المنخفضة.

ولسوء الحظ، فإنه لا بد من تبريد الموصِّلات الفائقة قبل أن تصبح صالحةً لأداء هذه المهمة؛ ذلك لأن الاستخداماتِ المتوقَّعةَ للموصِّلاتِ الفائقةِ الأكثرِ توافقًا يسهُل تخيُّلها، وأوضح مثالٍ على ذلك ببساطةٍ هو نقل الطاقة على طول الكابلات دون حدوث أي فقدٍ في

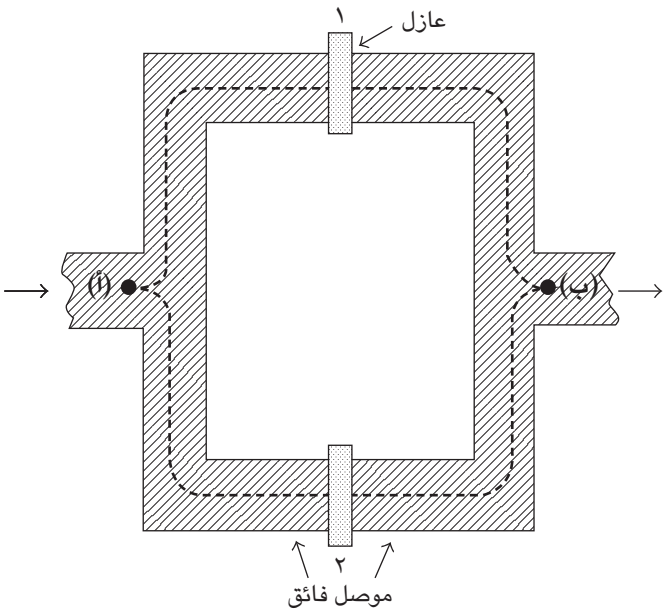
الطاقة. كما تؤدي الموصِّلاتُ الفائقةُ مهامَّ أخرى. فالفلزات الموصِّلة في حالتها الطبيعية يمكن اختراقُها بواسطةِ مجالٍ مغناطيسي، ولكن الموصِّلات الفائقة تنشئ تياراتٍ كهربية على سطحها تتنافر مع المجال المغناطيسي وتفصله، وهي الحائل المثالي دون حدوث التداخلات غير المرغوب فيها من المجالات المغناطيسية، ولكنها غير عملية ما دام أنه من الضروري تبريدُ الحائل إلى بضع درجات كلفنية. وعند فصل مُوصِّلَين فائقَين بواسطة عازلٍ ما، يمكنك أن تتوقَّع عدمَ سريان أي تيار بينهما، ولكن تذكَّر أن الإلكترون يخضع لقواعدِ الكَمِّ نفسِها التي تسمح للجسيمات بأن تخترق أنفاقًا إلى خارج النواة. فإذا كان الحاجز رقيقًا بما فيه الكفاية، فإن احتمالَ اجتيازِ أزواج الإلكترونات للفجوة يصبح كبيرًا، لكنه لا يعطي نتائجَ منطقية. ولا تُنتِج مثل هذه الوصلات (التي تُسمَّى وصلات جوزيفسون) تيارًا كهربيًّا في حالِ وجودِ فرقِ جهدٍ عبر الحاجز، ولكن يوجد تيار كهربي في حالة انعدام الجهد الكهربائي (الفولتية) من جانبٍ إلى آخر. ويمكن إعداد وصلة جوزيفسون مزدوجة، وذلك بأخذِ قطعتَين من الموصِّل الفائق وتشكيلِ كلٍّ منهما على هيئة شوكةٍ رنَّانة وضغط الطرفَين المزدوجَين معًا مع فصلهما بطبقةٍ بينية من العازل، وذلك لمحاكاة سلوك الإلكترون في تجربة «الشق المزدوج» وفقًا لميكانيكا الكَمِّ، وسنناقش هذه التجربة بالتفصيل في الفصل التالي، وتمثِّل هذه التجربة حجرَ الزاوية لعددٍ من أغربِ سماتِ عالَمِ الكَمِّ.

وليست الإلكترونات وحدَها التي تستطيع الارتباط ببعضها لصنْع بوزوناتٍ زائفة تتحدَّى قوانين الفيزياء العادية في درجات الحرارة المنخفضة. ولكن ذرات الهيليوم أيضًا يمكنها القيام بعملٍ مماثلٍ جدًّا، وهذا هو الأساس وراء خاصيةٍ معينةٍ من خصائص الهيليوم السائل تُسمَّى السيولة الفائقة. عندما تُقلِّب فنجانًا من القهوة ثم تتركه لحاله، تتباطأ الحركة الدوامية الدوارة للسائل ثم تتوقَّف، نظرًا لوجود قوة السيولة المكافئة لقوى الاحتكاك أو اللزوجة. جرِّب الأمرَ نفسَه مع الهيليوم المُبرَّد إلى ما دون ١٧,٢ كلفن ولن يتوقَّف الدوران أبدًا حتى لو تركته تمامًا لحاله، وقد يتحرَّك السائل لأعلى على جانب الإناء وفوق حافة الإناء، وبدلًا من المرور بصعوبةٍ عبر أنبوب ضيق، فإن الهليوم الفائق السيولة يتدفَّق بسهولةٍ أكثرَ إذا ازداد الأنبوب الذي يمر خلاله ضِيقًا. ويمكن تفسيرُ كلِّ هذا السلوكِ الغريب طِبقًا لإحصاء بوز-أينشتاين، ومرةً أخرى، على الرغم من صعوبةِ إيجاد استخدامات عملية لهذه الظاهرة بسبب درجات الحرارة المنخفضة اللازمة، فإن سلوك الذرات عند هذه الدرجات المنخفضة — مثله مثل سلوك الإلكترونات في التوصيل



شكل ٧-٢: تحدُث أشياءُ غريبة عند وصلة جوزيفسون، عند الفصل بين قطعتَي الموصِّل الفائق بواسطة طبقة عزْل. وفي ظل الظروف المناسبة، تستطيع الإلكترونات أن تخترق الحاجز عبر نفق.

الفائق — يقدِّم فرصةً لرؤيةِ العملياتِ الكَمِّية في أثناء حدوثها. وإذا وُضِع قليلٌ من الهيليوم الفائق السيولة في إناءٍ صغير عرضُه ٢ملم أو نحو ذلك، وجرى تقليب الإناء بحركةٍ دورانية، فإن الهيليوم سيظل ساكنًا في البداية. وعندما تزداد سرعة الدوران، وعند إحدى قيم الزخم الزاوي الحرجة يحدث للهيليوم كله تدفُّق زاوي، ويتغيَّر من حالة كمومية إلى أخرى. ولا يُسمَح بحالةٍ بينية — تقابل نوعًا من الزخم الزاوي البيني — طبقًا لقواعدِ الكَمِّ، ويمكن رؤية المجموعة الكاملة لذرات الهيليوم، وهي كتلة مرئية أكبر كثيرًا من الذرة المفردةِ أو جسيماتِ عالَمِ الكَمِّ، وهي تسلك وفقًا لقواعدِ الكَمِّ. وكما سنرى لاحقًا، يمكن أيضًا تطبيق التوصيل الفائق على أجسامٍ ذات مقاييس بشرية، وليست ذرية. ولكنَّ نظريةَ الكَمِّ ليست محدودةً بعالَم الفيزياء، ولا حتى العلوم الفيزيائية. وكما تذكر، فقد أصبحت الكيمياء كلُّها الآن مفهومةً بلغةِ قواعدِ الكَمِّ الأساسية. والكيمياء هو علم الجزيئات، وليس عالَم الذرات المفردة والوحدات الفرعية من الذرات، ويشمل ذلك أهم الجزيئات في حياتنا جميعًا وهي الجزيئات الحيَّة، بما في ذلك جزيء الحياة، الحمض النووي (الـ «دي إن إيه»). كما أن فهْمنا الحالي للحياةِ نفسِها له جذور راسخة في نظريةِ الكَمِّ.



شكل ٧-٣: يمكن إعداد زوج من وصلات جوزيفسون لإنشاءِ نظامٍ شبيهٍ بتجربة الشقَّين المستطيلَين للضوء. وفي هذا التكوين، يمكن رصد التداخل بين الإلكترونات، وهو أحدُ المؤشرات الكثيرة للطبيعة الموجية لهذه «الجسيمات».

الحياةُ نفسُها

بعيدًا عن الأهمية العلمية لنظريةِ الكَمِّ في فهْم كيمياء الحياة، فإن ثمَّة علاقاتٍ شخصية مباشرة بين بعض الشخصيات الرائدة في قصةِ الكَمِّ واكتشاف البنية الحلزونية المزدوجة للحمض النووي؛ جزيء الحياة. اكتشفَ لورانس براج ووالده ويليام القوانين التي تصفُ حيود أشعة إكس من البلورات أثناء عملهما في مختبر كافنديش في السنوات التي سبقت الحرب العالمية الأولى، وقد حصلا مناصفةً على جائزة نوبل عن هذا الاكتشاف، وكان لورانس في سنٍّ مبكِّرة في ذلك الوقت (سنة ١٩١٥، عندما كان ضابطًا في الخدمة بفرنسا) وظل على قيد الحياة (مع أنه خدمَ في فرنسا أثناء الحرب العالمية الأولى) ليحتفل باليوبيل الذهبي لهذه المناسبة بعد خمسين سنة. اشتهر براج الأبُ في البداية في الفيزياء بدراساته

لأشعة ألفا وبيتا وجاما، وقد أثبت في السنوات الأخيرة من العَقد الأول من القرن العشرين أن أشعة جاما وأشعة إكس تسلكان مسلكَ الجسيمات من بعض النواحي. ومع ذلك، يعتمد قانون براج لحيود أشعة إكس، الذي هو أساس حلِّ ألغاز بنية البلورات، على الخصائص الموجية لأشعة إكس التي ترتد عن الذرات في البلورة. وتعتمد أنماط التداخل الناتجة عن ذلك على مقدار المسافة بين الذرات في البلورة وعلى الطول الموجي لأشعة إكس، وقد تطوَّرت هذه التقنية على أيدٍ خبيرةٍ بحيث تحدِّد مواقع الذرات المفردة حتى في البِنى البلورية المعقَّدة.

ثم جاءت الفكرة التي أدَّت إلى قانون براج سنة ١٩١٢، وكانت في الأساس فكرةَ لورانس براج، الذي بحلول أواخر الثلاثينيات من القرن العشرين كان يشغل منصب أستاذ الفيزياء بمختبر كافنديش في كامبريدج (خَلفًا لرذرفورد الذي تُوفِّي سنة ١٩٣٧) وكان لا يزال منهمكًا في أبحاثه في مجال أشعة إكس، ضِمن أشياء أخرى كثيرة. وشهد هذا العَقد بداية إحراز التقدُّم في علم «الفيزياء الحيوية» الجديد. وقد أسفرَ البحثُ الرائد لجيه دي برنال في تحديد بنية الجزيئات البيولوجية وتكوينها بواسطة حيود أشعة إكس عن دراساتٍ تفصيليةٍ لجزيئات البروتين المعقَّدة المسئولة عن تنفيذ الكثير من وظائف الحياة. وقد اقتسم الباحثان، ماكس بيروتس وجون كندرو، جائزةَ نوبل في الكيمياء لسنة ١٩٦٢ عن تحديد بِنى الهيموجلوبين (الجزيء الذي ينقل الأكسجين في الدم) والميوجلوبين (بروتين العضلات) نتيجةً للأبحاث التي بدأت في كامبريدج قبل الحرب العالمية الثانية.

ومع ذلك، فإن الشخصَين اللذين يرتبط اسمهما دائمًا في هذا الاكتشاف بأصول البيولوجيا الجزيئية ونشأتها هما «الشابَّان الثوريان» فرانسيس كريك وجيمس واطسون، اللذان وضعَا النموذجَ الحلزوني المزدوج للحمض النووي في بداية خمسينيات القرن العشرين، وحصَلا على جائزة نوبل في «الفسيولوجيا أو الطب» (واقتسمَاها مع موريس ويلكينس) أيضًا سنة ١٩٦٢. ومن الجدير بالإعجاب تلك المرونة التي أبدتها لجنة نوبل في إدارتها لتكريم الرواد المختلفين في مجال الفيزياء الحيوية، وذلك بمنح الجوائز في السنةِ نفسِها تحت عنوان «الكيمياء» و«الفسيولوجيا»، ولكن مع الأسف حالت القواعد الصارمة التي لا تجيز منْح الجائزة بعد الوفاة دون منحِ جزءٍ من جائزة كريك-واطسون-ويلكينس إلى زميلة ويلكينس روزاليند فرانكلين، التي أنجزت القدرَ الأكبر من بحثِ عِلم البلورات الأساسي الذي اكتُشِفت من خلاله بنية الحمض النووي، بيدَ أنها تُوفِّيت سنة ١٩٥٨ في السابعة والثلاثين من عمرها. وقد أشار واطسون — الناشط النسوي اللاذع — في كتابه

«الحلزون المزدوج» إلى دور فرانكلين في هذا الاكتشاف، والكتاب عبارة عن سردٍ شخصي رائع للفترة التي قضاها في كامبريدج، وهو مسلٍّ إلى حدٍّ كبير لكنه لا يقدِّم صورةً منصفة ودقيقة عن زملائه أو حتى عن نفسِه.

كانت الأبحاث التي قادت واطسون وكريك إلى اكتشافِ بنية الحمض النووي قد أُجريت في مختبر كافنديش؛ حيث كان براج ما زال في السلطة. ويصف واطسون، الذي كان وقتها شابًّا أمريكيًّا موجودًا في أوروبا لإجراء أبحاثٍ ما بعد الدكتوراه، في كتابه كيف التقى براج لأول مرة عندما كان يسعى إلى الحصول على تصريحٍ للعمل في كافنديش. خرجَ الرجلُ ذو الشارب الأبيض، الذي كان في ذلك الوقت في بداية الستينيات من عمره، على واطسون الشابِّ كأحدِ المَعالم الأثرية من الماضي العلمي، ولا شك أنه أصبح حينئذٍ يُمضي معظم أيامه جالسًا في نوادي لندن. حصل واطسون على التصريح واندهش بالاهتمامِ البالغ الذي أبداه براج بالبحث؛ حيث قدَّم له إرشاداتٍ قيِّمة — وإن لم تكن دومًا موضعَ ترحيب، في سبيل حلِّ مشكلة الحمض النووي. أما فرانسيس كريك، فمع أنه كان أكبرَ سنًّا من واطسون إلا أنه كان من الناحية التخصصية لا يزال طالبًا يباشر رسالتَه لنَيل درجة الدكتوراه. واعترضت الحرب العالمية الثانية، مثل كثيرين من أبناء جيله، مسيرتَه العلمية، مع أن ذلك ربما لا يكون أمرًا غيرَ محمودٍ في حالته. وقد تلقَّى تدريبه في الأساس كفيزيائي، ولم يتحوَّل إلى العلوم البيولوجية إلا في أواخر أربعينيات القرن العشرين، وهو القرار الذي كان إلى حدٍّ كبير بإيحاءٍ من كتابٍ صغيرٍ كتبَه شرودنجر ونُشِرَ سنة ١٩٤٤. كان عنوان الكتاب «ما الحياة؟» وهو كتابٌ كلاسيكي — ما زال قيدَ الطبع، وهو جدير بالمطالعة والبحث — يشرح فكرةَ أن الجزيئات الأساسية للحياة يمكن فهْمُها من خلال قوانين الفيزياء. والجزيئات المهمة التي ينبغي تفسيرُها في ضوء هذه القوانين هي الجينات التي تحمل معلوماتٍ عن كيفية بناء الجسم الحي وآلية عمله. عندما كتبَ شرودنجر كتابه «ما الحياة؟» كان يُعتقَد أن الجينات، مثل جزيئاتٍ حيةٍ أخرى كثيرة، مصنوعةٌ من البروتين، ولكن في ذلك الوقت تقريبًا كان يجري العمل على بحثٍ اكتشفَ أن الصفات الوراثية تنتقل بواسطة جزيئات حمضٍ اسمه الحمض النووي الريبوزي المنقوص الأكسجين، وهو موجود في الأنوية المركزية للخلايا الحية.[7] وهكذا اكتشفَ كريك وواطسون الحمضَ النووي وحدَّدا بنيته باستخدام بيانات أشعة إكس التي حصل عليها ويلكينس وفرانكلين.

استعرضتُ وصفًا تفصيليًّا لبنية الحمض النووي ودوره في العمليات الحيوية في كتابٍ آخر.[8] ولكن السمة الأساسية هي أن الحمض النووي عبارة عن جزيء مزدوج،

مكوَّن من جَديلتَين إحداهما ملتفة حول الأخرى. ويكون الترتيب الذي تنتظم به المركَّبات الكيميائية — المسماة قواعد — في سلسلة الحمض النووي حول محورها المركزي، هو المسئول عن نقل المعلومات التي تستخدمها الخلايا الحية لبناء جزيئات البروتين التي تنجز كلَّ الوظائف، مثل نقل الأكسجين في الدم، أو مساعدة العضلات على أداء وظيفتها. ويمكن أن تنحلَّ جديلةٌ من الحمض النووي جزئيًّا لتجعل سلسلةَ القواعد تعمل بمثابة «قالب» لبناء الجزيئات الأخرى، أو يمكنها أن تنحلَّ تمامًا وتكرِّر نفسَها بتوصيل كل قاعدة على طول سلسلة الجديلة بنظيرتها بحيث تبني جديلةً صورةً طِبْق الأصل ومعكوسةً من ذاتِها مكوِّنةً بذلك حلزونًا مزدوجًا جديدًا. تستخدم العمليتان الحساءَ الكيميائي الموجود داخل الخلية الحية كمادة خام، وكلتا العمليتَين أساسيةٌ للحياة. وأصبح الآن في مقدور الإنسان التلاعب بالرسائل المشفرة على طول الحمض النووي؛ حيث يعدِّل في التعليمات المشفرة في مخطط الحياة، وإنْ كان ذلك على الأقل في حالة بعض الكائنات الحية البسيطة نسبيًّا.

يُعدُّ هذا هو أساس الهندسة الوراثية. فمن الممكن تخليق أجزاء من المادة الوراثية — الحمض النووي — بواسطةِ مجموعةٍ من التقنيات الكيميائية والبيولوجية، ومن الممكن تحفيزُ الكائنات الدقيقة مثل البكتيريا لالتقاط هذا الحمض النووي من الحساء الكيميائي في الوسط المحيط بها ودمجه في شفرتها الوراثية. وإذا أُعطيَت المعلومات المشفرة عن كيفية صنْع الأنسولين البشري سلالةً من البكتيريا بهذه الطريقة، فإن مصانعها البيولوجية ستؤدي المهمةَ نفسَها بالضبط؛ حيث تُنتِج المادة اللازمة تمامًا لإعانة مرضى السكر على أن يحيَوا حياةً طبيعية. ويُوشك أن يصبح الحُلم حقيقةً في تعديل المادة الوراثية البشرية للتخلُّص من العيوب التي تتسبَّب في مشكلاتٍ مثل مرض السكر في المقام الأول، ولا يوجد سببٌ نظري يحتِّم عدمَ تحقيقه. فقد تمكَّنا بالفعل من استخدامِ تقنيات الهندسة الوراثية في الحيوانات والنباتات الأخرى؛ حيث أنتجنا سلالاتٍ أجودَ من أجل الغذاء وغيره من المتطلبات البشرية.

مرةً أخرى، يمكن إيجاد التفاصيل في مواضعَ أُخر.[9] ولعل النقطة المهمة هي أننا جميعًا قد سمعنا بالهندسة الوراثية وقرأنا عن التوقُّعات المذهلة — والمخاطر — التي تَعِدُ بها في المستقبل. ومع ذلك، قليلٌ من الناس هم مَنْ يدركون أن فهْم الجزيئات الحية التي تجعل الهندسة الوراثية أمرًا ممكنًا يعتمد على فهْمِنا الحالي لميكانيكا الكَمِّ، التي لولاها ما تمكَّنا من تفسير بيانات حيود أشعة إكس، فضلًا عن أي شيء آخر. وحتى نفهمَ كيفية بناء الجينات أو إعادة بنائها، علينا أن نفهم السببَ والكيفية التي تجعل الذرات لا تتَّحد

بعضها مع بعض إلا في نسقٍ معيَّن، على مسافاتٍ محدَّدة بعضها من بعض، وبواسطة روابط كيميائية ذات قوة معينة. وهذا الفهم هو هدية فيزياء الكَمِّ إلى كلٍّ من الكيمياء والبيولوجيا الجزيئية.

لقد أسهبتُ في هذه النقطة على نحوٍ أكبرَ إلى حدٍّ ما عمَّا كنت لأفعل لو لم أكن عضوًا في كلية جامعة ويلز. وفي مارس ١٩٨٣، أشرتُ في عجالةٍ من خلالِ مقالٍ نقدي في مجلة «نيو ساينتست» أنه «لولا نظريةُ الكَمِّ لما كان هناك وجود للهندسة الوراثية، ولا حواسيب الحالة الصلبة، ولا محطات الطاقة النووية (أو القنابل).» وقد أثار ذلك حفيظةَ أحد المراسلين في هذه المؤسسة الأكاديمية الموقَّرة إلى الحد الذي جعله ضجِرًا برؤية الهندسة الوراثية تُجَر إلى كل سياقٍ بوصفها الكلمة العلمية الرنَّانة الجديدة، والتصريح بأن جون جريبين ينبغي ألا يُسمَح له بالذهاب طليقًا بهذه الملاحظات المفرِطة في الخيال. فماذا عساها أن تكون الصلة المحتمَلة، مهما كانت ضعيفة، بين نظريةِ الكَمِّ وعِلم الوراثة؟ وإنني أود أن تكون الصلة واضحةً هذه المرة. فمن جهة، من الممتع أن نستطيع الإشارةَ إلى حقيقةِ أنَّ تحوُّل كريك إلى الفيزياء الحيوية كان بإيعازٍ مباشر من شرودنجر، وأن البحث الذي أدَّى إلى اكتشاف الحلزون المزدوج للحمض النووي قد جرى تحت الإشراف الرسمي المباشر من لورانس براج، حتى وإن لم يكن موضعَ ترحيب أحيانًا، ومن جهةٍ أعمقَ كان السببُ وراء اهتمام الرواد مثل براج وشرودنجر والجيل التالي من الفيزيائيين أمثال كندرو وبيروتس وويلكينس وفرانكلين بالمشكلات البيولوجية، يُعزى بالطبع إلى أن هذه المشكلات كانت تمثِّل ببساطة نوعًا آخر من الفيزياء — كما أشار شرودنجر — وهو النوع الذي يتعامل مع مجموعاتٍ ذات أعداد كبيرة من الذرات في جزيئاتٍ معقَّدة.

وبدلًا من التراجع عن هذا التعليق العابر الذي قلته في مجلة «نيو ساينتست»، فقد وددتُ التأكيد عليه. إذا طلبت من شخصٍ ذكي وواسع الاطلاع — ولكنه ليس عالِمًا — أن يلخِّص أهمَ مساهمات العِلم في حياتنا الحالية، وأن يسرد فوائد التقدُّم العلمي ومخاطره في المستقبل القريب، فسوف تحصل بالتأكيد على قائمةٍ تتضمن تكنولوجيا الحواسيب (الأتمتة، والبطالة، والتسلية، والروبوتات) والطاقة النووية (القنبلة، والصواريخ الجوَّالة، ومحطات الطاقة) والهندسة الوراثية (العقاقير الجديدة، والاستنساخ، وخطر الأمراض المُخلَّقة، وسلالات المحاصيل المُحسَّنة) والليزر (الهولوجرام، وأشعة الموت، والجراحة المجهرية الدقيقة، والاتصالات). ومن المرجَّح أن الأغلبية العظمى من الأشخاص الذين طُلِب منهم ذلك قد سمعوا بنظرية النسبية، التي لا تلعب أيَّ دورٍ في حياتهم اليومية،

وقلَّما أدرك أيٌّ منهم أنَّ كلَّ اسم في هذه القائمة له جذوره في ميكانيكا الكَمِّ، وهو فرع العلوم الذي ربما لم يسمع به أحدُهم قط، ولم يفهمه بكل تأكيد.

إنهم ليسوا وحدَهم في ذلك. فقد تحقَّقت كل هذه الإنجازات عن طريق فن الطهي الكَمِّي، باستخدام القواعد التي يبدو أنها تنجح على الرغم من أن لا أحد يعلم سببَ نجاحها. وعلى الرغم من الإنجازات التي حدثت خلال العقود الستة الماضية، فمن غير المؤكَّد ما إذا كان أيُّ أحد يفهم «السبب» وراء نجاح فن الطهي الكَمِّي. وسوف نكرِّس بقيةَ الكِتاب لسَبْر أغوار بعض الأسرار الأكثر غموضًا التي يُغض الطرف عن مناقشتها غالبًا، وللنظر في بعض الاحتمالات الواردة والمفارقات.

هوامش

(1) *Quantum Theory and Beyond*, page 1.

(2) *Subtle Is the Lord*, page 8.

(3) The same process operates in reverse when nuclei fuse together. When two light nuclei are pushed together by the pressure inside a star, they can only fuse if they overcome the potential barrier from the outside. The amount of energy each nucleus possesses in that situation depends on the temperature at the heart of the star, and in the 1920s astrophysicists were puzzled to find that the calculated temperature inside the sun is a little less than it ought to be—the nuclei at the heart of the sun do not have enough energy to overcome the potential barrier and fuse together, according to classical mechanics. The answer is that some of them tunnel through the barrier at a slightly lower energy, in line with the rules of quantum mechanics. Among other things, quantum theory explains why the sun shines, when classical theory says it cannot.

(4) One way to gain energy from fusion is by combining an isotope of hydrogen, which has one proton and one neutron (deuterium), with one which has one proton and two neutrons (tritium). The result is a helium

nucleus (two protons, two neutrons), a free neutron, and 17.6 MeV of energy. Stars work by more complicated processes involving nuclear reactions between hydrogen and nuclei such as carbon that are present in small quantities inside the star. The net effect of such reactions is to fuse four protons into a helium nucleus, with two electrons and 26.7 MeV of energy being released, and the carbon put back into circulation to catalyse another cycle of reactions. But it is processes involving tritium and deuterium that are being investigated in fusion laboratories here on earth.

(5) There is actually another type of conductor in which the valence band itself is not filled, so that electrons can move about within the valence band.

(6) Bardeen had already made a name for himself in 1948 for his work with William Shockley and Walter Brattain on an invention that got the three of them the Nobel Prize in 1956. This little invention was the transistor, and Bardeen is the first person to have won the physics prize twice.

(7) The original use of the same term “nucleus” for the central part of an atom was a deliberate echo of the already existing biological terminology.

(8) *The First Chimpanzee*, with Jeremy Cherfas.

(9) For example, in *Man Made Life*, by Jeremy Cherfas.

الجزء الثالث

... وفوق ذلك

«أن نتجادل حول مشكلةٍ ما دون التوصُّل إلى حلٍّ لها أفضلُ من أن نتوصَّل إلى الحل دون أن نتجادل.»

جوزيف جوبرت
١٧٥٤–١٨٢٤

الفصل الثامن

الفرصة وعدم اليقين

يُرى اليوم مبدأ عدم اليقين لهايزنبرج كإحدى السمات المحورية — وربما السمة المحورية الأهم — لنظريةِ الكَمِّ. ولم يستوعب زملاؤه مبدأه على الفور، لكنه استغرق قرابة ١٠ سنوات ليصل إلى هذه المكانة المرموقة. غير أنه منذ ثلاثينيات القرن العشرين ربما يكون هذا المبدأ قد وصل إلى مكانةٍ مرموقةٍ أكثرَ مما يستحق.

انبثق هذا المفهوم من زيارة شرودنجر إلى كوبنهاجن في سبتمبر ١٩٢٦، وكانت المناسبة هي تعليقه الشهير الذي قدَّمه بور حول «الوثب الكَمِّي الملعون». تيقَّن هايزنبرج أن أحد الأسباب الرئيسية لما يبدو من تطاحُن بين بور وشرودنجر هو تضارب المفاهيم. فأفكارٌ مثل «الموضع» و«السرعة» (أو الحركة المغزلية فيما بعدُ) لا تعني ببساطة في عالَم الفيزياء الميكروية مثلَ ما تعنيه في الحياة اليومية. فماذا تعني تلك الأفكار، وكيف يمكن ربط هذين العالَمين بعضهما ببعض؟ عاد هايزنبرج إلى المعادلة الأساسية لميكانيكا الكَمِّ:

$$pq - qp = \hbar / i$$

وتبيَّن من هذه المعادلةِ أن ناتج عدم اليقين في الموضع (Δq) والزخم (Δp) لا بد أن يكون دائمًا أكبرَ من $\hbar$. وتُطبَّق القاعدةُ نفسُها لعدم اليقين لكلِّ ما يُطلق عليه المتغيرات المترافقة التي حاصلُ ضربها يساوي وحدات الفعل، مثل $\hbar$، ووحدات الفعل هنا هي الطاقة × الزمن؛ أما الزوج الهام الآخر من مثل هذه المتغيرات فهو من المؤكد الطاقة (E) والزمن (t). وقال هايزنبرج إن المفاهيم الكلاسيكية لعالَمنا اليومي ما زالت موجودة في

العالم الميكروي، ولكن من الممكن تطبيقها فقط بشكلٍ محدودٍ تبيِّنه علاقاتُ عدم اليقين. فكلما كانت معرفتُنا لموقعِ جسيمٍ أكثرَ دقةً أصبحت معرفتنا للزخم أقلَّ دقة، والعكس صحيح.

معنى عدم اليقين

نُشرت هذه النتائج المذهلة في مجلة الفيزياء الألمانية «تسايتشريفت فور فيزيك» سنة ١٩٢٧، فاستقبلها العلماء النظريون مثل ديراك وبور، الملمُّون بالمعادلات الجديدة لميكانيكا الكَمِّ، باستحسانٍ على الفور، لكن معظم التجريبيين رأى نتائج هايزنبرج تحديًا لمهاراتهم. وتخيلوا أنه يدَّعي أن تجاربهم ليست جيدةً بما فيه الكفاية لقياس الموضع والزخم في الوقتِ نفسِه، وحاولوا القيام بتجارب لإثبات خطئه. إلا أن ذلك كان هدفًا غيرَ ذي جدوى لأن هذا لم يكن ما قاله هايزنبرج على الإطلاق.

ويظهر أن سوء الفهم هذا، الذي لا يزال مستمرًّا حتى هذه الأيام، سببُه ولو جزئيًّا، الطريقةُ التي غالبًا ما تُدرَس بها فكرة عدم اليقين. وقد استخدم هايزنبرج نفسُه فكرةَ ملاحظة الإلكترون للوصول إلى مبدئه. إننا نستطيع أن نرى الأشياء عندما ننظر إليها، وهو الأمر الذي يتضمَّن ارتداد فوتونات الضوء منها إلى أعيننا. والفوتون لا يؤثِّر كثيرًا على شيء مثل بيت؛ ولذا لن نتوقَّع أن البيت سيتأثر كثيرًا عندما ننظر إليه. ولكن أمر الإلكترون يختلف كثيرًا. فبداية، حيث إن الإلكترون صغيرٌ جدًّا، لا بدَّ أن نستخدم طاقةً كهرومغناطيسية ذات طول موجي قصير حتى يمكن رؤيته على الإطلاق (بمساعدة جهاز تجريبي). وأشعة جاما هذه طاقتها كبيرة، وأي فوتونات لأشعة جاما ترتد عن الإلكترون — ويمكن التعرُّف عليها بجهازنا التجريبي — ستغيِّر بطريقةٍ درامية موقعَ وزخمَ الإلكترون — إذا كان الإلكترون في ذرةٍ ما — ومجرد فعْل الرؤية نفسِه بواسطة ميكروسكوب خاص بأشعة جاما ربما يدفع هذا الإلكترون خارج الذرة كليًّا.

وكل ذلك صحيح بما فيه الكفاية ويعطي فكرةً عامة عن استحالة قياس الموضع والزخم للإلكترون معًا بدقة. لكن مبدأ عدم اليقين، ووفقًا للمعادلات الأساسية لميكانيكا الكَمِّ، يدلنا على أنه لا يمكن أن يكون للإلكترون زخمٌ وموقعٌ دقيقان في الوقتِ نفسِه.

كان لهذه النتائج آثارٌ بعيدة المدى. وكما قال هايزنبرج في نهايةِ مقاله في مجلة «تسايتشريفت فور فيزيك»: «لا نستطيع أن نعرف الحاضرَ بكلِّ تفاصيله كمسألة مبدأ.» وهنا حيث تتحرَّر نظريةُ الكَمِّ من حتمية الأفكار الكلاسيكية. وبالنسبة إلى نيوتن، فإنه

من الممكن التنبؤ بكلِّ ما سيحدث في المستقبل إذا عرفنا موقع وزخم كلِّ جسيم في الكون، أما بالنسبة إلى الفيزيائيين المحدثين فإن فكرة هذا التنبؤ المثالي لا معنَى لها؛ حيث إننا لا نستطيع أن نعرف الموقع والزخم حتى لجسيمٍ واحد بالضبط. ونحصل على النتيجة نفسِها من كل النسخ المختلفة للمعادلات من الميكانيكا الموجية ومصفوفات هايزنبرج-بورن-جوردان وأعداد q لديراك، هذا مع أن مسلك ديراك الذي تجنَّب بعنايةٍ أيَّ مقارنة فيزيائية لعالَم الحياة اليومية كان يبدو وكأنه الأكثر ملاءمة. ومن المؤكد أن ديراك قد توصَّل تقريبًا إلى علاقةِ عدم اليقين قبل هايزنبرج. وقد أشار في مقالٍ صدر ضِمن دورية «بروسيدينجز أوف ذا رويال سوسايتي» في ديسمبر ١٩٢٦ إلى أنه قد يتوقَّع المرء مع ذلك أن تجيب نظريةُ الكَمِّ عن أيِّ أسئلة تشير إلى القيم العددية لكلٍّ من p وq، إلا أنه «لكي تجيب عن الأسئلة التي تحتوي فقط q وp فإنها لا بد أن تعطي قيمًا عددية.»

لم يستخدم العلماء تضمينات هذه الأفكار إلا في الثلاثينيات من القرن العشرين فيما يتصل بمفهوم السببية — الفكرة القائلة بأن كلَّ حدثٍ وراءه بعض الأحداث المحددة — ولغز التنبؤ بالمستقبل أيضًا. وفي الوقتِ نفسه، ومع أن علاقات عدم اليقين قد جرى استنتاجُها من المعادلات الأساسية لميكانيكا الكَمِّ، فإن بعض الخبراء المؤثِّرين قد أخذوا يدرسون نظريةَ الكَمِّ بادئين بعلاقات عدم اليقين. ويُعتبر فولفجانج باولي على الأرجح المؤثِّرَ المحوري في هذا الاتجاه. وقد كتب مقالًا موسوعيًّا مهمًّا حول نظريةِ الكَمِّ بادئًا بعلاقات عدم اليقين، وشجَّع زميله هيرمان فيل ليستهل كتابه «نظرية المجاميع وميكانيكا الكَمِّ» بالطريقة نفسِها. ظهر هذا الكتاب لأول مرة باللغة الألمانية سنة ١٩٢٨ ثم بالإنجليزية (بواسطة ميثوين) سنة ١٩٣١. ولقد هيَّأ هذا الكتاب ومقال باولي المناخَ لجيلٍ من المراجع القياسية في هذا المعنى، وأصبح الطلاب الذين شبُّوا على هذه المراجع أساتذةً بدورهم أحيانًا، ولقَّنوا تلك التعاليم للأجيال التالية. ونتيجةً لذلك صار الطلاب في الجامعات حتى يومنا هذا يتعلَّمون نظريةَ الكَمِّ في أغلب الأحيان عن طريق علاقات عدم اليقين.[1]

وهذا حدثٌ غريب في التاريخ. وعلى كلٍّ، فإن المعادلات الأساسية لنظريةِ الكَمِّ تؤدي إلى علاقات عدم اليقين، ولكن إذا بدأنا بعدم اليقين فلن نصل بأي حالٍ من الأحوال إلى المعادلات الأساسية للكَمِّ. والأسوأ من ذلك أن الطريقة الوحيدة لتقديم عدم اليقين من دون المعادلات، تكون باستخدامِ أمثلةٍ مثل استخدام ميكروسكوب أشعة جاما لرصد

الإلكترونات، ويجعل هذا الناس على الفور تعتقد أن عدم اليقين يختص بالقيود التجريبية ولا يختص بالحقيقة الأساسية عن طبيعة الكون. وعليك أن تعرف أمرًا واحدًا ومنه تعود لتعرف شيئًا آخرَ ثم تتحرَّك لتكتشف فقط أنك قد توصَّلت إلى ما تعلَّمته في البداية. فالعلم ليس بالضرورة منطقيًّا، وبالمثل مدرسو العلوم. والنتيجة هي أجيال من الطلاب المشوَّشين والمفاهيم الخاطئة المختلطة بشأن مبدأ عدم اليقين؛ تلك المفاهيم الخاطئة التي لا تشارك أنت فيها، لأنك قد اكتشفت أمورًا في ترتيبها الصحيح. وعلى كلٍّ، إذا لم نهتمَّ بالتعقيدات العلمية وأردنا أن ننخرط في غرائبِ عالَمِ الكَمِّ، فإنه من المعقول جدًّا أن نبدأ باكتشافِ هذا العالَم بالأمثلة المذهلة حول طبيعته الخاصة للغاية. وسيكون مبدأ عدم اليقين في الجزء المتبقي من هذا الكتاب، متعلقًا فقط بأقل الأشياء غرابةً من التي ستصادفنا.

تفسير كوبنهاجن

الأمر المهم المتعلِّق بمبدأ عدم اليقين، الذي لا يلقى الاهتمام الذي يستحقه، هو أن هذا المبدأ لا يعمل بالمنطقِ نفسِه للأمام أو للخلف في الزمن. «تهتم» أشياءُ قليلة جدًّا في الفيزياء بالكيفية التي ينساب بها الزمن، وأحدُ الألغاز الأساسية للكون الذي نعيش فيه أنه من المؤكَّد وجودُ «سهمٍ للزمن» محدَّدٍ، فارقٍ بين الماضي والمستقبل. وتدلنا علاقات عدم اليقين على أننا لا نستطيع معرفةَ الموضع والزخم في الوقتِ نفسه، وعليه فإننا لا نستطيع التنبؤ بالمستقبل؛ فالمستقبل ليس قابلًا أصلًا للتنبؤ وهو غير مؤكد. ولكنه في داخل نطاق قواعدِ ميكانيكا الكَمِّ من الممكن إجراء تجربة للحساب بطريقةٍ عكسية لنصل إلى موقعِ وزخمِ إلكترون بالضبط عند زمنٍ معيَّن في الماضي مثلًا. والمستقبل أصلًا غيرُ محدَّد وغير مؤكَّد، فنحن لا نعرف بالضبط إلى أين نحن ذاهبون، لكن الماضي محدَّد تمامًا؛ فنحن نعلم من أين جئنا. وباستعارة مقولة هايزنبرج «من الممكن أن نعرف — من حيث المبدأ — الماضي بكل تفاصيله». ويتناسب هذا الأمر تمامًا مع خبرتنا اليومية بطبيعة الزمن، من حيث حركتنا من ماضٍ معروف إلى مستقبلٍ مجهول، وهي سمة أساسية في صميم عالَمِ الكَمِّ. ومن الممكن ربط ذلك بسهم الزمن الذي نلاحظه في الكون على اتساعه، وسنناقش تضميناته الأكثر غرابةً فيما بعد.

وفي حين بدأ الفلاسفة يتمسَّكون شيئًا فشيئًا بمثل هذه التضمينات المثيرة لعلاقات عدم اليقين، كانت هذه التضمينات لبور شعاعًا من الضوء ينير الطريقَ للمفهوم الذي

كان يحاول الوصولَ إليه لبعض الوقت. وحيث وَجدت فكرةُ التكامل التي تفيد بأن كلًّا من صور الموجة والجسيم ضروريان لفهْم عالَم الكَمِّ (مع أن الإلكترون في الواقع ليس بموجة ولا جسيم) صيغةً رياضيةً في علاقةِ عدم اليقين تُفيد بأن الموقع والزخم معًا لا يمكن معرفتهما بدقة، ولكنها كوَّنت سماتٍ تكاملية للواقع، وبشكلٍ ما يستثني بعضها بعضًا. وفي الفترة ما بين يوليو ١٩٢٥ وسبتمبر ١٩٢٧ لم ينشر بور إلا القليل جدًّا في مجال نظريةِ الكَمِّ، ثم ألقى بعد ذلك محاضرةً في كومو بإيطاليا فيما يُعرف بـ «تفسير كوبنهاجن» أمام جمْعٍ غفيرٍ من الحضور قدَّم فيها لفكرةِ التكامل. أشار بور إلى أنه في الفيزياء الكلاسيكية نتصوَّر أن منظومةَ أيِّ جسيمات متداخلة تعمل مثل الساعة بصرف النظر عما إذا كانت مراقبةً أم لا، أما في فيزياءِ الكَمِّ فإن المُشاهد يتفاعل مع المنظومةِ لدرجةِ أن المنظومة لا يُنظر إليها كوجود مستقل. فإذا اخترنا قياس الموقع بدقةٍ فإننا نجبر الجسيم أن يخلق المزيد من عدم اليقين في الزخم والعكس صحيح؛ إذا اخترنا تجربةً لقياس خصائص الموجة فإننا نتغاضى عن سمات الجسيم، ولا توجد تجربة تكشف عن سمات الجسيم والموجة في آنٍ معًا، وهكذا. ويمكننا في الفيزياء الكلاسيكية وصْفُ موقعِ الجسيمات بدقةٍ في الزمكان والتنبؤ بمسلكها بالدقةِ نفسِها، أما في فيزياء الكَمِّ فلا نستطيع، وفي هذا السياق حتى النسبية تُعتبر نظريةً «كلاسيكية».

استغرق الأمر وقتًا طويلًا لتتطوَّر هذه الأفكار ويستقر مغزاها. واليوم أصبحت السمات المحورية لتفسير كوبنهاجن أكثرَ سهولةً في شرحها وفهمها بمدلولِ ما يحدث عندما يُجري عالِمٌ عمليةَ رصد تجريبية. أولًا: لا بد أن نسلِّم بأن مجرَّد ملاحظة الشيء تغيِّر منه، وأننا — نحن الملاحظين — جزءٌ حقيقي فعلًا من التجربة، ولا يوجد شيء مثل الساعة التي تدق سواء كنا ننظر إليها أم لا. ثانيًا: كلُّ ما نعرفه هو نتائج التجربة. نستطيع النظرَ إلى الذرة لنرى الإلكترون عند مستوى طاقةِ أ ثم عند النظر ثانية نرى الإلكترون عند مستوى طاقةِ ب. وربما نتخيَّل أن الإلكترون قد قفز من المستوى أ إلى المستوى ب لأننا نظرنا إليه. ولكننا في الواقع لا يمكن أن نجزم بأنه هو الإلكترون نفسُه، بل ولا نستطيع أن ندلي بأي شيء عما يحدث عندما كنا لا ننظر إلى الإلكترون. وما نستطيع تعلُّمه من هذه التجارب أو من معادلات نظريةِ الكَمِّ أنه من المحتمل أن نصل إلى الإجابةِ أ إذا نظرنا إلى نظامٍ ما، وعند النظر مرةً ثانية قد نحصل على الإجابة ب، ولا نستطيع أن نقول شيئًا عما حدث عندما كنا لا ننظر إليه، أو كيف وصل النظام من المستوى أ إلى ب إذا حدث ذلك فعلًا. أما «الوثبُ الكَمِّي الملعون» الذي سبَّب اضطراب

شرودنجر فهو التفسير لسببِ حصولنا على إجابتين مختلفتين لنفس التجربة، وهو تفسيرٌ خادع. وقد توجد بعض الأشياء في المستوى أ بعض الوقت، وأحيانًا أخرى في المستوى ب، والسؤال هو: ما الذي يحدث بين الحالتين، أو كيف يحدث الانتقال من مستوًى لآخر، وهو شيء غير ذي معنًى تمامًا؟

وهذه في الحقيقة سمةٌ أساسية لعالَمِ الكَمِّ. ومن المثير أن هناك حدودًا لما نعرفه عما يفعله الإلكترون عندما لا ننظر إليه؛ بل إنه شيء مثير للحَيرة تمامًا عندما نكتشف أنه ليس لدينا أيُّ فكرة عما يحدث عندما لا ننظر إليه.

لقد قدَّم إدنجتون في ثلاثينيات القرن العشرين بعضًا من أفضل الأمثلة الفيزيائية حتى الآن بخصوص ذلك في كتابه «فلسفة علم الفيزياء». وقد شدَّد على أن ما ندركه — ما نتعلَّمه من تجاربنا — متأثرٌ بدرجة كبيرة بتوقعاتنا، وقدَّم مثالًا على ذلك، مربِكًا في بساطته، ليسحب بذلك البِساط من تحت هذه الملاحظات. قال: نفترض أن أحد الفنانين أخبرك بأن شكل رأس إنسان «مختبِئ» في صخرةٍ من الرخام. ستقول: «هراء». لكن الفنان يبدأ حينئذٍ في نحت الرخام بشيءٍ ليس أكثرَ من مطرقة وإزميل كاشفًا الشكل المختبئ. فهل هذه هي الطريقة التي «اكتشف» بها رذرفورد النواة؟ قال إدنجتون: «الاكتشاف لا يتجاوز الموجات التي تمثِّل المعرفة التي لدينا عن النواة»؛ حيث إن نواة الذرة لم يرَها أحدٌ بالمرة. وكلُّ ما نراه هو نتائج التجارب التي تؤدي إلى مدلول النواة. لم يجِد أيُّ إنسان البوزيترون إلى أن اقترح ديراك احتمال وجوده، ويدعي الفيزيائيون هذه الأيام معرفةَ عددٍ أكبر لما يسمَّى بالجسيمات الأساسية أكثر من العناصر المعروفة في الجدول الدوري. وكان الفيزيائيون في ثلاثينيات القرن العشرين مفتونين بالتنبؤ بجسيمٍ جديدٍ آخرَ — وهو النيوترينو — مطلوبٍ لتفسير خفايا التفاعلات المغزلية في بعض أنواع الانحلال الإشعاعي. وقال إدنجتون: «لست مرتاحًا لنظرية النيوترينو»، وأضاف: «ولا أعتقد في وجود النيوترينوات». لكن «هل أجرؤ أن أقول إن الفيزيائيين التجريبيين ليس لديهم البراعة الكافية لصنْع النيوترينوات؟»

ومنذ ذلك الحين حدث بالفعل «اكتشاف» ثلاثة تشكيلات مختلفة (بالإضافة إلى ثلاثة تشكيلات مضادة مختلفة) كما افترض وجود أنواع أخرى. هل من الممكن حقيقة أخذ شكوك إدنجتون مأخذَ الجِد على ظاهرها؟ وهل من المحتمل أن النواة والبوزيترون والنيوترينو لم تكن موجودةً إلى أن اكتشف التجريبيون نوعَ الإزميل المناسب لكشف أشكالها؟ وتضرب مثل هذه التخمينات على جذور صحة عقولنا، علاوة على مفهومنا عن

الواقعية. لكنها أسئلة معقولة تمامًا يمكن طرحُها في عالمِ الكَمِّ. وإذا تتبَّعنا كتاب وصفةِ الكَمِّ بطريقةٍ صحيحة يمكننا القيام بتجربةٍ ينتج منها عدة قراءات نستطيع تفسيرها كمؤشرات على وجودِ نوعٍ معيَّن من الجسيمات. وفي كل مرة نستخدم نفس الوصف غالبًا نحصل على نفس المجموعة من القراءات. ولكن التفسيرات بمدلول الجسيمات كلها في الأذهان، وربما لا تكون أكثرَ من خداع متماسك. ولا تدلنا المعادلات على أي شيء مما تفعله الجسيمات عندما لا ننظر إليها؛ فلم ينظر أحد قط للنواة قبل رذرفورد، وقبل ديراك لم يتخيَّل أحدٌ وجود البوزيترون. فإذا كنا لا نستطيع أن نقول ماذا يفعل الجسيم عندما لا ننظر إليه، ولا نستطيع أن نجزم بوجوده عندما لا ننظر إليه؛ فمن المنطقي أن ندعي أن النواة والبوزيترون لم يكن لهما وجود قبل القرن العشرين؛ لأنه لم يحدث أن رأى إنسانٌ أيًّا منها قبل القرن العشرين. وما تراه في عالَمِ الكَمِّ هو ما تحصل عليه، وليس هناك شيء حقيقي، وأقصى ما نأمُل فيه أن تتوافق مجموعةٌ من الخدع بعضها مع بعض. ولسوء الحظ، حتى هذه الآمال قد تحطَّمت بواسطة بعض التجارب الأكثر بساطة. فهل تذكُر تجارب الشق الطولي المزدوج التي برهنت على الطبيعة الموجية للضوء؟ كيف يمكن تفسيرها بمدلول الفوتونات؟

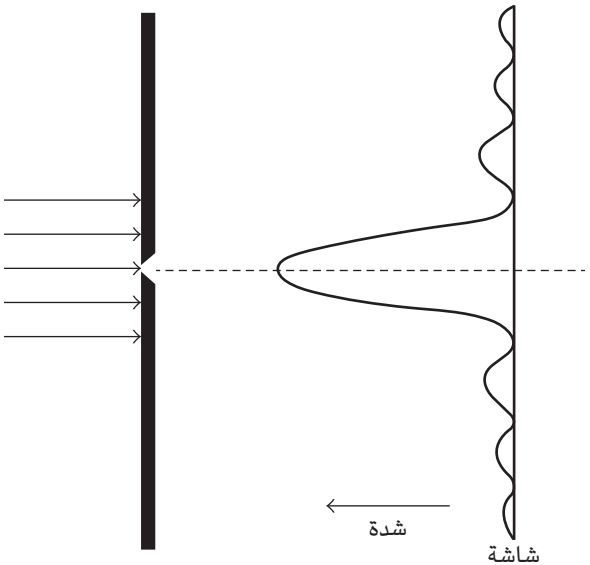
تجربة الثقبين

أحد أفضل المعلِّمين وأفضل المعروفين في ميكانيكا الكَمِّ على مدار العشرين سنة الماضية هو ريتشارد فاينمان من معهد كاليفورنيا للتقنية. وقد قدَّم مرجِعه المؤلَّف من ثلاثة أجزاء والمنشور في أوائل ستينيات القرن العشرين «محاضرات فاينمان في الفيزياء»، وهو مرجعٌ قياسي تُقارن به المراجع الأخرى للطلاب الجامعيين، وقد ألقى محاضراتٍ عامة في الموضوعِ نفسِه مثل تلك الحلقات في تليفزيون «بي بي سي» عام ١٩٦٥ التي نُشرت تحت عنوان «خاصية القانون الفيزيائي». وُلِد فاينمان سنة ١٩١٨، وكان في قمة عطائه كفيزيائي نظري في الأربعينيات من القرن العشرين؛ حيث كان منهمكًا في وضع معادلات نسخةِ الكَمِّ الخاصة بالكهرومغناطيسية، تحت اسم الكهربية الديناميكية للكَمِّ، وحصل على جائزة نوبل سنة ١٩٦٥ عن هذا الإنجاز. ومكانة فاينمان الخاصة في تاريخ نظريةِ الكَمِّ تجعله ممثِّلًا للجيل الأول للفيزيائيين الذين شبُّوا مع كل أسسِ ميكانيكا الكَمِّ، وأرسَوا كلَّ القواعد الأساسية. وكان على هايزنبرج وديراك أن يعملا في بيئةٍ متغيرة؛ حيث الأفكار الجديدة لا تتوالى بالصورة الصحيحة، ولا العلاقة المنطقية بين مفهومٍ وآخر

— كما في حالة الحركة المغزلية — تُلاحَظ بالضرورة على التو، أما جيل فاينمان فقد كانت كل أجزاء اللغز متاحةً لهم، ومن الممكن رؤية منطق ترتيبها لأول مرة، وقد لا يكون ذلك في لمحةٍ خاطفة، لكن بالتأكيد بعد قليل من التفكير والجهد الذهني. وهكذا فإن ما يجدُر الإشارة إليه أنه في حين كان باولي وأتباعه يفكِّرون — والموضوع ما زال ساخنًا — أن علاقات عدم اليقين هي المكان المناسب للبدء في مناقشة وتدريس نظريةِ الكَمِّ، توصَّل فاينمان وهؤلاء المعلمون في العقود الحديثة — الذين ينظرون إلى المنطق بأنفسهم بدلًا من إعادة إنتاج أفكار الأجيال السابقة — إلى نقطةِ بدايةٍ مختلفة. قال فاينمان في الصفحة الأولى من مرجِعه الخاص بمحاضراته والمخصَّص لميكانيكا الكَمِّ إن العنصر الأساسي في نظريةِ الكَمِّ هو تجربة الشق الطولي المزدوج. لماذا؟ لأن هذه «ظاهرة مستحيلة، مستحيلة بشكلٍ مطلق لتفسيرها بطريقةٍ كلاسيكية، وبها لبُّ ميكانيكا الكَمِّ. وفي الواقع فإنها تتضمَّن الشيء الوحيد الغامض ... والغرائب الرئيسية في كل ميكانيكا الكَمِّ.»

ومثل عظماء الفيزيائيين في الثلث الأول من هذا القرن، حاولت في كلِّ ما ذكرتُ سابقًا في هذا الكتاب أن أشرح أفكارَ الكَمِّ بمدلول الحياة اليومية. ولنبدأ الآن بالغموض المحوري بأن نزيح الضوء الوامض من خبرتنا اليومية بعيدًا بقدرِ المستطاع، وأن نشرح العالَم الواقعي على ضوء ميكانيكا الكَمِّ. ليس هناك شيء في خبرتنا اليومية يمكن أن نحاكيه في عالَمِ الكَمِّ، كما أن سلوك عالَمِ الكَمِّ ليس له أيُّ شبيه مألوف. ولا يعلم أيُّ إنسان كيف يسلك عالَمُ الكَمِّ، وكلُّ ما نعرفه أنه يسلك بتلك الطريقة. وهناك فقط قشتان يمكن التعلُّق بهما. الأولى هي أن كلًّا من الجسيمات (الإلكترونات) والموجات (الفوتونات) تسلك بالطريقةِ نفسها، فقواعد اللعبة متماسكة. أما القشة الثانية، وكما ذكرها فاينمان، فإن هناك شيئًا غامضًا واحدًا. فإذا اقتنعت بتجربة الشق الطولي المزدوج يكون أكثرُ من نصف المعركة قد حُسم؛ حيث إنه «وكما يبدو فإن أيَّ موقفٍ آخرَ في ميكانيكا الكَمِّ يمكن شرحه دائمًا بأن نقول: هل تذكر حالة التجربة ذات الثقبين؟ إنه الشيء نفسه.»[2]

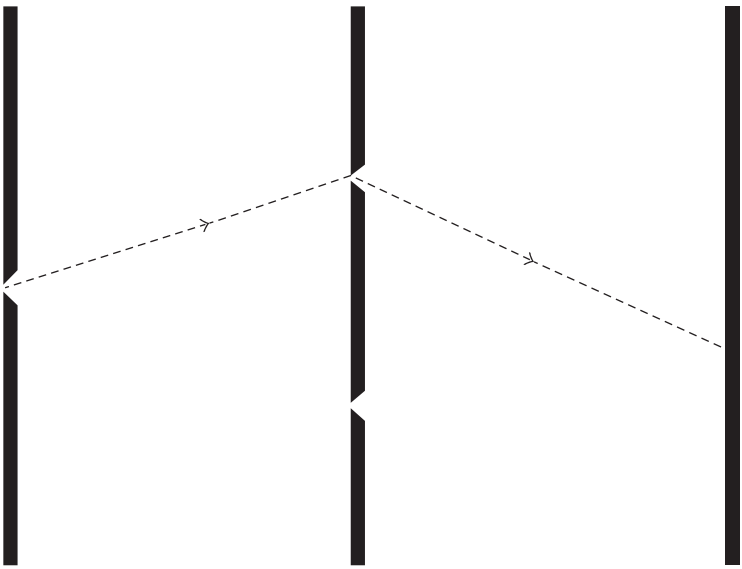
تتم التجربة على النحو الآتي. تخيَّل شاشةً من نوعٍ ما — ربما حائط — بها ثقبان صغيران. من الممكن أن يكونا شقَّين ضيقين كما في تجربة يونج الشهيرة للضوء — لكنهما صغيران — وقد يقوم بالمهمةِ نفسِها ثقبان مستديران صغيران. وعلى أحد جانبَي الحائط حائطٌ آخرُ به كشاف معيَّن. فإذا أجريت التجربة مع الضوء، فمن الممكن أن يكون الكشاف سطحًا أيضًا، يمكن عليه رؤية الضوء والحُزَم الداكنة، أو من الممكن أن يكون



شكل ٨-١: شعاع إلكتروني يمر خلالَ شقٍّ مفردٍ طولي ينتج عنه توزيع لأغلب «الجسيمات» التي تُشاهَد في خط مستقيم على امتداد الشق.

الكشاف لوحًا فوتوغرافيًّا، يمكن إظهار الناتج عليه ودراسته فيما بعد. وإذا تم العمل في وجود إلكترونات، فقد تبدو الشاشة مغطاةً بترتيبٍ مكوَّن من عددٍ كبير من كاشفات الإلكترونات، أو من الممكن تصوُّر استخدام كشاف متحرك على عجلٍ يمكن تحريكه كما نشاء لإيجاد عدد الإلكترونات التي تصل إلى بقعةٍ معينة على الشاشة. وليست التفاصيل مهمةً ما دامت هناك طريقةٌ ما لرصدِ ما يحدث على الشاشة. وعلى الجانب الآخر من الحائط المحتوي على الثقبين يوجد مصدر للفوتونات أو الإلكترونات أو أي شيء آخر. وقد يكون هذا المصدر مجرد مصباح أو قاذف إلكترونات مثل ذلك الذي يكوِّن الصورة على شاشة تلفزيونك، ومرة ثانية فإن التفاصيل غير ذات أهمية. ما الذي يحدث عند مرور هذه الأشياء خلال الثقبين لتصل إلى الشاشة؛ أيَّ نسق تصنع عندما تصل إلى الكشاف؟

أولًا: ابتعِد عن عالَمِ الكَمِّ للفوتونات والإلكترونات، وانظر إلى ما يحدث في عالَمنا اليومي. من السهل رؤية كيف تحيد الموجات عند مرورها خلال الثقوب عند استخدام



شكل ٨-٢: إلكترون أو فوتون يمر خلال أحد الشقين الطوليين «يجب» تبعًا لما هو متوقَّع أن يسلك بالطريقة نفسِها إذا مرَّ خلال شق طولي مفرد.

حوضٍ مليء بالماء ثم غمر النموذج فيه. والمصدر في هذه التجربة مجرَّد تصميم من نوعٍ ما يهتز إلى أعلى وإلى أسفل ليكوِّن موجاتٍ منتظمة. تنتشر الموجات خلال الثقبين مكوِّنةً نسقًا منتظمًا من القمم والقيعان على طول الكشاف نتيجةً لتداخل الموجات الآتية من كل ثقب. وإذا حجبنا أحدَ الثقبين على الحائط فإن ارتفاع الموجات على الشاشة سيتغيَّر بصورةٍ بسيطة منتظمة، تكون أعلى الموجات هي الأقرب للثقب عبر أقصر مسافة في الحوض، وتقل سَعة الموجات على كلٍّ من الجانبين. ويتكوَّن النسق نفسُه إذا حجبنا ذلك الثقبَ وفتحنا الذي كان مغلقًا في السابق. وتتناسب شدة الموجة، التي هي مقياسُ كمية الطاقة التي تحملها، مع مربَّع الارتفاع أو السَّعة، H^2، وتُظهِر نسقًا متماثلًا لكل ثقب على حدة. ولكن عندما يكون كلٌّ من الثقبين مفتوحًا فإن النسق سيصبح أكثرَ تعقيدًا. وتوجد بالفعل قمةٌ عالية ما بين الثقبين، ولكن الشدة تقلُّ كثيرًا على جانبي القمة؛ حيث إن مجموعتَي الموجات يلاشي بعضها بعضًا، ويتكرَّر تباعًا نسقٌ من ارتفاعات وانخفاضات

إذا تحرَّكنا على الشاشة. وقد وُجد رياضيًّا أنه بدلًا من أن تكون شدة الثقبين معًا هي حاصل جمعِ كلٍّ منهما على حدة (حاصل جمع المربعات)، نجد أن الشدة تساوي مربَّع حاصل جمْعِ سعتهما، وإذا رمزنا لسَعة الموجات بـ J وH فإن الشدة I لا تساوي $H^2 + J^2$، لكنها تصبح:

$$I = (H + J)^2$$

لتصبح:

$$I = H^2 + J^2 + 2HJ$$

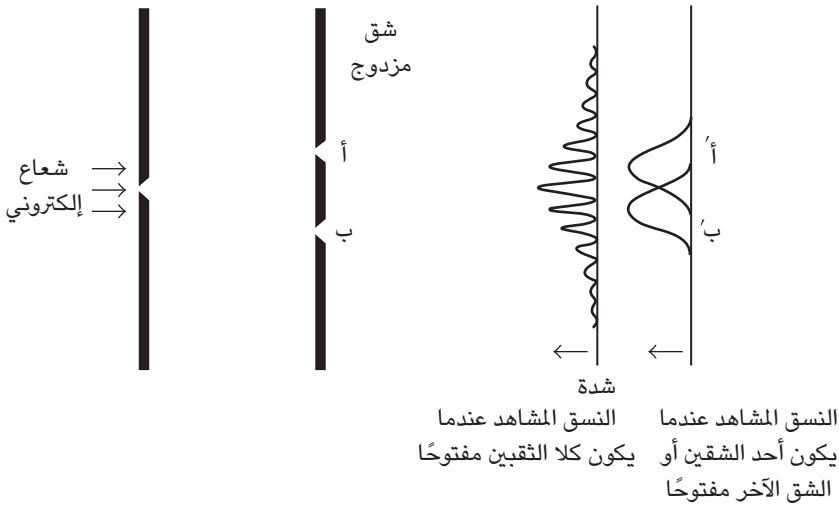
والحدُّ الإضافي هو المساهمةُ الراجعة إلى تداخُل الموجتين، وإذا سمحنا لقيم J وH أن تكون سالبة أو موجبة فإن ذلك يفسِّر بدقةٍ القممَ والقيعان لنسق التداخل.

وإذا قمنا بتجربةٍ من نفس النوع مستخدمين جسيماتٍ كبيرةً في حياتنا اليومية (تخيَّل فاينمان بغرابةٍ شديدةٍ تجربةً تتضمَّن مدفعًا رشاشًا يطلق طلقاته خلال الثقوب الموجودة على الحائط، وقد رُصَّت أجولةٌ مملوءة بالرمل عند الكشاف لالتقاط هذه الطلقات)، ولن نجد أيَّ «مدلول للتداخل»، وقد نجد بعد إطلاق عدد كبير من الطلقات خلال الثقوب أعدادًا مختلِفةً من الطلقات في الأجولة المختلفة. وعندما كان ثقبٌ واحد فقط هو المفتوح، فإن نسق انتشار الطلقات حول «الشاشة» ماثلَ تمامًا نسقَ توزيع الشدة لموجات الماء عندما كان ثقبٌ واحد مفتوحًا، ولكن عندما يكون كلا الثقبين مفتوحًا فإن نسقَ توزيع الطلقات في الأجولة يكون بالفعل مساويًا لمجموع التأثير الناتج من الثقبين المنفصلين، ومعظم الطلقات يوجد في المنطقة خلف الثقبين مباشرةً، ثم يتلاشى بهدوء دون وجودِ قممٍ أو قيعان نتيجةً للتداخل. وفي هذه الحالة، وباعتبار أن كل طلقة تمثِّل وحدةَ الطاقة، فإن توزيع الشدة يكون:

$$I = I_1 + I_2$$

حيث I_1 ترمز لـ H^2، وI_2 لـ J^2 في مثال الموجات. ولا يوجد مدلول للتداخل.

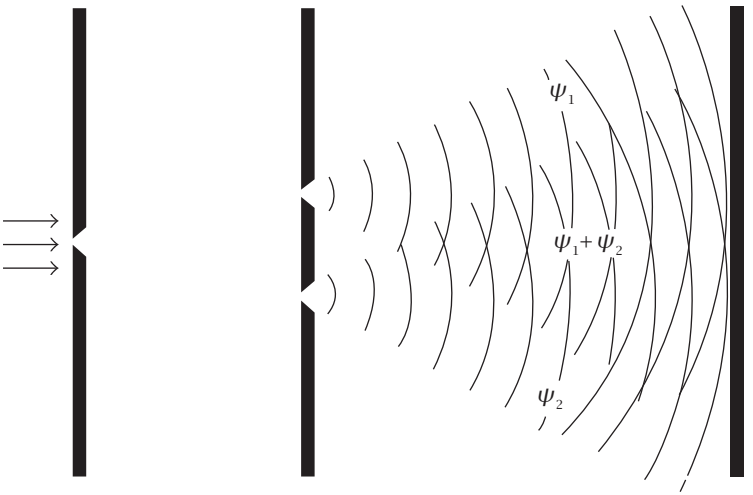
وأنت تعلم ما سيأتي بعد ذلك. تخيَّل الآن أننا أجرينا التجاربَ نفسَها باستخدام الضوء والإلكترونات. وفي الحقيقة أُجْرِيَت تجربةُ الشق الطولي المزدوج مرات عديدة باستخدام الضوء، ونتج عن ذلك أنساقُ حيود بالضبط كما في مثال الموجات. لم تُجرَ



شكل ٨-٣: توضِّح التجارب أن النسق المُشاهَد بالنسبة إلى الإلكترونات والفوتونات، عندما يكون كلٌّ من الثقبين «مفتوحًا» فإن هذا النسق لا يماثل حاصلَ جمْع الثقبين عند رؤيةِ كلٍّ منهما على حدة.

تجربةُ الإلكترون بالطريقةِ نفسِها — هناك مشكلات عند إجراء التجارب بالنسبة إلى الأشياء الصغيرة — لكن أُجريت تجاربُ مماثلة لتشتُّت أشعة الإلكترونات عن ذرات موجودة في بلورات. وعليه وللمحافظة على عدم تعقيد الأمور سأتمسَّك بالتجربة الخيالية للشق الطولي المزدوج مترجِمًا ذلك إلى لغةِ النتائج غيرِ المبهمة التي نحصل عليها من تجارب الإلكترونات الحقيقية. فالإلكترونات مثل الضوء تمامًا تعطي نسقًا للحيود.

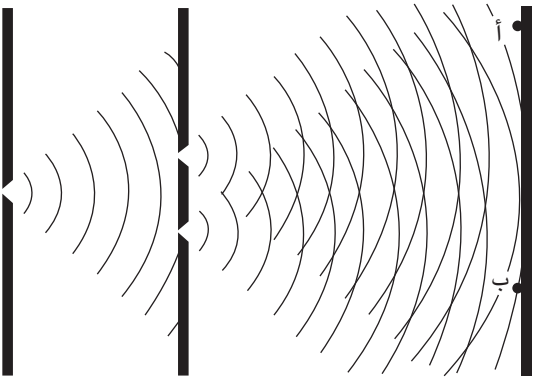
وماذا بعد؟ أليست هذه مجرد ازدواجية الجسيم/الموجة التي تَعلَّمنا التعايش معها؟ والعِبرة هنا أننا اعتدنا التعايش معها لأغراضِ كتابِ طهي الكَمِّ، ولكننا لم ننظر بتعمُّق إلى ما بها من تضمينات. وقد حان الوقت لنفعل ذلك. فدالة شرودنجر ψ، المتغير في معادلة الموجة الخاصة بها، لها علاقةٌ ما بالإلكترون (أو أي جسيم تصفه المعادلة). فإذا كانت ψ موجة، فليس من الغريب أنها تحيد وتنتج نسقَ تداخل، وإنها لخطوة بسيطة أن نبيِّن أن ψ تعمل كسعة الموجة، وأن ψ^2 تعمل كالشدة. ونسق حيود الإلكترون في تجربة الثقبين هو نسقٌ من ψ^2. وإذا كان في الشعاع إلكترونات عديدة — وهذا تفسير بسيط



شكل ٨-٤: يبدو أن «موجات الاحتمال» هي التي تقرِّر أين يتجه كلُّ «جسيم» في الشعاع، وأن موجات الاحتمال تتداخل مثلما تفعل موجات الماء بالضبط (راجع شكل ١-٣).

— فإن ψ^2 تمثِّل احتمالية وجود إلكترون في مكانٍ ما معيَّن. وتندفع آلاف الإلكترونات خلال الثقبين، ويمكن التنبؤ بالمكان الذي تصل إليه على أسسٍ إحصائية مستخدمين هذا التفسير للموجة ψ؛ وهذا هو إسهام بورن العظيم في عملية طهي الكَمِّ. لكن ما الذي يحدث لكل إلكترون مفرد؟

إننا نستطيع أن نفهم بسهولةٍ كافية أن الموجة — قد تكون موجة ماء — تستطيع المرور خلال الثقبين في الحاجز. فالموجة شيء منتشر. لكن الإلكترون ما زال يبدو كجسيم حتى لو صاحبته خصائصُ تشبه الموجة. ومن الطبيعي أن نعتقد أن كل إلكترون منفرد «لا بد» وبالتأكيد أن يمرَّ خلال أحد الثقبين. ومن الممكن أن نحاول تجريبيًّا حجْبَ أحد الثقبين، كلٌّ على حدة، دوريًّا. وعندما نفعل ذلك فإننا نحصل على النسق المعتاد على الشاشة لتجارب الثقب الأوحد. أما عند فتح الثقبين معًا، فإننا لن نحصل على النسق الناتج من جمع النسقين معًا كما في حالة طلقات الرصاص. وبدلًا من ذلك فإننا سنحصل على نسق التداخل كما في حالة الموجات، وسنظل نحصل على النسق نفسِه حتى لو أبطأنا إطلاق الإلكترونات للدرجةِ التي يمر فيها إلكترون واحد فقط كلَّ لحظة خلال منظومة



شكل ٨-٥: قواعد سلوك الموجة مطلوبةٌ لتحديد ظهور الإلكترون عند أ أو ب، إلا أنه عندما ننظر إلى أ أو ب فنحن إما أن نرى إلكترونًا — جسيمًا — أو لا نرى شيئًا. إننا لا نرى الموجة. ولا نستطيع القول ما الذي يفعله الإلكترون في الحقيقة أثناء مروره خلال الجهاز.

الثقبين. ونستطيع أن نخمِّن أن إلكترونًا واحدًا سيمر من خلال ثقب واحد ويصل إلى الكشاف ليأتي بعده إلكترون آخر وهكذا. فإذا انتظرنا صابرين ليمر عددٌ كافٍ من الإلكترونات فإن النسق الذي سيتكوَّن على شاشة الكشاف هو نسق حيود الموجات. ومن المؤكد أنه في حالة الإلكترونات والفوتونات إذا أجرينا ألف تجربة مماثلة في ألف معمل مختلِف وجعلنا جسيمًا واحدًا يعبر في كل تجربة، فسنجمع ألف نتيجة مختلفة، لكن بها كلِّها نسقٌ يتماشى مع الحيود تمامًا كما لو كنا قد جعلنا ألف إلكترون يعبرون معًا في واحدة من هذه التجارب. ويخضع الإلكترون المنفرد أو الفوتون المنفرد لقوانين الإحصاء عند عبوره من خلالِ أحدِ الثقبَين على الحائط؛ تلك القوانين التي لا تكون مناسبة إلا إذا «عُرف» أولًا أن الثقبَ الآخرَ مفتوح. وهذا هو الغموض المحوري في دنيا الكَمِّ.

نستطيع محاولةَ الخداع، وذلك بغلق أو فتح أحد الثقبين بسرعةٍ في حين يكون الإلكترون في حالةِ انتقال خلال الجهاز. ولن يفيد ذلك؛ فالنسق على الشاشة دائمًا هو «الصحيح» لحالة الثقوب عند لحظة مرور الإلكترون من خلالها. ويمكن أن نختلس النظرَ «لنرى» من أيِّ الثقبين يمر الإلكترون. وعند إجراء تجربة مماثلة لهذه التجربة تأتي النتيجة أكثرَ غرابة. لنتخيل تصميمًا يسمح لنا بتسجيلِ أيُّ الثقبين يعبر الإلكترون من خلاله، ويتركه ليعبر ويصل إلى شاشة الكشاف. وهنا تسلك الإلكترونات مسلكًا عاديًّا كأي

جسيمات في الحياة اليومية تحترم نفسها. ونرى الإلكترون دائمًا عند ثقب أو عند الآخر، وليس عند الثقبين أبدًا في آنٍ واحد. والآن فإن النسق الذي يتكوَّن على شاشة الكشاف سيكون مكافئًا تمامًا لنسق الرصاصات دون وجود أيِّ أثر للتداخل. وفي هذه الحالة، لا تعرف الإلكترونات ما إذا كان الثقبان مفتوحين أم لا فحسب، لكنها تعرف إذا كنا نراقبها أم لا، وعليه تُكيِّف من سلوكها وفقًا لذلك. ولا يوجد مثال أوضح من ذلك لتداخل المشاهد مع التجربة. وعندما نحاول النظرَ إلى موجة الإلكترون المنتشرة نجدها تنهار إلى جسيمٍ محدَّد، أما إذا كنا لا ننظر فإنها تتحرك هي نفسُها بكل الاحتمالات. وبمدلول احتمالات بورن فإن الإلكترون قد أصبح مضطرًّا، بناءً على قياساتنا، لاختيار مسارٍ واحد من احتمالات عديدة. فهناك احتمالٌ أكيد أن ينفُذ من أحد الثقبين، وهناك احتمالٌ مكافئ أن يتجه إلى الثقب الآخر، وينتج احتمال التداخل هذا نسق الحيود عند الكشاف. ولكن عندما نكتشف الإلكترون، يكون في مكان واحد مما يغيِّر من نسق الاحتمالية في المستقبل — بالنسبة إلى الإلكترون — ومعروف الآن بالتأكيد أيُّ الثقبين يمر منهما. أما إذا لم ينظر أحد إليه، فحتى الطبيعة نفسُها لا تعرف من أيِّ الثقبين مر الإلكترون.

الموجات المنهارة

ما نراه هو ما يُعتَد به. فأيُّ مشاهدة تجريبية من التجربة تكون صحيحة فقط في نطاق التجربة ولا يمكن استخدامها لتدلنا على تفاصيلِ أشياءَ لم نشاهدها. ونستطيع القول إن تجربة الشق الطولي المزدوج تدلنا على أننا نتعامل مع موجات، وبنفس القدْر بالنظر فقط إلى النسق على شاشة الكشاف يمكن استنتاج أن بالجهاز ثقبين وليس ثقبًا واحدًا. وكلُّ ما يعنينا هو أن الجهاز والإلكترونات والمشاهد كلَّها مكوِّنات التجربة. ولن نستطيع القول إن الإلكترون يمر من خلال أحد الثقبين دون النظر إلى الثقبين أثناء مروره (وهذه تجربة مختلفة). يترك الإلكترون مصدرَ القذف ويصل إلى الكشاف ويبدو أنه يمتلك كلَّ الإعدادات التجريبية بما فيها المشاهد. وكما شرح فاينمان لمشاهديه في تلفزيون «بي بي سي» سنة ١٩٦٥ أنه إذا كان لديك جهازٌ قادر على أن يدُلك من أي الثقبين سيمر الإلكترون، فإنك تستطيع القول إنه سيمر من خلال ثقب أو من خلال الآخر. ولكن إذا لم يوجد جهاز يحدِّد أيُّ الثقبين قد مرَّ منه الإلكترون فحينئذٍ ليس في الاستطاعة القول إنه مر من ثقبٍ دون الآخر. وقال: «إذا جزمت أن الإلكترون يمر من ثقب وليس من الآخر دون مشاهدة ذلك، فهذا ادعاء خاطئ.» أصبح مصطلح «شامل» كلمة طنانة أسيء

استخدامُها؛ الأمر الذي يجعلني مترددًا في استخدامها. إلا أنه ليس هناك تعبيرٌ مناسب أكثر لوصف عالَمِ الكَمِّ. إنه شامل، فيه الأجزاء ترتبط بشكلٍ ما بالكل. ولا يعني ذلك فقط كل إعدادات التجربة. ويبدو أن العالم يحتفظ بكل خياراته وكل احتمالاته متاحة لفترةٍ طويلة بقدرِ الإمكان. وأغرب شيء حول تفسير كوبنهاجن القياسي عن عالَمِ الكَمِّ هو أن رصد منظومة يرغمها على اختيار أحد الخيارات فقط، ويصبح هذا الخيار واقعًا.

إن تداخل الاحتمالات في أبسطِ تجارب الثقبين يمكن تفسيره على أن الإلكترون عند تركه مصدرَ القذف يتلاشى ويحل محلَّه مجموعةٌ من الإلكترونات الأشباح يسلك كلٌّ منها مسارًا مختلفًا حتى تصل إلى شاشة الكشاف. تتداخل تلك الأشباح بعضها مع بعض، وعند النظر إلى الطريقة التي تكتشف بها هذه الإلكترونات عن طريق الشاشة، نجد حينئذٍ آثار هذا التداخل حتى لو كنا نتعامل مع إلكترون حقيقي واحد كلَّ مرة. وعلى كلٍّ، فإن وفرة الإلكترونات الأشباح هذه تصفُ الموقف فقط عندما لا ننظر إلى ما يحدث، أما عندما ننظر فتختفي كل الأشباح ما عدا واحدًا فقط، وهذا الواحد من الأشباح يتجسَّد كإلكترون حقيقي. وبمدلول معادلة شرودنجر للموجة فكلٌّ واحد من الأشباح يعبِّر عن موجة، أو بالأحرى حزمة من الموجات التي اعتبرها بورن مقياسًا للاحتمالية. ويماثل مشاهدةُ شبح واحد يتبلور من بين إلكترونات عديدة — بمدلول تعبير الميكانيكا الموجية — اختفاءَ مجموعةِ موجات الاحتمالات ما عدا حزمةً واحدة من الموجات التي تصف إلكترونًا حقيقيًّا واحدًا. ويسمَّى هذا «انهيار الدالة الموجية»، ومع غرابة ذلك فإنه يقع في صلب تفسير كوبنهاجن الذي هو نفسه أساسُ طهي الكَمِّ. وعلى كلٍّ، فإن الأمر يدعو للشك، حيث إن العديد من الفيزيائيين ومهندسي الإلكترونيات وآخرين يستخدمون وهم سعداء كتابَ طهي الكَمِّ، مقدِّرين أن القواعدَ التي أثبتت أنه يمكن الاعتماد عليها في تصميم الليزر والحاسوب ودراسة المادة الجينية، تعتمد صراحةً على افتراض أن عددًا وافرًا من الجسيمات الأشباح تتداخل بعضها مع بعض طوال الوقت، وتندمج كلُّها في جسيمٍ وحيد حقيقي كحالة انهيار الدالة الموجية أثناء المشاهدة. وما هو أسوأ من ذلك، أنه في اللحظة التي نتوقَّف فيها عن مشاهدة الإلكترون أو أيِّ جسيمٍ آخرَ ننظر إليه فإنه ينشطر في الحال إلى عددٍ وافرٍ من الجسيمات الأشباح، يسلك كلٌّ منها مسارَه من الاحتمالات من خلال عالَمِ الكَمِّ. لا شيء حقيقي إلا عندما ننظر إليه، ويتوقَّف هذا الشيء عن أن يكون حقيقيًّا في اللحظة التي نتوقَّف فيها عن النظر إليه.

وربما تعود سعادة الناس الذين يستخدمون كتابَ طهي الكَمِّ إلى الراحة التي تأتيهم من تعوُّدهم على المعادلات الرياضية. ويشرح فاينمان الوصفة الأساسية ببساطة. «فالحدث» في ميكانيكا الكَمِّ هو مجموعة من الظروف الأولية والنهائية لا أكثر ولا أقل. يترك الإلكترون مصدرَ القذف من أحد طرفي الجهاز، ثم يصل هذا الإلكترون إلى كشَّافٍ معيَّن في الطرف الآخر من الثقوب، هذا حدث. وفي الأساس، فإن احتمال وقوع هذا الحدث هو مربَّع أحد الأعداد التي هي في الأساس دالة شرودنجر الموجية، ψ، فإذا كانت هناك أكثرُ من طريقة لوقوع هذا الحدث (كلا الثقبين مفتوح في التجربة)، عندئذٍ تكون احتمالية كلِّ حدث ممكن (احتمال وصول الإلكترون لكل كشافٍ اختير) تساوي مربَّع مجموع قيم ψ؛ ومن ثَم يكون هناك تداخُل. ولكن إذا نظرنا لنشاهد أيُّ الاحتمالات البديلة هو الذي يحدث بالفعل (النظر لنرى من أيِّ ثقب يمر الإلكترون) فهنا احتمال التوزيع هو حاصل جمْع مربَّع قِيم ψ، ويعني اختفاء مصطلح التداخل؛ وهو ما يعني انهيار الدالة الموجية.

الفيزياء مزعجة، لكن الرياضيات نظيفة وبسيطة، ومعادلاتها مألوفة لأي فيزيائي. وما دمتَ تتجنَّب السؤال عما تعنيه فليس هناك أيُّ مشكلة. ولو سألت لماذا العالَم على هذا الشكل، فإن الجواب حتى من فاينمان «ليس لدينا أي فكرة». ولو ظللت تصرُّ على صورةٍ فيزيائيةٍ لما يحدث لوجدتَ كلَّ الصور الفيزيائية تذوب في عالَمٍ من الأشباح تبدو فيه الجسيمات حقيقية فقط عندما ننظر إليها، وحتى خصائص مثل الزخم والموقع هي أشياء من صنْع المشاهدة. وليس من العجيب على الإطلاق أن نجد العديد من الفيزيائيين الأجلاء، ومن بينهم أينشتاين، يقضون العقودَ في محاولةِ إيجاد طرقٍ تدور حول هذا التفسيرِ لميكانيكا الكَمِّ. وقد باءت هذه المحاولات بالفشل، وهي المحاولات التي سنصفها بإيجاز في الفصل القادم. وكانت كل محاولة جديدة لإثباتِ عدمِ صحة تفسير كوبنهاجن تقوي أسسَ صورة عالَم أشباح الاحتمالات، وتمهِّد الطريقَ لما بعد ميكانيكا الكَمِّ، وتطوِّر صورةً جديدة للعالَم الشامل. وأساس هذه الصورة الجديدة هو التعبير الأقصى لمفهوم التكامل، لكن تظل هناك طلقةٌ أخيرة نعَضُّ عليها بالنواجذ قبل أن نتمكَّن من النظر في التضمينات.

قواعد التكامل

عادةً ما تمثِّل النسبيةُ العامة وميكانيكا الكَمِّ الانتصارين التوءمين للنظريات العلمية في القرن العشرين، وأن الكأس المقدَّسة للفيزيائيين اليوم هي التوحيد الحقيقي لهاتين

النظريتين في نظريةٍ عظمى واحدة. وتدُل مجهوداتهم بكلِّ تأكيد، كما سنرى، على نفاذِ بصيرةٍ بطبيعةِ الكون. ولكن يبدو أن هذه المجهوداتِ لا تأخذ في حُسبانها حقيقةَ أنه بالمنطق الصارم لا يمكن التوفيقُ بين هاتين الصورتين للعالَم.

وفي أول عرض لبور سنة ١٩٢٧ لِمَا أصبح معروفًا باسم تفسير كوبنهاجن، ركَّز على التناقضِ بين وصف العالَم من منطلقِ محاورِ الزمكان البحتة والسببية المطلقة من جهة، وبين صورةِ الكَمِّ التي يتداخل فيها المُشاهد ويصبح طرفًا في المنظومة التي يراها من جهة أخرى. وتمثِّل إحداثيات الزمكان الموقع، وتعتمد السببية على معرفةِ أين تتجه الأشياء بالضبط، وبصفة ضرورية معرفة زخمها. وتفترض النظريات الكلاسيكية أنك تستطيع معرفةَ الاثنين في آنٍ واحد، وتوضِّح ميكانيكا الكَمِّ أن الدِّقة في إحداثيات الزمكان تكون على حساب عدم اليقين من الزخم؛ ومن ثَم من السببية. ومن هذا المفهوم فإن النسبية العامة نظريةٌ كلاسيكية ولا يمكن اعتبارها مكافِئةً لميكانيكا الكَمِّ كأساس في وصف الكون. فإذا حدث وكان هناك تناقض بين النظريتين فلا بد من الرجوع إلى نظريةِ الكَمِّ لما بها من وصفٍ أفضلَ للعالَم الذي نعيش فيه.

ولكن ما العالَم الذي نعيش فيه؟ اقترح بور أن فكرة العالم المنفرد ذاتها ربما تكون مضلِّلة وقدَّم تفسيرًا آخرَ لتجربة الثقبين. ومن الطبيعي حتى في هذه التجربة البسيطة أن تكون هناك مسارات عديدة يمكن أن يختارها الإلكترون أو الفوتون من خلال الثقبين. لكن دعنا نتظاهر للتبسيط أن هناك احتمالين فقط؛ أي أن الجسيم يُمرَّر خلال الثقب أ أو الثقب ب. واقترح بور أن كل احتمال ربما يمثِّل عالَمًا مختلفًا. في أحد العالَمين يمر الجسيم خلال الثقب أ، وفي الآخر يمر خلال الثقب ب. إلا أن العالَم الحقيقي، العالَم الذي نعايشه، ليس بهذه البساطة على العموم. فعالَمنا هجينٌ من عالَمين محتملين يقابلان المسلكين اللذين يسلكهما الجسيم، ويتداخل كلُّ عالَم مع الآخر. وعندما ننظر لنرى أيُّ ثقب يمر خلاله الجسيم، يكون هناك عالَم واحد لأننا استبعدنا الاحتمالَ الآخر، وفي هذه الحالة لا يوجد تداخل. لم تكن الإلكترونات الأشباح هي تلك التي استحضرها بور من معادلاتِ الكَمِّ فقط بل كانت أيضًا الوقائع الشبحية وعوالم الأشباح التي توجد فقط عندما لا ننظر إليها. تخيَّل هذا المثالَ البسيطَ وقد طُوِّر ليشمل عددًا وافرًا من الوقائع الشبحية، وليس العالَمين المتحدَين بتجربة الثقبين فقط؛ تلك الوقائع التي تقابل الوسائلَ العديدة التي تستطيع فيها كلُّ منظومةِ كَمٍّ في كافة أنحاء الكون أن «تختار» كيف تقفز: كل دالة موجية محتملة لكل جسيم محتمل، وكل قيم عدد ديراك q. اربط هذا بلغز أن الإلكترون

عند الثقب أ يعلم ما إذا كان الثقب ب مفتوحًا أم لا، ومن السهل أن نرى لماذا هوجِم تفسيرُ كوبنهاجن بهذا العنف من خبراءَ يفهمون أعمقَ تضميناته، في حين وجد خبراء آخرون، مع تشوشهم بهذه التضمينات، أن التفسيرات ملزمة، وفي حينِ لم تعبأ مجموعةٌ أخرى أقل شراسة، بالتضمينات العميقة، واستمرت بسعادة في استخدام كتابِ طهي الكَمِّ والدوال الموجية المنهارة، وكل ذلك لإحداث تحوُّل للعالَم الذي نعيش فيه.

هوامش

(1) This does make for a delightful coincidence, though. According to this way of approaching quantum theory, the most important things are the **p**'s and **q**'s of the uncertainty relation. Everyone knows the old expression "mind your **p**'s and **q**'s," which means "take care". The expression probably comes from an admonition to children learning the alphabet, or to printers' apprentices working with movable type, to watch out for the fiddly bits on the tails of these letters (*Brewer's Dictionary of Phrase and Fable*, Cassell, London, 1981), but it could now be taken as the motto of quantum theory. As far as I know, the choice of these letters in the quantum equations was, however, no more than a coincidence.

(2) *The Character of Physical Law*, page 130.

الفصل التاسع

المفارقات والاحتمالات

قام كلُّ هجوم على تفسيرِ كوبنهاجن بتعزيزِ مكانته أكثر. وعندما حاول مفكِّرون من أمثال أينشتاين إيجادَ عيوبٍ في النظرية، واستطاع المدافعون عنها التفنيد والرد على دفوع المهاجمين، خرجت النظرية أقوى بعد تلك المحاكمات. ومن المؤكد أن تفسير كوبنهاجن «صحيح» من جهةِ أنه قابل للاستخدام، وأي تفسير آخر لقواعدِ الكَمِّ لا بد أن يتضمَّن تفسير كوبنهاجن كرؤيةٍ قابلة للاستخدام، وأنها تُمكِّن التجريبيين من التنبؤ بنتائج تجاربهم على الأقل بالمعنى الإحصائي — وتُمكِّن المهندسين من تصميمِ أنظمةِ الليزر والكمبيوتر وخلافه. وليس هناك داعٍ للخوض في كل العمل الأساسي الذي أدَّى إلى تفنيد جميع الأطروحات المضادة لتفسير كوبنهاجن؛ فقد اضطلع بهذه المهمة آخرون بشكلٍ جيد. لكن ربما يكون من أهم الآراء المهمة التي ذكرها هايزنبرج سابقًا سنة ١٩٥٨ في كتابه «الفيزياء والفلسفة». حيث ركَّز هايزنبرج على أن كل المقترحات المضادة «مجبرة على أن تضحِّي بالتماثل الأساسي لنظريةِ الكَمِّ (مثلًا بالتماثل بين الموجات والجسيمات أو بين الموضع والسرعة). وعليه فمن الممكن جدًّا أن نقترح أنه لا يمكن تجنُّبُ تفسيرِ كوبنهاجن إذا ظلت خصائص التماثل ... سمةً أساسية في الطبيعة، وأن كل تجربة تُجرى حتى الآن تعضِّد هذه الرؤية.»

وقد أُدخل تحسينٌ على تفسير كوبنهاجن (ليس هجومًا ولا أطروحة مضادة) ما زال يتضمَّن هذا التماثل الأساسي، وأحسن صورة يمكن تقبُّلها لواقعِ الكَمِّ ستُشرح في الفصل الحادي عشر. وعلى كلٍّ، يكاد يكون غريبًا أن يغفل هايزنبرج عن ذكْرِ ذلك في كتابه المنشور سنة ١٩٥٨، حيث إن تلك الصورة الجديدة كانت قد ظهرت في ذلك الوقت بواسطةِ طالبِ دكتوراه في الولايات المتحدة. وعلى كلٍّ وقبل التطرُّق لهذا، من الصواب

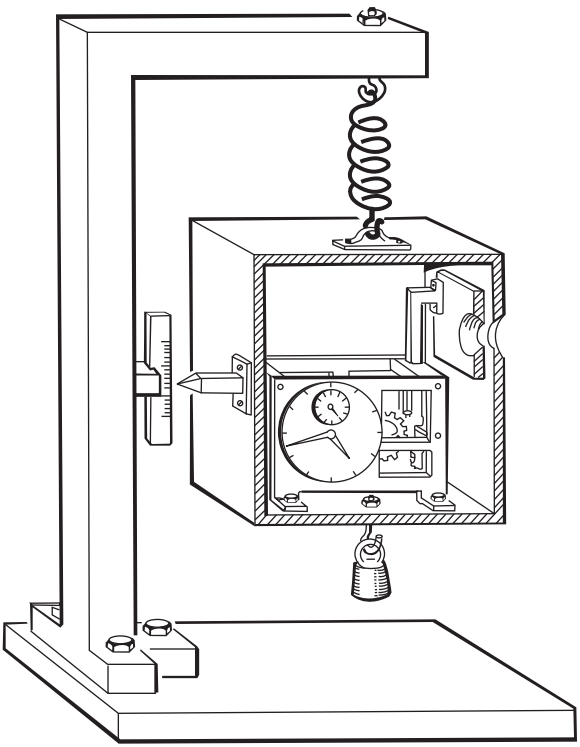
أن نقتفي أثرَ مسار اندماج النظرية بالتجربة الذي أُنجز بداية عام ١٩٨٢، وأرسى دون أدنى شكٍّ دقةَ تفسيرِ كوبنهاجن كرؤية قابلة للاستخدام في الواقعِ الكَمِّي. وتبدأ القصة بأينشتاين وتنتهي في معملٍ للفيزياء في باريس بعد ٥٠ عامًا، وهي واحدة من أعظم القصص في العالم.

الساعة في الصندوق

بدأ الجدل الكبير بين بور وأينشتاين حولَ تفسيرِ نظريةِ الكَمِّ عام ١٩٢٧ في مؤتمر سولفاي الخامس واستمر حتى وفاة أينشتاين عام ١٩٥٥. وراسل أينشتاين بورن حول الموضوع، ومن الممكنِ التقاطُ جانبٍ من هذا الجدل من «خطابات بورن-أينشتاين». كان محورُ هذا الجدل حول سلسلةٍ من الاختبارات الخيالية للتنبؤ بتفسير كوبنهاجن، ليست تجاربَ حقيقيةً أُجريت في المعمل، لكنها «تجارب ذهنية». حاول أينشتاين في هذه اللعبة أن يفكِّر في تجربةٍ يمكن فيها نظريًّا قياسُ شيئين مكمِّلين في اللحظة نفسِها — مثل موقع وكتلة الجسيم أو طاقته — بدقةٍ عند زمنٍ محدَّد، وهكذا. وعندئذٍ حاول بور وبورن أن يُظهِرا أن تجربةَ أينشتاين الذهنية لا يمكن ببساطة إجراؤها بالطريقة المطلوبة لسحْب البِساط من تحت أقدامِ النظرية. وتجربة «الساعة في الصندوق» هي أحد الأمثلة التي ستبيِّن كيف أُجريت اللعبة.

قال أينشتاين: تخيَّل صندوقًا به ثقبٌ في أحد جدرانه، مغطًّى بحاجزٍ يمكن فتحُه ثم إغلاقه ثانية بتحكُّمٍ من ساعةٍ داخل الصندوق. وبجانب الساعة وآلية فتح وإغلاق الثقب، يكون الصندوق مليئًا بالإشعاع. جهِّز التجربة بحيث يُفتح غطاء الثقب عند لحظة معينة حُدِّدَت مسبقًا بواسطة الساعة ليسمح بمرور فوتون واحد ليهرب قبل أن يغلق ثانية. زنِ الصندوق في البداية ثم اسمح للفوتون بالهرب، ثم زنِ الصندوق ثانية. ولأن الكتلة هي طاقة، فالفرق بين الوزنين سيدُلنا على طاقة الفوتون الذي هرب. وعليه فإننا — من حيث المبدأ — سنعرف كميةَ طاقة الفوتون بالضبط والزمن الذي استغرقه الفوتون للمرور خلال الثقب، داحضين بذلك مبدأ عدم اليقين.

فاز بور ذلك اليوم، كما كان يحدث دائمًا في مثل هذه المناقشات، عندما نظر إلى التفاصيل العملية لإمكانية إجراء القياسات. فلا بد من وزن الصندوق مما يتطلَّب تعليقه بواسطة زنبركٍ مثلًا، واقعٍ تحت تأثير مجال الجاذبية. وقبل أن يهرب الفوتون



شكل ٩-١: تجربة الساعة في الصندوق. المعدات المطلوبة لجعل التجربة قابلة للإجراء عمليًّا (أوزان، وزنبركات، وغيرها) تجعل من المستحيل دائمًا إزاحةُ عدم اليقين من قياس الطاقة والزمن معًا (انظر المتن).

من الصندوق يسجِّل الشخص الوهمي الذي يُجري التجربة موقع المؤشر المثبت بقوة على المقياس. وبعد أن يهرب الفوتون يمكن لهذا الشخص من حيث المبدأ أن يضيف أوزانًا للصندوق ليعيدَ المؤشر إلى ما كان عليه. ويتضمَّن هذا نفسُه علاقاتِ عدم اليقين. ويمكن تحديد موقع المؤشر في حدودٍ وصفتها علاقاتُ هايزنبرج، وهناك عدمُ يقين في زخم الصندوق مرتبط بعدم اليقين هذا في موضع المؤشر. فكلما زادت درجة الدقة في قياس وزن الصندوق زاد عدم اليقين لكل المعرفة الهامة لزخمه. وحتى إذا حاولتَ إعادةَ الموقف إلى ما كان عليه بإضافةِ أوزان صغيرة للصندوق ليعودَ الزنبرك إلى موضعه

الأصلي، وحساب الوزن الزائد لتغيير طاقة الفوتون الهارب، فإنك لن تستطيع أبدًا فعْلَ شيءٍ أفضلَ من اختزال عدم اليقين إلى الحدود المسموح بها في علاقة هايزنبرج، وفي هذه الحالة $\Delta E \Delta t > \hbar$.

وتوجد هذه التفاصيل وتفاصيل تجاربَ ذهنيةٍ أخرى تضمَّنتها مناقشاتُ أينشتاين-بور في كتاب أبراهام باي «خفي هو الرب» ... أكَّد باي أنه ليس هناك شيء غريب في إصرار بور على ذكْر الوصف الكامل والتفصيلي للتجارب الخيالية، وفي هذه الحالة تُستخدم صواميل ومسامير لتثبيتِ إطارِ الميزان في موضعه، والزنبرك الذي يسمح بقياس الكتلة لا بد أن يسمح للصندوق بالحركة، وبإضافة الأوزان الصغيرة الضرورية، وهكذا، ولا بد من تفسير نتائج كل هذه التجارب بمدلول مصطلحات اللغة الكلاسيكية؛ لغة الواقع اليومي. ومن الممكن تثبيت الصندوق في مكانه تمامًا، وعليه فلن يكون هناك عدمُ يقين حول الموقع، لكن سيكون من المستحيل قياسُ التغير في الكتلة. وتنشأ معضلةُ عدمِ يقينِ الكَمِّ لأننا نحاول أن نعبِّر عن الأفكار الكَمِّية بلغة حياتنا اليومية، ولذلك أصرَّ بور على استخدام المسامير والصواميل في تجاربه.

مفارقة أينشتاين وبودولسكي وروزين

تقبَّل أينشتاين انتقاداتِ بور لهذه التجربة ولتجاربَ ذهنيةٍ أخرى، وفي أوائل ثلاثينيات القرن العشرين تحوَّل أينشتاين إلى نوعٍ جديد من الاختبارات الخيالية لقواعدِ الكَمِّ. كانت الفكرة الأساسية لهذا المدخل الجديد هي استخدام معلومات تجريبية لجسيم واحد لاستنتاجِ خصائصَ مثل الموضع والزخم لجسيم آخر. ولم يُحَل هذا النوع من الجدل قط في حياة أينشتاين، ولكن جرى اختباره بنجاحٍ الآن، ليس عن طريق التجارب الفكرية المحسنة، بل عن طريقِ تجاربَ حقيقيةٍ في المعمل. ومرة أخرى يفوز بور ويخسر أينشتاين.

كانت حياة أينشتاين الشخصية في السنوات الأولى من ثلاثينيات القرن العشرين غيرَ مستقرة. فكان عليه أن يغادر ألمانيا، خوفًا من إدانته من قِبَل النظام النازي. وبحلول سنة ١٩٣٥ كان قد استقر في برينستون، وفي ديسمبر سنة ١٩٣٦ ماتت زوجته الثانية إلسا بعد صراعٍ طويلٍ مع المرض. واصل أينشتاين مع كل هذا الاضطراب مناوشاته حول تفسيرِ نظريةِ الكَمِّ، مع أنه هُزم بدفوع بور، إلا أنه لم يقتنع في قلبه بأن تفسيرَ كوبنهاجن وملحقاته من عدم اليقين وغياب السببية الصارمة لها الكلمة الأخيرة كوصف صحيح

للعالم الواقعي. وقام ماكث جامر بوصف الالتواءات والانثناءات لما يدور بخَلد أينشتاين حول هذا الموضوع باستفاضةٍ في كتاب «فلسفة ميكانيكا الكَمِّ». التأم العديد من الخيوط في سنتي ١٩٣٤ و١٩٣٥ عندما عمل أينشتاين مع بوريس بودولسكي وناثان روزين في بحثٍ عرضوا فيه ما أصبح يُعرف بعنوان «مفارقة أينشتاين وبودولسكي وروزين» مع أن هذا البحث لا يصفُ في الواقع أيَّ تناقض على الإطلاق.[1]

كانت نقطةُ الجدل، وفقًا لأينشتاين ومساعديه، أن تفسير كوبنهاجن لا بد أن يكون منقوصًا، ولا بد من وجودِ شيءٍ ما يجعل عمل الساعة التي تحرِّك الكون مستمرة، وهذا فقط هو ما يعطي الانطباع بعدم اليقين وعدم التنبؤ على المستوى الكَمِّي خلال التغيرات الإحصائية.

قال أينشتاين وبودولسكي وروزين: تخيَّل جسيمين يتداخل كلٌّ منهما مع الآخر ثم يبتعدان أحدهما عن الآخر، ولا يتداخلان مع أي شيءٍ آخرَ إلى أن يقرِّر الشخص الذي يُجري التجربةَ فحصَ أحدِهما. ولكل جسيم زخمٌ خاص به، ويقع كلٌّ منهما في موقعٍ ما في الفضاء، وحتى بالنسبة إلى قواعدِ نظريةِ الكَمِّ فإنه مسموحٌ لنا بقياس الزخم الكلي للجسيمين معًا بدقه، بالإضافة إلى المسافة بينهما عندما كانا قريبين أحدهما من الآخر. وعندما نقرِّر قياسَ الزخم لأحدهما بعد فترةٍ طويلة فإننا نعلم تلقائيًّا ما يجب أن يكون عليه زخمُ الجسيم الآخر؛ حيث إن المجموع يجب ألا يتغيَّر. وبدلًا من ذلك نستطيع قياسَ الموقع الدقيق للجسيم الأول، وبنفس الأسلوب نستنتج موقعَ الجسيم الآخر. والآن قد ندفع بأن القياسات الفيزيائية لزخمِ الجسيم أ تُدمِّر معرفةَ موقعه الخاص، ومن ثم لن نستطيع أن نعرفَ موقعَه بالضبط، وكذلك بالمثل، فالقياسات الفيزيائية لموقع الجسيم أ تتسبَّب في اضطراب زخمه، الذي سيظل غيرَ معلوم، ولكن الأمر قد يبدو مختلفًا تمامًا لأينشتاين ورفاقه ليدفعوا بأن حالةَ الجسيم ب تعتمد على أي من القياسين نختار أن نُجري على الجسيم أ. كيف للجسيم ب أن «يعرف» هل يجب أن يكون له زخم محدَّد بدقة أو موقع محدَّد بدقة؟ ويبدو في عالمِ الكَمِّ أن إجراء قياسات على جسيم «هنا» يؤثِّر على شريكه «هناك»، وهذا يخالف السببية، وهو «الاتصال» التلقائي عبر الفضاء، وهو شيءٌ ما يُدْعى «الفعل عن بُعد».

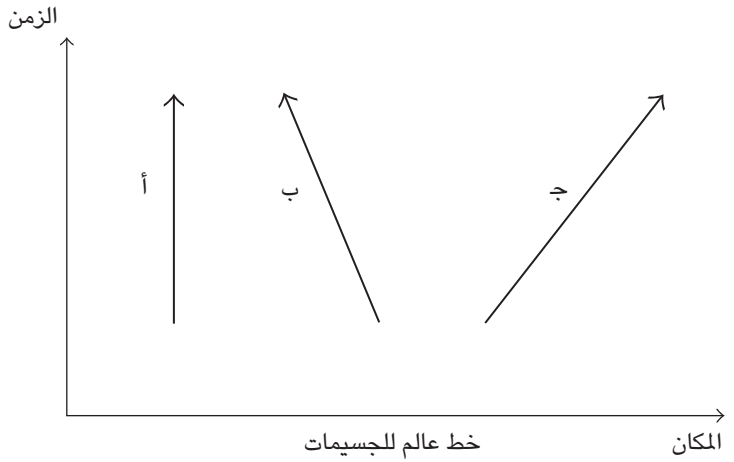
انتهى بحث أينشتاين وبودولسكي وروزين بأنه إذا تقبَّلنا تفسيرَ كوبنهاجن، فإنه «يجعل واقعية [الموقع والزخم للنظام الثاني] تعتمد على عملية القياس التي أُجريت على النظام الأول، الأمر الذي لن يؤثِّر في النظام الثاني بأي شكل. ولا يوجد تعريف معقول

للواقعية نتوقَّع أن يسمح بذلك.[2] ويوضِّح هذا أين حادَ ذلك الفريق عن زملائهم وعن كل مدرسة كوبنهاجن. لم يعترض أحدٌ على منطق المناقشة، لكنهم اعترضوا على ما يكوِّن تعريفًا «معقولًا» للواقعية. استطاع بور ورفاقه أن يتعايشوا مع واقعيةٍ ليس فيها لموقعِ الجسيم الثاني وزخمه معنًى موضوعيٌّ إلى أن يُقاسا بصرفِ النظرِ عمَّا تم على الجسيم الأول. وليس هناك من شك أنه لا بد من الاختيار بين الواقعية الموضوعية وعالمِ الكَمِّ. لكن ظلَّ أينشتاين ضمن أقليةٍ تتشبَّث بالواقع الموضوعي وترفض تفسيرَ كوبنهاجن.

لكن أينشتاين كان رجلًا شريفًا ومستعدًّا دائمًا لتقبُّل الأدلة التجريبية المقنعة. ولو قُدِّر له أن يعيش ليرى الاختباراتِ التجريبيةَ الحديثة التي بيَّنت بجلاءٍ خطأَ تأثير أينشتاين وبودولسكي وروزين، لمالَ إلى الاعتراف بخطئه. فالواقعية الموضوعية ليس لها مكان في الوصف الأساسي للعالَم، لكن الفعل عن بُعد أو اللاسببية لها مثل هذا المكان. ولذلك فإن التحقُّق التجريبي من الأهمية بحيث يستحِقُّ أن نخصِّص له فصلًا قائمًا بذاته. ولكن أولًا، يجب أن نلقي نظرةً على بعض الاحتمالات المتناقضة الموروثة في قواعدِ الكَمِّ؛ الجسيمات التي تسافر إلى الوراء في الزمن، وأخيرًا قطة شرودنجر الشهيرة نصف الميتة.

السَّفر عبر الزمن

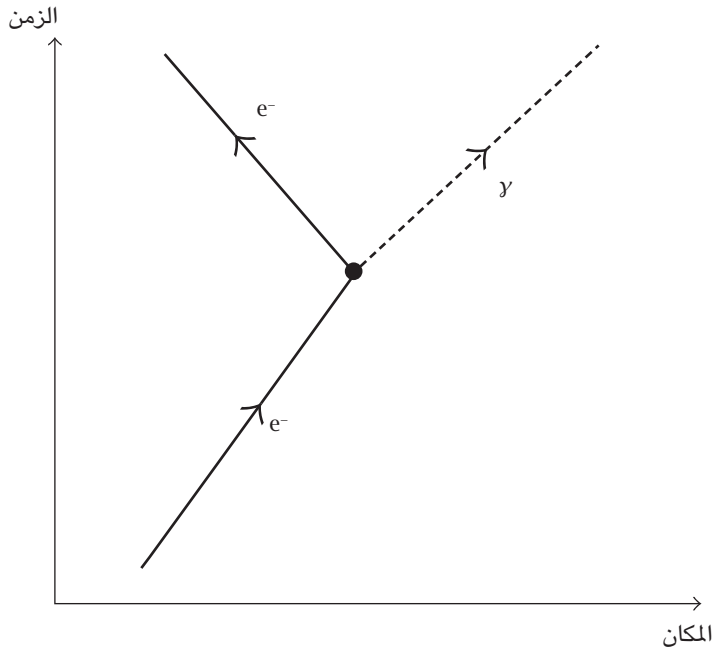
غالبًا يستخدم الفيزيائيون أداةً بسيطة لتمثيل حركة الجسيمات في الزمان والمكان مثل قطعةٍ من الورق أو سبورة. والفكرة ببساطة هي تمثيل سريان الزمن في اتجاهِ أعلى الصفحة من أسفل إلى أعلى والحركة في الفضاء عبر الصفحة، ويقلِّص هذا الأبعادَ الفراغية الثلاثة في بُعدٍ واحد، لكن ينتج عنه نسقٌ مألوف توًّا لأي إنسان تعامل مع الشكل البياني حيث يعبَّر عن الزمن بمحور y والفضاء بمحور x. ظهرت هذه الأشكال البيانية للزمكان كأداة لا تقدَّر بثَمن للفيزياء الحديثة في النظرية النسبية، التي يمكن استخدامُها لتمثِّل الكثيرَ من غرائب معادلات أينشتاين بمصطلحاتٍ هندسية، تكون في بعض الأحيان أسهلَ في التناول، وغالبًا تكون أسهلَ في الفهم. ولقد استُخدِمت في فيزياء الجسيمات بواسطة ريتشارد فاينمان في الأربعينيات من القرن العشرين، وفي هذا السياق عادةً تسمَّى «أشكال فاينمان»؛ في عالمِ الكَمِّ للجسيمات يمكن الاستعاضةُ عن تمثيل الزمان والمكان بمدلولِ الزخم والطاقة، وهو ما يناسب أكثرَ عند التعامل مع التصادمات بين الجسيمات، لكنني سألتزم هنا بوصف الزمكان البسيط.



شكل ٩-٢: حركة جسيم خلال الزمكان والمكان يمكن تمثيلها كـ «خط عالم».

ويمثِّل الخط في شكل فاينمان مسارَ الإلكترون. فالإلكترون الذي يقبع في مكانه ولا يتحرك أبدًا يعطي خطًّا يتحرك إلى أعلى الصفحة معبِّرًا عن حركةٍ في اتجاه الزمن فقط، أما الإلكترون الذي يغيِّر من مكانه ببطء، والذي يتحرك كذلك مع سريان الزمن فيمثِّله خطٌّ بزاويةِ ميلٍ ضئيلة بالنسبة إلى الخط الرأسي، لكن الإلكترون الذي يتحرك بسرعة فإنه يكوِّن زاويةً أكبرَ مع «خط العالم» لجسيمٍ ثابت. ويمكن أن تكون الحركة في الفراغ في أيٍّ من الاتجاهين اليسار أو اليمين، وربما يكون الخط هنا متعرجًا إذا حادَ الإلكترون نتيجةَ التصادم مع جسيماتٍ أخرى. ولكن في عالَمنا اليومي أو في أشكال عالم الزمكان البسيط في النظرية النسبية فإننا لن نتوقَّع لخطِّ العالَم أن يرجع للخلف ويتقدَّم إلى أسفل الصفحة؛ لأن هذا سيعني التحرُّك إلى الوراء في الزمن.

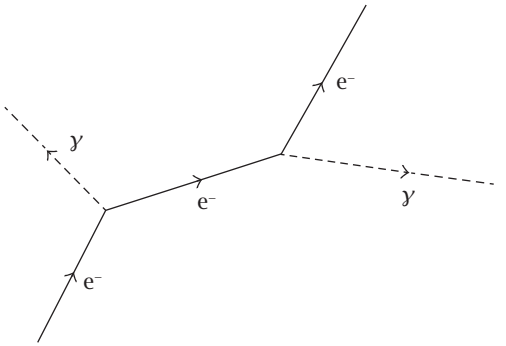
وإذا التزمنا بالإلكترون كمثال للتعامل نستطيع أن نرسم شكل فاينمان البسيط، مبينًا كيف يتحرَّك الإلكترون عبر الزمان والمكان ويتصادم بفوتون ويغيِّر من اتجاهه، وعندئذٍ يبعث بفوتون ويرتد في اتجاهٍ آخر. والفوتونات في هذا الوصف لمسلك الجسيم لها أهمية عظمى لأنها تعمل كحاملة للقوة الكهربية. فعندما يقترب إلكترونان أحدهما من الآخر فإنهما يتنافران ويتحرَّكان بعيدًا أحدهما عن الآخر مرةً ثانية، وذلك بسبب



شكل ٩-٣: يتحرَّك الإلكترون خلال المكان والزمان ويُطلِق فوتونًا (أشعة γ) ويرتدُّ بزاوية.

القوة الكهربية بين الشحنات المتماثلة. ويعرض شكل فاينمان مثلَ هذا الحدث: خطًّا عالَمٍ للإلكترون يتقابلان، فيترك عندها الإلكترون فوتونًا (الذي يرتد مبتعدًا) ويمتصُّه إلكترون آخر (الذي يندفع في الاتجاه الآخر).[3] والفوتونات هي حاملة للمجال الكهربي، لكنها تستطيع القيام بما هو أكثر من ذلك. وقد بيَّن ديراك أن الفوتون الذي يحمل طاقةً كافية يمكن أن يُنتِج إلكترونًا وبوزيترونًا من الفراغ محوِّلًا طاقته إلى كتلتهما. وسيصبح البوزيترون (ثقب إلكترونٍ ذي طاقة سالبة) قصيرَ العمر؛ لأنه من المتوقَّع أن يلتقي بإلكترون في الحال ويتلاشى الاثنان في شكل جرعة طاقة إشعاعية، وللتبسيط يمكن تمثيل هذه الطاقة بفوتون مفرد.

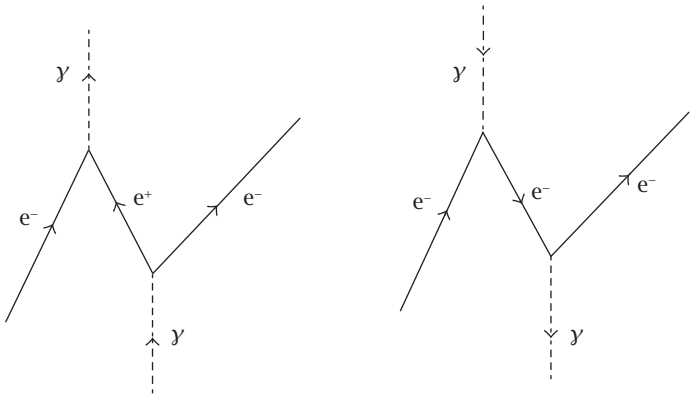
ومرةً أخرى، يمكن تمثيل التداخل الكلي ببساطة في شكل فاينمان. فالفوتون الذي يرحل عبْر الزمان والمكان يكوِّن تلقائيًّا زوجًا من إلكترون وبوزيترون، ويتحرك الإلكترون



شكل ٩-٤: جزء من تاريخ الإلكترون متضمن التداخل مع زوج من الفوتونات.

في مساره، ويقابل البوزيترون إلكترونًا آخر ويتلاشيان، ويترك الساحة فوتون آخر. لكن الاكتشاف الدرامي الذي توصَّل إليه فاينمان سنة ١٩٤٩ في وصف الزمكان، هو أن البوزيترون المتحرِّك إلى الأمام في الزمان يكافئ تمامًا الوصفَ الرياضي لتحرُّك إلكترون إلى الخلف في الزمان على مسارِ شكلِ فاينمان نفسِه. ومع أن الفوتونات هي نفسُها جسيماتٌ مضادة، إلا أنه ليس هناك اختلافٌ في هذا الوصفِ بين فوتون يتحرَّك إلى الأمام في الزمان، وآخرَ يتحرَّك إلى الوراء في الزمان. ولكل الأغراض العملية يمكن أن نمحو أسهم مسار الفوتون في الشكل ونعكس مسار البوزيترون لنجعله إلكترونًا. ويدُلنا شكل فاينمان نفسُه على قصة أخرى، عندما يتقدَّم إلكترون عبر الزمان والمكان ويقابل فوتونًا عالي الطاقة، فإنه يمتصه ثم يتشتَّت إلى الخلف في الزمان حتى يطلق فوتونًا نشطًا آخرَ ويرتدُّ بطريقةٍ ما إلى الأمام في الزمان مرة أخرى، وبدلًا من ثلاثة جسيمات، إلكترونين وبوزيترون في رقصة معقَّدة، يصبح لدينا جسيمة واحدة، إلكترون يتحرَّك بشكلٍ متعرِّج عبر الزمان والمكان متصادمًا مع الفوتونات هنا وهناك خلال مساره.

وبمدلول هندسة الأشكال فإن هناك تشابهًا واضحًا بين مثال الإلكترون الذي يمتص فوتونًا ذا طاقةٍ منخفضة ويغيِّر من مساره قليلًا ثم ينبعث منه فوتون ويغيِّر من اتجاهه مرةً أخرى، وبين الإلكترون الذي يتشتَّت بعنفٍ عند التداخل مع فوتون يتحرَّك إلى الوراء في الزمن أثناء فترةٍ معينة من حياته. وهناك خطٌّ متعرِّج في كلتا الحالتين له ثلاثةُ مقاطع مستقيمة وزاويتان. والاختلاف هنا فقط أنه في الحالة الثانية تكون الزوايا أكثرَ حدةً عنها في الحالة الأولى. وكان جون ويلر أولَ مَن امتلك البصيرة ليقول إن النمطين المتعرِّجين

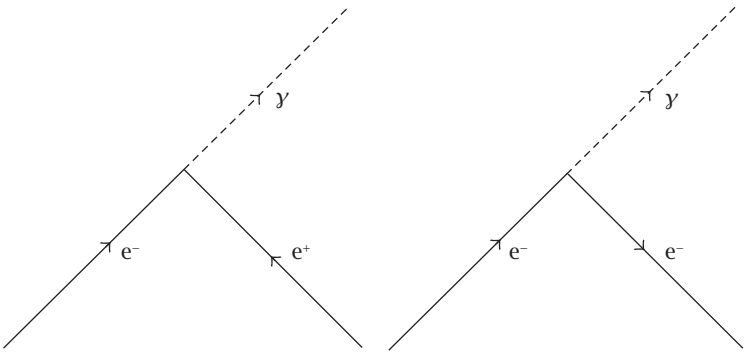


شكل ٩-٥: إلى اليسار تنتج أشعةُ جاما زوجًا من إلكترون/بوزيترون، ويقابل البوزيترون فيما بعدُ إلكترونًا ويتلاشيان معًا ويكوِّنان فوتونًا آخر. وإلى اليمين، يتحرك إلكترون منفرد بشكلٍ متعرج عبر الزمكان ويتداخل مع فوتونين تمامًا كما في شكل ٩-٤. ولكن في جزء من حياته، يتحرَّك هذا الإلكترون للوراء في الزمان. وهاتان الصورتان متكافئتان رياضيًّا.

يمثِّلان النوعَ نفسَه من الأحداث، لكن فاينمان كان أول مَن برهن على التطابق الرياضي المضبوط بين الحالتين.

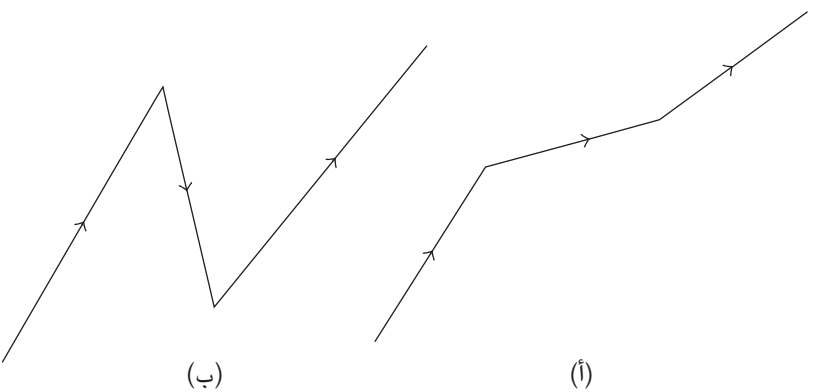
وهناك الكثيرُ مما يمكن استيعابُه أكثر حتى مما تقابله العينُ للوهلة الأولى. لذا دعونا نحلِّل الأمرَ جزءًا جزءًا:

أولًا: لقد ألقيت بهذه الملحوظةِ التي تتعلَّق بأن الفوتون هو نفسه جسيمه المضاد، ولهذا نستطيع أن نزيل الأسهم من مسارات الفوتون. فالفوتون الذي يتحرَّك إلى الأمام في الزمان هو نفسه الفوتون المضاد الذي يتحرك إلى الوراء في الزمان، ولكن الفوتون المضاد هو فوتون كذلك، وعليه فإن الفوتون المتحرِّك إلى الأمام في الزمان هو نفسه فوتون متحرِّك إلى الوراء في الزمان. فهل هذا غريب عليك؟ يجب أن يكون الأمر كذلك. وبعيدًا عن أي شيء آخر، فإن هذا يعني أننا عندما نرى ذرةً في حالةٍ مثارة تنبعث منها طاقةٌ وتسقط إلى الحالة الأرضية المستقرة، فإنه يمكن القول هنا إن طاقة كهرومغناطيسية تتحرَّك للوراء في الزمان ووصلت للذرة محدِثةً الانتقال. وهذا ليس من السهل تصوُّره؛ لأننا الآن لا نتكلم عن فوتون بمفرده يتحرَّك في خط مستقيم عبر المكان، بل نتحدَّث عن غلافٍ كروي متمدِّد من الطاقة الكهرومغناطيسية، وجبهة موجة تنتشر من الذرة في



شكل ٩-٦: على العموم يمكن كذلك وصفُ تلاشي زوجٍ من جسيمٍ وجسيمٍ مضاد كحدثِ تشتُّتٍ عنيف لدرجةِ أنه يبعث بالجسيم إلى الوراء في الزمان.

جميع الاتجاهات وتتشوَّه وتتشتَّت أثناء سيرها. وينتج عن عكسِ هذه الصورةِ عالَمٌ به جبهةُ موجةٍ كروية الشكل تمامًا متمركزة حول ذرتنا المختارة، لا بد أن تنشأ بواسطة الكون ناتجة من سلسلة من عمليات التشتُّت، تعمل معًا ثم تتجمَّع لتتقارب على هذه الذرة المعنية.



شكل ٩-٧: أرسى ريتشارد فاينمان التكافؤ الرياضي لكل أشكال الزمكان ذات الانثناء المزدوج.

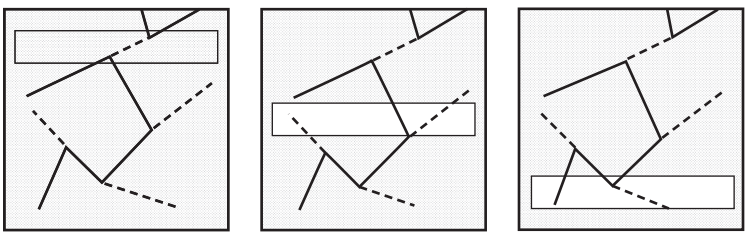
ولا أود أن أستغرق بعمقٍ في هذا النوع من التفكير؛ لأن هذا سيبعدنا عن نظريةِ الكَمِّ ويدخلنا في علمِ أصل الكون. لكنها تحمل تضميناتٍ عميقة لمفهومنا عن الزمان، ولماذا نرى الزمان ينساب في اتجاهٍ واحد فقط. وببساطة شديدة فإن أيَّ شعاع ينطلق من ذرة سيُمتص بواسطةِ ذرة أخرى فيما بعد. وهذا محتمل فقط لأن معظم الذرات الأخرى موجودة في حالتها المستقرة؛ الأمر الذي يعني أن مستقبل الكون سيكون باردًا. وعدم التماثل هذا الذي نراه كسهمٍ للزمن هو عدم التماثل بين الحِقَب الأبرد والحِقَب الأسخن للكون. ومن الأسهل أن ننسِّق لمستقبلٍ أبردَ لإجراء الامتصاص اللازم إذا كان الكون متمددًا؛ لأن التمدُّد نفسَه له تأثير بارد، ونحن نعيش بالفعل في كون متمدد. ولذلك فطبيعة الكون كما نراه الآن مرتبطةٌ بشكلٍ وثيق بطبيعة الكون المتمدد.[4]

زمان أينشتاين

لكن ما الذي «يراه» الفوتون نفسُه كسهم للزمن؟ نحن نعرف من النظرية النسبية أن الساعات المتحركة تسير ببطء، وأنها تسير بإيقاعٍ أبطأ عندما تتحرك مقتربةً من سرعة الضوء، وبالفعل عند سرعة الضوء يتوقَّف الزمان ساكنًا فتتوقف الساعة. يتحرك الفوتون طبيعيًّا بسرعةٍ تعادل سرعة الضوء، وهو ما يعني أن الزمن لا يعني شيئًا للفوتون. فالفوتون الذي يترك نجمًا بعيدًا ويصل إلى الأرض قد يستغرق في هذه الرحلة آلاف السنين إذا قيس ذلك بساعات الأرض، ولكنه لا يستغرق أيَّ زمن على الإطلاق بالنسبة إلى الفوتون نفسِه. وقد يكون الفوتون الموجود من الخلفية الإشعاعية الكونية من وجهة نظرنا قد قطع نحو ١٥ ألف مليون سنة من الانفجار الكبير الذي بدأ به الكون الذي نعرفه، لكن الانفجار الكبير وحاضرنا يعنيان الزمانَ نفسَه بالنسبة إلى الفوتون. وليس هناك سهمٌ في مسار الفوتون في شكل فاينمان، ليس فقط لأن الفوتون هو نفسُه جسيمه المضاد، لكن لأن الحركة عبر الزمان بالنسبة إلى الفوتون ليست ذات معنًى، ولهذا فإن الفوتون هو جسيمه المضاد.

فشل المتصوِّفون ومبسِّطو الأمور الذين يبحثون في مساواة الفلسفة الشرقية بالفيزياء الحديثة في الوصول إلى هذه النقطة، وهي النقطة التي تخبرنا أن كلَّ شيء في الكون، الماضي والحاضر والمستقبل، متصلٌ بكل شيءٍ آخر بشبكةٍ من الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي «يرى» كل شيء في اللحظةِ نفسِها. ومن الطبيعي أن الفوتونات يمكن أن تُخلق وأن تُدمَّر، ولذلك فإن الشبكة ليست مكتملة، لكن مسار الفوتون في الواقع خلال الزمكان

ربما يربط بين عيني وبين النجم القطبي. ولا توجد حركةٌ حقيقية في الزمان ترى مسارًا يتطوَّر من النجم إلى عيني، هذا مجرد إدراك حسي من وجهة نظري. وهناك وجهة نظر أخرى لها نفس القدْر من الصلاحية ترى المسارَ سمةً أبدية يتغيَّر حولها الكون، وأحد الأشياء التي تحدُث خلال هذه التغيُّرات في الكون أنه قد توجد عينِي والنجم القطبي عند نهايتين متضادتين للمسار.



شكل ٩-٨: لو أن كل مسارات الجسيم ثبتت بشكلٍ ما في الزمكان، فربما نرى حركةً وتداخلًا خادعين عندما يتحوَّل إدراكنا من الآن (الصورة في الجانب الأيمن) إلى الأمام خلال الزمن وإلى أعلى في الصفحة. فهل تَراقصُ الجسيمات مجرَّد خدعةٍ سببُها إدراكنا الحسي لسريان الزمان؟

وماذا عن مسارات الجسيمات الأخرى في أشكال فاينمان؟ وإلى أي مدًى هي «واقعية»؟ يمكننا أن نقول الشيء نفسَه تقريبًا عنها. تصوَّر شكلَ فاينمان وهو يحتوي على كل الزمان والمكان وبه مسارٌ لكل جسيم موجود بداخله. تصوَّر الآن مشاهدةَ ذلك الشكل من خلال شقٍّ ضيق يسمح فقط بتتبُّع شريحةٍ محدودةٍ من الزمان، وحرِّك الشقَّ بثباتٍ في اتجاه أعلى الصفحة. سنرى من خلال الشق تراقُصًا مُعقَّدًا لجسيماتٍ متداخلة، وتكوُّنَ أزواجٍ وتلاشياتٍ، وأحداثًا أكثرَ تعقيدًا بكثير، وبانوراما لتغيُّرٍ دائم. إلا أن كلَّ ما نفعله هو ملاحظةُ شيءٍ ما مثبَّت في المكان والزمان. إن إدراكنا الحسي هو الذي يتبدَّل وليس الواقع الأساسي. ولأننا نثبِّت أنظارنا على شقٍّ يتحرَّك بثباتٍ فإننا نرى بوزيترونًا يتحرَّك إلى الأمام بدلًا من إلكترون يتحرَّك إلى الوراء في الزمن، لكن كلا التفسيرين حقيقيٌّ بالقدْرِ نفسِه. ولقد ذهب جو ويلر أبعدَ من ذلك مشيرًا إلى أننا يمكن أن نتخيَّل جميع الإلكترونات في الكون مرتبطةً بعضها ببعض عن طريق تفاعلاتٍ لتشكِّل ممرًّا متعرجًا غايةً في التعقيد خلال الزمكان إلى الأمام وإلى الخلف. كان ذلك جزءًا من ومضةِ الإلهام

الأصلية التي أدَّت إلى بحثِ فاينمان الحاسم — صورة «الإلكترون المنفرد الذي يتحرَّك الذي يتحرَّك للخلف وللأمام، ويواصل التحرُّك هكذا، على طيفِ الزمن لينسج نسيجًا غنيًّا»، ربما يحتوي على جميع الإلكترونات والبوزيترونات في العالم.»[5] وفي صورةٍ مثل هذه سيكون كلُّ إلكترون ببساطةٍ في كل مكان في الكون جزءًا مختلفًا لخطٍّ عالَمٍ واحد فقط؛ خط العالَم الوحيد لإلكترون «حقيقي».

ولا تصلح هذه الفكرة في عالَمنا، ولكي نجعلها صالحة يجب أن نتوقَّع أن نجد عددًا من الشرائح المنعكسة لخط العالَم، وعددًا من البوزيترونات مساويًا لعدد الشرائح الأمامية؛ إلكترونات. وفكرة الواقع الثابت مع كون رؤيتنا الشيء الوحيد المتغير ربما لا تصلح عند هذا المستوى البسيط؛ فكيف يمكن أن نتوافق مع مبدأ عدم اليقين؟[6] ولكن هذه الأفكار معًا تقدِّم فهْمًا أفضلَ لطبيعة الزمن مما تقدمه خبرتنا اليومية. وانسياب الزمن في عالمنا اليومي مؤشرٌ إحصائي يسبِّبه بصورةٍ كبيرة تمدُّدُ الكون من حالةٍ أكثرَ سخونةً إلى حالةٍ أكثرَ برودة. وحتى عند هذا المستوى فإن معادلات النسبية تسمح بالسفر عبر الزمان، ويمكن استيعاب هذا المفهوم بسهولة جدًّا بمدلول أشكال الزمكان.[7]

ويمكن أن تكون الحركةُ في الفضاء في أي اتجاه ثم العودة مرة ثانية. أما الحركة في الزمان فتسير في اتجاهٍ واحد فقط في حياتنا اليومية بصرف النظر عما يحدث على مستوى الجسيم. ومن الصعب أن تتصوَّر أبعاد الزمكان الأربعة متعامدةً بعضها على بعض بزوايا قائمة، لكننا نستطيع إهمال أحد الأبعاد الأربعة ونتصوَّر ماذا تعني هذه القاعدة الصارمة إذا طبَّقتها على أحد الأبعاد الثلاثة التي تعوَّدنا عليها. ويبدو الأمر وكأنه يسمح لنا بالحركةِ إما إلى أعلى وأسفل أو إلى الأمام وإلى الخلف، لكن الحركة إلى الجوانب مفيدة، فالحركة مثلًا قد تكون ممكنةً لليسار فقط. أما الحركة إلى اليمين فممنوعة. فإذا جعلنا من ذلك القاعدةَ الأساسيةَ في لعبة الأطفال، وطلبنا من طفلٍ أن يجد طريقةً للوصول إلى جائزةٍ على الجانب الأيمن (إلى الخلف في الزمان) فإن الأمر لن يستغرق طويلًا حتى يجد الطفل مخرجًا من هذا المأزق. يدور ببساطة حول نفسِه ليواجه الجانب الآخر مبدِّلًا اليسار باليمين ثم يصل إلى الجائزة بأن يتحرك إلى اليسار. وبدلًا من ذلك يرقد على الأرض لتصبح الجائزة في الاتجاه «الأعلى» لرأسه. الآن تستطيع الحركة إلى «أعلى» لتقبض على الجائزة وإلى «أسفل» لتعود إلى مكانك الأصلي قبل أن تنهض لتقف مرةً ثانية وتعود إلى اتجاهك الشخصي في الفضاء بالنسبة إلى المشاهدين.[8] وتقنية السَّفر عبر الزمن التي تسمح بها النظرية النسبية مشابهةٌ جدًّا لذلك. فهي تتضمَّن تشويهًا لنسيج الزمكان لدرجةِ أنه

في منطقةٍ محلية من الزمكان يشير محورُ الزمن إلى اتجاهٍ مكافئ لأحد اتجاهات المكان الثلاثة في المنطقة غير المشوهة في الزمكان. ويأخذ أحدُ هذه الاتجاهات الأخرى للمكان دورَ الزمان ويحدث ذلك بتبديل الزمان بالمكان، ومثل هذا الترتيب قد يجعل السَّفر في الزمان حقيقةً؛ الأمر الذي يجعل السَّفرَ إلى الأمام ثم إلى الخلف مرةً ثانية ممكنًا.

أجرى فرانك تبلر، عالِم الرياضيات الأمريكي الحساباتِ التي تبرهن على أن مثل هذه الحيلة ممكنةٌ نظريًّا. فمن الممكن تشويه الزمكان بواسطةِ مجالٍ جاذبية قوي، وآلة تبلر الخيالية للسفر عبر الزمن هي أسطوانة ذات كتلة كبيرة تحتوي على مادةٍ تعادل ما في شمسنا معبَّأة في حجم طوله ١٠٠كم ونصف قطره ١٠كم وكثيف مثل كثافة النواة في الذرة، ويدور مرتين كل ملِّي ثانية، ويجر من حوله نسيج الزمكان. ويتحرَّك سطح الأسطوانة بسرعةٍ تعادل نصف سرعة الضوء. هذا نوعٌ من الأشياء التي لن يبنيها أكثرُ المخترعين جنونًا في ساحةِ منزله الخلفية، ولكن المقصود هنا أن ذلك مسموحٌ به بواسطة كل قوانين الفيزياء التي نعرفها. وهناك جسمٌ في الكون له كتلة شمسِنا نفسِها وكثافة نواة الذرة ويدور حول نفسِه كل ١,٥ ملِّي ثانية، لكنه أبطأ ثلاث مرات من آلة تبلر للسفر عبر الزمن. ويُطلق على هذا الجسم «النابض ذو الملِّي ثانية» الذي اكتُشف سنة ١٩٨٢. ومن المستبعَد تمامًا أن يكون هذا الشيء أسطوانيًّا؛ فمن المؤكد أن الدوران الشديد قد جعله مسطَّحًا على شكل فطيرة. ومع ذلك، فلا بد أن يكون هناك تشويه غريب للزمكان بالقرب منه. وربما لا يكون الزمن «الواقعي» للسفر مستحيلًا، لكنه مجرَّد غاية في الصعوبة وغير محتمل للغاية. وهذه النهاية الهشة لما يمكن أن يكون وتدًا صُمِّم ليجعل اعتياد السفر عبر الزمن عند المستوى الكَمِّي، على كل حال، يبدو أكثرَ قبولًا قليلًا. وتسمح نظريةُ الكَمِّ والنظرية النسبية بنوعٍ أو بآخر من السفر عبر الزمن، وأي شيء مقبول لهاتين النظريتين لا بد أن يؤخذ مأخذَ الجِد مع ما يبدو عليه هذا الشيء من تناقض. فالسفر عبر الزمان في الواقع هو جزءٌ لا يتجزأ من بعض السمات الغريبة في عالم الجسيمات؛ حيث يمكن فيها أن تحصل على شيءٍ من لا شيء، إذا كنت سريعًا بما فيه الكفاية.

شيء مقابل لا شيء

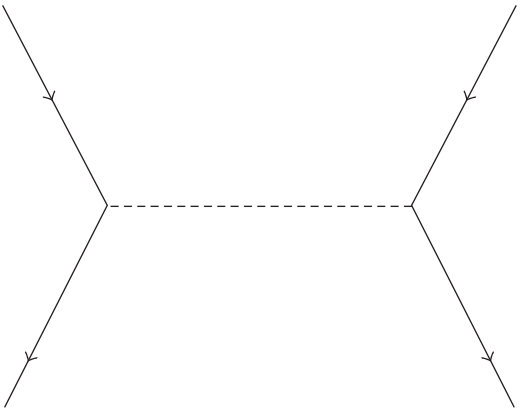
في سنة ١٩٣٥، اقترح هيديكي يوكاوا الذي كان في ذلك الوقت يبلغ من العمر ٢٨ عامًا ويعمل محاضرًا في الفيزياء بجامعة أوساكا، تفسيرًا لكيفية تماسك النيوترونات والبروتونات في نواة الذرة بالرغم من الشحنة الموجبة التي تميل إلى تفجيرِ النواة بواسطة

القوى الكهربية. ومن الواضح أنه لا بد من وجودِ قوةٍ أقوى تتغلب على القوى الكهربية تحت الظروف المناسبة. وتحمل الفوتونات القوى الكهربية، وقد أقرَّ يوكاوا بأن هذه القوى النووية لا بد هي الأخرى أن تكون جسيمًا. أصبح الجسيم يُعرف بـ «الميزون»، وذلك باستخدامِ قواعدِ الكَمِّ للنواة. والميزونات مثل الفوتونات، هي الأخرى بوزونات لكن بحركةٍ مغزلية مقدارها الوحدة وليس صفرًا، وتختلف عن الفوتونات في أن متوسط عمرها قصير جدًّا، ولهذا السبب فإنها لا تُرى خارج النواة إلا تحت ظروف خاصة. وفي الوقت المناسب، اكتُشفت عائلة من الميزونات ليست بالضبط كما تنبَّأ يوكاوا، لكن قريبة من تنبُّئه بما فيه الكفاية، لتبيِّن أن فكرة تبادل الجسيمات النووية للميزونات كحاملٍ للقوى النووية القوية تعمل بشكلٍ مشابه لتبادل الفوتونات كحامل للقوى الكهربية، وقد نال يوكاوا عن استحقاقٍ جائزةَ نوبل في الفيزياء سنة ١٩٤٩.

هذا التأكيد على أن القوى النووية، إضافةً إلى القوى الكهربية، يمكن أن يُنظر إليها استنادًا إلى التفاعلات فحسب بمثابةِ حجر الزاوية لرؤية الفيزيائيين في العالَم اليوم. وتُعدُّ كل القوى الآن تفاعلاتٍ.

ولكن من أين تجيء تلك الجسيمات التي تحمل التفاعلات؟ تجيء من لا مكان؛ أي التوصُّل إلى شيءٍ من لا شيء، وفقًا لمبدأ عدم اليقين.

ينطبق مبدأ عدم اليقين على الخصائص التكاملية للزمان والطاقة، وينطبق أيضًا على الموقع والزخم. فكلما قلَّ عدم اليقين بالنسبة إلى الطاقة المتضمَّنة في حدثٍ على مستوى الجسيم زاد عدم اليقين لزمن هذا الحدث، والعكس صحيح. ولا يوجد إلكترون منعزل لأنه يستطيع أن يقترض طاقةً من علاقةِ عدمِ اليقين لفترةٍ وجيزة كافية من الزمن ويستخدم هذه الطاقة لتوليد فوتون. والعقبة هنا أنه بمجرد تكوُّن الفوتون لا بد له أن يُمتص ثانيةً بواسطة الإلكترون قبل أن «يلحظ» العالَم أن الحفاظ على الطاقة قد انتُهك. وتُوجد الفوتونات لجزء ضئيل جدًّا من الثانية — أقل من $١٠^{-١٥}$ من الثانية — لكنها تظهر وتختفي طوال الوقت حول الإلكترونات. ويبدو الأمر وكأن كلَّ إلكترون محاطٌ بسَحابة من الفوتونات «الافتراضية» التي تحتاج فقط إلى دفعة صغيرة؛ كمية قليلة من الطاقة من الخارج لتهرب وتصبح حقيقية. وعندما يتحرك إلكترون من حالةٍ مثارةٍ إلى حالةٍ أقلَّ إثارة في ذرةٍ ما، فإنه يعطي الطاقة الزائدة لواحد من الفوتونات الافتراضية ويجعله يطير حرًّا؛ فالإلكترون الذي يمتص طاقةً يتصيد داخله فوتونًا حرًّا. ويقدِّم النوعُ نفسُه من العملياتِ المادةَ اللاصقةَ التي تمسك بمحتويات النواة بعضها مع بعض.



شكل ٩-٩: في شكل فاينمان يتفاعل جسيمان بأن يتبادلا جسيمًا ثالثًا. وفي هذه الحالةِ تحديدًا من الممكن أن يكون الجسيمان إلكترونين يتبادلان فوتونًا ويتنافران أحدهما مع الآخر.

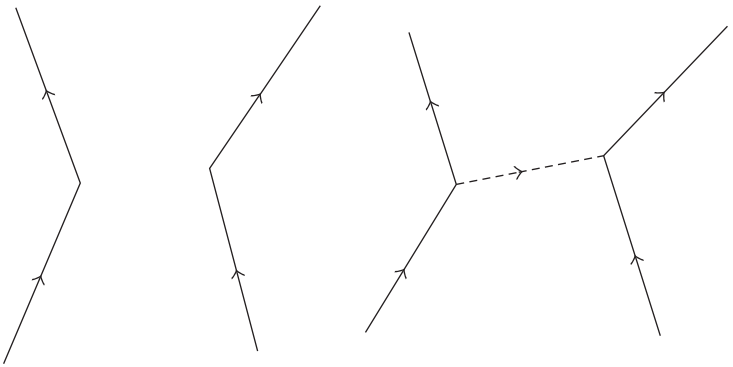
وإذا تكلمنا بطريقةٍ تقريبية، وحيث إن الكتلة والطاقة قابلتان للتبادل، فإن «مدى» أيِّ قوًى يتناسب عكسيًّا مع كتلة الجسيم التي تُوجِد المادةَ اللاصقة أو مع كتلةِ أخفِّ جسيم إذا كانت العملية تتضمَّن أكثرَ من جسيم. وحيث إن الفوتونات عديمة الكتلة فإن مدى القوى الكهرومغناطيسية يكون نظريًّا لا حدود له مع أنه يصبح متناهي الصِّغر عند مسافةٍ لا نهائية بعيدًا عن الجسيم المشحون. وللميزونات الافتراضية ليوكاوا مثل هذا المدى الدقيق ويُشار إليه بمدى القوى النووية القوية، ويجب أن تكون كتلتها ما بين ٢٠٠ إلى ٣٠٠ ضعف كتلة الإلكترون. وكجسيمات تُعتبر الميزونات ثقيلة الكتلة. وقد وجدت الميزونات المعينة المتضمَّنة في التفاعلات النووية القوية في الأشعة الكونية سنة ١٩٤٦ وأُطلق عليها ميزونات Pi أو بيونات. والبيون الذي لا يحمل شحنة أيٍّ متعادل له كتلة مساوية لـ ٢٦٤ مرة كتلة الإلكترون، وكلٌّ من البيون الموجب والسالب يزن ٢٧٣ ضعف كتلة الإلكترون. وبصورة عامة فهي لها سُبْع كتلة البروتون. إلا أن بروتونين يتماسكان معًا في النواة بالتبادل المتكرر للبيونات التي تزن جزءًا محسوسًا من وزن البروتون نفسه، دون أن تفقد البروتونات نفسُها أيَّ كتلة. وهذا ممكن فقط لأن البروتونات قادرة على أن تستفيد من مبدأ عدم اليقين. يتخلق البيون ثم يقابل بروتونًا آخرَ ويختفي، في ومضةٍ من عدم اليقين مسموح بها بينما الكون «لا يلاحظ». ويمكن للبروتونات والنيوترونات — النوويات — أن تتبادل الميزونات فقط عندما تكون متقاربة جدًّا، وبالضرورة عندما

«تتلامس» إذا استخدمنا تعبيرًا غيرَ ملائم من حياتنا اليومية. خلافًا لذلك، فإن البيونات الافتراضية لن تستطيع عبور الفجوة خلال الزمن المسموح بواسطة مبدأ اليقين. وعليه فإن النموذج يشرح بشكلٍ مفهوم جدًّا لماذا كان التفاعل النووي القوي هو قوة ليس لها أي تأثير على النوويات خارج النواة، ولها تأثير فعَّال جدًّا على النوويات داخل النواة.[9]

وهكذا فإن البروتون هو مركزُ سحابةٍ من النشاط أكثر من الإلكترون. وفي حين يتحرَّك البروتون الحر في مساره عبر المكان (والزمان) فإنه يطلق ويعيد امتصاصَ فوتونات افتراضية وميزونات افتراضية. ولا تزال هناك طريقةٌ أخرى للنظر إلى هذه الظاهرة. تخيَّل أن بروتونًا واحدًا فقط ينبعث منه بيون واحد فقط ويُعاد امتصاصه. أمر بسيط. لكن لتنظر إلى ذلك بطريقةٍ أخرى: أولًا هناك بروتون واحد، ثم بروتون واحد وبيون، وفي النهاية بروتون واحد مرة أخرى. ولأن البروتونات جسيماتٌ لا يمكن تمييز بعضها عن بعض فإننا أحرار لأن نقول إن البروتون الأول قد اختفى وأعطى طاقةَ كتلته علاوةً على القليل الذي اقترضه من مبدأ عدم اليقين ليكوِّن بيونًا وبروتونًا جديدًا. وفور ذلك يتصادم الجسيمان ويختفيان ليكوِّنا في هذه العملية بروتونًا ثالثًا، وتحتفظ بتوازن الطاقة في الكون. ولماذا التوقف هناك؟ ولماذا لا يتنازل بروتوننا الأصلي عن طاقته مع القليل من الزيادة ليكوِّن نيوترونًا وبيونًا موجب الشحنة؟ هذا ممكن. ولماذا حينئذٍ لا يستطيع بروتون أن يتبادل هذا البيون الموجب الشحنة مع نيوترون «ليصبح» نيوترونًا، والنيوترون «يصبح» بروتونًا؟ وهذا أيضًا ممكن تمامًا، مثل إمكانية حدوث العمليات العكسية المتضمَّنة للنيوترونات و«هي تتحوَّل» إلى بروتونات وبيونات سالبة الشحنة.

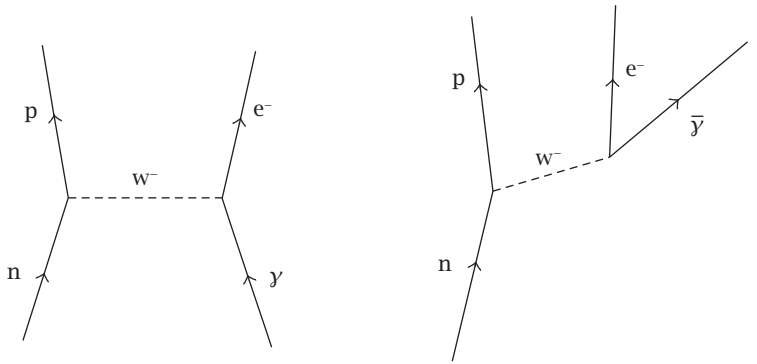
بدأت الأمور تتعقَّد الآن؛ حيث لا يوجد أيُّ سبب للتوقُّف هنا. فبالمثل يمكن لبيون وحدَه أن يتحوَّل إلى نيوترون وبروتون مضاد، وذلك لمدة قصيرة قبل أن يعود مرةً أخرى لحالته الطبيعية، ويمكن أن يحدث هذا لبيون افتراضي، هو نفسُه جزء من نسق فاينمان المكوَّن من بروتون أو نيوترون. ويمكن لبروتون أثناء تقدُّمه في طريقه أن ينفجر لينتج عن ذلك شبكةٌ من الجسيمات الافتراضية تطن وتتفاعل جميعها بعضها مع بعض، ثم تخفت عائدةً إلى ما كانت عليه، ويمكن النظر إلى جميع الجسيمات كناتج اتحاد جسيمات أخرى متضمنة فيما أطلق عليه فريتوف كابرا «الرقص الكوني». ولم تنتهِ القصة بعد. وحتى الآن لم نحصل على شيء من لا شيء، مع أننا قد حصلنا على الكثير مقابل القليل. والآن دعونا ندفع الأمورَ إلى أقصى ما يمكن.

إذا كان هناك عدمُ يقين متأصل للطاقة المتاحةِ لجسيمٍ لفترة قصيرة كافية من الزمن، فمن الممكن أن نقول أيضًا إن هناك عدم يقين متأصل عما إذا كان الجسيم



شكل ٩-١٠: الفكرة القديمة «الفعل عن بُعد» إلى اليسار تم إحلالها بفكرة عمل الجسيمات كحاملات للقوى.

موجودًا أم لا في زمنٍ قصيرٍ كافٍ. وشريطة اتباع قواعد معينة مثل الحفاظ على الشحنة الكهربية، والتوازن بين الجسيمات والجسيمات المضادة، ليس هناك ما يوقف ظهورَ مجموعةٍ كاملة من الجسيمات من لا شيء يتَّحد بعضها مع بعض بعدَ ذلك، ثم تختفي قبل أن يلاحظ الكون ككل هذا التعارض. وقد يظهر إلكترون وبوزيترون من لا شيء على الإطلاق بشرطِ أن يختفيا بسرعةٍ كافية، ويمكن لبروتون وبروتون مضاد أن يفعلا الشيء نفسَه. ونستطيع القول بتحفُّظ شديد إن الإلكترون يستطيع فقط القيام بهذه الحيلة بمساعدة فوتون، وكذلك البروتونات بمساعدة ميزون ليقدِّما «التشتُّت» المطلوب. فالفوتون الذي ليس له وجود يكون زوجًا من بوزيترون/إلكترون يتلاشى بعد ذلك ليكوِّن الفوتون الذي كان قد كوَّنهما في بادئ الأمر، ولنتذكر: لا يعرف الفوتون الفرْق بين الحاضر والمستقبل. وكبديلٍ عن هذا، يمكن أن نتصوَّر الإلكترونَ وهو يقتفي أثرَ ذيله في دوامة من الزمن. يظهر أولًا قافزًا من الفراغ كما يخرج الأرنب من قبعة الساحر، ثم يرحل إلى الأمام في الزمن لمسافةٍ قصيرة قبل أن يلاحظ أنه أخطأ، معترفًا بعدم واقعيته فيعود مرة ثانية من حيث أتى — إلى الوراء عبر الزمن إلى نقطة البداية. وهناك يغيِّر من اتجاهه مرةً ثانية، وهكذا تتواصل الحلقة، وبمساعدة التفاعل مع فوتون — حدث تشتُّت عالي الطاقة — عند كل «طرف» من الحلقة.

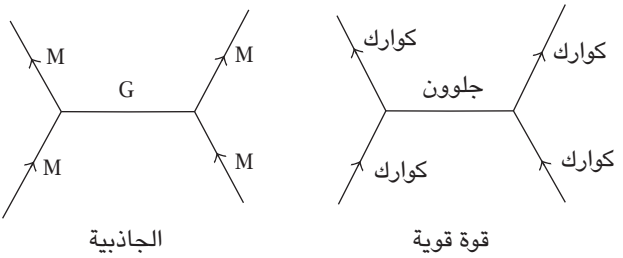


شكل ٩-١١: طريقتان مختلفتان للنظر إلى تفاعل الجسيم نفسه — بمجرد تغيُّر نيوترينو داخل إلى نيوترينو مضاد خارج. وهذه عملية تفكُّك بانطلاق أشعة بيتا التي يتحوَّل فيها النيوترون إلى بروتون وإلكترون ونيوترينو.

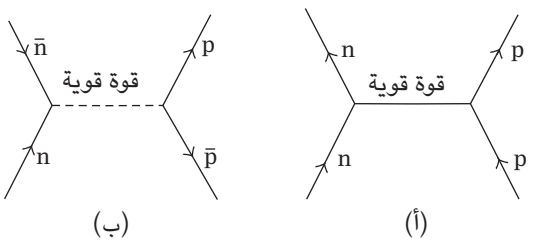
ووفقًا لأفضل نظرياتنا عن سلوك الجسيمات، فإن الفراغ ما هو إلا كتلة مضطربة من الجسيمات الخيالية في حدِّ ذاتها، حتى إذا لم توجد جسيمات «حقيقية». وهذه ليست مجرَّد طنطنة عديمة الجدوى بواسطة المعادلات؛ لأنه من دون السماح لتأثير تلك التقلُّبات الفراغية، فإننا ببساطةٍ لن نصل إلى الحل الصحيح للمشكلات المتضمنة لتشتُّت الجسيمات حيث يشتِّت بعضها بعضًا. وهذا دليل قوي على أن النظرية — المبنية مباشرة على علاقات عدم اليقين، لو نذكر — صحيحة. فالجسيمات الافتراضية وتقلبات الفراغ أمرٌ واقعي كباقي نظريةِ الكَمِّ؛ واقعي كازدواجية الموجة/الجسيم، ومبدأ عدم اليقين، والفعل عن بُعد. وفي عالَمٍ مثل هذا ليس من العدل مطلقًا أن نطلق على لغز قطة شرودنجر أنه تناقض بالمرة.

قطة شرودنجر

نُشرت مفارقة القطة الشهير لأول مرة سنة ١٩٣٥ (مجلة «العلوم الطبيعية»، المجلد ٢٣، صفحة ٨١٢) في السنةِ نفسِها التي ظهر فيها بحْث أينشتاين وبودولسكي وروزين. رأى أينشتاين في اقتراح شرودنجر أجملَ وسيلةٍ تبيِّن أن تمثيل المادة بموجة هو تمثيل منقوص للواقع،[10] وما زال الجدل حول أينشتاين وبودولسكي وروزين وتناقض القطة



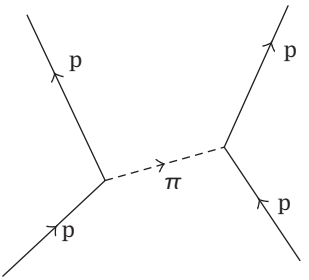
شكل ٩-١٢: يمكن تمثيلُ القوى الأساسية بمدلول تبادل الجسيمات. وفي هذه الأمثلة يتفاعل جسيمان كثيفان (M) بتبادل الجرافيتون (G)، ويتداخل كواركان بتبادل الجلوون.



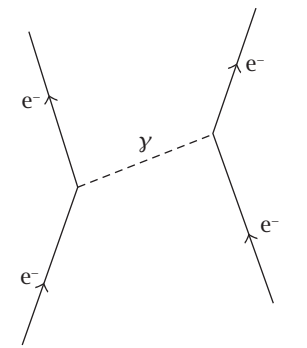
شكل ٩-١٣: كالعادة فإن اتجاه الزمن في هذه الأشكال أمرٌ اختياري. وفي الحالة (أ) يتحرك نيوترون وبروتون إلى أعلى الصفحة متفاعلَين بتبادل ميزون. وفي الحالة (ب) يتحرك نيوترون ونيوترون مضاد من اليسار إلى اليمين ليتقابلا ويتلاشيا وينتج ميزون، يتفكَّك بدوره وينتج زوجًا من بروتون/بروتون مضاد. وتُظهِر مثل هذه «التفاعلات المتقاطعة» كيف أن مفاهيم القوى والجسيمات تصبح غير قابلة للتمييز فيما بينها.

يدور في نظريةِ الكَمِّ حتى اليوم. ولكن بخلاف جدل أينشتاين وبودولسكي وروزين لم نصل إلى حلٍّ مقنعٍ للجميع.

إلا أن المفهوم الذي وراء هذه التجربة الذهنية بسيط جدًّا. اقترح شرودنجر أننا يجب أن نتصوَّر صندوقًا يحتوي على مصدرٍ مشعٍّ وكشاف لتسجيل الجسيمات المشعة (ربما عدَّاد جايجر) وزجاجة تحتوي على سمٍّ مثل السيانيد، وقطة حية. وقد رُتِّبت الأدوات في الصندوق بحيث يمكن تشغيلُ الكشافِ لمدة كافية فقط لتحقق فرصة ٥٠٪ أن تتفكك

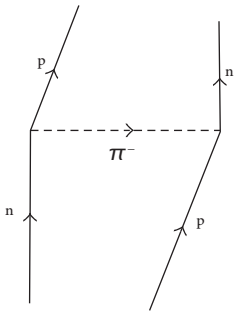


شكل ٩-١٤: بروتونان يتنافران أحدهما مع الآخر بتبادل بيون.

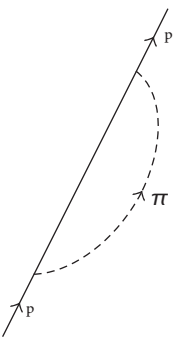


شكل ٩-١٥: يتفاعل إلكترونان بتبادل فوتون.

إحدى الذرات من المادة المشعة، وأن يسجل الكشاف وجود جسيم. وإذا سجَّل الكشاف مثل هذا الحدث فستنكسر الزجاجة وتموت القطة، وإذا لم يحدث فستعيش القطة. وليس لدينا أي وسيلة لمعرفةِ ما حدث في التجربة إلى أن نفتح الصندوق وننظر داخله، ويحدث التفكُّك الإشعاعي بالصدفة البحتة، ولا يمكن التنبؤ به إلا بالمعنى الإحصائي. وطبقًا لتفسير كوبنهاجن الصارم، وتمامًا كما في تجربة الثقبين؛ حيث تكون فرصة الإلكترون في المرور من أحد الثقبين متساوية، وينتج من هذين الاحتمالين المتداخلين تراكبٌ للحالات، وعليه فإنه في هذه الحالة تتساوى فرصة حدوث التفكُّك الإشعاعي وعدم حدوث التفكك



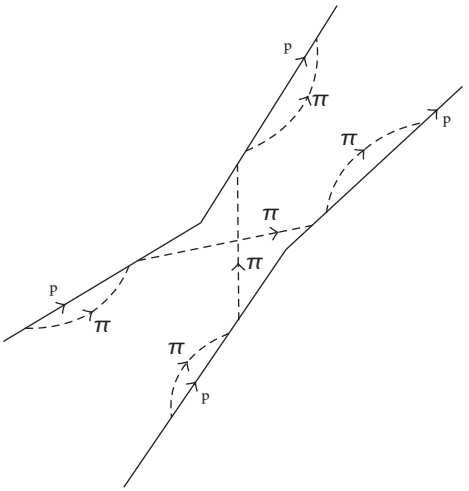
شكل ٩-١٦: بمساعدة بيون مشحون، يتحوَّل نيوترون إلى بروتون بواسطة التفاعل مع بروتون، الذي يصبح نيوترونًا.



شكل ٩-١٧: يمكن للبروتون أن يكوِّن أيضًا بيونًا «افتراضيًّا» بشرط أن يُعاد امتصاصه سريعًا.

الإشعاعي، ويجب أن يؤدي ذلك إلى تراكب الحالات. وتخضع التجربة بأكملها، القطة وخلافه، للقاعدة القائلة بأن التراكب حقيقيٌّ إلى أن ننظر إلى التجربة، وعند هذه اللحظة فقط من المشاهدة تنهار الدالة الموجية إلى إحدى الحالتين. وإلى أن ننظر إلى الداخل فهناك عينة مشعة قد تكون تفكَّكت أو لم تتفكك، وزجاجة بها سمٌّ مكسورة أو سليمة، وقطة حية وميتة، أو لا حية ولا ميتة.

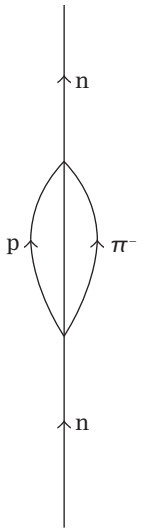
يمكن أن نتصوَّر جسيمًا أوليًّا مثل إلكترون ليس هنا أو هناك، لكن في تراكبٍ ما للحالات، لكن يكون الأمر أكثرَ صعوبة أن نتخيل شيئًا مألوفًا مثل قطة في هذا الوضع



شكل ٩-١٨: تنافُر بروتونين بتبادل بيون يبدو أكثرَ تعقيدًا عما يظهر في شكل ٩-١٤.

من الحياة المعلَّقة. فكَّر شرودنجر في هذا المثال ليثبت أن هناك عيبًا في تفسير كوبنهاجن الصارم؛ حيث إنه من الواضح أن القطة لا يمكن أن تكون حية وميتة في آنٍ واحد. ولكن هل هذا أكثرُ «وضوحًا» من «حقيقة» أن الإلكترون لا يمكن أن يكون جسيمًا وموجةً في الوقت نفسه؟ لقد اختُبر الحسُّ السليم بالفعل كدليل للواقعِ الكَمِّي وتبيَّن أنه يُعوِزه الكثير. والشيء المؤكَّد الذي نعرفه هو أن عالِمَ الكَمِّ لا يثق بالحس السليم، ويعتقد فقط في الأشياء التي نستطيع رؤيتها أو تسجيلها بأجهزتنا دون لبْس. فلن نعرف ماذا يدور داخل الصندوق ما لم ننظر فيه.

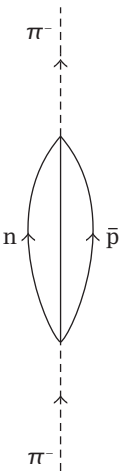
استمر الجدل حول القطة في الصندوق لمدة ٥٠ عامًا. وقد قالت إحدى المدارس الفكرية إنه ليس هناك أيُّ مشكلة لأن القطة قادرة تمامًا على أن تقرِّر هي نفسُها ما إذا كانت حية أو ميتة، وأن وعي القطة كافٍ ليقدح انهيار الدالة الموجية. وفي هذه الحالة، أين سنضع خط النهاية؟ فهل النملة أو البكتيريا على علمٍ بما جرى؟ وإذا تحرَّكنا في اتجاهٍ آخر، وحيث إن هذه التجربة ليست سوى تجربة ذهنية فقط، فلنا أن نتصوَّر إنسانًا متطوعًا قد أخذ مكان القطة في الصندوق (يشار أحيانًا إلى المتطوع «صديق ويجنر» على اسم يوجين ويجنر الذي فكَّر بعمق حول تحويرات في تجربة القطة في الصندوق،



شكل ٩-١٩: يمكن أن يتحوَّل نيوترون لفترة وجيزة إلى بروتون زائد بيون مشحون على أن يعود الاثنان معًا بسرعة.

وبالمصادفة كان يوجين صهر ديراك). ومن الواضح أن الإنسان في الصندوق ملاحظٌ واعٍ ولديه المقدرة من وجهة نظر ميكانيكا الكَمِّ أن يُحدِث انهيارًا لدالات الموجة. وعندما نفتح الصندوق مفترضين أننا محظوظون بما فيه الكفاية ونجد الإنسان ما زال حيًّا، فإننا سنكون متأكدين تمامًا أنه لن يشير إلى أي خبرة غريبة، بل إن الأمر ببساطة هو أن مصدر الإشعاع قد فشل في إنتاجِ أيِّ جسيم في الوقت المناسب. إلا أنه بالنسبة إلينا نحن الموجودين خارج الصندوق، الشيء الوحيد الصحيح حول ما يجري داخل الصندوق هو تراكب الحالات إلى أن ننظر داخله.

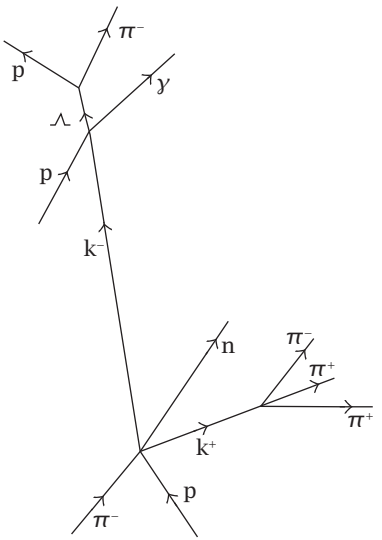
وسلسلة الأحداث بلا نهاية. تصوَّر أننا قد أعلنا التجربة مقدمًا إلى العالم الفضولي، ولكن لِنتجنَّب تدخُّل الإعلام أجرينا التجربة خلف الأبواب المغلقة. وحتى بعد فتح الصندوق وترحيبنا بصديقنا أو سحب الجثة من الصندوق إلى الخارج، لن يعرف مندوبو الإعلام في الخارج ما الذي يجري. فبالنسبة إليهم يكون البناء الذي به معملنا ككل في حالةٍ من تراكبٍ للحالات. وهكذا نعود إلى حالة تراجع لا نهائي.



شكل ٩-٢٠: يمكن أن يكون البيون زوجًا من نيوترون/نيوترون مضاد افتراضي لفترةٍ وجيزة بالمثل.

لكن لنفرض أننا وضعنا مكانَ صديقِ ويجنر حاسوبًا. يستطيع الحاسوب أن يسجِّل المعلومات عن التفكك الإشعاعي أو عن عدم حدوثه. فهل يستطيع الحاسوب أن يُحدِث انهيارًا للدالة الموجية (على الأقل داخل الصندوق)؟ ولمَ لا؟ إلا أنه وفقًا لوجهةِ نظرٍ أخرى ما يهم ليس الإدراك البشري لما أسفرت عنه التجربة أو حتى إدراك أي مخلوق حي، لكن الحقيقة أن ما نتج عن هذا الحدث على المستوى الكَمِّي قد سُجِّل أو ترك تأثيرًا على العالم الماكروي. وقد تكون الذرة المشعة في تراكبٍ للحالات، لكن بمجرد «نظر» عدَّاد جايجر لناتج التفكك، تصبح الذرة مجبرةً على الوجود في حالة أو في أخرى؛ أي أنها تفكَّكت أو لم تتفكك.

وهكذا يكتنف تجربة القطة في الصندوق تناقض، على خلاف تجربة أينشتاين وبودولسكي وروزين الذهنية. فمن المستحيل التوافُق مع تفسير كوبنهاجن الصارم دون قبول «واقع» القطة الحية/الميتة، وقد أدَّى ذلك بويجنر وجون ويلر إلى أن يعتبرا احتمالَ أن العالم ككل ربما يَدين بوجوده «الواقعي» إلى حقيقةِ أنه قد يُشاهد بواسطة الكائنات الذكية فقط، ويرجع ذلك إلى تراجعٍ غيرِ محدودٍ للسبب والأثر. وأغلب تناقضات كل

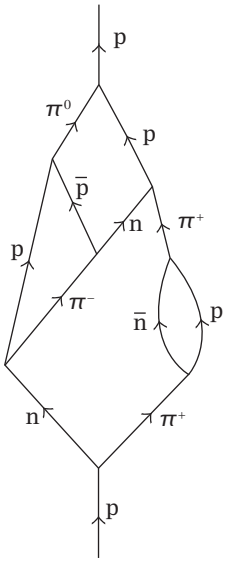


شكل ٩-٢١: شكل (زمكان) فاينمان لتفاعل حقيقي لعدة جسيمات كُشِفَ عنها بواسطة صورة غرفة الفقاعة، ووصفَها فريتوف كابرا في كتابه «طاوية الفيزياء».

الاحتمالات المتأصلة في نظريةِ الكَمِّ تنحدر مباشرةً من تجربة القطة لشرودنجر التي تقف فجأةً مما يسميه ويلر تجربة الاختيار المتأخر.

الكون التشاركي

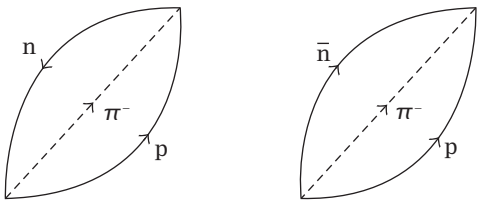
كتب ويلر عدةَ آلاف من الكلمات في تفسيرِ نظريةِ الكَمِّ، وذلك في الكثير من النشرات العلمية المختلفة على مدى أربعة عقود.[11] وقد ظهر أوضحُ تفسيرٍ لمفهومه عن «الكون التشاركي» في مساهمته في مؤتمر «بعض الغرائب في التناسب» (التي حرَّرها هاري وولف) وكان المؤتمر بمناسبة الاحتفال بمئوية ميلاد أينشتاين. حكى ويلر في تلك المساهمة (فصل ٢٢ من المجلد) نادرةً عن الزمن الذي كان يلعب فيه مع مجموعةٍ من الناس لعبة العشرين سؤالًا القديمة في حفل عشاء. وعندما حان دوره للخروج من الحجرة حتى يتفق الضيوف على الشيء الذي يجب أن يكون موضع السؤال، وقد تُرك خارج الحجرة «لفترة غير معقولة» من الزمن، وهذه إشارة مؤكَّدة لأحد أمرين؛ إما أن المشاركين كانوا يختارون



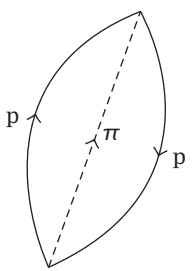
شكل ٩-٢٢: يستطيع بروتون منفرد أن يدخل ضمن شبكة من التداخلات الخيالية مثل هذه، مأخوذة من كتاب «عالم الجسيمات الأولية» لمؤلفه كيه فورد بليسديل، نيويورك، ١٩٦٣. ويحدث مثل هذا التفاعل طيلة الوقت. وليس هناك جسيم منعزل كما قد يبدو لأول وهلة.

كلمةً فريدة في صعوبتها، أو أنهم كانوا يفكِّرون في عملٍ مؤذٍ. وقد وجد هو بدوره أن الإجابات في البداية قد جاءت من كل ضيف في دوره سريعةً على أسئلته مثل «هل هذا الشيء حيوان؟» أو «هل هو أخضر؟» وكلما تقدَّم الوقت في اللعبة أصبحت الأسئلة تستغرق وقتًا أطولَ في الرد، وهو أمر غريب؛ حيث إنه من المفترض أن كل الحاضرين قد اتفقوا على ذلك الشيء، وأن الإجابة المطلوبة نعم أو لا. فلماذا يستغرق الشخص الموجَّه له السؤال وقتًا طويلًا في التفكير قبل أن يجيب؟ وفي النهاية، وعندما لم يتبقَّ لويلر سوى سؤال واحد، خمَّن ويلر «هل هو سحاب؟» وكانت الإجابة نعم مصحوبة بموجةٍ عارمةٍ من الضحك من قِبَل الجموع، وسُمح له بالاطلاع على السر.

كانت هناك خطة تآمرية على ألا يتفقوا على الشيء المطلوب تخمينه، لكن كان هناك اتفاقٌ على أن كل شخصٍ عندما يُسأل فعليه أن يعطي إجابةً نزيهة تتعلَّق بشيء حقيقي



شكل ٩-٢٣: يمكن أن يظهر بروتون، ونيوترون مضاد، وبيون لا شيء على الإطلاق، كتموجات للفراغِ لفترةٍ قصيرة من الزمن قبل التلاشي (أ). ويمكن تمثيل هذا التفاعلِ نفسِه كحلقة في الزمان، بواسطة بروتون ونيوترون يتعقَّب كلٌّ منهما الآخر حول دوامة من الزمان ترتبط بالبيون (ب). وكلٌّ من وجهتي النظر صحيحة بالقدْرِ نفسِه.



شكل ٩-٢٤: يمكن للبروتون أن يتعقَّب ذيله عبر الزمان بالطريقةِ نفسِها.

يدور في ذهنه ويتوافق مع كل الإجابات التي طُرحت من قبل. وكلما استمر الحاضرون في اللعب أصبح الأمر أكثرَ صعوبةً للسائل وللمطروح عليهم الأسئلة.

ما علاقة هذا بنظريةِ الكَمِّ؟ مثل مفهومنا عن العالَم الواقعي الموجود هناك عندما لا ننظر إليه، تصوَّر ويلر أن هناك إجابةً واقعية للشيء الذي يحاول التعرُّف عليه. لكن لم تكن هناك إجابة؛ فكلُّ ما كان واقعيًّا هي الإجابات عن الأسئلة، بالطريقة نفسها التي يكون بها الشيء الوحيد الذي نعرفه عن عالَمِ الكَمِّ هو نتائج تجاربنا، وقد نتج جواب السحاب بشكلٍ ما نتيجةَ طرح الأسئلة، وبالمنطق نفسِه فإن الإلكترونات كانت نتيجةَ

عمليةِ التحقُّق التجريبي الدقيق. وتُركِّز القصة على أن المحور الأساسي لنظريةِ الكَمِّ هو أنه ليس هناك ظاهرة أولية يقال عنها ظاهرة إلى أن تُسجَّل كظاهرة. وهذه الطريقة في التسجيل من الممكن أن تؤدي حيَلًا غريبة في مفهومنا اليومي للواقع.

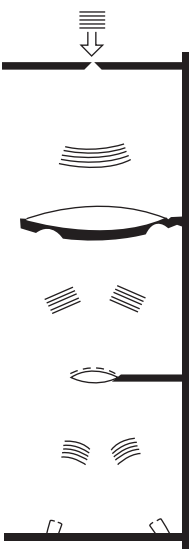
وليوضِّح ويلر هذه المقولة أجرى تجربةً ذهنية أخرى، وهي تحوير لتجربة الشقين، وفي هذه النسخة من اللعبة ربط الشقين بعدسةٍ لتركيز الضوء المار خلال المنظومة، وجرى استبدال الشاشة القياسية بعدسةٍ أخرى تجعل الفوتونات القادمة من كلا الشقين تتباعد. وكل فوتون يعبر خلال أحد الشقين يتجه إلى الشاشة الثانية، ثم يحيد لوجود العدسة الثانية في اتجاه الكشاف الموجود إلى اليسار، إلى جانب أن الفوتون الذي يعبر خلال الشق الآخر سيتجه إلى الكشاف الموجود ناحية اليمين. وبهذا الإعداد للتجربة، فإننا نعرف أيَّ شق مرَّ خلاله كل فوتون. وبكل تأكيد فإن مثل تلك النسخة من التجربة التي نراقب فيها كل شق، لكي نرى كل فوتون يمر، تمامًا كما في حالة التجربة التي لو سمحنا فيها لفوتون واحد عند زمنٍ معيَّن أن يمر خلال الجهاز، فإننا من دون أي لبْسٍ سنحدِّد المسار الذي يتبعه الفوتون، ولا يوجد هنا تداخل لعدم وجود أي تراكب للحالات.

والآن فلنعدِّل في الجهاز مرةً ثانية. نغطي العدسة الثانية بفيلم فوتوغرافي على شكل شرائح طولية كتلك المستخدَمة في النوافذ. ويمكن إغلاق هذه الشرائح الطولية لتكوِّن شاشةً محكمةً تمنع الفوتونات من العبور خلال العدسة والحيود. أو يمكن فتح هذه الشرائح لتسمح للفوتونات بالمرور كما كان في السابق. الآن عندما كانت الشرائح الطولية مغلقة، تصل الفوتونات إلى الشاشة كما في حالة تجربة الثقبين الكلاسيكية. وليس هناك وسيلةٌ تدُلنا من أي الثقبين مرَّ الفوتون، ويوجد الآن نسقُ تداخل كما لو أن كل فوتون منفرد قد مرَّ خلال الثقبين في اللحظةِ نفسها. وهنا تظهر الخدعة في هذه التجربة. فليس من الضروري أن نقرِّر ما إذا كانت الشرائح الطولية مفتوحة أو مغلقة إلا بعد مرور الفوتون خلال الثقبين. فمن الممكن أن ننتظر حتى يمر الفوتون خلال الشقين، وعندئذٍ نقرِّر هل سنجري تجربةً يمر فيها الفوتون خلال ثقب واحد أو خلال الثقبين معًا. وفي تجربة الاختيار المتأخر هذه هناك شيء نفعله له تأثيرٌ لا يمكن تتبُّعه من حيث ما الذي نستطيع قوله عن الماضي. فتاريخ فوتون واحد على الأقل يعتمد على اختيارنا كيفيةَ إجراء القياسات.

تأمَّل الفلاسفة مليًّا ولفترة طويلة في حقيقةِ أن التاريخ لا معنَى له، والماضي لا وجودَ له، إلا في الطريقة التي يُسجَّل بها في الوقت الحاضر، وتعزِّز تجربة ويلر للاختيار المتأخر

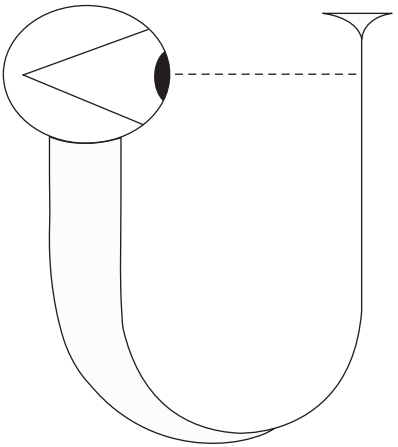
هذا المفهومَ المجرَّد ليصبح في صورةِ مصطلحات صلبة وعملية. «ليس لنا بعد ذلك الحق في أن نقول «ما الذي يفعله الفوتون» — إلى أن يُسجَّل — أكثر من أن نقول «ما الكلمة التي في الحجرة؟» حتى تنتهي لعبة السؤال والرد عليه». (*Some Strangeness*, page 358.)

إلى أي مدًى يمكن الدفع بهذا المفهوم؟ سيخبرك طهاةُ الكَمِّ السعداء، وهم يجهِّزون أجهزةَ الحاسوب، ويتعاملون مع المادة الوراثية، أن كلَّ ذلك ما هو إلا تخمينات فلسفية ليس لها أي معنًى في حياتنا اليومية في العالم الماكروي. ولكن كل شيء في العالَم الماكروي يتكوَّن من جسيماتٍ تخضع لقواعدِ الكَمِّ. فكلُّ ما نطلق عليه واقعًا يتكوَّن من أشياءَ لا نستطيع اعتبارها واقعًا؛ «أي خيار لدينا عدا أن نقول بطريقةٍ ما، ربما سنكتشفها فيما بعد، إن كل الأشياء لا بد أن تُبنى على إحصائيات للمليارات فوق المليارات لمثل أفعال مشاركة المشاهد؟»



شكل ٩-٢٥: تجربة ويلر للشق الطولي المزدوج، والاختيار المتأخر.

واصل ويلر غيرَ خائفٍ إطلاقًا ليصل إلى الفقرة الملهِمة الهائلة (تذكَّر رؤيته حول الإلكترون المنفرد الذي ينسج طريقه عبْر الزمان والمكان)، وذهب إلى اعتبار أن الكون



شكل ٩-٢٦: يمكن تصوُّر العالم ككل مثل تجربة الاختيار المتأخر التي يوجد فيها المشاهدون الذين يلاحظون ماذا يحدث، هي التي تُضفي الواقع المتشابك على أصل كل شيء.

ككل دائرةٌ مثارة ذاتيًّا وتشاركية. وبدءًا من الانفجار الكبير حيث يتمدَّد الكون ويبرد، ثم بعد آلاف الملايين من السنوات ينتج كائناتٍ قادرة على مراقبة الكون و«فعل المشاهدة التشاركية — عن طريق آليةِ تجربةِ الاختيار المتأخر — ويعطي هذا بدوره واقعًا متشابكًا للكون، ليس الآن فقط، ولكن منذ بدايته.» وبملاحظة فوتونات الخلفية الإشعاعية الكونية، صدى الانفجار الكبير، ربما نخلق الانفجار الكبير والكون. فإذا كان ويلر على صواب، فإن فاينمان كان أكثر قربًا مما كان يتصوَّر من الحقيقة عندما قال إن تجربة الثقبين «تحتوي على الغموض الوحيد».

لقد هِمْنا في عالَم الميتافيزيقيا متتبِّعين ويلر، وإنني لأتخيَّل أن كثيرًا من القراء يعتقدون أن كلَّ ما تم يعتمد على تجاربَ افتراضية ذهنية، وبذا فأنت تستطيع أن تلعب أيَّ لعبةٍ تشاء، وإنه فعلًا لا يَهُمُّ أن تلتزم بأي تفسيرات للواقع. وما نحتاج إليه هو بعض الأدلة القاطعة من تجاربَ حقيقيةٍ نبني عليها حكمنا حول أفضل اختيار للتفسير من بين كل الاختيارات الميتافيزيقية المتاحة، وكانت تجربة أسبكت في بداية ثمانينيات القرن العشرين هي البرهانَ القاطع الذي أمدَّنا به؛ برهانًا على أن غرابةَ الكَمِّ ليست فقط «واقعًا»، بل يمكن مشاهدتها وقياسها.

هوامش

(1) A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, “Can quantummechanical description of physical reality be considered complete?” *Physical Review*, volume 47, pp. 777–780, 1935. The paper is among those reprinted in the volume *Physical Reality*, edited by S. Toulmin, Harper & Row, 1970.

(2) Quoted by Pais, page 456.

(3) This is, of course, a great simplification. We should imagine the electron pair actually exchanging many photons as they interact. In the same way, in what follows I refer to “a photon” creating a positron/electron pair, where in reality we would be dealing with more than one photon, perhaps a pair of colliding gamma rays or an even more complex situation.

(4) These ideas are discussed in more detail, but in clear, non – mathematical language, in Chapter 6 of Jayant Narlikar’s *The Structure of the Universe*, Oxford University Press, 1977. Paul Davies’s *Space and Time in the Modern Universe* (Cambridge University Press, 1977) goes into even more detail, and some of the maths can be found in *The Ultimate Fate of the Universe*, by J. N. Islam (Cambridge University Press, 1983).

(5) Quote, based on Wheeler’s explanation of his vision, from Banesh Hoffmann’s *The Strange Story of the Quantum* (Pelican edition, 1963, page 217).

(6) Feynman really went much further than I have indicated in this simple exposition and did develop a treatment of world lines including probabilities, thereby producing a new version of quantum mechanics that was soon shown, by Freeman Dyson, to be exactly equivalent to the original versions of the theory in its results, but has since proved a much more powerful mathematical tool. More of this later.

(7) The implications of relativity theory for our understanding of the universe and the implications for time travel, are covered in more detail in my book *Time Travel for Beginners* (Hodder, London, 2008).

(8) I tried this on a few children and adults, separately. About half the children spotted the trick, but very few of the adults. Those who *didn't* spot it complained of cheating; the fact is, according to Einstein's equations, nature herself is not above this kind of cheating.

(9) In fact, Yukawa made his calculations the other way around. He knew the range of the strong nuclear force, and this enabled him to set limits on the uncertainty of time involved in the nucleon interactions. That in turn gave him a rough idea of the energy, or mass, of the particles that carry (or mediate) the interaction.

(10) See, for example, letters 16–18 in Schrödinger's *Letters on Wave Mechanics*.

(11) He was born in 1911 and was just the right age to receive the full impact of the discoveries of the 1920s. Later generations have been all too willing to accept quantum theory as the received wisdom and use the quantum cookbook as the accepted rules of the game; to the older generation, relief that a consistent theory had been found, together with the natural effects of increasing age, reduced the pioneering drive. Wheeler's and Feynman's generation was inevitably the one that suffered the most soul searching about the meaning of it all, together with Einstein who, as usual, was an exception.

الفصل العاشر

الحكم بعد التجربة

يأتي البرهان التجريبي المباشر للواقع المناقِض لعالَمِ الكَمِّ من النسخ الحديثة لتجربة أينشتاين وبودولسكي وروزين الذهنية. ولا تتضمَّن التجارب الحديثة قياسات موقع حركة الجسيمات وكميتها، بل الحركة المغزلية والاستقطاب، وخاصية الاستقطاب للضوء مشابهةٌ بشكلٍ ما للحركة المغزلية للجسيم المادي. وقد قدَّم ديفيد بوم من كلية بيركبك في لندن فكرةَ قياسِ الحركة المغزلية في نسخةٍ جديدة لتجربة أينشتاين وبودولسكي وروزين الذهنية سنة ١٩٥٢، ولكنها لم تؤخذ بعين الجِدية من أيِّ طرف حتى الستينيات من القرن العشرين، فلم يُجرِ أحدٌ تجاربَ لاختبار تنبؤات نظريةِ الكَمِّ فعليًّا في مثل هذه الظروف. وقد حدث الاختراق المفاهيمي في بحثٍ نُشر سنة ١٩٦٤ لجون بل عالم الفيزياء الذي يعمل في المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية القريبة من جنيف،[1] ولكن حتى نفهم هذه التجاربَ نحتاج أن نعود إلى الوراء قليلًا قبل هذا البحث المحوري ونتأكَّد من أن لدينا فكرةً واضحة عما يعنيه كلٌّ من الحركة المغزلية و«الاستقطاب».

تناقُض الحركة المغزلية

لحسن الحظ فإن كثيرًا من غرائب الحركة المغزلية لجسيمٍ مثل الإلكترون، يمكن إهمالها في هذه التجارب. وليس من المهم إذا «دار» الجسيم مرتين قبل أن يظهر بالوجه نفسِه مرةً ثانية. وما يهم هنا هو أن الحركة المغزلية تحدِّد الاتجاه في الفراغ، إلى أعلى وإلى أسفل، الأمر الذي يماثل الطريقة التي تدور بها الأرض التي تحدِّد اتجاه محور شمال-جنوب. وبالمقارنة بمجال مغناطيسي منتظم فإن الإلكترون يستطيع أن يستقيم في حالتين محتملتين فقط؛ في اتجاه المجال أو في الاتجاه العكسي، «فوق» أو «تحت» استنادًا إلى طريقةٍ عشوائية. تبدأ تعديلات بوم على دوافع أينشتاين وبودولسكي وروزين

بزوجٍ من البروتونات مرتبط الواحد بالآخر في ترتيبٍ يُطلَق عليه الحالة الانفرادية. ويكون العزم الزاوي الكلي دائمًا لمثل هذا الزوج من البروتونات مساويًا للصفر، وعندئذٍ نستطيع أن نتصوَّر أن الجزيء قد انشطر إلى الجسيمين المكوِّنين له أصلًا، وتفرَّقا في اتجاهاتٍ معاكسة. ويمكن أن يكون لكلٍّ من هذين البروتونين عزم زاوي وحركة مغزلية، ولكن لا بد أن تكون الحركة المغزلية لكلٍّ منهما متساوية ولها قيمة عكسية لنتأكد من أن المجموع لزوج البروتونات ما زال صفرًا كما كان الأمر عندما كانا معًا.[2]

وهذا تنبؤ بسيط حيث تتفق نظريةُ الكَمِّ والميكانيكا الكلاسيكية معًا، فإذا عرفتَ قيمةَ الحركة المغزلية لإحدى جسيمات الزوج فإنك ستعرف قيمة الآخر؛ حيث إن المجموع صفر. ولكن كيف يمكن أن تقيس الحركة المغزلية لجسيم واحد؟ القياس سهل في العالم الكلاسيكي. ذلك لأننا نتعامل مع الجسيمات في عالَمٍ ثلاثي الأبعاد، وبذا علينا أن نقيس الاتجاهات الثلاثة للحركة المغزلية. وبجمعِ مكوِّنات الأبعاد الثلاثة سنحصل على الحركة المغزلية الكلية (باستخدام قواعد حساب المتجهات التي لن أخوض فيها هنا). ولكن الوضع في عالَمِ الكَمِّ مختلِف جدًّا. فأولًا، عند قياسِ أحدِ مكوِّنات الحركة المغزلية فإنك تغيِّر من المكوِّنات الأخرى، ولمتجهات الحركة المغزلية خصائصُ تكاملية ولا يمكن قياسُها في الوقتِ نفسِه بأي صورةٍ أكثرَ من قياس الموضع والزخم في الوقتِ نفسِه أيضًا. وثانيًا: الحركة المغزلية لجسيمٍ مثل الإلكترون أو البروتون هي نفسُها مُكمَّمة. فإذا قيست الحركة المغزلية في أي اتجاه فإنك ستحصل على إجابةٍ واحدة أعلى أو أسفل، وفي بعض الأحيان تكتب +١ و−١. وبقياس الحركة المغزلية في أحد الاتجاهات وليكن مثلًا محورَ z، قد نحصل على إجابة +١ (وهناك احتمال ٥٠٪ تمامًا أن تكون نتيجة التجربة كذلك). والآن قِس الحركة المغزلية في اتجاهٍ آخر وليكن المحورَ y. وأي إجابة ستصل إليها، ارجع لقياس الحركة المغزلية للاتجاه الأول مرة أخرى، القيمة التي «تعرفها» الآن. كرِّر التجربة مرارًا وافحص النتائجَ التي توصَّلت إليها. والنتيجة أن قياسنا للحركة المغزلية للجسيم في الاتجاه z، ومعرفتنا أنه يتَّجه إلى «أعلى» قبل قياس الحركة في الاتجاه y، لن يغيِّر معرفتنا الأولى بشيء عند الاتجاه لقياس الحركة في الاتجاه z مرةً أخرى، والجواب سيكون إلى «أعلى» نصف الوقت فقط. وقياس متجه الحركة المغزلية التكاملية قد حافظ على حالة عدم اليقينِ الكَمِّي التي قيست مسبقًا.[3]

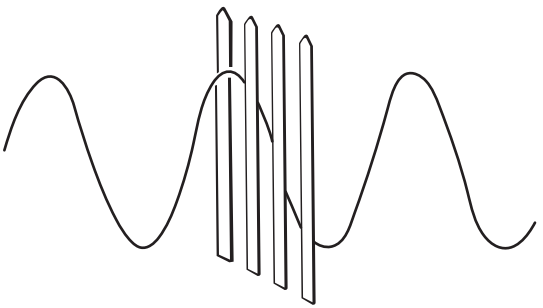
وعليه، ماذا يحدث إذا حاولنا قياسَ الحركة المغزلية لأحد الجسيمين المنفصلين؟ فإذا أخذنا في الاعتبار أن الجسيمين منفصلان فقد نتخيَّل أن كل جسيم يمر بتموجاتٍ

عشوائية في مكوِّنات حركته المغزلية، التي تشوِّش أي محاولة لقياس الحركة المغزلية الكلية لأيٍّ من الجسيمين. ولكن إذا أخذناهما معًا، فلا بد أن تكون الحركة المغزلية لكلٍّ منهما متساوية، وعكس بعضهما. وعليه فإن التموُّجات العشوائية للحركة المغزلية لأيهما لا بد أن تتوازن وتتساوى وتصبح عكس التموُّجات «العشوائية» في مكونات الحركة المغزلية للجسيم الآخر البعيد جدًّا. وكما هو مذكور في دفوع أينشتاين وبودولسكي وروزين الأصلية فإن الجسيمات ترتبط بعضها ببعض بواسطة الفعل عن بُعد. وقد اعتبر أينشتاين هذه «اللامحلية الشبحية» هراء، مما يعني وجود خلل في نظريةِ الكَمِّ. وقد استعرض جون بل كيف أن التجارب يمكن إعدادها لقياس هذه اللامحلية الشبحية وإثبات أن نظريةَ الكَمِّ صحيحة.

لغز الاستقطاب

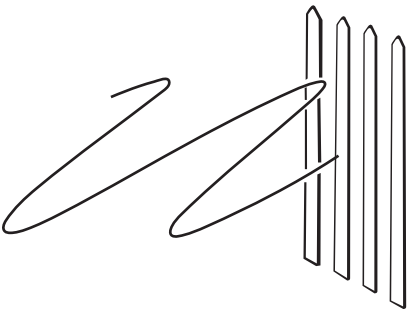
تضمَّنت معظمُ التجارب التي أُجريت حتى هذه اللحظةِ لعمل هذا الاختبار استقطابَ الفوتونات بدلًا من الحركة المغزلية للجسيمات المادية، لكن المبدأ هو نفسه. فالاستقطاب خاصيةٌ تحدِّد الاتجاه في الفراغ المرتبط بفوتون أو بشعاع من الفوتونات تمامًا كما أن الحركة المغزلية تحدِّد الاتجاه في الفراغ المرتبط بالجسيمات المادية. فنظارةُ الشمس البولارويد تعمل عن طريق حجْب الفوتونات التي ليس لها استقطاب معيَّن جاعلةً المنظرَ أمام مرتدي النظارة أكثرَ إظلامًا. تصوَّر أن نظارة الشمس مصنوعةٌ من مجموعة من الشرائح مثل الستائر المعدنية، وأن الفوتونات تحمل رماحًا طويلة. كل الفوتونات التي تمسك بالرماح مائلة بعض الشيء عبر صدورها تستطيع أن تمرق خلال الشرائح وتشاهدها بعينيك، وكل الفوتونات التي تحمل الرماحَ متجهة إلى أعلى لن تستطيع العبور خلال الشقوق الضيقة وستُحجب. ويحتوي الضوء العادي على كل أنواع الاستقطاب؛ الفوتونات برماحها الممسوكة بزوايا مختلفة. وهناك أيضًا نوعٌ من الاستقطاب يسمَّى الاستقطابَ الدائري؛ حيث يتغيَّر اتجاه الاستقطاب أثناء تقدُّم الفوتون، وكما أنني أحاول مزْج تماثلاتي، فلنتصوَّر الفتاةَ التي تسير في مقدمة العرض وهي تحرِّك عصاها في حركةٍ دائرية. ويأتي هذا بطريقتين مختلفتين؛ واحدة تجاه اليمين والأخرى تجاه اليسار. ويمكن استخدام ذلك أيضًا في اختباراتِ دقةِ النظريةِ الكَمِّية للعالم. فالضوء المُستقطَب في أحد المستويات الذي به كل الفوتونات تحمل رماحها بالزاويةِ نفسِها يمكن أن ينتج عن طريق الانعكاس في ظل الظروف الصحيحة، أو بإمرار الضوء خلال مادةٍ مثل عدسة

بولاروید التي تسمح فقط بمرور استقطابٍ معيَّن. ويُظْهر الضوء المستقطَب في أحد المستويات مرةً أخرى قواعدَ عدمِ اليقينِ الكَمِّي أثناء عملها.



شكل ١٠-١: موجات مستقطَبة رأسيًّا تمرق عبر «ألواح السور».

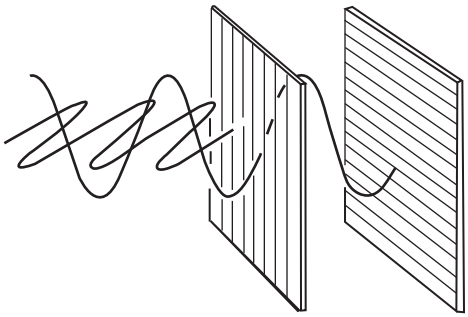
إن استقطاب الفوتون في اتجاهٍ أو آخر هي خاصية «نعم/لا» مثل الحركة المغزلية للجسيم على المستوى الكَمِّي. إما أنه يُستقطَب في اتجاهٍ معيَّن — ربما رأسيًّا — أو لا. فالفوتونات التي تمر خلال شاشة معدنية ستُحجَب حتمًا بشاشة أخرى موضوعة بزاوية قائمة. فإذا كان المُستقطِب الأول مثل شاشةٍ معدنية بشرائح أفقية، فالشاشة الثانية ستكون مثل ألواح سور مرصوصة رأسيًّا. والشيء المؤكَّد بما فيه الكفاية أنه عندما يكون هناك قطعتان من المادة المُستقطِبة «متعامدتين» بهذا الشكل فلن يمرَّ أيُّ ضوء. لكن ماذا لو افترضنا أن لوح البولاروید الثاني تُصنع «شرائحه» بزاوية ٤٥ درجة مع شرائح المُستقطِب الأول؟ فالفوتونات التي تصل إلى المُستقطِب الثاني تمثِّل كلها زاويةً قياسها ٤٥ درجة مع المستوى، وبناء على الصورة الكلاسيكية فالفوتونات لا تمر. أما الصورةُ الكَمِّية فهي مختلفة. ومن هذا المنطلق يملك كل فوتون فرصة ٥٠٪ للعبور خلال المستقطِب غير المتوازي مع الأول، وبالفعل تمر نصف الفوتونات. والآن يأتي الأمر الغريب حقًّا. فالفوتونات التي استطاعت العبور صارت بالفعل ملتوية. وقد جرى استقطابها بزاوية ٤٥ درجة بالنسبة إلى المستقطِب الأصلي، وعليه فماذا يحدث إذا قابلت الآن هذه الفوتونات مستقطِبًا آخر يصنع زاويةً قائمة مع المُستقطِب الأول؟ وحيث إن الزاوية القائمة ٩٠ درجة، فإن الفوتونات لا بد أن تكون بزاوية ٤٥ درجة مع هذا المُستقطِب أيضًا. وتمر نصف الفوتونات كما حدث في السابق.



شكل ١٠-٢: حجب موجات مستقطَبة أفقيًّا.

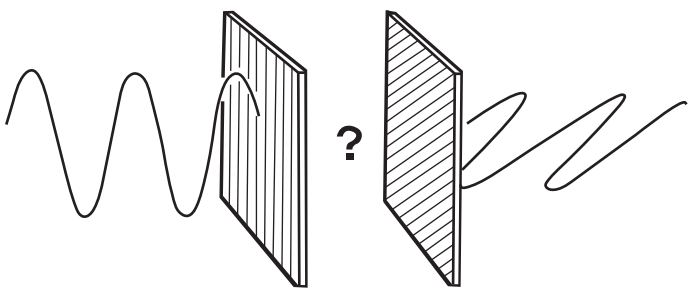
وعندما يوجد استقطابان متعامدان فلن يمر أيُّ ضوء. لكن إذا وضعت مستقطِبًا ثالثًا بين الاثنين المتعامدين بحيث يصنع زاوية ٤٥ درجة مع كلٍّ منهما، فإن ربع الضوء الذي يمر خلال المستقطِب الأول يمر كذلك خلال الاثنين الآخرين. ويبدو الأمر وكأننا وضعنا سياجين يمنعان دخول الحيوانات الضالة بنسبة ١٠٠٪ إلى ممتلكاتنا، ولنكون أكثرَ حرصًا قرَّرنا بناء سياج ثالث بينهما لنطمئن أكثر. ولكن المفاجأة أننا وجدنا أن بعض الحيوانات الضالة التي منعها السياجُ المزدوج لم تجِد أيَّ صعوبة في العبور خلال السياجات الثلاثة كما لو كان لا يوجد أي سياج. وبتغيير التجربة فإننا نغيِّر من طبيعةِ الواقعِ الكَمِّي. وعندما نستخدم مستقطِباتٍ بزوايا مختلِفة فإننا فعليًّا نقيس استقطاب المكوِّنات المختلِفة لمتجه، وكل قياس جديد يبطل شرعيةَ المعلومات التي حصلنا عليها من كل القياسات السابقة.

ويُدخل هذا تنويعةً جديدة على موضوع أينشتاين وبودولسكي وروزين. فنحن نتعامل مع فوتونات بدلًا من جسيماتٍ مادية، ولكن التجربة الأساسية ما زالت كما هي. ولنتخيل الآن عمليةً ذريةً تُنتِج فوتونين يتحرَّكان في اتجاهين مختلفين. هناك عمليات واقعية كثيرة تحدث بهذا الشكل، وفي مثل هذه العمليات هناك دائمًا علاقةٌ بين استقطاب الفوتونين؛ فهما إما أن يُستقطبا في نفسِ الاتجاه أو يُستقطبا بشكلٍ ما في اتجاهٍ معاكس. وللتبسيط سنتصوَّر في تجربتنا الذهنية أن الاستقطابين لا بد أن يكونا هما نفسهما. وبعد فترة طويلة من ترك الفوتونين مكانَ ميلادِهما نقرِّر قياسَ استقطاب أي منهما. فلنا حرية الاختيار، وهذا شيء اختياري كليةً، في أي اتجاه ستُرصُّ موادُّ الاستقطاب، وبمجرد أن نفعل ذلك هناك فرصة معينة في أن يمر الفوتون خلالها. وسنعرف فيما بعد إذا



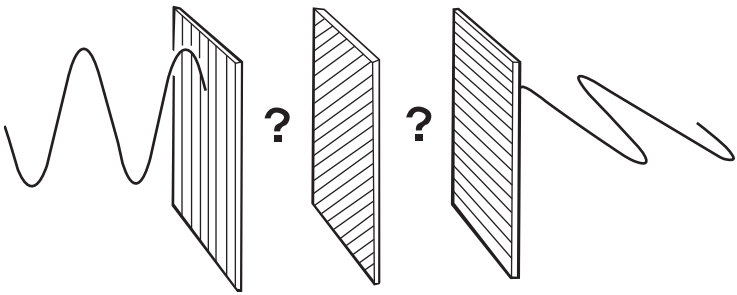
شكل ١٠-٣: الاستقطابات المتقاطعة توقِف كل الموجات.

كان استقطاب الفوتون إلى «أعلى» أو إلى «أسفل» لهذا الاتجاه المختار في الفراغ، ونعلم أنه — عبر الفضاء الشاسع — يُستقطَب الفوتونُ الآخرُ بالطريقةِ نفسِها. ولكن كيف يُعرف الفوتونُ الآخرُ؟ وكيف له أن يكيِّف من نفسه لكي يمرَّ بالاختبار بطريقةِ الفوتون الأول نفسِها أو يفشل في المرور كما يفشل الفوتون الأول؟ وبقياسنا لاستقطاب الفوتون الأول فإننا نُحدِث انهيارًا للدالة الموجية ليس فقط لفوتون واحد بل لآخرَ بعيدٍ تمامًا عند اللحظةِ نفسِها.



شكل ١٠-٤: مستقطِبان يصنعان زاوية ٤٥ درجة يمرِّران نصف الموجات التي مرَّت من الأول!

ومع الأمور الغريبة في هذه التجربة، فإنها ليست أكثرَ غرابة من اللغز الذي رسمه أينشتاين ورفاقه للاستحواذ على انتباه العلماء في ثلاثينيات القرن العشرين. إن تجربةً



شكل ١٠-٥: ثلاثة مستقطِبات تمرِّر ربع الموجات التي تعبر من الأول، حتى مع عدم مرور أيٍّ منها إذا أزلنا المستقطِب الأوسط.

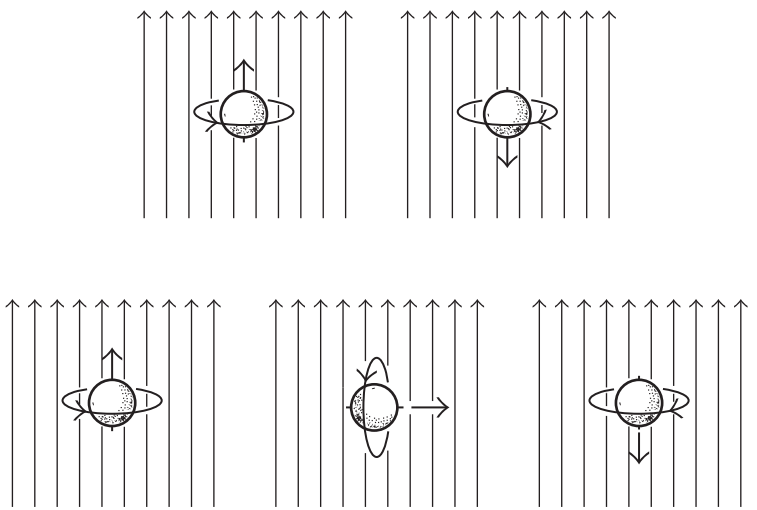
واقعيةً واحدة تعدل أكثرَ من نصف قرن من النقاش حول معنى تجربة ذهنية، وقد أعطى بل التجريبيين وسيلةً لقياس تأثيرات هذا الفعل الشبحي عن بُعد.

اختبار بل

كرَّس برنارد ديسباجنات، العالِم النظري مثل ديفيد بوم من جامعة باريس-ساوث الكثيرَ من الفكر في تضمينات عائلة تجارب أينشتاين وبودولسكي وروزين. وفي مقاله المذكور سابقًا المنشور في مجلة «ساينتفيك أمريكان»، وفي إسهامه في مجلد «إدراك الفيزيائيين الحسي للطبيعة» الذي حرَّره ميهرا؛ حيث وضع النقاط على الحروف للأساس الذي بنى عليه بل حلَّ اللغز. يقول ديسباجنات إن رؤيتنا اليومية للواقع ترتكز على ثلاثة افتراضات أساسية. الأول أن هناك أشياءَ واقعيةً موجودة سواء شاهدناها أم لا، والثاني أنه يُعد أمرًا شرعيًّا أن نصل إلى نتيجةٍ من مشاهدات قوية أو تجارب، والثالث أنه لا يمكن أن ينتشر أيُّ تأثير أسرع من سرعة الضوء، الذي أطلق عليه بنفسه «المحلية». وكل هذه الافتراضات الثلاثة هي أساس رؤيتنا «الواقعية المحلية» للعالم.

يبدأ اختبار بل من رؤيةٍ محليةٍ واقعيةٍ للعالم. وبمدلول تجربة الحركة المغزلية للبروتون، ومع أن مَن يُجري التجربة لن يعرف أبدًا المكوِّنات الثلاثة للحركة المغزلية للجسيمِ نفسِه، فإنه يستطيع أن يقيس ما يفضِّله منها. وإذا أطلقنا على المحاور الثلاثة X وY وZ، فقد وجد أنه في كل مرة يسجل فيها +١ للحركة المغزلية X لبروتون، فإنه يجد قيمة −١ للحركة المغزلية X لنظيره، وهكذا. ولكن إذا سمح له بقياس حركة مغزلية X

لبروتون وحركة مغزلية Y (أو Z ولكن ليس الاثنان معًا) لرفيقه، فمن الممكن الحصولُ على معلوماتٍ عن الحركة المغزلية للاتجاهين X وY لكل زوج.



شكل ١٠-٦: تستطيع الجسيمات التي لها حركة مغزلية مقدارها نصف عدد صحيح أن تصطف إما موازية للمجال المغناطيسي أو في الاتجاه العكسي. أما الجسيمات ذات الحركة المغزلية بقيمِ أعدادٍ صحيحة فقادرةٌ أيضًا على أن تصطف عمودية على المجال.

وحتى من ناحية المبدأ، فهذا أمرٌ ليس سهلًا بالمرة، ويتضمَّن قياسًا عشوائيًّا للحركة المغزلية لكثير من أزواج البروتونات، واستبعاد تلك التي يتصادف قياس حركتها نفسها في كل فرد من الزوج. وهذا يمكن عمله، وتعطي هذه المعلومات الفاحص، من حيث المبدأ، مجموعةً من النتائج التي قد يجري التعرُّف بها على الحركة المغزلية لأزواج من البروتونات في مجموعات يمكن أن تُكتب XY وXZ وYZ. وما أراد بل أن يبينه في مقاله الكلاسيكي سنة ١٩٦٤ أنه إذا أُجريت تجربة مثل هذه فإنه وفقًا للرؤى الواقعية المحلية للعالم، فإن عدد الأزواج التي لها حركة مغزلية موجبة ولها مكونات (X^+Y^+) لا بد أن تكون دائمًا أقلَّ من المجموع الكلي للأزواج التي تظهر فيها قياسات XZ، YZ كلها قيمًا موجبة للحركة المغزلية $(X^+Z^+ + Y^+Z^+)$. وتتوالى الحسابات مباشرةً من الحقيقة

الواضحة أنه إذا أظهرت قياسات بروتون معيَّن أن له حركة مغزلية X^+ وY^- مثلًا، فإن حركته المغزلية الكلية لا بد أن تكون إما $X^+Y^-Z^+$ أو $X^+Y^-Z^-$. وتأتي باقي النتائج من دفوعٍ رياضية بسيطة مبنية على نظرية المجموعات. ولكن في ميكانيكا الكَمِّ تختلف القواعد الرياضية، وإذا تم التعامل بها بشكل صحيح فإنها تأتي بتنبؤ عكسي وهو أن عدد أزواج X^+Y^+ «أكثر» وليس أقل من عدد أزواج X^+Z^+، Y^+Z^+ مجتمعة.

ولأن الحسابات عُبِّر عنها في الأصل بدءًا بالرؤية المحلية الواقعية للعالم، فالمصطلح المتَّفق عليه هو أن عدم المساواة «الأول» يُطلق عليه «عدم مساواة بل»، وإذا انتُهِكت عدم مساواة بل هذه فإن الرؤية الواقعية المحلية للعالم خادعة، ولكن نجحت نظريةُ الكَمِّ مرة أخرى عند خوض اختبار آخر.

البرهان

من المفترض أنه من الممكن استخدام هذا الاختبار لقياس الحركة المغزلية للجسيمات بكفاءة متساوية، وهي عادة صعبة جدًّا في إجرائها أو أن تستخدم لقياس استقطاب الفوتونات التي هي أسهل في إجرائها مع أنها ما زالت صعبة. ولأن كتلة سكون الفوتونات هي صفر، وتتحرك بسرعة الضوء ولا سبيل لها لتمييز الزمن، فإن بعض الفيزيائيين لا يرتاحون لإجراء تجارب تتضمَّن الفوتونات. وليس واضحًا في الواقع ما هو مفهوم المحلية للفوتون. ومع أن معظم اختبارات عدم مساواة بل، التي أجريت حتى الآن تتضمَّن قياسات استقطاب الفوتونات، فإنه من المهم للغاية أن الاختبار الوحيد الذي أُجري حتى تلك اللحظة قد استُخدم فيه بالفعل قياسات الحركة المغزلية لبروتون، وهو يعطي نتائج تنتهك عدم مساواة بل؛ ولذا فهي تدعم الرؤيةَ الكَمِّية للعالم.

لم يكن هذا أولَ اختبار لعدم مساواة بل، وإنما قدَّم فريق من مركز ساكلي للأبحاث النووية بفرنسا تقريرًا سنة ١٩٧٦ حول ذلك. وتتبع التجربة بشكل كبير التجربةَ الذهنية الأصلية، وتتضمَّن قذفَ بروتونات ذات طاقة منخفضة على هدفٍ يحتوي عددًا كبيرًا من ذرات الهيدروجين. وعندما تصدم الأنوية نواة ذرة هيدروجين — الذي هو بروتون آخر — يتداخل الجسيمان من خلال الحالة الانفرادية، ويمكن قياس مكوِّنات حركتهما المغزلية. ولكن صعوبة القيام بتلك القياسات هائلة. ويسجِّل الكشاف معظم الفوتونات فقط، وخلافًا للعالم المثالي في التجربة الذهنية، حتى عندما تجري القياسات فليس من

الممكن دائمًا تسجيل مكونات الحركة المغزلية دون لبْس. إلا أن نتائج التجربة الفرنسية تبيِّن أن الرؤى الواقعية المحلية للعالم خاطئة.

وقد أجريت الاختبارات الأولى لعدم مساواة بل بجامعة كاليفورنيا، بيركلي، باستخدام الفوتونات، وقُدِّم تقرير عن ذلك سنة ١٩٧٢. ومع بداية سنة ١٩٧٥ أُجريت ستة من مثل هذا النوع من الاختبارات كانت نتائجُ أربعة منها تنتهك عدم مساواة بل. ومهما كانت الشكوك حول معنى المحلية للفوتونات، فإن هذا برهان آخر صارخ لمصلحة ميكانيكا الكَمِّ، لا سيما وأن النتائج استندت إلى أساليبَ مختلفةٍ في الأساس. وفي النسخة المبكرة للتجربة الخاصة بالفوتونات، كانت هذه الفوتونات تأتي من ذرات الكالسيوم أو الزئبق، التي يمكن إثارتها بواسطة ضوء الليزر إلى الحالة المختارة من الطاقة.[4] وطريق العودة من الحالة المثارة إلى الحالة الأرضية يتضمَّن إلكترونًا على مرحلتين؛ أولًا الانتقال إلى حالة أخرى أقلَّ إثارة، ثم الانتقال إلى الحالة الأرضية، وفي كل مرحلة ينتج فوتون واحد. وفي المراحل التي جرى اختبارها في هذه التجارب، فإن الفوتونين الناتجين يكونان مصحوبين باستقطابات مترابطة. وعندئذٍ تُحلَّل الفوتونات القادمة على شكل شلال باستخدام عدَّاد الفوتونات الموضوع خلف مرشحات الاستقطاب.

قام التجريبيون في منتصف سبعينيات القرن العشرين بأولى القياسات مستخدمين تنويعةً أخرى على هذا الموضوع. كانت الفوتونات الناتجة في هذه التجارب هي أشعة جاما نتيجة تلاشي بوزيترون وإلكترون. ومرة ثانية لا بد لاستقطاب الفوتونين أن يكونا مرتبطين، ونجد من جديد أنه إذا حاولت قياس تلك الاستقطابات فإن النتيجة التي تصل إليها هي تناقض عدم مساواة بل.

وعليه فإن خمسة من الاختبارات السبعة الأولى لعدم مساواة بل كانت في مصلحة ميكانيكا الكَمِّ. وقد ركَّز ديسباجنات في مقاله بمجلة «ساينتفيك أمريكان» على أن هذا دليلٌ أقوى في مصلحة نظريةِ الكَمِّ وليس كما يبدو لأول وهلة. ولطبيعة هذه الاختبارات والصعوبات المصاحبة لإجرائها فإن «وجود جوانب خلل كثيرة منهجية في تصميم أي تجربة يمكن أن يدمِّر البرهان على الارتباط الواقعي ... ومن جهة أخرى، فإنه من الصعوبة أن تتخيل أن خطأ تجريبيًّا يمكن أن يسبِّب ترابطًا خادعًا في خمسة اختبارات أجريت منفصلة. والأكثر من ذلك فإن نتائج هذه الاختبارات لم تنتهك عدم مساواة بل فقط، وإنما أيضًا تناقضها بالضبط كما تنبأت ميكانيكا الكَمِّ.»

ومنذ منتصف سبعينيات القرن العشرين، أُجري المزيد من الاختبارات، التي صُمِّمت لإزالة أي ثغرات باقية في تصميم التجارب. وقد تطلب الأمر أن توضع أجزاءُ الاختبار

متباعدةً بعضها عن بعض بما فيه الكفاية حتى إن أي إشارة «بين الكشافات»، التي قد تعطي ترابطًا زائفًا، سيكون عليها أن تنتقل بسرعةٍ أكبرَ من سرعة الضوء، وجرى عمل ذلك وما زال يُنتهك عدم المساواة. أو ربما يحدث الترابط لأن الفوتونات تعرف «حتى أثناء تولُّدها» أيُّ نوع من الأجهزة قد أُعِدَّ لاصطيادها. ويمكن أن يحدث ذلك دون الحاجة إلى إشاراتٍ أسرعَ من الضوء إذا أعددت التجهيزات مقدَّمًا ووجدت دالة موجة عامة تؤثِّر على الفوتون عند مولده. وعليه فإن الاختبار النهائي، حتى تلك اللحظة، لعدم مساواة بل يتضمَّن تغيير بنية التجربة، في حين تكون الفوتونات في مسارها بنفس الطريقة التي أُجريت بها تجربة الشق الطولي المزدوج، حيث يمكن تغييرُها ويكون الفوتون في مساره في تجربة جون ويلر الذهنية. هذه هي التجربة التي أغلق فيها فريق آلان أسبكت من جامعة باريس ساوث آخرَ أعظمِ الثقوب في النظريات الواقعية المحلية سنة ١٩٨٢.

أجرى أسبكت ورفاقه اختبارات عدم المساواة بالفعل مستخدمين فوتوناتٍ ناتجةً من عملية تعاقبية، وقد وجدوا أن هناك انتهاكًا لعدم المساواة. ويتضمَّن تحسينهم للتجربة استخدام مفتاحٍ يغيِّر من اتجاه شعاع الضوء المار. ويمكن تغيير اتجاه الشعاع في اتجاه أيٍّ من مرشحي الاستقطاب، ويقيس كلٌّ منهما اتجاهًا مختلفًا من الاستقطاب، ويوجد خلفَ كلٍّ منهما كشافٌ للفوتونات خاص به. ويمكن تغيير اتجاه شعاع الضوء المار عن طريق المفتاح بسرعةٍ فائقة غير ١٠ نانو ثانية (١٠ أجزاء من ألف مليون جزء من الثانية ١٠ × ١٠$^{-٩}$ ثانية) بواسطة تصميمٍ آليٍّ يولِّد إشارةً شبه عشوائية. ونظرًا لأن الفوتون يستغرق زمنًا قدره ٢٠ نانو ثانية لينتقل من الذرة التي تولَّد منها إلى قلب التجربة ليصل إلى الكشاف نفسه، لا توجد أيُّ طريقة يمكن بواسطتها للمعلومات الخاصة بإعداد التجربة أن تنتقل من جزء من التجهيزات إلى جزءٍ آخر وتؤثِّر على أيٍّ من القياسات، إلا إذا كان هذا المؤثِّر ينتقل أسرعَ من الضوء.

ماذا يعني ذلك؟

التجربة تامة تقريبًا؛ فحتى بالرغم من أن فتح وغلق شعاع الضوء لا يكون عشوائيًّا تمامًا، فإنه يتغيَّر لكلٍّ من شعاعي الفوتونات بطريقةٍ منفصلة. والخطأ الحقيقي الوحيد المتبقي هو أن معظم الفوتونات الناتجة لا تُرصد؛ لأن الكشافاتِ نفسَها متدنية الكفاءة جدًّا. وما زال من الوارد أن نجادل بأن الفوتونات التي تنتهك عدم مساواة بل تُرصد،

وأن الباقي قد يخضع لعدم المساواة فقط إذا أمكن رصده، ولكن حتى تلك اللحظة لم يفكِّر أحدٌ في تصميمِ تجربةٍ لاختبار هذه الإمكانية غير المحتملة، وأنه ليبدو أن هذا الجدل يمثِّل قمة اليأس. وفور إعلان نتائج فريق أسبكت قبل أعياد الميلاد سنة ١٩٨٢ مباشرةً لم يشكَّ أحدٌ بشكلٍ جادٍّ في أن اختبار بل يؤكد تنبؤاتِ نظريةِ الكَمِّ.[5] وفي الواقع فإن نتائج هذه التجربة، ونقصد النتائجَ الأفضل التي يمكن تحقيقها بتقنيةِ هذه الأيام، تناقضُ عدم المساواة بدرجةٍ أكبر من أي اختبارات سابقة، وتتفق بشكلٍ جيد جدًّا مع تنبؤات ميكانيكا الكَمِّ. وكما قال ديسباجنات: «إن التجارب التي أُجريت حديثًا كان من الممكن أن ترغم أينشتاين على تغييرِ مفهومه عن الطبيعة في نقطةٍ كان يعتبرها حيوية ... ويمكن أن نقول بأمانٍ إن عدم الانفصال هو الآن واحد من أكثرِ المفاهيم العامة رسوخًا في الفيزياء.»[6]

ولا يعني هذا أن هناك أيَّ بارقةِ أملٍ في إمكانية القدرة على إرسال رسالة بسرعةٍ تفوق سرعة الضوء. وليس هناك أيُّ أملٍ معقود لنقل المعلومات المفيدة بهذه الطريقة؛ لأنه ليس هناك وسيلةٌ لربط حدثٍ معيَّن، يسبِّب حدثًا آخر، بالحدث الآخر الذي تسبَّبت فيه هذه العملية. إنها سِمةٌ أساسية للتأثير الذي ينطبق فقط على الأحداث التي لها سببٌ مشترك؛ تلاشي زوج بوزيترون/إلكترون، وعودة إلكترون إلى الحالة الأرضية، وانفصال زوج من البروتونات من الحالة الانفرادية. ويمكنك أن تتخيَّل كشافَين وُضعا متباعدَين في الفراغ، وكذلك فوتونات من مصدرٍ مركزي تتطاير في اتجاهِ كلٍّ من الكشافين، وربما تتخيَّل تقنيةً بسيطة معينة تغيِّر استقطاب أحد شعاعي الفوتونات، حتى يلاحظ مراقبٌ بعيدٌ عن الكشاف الثاني تغييرًا في استقطاب الشعاع الآخر. ولكن أي نوع من الإشارة يتغيَّر؟ إن التغيُّر الأصلي في الاستقطاب أو الحركة المغزلية للجسيمات في الشعاع هي نتيجة العمليات العشوائية التي لا تحمل أيَّ معلوماتٍ بذاتها، وكلُّ ما سيراه المشاهد هو نسق عشوائي مختلف عن النسق العشوائي الذي قد يراه من دون المعالجة البارعة للمستقطِب الأول! وحيث إنه لا توجد معلومات في النسق العشوائي، فذلك يكون بلا جدوى. والمعلومات موجودة في الفرق بين النسقين العشوائيين، غير أن النسق الأول لا يوجد أبدًا في العالم الواقعي، ولا توجد أي وسيلة لاستخلاص المعلومات.

لكن لا تُفرِط في الإحباط؛ حيث إن تجربة أسبكت والتجارب السابقة عليها تضع بالتأكيد صورةً مختلفة للعالم عما نعرفه في حياتنا اليومية بالفطرة. وتخبرنا أن الجسيمات التي كانت في وقتٍ ما مرتبطةً بعضها ببعض في تفاعلٍ تظل بطريقةٍ ما أجزاءً من نظام واحد، تتجاوب معًا في تفاعلات أخرى، وفي النهاية فإن كل شيء تقريبًا

نراه ونلمسه ونشعر به يتكوَّن من تجمعاتٍ لجسيمات هي بدورها كانت متداخلة مع جسيماتٍ أخرى عبر الزمن في الماضي، وحتى لحظة الانفجار الكبير الذي جاء منه الكون الذي نعرفه. إن الذرات في جسدي تتكوَّن من جسيماتٍ كانت في زمنٍ ما تندفع في تقاربٍ شديد في كرة النار الكونية مع جسيمات أخرى هي الآن جزء من نجمٍ بعيد، أو مع جسيماتٍ قد تكون جزءًا من مخلوقٍ حي آخر موجود على مسافةٍ بعيدة فوق كوكبٍ لم يُكتشف بعد. ومن المؤكد أن الجسيمات التي يتكوَّن منها جسدي كانت في وقتٍ ما تندفع متقاربةً وتتداخل مع الجسيمات التي تكوِّن الآن جسدك. ونحن جميعًا جزء من نظام واحد تمامًا مثل الفوتونين المتطايرين من قلبِ تجربة أسبكت.

ويجادل نظريون مثل ديسباجنات وديفيد بوم بأن علينا أن نتقبل ذلك، حرفيًّا، فكل شيء مرتبط بكل شيء آخر، وأن التعامل الشامل للكون هو وحده الذي ربما قد يفسِّر ظواهرَ مثل الوعي البشري.

وما زال الوقت مبكرًا جدًّا على الفيزيائيين والفلاسفة الذين يميلون نحو مثل هذه الصورة الجديدة للوعي والكون، أن يأتوا بمخطط لشكله المحتمل، والمناقشة التخمينية للعديد من الإمكانيات التي تشدقنا بها قد لا يكون لها محل هنا. ولكنني أستطيع أن أقدِّم مثالًا من خلفيتي يأتي أساسًا من التقاليد الصارمة للفيزياء والفلك. فأحد الألغاز العظيمة في الفيزياء هي خاصية القصور الذاتي ومقاومة الجسم للتغير في الحركة لا للحركة ذاتها. وأي جسم يتحرَّك في فراغٍ يحافظ على حركته في خط مستقيم عند سرعةٍ ثابتةٍ إلى أن تدفعه قوة خارجية، وهذا هو أحد اكتشافات نيوتن العظيمة. إن كمية الدفع المطلوبة لتحريك الجسم تعتمد على كمية المواد التي يحتويها. ولكن كيف للجسم أن «يعرف» أنه يتحرك بسرعة ثابتة في خطوط مستقيمة، وبالنسبة إلى أي سرعة تُقاس سرعته؟ وقد أصبح الفلاسفة على درايةٍ تامة منذ عهد نيوتن بأن المعيار الذي يُقاس على أساسه القصور الذاتي فيما يبدو هو الإطار المرجعي الذي كان يطلق عليه عادة «النجوم الثابتة»، بالرغم من أننا قد نتكلم الآن من منطلق المجرات البعيدة. والحركة المغزلية للأرض في الفراغ أو بندول فوكو مثل تلك التي نراها في العديد من المتاحف العلمية أو رائد فضاء أو الذرة، كل هؤلاء «يعرفون» ما هو متوسط توزيع المادة في الكون.

ولا يعرف أحدٌ لماذا أو كيف تعمل المؤثِّرات، وقد أدَّى ذلك إلى تخميناتٍ خادعة إن لم تكن مفيدة. فإذا كان هناك جسيم واحد في كونٍ فارغ فلن يكون له قصور ذاتي لأنه لا يوجد أي شيء يمكن قياس حركته أو مقاومته للحركة بالنسبة إليه. ولكن إذا وُجِد

جسيمان في كونٍ فارغٍ فهل سيكون لهما نفس القصور الذاتي كما لو كانا في كوننا؟ ولو استطعنا بطريقةٍ سحرية أن نزيل نصف المادة من كوننا، فهل سيكون للنصف الباقي القصور الذاتي نفسه أم نصفه؟ (أو ضعفه؟) وما زال هذا اللغز عظيمًا في يومنا هذا مثلما كان منذ ٣٠٠ سنة، ولكن فناء الرؤى الواقعية المحلية للعالم يعطينا مفتاحًا لهذا اللغز. فإذا حافظ كلُّ شيء تفاعل في أيِّ وقتٍ في الانفجار الكبير على ارتباطه مع كل شيء تفاعل معه، فعندئذٍ «سيعرف» كل جسيم في كل نجم ومجرة نستطيع أن نراها بوجود كل جسيم آخر، ويصبح القصورُ الذاتي لغزًا ليس لعلماء الكون وعلماء النسبية أن يتجادلوا فيه، بل أمرًا أساسيًّا في أوساط ميكانيكا الكَمِّ.

هل يبدو ذلك تناقضًا؟ لقد لخَّص ريتشارد فاينمان الوضعَ بإحكامٍ في محاضراته؛ إذ قال إن التناقض اختلافٌ بين الواقعية وشعورك بما يجب أن تكون عليه الواقعية. وهل يبدو ذلك سفسطة مثل الجدل حول عدد الزوايا التي يمكن أن ترقص على رأس دبوس؟ وبالفعل، مسبقًا سنة ١٩٨٣، وبعد بضعة أسابيع من نشر نتائج فريق أسبكت أعلن علماء من جامعة ساسكس بإنجلترا نتائج تلك التجارب، التي لم تقدِّم تأكيدًا مستقلًّا لارتباط الأشياء على المستوى الكَمِّي فقط، بل قدَّمت مدخلًا للتطبيقات العملية متضمنة جيلًا جديدًا من الحواسيب المتفوقة على تقنية الحالة الجامدة كما كان راديو الترانزستور نفسه متفوقًا على السيمافور كجهاز للإشارة.

التأكد والتطبيقات

تعامل فريق ساسكس الذي يرأسه تيري كلارك مع معضلةِ قياسِ واقعيةِ الكَمِّ بطريقةٍ عكسية. فبدلًا من محاولة بناء تجارب تعمل على المقياس العادي للجسيمات الكَمِّية — مقياس الذرات أو أقل — حاولوا بناء «جسيمات كمية» تقارب كثيرًا حجمَ أجهزة القياس التقليدية. وتعتمد تقنيتهم على خاصية التوصيل الفائق مستخدمين حلقةً من مادة فائقة التوصيل، لها مقطع حوالي نصف سنتيمتر، وبها انقباض عند نقطة معينة؛ حيث تضيق الحلقة إلى ١٠ أجزاء من المليون من السنتيمتر المربَّع فقط في مساحةِ مقطعها. وهذه «الوصلة الضعيفة» التي ابتكرها براين جوزيفسون الذي طوَّر وصلة جوزيفسون، تجعل حلقةَ المادةِ الفائقةِ التوصيل تعمل كأسطوانةٍ مفتوحةِ الطرفين مثل أنبوب الأرغن أو صفيحة من الزنك نُزع كلا طرفيها. وتصف موجات شرودنجر سلوكَ الإلكتروناتِ الفائقةِ التوصيل وكأنها

تعمل مثل موجات الصوت المثبتة في أنبوب الأرغن والتي يمكن «ضبط نغماتها» باستخدامِ مجالٍ كهرومغناطيسي متغيِّر عند ترددات لاسلكية. وفي الواقع فإن موجة الإلكترون حول الحلقة ككل تضاعف جسيمًا كميًّا مفردًا، وباستخدام كشافٍ حساس لترددات لاسلكية، يستطيع الفريق أن يشاهد تأثيرات التحوُّل الكَمِّي لموجة الإلكترون في الحلقة. وعمليًّا فإن الأمر يبدو وكأن لديهم جسيمًا كميًّا مفردًا قطرُه نصف سنتيمتر يعملون به مثل الدلو الصغير المملوء بالهليوم الفائق الميوعة الذي سبق ذكره، بل أكثر دراماتيكية منه.

وتقدِّم التجربة قياساتٍ مباشرة لتحولات كميَّة مفردة، وتعطي أيضًا برهانًا جليًّا آخرَ لعدم المحلية. ونظرًا لأن الإلكترونات في حالة التوصيل الفائق تعمل كبوزون واحد فإن موجة شرودنجر التي تُجري التحوُّل الكَمِّي تنتشر حول كل الحلقة. ويسبِّب كل هذا البوزون الكاذب التحوُّل في الوقت نفسه. ولا يُشاهد جانب واحد من الحلقة وهو يقوم بالتحول أولًا، والجانب الآخر يلحق به فقط عندما يصبح لدى الإشارةِ التي تتحرَّك بسرعة الضوء، الوقتُ الكافي لتتنقَّل حول الحلقة وتؤثِّر على باقي «الجسيم». وبطريقةٍ ما فإن هذه التجربة أقوى من اختبار أسبكت لعدم مساواة بل، ويعتمد هذا الاختبار على مجادلات — مع أنها رياضيًّا ليست مبهمة — فليس من السهل تتبُّعها للشخص العادي غير المتخصص. ومن الأسهل كثيرًا استيعاب مفهوم «الجسيم» المفرد الذي يبلغ قطره نصف سنتيمتر وما زال يسلك سلوكَ جسيمٍ كمِّي مفرد، ويتجاوب هذا كليًّا ولحظيًّا لأي حثٍّ تستقبله من الخارج.

وقد قام بالفعل كلارك ورفاقه بالتطوير المنطقي التالي. كانوا يأمُلون في تصميم «ذرة ماكروية» أكبرَ، ربما على شكل أسطوانةٍ مستقيمة طولها ستة أمتار. فإذا استجاب هذا التصميم للإثارة الخارجية كما هو متوقَّع فلا بد من وجود شرخ مفتوح في الباب الذي يقود إلى اتصالٍ أسرعَ من الضوء. وسيستجيب لحظيًّا الكشاف المثبت على أحد طرفي الأسطوانة لغرضِ قياس الحالة الكَمِّية، للتغير في الحالة الكَمِّية الناتجة عن الإشارة التي حدثت عند الطرف الآخر للأسطوانة، ولا يزال هذا الأمر قليلَ الجدوى بالنسبة إلى الإشارات المألوفة؛ فلن نستطيع بناءَ ذرةٍ ماكروية تصل من هنا إلى القمر مثلًا، وأن نستخدمها للتخلُّص من التباطؤ المقلق عند الاتصال بين مكتشفي القمر والتحكم الأرضي هنا. لكن قد يكون لها استخدام عملي مباشر.

وأحد أهم العوامل المؤثِّرة في معظم الحواسيب الحديثة المتقدمة هي السرعة التي يمكن بها للإلكترون أن يتحرَّك حول مجموعةِ الدوائر من مكوِّنٍ لآخر. والتأخُّر في الزمن المعني يكون صغيرًا في نطاق النانو ثانية، لكنه ذو دلالة مهمة. فالتواصل اللحظي المتوقَّع عبر المسافات الكبيرة لا يصير سهلًا بالمرة عن طريق تجارب ساسكس، لكن يصير ممكنًا بناءُ حواسيبَ إلكترونية بها كل المكونات التي تتجاوب لحظيًّا مع أي تغيُّر في حالةِ أصبح أحد المكونات. وقد شجَّع هذا الأمر تيري كلارك ليدعي أنه «عندما تترجم قواعده إلى دوائر في الأجهزة، فإن ذلك سيجعل إلكترونيات القرن العشرين المذهلة تبدو كأنها سيمافورات عتيقةٌ مقارنةً بها.»[7]

لم ترسِّخ التجارب تفسيرَ كوبنهاجن كليةً فقط، بل يبدو أن هناك تطوراتٍ أخرى ما زالت في الجَعبة أبعدَ مما قدَّمته ميكانيكا الكَمِّ لنا بالنسبة إلى التطورات الأبعد من الابتكارات الكلاسيكية. ولكن ما زال تفسير كوبنهاجن غيرَ كافٍ فكريًّا. فماذا يحدث لكل هذه العوالم الكَمِّية الشبحية التي تنهار مع دوالها الموجية عندما تقوم بقياسِ نظامٍ تحت ذري؟ وكيف لواقعٍ متداخلٍ لا أقل ولا أكثر من الواقع الذي نقيسه نحن في النهاية، ويختفي ببساطة عندما تتم عملية القياس؟ وأفضلُ إجابةٍ هي أن الواقعيات البديلة لا تختفي، وأن قطة شرودنجر في الواقع حيةٌ وميتةٌ في الوقتِ نفسِه، ولكن في عالمين أو أكثرَ مختلفين. إن تفسير كوبنهاجن وتضميناته العملية موجودان كليةً في رؤيةٍ أكثرَ اكتمالًا للواقع، أو بعبارة أخرى، تفسير العوالم المتعدِّدة.

هوامش

(1) J. S. Bell, *Physics*, volume 1, page 195, 1964.

(2) In this example I am following the very clear and detailed description of the Bell experiment by Bernard d'Espagnat in "The Quantum Theory and Reality", *Scientific American Offprint*, number 3066. My version is, however, highly simplified and d'Espagnat's article includes much more detail.

(3) Perhaps you think the uncertainty ought to be *h*? It is. The fundamental unit of spin is 1/2 *h* as Dirac established, and this is what we mean by the shorthand "+1 unit of spin". The difference between +1 unit and

−1 unit is the difference between plus and minus 1/2 *h* which, of course, is just *h*. But in the experiments discussed here, the only thing that matters is the *direction* of the spin.

(4) Even here we get a scent of the kind of problems that puzzled Bohr for so long. The only real things are the results of our experiments, and the way we make measurements influences what we measure. As we can see here, in the 1980s, physicists were using as an everyday tool of their trade a laser beam whose job is simply to pump atoms into an excited state. We can only use this tool because we know about excited states and have the quantum cookbook to hand, but the whole purpose of our experiment is to verify the accuracy of quantum mechanics, the theory we used to write the quantum cookbook! I'm not suggesting that experiments are therefore wrong. We can imagine other ways to excite atoms before we make the measurements, and other versions of the experiment do give the same result. But just as the everyday conceptions of previous generations of physicists were coloured by their use of, say, spring balances and metre rules, so the present generation is affected, far more than it sometimes realizes, by the quantum tools of the trade.

Philosophers may care to take up the question of what the results of the Bell experiment really mean if we are using quantum processes in order to set up the experiment. I am happy to stick with Bohr – what we see is what we get; nothing else is real.

(5) *Physical Review Letters*, volume 49, page 1804.

(6) *The Physicist's Conception of Nature*, ed. J. Mehra, page 734.

(7) In the *Guardian*, 6 January, 1983. While I was preparing this chapter for the printer, news of a similar development along these lines came from the Bell Laboratories, where researchers are using Josephson junction technology to develop new, fast "switches" for computer circuitry. These

switches use only “conventional” Josephson junctions, and can already operate ten times faster than standard computer circuitry. That development is likely to continue to make headlines, and achieve practical applications, in the near future. But don’t be confused—the developments Clark is talking about are more remote, and may not be applied before the end of this century, but are potentially a far greater leap forward.

الفصل الحادي عشر

عوالم كثيرة

لم أحاول أن أنحاز لجانبٍ معيَّن حتى الآن، بل حاولتُ تقديمَ قصةِ الكَمِّ بكل جوانبها، وأن أدَع القصة تتكلم عن نفسها. وقد حان الوقت الآن كي أقف لأُبدي رأيي. وسأتخلَّى في هذا الفصل الأخير عن أيِّ مظهرٍ لعدم الانحياز، وأُعرض تفسير ميكانيكا الكَمِّ الذي أجد أنه مقنع جدًّا أو مريح. وليست هذه رؤية الأغلبية؛ فمعظم الفيزيائيين الذين يَشغلون أنفسَهم بالتفكير في مثل هذه الأمور سعداءُ بتفسير كوبنهاجن عن انهيار الدوال الموجية. إلا أن الأقلية لها رؤيةٌ جديرة بالاحترام، وتتميَّز بأنها تشتمل على تفسير كوبنهاجن. والسمة غير المريحة التي منعت هذا التفسير المحسَّن من اكتساح عالَم الفيزيائيين هو أنها تعني وجودَ عوالمَ عديدةٍ — يحتمل وجود عددٍ لا نهائي — بجانب واقعنا عبر الزمن، موازية لعالمنا، لكنها محجوبة عنه للأبد.

مَن يرصد الراصِد؟

نشأت فكرةُ تفسير العوالم المتعددة في أبحاث هيو إيفرت طالب الدراسات العليا بجامعة برنستون في خمسينيات القرن العشرين. كان متحيرًا حول الطريقة الغريبة التي تنهار بها الدوال الموجية في تفسير كوبنهاجن بطريقةٍ سحرية عند المشاهدة، وقد ناقش البدائل مع العديد من الأشخاص، ومن بينهم جون ويلر الذي شجَّع إيفرت ليُطوِّر مسلكه البديل كرسالة للدكتوراه. وتبدأ هذه الرؤية البديلة بسؤالٍ بسيط جدًّا هو أن الذروة المنطقية للتعبير عن الانهيارات المتتابعة للدالة الموجية تعني أنه عندما أُجري التجربةَ في حجرةٍ مغلقة ثم أخرج وأخبرك بالنتائج، التي ترسلها أنت إلى صديق، الذي بدوره يبلغها لشخص آخر، وهكذا. وفي كل خطوة تصبح الدالة الموجية أكثرَ تعقيدًا وتحتضن المزيدَ من

«العالم الواقعي». ولكن تبقى البدائل عند كل مرحلةٍ متساويةً، وتتداخل الواقعيات حتى تصل أخبار النتائج النهائية للتجربة. ولنا أن نتخيَّل أن الأخبار ستنتشر عبر كل العالم بهذه الوسيلة حتى يصل العالم ككل إلى حالة من الدوال الموجية المتداخلة، وستشاهد الواقعيات البديلة التي تنهار لتصير عالمًا واحدًا عند المشاهدة. ولكن من يشاهد الكون؟

وحسب التعريف، فإن الكون قائم بذاته مستقلٌّ بنفسه، إذ يحتوي على كل شيء، ولذلك لا يوجد مراقبٌ خارجي يراقب وجود الكون، ومن ثم تنهار شبكته المعقَّدة من الواقعيات البديلة المتفاعلة إلى دالةٍ موجيةٍ مفردة. وفكرة ويلر عن الوعي — أو أنفسنا — كمراقبٍ مهمٍّ يعمل خلال سببيةٍ عكسيةٍ إلى الوراء حتى الانفجار الكبير، هي وسيلةٌ للخروج من هذه المعضلة، ولكنها تتضمَّن جدلًا مُحيرًا مثل الحيرة التي يحاول إزالتها. وإنني أفضِّل فكرةَ الأنانة، أي إنه يوجد مراقبٌ واحد للكون هو أنا، وأن مشاهداتي هي كل العوامل المهمة التي تبلور الواقعية من شبكة احتمالاتِ الكَمِّ، لكن الأنانة المفرطة فلسفةٌ غيرُ مقنعة تمامًا لشخصٍ كل مساهمته في العالَم أن يكتب كتبًا ليقرأها أناسٌ آخرون. وتفسير إيفرت عن العوالم المتعددة هو أمرٌ آخر أكثرُ إقناعًا واحتمالٌ أكثرُ اكتمالًا.

وينحصر تفسيرُ إيفرت في أن الدوال الموجية المتداخلة لكل الكون — الواقعيات البديلة التي تتفاعل لتنتج تداخلًا يمكن قياسُه عند المستوى الكَمِّي — لا تنهار. وكل الدوال متساوية في واقعيتها، وتتواجد في أجزائها من «الفضاء الفائق» (والزمان الفائق). والذي يحدث عند إجراء قياساتٍ عند المستوى الكَمِّي هو أننا نضطر عن طريق المشاهدة أن نختار أحدَ هذه البدائل، والذي يصبح جزءًا مما نراه في عالمنا «الواقعي»، وتقطع المشاهدة الروابطَ التي تربط الواقعيات البديلة بعضها ببعض، وتسمح لها بأن يذهب كلٌّ منها في طريقٍ منفصلٍ عبر الفضاء الفائق، وتحتوي كل واقعيةٍ بديلة على مُشاهِدها الخاص بها الذي حصل على المشاهدةِ نفسِها، إلا أنه توصَّل إلى «إجابة» كميَّة مختلِفة ويتصوَّر أنه «تسبَّب في انهيار الدالة الموجية» إلى بديلٍ كميٍّ وحيد.

قطة شرودنجر

من الصعب أن نستوعبَ ما الذي يعنيه هذا عندما نتكلم عن انهيار الدالة الموجية لكل الكون، لكن الأمر قد يصبح أسهلَ كثيرًا عندما نرى مدخل إيفرت كخطوة للأمام عند النظر إلى مثالٍ أبسط. إنَّ بحْثَنا عن القطة الحقيقية المختبئة داخل صندوق شرودنجر المتناقض قد انتهى أخيرًا؛ حيث يعطي هذا الصندوقُ المثالَ الذي أحتاج إليه لأستعرض

قوةَ تفسير العوالم المتعددة لميكانيكا الكَمِّ، والمفاجأة أن هذا المسلكَ سيؤدي في النهاية ليس إلى قطةٍ واحدةٍ حقيقية، بل إلى اثنتين.

تدُلنا معادلةُ ميكانيكا الكَمِّ على أن داخلَ صندوق تجربة شرودنجر الذهنية الشهيرة صورتين لدالة موجة «قطة حية» و«قطة ميتة»، والاثنتان حقيقيتان على قدم المساواة. وينظر تفسير كوبنهاجن المتَّفق عليه إلى هذه الاحتمالات من منظورٍ مختلِف، ويقول إن الدالتَين في الواقع غير حقيقيتَين بنفس المقدار، وإن إحداهما فقط ستتبلور كواقعٍ عندما ننظر داخل الصندوق. ويتقبَّل تفسيرُ إيفرت معادلاتِ الكَمِّ كليةً بكامل وجاهتها، ويقول إن كلًّا من القطتَين حقيقةٌ واقعة. فهناك قطةٌ حيةٌ وقطةٌ ميتة، ولكنهما توجدان في عالَمين مختلفَين. وليست المسألةُ أن الذرة المشعة داخل الصندوق تتفكَّك أو لا تتفكَّك، بل يحدث كلٌّ من الحالتَين. وفي مواجهةِ قرارٍ، ينشطر العالَم ككل — الكون — على نفسه في صورتَين متطابقتَين من جميع الأوجه، عدا أنه في إحدى الصورتَين تتفكَّك الذرة وتموت القطة، وفي الصورة الأخرى لا تتفكَّك الذرة وتبقى القطة حية. ويبدو هذا كخيالٍ علمي، لكنه يصل إلى ما هو أعمق من أي خيالٍ علمي، كما أنه مبنيٌّ على معادلاتٍ رياضية لا تقبل الشك ومتماسكة ولها تتابعٌ منطقي في أن نأخذ ميكانيكا الكَمِّ حرفيًّا.

ما بعد الخيال العلمي

إن أهميةَ أعمال إيفرت التي نُشرت سنة ١٩٥٧، تتمثَّل في أنه أخذ هذه الفكرةَ التي تبدو خياليةً في مظهرها، ووضعها على أسسٍ رياضية لا تقبل الشك، مستخدمًا قواعدَ نظريةِ الكَمِّ. فأن نخمِّن شيئًا عن طبيعة الكون هذا أمرٌ، لكن أن نطوِّر هذه التكهنات ونضعها في نظريةٍ للواقعيةِ كاملة ومتسقة مع نفسها فهذا أمرٌ آخر. ولم يكن إيفرت في الواقع هو أول شخص يتكهَّن بهذا الشكل، مع ما قد يبدو أنه توصَّل لأفكاره مستقلًّا تمامًا عن أي اقتراحات عن الواقعيات المتعددة والعوالم المتوازية، ومعظم التكهنات — التي زادت زيادةً كبيرة في الحقيقة منذ سنة ١٩٥٧ — قد ظهرت على صفحات الخيال العلمي. وقد استطعت أن أقتفي أثرَ أول نسخةٍ من ذلك نُشرت لأول مرة في صورةِ سلسلةٍ في مجلةٍ سنة ١٩٣٨، وهي «فرقة الزمان» لجاك ويليامسون.

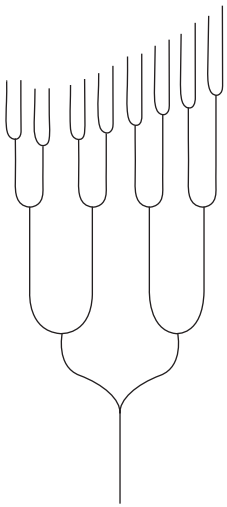
ومعظم قصص الخيال العلمي موضوعةٌ في إطار الواقعيات «المتوازية» مثل انتصار الجنوب في الحرب الأهلية الأمريكية، ونجاح الأرمادا الإسبانية في إلحاق الهزيمة بإنجلترا، وهكذا. وبعض هذه القصص يصف مغامراتِ بطلٍ ما يسافر عبر الزمان، من واقعٍ بديل

إلى واقعٍ آخر، وقليل من هذه القصص يصف، بلغةٍ عبثية، كيف ينفصل عالَمٌ بديل عن عالمنا. وتتناول قصة ويليامسون الأصلية عالَمَين بديلَين لا يصل أيهما إلى واقعيةٍ محسوسة إلا عند وقوع حدثٍ معيَّن من زمنٍ حرج في الماضي؛ حيث يفترق طريقا العالَمَين (وهناك أيضًا سَفر «توافقي» عبْر الزمان في هذه القصة، كما أن الحدث دائري مثل الجدل). وتردِّد الفكرة انهيارَ الدالة الموجية كما وُصِفت في تفسير كوبنهاجن المتعارف عليه، وتتضح ألفة ويليامسون مع الأفكار الجديدة في ثلاثينيات القرن العشرين من المقطع الذي يشرح فيه أحدُ الأشخاص ماذا يحدث:

> بإحلال موجات الاحتمالية بدلًا من الجسيمات المتماسكة أصبحت خطوطُ العالم للأشياء غير ثابتة، ولم تَعُد ممراته البسيطة موجودة. ولدى الجيوديسيين توالدٌ لا نهائي من الفروع المحتملة حسب اللاتحديدية تحت الذرية.

وعالَم ويليامسون هو عالَم للواقعيات الشبحية حيث يجري الحدث البطولي بينما ينهار أحد هذه العوالم، ويختفي لدى اتخاذ القرار الحاكم، ويُخْتار شبحٌ آخر ليصبح واقعًا محسوسًا. وعالَم إيفرت واحدٌ من الواقعيات المحسوسة العديدة، الذي تتساوى فيه كل العوالم بنفس الدرجة؛ حيث أيضًا، وللأسف، لا يستطيع حتى الأبطالُ الانتقالَ من واقعٍ إلى الواقع المجاور له. لكن نسخة إيفرت عن العالم واقعٌ علمي وليست خيالًا علميًّا.

دعونا نَعُد مرةً ثانية للتجربة الأساسية في فيزياء الكَمِّ، تجربة الثقبين. وحتى في إطارِ تفسير كوبنهاجن المتَّفق عليه، ومع أن قليلين من طهاةِ الكَمِّ على علمٍ بذلك، فإن نسقَ التداخل الذي يظهر على شاشة تلك التجربة عندما يمر جسيمٌ واحد فقط عبر الجهاز قد شُرِحَ على أن الأمر تداخلٌ بين واقعَين تبادليَّين يمرُّ في أحدهما الجسيم خلال الثقب أ وفي الآخر يمرُّ خلال الثقب ب. وعندما ننظر إلى الثقبَين نرى جسيمًا واحدًا يمر خلال أحدهما وليس هناك تداخل. ولكن كيف للجسيم أن يختار من أي الثقبَين يمر؟ بالنسبة لتفسير كوبنهاجن فإن الاختيار عشوائي، وهو ما يتفق مع احتمالات الكَمِّ، ويلعب الرب النردَ مع الكون في ظنه. وبتفسير العوالم المتعددة فإن الجسيم لا يختار. وبالمواجهة فالاختيار على المستوى الكَمِّي ليس للجسيمِ نفسِه فقط، بل ينشطر كل الكون إلى نسختَين. يمر الجسيم في أحد الكونين خلال الثقب أ ويمر في الآخر خلال الثقب ب. وفي كل كون هناك المُشاهد الذي يرى الجسيم يمر خلال ثقبٍ واحد فقط. ويصبح العالَمان بعد ذلك وللأبد منفصلَين تمامًا ولا يتداخلان، وهذا هو السبب في عدمِ وجودِ تداخلٍ على شاشة التجربة.

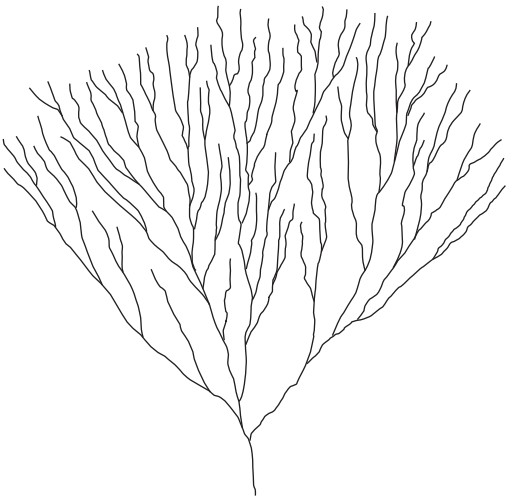


شكل ١١-١: توحي عبارة «العوالم المتوازية» بأن الواقعيات التبادلية تصطف بعضها بجانب بعض في «الزمكان الفائق». وهي صورةٌ زائفة.

اضرب هذه الصورةَ في عددِ الأحداثِ الكَمِّية التي تحدث طوال الوقت في كل منطقةٍ من الكون، وسيعطيك هذا فكرةً عن عدم تقبُّل الفيزيائيين التقليديين لهذه الفكرة. ولكن — وكما فعل إيفرت منذ ٢٥ عامًا — فإن ذلك يُعد أمرًا منطقيًّا، ووصفًا متماسكًا بذاته للواقعِ الكَمِّي لا يتعارض مع أي دليل من التجربة أو المشاهدة.

لَم يُحدث تفسير إيفرت الجديد لميكانيكا الكَمِّ — بالرغم من رياضياته التي لا تقبل الشك — أيَّ اضطرابات على سطح بِركة المعرفة العلمية عندما نُشر سنة ١٩٥٧. وقد ظهرت نسخةٌ من أبحاثه في «مراجعات الفيزياء الحديثة»[1] وبجانبه نُشر بحثٌ آخر لويلر يلفت الانتباه إلى أهمية أعمال إيفرت.[2] إلا أن تلك الأفكار ظلت مهمَلةً إهمالًا كبيرًا حتى التقطها برايس دي ويت من جامعة نورث كارولاينا بعد أكثرَ من ١٠ سنوات.

وليس هناك سببٌ واضح لماذا استغرقت الفكرةُ كلَّ هذا الوقت ليتم الاقتناع بها، ولو حتى من القلة، ثم لاقت نجاحًا في سبعينيات القرن العشرين. وبعيدًا عن الرياضيات المعقَّدة، شرح إيفرت بعنايةٍ في مجلة «مراجعات الفيزياء الحديثة» أن الجدلَ حول انشطار الكون إلى عوالمَ عديدة لا يمكن أن يكون واقعيًّا؛ لأنه لا خبرة لنا بذلك، وأن الأمر كالإناء



شكل ١١-٢: صورةٌ أفضل ترى الكون ينشطر دائمًا مثل شجرةٍ لها فروع. لكن ذلك ما زال صورةً زائفة.

المثقوب لا يحتفظ بالماء داخله. وتخضع كل العناصر المنفصلة كحالات التطابق لمعادلة الموجة بعدم اكتراثٍ تام لحقيقةِ وجودِ العناصرِ الأخرى، والغياب الكلي لتأثير أي فرع على الآخر، الأمر الذي يعني أن المُشاهِد لا يمكن أن يكون أبدًا على علمٍ بعملية الانشطار. وجدلٌ بهذا الشكل يماثل الجدلَ بأن الأرض لا يمكن أن تدور في مدارٍ حول الشمس؛ لأنه إذا حدث ذلك يجب أن نشعر به. ويقول إيفرت: «في كلتا الحالتين، النظريةُ نفسُها تتنبأ بأن خبرتنا ستكون في الحقيقة على ما هي عليه.»

ماذا بعد أينشتاين؟

في حالة تفسير العوالم المتعددة نرى أن النظرية بسيطةٌ في الفهم، وسببيةٌ وتعطي تنبؤاتٍ تتماشى مع الخبرة. وقد حاول ويلر جاهدًا أن يجعل الناس يلاحظون هذه الفكرة:

> من الصعب أن نبيِّن بجلاء كيف أسقطت «حالة النسبية» المفاهيمَ الكلاسيكية تمامًا. والتعاسة الأولية لمثل هذه الخطوة يمكن أن تنطبق على بعض الأمثلة

> في التاريخ: عندما وصف نيوتن الجاذبيةَ بشيءٍ منافٍ للطبيعة مثل الفعل عن بُعد، أو عندما وصف ماكسويل أيَّ شيءٍ طبيعي مثل الفعل عن بُعد معبِّرًا عنه بتعبيرٍ غير طبيعي مثل نظرية المجال، وعندما أنكر أينشتاين الخاصية المفضَّلة لأي نظامٍ إحداثي … ولكن لا يمكن مقارنة أي شيء مستخلص من بقية الفيزياء، ما عدا مبدأ النسبية العامة الذي ينصُّ على أن كلَّ أنظمة المحاور العادية لها نفس الوضع.[3]

وقد ختم ويلر مقالَه بأن قال: «بعيدًا عن مفهوم إيفرت، ليس هناك نظامُ أفكارٍ متناسقٌ مع نفسه متاحٌ ليشرح ماذا نعني بأن نُكمِّم نظامًا مغلقًا مثل الكون مع النسبية العامة.» كلماتٌ قوية بالفعل، لكن تفسير إيفرت يعاني عيبًا رئيسيًّا محاولًا إخراج تفسير كوبنهاجن من مكانته التي رسخت في الفيزياء. فصورة العوالم المتعددة في ميكانيكا الكَمِّ تأتي بالتنبؤاتِ نفسِها التي حصلنا عليها من رؤيةِ كوبنهاجن عند تقييم الناتج المحتمل لأي تجربة أو مشاهدة. ويحتوي هذا الأمر على نقطةِ قوة ونقطة ضعف أيضًا. وحيث إن تفسير كوبنهاجن لم يُتَطلب قط في الأمور العملية فإن أيَّ تفسيرٍ جديد لا بد وأن يعطي «الإجابات» نفسَها مثل تفسير كوبنهاجن أينما أمكن اختباره، وعليه فإن تفسير إيفرت قد اجتاز الاختبار الأول. إلا أنه يتقدَّم على رؤية كوبنهاجن فقط عندما تُزال سمات التناقض الظاهرية من تجربة الشق الطولي المزدوج، أو في اختبارات من النوع الذي ابتكره أينشتاين وبودولسكي وروزين. ومن وجهةِ نظرِ كل طهاة الكَمِّ فإنه من الصعوبة أن نرى الفرْق بين التفسيرين، ومن الطبيعي الميل للارتباط بالمألوف. وعلى كلٍّ، بالنسبة إلى أي إنسان درسَ التجارب الذهنية لأينشتاين وبودولسكي وروزين، ودرس الآن الاختبارات المختلفة لعدم مساواة بل، فإن الانحياز نحو تفسير إيفرت يصبح أكبر كثيرًا. وفي تفسير إيفرت، ليس باختيارنا لأيٍّ من مكونات الحركة المغزلية أن نقيس قوَى مكوِّن الحركةِ المغزلية لجسيمٍ آخرَ بعيدٍ عبر الكون، ليتخذ بطريقةٍ سحرية حالةً تكاملية، لكن بالأحرى نختار أي مكون من مكونات الحركة المغزلية نقيسه، وبذلك فإننا نختار أي فروع الواقعية نعيش فيه. وفي هذا الفرع من الفضاء الفائق تكون الحركة المغزلية للجسيم الآخر تكاملية دائمًا للجسيم الذي نقيسه، إن الاختيار هو الذي يقرِّر في أي العوالم الكَمِّية نقيس تجاربنا، ومن ثم في أي عالم نقطن، ولا علاقة للأمر بالصدفة. وحيث إن كل الاحتمالات الناتجة من التجربة تحدث فعلًا، وحيث إن كل ناتجٍ محتملٍ يُشاهده مجموعة من مشاهديه، فليس من المدهش أن ما نشاهده هو إحدى النتائج المحتملة للتجربة.

نظرة ثانية

ظلَّ تفسير العوالم المتعددة لميكانيكا الكَمِّ مهملًا عن عمدٍ في مجتمع الفيزياء إلى أن أخذ دي ويت الفكرةَ في أواخر ستينيات القرن العشرين، وكتب عن المفهوم بنفسه، كما شجَّع أحدَ طلابه، نيل جراهام، على أن يجعل رسالته للدكتوراه عن تطوير أعمال إيفرت وامتدادها. وكما شرح دي ويت في مقالٍ سنة ١٩٧٠ في مجلة «الفيزياء اليوم»،[4] فإن تفسيرَ إيفرت له بريقٌ لحظي عند استخدامه في تناقض قطة شرودنجر. ولا داعي الآن للقلق حول اللغز المتعلق بما إذا كانت القطة حيةً وميتةً معًا، أو ليست حية وليست ميتة، وبدلًا من ذلك فإننا نعلم في عالمنا أن الصندوق يحتوي على قطةٍ إما حية أو ميتة، وهناك في العالم المجاور يوجد مشاهِدٌ آخر وعنده صندوقٌ مطابق تمامًا لصندوقنا يحتوي على قطةٍ إما ميتة أو حية. لكن إذا كان الكون في حالة «انشطارٍ دائم إلى عددٍ مذهلٍ من الأفرع» فحينئذٍ «كل تحوُّلٍ كمِّي يحدث في كل نجم، وفي كل مجرة، وفي كل ركن بعيد من الكون يُحدِث انشطارًا في عالمنا المحلي على الأرض إلى عددٍ هائل من النسخ لنفسه».

تذكَّر دي ويت الصدمةَ التي مرَّ بها عند مواجهة هذا المفهوم «فكرة انشطار ١٠١٠٠ نسخة ليست تامة بالضبط في حالةِ انشطارٍ دائم إلى نسخٍ أخرى». ولكنه كان متأثرًا بعمله، ورسالة الدكتوراه الخاصة بإيفرت والدراسة المتجددة لجراهام عن الظاهرة. بل أخذ في اعتباره إلى أي مدًى يمكن للانشطار أن يستمر في الحدوث. وفي عالمٍ محدود — هناك من الأسباب الجيدة للاعتقاد بأنه إذا كانت النسبية العامة وصفًا جيدًا للواقعية إذن فالكون محدود[5] — وعليه فلا بد أن يكون هناك عددٌ محدود فقط من «فروع» شجرةِ الكَمِّ، وببساطة فإن الفضاء الفائق قد لا يكون به مكانٌ كافٍ ليقطنه المزيدُ من الاحتمالات الشاذة، وقد أطلق دي ويت على هذا التركيبِ الدقيقِ المدى مسمَّى «العوالم الخارجة عن السياق»، وهي واقعياتٌ ذات أنماط سلوك مشوَّه بشكلٍ غريب. وعلى أية حال، ومع أن تفسير إيفرت الصارم يقول إن أيَّ شيء يحتمل أن يحدث في أي صورةٍ من الواقعية، في مكانٍ ما في الفضاء الفائق، فإن ذلك ليس الشيء نفسه كالقولِ إن أيَّ شيء يمكن «تخيُّله» يمكن أن يحدث، ويمكن أن نتصوَّر أشياءَ مستحيلةً وأن العالم الواقعي لا يستطيع احتواءها. وفي عالَمٍ آخرَ مماثلٍ لعالمنا حتى لو كانت للخنازير (المشابهة لخنازيرنا) أجنحةٌ بطريقةٍ ما، فإنها لن تستطيع الطيران، والأبطال مهما كانوا فائقين، لن يستطيعوا الإفلات بالطرق الجانبية من خلال الشقوق في الزمان لزيارة الواقعيات البديلة، حتى بالرغم من أن كتَّاب الخيال العلمي يفكِّرون حول عواقب مثل هذه الأحداث، وهكذا.

أنهى دي ويت مقاله بطريقةٍ درامية مثلما فعل ويلر من قبلُ:

> إن الرؤيةَ التي تناولها إيفرت وويلر وجراهام مثيرةٌ للإعجاب حقًّا. إلا أنها رؤيةٌ سببية تمامًا، كان من الممكن حتى لأينشتاين أن يتقبَّلها … وهي تزعم أنها الأفضل لتصبح النهاية الطبيعية لبرنامجِ تفسيرٍ بدأ بهايزنبرج سنة ١٩٢٥.

وربما يكون من الإنصاف عند هذه النقطة أن نذكر أن ويلر نفسَه قد عبَّر حديثًا عن شكوكه حول العملِ كلِّه، حين أجاب على أحد السائلين في المؤتمر الذي عُقد بمناسبة مئوية ميلاد أينشتاين. قائلًا عن نظريةِ العوالم المتعددة: «أقرُّ وأعترف أنني يجب أن أتوقَّف مرغمًا عن دعمي لوجهة النظر هذه في النهاية — تمامًا مثلما ناصرتُها في البداية — لأني أخشى أنها تحمل الكثيرَ من حقيبة الميتافيزيقيا.»[6] ويجب ألَّا يُقرأ هذا على أنه سحْبٌ للبِساط من تحت أقدام تفسير إيفرت، وحقيقةُ أن أينشتاين قد غيَّر فكره عن الأساس الإحصائي لم تسحَب البِساط من تحت أقدام ذلك التفسير. كما لا يعني ذلك أن ما قاله ويلر سنة ١٩٥٧ لم يَعُد حقيقيًّا. فإنه لا يزال حقيقيًّا سنة ٢٠١٢؛ فبعيدًا عن نظرية إيفرت، لا يوجد نظامٌ متسِق مع نفسِه جاهزٌ لشرحِ ماذا يعني تكميم الكون. ولكن تغيير ويلر عقيدتَه يُظهِر كيف كان من الصعب أن يتقبَّل العديد من الناس نظريةَ العوالم المتعددة. وأنا شخصيًّا أجد أن حملَ الميتافيزيقيا المطلوب أقلُّ إزعاجًا بكثير من تفسير كوبنهاجن لتجربة شرودنجر مع القطة، أو يتطلب أبعادًا لـ «فضاء الطور» عددها أكبر ثلاث مرات من عدد الجسيمات في الكون. ولم تَعُد المفاهيم أكثرَ غرابةً من المفاهيم التي أصبحت مألوفةً لمجرد أنها نوقشت بإسهابٍ على الملأ، وأن تفسير العوالم المتعددة يقدِّم منظورًا جديدًا عن لماذا يجب أن يكون الكون الذي نعيش فيه في الصورة التي هو عليها؟ إن النظرية بعيدةٌ جدًّا عن أن تُهمَل، وما زالت تستحق اهتمامًا جادًّا.

ما بعد إيفرت

يتكلَّم علماء الكون اليوم بسعادةٍ بالغةٍ عن الأحداث التي حدثت عند لحظةِ ميلاد الكون في الانفجار الكبير، ويدرسون الاستجابات التي حدثت عندما كان عمر الكون $١٠^{-٣٥}$ ثانية أو أقل. وتتضمَّن الاستجابات اضطرابًا عظيمًا للجسيمات والإشعاع وكذلك إنتاج أزواج ودمار. والافتراضات حول كيفية حدوث هذه الاستجابات تأتي من خليطٍ من النظرية والمشاهدات للطريقة التي تتداخل بها الجسيمات في معجِّلات عملاقة مثل ما يحدث في

معجِّل المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية في جنيف. ووفقًا لتلك الحسابات فإن قوانين الفيزياء الناتجة من تجاربنا البسيطة هنا على الأرض تستطيع أن تفسِّر بشكلٍ منطقي ومتسقٍ مع نفسِه كيف للكون أن يصل من حالة الكثافة غير المحدودة غالبًا إلى الحالة التي نراه عليها هذه الأيام. وتحاول النظريات أن تتنبأ بالتوازن بين المادة والمادة المضادة في الكون وبين المادة والإشعاع.[7] وقد سمع بها كل إنسان مهتم بالعلم، سواء على نحوٍ معتدل أو كناقلين لاهتمامهم بنظرية الانفجار الكبير لأصل الكون. ويلعب النظريون وهم سعداءُ بالأرقام التي تصف الأحداث التي يزعمون حدوثها خلال أجزاءٍ من الثانية منذ حوالي ١٤ ألف مليون سنة مضت. ولكن من في هذه الأيام يتوقَّف ليتأمل فيما تعنيه حقيقة هذه الأفكار؟ إنه بالقطع أمرٌ مبهر إذا حاولت أن تفهم التضمينات التي في هذه الأفكار. مَن سيقدِّر رقمًا مثل ١٠−٣٥ من الثانية، وماذا يعني حقيقةً إذا تركنا جانبًا كيف نستوعب طبيعة الكون عندما كان عمره ١٠−٣٥ ثانية؟ فالعلماء الذين يتعاملون مع مثل هذه الحالاتِ المتطرفة الشاذة في الطبيعة لن يجدوا في الواقع أيَّ صعوبة ليفتحوا عقولهم لاستقبال مفهوم العوالم المتوازية.

وفي الواقع، يبدو هذا التعبير صائبًا، وهو مستعارٌ من الخيال العلمي، لكنه ليس مناسبًا تمامًا. فالصورة الطبيعية للواقعيات البديلة ما هي إلا فروعٌ تبادلية تفرَّعت من ساقٍ رئيسية وينطلق بعضها بجانب بعض عبر الفضاء الفائق مثل خطوط السكك الحديدية المعقَّدة عند نقطة ارتكاز، ومثل طريقٍ فائقِ السرعة، به ملايين الخطوط المتوازية، يتصوَّر كتَّاب الخيال العلمي أن كل العوالم تتحرَّك جنبًا إلى جنب عبر الزمان، وأقرب هذه العوالم يماثل تقريبًا عالمنا، ثم يصبح الفارق بيننا أكثرَ وضوحًا وأكثرَ تباينًا كلما تحركنا أبعدَ «بالطرق الجانبية في الزمان». هذه هي الصورة التي قد تقودنا بشكلٍ طبيعي إلى افتراضِ احتمالِ تغيير سيرنا على الطريق الفائق السرعة من حارةٍ إلى أخرى، منزلقين إلى العالَم المجاور. ولسوء الحظ فإن الرياضيات ليست تمامًا بمثل هذه الصورة الواضحة.

لم يجد الرياضيون صعوبةً في التعامل مع أبعادٍ أكثرَ من الأبعاد الفضائية الثلاثة المألوفة، وهي في غاية الأهمية في حياتنا اليومية. وعالمنا الكلي — الذي هو أحد فروع واقعية العوالم المتعددة لإيفرت — قد وُصِفَ رياضيًّا بأربعة أبعاد؛ ثلاثة للفضاء، وواحد للزمان، كلها تصنع زوايا قائمة بعضها مع بعض، والرياضيات المطلوبة لوصفِ أبعادٍ أكثرَ تصنع زوايا قائمة بعضها مع بعض ومع أبعادنا الأربعة هو أمرٌ روتيني يجري

التلاعب به. وهذا هو بالضبط موضع الواقعيات البديلة فعلًا، التي ليست متوازيةً مع عالمنا لكنها تصنع زوايا قائمة معه، عوالم متعامدة ومتفرعة «بطرقٍ جانبية» خلال الفضاء الفائق. ويصعب أن نتخيَّل هذه الصورة، لكن ذلك يجعل الأمر أكثرَ سهولة حتى نرى لماذا يستحيل انزلاقه بطرقٍ جانبية إلى واقعٍ بديل. إذا انفصلتَ بزاويةٍ قائمة بالنسبة لعالمنا — بطرقٍ جانبية — فإنك بذلك تكون قد كوَّنت عالمًا جديدًا خاصًّا بك. في الواقع، استنادًا إلى نظريةِ العوالم المتعددة فإن هذا ما يحدث عندما يواجه الكون باختيارٍ كمِّي. والطريقة الوحيدة التي يمكن بها أن تحصل على واحدةٍ من الواقعيات البديلة التي تكوَّنت بانشطارٍ للكون مثل هذا نتيجةَ تجربةِ القطة في الصندوق أو تجربة الثقبَين، يمكن أن تحدث بأن ترجع في الزمان في واقعنا الخاص بنا ذي الأبعاد الأربعة إلى زمن التجربة، وحينئذٍ نذهب إلى الأمام في الزمان عبر الفرع البديل الذي يصنع زوايا قائمة بالنسبة لعالمنا ذي الأبعاد الأربعة.

وربما يكون ذلك مستحيلًا. إن الحكمة التقليدية تفيد بأن السَّفر الحقيقي عبر الزمان لا بد أن يكون مستحيلًا لما به من تناقضٍ كتلك الحالة التي ترجع فيها في الزمان وتَقتل جَدك قبل أن تحمل جَدتك بوالدك. ومن ناحيةٍ أخرى فإن الجسيمات على المستوى الكَمِّي تبدو مشغولةً طول «الوقت» في السَّفر عبر الزمان، كما أن فرانك تيبلر قد بيَّن أن معادلات النسبية العامة تسمح بالسفر عبر الزمان. ومن الممكن أن نولِّد نوعًا من السفر الأصيل للأمام أو للخلف في الزمان لا يسمح بالتناقض، ومثل هذا الشكل من السفر عبر الزمان يعتمد على واقعية الأكوان البديلة. وقد اختبر ديفيد جيرولد في كتابٍ مسلٍّ للخيال العلمي هذه الاحتمالات، ويحمل الكتاب اسم «الرجل الذي طوى نفسه»، وهو كتاب يستحق القراءة كدليلٍ على ما في واقع العوالم المتعددة من تعقيداتٍ وأشياءَ خفية. والمسألة أنك — استنادًا إلى المثال الكلاسيكي — إذا عُدت للوراء في الزمان لتقتل جَدك، فإنك (معتمدًا على وجهة نظرك) تدخل أو تخلق عالمًا بديلًا تفرَّع بزاويةٍ قائمة مع العالم الذي بدأت فيه. وفي هذا الواقع «الجديد» لم يكن أبوك ولا حتى أنت نفسك قد وُلدتما، لكن ليس هناك تناقض لأنك قد وُلدت بالفعل في الواقع «الأصلي» وتقوم بالرحلة إلى الوراء عبر الزمان وفي فرعٍ بديل. عُد مرةً ثانيةً وأصلح ما أفسدته، وكل ما ستفعله هو أن تعود إلى الفرع الأصلي للواقع أو على الأقل واقعٍ شبيه به.

لكن لم يشرح أحدٌ — حتى جيرولد نفسه — هذه الأحداثَ الغريبة التي تحدث لشخصيته الرئيسية بمدلول الواقعيات المتعامدة، وعلى مدى علمي فإن التفسير الفيزيائي

لرياضيات تفسير إيفرت هو أصلي، ومن المؤكد أنه تحويرٌ جديد لملحمة السفر عبر الزمان التي لم يتطرَّق لها كتَّاب الخيال العلمي حتى الآن. وها أنا ذا أقدِّمها لهم.[8] والنقطة التي تستحق التركيزَ عليها هو أن الواقعيات البديلة، في هذه الصورة، موجودةٌ «جنبًا إلى جنب» مع واقعنا؛ حيث إنها تستطيع أن تنفلت للداخل أو للخارج بقليل من الجهد. ويصنع كل فرع من فروع الواقعية زاويةً قائمة بالنسبة للفروع الأخرى. وربما يوجد عالَم فيه بونابرت قد سمِّي بيير، وليس نابليون، ولكن، وحيث إنه على الجانب الآخر ينساب التاريخُ بصورةٍ أساسية كما هو في فرعنا من الواقعية، ربما هناك عالَم لم يكن فيه بونابرت هذا بالمرة، وكلا الرأيين بعيدُ الاحتمال وغير متاح في عالَمنا، ولا يمكن الوصول إليهما إلا إذا سافرنا للوراء عبر الزمان في عالمنا الخاص بنا على نقطةِ التفرُّع المناسبة، ثم الانطلاق للأمام مرةً ثانية بزوايا قائمة (زاوية واحدة من الزوايا القائمة العديدة!) إلى واقعنا.

يمكن أن يمتد المفهوم ليزيل الطبيعة المتناقضة لأي تناقض للسفر عبر الزمان المفضَّل لدى كتاب وقرَّاء الخيال العلمي، الذي ناقشه الفلاسفة. وكل الأشياء المحتملة تحدث بالفعل في بعض فروع الواقعية. والأمر المحوري للدخول إلى تلك الواقعيات المحتملة عبر الزمان، هو عدم السفر بالطرق الجانبية، إلى الوراء ثم إلى الأمام في فرعٍ آخر. ومن المحتمل أن أفضلَ روايات الخيال العلمي التي كُتبت على الإطلاق قد استفادت من تفسيرِ العوالم المتعددة، مع أنني لست متأكدًا أن المؤلِّف جريجوري بينفورد قد فعل ذلك وهو على وعيٍّ به. تبدَّل مصير العالم في كتابه «الهروب عبر الزمان» جذريًّا نتيجةً للرسائل التي أُرسلت إلى الوراء إلى ستينيات القرن العشرين من تسعينياته. وقد نوقشت القصة بشكلٍ جميلٍ وأخَّاذ لتشغل مكانها الصحيح حتى من دون موضوع الخيال العلمي. ولكن النقطة التي أردتُ التقاطها هنا هي أنه لأن العالَم يتغير نتيجةَ أحداثٍ حدثت بواسطة أناسٍ استقبلوا رسائلَ من المستقبل، هذا المستقبل الذي أتت منه الرسائل ليس له وجود بالنسبة إليهم. وعليه، فمن أين أتت هذه الرسائل؟ ربما تستطيع أن تقدِّم أطروحةً تتعلق بتفسير كوبنهاجن القديم لعالمٍ شبحيٍّ يرسل للوراء رسائلَ شبحيةً تؤثِّر على الطريقة التي تنهار بها الدالة الموجية، ولكنك ستتعرض لضغطٍ شديد لتجعل أطروحتك مقبولة. وعلى الجانب الآخر فإنه أمرٌ واضح تمامًا أن نرى رسائل تذهب إلى الوراء في الزمان في تفسير العوالم المتعددة إلى نقطةِ تفرُّعٍ حيث يستقبلها الذين يتحركون حينئذٍ إلى الأمام في الزمان إلى فرعٍ مختلف للواقعية خاصٍّ بهم. وكلٌّ من العالَمين البديلَين موجود، والاتصال بينهما منقطع في اللحظة التي تُتَّخذ فيها القرارات الحاسمة التي تؤثِّر في المستقبل.[9]

وكما أن «الهروب عبر الزمن» جيدٌ للقراءة، فإنه يحتوي بالفعل على «تجربةٍ ذهنية» مثيرة، بكلِّ ما في الكلمة، ومتمشية مع جدال ميكانيكا الكَمِّ، وكذلك تجربة EPR أو قطة شرودنجر. وربما لم يقدِّر ذلك شرودنجر نفسُه، ولكن واقع العوالم المتعددة هو بالضبط نوعٌ من الواقع يسمح بالسفر عبر الزمان، وهو أيضًا نوع من الواقع يشرح لماذا يجب أن نكون هنا لنناقش مثل هذه الموضوعات.

مكاننا الخاص

وفقًا لتفسيري لنظريةِ العوالم المتعددة، فإن المستقبل لا يتقرَّر من حيث إدراكنا الحسي الواعي للعالم المعني، لكن الماضي محدَّد. وبفعل الملاحظة فقد اخترنا تاريخًا «واقعيًّا» من بين الواقعيات العديدة، فبمجرد أن رأى شخصٌ ما شجرةً في عالمنا، فإنها تظل هناك حتى عندما لا ينظر إليها أحد. وينطبق هذا على كل شيء إلى الوراء حتى الانفجار الكبير. وعند كل وصلة على الطريق السريع للكَمِّ، ربما يكون قد تكوَّنت العديد من الواقعيات الجديدة، ولكن ما وصل إلينا واضحٌ وغير مبهم. وهناك العديد من الطرق التي تصل إلى المستقبل، إلا أن بعض نسخ «منَّا» ستتبع كلَّ واحد منها. وستعتقد كل نسخة منَّا أنها تسلك مسلكًا فريدًا، وسننظر إلى الوراء إلى ماضٍ فريد، لكن من المستحيل أن نعرف المستقبل؛ حيث إن به مساراتٍ عديدة. وربما نستقبل رسائلَ من المستقبل، إما بواسطةِ وسائلَ ميكانيكيةٍ مثل «الهروب عبر الزمن»، أو إذا أردت أن تتصوَّر احتمالَ حدوث ذلك من خلال الأحلام، أو بالإدراك الخارج عن النطاق الحسي. لكن من غير المحتمل جدًّا أن تكون تلك الرسائلُ ذاتَ فائدةٍ كبيرة لنا. وحيث إنه قد توجد أعدادٌ وافرة من عوالم المستقبل، فإن أي رسائل مثل هذه يجب أن تتوقَّع أنها مشوشة ومتضاربة. وإذا تصرفنا بناءً على هذه الرسائل فإن الاحتمال الأكثر أن نحيد بأنفسنا إلى فرعٍ من الواقعية مختلِف عن الذي جاءت منه «الرسائل»، وعليه فإنه من غير الممكن جدًّا أن تستطيع هذه الرسائل «أن تصبح صحيحة». والناس الذين يعتقدون أن نظريةَ الكَمِّ تقدِّم مفتاحًا لتفسير الإدراك الخارج عن النطاق الحسي عمليًّا، والتخاطر، وخلافه، إنما يضلِّلون أنفسَهم.

وصورةُ الكون كما يصوِّرها شكل فاينمان المبسوط التي تتحرَّك فيها «اللحظة الحاضرة» بمعدلٍ ثابت تعدُّ تبسيطًا أكثرَ من اللازم. والصورة الواقعية هي شكل فاينمان المتعدِّد الأبعاد، به كل العوالم المحتملة، وبه «اللحظة الحاضرة» تنتشر عبرهم جميعًا مرتقبةً كلَّ فرع وكلَّ بديل. والسؤال الأعظم الذي تُرِكَ للإجابة عنه في هذا الإطار

هو: لماذا يجب أن يكون إدراكنا الحسي عن الواقعِ بالشكل الذي هو عليه؛ ولماذا يجب أن تكون الممرات عبر متاهةِ الكَمِّ التي بدأت منذ الانفجار الكبير وأدَّت إلى كوننا، أن تكون هي المسار الصحيح دون سواها لظهور المخلوقات الذكية في الكون؟

يكمُن الجواب في فكرةٍ غالبًا يُرجع إليها هي «المبدأ الإنساني». ويفيد هذا المبدأ الإنساني بأن الظروف التي وُجدت في الكون هي الظروف الوحيدة فقط، بعيدًا عن أي تغيراتٍ صغيرة، والتي قد تسمح لحياةٍ مثلنا أن تنشأ، وعليه فإنه من الحتمي أن أيَّ أنواعٍ ذكية مثلنا لا بد أن تتطلع إلى كونٍ مثل ذلك الذي نراه حولنا.[10] وإذا لم يكن الكون على الشكل الذي هو عليه، فلن نكون هنا لنلاحظه. ونستطيع أن نتخيَّل الكونَ يتخذ ممراتٍ كمِّيةً عديدة ومختلفة للأمام بدءًا من الانفجار الكبير. وفي بعض تلك العوالم — وبسبب الاختلافات في الاختبارات الكَمِّية التي حدثت بالقرب من بداية تمدُّد الكون — فإن النجوم والكواكب لن تتشكَّل أبدًا، ولن توجد الحياة التي نعرفها. وإذا أخذنا مثالًا معينًا، ففي كوننا يبدو وكأنه يوجد فيضٌ كبير من الجسيمات المادية، وقليل — أو لا يوجد شيء — من المادة المضادة. وربما لا يوجد سببٌ جوهري لذلك، وربما يكون هذا مجرد صدفة لطريقة التفاعلات التي حدثت أثناء طور الكرة النارية في الانفجار الكبير. والأمر المحتمل هو أن يكون الكون فارغًا، أو أنه يجب أن يتكوَّن أساسًا مما نسميه المادة المضادة، مع وجود قليل من المادة أو عدم وجودها بالمرة. ولا توجد حياةٌ في الكون الفارغ، وفي عالَم المادة المضادة قد تكون هناك حياةٌ كحياتنا تمامًا، نوعٌ من نظيرٍ لعالَمٍ زجاجي أصبح واقعيًّا. واللغز هنا لماذا يجب أن يظهر عالَمٌ مثالي للحياة من الانفجار الكبير.

وينصُّ المبدأ الإنساني على أنه ربما توجد عوالمُ محتملة عديدة، وأننا بلا جدال نتاج نوعنا من الكون. ولكن أين العوالم الأخرى؟ وهل هي أشباح مثل العوالم المتفاعلة في تفسير كوبنهاجن؟ وهل تعبِّر عن حلقاتِ حياةٍ مختلفة للعالم ككلٍّ قبل الانفجار الكبير الذي بدأ به الزمان والمكان كما نعرفهما نحن؟ أم هل هي عوالم إيفرت المتعددة، التي توجد كلها بزوايا قائمة مع عالمنا؟ يبدو لي أن هذا أفضلُ تفسيرٍ حتى اليوم، وأنه حلَّ اللغز الأساسي حول لماذا نرى الكون على الشكل الذي يعوِّض بوفرةٍ الحملَ الثقيلَ الذي يحمله تفسيرُ إيفرت. ومعظم الواقعيات الكَمِّية البديلة غير مناسبة للحياة أو هي فارغة. والظروف الصحيحة المناسبة للحياة هي ظروفٌ خاصة، وعليه فإن الكائنات الحية عندما تنظر إلى الوراء في ممرِّ الكَمِّ الذي أنتجها هي نفسَها، فإنها ترى أحداثًا خاصة، وفروعًا في طريقِ الكَمِّ ربما لا تكون الأكثرَ احتمالًا على أساسٍ إحصائي، ولكنها تفضي إلى حياةٍ

ذكية. إن تعدُّد عوالمَ مثل عالمنا ولكن بتواريخ مختلفة — التي فيها ما زالت بريطانيا تحكم مستعمرات شمال أمريكا، أو فيها السكان الأصليون لأمريكا يستعمرون أوروبا — وهؤلاء يُكوِّنون معًا ركنًا واحدًا صغيرًا فقط لواقعٍ أكثرَ اتساعًا بكثير. وليس من قبيل الصدفة أنه قد جرى انتقاء الظروف الخاصة المناسبة للحياة من بين العديد من الاحتمالات الكَمِّية، لكنه اختيار. وكل العوالم واقعية بالدرجةِ نفسِها، لكن العوالم المناسبة فقط هي التي تتضمَّن مشاهدين.

إن نجاحَ تجارب فريق أسبكت لاختبار عدم مساواة بل قد أزاح كلَّ احتمالات تفسيرات ميكانيكا الكَمِّ الممكنة، التي وجدت ما عدا اثنين. فإما أن نتقبل تفسير كوبنهاجن، مع واقعياته الشبحية والقطط نصف الميتة، أو نتقبل تفسير إيفرت وعوالمه المتعددة. ومن الطبيعي أن أيًّا من هذين الشيئين اللذين يمثِّلان «أفضل المشتريات» في متجر العلوم، يمكن أن يُتصوَّر أنه غير صحيح، وأن كلا هذين البديلَين على خطأ. وربما ما يزال هناك تفسيرٌ آخر لواقع ميكانيكا الكَمِّ يحُل الألغاز التي يحلُّها تفسير كوبنهاجن وتفسير إيفرت، بما يشمل اختبار بل، ويذهب أبعدَ من فهْمنا الحالي، بنفس الطريقة التي ربما تتجاوز بها نظرية النسبية العامة النسبية الخاصة وتحتضنها. لكن إذا كنت تعتقد أن هذا هو الخيار الأسهل، طريقٌ يسيرٌ للخروج من المأزق، فلتتذكَّر أن أي تفسير «جديد» مثل هذا يجب أن يوضِّح كلَّ شيء قد تعلَّمناه، مثل قفزة بلانك الكبيرة في الظلام، ويجب أن يشرح كل شيء بالمثل أو «أفضل» من التفسيرَين الحاليَّين. وهذا من المؤكَّد أمرٌ صعب للغاية، وليس من المعتاد أن يجلس العلم خاملًا على أملِ أن يأتي شخصٌ ما بإجابةٍ «أفضل» لمشكلاتنا. وفي حالةِ عدمِ وجودِ إجابةٍ أفضلَ، علينا أن نقبل بتضميناتِ أفضلِ الأجوبةِ التي لدينا. وحتى في العَقد الثاني من القرن الحادي والعشرين وبعد مجهودٍ مكثَّفٍ لأكثر من ٨٠ عامًا كُرِّس للغز الواقع الكَمِّي من جانبِ أفضل أدمغة هذا القرن، يتعيَّن أن نتقبَّل أن العلم قادرٌ في الوقت الحالي فقط أن يقدِّم هذين التفسيرَين البديلَين، للطريقةِ التي صُمِّمَ العالمُ بها. ولا يبدو أن أيًّا منهما مستساغ جدًّا عند النظرة الأولى. وبتعبيرٍ بسيط، إما أنه لا يوجد شيءٌ واقعي، أو أن كل شيء واقعي.

وربما لن يُحَل الموضوع أبدًا؛ لأنه قد يكون من المستحيل تعميمُ تجربةٍ تفرِّق بين التفسيرين، ومفيدة للسَّفر عبر الزمن. ولكن من الواضح تمامًا أن ماكس جامير، وهو أحد أقدرِ فلاسفةِ الكَمِّ، لم يكن مبالغًا عندما قال إن نظريةَ العوالم المتعددة هي بلا شك واحدة من أكثرِ النظريات التي صُمِّمَت على الإطلاق في تاريخ العلوم جرأةً وطموحًا.[11]

وهي تشرح حرفيًّا كلَّ شيء بما في ذلك حياةُ وموت القطط. وكمتفائل لا يكِلُّ، فإن ذلك هو تفسير ميكانيكا الكَمِّ الأحب إلى نفسي. وكل الأشياء محتملة، وبأفعالنا نختار مساراتنا الخاصة خلالَ عوالمِ الكَمِّ المتعددة. وفي العالم الذي نعيش فيه، ما تراه هو ما يُعتَد به، وليس هناك متغيراتٌ مخبأة، إن الرب لا يلعب النرد، وكل شيء واقع. وإحدى النوادر التي تُقال ويُعاد ترديدها عن نيلز بور أنه عندما جاء إليه شخصٌ ما يقترح حلَّ أحدِ ألغازِ نظريةِ الكَمِّ في عشرينيات القرن العشرين، أجابه قائلًا: «نظريتك مجنونة، لكنها ليست مجنونة بما فيه الكفاية لتكون حقيقية.»[12] ومن وجهة نظري فإن نظرية إيفرت مجنونة بما فيه الكفاية لتكون حقيقية، ويبدو أن هذه إشارةٌ مناسبة نختتم بها بحثنا عن قطة شرودنجر.

هوامش

(1) Volume 29, page 454.

(2) Volume 29, page 463.

(3) *Op. cit.*, page 464.

(4) Volume 23, number 9 (September 1979), page 30.

(5) General relativity is a theory that describes closed systems, and Einstein originally envisaged the universe as a closed, finite system. Although people talk about open, infinite universes, strictly speaking such descriptions are not properly covered by relativity theory. The way for our universe to be closed is if it contains enough matter for gravity to bend space–time around on itself, like the bending of space–time around a black hole. That needs more matter than we can see in the visible galaxies, but most observations of the dynamics of the universe suggest that it is in fact in a state very close to being closed – either “just closed” or “just open”. In that case, there is no observational justification for rejecting the fundamental relativistic implications that the universe is closed and finite, and there is every reason to seek the dark matter that holds it together gravitationally. Some of the basis for these ideas can be found in Wheeler’s contribution to *Some Strangeness in the Proportion*.

(6) *Some Strangeness in the Proportion*, ed. Harry Woolf, pp. 385–386.

(7) All these ideas are discussed in my book, *In Search of the Big Bang* (Penguin, London, 1998).

(8) While this book was making its way to press, I wrote a short story, "Perpendicular Worlds", for *Analog*, that uses this theme.

(9) There is another element here that is worth emphasizing. Even if time travel is theoretically possible, there may be insuperable practical difficulties to prevent us from sending material objects through time. But sending messages through time could be a relatively simple matter if we can find a way to make use of the particles that travel backward in time in Feynman's interpretation of reality.

(10) I have discussed the anthropic principle briefly in my book, *In Search of the Multiverse* (Penguin, London, 2010); more details can be found in *The Accidental Universe*, by Paul Davies.

(11) *The Philosophy of Quantum Mechanics*, page 517.

(12) Quoted by, for example, Robert Wilson, *The Universe Next Door*, page 156.

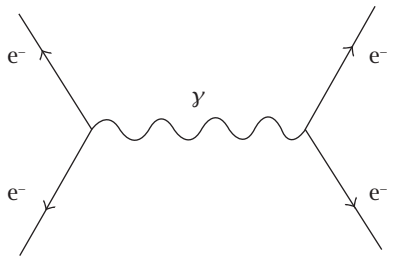
خاتمة

عملٌ غير مكتمل

إنَّ قصةَ الكَمِّ كما عرضتُها هنا، تبدو واضحةً وجافة، إلا فيما يتعلَّق بالسؤالِ شبهِ الفلسفي عما إذا كنتَ تفضِّل تفسيرَ كوبنهاجن أم نسخةَ العوالم المتعددة. تلك هي الطريقة الأفضل لعرض القصة في كتاب، لكنها لا تمثل الحقيقة كاملة. ذلك أنَّ قصةَ الكَمِّ لم تنتهِ بعدُ، ولا يزال علماء الفيزياء النظرية اليوم يعالجون مشكلاتٍ قد تؤدي إلى إحراز خطوة جوهرية للأمام، كتلك الخطوة التي اتخذها بور عندما تمكَّن من تكميم الذرة. ومحاولة الكتابة عن هذا العمل غير المكتمل، هي مهمةٌ فوضوية وغير مُرضية؛ فالآراء المقبولة عما هو مهم وعما يمكن تجاهله دون ضرر، ربما تتغيَّر تمامًا قُبيل طباعةِ ما كتبته. ومع ذلك، فمن أجلِ تقديمِ تصوُّرٍ عن الكيفية التي يمكن أن تتطوَّر بها الأمور، أوردُ في هذه الخاتمة عرضًا للجوانب غير المكتملة في قصةِ الكَمِّ، وبعض التلميحات عما يمكن ترقُّبه في المستقبل.

تأتي الإشارة الأوضح على أنه لا يزال هناك الكثير من الجوانب الخفية في نظريةِ الكَمِّ من أحدِ الفروع الذي يُعَدُّ الأهمَّ في النظرية وأعظمَّ انتصارٍ لها. يتمثَّل هذا الفرع في الكهروديناميكا الكَمِّية، وهو النظرية التي «تشرح» التفاعل الكهرومغناطيسي من منظورِ الكَمِّ. أزهرت الكهروديناميكا الكَمِّية في أربعينيات القرن العشرين، وثبت أنها ناجحةٌ للغاية حتى إنها استُخدِمت نموذجًا لإحدى نظريات التفاعل النووي القوي، وهي النظرية التي تُلقَّب بدورها بالكروموديناميكية الكَمِّية؛ لأنها تتضمَّن تفاعلاتِ جسيماتٍ

تُدعى بالكواركات يميِّز العلماء بين خواصها من خلال وصفها بأسماء الألوان. على سبيل الطرافة. غير أن الكروموديناميكية الكَمِّية نفسَها تعاني عيبًا خطيرًا. ذلك أنها لا تستقيم إلا بعد التلاعب بالرياضيات كي تلائم ملاحظاتنا للعالم.

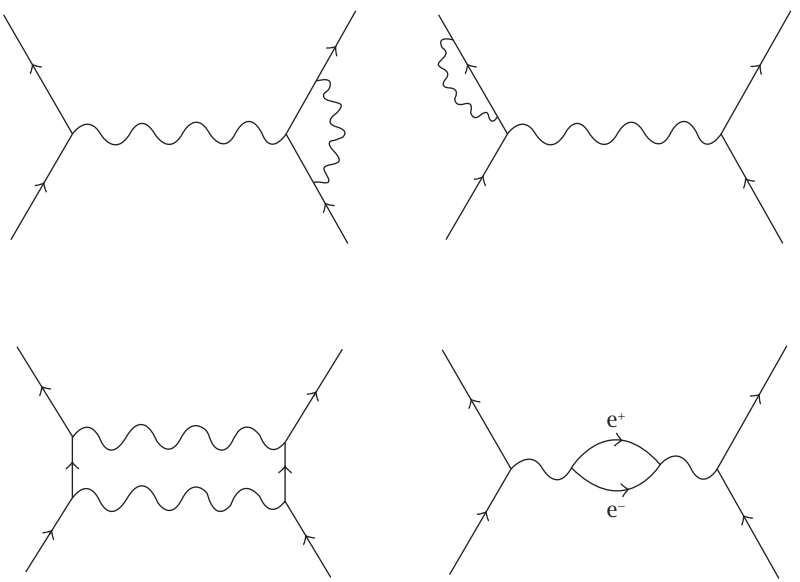


شكل ١: مخطَّط فاينمان الكلاسيكي لتفاعلات الجسيم.

تتعلَّق المشكلات بأنَّ الإلكترون في نظريةِ الكَمِّ ليس بالجسيم العاري كما هي الحال في النظريةِ الكلاسيكية، بل هو محاطٌ بسحابةٍ من الجسيمات الافتراضية. وتؤثِّر سحابة الجسيمات هذه بالطبع على كتلة الإلكترون. من الممكن جدًّا إعدادُ المعادلاتِ الكَمِّية بما يتلاءم مع إلكترون + سحابة، لكن عند حل هذه المعادلات دائمًا ما تُقدَّم «حلول» لا نهائية الكبر. فبدءًا من معادلة شرودنجر، وهي حجر الزاوية في نظريةِ الكَمِّ، نجد أنَّ المعالجة الرياضية الصحيحة للإلكترون تعطي كتلةً لا نهائية وطاقةً لا نهائية وشحنةً لا نهائية. وما من طريقةٍ رياضيةٍ شرعية للتخلُّص من هذه اللانهائيات، لكن يمكن التخلُّص منها بالغش. فنحن نعرف قيمةَ كتلة الإلكترون بالقياسات التجريبية المباشرة، ونعرف أن هذه هي الإجابة التي يجب أن تقدِّمها النظرية لكتلة الإلكترون + السحابة. لذا يزيل النظريون الكَمِّيات اللانهائية من المعادلات عن طريق قسمة إحداها على الأخرى. ومن الناحية الرياضية، إذا قسَّمتَ كميةً لا نهائية على كميةٍ أخرى لا نهائية، يمكن أن تحصلَ على أي حلٍّ؛ ومن ثَم فإنهم يقولون إن الحل لا بد أن يكون هو الحل الذي نريده؛ أي الكتلة المقيسة للإلكترون. وتسمَّى هذه الخدعة بإعادة التطبيع.

ولكي تفهم ما يجري، تخيَّل أنَّ شخصًا ما يزن ١٥٠ رطلًا يذهب إلى القمر؛ حيث تبلغ قوة الجاذبية على سطحه سدسَ قوة الجاذبية على سطح الأرض. إذا ضبطنا ميزانَ

الحمَّام المألوفَ على سطح الأرض، وأخذناه في الرحلة إلى القمر، فسنجد أنَّ وزن المسافر ٢٥ رطلًا فقط، مع أن جسمه لم يفقد أيَّ كتلة. وفي ظل هذه الظروف، ربما يكون من المنطقي أن «نعيد تطبيع» الميزان المنزلي من خلال تحريك المؤشِّر حتى يسجِّل الوزن ١٥٠ رطلًا من جديد. لكن هذه الخدعة تنجح فقط لأننا نعلم الوزن الفعلي للمسافر بمقياس الأرض، ولأننا نود الحفاظ على سجلاتنا بما يتماشى مع الوزن المرصود على الأرض. إذا سجَّل الميزان وزنًا لا متناهيًا، فلا يمكننا ضبطه بما يتفق مع الواقع إلا من خلالِ إجراءِ تصحيحٍ لا متناهٍ، وهذا هو ما يفعله منظِّرو الكَمِّ في مجال الكهروديناميكيا الكَمِّية. ومن سوء الحظ أن قسمة ١٥٠ على ٦ تعطي نتيجةً مؤكدة مقدارها ٢٥، لكن ضرب ٢٥ في ما لا نهاية ثم قسمتها على ما لا نهاية، لا تعطي الجواب ٢٥ دون شك، بل يمكن أن تعطي أيَّ إجابة على الإطلاق.



شكل ٢: تظهر التصويباتُ الكَمِّية لقوانين الكهربية الديناميكية بسبب وجود الجسيمات الافتراضية، والتي تُمثَّل في المخططات ذات الحلقات المغلقة. وهذه هي الظروف التي تؤدي إلى لا نهائيات لا يمكن التخلُّص منها إلا بحيلةِ إعادة التطبيع غير المقنعة.

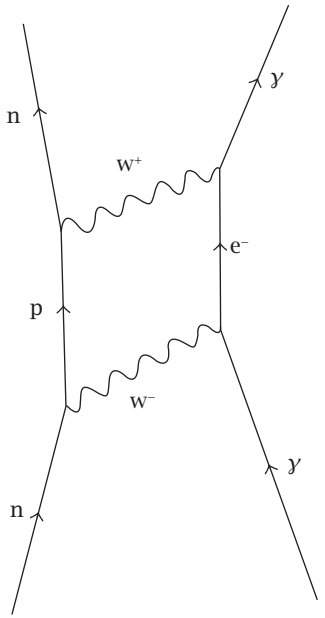
ومع ذلك، فالخدعة فعَّالة للغاية. فبإلغاء اللانهائيات بعضها لبعض، تفعل حلول معادلة شرودنجر كلَّ شيء قد يتمنَّاه الفيزيائيون، وتصف بشكلٍ مثالي أدقَّ تأثيرات التفاعلات الكهرومغناطيسية على الأطياف الذرية. ولما كانت النتائج رائعة، فإن معظم الفيزيائيين يقبلون بالكهروديناميكا الكَمِّية بصفتها نظريةً جيدةً ولا ينشغلون بالكَمِّيات اللانهائية، وذلك مثلما فعل مؤسسو نظريةِ الكَمِّ حين لم يشغلوا أنفسهم بتفسير كوبنهاجن أو مبدأ عدم اليقين. وحقيقة أن الخدعة صالحة لا تنفي كونها خدعة، ولا يزال الشخص الوحيد الذي يجب أن يحظى رأيه فيما يتعلَّق بنظريةِ الكَمِّ بأقصى درجة من الاحترام، غير راضٍ للغاية عن هذه الخدعة. وفي محاضرةٍ أُلقيَت في نيوزيلندا سنة ١٩٧٥[1] علَّق بول ديراك:

> عليَّ الاعتراف بأنني في غايةِ السخط على الوضع؛ لأن هذه النظرية التي توصَف بأنها «نظريةٌ جيدة» تنطوي على تجاهل اللانهائيات التي تظهر في معادلاتها، ويحدث هذا التجاهلُ بطريقةٍ اعتباطية. وليس هذا ما يحدث في الرياضيات السليمة؛ فالرياضيات السليمة تتجاهل كميَّةً عندما تكون هذه الكَمِّية ضئيلة، وليس إهمالها لأنها كبيرةٌ إلى ما لا نهاية، وأنك لا ترغب فيها.

وبعد أن أوضح ديراك أنَّ «معادلة شرودنجر ليس لها حلول» من وجهة نظره، ختم محاضرته بالتأكيد على ضرورةِ إجراءِ تغييرٍ «جذري» على النظرية لكي تصبح سليمةً رياضيًّا. «فالتغييرات البسيطة لن تكفي ... وأنا أشعر أن التغيير المطلوب سيكون بضخامة الانتقال من نظرية بور إلى ميكانيكا الكَمِّ.» لكن أين نستطيع البحثَ عن مثل هذه النظرية الجديدة؟ لو أنني أملك الإجابةَ لكنت في طريقي للفوز بجائزة نوبل، لكني قد أستطيع أن ألفت انتباهَكم إلى بعض التطورات المثيرة للاهتمام النابعة من الفيزياء اليوم، والتي ربما تلائم في النهاية حتى تحقيقات ديراك الفاحصة عما يشكِّل نظريةً جيدة.

الزمكان المنحني

ربما تكمُن الوسيلة لتحقيقِ فهمٍ أفضلَ لطبيعة الكون في ذلك الجزء من العالم المادي الذي ظل مهملًا على نطاقٍ كبير في نظريةِ الكَمِّ حتى الآن. تخبرنا ميكانيكا الكَمِّ بالكثير عن جسيمات المادة، لكنها لا تخبرنا إلا بالقليل للغاية أو لا تخبرنا بأي شيء على الإطلاق



شكل ٣: تبادل زوج من بوزونات W بين نيوترينو ونيوترون كافٍ ليتطلب تصحيحًا «لا نهائيًّا» للحسابات، مقارنةً بتبادل بوزون مفرد.

عن الفضاء الخالي. بالرغم من ذلك، فمثلما علَّق إدنجتون منذ أكثر من ٥٠ عامًا في «ذا نيتشر أوف ذا فيزيكال وورلد»، بأنَّ الثورةَ التي كوَّنت صورتنا عن المادة الجامدة بصفتها فضاءً خاليًا في معظمه، جوهريةٌ بدرجةٍ أكبرَ من الثورة التي جاءت بها نظرية النسبية. فحتى جسمٌ جامد مثل مكتبي، أو هذا الكتاب، يكاد يكون بأكمله فراغًا خاليًا. إنَّ نسبة المادة إلى الفضاء أقل حتى من النسبة بين حبة رمل وبين قاعة «ألبرت هول». والشيء الوحيد الذي يبدو أن نظريةَ الكَمِّ تخبرنا به عن هذا الجزء المهمل الذي يمثِّل ٩٩,٩٩٩٩ من الكون، هو أنه دوامةٌ من الجسيمات الافتراضية تموج بالنشاط. ومن سوء الحظ أن المعادلات الكَمِّية التي تؤدي إلى حلولٍ لا نهائية في الكهروديناميكيا الكَمِّية، تخبرنا هي نفسُها أيضًا أن كثافة طاقة الفراغ لا نهائية، وأنه لا بد من تطبيق إعادة التطبيع حتى على الفضاء الخالي. وعند الجمع بين معادلات الكَمِّ القياسية ومعادلات النسبية العامة في محاولةٍ للوصول إلى وصفٍ أفضلَ للواقع فإن الموقف يصبح أسوأ؛ إذ

نظل نجد اللانهائيات، لكنها لا تعود حتى قابلة لإعادة التطبيع. من الواضح أننا نسعى وراء هدفٍ خاطئ. فما الهدف الذي ينبغي أن نسعى خلفه؟

عاد روجر بنروز الباحث في جامعة أوكسفورد، إلى الأساسيات في محاولة لإحراز تقدُّم. وقد درس العديدَ من الطرق المختلفة لرسم وصفٍ هندسي للفراغ وجسيماته، مثل أوصافٍ هندسية تتضمَّن زمكانًا مشوَّهًا، وقِطعًا مبرومةً من الزمكان نرصدها على أنها جسيمات. ولأسبابٍ واضحة، يُطلَق على النظرية التي أسَّسها نظريةُ المبرومات، لكن من سوء الحظ أنَّ الرياضيات المتعلقة بالنظرية صعبةٌ على معظم الناس، والنظرية نفسُها أبعدُ عن أن تكون مكتملة. غير أنَّ المفهوم في حد ذاته مهم؛ فباستخدامِ نظريةٍ واحدة، يحاول بنروز تفسيرَ كلٍّ من الجسيمات الدقيقة والمساحات الشاسعة من الفراغ داخل شيءٍ جامد مثل هذا الكتاب. وربما تكون هذه هي النظرية الخطأ، لكن معالجتنا لصميمِ مشكلةٍ أُهملت بشكلٍ كبير، يسلِّط الضوء على أحد الأسباب المحتملة لفشلِ النظرية القياسية.

ثمَّة طرقٌ أخرى لتصوُّر تشوهات الزمكان على المستوى الكَمِّي. فمن خلال الربط بين ثابت الجاذبية وثابت بلانك وسرعة الضوء (الثوابت الأساسية الثلاثة في الفيزياء) يمكن أن نحصل على وحدةِ طولٍ أساسيةٍ فريدة، يمكن اعتبارها وحدةَ كَمٍّ من الطول تمثِّل أصغر منطقة في الفراغ يمكن وصفها على نحو مُجدٍ. وهذه الوحدة صغيرة جدًّا بالطبع؛ حوالي ١٠-٣٥ متر وتسمَّى طول بلانك. وبالطريقة نفسِها، فإنَّ التلاعب بالثوابت الأساسية بطريقةٍ مختلفة يقودنا إلى ناتجٍ واحد فحسب هو وحدة زمن أساسية: زمن بلانك الذي يبلغ حوالي ١٠-٤٣ ثانية.[2] الحقُّ أننا لا نستطيع الحديثَ عن زمنٍ أقصرَ من ذلك على نحوٍ ذي مغزًى، ولا عن أي بُعدٍ من الفضاء أصغرَ من طول بلانك.

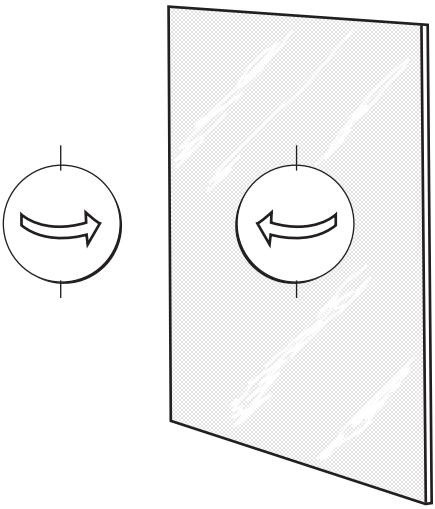
إنَّ التقلباتِ الكَمِّية في هندسة الفراغ ضئيلةٌ تمامًا على مستوى الذرات، أو حتى على مستوى الجسيمات الأولية، لكن عند هذا المستوى الأساسي للغاية، يمكن تخيُّل الفضاءِ نفسِه على أنه رغوة من التقلباتِ الكَمِّية، ويرسم جون ويلر الذي طوَّر هذه الفكرة تشبيهًا بالمحيط الذي يبدو مسطحًا بالنسبة إلى ملاحٍ جوي يطير عاليًا فوقه، لكنه لا يبدو كذلك إطلاقًا لركَّابٍ على قاربِ نجاة يتخبط بهم على سطح المحيط العاصف الدائم التغيُّر.[3] فعلى المستوى الكَمِّي، ربما يتسم الزمكان نفسُه بدرجةٍ كبيرة من التعقيد الطوبولوجي؛ فيحتوي على «ثقوب دودية» و«جسور» تربط بين مناطقَ مختلفة من الزمكان؛ ومن

الممكن أيضًا وفقًا لإحدى تنويعات هذه الفكرة، أن يكون الفراغ الخالي عبارة عن ثقوبٍ سوداءَ في حجمٍ طولِ بلانك مرصوصةٍ بإحكام بعضها بجانب بعض.

هذه الأفكار كلُّها مبهمة وغير كافية ومحيِّرة. وليس لدينا إجاباتٌ جوهرية حتى الآن، لكن لا ضررَ في إدراك أن «فهمنا» للفضاء الخالي مشوَّش في واقع الأمر وغير مؤكَّد ومبهم وغير كافٍ. وإنه لأمر يوسِّع من مداركنا أن نفكِّر مليًّا في أن كل الجسيمات المادية قد لا تكون أكثرَ من أجزاءٍ مبرومة من الفضاء الخالي. وإذا كانت النظريات التي «نفهمها» تتداعى، فمن المحتمل إذن أن يأتي التقدُّم من أشياءَ لا نفهمها بعدُ؛ لذا فقد يكون من المثير للاهتمام أن نراقب ما قد يأتي به مهندسو الكَمِّ في السنوات القليلة القادمة.

اختلال التناظر

يُعد التناظر مفهومًا أساسيًّا في الفيزياء. فالمعادلات الجوهرية تتسم بالتناظر الزماني على سبيل المثال؛ أي أنها تكون صالحةً بالدرجةِ نفسِها عند التقدُّم بالزمن للأمام أو العودة به للخلف. ويمكن فهمُ بعض الأنواع الأخرى من التناظر بالمصطلحات الهندسية. يمكن مثلًا أن تنعكس كُرةٌ تدور في مرآة. وعند النظر إليها من أعلى، قد نراها تدور عكس عقارب الساعة، وفي هذه الحالة سنرى صورةَ المرآة تدور مع عقارب الساعة. كلٌّ من الكرة الحقيقية وصورة المرآة تتحركان بطرقٍ تسمح بهما قوانين الفيزياء، وهي تناظرية بهذا المعنى (ولا شك بأنَّ صورة الكرة المنعكسة في المرآة تدور على النحو الذي كانت الكرةُ الحقيقية ستدور به إن تحرَّك الزمن للوراء. أمَّا إذا انعكس الزمن «مع» انعكاس صورة الكرة على المرآة أيضًا، فسنرجع إلى حيث بدأنا). يوجد العديد من الأنواع الأخرى من التناظر في الطبيعة. ومن هذه الأنواع ما يسهُل فهمُه بلغة الحياة اليومية؛ إذ يمكن على سبيل المثال أن نتخيَّل الإلكترون والبوزيترون على أنَّ كلًّا منهما صورةُ مرآة للآخر، كما يمكننا أيضًا تخيُّل أنَّ أحدهما يمثِّل نظيرًا معكوسَ الزمن للآخر. فالشحنة الموجبة المعكوسة هي شحنةٌ سالبة. إنَّ أفكار الانعكاس في الفضاء هذه معًا (تسمَّى تغيُّر التكافؤ لأنها تبدِّل اليسار باليمين)؛ ويشكِّل الانعكاس في الزمن وانعكاس الشحنة أحد أقوى المبادئ الأساسية في الفيزياء متمثلًا في مبرهنة «التكافؤ-الشحنة-الزمن» التي تنص على أن قوانين الفيزياء يجب ألا تتأثَّر بتغيير «هذه العوامل الثلاثة كلها» إلى نظائرها المضادة في الوقتِ نفسِه. إنَّ مبرهنة «التكافؤ-الشحنة-الزمن» هي أساس الافتراض القائل بأن انطلاق جسيم يكون مكافئًا «تمامًا» لامتصاصِ نظيره الجسيم المضاد.



شكل ٤: تناظر الانعكاس. دوران الكرة في عالم المرآة هو نفسه انعكاس الزمن لدورانها في العالم الواقعي.

أمَّا معظم أنواع التناظر الأخرى، فمن الصعب جدًّا استيعابها بلغةِ الحياة اليومية، حيث تتطلَّب لغةً رياضية حتى تُفهم كليةً. لهذه الأنواع الأخرى أهميةٌ كبيرة في فهْمِ آخرِ الأخبار من جبهة الجسيمات، ومع ذلك، تصوَّر مثالًا فيزيائيًّا بسيطًا: تخيَّل كرةً مستقرة على إحدى درجات سُلَّم. إذا حرَّكنا الكرة إلى درجةٍ أخرى، فإننا نغيِّر من طاقةِ وضعها في مجال الجاذبية الذي تقع فيه. ولا تهمُّ الطريقةُ التي نحرِّك بها الكرة، فمن الممكن أن نأخذها في رحلة حول العالم أو نرسلها بصاروخ إلى المريخ ثم نعود بها قبل وضعها على الدرجة الجديدة. ذلك أنَّ ما يحدِّد التغيُّر في طاقة الوضع هو ارتفاع الدرجتين؛ الدرجة التي تبدأ منها والدرجة التي تستقر عليها. ولا يهم أيضًا المكان الذي نختار أن نقيس منه طاقةَ الوضع. يمكننا قياسُها من القبو، وإعطاءُ كل درجةٍ طاقةَ وضعٍ كبيرة، أو يمكننا قياسها من أسفل الدرجتَين، وفي تلك الحالة ستكون طاقة وضع تلك الدرجة صفرًا.[4] وسيظل «الفرْق» في طاقةِ الوضع بين الحالتين هو نفسه. وهذا نوعٌ من التناظر، ولأننا نستطيع «إعادة قياس» خط القاعدة الذي بدأنا منه القياس، يُسمى هذا النوع من التناظر بتناظر المقياس.

ويحدث الشيء نفسه مع القوى الكهربية. ونتيجةً لذلك، فإنَّ كهرومغناطيسية ماكسويل تتسم بعدمِ تغيُّر القياس، وينطبق الأمر نفسُه على الكهروديناميكا الكَمِّية التي تتبع هي أيضًا نظريةَ المقياس، وكذلك الديناميكا اللونية الكَمِّية، التي صيغت نموذجًا على أساس الكهروديناميكا الكَمِّية. تظهر التعقيدات عند التعامل مع مجالات المادة على المستوى الكَمِّي، غير أنه من الممكن التوصُّل إلى حلٍّ مقنعٍ لجميع هذه التعقيدات من خلالِ نظريةٍ تتسم بتناظر المقياس. لكنَّ إحدى السمات الجوهرية في الكهروديناميكا الكَمِّية أنها لا تتسم بتناظر المقياس إلا لأن كتلة الفوتون صفر. ويتضح أنها إذا كانت للفوتون أي كتلة على الإطلاق، فستصبح إعادةُ تطبيع النظرية مستحيلة، ولن نستطيع التخلص من اللانهائيات. وتصبح هذه مشكلةً عندما يحاول الفيزيائيون استخدام نظرية المقياس الناجحة للتفاعل الكهرومغناطيسي كنموذجٍ لبناءِ نظريةٍ مماثلة للتفاعل النووي الضعيف، وهي العملية المسئولة، من بين أمورٍ أخرى، عن الانحلال الإشعاعي وانبعاث جسيمات بيتا (الإلكترونات) من الأنوية المشعة. ومثلما أنَّ الفوتونات تحمل القوى الكهربية أو تصبح بمثابةِ وسيطٍ لها، يبدو أن القوة النووية الضعيفة لا بد أن تنتقل بواسطة البوزون الخاص بها. لكن الوضع أكثرُ تعقيدًا؛ لأنه لكي تنتقل الشحنة الكهربية خلال التفاعلات الضعيفة، لا بد للبوزون الضعيف («فوتون» المجال الضعيف) أن يحمل شحنة. ومن ثَم، فلا بد من وجودِ زوجٍ من هذه الجسيمات على الأقل وتُسمى: بوزون $+W$ وبوزون $-W$، وحيث إن التفاعلات الضعيفة لا تتضمَّن انتقال شحنة في جميع الحالات، فقد اضطُر المنظِّرون إلى استدعاءِ وسيطٍ ثالث هو البوزون المتعادل Z، ليكمل مجموعة الفوتونات الضعيفة. لقد استلزمت النظريةُ وجودَ هذا الجسيم، مما كان مصدرَ خجلٍ للفيزيائيين في البداية؛ إذ لم يكن لديهم أيةُ أدلةٍ تجريبيةٍ على وجوده.

كان أول مَن توصَّل إلى أشكال التناظر الرياضية الصحيحة التي تضم التفاعل الضعيف والجسيمين: بوزون $+W$ وبوزون $-W$[5] والجسيم المتعادل Z، هو شيلدون جلاشو من جامعة هارفارد سنة ١٩٦٠، ونشرها سنة ١٩٦١. ولم تكن نظريته قد اكتملت بعدُ، لكنها قدَّمت بصيصًا لإمكانيةِ ظهورِ نظريةٍ واحدة في النهاية تدمج كلًّا من تفاعلات القوة النووية الضعيفة والتفاعلات الكهرومغناطيسية. كانت المشكلة الرئيسية أن النظرية تطلَّبت وجود جسيمات W، وليس ذلك لحمل الشحنة فقط كما هي الحال مع الفوتونات، بل استلزمت أن يكون لهذه الجسيمات كتلةٌ أيضًا؛ مما يجعل إعادة تطبيع النظرية مستحيلة ويخلُّ بالتشابه مع الكهرومغناطيسية؛ حيث الفوتونات بلا كتلة. كان

لا بد من وجودِ كتلةٍ للجسيمات؛ لأن التفاعلات الضعيفة قصيرةُ المدى، ومن دون كتلةٍ للجسيمات سيكون المدى لا نهائيًّا، مثل مدى التفاعلات الكهرومغناطيسية. بالرغم من ذلك، لم تكن المشكلة تتمثَّل في الكتلة نفسِها بقدرِ ما تمثَّلت في الحركة المغزلية للجسيمات. ذلك أنَّ قواعدَ الكَمِّ تقتضي أن تكون الحركة المغزلية لجميع الجسيمات العديمة الكتلة، مثل الفوتونات، موازيةً لاتجاه حركتها أو في الاتجاه المضاد لحركتها فقط. أما الجسيمات التي تمتلك كتلةً مثل جسيمات W، فمن الممكن أيضًا أن تكون حركتها المغزلية عموديةً على اتجاه حركتها، وهذه الحالة الزائدة من الحركة المغزلية تتسبَّب في كل المشكلات. لو كانت جسيماتُ W عديمةَ الكتلة لصار لدينا حينئذٍ نوع من التناظر بين الفوتونات وجسيمات W؛ ومن ثَم بين التفاعلات الضعيفة والتفاعلات الكهرومغناطيسية؛ مما يجعل من الممكن الجمعُ بينهما في نظريةٍ واحدةٍ قابلة لإعادة التطبيع تُفسِّر كلتا القوتَين. إنَّ اختلال هذا التناظر هو ما يسبِّب المشكلة.

كيف يختل التناظر الرياضي؟ يأتي أفضل مثال على هذا من المغناطيسية. لنتخيل قضيبًا من مادةٍ مغناطيسية يحتوي على عددٍ هائل من مغناطيساتٍ داخليةٍ دقيقة تشبه الذرات المفردة. وعندما تكون المادة المغناطيسية ساخنة، تتحرَّك هذه المغناطيسات الداخلية الدقيقة حركتَها المغزلية، ويزاحم بعضها بعضًا بصورةٍ عشوائيةٍ متحركة في جميع الاتجاهات، ولا يوجد مجالٌ مغناطيسي كلي للقضيب، ولا عدم تناظرٍ مغناطيسي. لكن عندما يبرد القضيب تحت درجة حرارة معينة، تسمَّى درجة حرارة «كوري»، يتخذ فجأة حالةً ممغنطة؛ إذ تصطفُّ كل المغناطيسات الداخلية الدقيقة بعضها مع بعض. في درجة الحرارة المرتفعة فإن أدنى حالةِ طاقةٍ متاحةٍ تقابل صفرًا من المغنطة، وفي درجات الحرارة المنخفضة فإن أدنى حالةِ طاقةٍ تقابل اصطفاف المغناطيسات الداخلية الدقيقة (بصرف النظر عن طريقة اصطفافها). اختل التناظر وحدث التغيُّر لأنه في درجات الحرارة المرتفعة تتغلب الطاقة الحرارية للذرات على القوى المغناطيسية، أما في درجات الحرارة المنخفضة، فتتغلب القوى المغناطيسية على الحركة الحرارية للذرات.

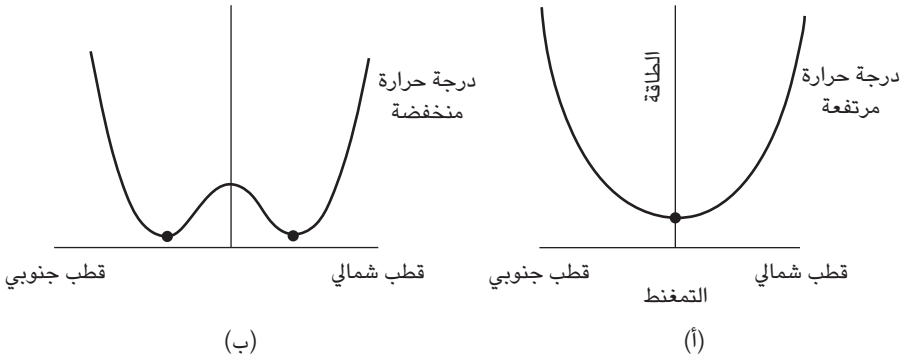
في أواخر ستينيات القرن العشرين كان عبد السلام يعمل في الكلية الإمبريالية بلندن، وكان ستيفن واينبرج في هارفارد، وقد توصَّل كلٌّ منهما على حدةٍ إلى نموذجٍ للتفاعلِ الضعيفِ مطوَّرٍ من التناظر الرياضي الذي ابتكره جلاشو في بداية الستينيات من القرن العشرين، وطوَّره عبد السلام منفردًا بعد ذلك ببضع سنوات. في النظرية الجديدة، يتطلب اختلال التناظر مجالًا جديدًا، هو مجال هيجز، والجسيمات المصاحبة له والتي

سمِّيت أيضًا بجسيماتِ هيجز. وقد دُمِجَت الكهرومغناطيسية والتفاعل الضعيف في مجالٍ مقياسي متناظرٍ واحد: التفاعل الكهربي الضعيف، وذلك من خلال البوزونات الوسيطة العديمة الكتلة. ونتيجةً لأبحاث الفيزيائي الهولندي جيرالد تهوفت، اتضح بعد ذلك في عام ١٩٧١ أن هذه النظرية قابلة لإعادة التطبيع، وحينها بدأ الناس يأخذون النظرية على محمل الجِد. وبظهور دليل على وجود الجسيم Z سنة ١٩٧٣ ترسَّخت النظرية الكهربية الضعيفة. وهذا التفاعل المدمج لا «ينجح» إلا في ظروف الطاقة العالية الكثافة فقط، مثل تلك التي وُجِدت في الانفجار الكبير، وفي ظروف الطاقة الأقل كثافة، يتعطل التفاعل بالطريقة التي تظهر بها جسيمات W وجسيمات Z الكثيفة الكتلة، وتنفصل كلٌّ من التفاعلات الكهرومغناطيسية والتفاعلات الضعيفة كلٌّ في طريقه.

يمكن تقييم هذه النظرية الجديدة من حقيقةِ أن جلاشو وعبد السلام وواينبرج قد اقتسموا جائزةَ نوبل في الفيزياء عنها سنة ١٩٧٩، بالرغم من عدمِ وجودِ برهانٍ تجريبيٍّ مباشرٍ على صحةِ فكرتهم في ذلك الوقت. ومع ذلك، ففي بدايات عام ١٩٨٣ أعلن فريق المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية «سيرن» في جنيف، نتائجَ تجاربَ أُجريَت على الجسيمات في ظروفِ طاقةٍ عاليةٍ جدًّا (تحقَّقت هذه الظروف بتصادم شعاع بروتونات عالية الطاقة مباشرةً بشعاع من البروتونات المضادة العالية الطاقة)، وتُعَدُّ الطريقة الأفضل لشرحها بأنها جسيمات W وجسيمات Z تبلغ كتلتها ٨٠ مليون إلكترون فولت و٩٠ مليون إلكترون فولت، على التوالي. جاءت هذه النتائج متطابقة على نحوٍ جيد للغاية مع تنبؤات النظرية، وتُعدُّ نظريةُ «جلاشو-سلام-واينبرج» نظريةً «جيدة» لأنها تقدِّم تنبؤات يمكن اختبارها، على خلافِ نظريةِ جلاشو السابقة التي لم تقدِّم ذلك. وفي الوقت نفسِه لم يجلس المنظِّرون خاملين؛ إذا أمكن دمج تفاعلَين في نظريةٍ واحدة، فلماذا لا يكون من الممكن إيجادِ نظريةٍ عظمى موحَّدة تضم كلَّ التفاعلات الأساسية؟ صار حلم أينشتاين قريبًا للغاية من التحقُّق بدرجةٍ أكبرَ من أي وقتٍ مضى، وليس في صورة التناظر فحسب، بل في صورة التناظر الفائق والجاذبية الفائقة.

الجاذبية الفائقة

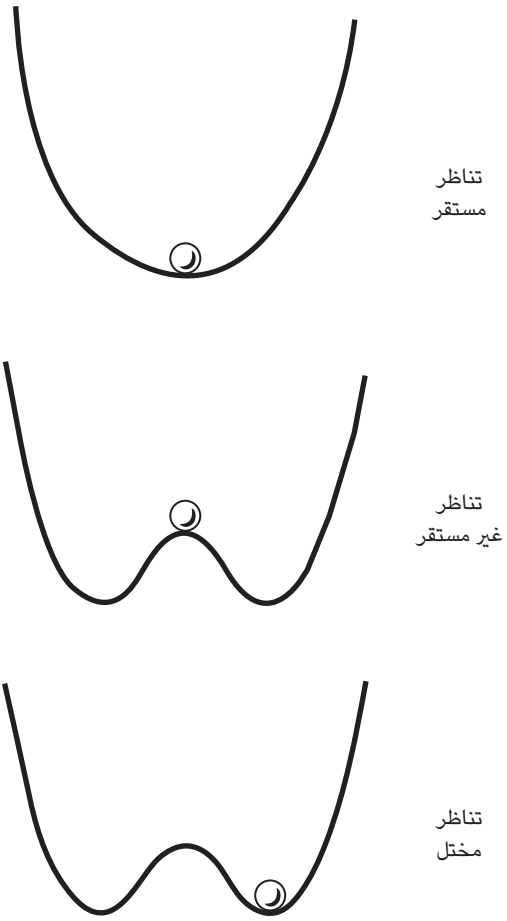
إضافةً إلى صعوبة إعادة التطبيع، تكمُن المشكلة مع نظريات المقياس في أنها ليست فريدة. فمثلما أنَّ نظريةَ مقياس واحدة تتضمَّن لا نهائيات لا بد من تكييفها لتلائم الواقع عن طريق إعادة التطبيع، يوجد أيضًا عددٌ لا نهائي من نظريات القياس المحتملة، وتلك



شكل ٥: يحدث اختلال التناظر عندما يبرُد قضيب من مادة مغناطيسية.

النظريات المختارة لوصف تفاعلات الفيزياء لا بد أن تُكيَّف بالطريقةِ نفسِها، وعلى أساسٍ مخصَّص بالدرجةِ نفسِها، لتلائم مشاهدات العالم الواقعي. الأسوأ من ذلك أنه لا يوجد في نظريات المقياس ما يوضِّح العدد الذي ينبغي أن يوجد من أنواع الجسيمات المختلفة؛ أي لا يوجد ما يوضِّح عدد الباريونات أو اللبتونات (جسيمات من عائلة الإلكترونات)، أو بوزونات المقياس، أو أي شيءٍ آخر. من ناحيةٍ مثالية، يودُّ الفيزيائيون التوصُّل إلى نظريةٍ فريدة لا تستلزم إلا عددًا معينًا من أنواعٍ معينة من الجسيمات لتفسير العالم الفيزيائي. وفي عام ١٩٧٤، تحققت خطوة في اتجاه تشكيل مثل هذه النظرية مع ابتكار التناظر الفائق.

جاءت الفكرة من أعمال يوليوس وايس من جامعة كارلسروه، وبرونو زمينو من جامعة كاليفورنيا بولاية بيركلي. بدأ الاثنان بتخمينِ ما يجب أن تكون عليه الأمور في عالمٍ مثالي التناظر، وهو أن يكون لكل فيرميون بوزون مقابلٌ مساوٍ له في الكتلة. إننا لا نرى في الطبيعة هذا النوع من التناظر فعليًّا، لكن تفسير ذلك قد يكون أنَّ التناظر اختلَّ مثل التناظر الذي يتضمَّن التفاعلات الكهرومغناطيسية والتفاعلات الضعيفة. ومن المؤكَّد بما فيه الكفاية أنك إذا أجريت العمليات الرياضية، فستجد طرقًا تصف التناظرات الفائقة التي وُجدت خلال الانفجار الكبير، لكنها اختلت بحيث اكتسبت الجسيمات اليومية في الفيزياء كتلةً صغيرة بينما اكتسبت شريكتها الفائقة كتلةً كبيرة جدًّا. لم يكن من الممكن للجسيمات الفائقة حينئذٍ أن توجد إلا لزمنٍ قصير قبل انقسامها إلى فيضٍ من الجسيمات



شكل ٦: يمكن فهْم اختلال التناظر المغناطيسي في الشكل ٥ بتخيُّل كرةٍ في وادٍ. في حالة وجود وادٍ واحد، تكون الكرة في حالةِ تناظر مستقرة. وفي حالة وجود واديين، يصبح التناظر غير مستقر، ولا بد من أن تقع الكرة عاجلًا أو آجلًا في أحد الواديين فيختل بذلك التناظر.

الأقل كتلة، ولتكوين مثل هذه الجسيمات الفائقة اليوم، فإننا نحتاج إلى تهيئةِ ظروفٍ مثل ظروف الانفجار الكبير، وتلك ظروف تتسم بطاقةٍ هائلةٍ بالطبع، فلن يكون من المستغرب إذن أن تفشل حتى أشعة البروتونات/مضادات البروتونات المتصادمة في المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية في إنتاجها.

إنَّ ذلك كلَّه قائم على الاحتمالات. غير أنَّ ذلك ينطوي على ميزةٍ عظيمة. لا يزال هناك أنواعٌ مختلِفة من نظريات المجال للتناظر الفائق تمثِّل تنويعات على الفكرة الأساسية، لكن قيود التناظر تعني أن كل نسخةٍ من النظرية لا تسمح إلا بوجود عددٍ محدودٍ من أنواع الجسيمات المختلفة. بعض النسخ تحتوي على مئات من الجسيمات الأساسية المختلفة، وهو احتمال مخيف، لكن بعضها الآخر يتضمَّن عددًا أقل كثيرًا، ولا تتنبأ أيٌّ من النظريات باحتماليةِ وجودِ عددٍ لا نهائي من الجسيمات «الأساسية». والأفضل من ذلك أن الجسيمات مرتَّبةٌ بانتظامٍ في مجموعاتٍ عائلية في كلٍّ من نظريات التماثل الفائق. في النسخة الأبسط، يوجد بوزون واحدٌ فقط حركتُه المغزلية تساوي صفرًا مع شريكٍ حركته المغزلية تساوي −١ / ٢؛ بينما تتضمَّن إحدى النسخِ الأكثرِ تعقيدًا لها اثنين من البوزونات بحركةٍ مغزلية تساوي −١ وفيرميون واحدًا حركتُه المغزلية −١ / ٢ وفيرميون آخرَ حركتُه المغزلية ٣ / ٢ وهكذا. لكنَّ أحسنَ الأخبارِ لم تأتِ حتى الآن. وهو أنه في نظريات التناظر الفائق لا يكون عليك دائمًا أن تقلق بشأن إعادة التطبيع. ففي بعض هذه النظريات تلغي اللانهائيات بعضها بعضًا تلقائيًّا وليس بطريقةٍ معينة، متبعةً بذلك القواعدَ السليمة للرياضيات مع التخلي عن الأعداد المحدودة والمعقولة.

يبدو التناظرُ الفائقُ جيدًا، لكنه ليس الجواب النهائي حتى الآن. فثمَّة شيءٌ ناقص لا يعرفه الفيزيائيون. تتلاءم النظريات المختلفة مع السمات المختلفة للعالم الحقيقي بصورةٍ جيدة، لكن لا توجد نظريةٌ مفردة للتناظر الفائق تفسِّر العالم الحقيقي كله. ومع ذلك، ثمَّة نظرية بعينها للتناظر الفائق تستحق الذكر بصفةٍ خاصة. إنها نظرية الجاذبية الفائقة N = 8.

تبدأ نظرية الجاذبية الفائقة هذه بجسيمٍ افتراضي يُسمى «جرافيتون» هو الذي يحمل مجال الجاذبية. إضافةً إلى هذا الجسيم، توجد ثمانية جسيماتٍ أخرى تُسمى جرافيتونات؛ (ومن هنا يأتي الاسم N = 8)، و٥٦ جسيمًا «واقعيًّا» مثل الكواركات والإلكترونات، و٩٨ جسيمًا تشترك في توسط التفاعلات (فوتونات، وجسيمات W والكثير من الجليونات). هذا عددٌ هائلٌ من الجسيمات، لكن النظرية تحدِّده على وجه الدقة، دون أي مجالٍ لجسيماتٍ أخرى. يمكن معرفةُ نوع الصعوبات التي يواجهها الفيزيائيون في اختبار النظرية من خلال النظر في أمر الجرافيتونات. فهذه الجسيمات لم تُكتشَف قط، ويعود ذلك لسببين متضادَّين تمامًا. ربما تكون هذه الجرافيتونات جسيماتٍ مراوغةً شبحيةً ذات كتلةٍ ضئيلةٍ جدًّا ولا تتفاعل مع أي شيء بالمرة. أو ربما تكون كتلتها كبيرةً

للغاية حتى إن أجهزة توليد الجسيمات المتاحة لدينا في الوقت الحالي غير كافية لتقديم الطاقة اللازمة لتخليقها ورصدها.

إنَّ المشكلات التي تواجه النظرية هائلة بالطبع، لكن النظريات المشابهة للجاذبية الفائقة متسقة على الأقل ومحدَّدة، ولا تحتاج إلى إعادة التطبيع. ثمة شعور بأن الفيزيائيين على المسار الصحيح. بالرغم من ذلك، إذا كانت معجِّلات الجسيمات غير مناسبة لاختبار النظرية، فكيف يمكنهم التأكُّد منها؟ وهذا هو السبب في أن علم الكونيات، من مجالات العلم المزدهرة في هذه الأيام. ومثلما قال هاينز باجليز، المدير العام لأكاديمية العلوم بنيويورك في عام ١٩٨٣: «لقد دخلنا بالفعل عصر فيزياء ما بعد المعجِّلات، الذي يجعل من تاريخ الكون بأكمله أرضًا لاختبار الفيزياء الأساسية وإثباتها.»[6] وليس علماء الكون أقلَّ حماسًا لتقبُّل فيزياء الجسيمات.

هل الكون تقلبات فراغية؟

ربما يكون علم الكونيات في الواقع فرعًا من فيزياء الجسيمات. ذلك أنه وفقًا لإحدى الأفكار التي تطوَّرت من اعتبارها محضَ فكرةٍ مجنونة تمامًا إلى أن حظيت بالتقدير باعتبارها فرعًا من فروع علم الكونيات، ربما يكون الكون وكل شيء فيه، ليس سوى واحد من تلك التقلبات الفراغية التي تسمح لمجموعاتٍ من الجسيمات بأن تنبثق من لا شيء، وتعيش لفترة ثم يُعاد امتصاصها ثانيةً داخل الفراغ. ترتبط هذه الفكرة ارتباطًا وثيقًا باحتمالية أن يكون الكون مغلقًا فيما يتعلَّق بالجاذبية. فكونٌ وُلِد في لهيب انفجارٍ كبير ويتمدَّد لفترة من الزمن ثم يتقلص مرةً أخرى إلى كرة من اللهب ويختفي، «هو» تقلُّبٌ فراغي بالفعل، لكن على مستوًى ضخمٍ جدًّا. وإذا كان الكون متوازنًا تمامًا على مستوى الجاذبية بين التمدُّد اللامحدود والانهيار المحتوم، فلا بد أنَّ طاقةَ الجاذبية السالبة للكون ستلغي بالضبط كتلةَ الطاقة الموجبة لكل المادة الموجودة فيه. إنَّ إجمالي الطاقة في كونٍ مغلقٍ تساوي صفرًا، وليس من الصعب جدًّا تكوين شيءٍ ما بطاقةٍ كليةٍ صفرية من إحدى التقلبات الفراغية، حتى وإن كان الأمر ينطوي على خدعةٍ محبوكة بعض الشيء لكي تتمدَّد جميع الأجزاء الصغيرة مبتعدةً بعضها عن بعض، وتسمح — مؤقتًا — بوجود كل ذلك التنوُّع المثير للاهتمام الذي نراه حولنا.

إنني مولَع بهذه الفكرةِ على نحوٍ خاص؛ إذ كان لي دور في ظهورها بشكلها الحديث في سبعينيات القرن العشرين. يمكننا أن ننسب الفكرةَ الأصلية إلى لودفيج بولتزمان، وهو

فيزيائي من القرن التاسع عشر، وأحد مؤسسي الديناميكا الحرارية الحديثة والميكانيكا الإحصائية. لقد افترض بولتزمان أنه بما أنَّ الكون ينبغي أن يكون في حالةِ اتزانٍ ديناميكي، لكنَّ ذلك لا يبدو ظاهريًّا، فربما يكون مظهره الحالي نتيجةَ انحرافٍ مؤقت عن الاتزان الذي تسمح به قواعد الإحصاء، شريطة الحفاظ على الاتزان في المتوسط، على المدى الطويل. إنَّ احتمالية حدوث مثل ذلك التقلُّب على مقياس الكون المرئي ضئيلة، لكن إذا كان الكون موجودًا في حالةٍ مستقرة على مدارِ زمنٍ لا نهائي، فثمَّة يقينٌ افتراضي بوقوع شيء من هذا النوع في نهاية المطاف، وحيث إن انحرافًا عن الاتزان هو وحده ما يمكن أن يسمح بوجود الحياة، فليس من الغريب أن نكون هنا خلال حدثٍ نادر من انحراف الكون عن الاتزان.

لم تلقَ أفكارُ بولتزمان القبول قط، لكن بعض التنويعات على هذه الفكرة قد استمرت في الظهور من حينٍ لآخر. وفي عام ١٩٧١ ظهرت تلك التنويعة التي راقت لي كثيرًا، وكتبتُ عنها في مجلة «نيتشر»، وهي احتمالية أن يكون الكون قد وُلِد من نارٍ وهو يتمدَّد وسيتقلَّص بعد ذلك إلى لا شيء.[7] وبعد ذلك بسنتَين قدَّم إدوارد من جامعة سيتي بنيويورك، بحثًا إلى مجلة نيتشر طوَّر فيه فكرة الانفجار الكبير بصفته تقلبًا فراغيًّا، لكنه أشار في الخطاب المرفق بالبحث إلى أنَّ مقالي غير الموقَّع هو نقطة البداية لافتراضاته.[8] ولهذا فإنني مهتم على نحوٍ خاص بهذا النموذج الكوني على وجه التحديد، ومن الملائم بالطبع أن يُنسب الفضل الآن كاملًا إلى ترايون في التوصل إلى تلك الفكرة الحديثة عن الكون بصفته تقلبًا فراغيًّا. لم يفكِّر بها أحد في البداية، لكن كما أشار هو حينذاك أنه إذا كانت محصلة الطاقة في الكون تساوي صفرًا، فإنَّ مقدار الزمن المسموح بوجوده بما يتماشى مع المعادلة:

$$\Delta E \Delta t = \hbar$$

يمكن أن يكون طويلًا جدًّا بالفعل. وقال: «لست أزعم أنَّ أكوانًا مثل كوننا تظهر كثيرًا، وإنما الوتيرة المتوقَّعة لظهورها لا تساوي صفرًا فحسب.» وأوضح أيضًا: «إنَّ منطق الظروف يقتضي على كل حالٍ أن يجد المراقبون أنفسهم دائمًا في أكوانٍ قادرةٍ على توليد الحياة، ومثل هذه الأكوان كبيرة بدرجةٍ مثيرة للإعجاب.»

ظلت هذه الفكرة مهملةً لعشر سنوات. لكن في ثمانينيات القرن العشرين، بدأ الناس يأخذون نسخةً جديدةً منها على محمل الجِد. وبرغمِ آمالِ ترايون الأولية، أظهرت

الحسابات المقترحة أن أي «كون كمِّي» جديد يتكوَّن من تقلبٍ فراغي سيكون في الواقع ظاهرةً دقيقة، وقصيرة الأجل، ولا تشغل سوى حجمٍ صغيرٍ للغاية من الزمكان. غير أنَّ علماء الكون قد اكتشفوا بعد ذلك طريقةً تؤدي بهذا الكون المتناهي الصِّغر إلى تمددٍ دراماتيكي يمكن أن يضخِّمه حتى يصل إلى حجم الكون الذي نعيش فيه في أقلَّ من طرفةِ عين. صار مصطلح «التضخم» هو الكلمة السحرية في علم الكون في منتصف ثمانينيات القرن العشرين، ويفسِّر التضخم كيف أن تقلبًا فراغيًّا متناهي الصِّغر يمكن أن ينمو إلى الكون الذي نعيش فيه.

التضخُّم والكون

كان علماء الكونيات مهتمين بالفعل بأي جسيماتٍ إضافية قد تكون موجودةً في الكون، لأنهم يبحثون دائمًا عن «الكتلة المفقودة» اللازمة لكي يصبح الكون مغلقًا. يمكن للجرافيتونات التي تبلغ كتلةُ الجسيم الواحد منها ١٠٠٠ إلكترون فولت أن تكون مفيدةً للغاية هنا؛ إذ إنها لن تساعد في غلق الكون فحسب، بل إن وجودها سيكون ملائمًا تمامًا لتكوينِ تكتلاتٍ من المادة في حجم المجرات، وذلك وفقًا للمعادلات التي تصف تمدُّد الكون من الانفجار الكبير. وقد تكون النيوترينوات التي تبلغ كتلة الواحد منها ١٠ إلكترون فولت ملائمةً تمامًا لتشجيع نمو تكتلات من المادة على مستوى تجمُّعات المجرات، وهكذا. غير أنَّ علماء الكونيات أصبحوا أكثرَ اهتمامًا بفيزياء الجسيمات، لأن أحدث التأويلات لاختلال التناظر تشير إلى أن هذا التناظرَ المختلَّ نفسَه ربما يكون هو القوة الدافعة التي فجَّرت فقاعتنا من الزمكان إلى حالتها المتمددة.

جاءت الفكرةُ في الأساس من آلان جوث الباحث بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. تتلخَّص الفكرة في صورةٍ للكون في مرحلةٍ كان فيها ساخنًا جدًّا وكثيفًا جدًّا وكانت كل التفاعلات الفيزيائية (ماعدا الجاذبية؛ إذ لا تتضمَّن النظرية التناظر الفائق بعد) متحدةً في تفاعلٍ تناظريٍّ واحد. وبينما بدأ الكون يبرد، اختلَّ التناظر واتخذت كلٌّ من القوى الأساسية للطبيعة، الكهرومغناطيسية والقوى النووية القوية والضعيفة، مسارَها المنفصل. ومن الواضح أن حالتَي الكون قبل اختلال التناظر وبعده، مختلفتان إحداهما عن الأخرى تمامًا. إنَّ التغيُّر من حالةٍ إلى الأخرى يشبه التغير الطوري، مثل تغيُّر الماء إلى الثلج عند التجمُّد، أو إلى البخار عند الغليان. بالرغم من ذلك، فبخلاف تغيُّر الأطوار على مستوى الحياة اليومية، فإنَّ اختلال التناظر الذي حدث في الكون المبكِّر ينبغي، وفقًا

للنظرية، أن يكون قد ولَّد قوةَ جاذبيةٍ طاردة طاغية، فينفجر كل شيء مبتعدًا بعضه عن بعض في جزء من الثانية.

إننا نتحدَّث عن الأصول المبكِّرة جدًّا للكون، أي قبل ١٠⁻³⁵ ثانية تقريبًا، عندما كانت «درجة الحرارة» ربما أكثر من ١٠٢٨ كيلفن، فيما يتعلَّق بأي معنًى لدرجة الحرارة في مثل هذه الحالة. كان لا بد لهذا التمدُّد الناتج عن اختلال التناظر أن يكون أُسِّيًّا، فيؤدي إلى تضاعفِ حجمِ كلِّ جزءٍ دقيقٍ جدًّا من الفضاء كل ١٠⁻³⁵ ثانية. وفي غضون زمنٍ أقل كثيرًا من الثانية، يتضخَّم هذا التمدد المباشر من منطقةٍ في حجم البروتون إلى حجمِ الكونِ الذي نستطيع رصده اليوم. وبعد ذلك، تتكوَّن في تلك المنطقة المتمددة من الزمكان الفقاعات التي نعتقد اليوم أنها زمكانٌ عاديٌّ، وتنمو عن طريقِ تحوُّلٍ طوريٍّ إضافي.

لم تحاول نسخة جوث الأولية للكون التضخمي أن تفسِّر المكان الذي أتت منه الفقاعات الأولية الدقيقة، لكن من المغري جدًّا أن نكافئها بتقلباتٍ فراغية من النوع الذي وصفة ترايون.

إنَّ هذه الرؤية الدرامية للكون تحلُّ الكثيرَ من الألغاز الكونية، ولا سيما المصادفة البارزة المتمثِّلة في أن فقاعة الزمكان التي يوجد فيها كونُنا تتمدَّد فيما يبدو بمعدلٍ على الحدود بين أن يظل الكون مفتوحًا أو مغلقًا. وهذا التصوُّر للكون التضخمي «يستلزم» وجود هذا التوازن، بسبب العلاقة بين كثافة الكتلة/الطاقة للفقاعة وبين القوى التضخمية. والأمرُ الأكثرُ إثارةً هو أن هذا التصوُّر يعهد بنا إلى دورٍ تافهٍ جدًّا في الكون؛ إذ يضع كلَّ ما نستطيع رؤيته في الكون في فقاعةٍ داخلَ فقاعةٍ أخرى لِكُلِّ آخرَ يتمدَّد بدرجةٍ أكبرَ كثيرًا.

إننا نعيش في زمنٍ مثير، ويبدو أننا على شفا فتحٍ كبيرٍ لفهمنا عن الكون يتسم من الأهمية، كما تنبَّأ ديراك، بما تتسم به خطوة الانتقال من ذرة بور إلى ميكانيكا الكَمِّ. وإنني أجد أنه من المثير للاهتمامِ للغاية أن ينتهي بحثي عن قطة شرودنجر بالانفجار الكبير، وعلم الكون، والجاذبية الفائقة والكون التضخمي؛ ذلك أنني بدأت في كتابي السابق «انثناء الفضاء» في سرد قصة الجاذبية والنسبية العامة، وانتهيت إلى المكانِ نفسِه. لم يكن ذلك هو مخطَّطي الأصلي في كلتا الحالتين، وفي كلتا الحالتين أيضًا يبدو أن الجاذبية الفائقة هي نقطةُ النهاية الطبيعية، وربما تكون تلك إشارة إلى أن التوحيد بين نظريةِ الكَمِّ والجاذبية يلوح في الأفق. بالرغم من ذلك، فليس لدينا نهايةٌ واضحة بعدُ، وأنا آمُل

ألا يحدث هذا أبدًا. وكما قال ريتشارد فاينمان «من الطرق التي تؤدي إلى توقُّف العلم ألا نجري التجارب إلا حيثما نعرف القانون». والفيزياء هي استكشاف المجهول، وأضاف:

> ما نحتاج إليه هو الخيال، على أن يكون خيالًا محكمًا. وعلينا أن نجد رؤيةً جديدةً للعالم تتوافق مع كل شيءٍ معروف، لكن تختلف معه في تنبؤاتها في بعض المواضع، وإلا فلن تكون مثيرةً للاهتمام. وفي ذلك الاختلاف يجب أن تتفق مع الطبيعة. فإذا استطعت أن تجد أيَّ رؤيةٍ أخرى للعالم تتفق مع النطاق الكامل لما هو مرصود بالفعل لكن تختلف في موضعٍ آخر، فستكون قد توصَّلت بذلك إلى اكتشافٍ كبير. قد يكون ذلك محالًا تقريبًا، لكن ليس تمامًا ...[9]

إذا انتهى عمل الفيزياء في أيِّ يوم من الأيام، فإن العالم سيصبح مكانًا أقلَّ إثارةً فيما يتعلَّق بالحياة، ولهذا فإنني سعيدٌ لأنْ أتركك مع هذه النهايات المفتوحة، والتلميحات المغرية، واحتمال وجود المزيد من القصص التي لم تُروَ بعدُ، وكلٌّ منها لا تقل في عنصر الإثارة عن قصة قطة شرودنجر.

هوامش

(1) Directions in Physics, Chapter Two. Dirac is not alone in his con- cern; Banesh Hoffmann, in *The Strange Story of the Quantum*, page 213, describes renormalization as leading physics into a culde- sac. “The auda- cious juggling with infinities is extraordinarily brilliant. But its brilliance seems to illuminate a blind alley.”

(2) If you really want to know, the Planck length is given by the square root of Gh/c^3 and the Planck time is the square root of $G\hbar/c^5$.

(3) For example, see Wheeler’s contribution to Mehra’s *The Physicist’s Conception of Nature*.

(4) This borrows heavily from the approach used by Paul Davies in his book *The Forces of Nature*, Cambridge University Press, 1979.

(5) The W^+ and W^- can also be considered, of course, as one particle and its antiparticle, like the electron (e^-) and the positron (e^+). In case you aren't confused enough, the W also has another name, the intermediate vector boson.

(6) Quoted in *Science*, 29 April 1983, volume 220, page 491.

(7) *Nature*, volume 232, page 440, 1971.

(8) *Nature*, volume 246, page 396, 1973.

(9) *The Character of Physical Law*, page 171.

كلمة أخيرة

تحديث

بعد نشْرِ الإصدارِ الأول من كتاب «البحث عن قطة شرودنجر» بفترةٍ قصيرة، سُئل جون بيل عمَّا إن كان يرى أنَّ تجربة «أسبيكت» هي الاختبار التجريبي «النهائي» الحاسم للواقع الكَمِّي، أم لا. وقد أجابَ:

> كلا، لا أعتقد ذلك. إنها تجربة مهمة، وهي ربما تحدِّد النقطة التي ينبغي للمرء التوقُّف عندها والتفكير لبعض الوقت، لكني آمُل بالطبع ألا تكون هي النهاية.[1]

ومن منطلق أنَّ التجربة «تحدِّد النقطة التي ينبغي للمرء التوقُّف عندها والتفكير لبعض الوقت»، ألَّفتُ هذا الكتاب. لكن إلى أين أخذَنا ربعُ قرن آخر من التفكير وإجراء التجارب؟

يُعَد التطور الأهم فيما يتعلَّق بالتفكير بشأنِ الواقعِ الكَمِّي هو تحوُّل تفسير العوالم المتعدِّدة من «رأي أقلية جدير بالاحترام» إلى رأيٍّ شائعٍ للغاية لدرجةِ أنه صار يُشار إليه بالحروف الأولية من مصطلحه الإنجليزي، التي يعرفها جميعُ الفيزيائيين. في أواخر الثمانينيات والتسعينيات من القرن العشرين، حازت الفكرة دعمًا من علماء الكَوْنيات، ومنهم الشهير ستيفن هوكينج الذي لم يَجِد طريقةً تؤدي إلى «انهيار الدالة الموجية للكون»، واضطُر إلى التفكير في البديل، وهو تفسير العوالم المتعددة. غير أنَّ عِلم الكونيات

مجالٌ مبهم بعض الشيء، والسبب الحقيقي لإحياء تفسير العوالم المتعددة هو تطويرُ الحوسبةِ الكَمِّية، لا سيَّما ما قام به فيزيائيٌّ جامعة أكسفورد ديفيد دويتش.

لقد عرضتُ التفاصيلَ في كتابي «البحث عن العوالم المتعددة»، لكني سأوضِّح هنا بإيجازٍ أنَّ الحاسوبَ الكَمِّي يختلف عن الحاسوب العادي الذي أستخدمه لكتابة هذه الكلمات في أنَّ «المحوِّلات» الموجودةَ في بنوكِ ذاكرتِه (وحدات «البِت») ليست «تشغيل» و«إيقاف تشغيل» فحسب، بل يمكن، وفقًا لتفسير كوبنهاجن، أن توجَد في تراكبٍ من الحالات على غرارِ قطةِ شرودنجر، فتُوجَد في حالتَي «التشغيل» و«إيقاف التشغيل» في الوقتِ نفسِه. ومن الناحية العملية يعني هذا أنَّ عدد وحدات البِت الفعلي في هذا الحاسوب لا يساوي عدد المحوِّلات، بل يساوي العدد ٢ مرفوعًا لأُس عدد المحوِّلات. وبهذا فإنَّ حاسوبًا كَمِّيًّا بذاكرةٍ سعتُها ٤ بِت يعمل بكفاءةِ حاسوبٍ تقليديٍّ بذاكرةٍ سعتُها ١٦ بِت، وهكذا. وبذاكرةٍ سعتُها ١٠ بِت (أو بِت كَمِّي) فحسب، فإنَّ الحاسوب سيعمل بكفاءة حاسوب عادي تبلغ سعة ذاكرته ١٠٢ بِت أو كيلوبِت واحدًا.

وفي وقتٍ مبكِّر يعود إلى عام ١٩٨٥، أثبت دويتش نظريًّا أنَّ الحواسيب الكَمِّية ستكون قادرةٍ بصفةٍ أساسيةٍ على إجراءِ عملياتٍ حسابية تعجز الحواسيب التقليدية عن إجرائها. لكنَّ الجوانب العملية لبناء مثل هذا الحاسوب كانت تتجاوز قدرات التجريبيين في ذلك الوقت. الأمر المذهل أنه بالرغم من الصعوبات العملية، حدثَ إنجازٌ بارز للغاية في بداية القرن الحادي والعشرين؛ إذ تمكَّن فريقٌ في «مركز أبحاث المادين» التابع لشركة «آي بي إم» من تصميم كمبيوتر كَمِّي تبلغ سعةُ معالِجه سبعة بِت كَمِّي؛ أي ما يعادل ١٢٨ بِت في الأجهزة التقليدية، وصارت بعض الحواسيب الكَمِّية الأكبر بعض الشيء تُستخدم الآن. إنَّ الحوسبة الكَمِّية ناجحةٌ بالتأكيد. لكن الأهم، هو كيف تنجح، أو بالأحرى، «أين»؟

لا ينشغل العلماء التجريبيون كثيرًا بشأن ذلك. لكنَّ دويتش قد توصَّل إلى استنتاجاتٍ مهمةٍ من نجاحِ الحوسبةِ الكَمِّية. في الحوسبة، يُطلق على ٨ وحدات من البِت اسم البايت، وهي الوحدة المعتادة التي نقيس بها ذاكرة الحاسوب. ويمكن لمخزن ذاكرة (يُسمَّى عادةً «السجل») يتألَّف من ٨ وحداتٍ كَمِّية أن يتذكَّر ٢٥٦ عددًا في الوقت نفسه. يقول دويتش إنَّ التفسير المنطقي الوحيد لهذا أنَّ «التراكب» يمثِّل بالفعل ٢٥٦ «عالَمًا موازيًا» مختلفًا. وإذا كان لدينا حاسوبٌ كَمِّي تبلغ سعة ذاكرته ١٠٠ بِت كَمِّي فحسب، فسوف يعادل في كفاءته ١٢٦٧ مليار مليار مليار حاسوب تقليدي جميعها يعمل في ١٢٦٧ مليار مليار مليار عالَم. إنَّ حقيقةَ عملِ الحواسيب الكَمِّية تثبت وجود العوالم المتعددة. وقد أدَّى هذا

بدويتش إلى وضعِ تصوُّرٍ مختلِفٍ لموضوع تفسير العوالم المتعددة، وهو يقدِّم فهْمًا جديدًا للواقعِ الكَمِّي.

كانت الطريقة التي يفكِّر بها أشخاصٌ مثل هيو إيفريت في العوالم المتعدِّدة تتمثَّل في الانقسام. ففي تجربة القطة وفقًا لتصوُّرهم، ينقسم العالَم بأكمله إلى فرعَين في لحظةِ إجراء التجربة؛ أحدهما يحتوي على قطةٍ ميتة، بينما يحتوي الآخر على قطةٍ حية. لكنَّ دويتش يرى أنَّ كلتا النسختين من الواقع موجودةٌ «دائمًا». كان يوجد كَوْنان على الدوام، وقد ظلَّا متطابقَين حتى نقطةِ إجراء التجربة، وحدث الاختلافُ بينهما بدءًا من تلك النقطة. في أحدِ الكَوْنين، تموت القطة (أو بالأحرى تموت «قطةٌ» ما)، وفي الكون الآخر تعيش القطة، لكن «دون» انقسام. بدأت بعض الأفكار المماثلة تتشكَّل أيضًا منذ ثمانينيات القرن العشرين على يدِ فيزيائيٍّ آخرَ من جامعة أكسفورد، وهو جوليان بربور، الذي طوَّر منظورًا مثيرًا للاهتمام عمَّا يعنيه هذا كلُّه فيما يتعلَّق بفهْمنا لطبيعة الزمن. غير أنَّ تلك قصةٌ أخرى.

ثمَّة تطوُّر عملي آخر حدث في السنوات الأخيرة ينبع من مفارقة «إي بي آر» وتجربة «أسبيكت». فمنذ ١٩٨٤، انتقلنا من إثباتِ أنَّ أيَّ كِيانَين كُموميَّين يتفاعلان يظلان في حالةِ «تشابك»، حتى إذا فصلت بينهما مسافاتٌ ضخمة، إلى تطبيق هذا السلوك الناتج عمليًّا. وقد جرى ذلك بطريقتَين. الأولى هي إنتاجُ تعليماتٍ برمجيةٍ كَمِّية لا يمكن فكُّ تشفيرها، والثانية هي تطويرُ الانتقال الآني.

إنَّ أول نسخةٍ جرى تطويرها من التشفير الكَمِّي لا تتضمَّن التشابكَ الكَمِّي بصورةٍ مباشرة، وإنما تعتمد على التراكب الكَمِّي. تُعزى هذه النسخة إلى بحثٍ أجراه كلٌّ من تشارلز بينيت الذي كان يعمل لدى شركة «آي بي إم» وجيليس براسارد الذي كان يعمل في مونتريال عام ١٩٨٤. تتمثَّل الطريقة التي تعمل بها التعليمات البرمجية (الشفرات) في أنَّ الرسالةَ الأصلية تُشوَّش بطريقةٍ ما حتى لا يمكن فَهْمها، ثم تُنقَل إلى شخصٍ آخر يتمكَّن من إزالة التشوُّش لأنه يملك «مفتاحًا» يخبره بطريقةِ فعْلِ ذلك. تكمُن الفكرة في كيفية نقل المفتاح من المُرسِل إلى المستقبِل دون حصولِ طرفٍ ثالثٍ عليه واستخدامه في فكِّ شفرةِ الرسالة. كان الحل الذي اقترحه بينيت وبراسارد هو إرسال المفتاح في صورةِ سلسلةٍ من الفوتونات في حالاتٍ مختلفة من الاستقطاب. ستكون هذه الفوتونات في حالاتٍ من التراكب؛ ومن ثَم إذا حاول المتنصِّت «قراءة» المفتاح، فستنتقل الفوتونات إلى حالة أو أخرى، مما يوفِّر دليلًا على اعتراض التواصل. والأفضل من ذلك، ومن دونِ إسهابٍ في

التفاصيل التقنية، يمكن إعدادُ النظامِ بطريقةٍ تجعل المتنصِّت يدمِّر المعلومات الموجودة في المفتاح بمحاولة قراءتها؛ ولذا فلن يتمكَّن من استخدامها على أية حال. وليس ذلك من شطحات الخيال النظري فحسب. ففي الحادي والعشرين من أبريل عام ٢٠٠٤، بعد عشرين عامًا فحسب من توصُّل بينيت وبراسارد إلى هذه الفكرة، أجرى فيزيائيون من جامعة فيينا بمساعدةِ بنكٍ محلي وعُمدة المدينة تحويلًا إلكترونيًّا للأموال من البنك إلى سلطات المدينة باستخدام هذا النوع المحدَّد من الأنظمة التي لا يمكن فكُّ شفرتها. نُقِلت إشارات مماثلة أيضًا عبر الأثير على نطاقٍ يزيد عن ١٥٠ كيلومترًا، مما يثبت أنه سيصبح من الممكن إرسالُها إلى مدار الأرض على متن أقمار صناعية. وما هي إلا مسألةُ وقتٍ، ولن يكون وقتًا طويلًا على الأرجح، ويُستخدم هذا الأسلوب بطريقةٍ اعتياديةٍ في تشفير المعلومات، كالمعلومات التي تقدِّمها عند استخدام بطاقات الائتمان للشراء عبر الإنترنت.

أما الأسلوب الثاني للتشفير الكَمِّي فقد اقترحه أرتور إيكيرت الباحث بجامعة أكسفورد في تسعينيات القرن العشرين، لكنه لم يبلغ تلك المرحلة المتقدمة من التطبيق العملي. يستند هذا الأسلوب إلى مبدأ بسيط، لكنه ذو صعوباتٍ عمليةٍ هائلة. ففي البداية، يجب إعدادُ زوجٍ من الفوتونات (أو غيرها من الكِيانات) التي توجد في حالةِ تشابك. بعد ذلك، تُرسِل أحدَ الفوتونَين إلى صديقك الذي يُجري قياسًا يعترض مسار الفوتون، ثم يرسله إليك مجددًا. وأخيرًا، تُجري قياسًا لحالة الكِيانَين المتشابكَين، فيخبرك بما فعله صديقك للكِيان الذي تدخل فيه. لا يمكن لأحدٍ أن يفكَّ شفرة هذا المفتاح؛ لأنك تحتاج إلى كلا الكِيانَين المتشابكَين لمعرفةِ ما فعله صديقك، المشكلة هي أنه سيكون عليك إرسال تدفُّق من الفوتونات ذَهابًا وإيابًا مع الاعتناء في الوقتِ نفسِه بشركائها من الفوتونات لكي تتمكَّن من إرسالِ مقدارٍ مفيدٍ من المعلومات، غير أنَّ التغلُّبَ على هذه المشكلة ممكن.

لقد ادَّخرت الأسلوبَ الأفضل، أو المفضَّل لديَّ على الأقل، إلى النهاية. توصَّل تشارلز بينيت عام ١٩٩٣ إلى استخدامٍ آخرَ للتشابك، وهو الانتقال الآني الكَمِّي. وكالمعتاد، يبدأ الإجراء بالفوتونات، لكن ربما يتطوَّر في يومٍ ما إلى ما هو أكبرُ من ذلك. يتمثَّل المبدأ الأساسي للانتقال الآني في صنْعِ نسخةٍ طبْقِ الأصل من شيءٍ ما في موقعٍ مختلفٍ عن الموقع الأصلي للشيء؛ أي كشراء ملفات الموسيقى بتنسيق «إم بي ثري» عبر الإنترنت على سبيل المثال. لقد ثبُتَ أنَّه من المحال استنساخ فوتون واحد؛ أي يستحيل صنْعُ نسخةٍ طبقِ الأصل منه في الحالةِ الكَمِّيةِ نفسِها. بالرغم من ذلك، يمكن تنفيذ الانتقال الآني،

وقد تحقَّق ذلك بالفعل باستخدام زوجٍ من الفوتونات المتشابكة. تتمثَّل البداية في إعدادِ زوجٍ من الفوتونات المتشابكة التي تُنقَل بعد ذلك إلى مواقعَ مختلفةٍ دون إجراء أي قياس لحالاتها. بعد ذلك، يسمح أحد القائمين بالتجربة للفوتون المسئول عنه بالتفاعل مع شيء آخر، ويخزِّن المعلومات بشأنِ ناتِج هذا التفاعل. وبعدها تُنقَل هذه المعلومات إلى القائم بالتجربة الثاني باستخدامِ طرقٍ تقليدية (ومن الضروري ألا تتجاوز سرعة الضوء). وباستخدام هذه المعلومات، يمكن لفيزيائي بارع أن يعدِّل الفوتون الثاني بطريقةٍ تجعله نسخةً طبقَ الأصل من الفوتون الأول. في واقع الأمر، يصبح الفوتون الثاني هو الفوتون الأول. ونؤكِّد مرةً أخرى على أنَّ ذلك قد تحقَّق بالفعل. لقد نجح الفيزيائيون بالفعل في إجراءِ النقل الآني لفوتوناتٍ من أحد جانبي مختبر إلى الجانب الآخر في البداية، ونجحوا مؤخرًا في نقلها آنيًّا عبرَ مسافةٍ تبلغ بضعة كيلومترات.

إلى أين سيئول الأمر؟ لا يمكن لأحدٍ أن يعرف على وجه اليقين إلى أين ستأخذنا مثل هذه التطورات في القرن الحادي والعشرين، مثلما كان الأخوَان رايت لا يعرفان إطلاقًا مدى تطوُّر آلات الطيران خلال القرن العشرين. لكنَّ الجلي أنَّ أسرارَ عالَمِ الكَمِّ قد انكشفت، وأننا على أعتابِ مرحلة جديدة من تطبيق المبادئ الكَمِّية في الاستخدامات العملية. ومن المرجَّح أن يكون القرن القادم أكثرَ إثارة حتى من سابقه.

هوامش

(1) Paul Davies and Julian Brown (editors), *The Ghost in the Atom*, Cambridge University Press, 1986.

المراجع

هذه هي الكتب التي قرأتُها في مسارِ بحثي عن حقيقةِ قطة شرودنجر. لم أرتِّب لتقديمِ مجموعةٍ شاملةٍ من المراجع لنظريةِ الكَمِّ، ولا شك أنَّ خبراء المجال سيلاحظون غياب بعض العناوين التي قد يتوقَّعون وجودها هنا. بالرغم من ذلك، فإن أحد المراجع يقودنا إلى آخرَ، وتستطيع أن تجد كلَّ ما كُتِب من الأمور المهمة عن نظريةِ الكَمِّ والكثير جدًّا من الموضوعات الأخرى بالبدء من مكانٍ ما من الخيارات التالية، واتباع حدْسك بعد ذلك. وإضافةً إلى الكتب غير الخيالية، أقدِّم في النهاية أيضًا مجموعةً من كتب الخيال العلمي، التي لا أجِدها مسليةً فحسب، بل تحتوي أيضًا على معلوماتٍ مفيدة عن بعض أفكار فيزياءِ الكَمِّ، ولا سيما فكرة العوالم المتوازية. وقد انتهزت فرصةَ إعادة الطبْع لتضمين بعضٍ من مؤلفاتي الخاصة الأحدث — من الكتب غير الخيالية والخيالية أيضًا — إذ توضِّح بعضَ الأفكار التي يناقشها هذا الكتاب.

نظريةُ الكَمِّ

A. d'Abro, *The Rise of the New Physics*, volume two, Dover, New York, 1951 (original edition 1939).

معالجة مبكِّرة شاملة لغير المتخصصين. يغطي الجزء الأول الخلفيتَين التاريخية والرياضية، ومن ثَم فالجزء الثاني بأكمله يدور عن نظريةِ الكَمِّ. يُصعِّب أسلوبُ الكتابةِ القديمةِ المهمةَ بعض الشيء على القراء الحديثي السِّن، لكنه يقدِّم معالجةً متبحرة؛ إذ

يشكِّل الجزءان معًا ٩٨٢ صفحة، وهو جدير بالقراءة تمامًا إذا كنت ملتزمًا بما يكفي للاجتهاد في فهْم بعض الرياضيات.

Kenneth Atkins, *Physics—Once Over—Lightly*, Wiley, New York, 1972.

هذا الكتاب مُعَدٌّ ليكون مقرَّرَ فصلٍ دراسي واحد في الفيزياء للطلابِ غيرِ المتخصصين في العلوم، لكنه مُشَوِّق وواضح بما فيه الكفاية ليكون ذا قيمةٍ للقارئ العادي. إنه أحد أفضل الكتب الجادة في الفيزياء لغير المتخصصين في العلوم، وهو يطوف بالقارئ بدءًا من البدايات البسيطة إلى النسبية وميكانيكا الكَمِّ والأنوية والجسيمات. ومع أن الكتاب لا يتطرق إلى النتائج الفلسفية ومعنى الواقعِ الكَمِّي إلا من بعيد، فإنه يقدِّم أساسياتِ فيزياءِ الكَمِّ بوضوحٍ لأي شخص يرغب في محاولة وضع بضعةِ أرقام في المعادلة. أوصي به بشدة.

Ted Bastin (editor), *Quantum Theory and Beyond*, Cambridge University Press, New York, 1971.

مبني على مقالاتٍ أُلقيت في مؤتمرٍ تعليمي غير رسمي عُقِد في كامبريدج سنة ١٩٦٨ لدراسةِ إمكانيةِ حدوث «تحوُّل نوعي» رئيسي في نظريةِ الكَمِّ في وقتٍ قريب. الكتاب صعبٌ بعضَ الشيء وفلسفي بدرجةٍ أكبرَ من معظم الكتب المُشار إليها هنا.

Max Born, *The Restless Universe*, Dover, New York, 1951.

أفضلُ عرضٍ معاصرٍ للفيزياء الجديدة بقلم إحدى الشخصيات الرائدة في تطويرِ نظريةِ الكَمِّ. ليس الكتاب عرْضًا لتاريخ ميكانيكا الكَمِّ، بل هو كتابٌ عن الفيزياء «لعامة الجمهور»، ويتضمَّن أحد الأوصاف المبكِّرة للتفسير الإحصائي الذي كان السببَ في حصول بورن على جائزة نوبل فيما بعد، وبأسلوبٍ يناسب غيرَ المتخصصين. من الجدير بالذكر أيضًا أنه يحتوي — منذ نصف قرن — على رسومٍ كاريكاتورية توضِّح العمليات الديناميكية.

Max Born, *The Born–Einstein Letters*, Macmillan, London, 1971

مراسلات جرت بين رجلين عظيمين مع تعليقات لبورن. تحتوي المراسلات على تعليقاتٍ هامشيةٍ عديدةٍ ومثيرةٍ حول نظريةِ الكَمِّ وتردُّد أينشتاين في قبولِ تفسيرِ كوبنهاجن.

Louis de Broglie, *Matter and Light*, Norton, New York, 1939 (translation of French edition published in 1937; also available as a Dover paperback).

للكتاب أهميةٌ تاريخية بصفةٍ أساسية، وهو تقرير معاصر لميلاد الفيزياء الجديدة بقلم أحد المساهمين فيها.

Louis de Broglie, *The Revolution in Physics*, Greenwood Press, New York, 1969.

ترجمة إنجليزية غير جيدة للغاية لكتابٍ فرنسيٍّ آخرَ أكثرَ قِدمًا بكثير، لكنه مهم من الناحية التاريخية أيضًا.

Fritjof Capra, *The Tao of Physics*, Bantam, New York, 1980.

باكورة الموجة الجديدة من الكتب التي تربط فيزياءَ الجسيمات الحديثة بالفلسفة الشرقية والتصوف والدِّين. كابرا فيزيائي ينسج روايةً مُشوِّقة تضم الأفكارَ الأساسيةَ للكَمِّ، لكنه لا يضعها في سياقٍ تاريخي.

Jeremy Cherfas, *Man Made Life*, Blackwell, Oxford, 1982.

مقدمة مباشرة لغرائب الهندسة الوراثية وإمكانياتها وحدودها.

Barbara Lovett Cline, *The Questioners*, Crowell, New York, 1965.

قصة ميكانيكا الكَمِّ تُحكى عن طريق السيرة الذاتية، من خلال فصولٍ عن رذرفورد وبلانك وأينشتاين وبور، وباولي وهايزنبرج. كتاب جيِّد للقراءة، وقوي في الحكايات التي يرويها لكنه لا يتضمَّن سوى القليل من الفيزياء.

Francis Crick, *Life Itself*, Simon & Schuster, New York, 1982.

مقدمة سهلة عن طبيعة الجزيئات الحية، ويقدِّم افتراضًا بأن الحياة على الأرض ربما تكون قد أتت من الكون الخارجي بصفة عامة.

Paul Davies, *The Accidental Universe*, Cambridge University Press, New York, 1982.

عرضٌ واضح لكنه رياضي للعديد من «المصادفات» الكونية التي أدَّت إلى وجودنا هنا، مع إشارةٍ مختصرة للصلة بين تفسير إيفرت لميكانيكا الكَمِّ وبين المبدأ الإنساني.

للمؤلِّفِ نفسِه أيضًا عرضٌ غيرُ رياضي للمبدأ الإنساني مكتوب «للعموم»، يُعَد هو الموضوع الرئيسي لكتاب: *Other Worlds* (Dent, London, 1980).

Bryce DeWitt and Neill Graham (editors), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1973.

إعادة نشر لمجموعة الأوراق البحثية الرئيسية التي أرست أساسَ نظرية العوالم المتعدِّدة، يتضمَّن الكتابُ رسالةَ الدكتوراه لإيفرت، ومقالات إيفرت وويلر الصادرة سنة ١٩٥٧ في مجلة «ريفيوز أوف مودرن فيزيكس»، ومحاولات ديويت وجراهام اللاحقة لتعميم النظرية ونشرها على نطاقٍ أوسع، إضافةً إلى مساهمات أخرى. كتاب منظَّم من جزء واحد يلخِّص كلَّ ما دار في هذا الموضوع.

Paul Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, New York, 1982.

الكتاب المعتمَد للطلاب الجادين حتى اليوم. رُوجع وحُدِّث عدةَ مرات، ويحتوي الكتاب على جزء عن الكهروديناميكيا الكَمِّية، وتَعرِض أجزاء المقدمة أوضحَ نقاش يمكن أن تجده في أي مكانٍ عن عدم اليقين، والتراكب والحاجة إلى ميكانيكا الكَمِّ. وحتى إذا لم تكن طالبًا جادًّا، فإن الكتاب يستحق أن تستعيره من المكتبة لقراءة الفصل الأول، أما إذا كنت طالبًا جادًّا فإن نهج ديراك في الانتقال من الرياضيات إلى شرودنجر وتفسيرات هايزنبرج، أكثرُ منطقيةً وذكاءً من الطريقة التي يُدرَس بها الموضوع اليوم في المعتاد.

Paul Dirac, *Directions in Physics*, Wiley, New York and London, 1978.

محاضرات أُلقيت في أستراليا ونيوزيلندا سنة ١٩٧٥. وهي لا تقدَّر بثَمن بصفتها رؤيةَ آخرِ عضوٍ ما زال على قيد الحياة من المجموعة التي طوَّرت ميكانيكا الكَمِّ في عشرينيات القرن العشرين، ومما يضاعف من قيمتها أنها نُسخٌ مباشرة من محاضرات ديراك الممتعة والواضحة. ويحتوي الكتاب على مناقشةِ أفكارٍ مثل الجاذبية المتغيرة والمغناطيسات الأحادية القطب التي تلقي الضوءَ على عدم اكتمال الفيزياء اليوم.

Sir Arthur Eddington, *The Nature of the Physical World*, Folcroft Library Editions, Folcroft, Pennsylvania, 1935.

نصٌّ يضم سلسلةَ محاضراتٍ أُلقيت في إدنبرة سنة ١٩٢٧، ويعرِض هذا الكتاب نظرةً ثاقبةً ونادرةً لتأثيرِ نظريةِ الكَمِّ على أحد أعظم العلماء في عشرينيات القرن العشرين، وقد كُتب في وقتٍ كان الموضوع لا يزال يتغيَّر فيه بوتيرة سريعة. إضافةً إلى ذلك، فإنَّ إدنجتون ليس عالِمًا رائدًا فحسب، بل هو كذلك من أوائل مَن نشروا العلم للعموم وأفضلهم.

Sir Arthur Eddington, *Science and the Unseen World*, Folcroft Library Editions, Folcroft, Pennsylvania, 1979.

مزيد من المحاضرات من الفترة نفسها.

Sir Arthur Eddington, *New Pathways in Science*, Cambridge University Press, 1935.

سلسلة من المحاضرات أُلقيت بجامعة كورنيل سنة ١٩٣٤. يوضِّح هذا الكتاب الكيفيةَ التي سارت عليها الأمور منذ ظهورِ كتاب «ذا نيتشر أوف ذا فيزيكال وورلد» (طبيعة العالم الفيزيائي).

Sir Arthur Eddington, *The Philosophy of Physical Science*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1958 (original edition Cambridge University Press, 1938).

المزيد من المحاضرات التي يعود تاريخها إلى أواخر ثلاثينيات القرن العشرين وتتسم بدرجةٍ أكبرَ من التوجُّه الفلسفي، مثلما يدُل على ذلك عنوانها.

Leonard Eisenbud, *The Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1971.

يستخدم الحدَّ الأدنى من الرياضيات ويركِّز على المغزى الفيزيائي لنظريةِ الكَمِّ، لكن هذا «الحد الأدنى» لا يزال كثيرًا. يُعَد دليلًا جيدًا لا يتعمَّق في شرح البنية الذرية وغيرها، لكنه يقدِّم رؤيةً فيزيائية وفلسفية ثاقبة لألغازِ عالَم الكَمِّ.

Richard Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge, 1967.

سلسلة من المحاضرات التليفزيونية أُلقيت في جامعة كورنيل سنة ١٩٦٤ وأُذيعت على شبكة «بي بي سي تو» سنة ١٩٦٥. كلها مستساغة وسهلة القراءة من مُحاضِرٍ متمكِّن، وتتضمَّن فصلًا جيدًا عن الرؤية الميكانيكيةِ الكَمِّية للطبيعة.

Richard Feynman, Robert Leighton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Volume III*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1981.

أسهل الكتب الدراسية التي تصلح مقدمة لميكانيكا الكَمِّ للطلاب الجادين. الكتاب جيد جدًّا فيما يتعلَّق بتجربةِ الشقين الطوليَّين الشهيرة ويحتوي على مناقشةٍ مثيرة للاهتمام حول التوصيل الفائق.

George Gamow, *The Atom and Its Nucleus*, Prentice-Hall, New Jersey, 1961.

كتابٌ سهل القراءة وبه مقدارٌ جيد من المعلومات عن الكوانتا ونظرية الموجات من قاصٍّ بارع، يتصادف أيضًا أنه كان جزءًا من هذه القصة؛ إذ عمل جامو فترةً مع بور. ربما يكون أسلوب الكتاب قديمًا، لكنه مسلٍّ ويستحق الاستكشاف، وإن كان ذلك للتعرُّف على الشخصيات الرئيسية فحسب.

Maurice Goldsmith, Alan Mackay, and James Woudhuysen (editors), *Einstein: The First Hundred Years*, Pergamon, Elmsford, New York, 1980.

كتابٌ متفاوت الجودة، يحتوي على مقالٍ ممتاز عن أينشتاين بقلم سي بي سنو.

John Gribbin, *In Search of the Double Helix*, Penguin, London, 1995.

من داروين إلى الحمض النووي «دي إن إيه»، وما بعد ذلك.

John Gribbin, *Schrodinger's Kittens*, Phoenix, London, 1996.

المزيد عن ألغازِ الكَمِّ مع تقييمٍ للتفسيرات المختلفة.

John Gribbin, *In Search of the Big Bang*, Penguin, London, 1998.

قصة اكتشاف ميلاد الكون، بما في ذلك التضخم.

John Gribbin, *In Search of the Multiverse*, Penguin, London, 2010.
علامَ نحصل عن الجمع بين الفيزياءِ الكَمِّية وعلم الكونيات؟ ليس كونًا واحدًا، بل أكوان متعدِّدة.

John Gribbin, *In Search of Schrodinger's Cat*, Transworld, London, 2012.
يحكي عن صاحب المعادلة.

John Gribbin and Jeremy Cherfas, *The First Chimpanzee*, Penguin, London, 2001.
كتاب عن تطوُّر البشر، لكنه يتضمَّن عرْضًا مفصَّلًا غيرَ تقني عن الحمض النووي ووظائفه.

Mary and John Gribbin, *Time Travel for Beginners*, Hodder, London, 2008.

Niels Heathcote, *Nobel Prize Winners in Physics 1901–1950*, Henry Schuman, Inc., 1953 (reprinted 1971, by Books for Libraries Press, Freeport, New York).
يضم سِيَرًا ذاتيةً مختصرةً وتلخيصاتٍ للأعمال التي فاز عنها أصحابها بجائزة نوبل، ويشير هذا المجلَّد بأناقةٍ إلى الدور الطاغي لنظريةِ الكَمِّ في فيزياء النصف الأول من القرن العشرين. لا يغيب من الكتاب سوى اثنين من الأسماء الرئيسية: ماكس بورن الذي لم يحصل على جائزته إلا في خمسينيات القرن العشرين، وإرنست رذرفورد الذي مُنح الجائزة في مجال «الكيمياء». كتاب يستحق الغوص فيه.

Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Harper & Row, 1959.
نصُّ سلسلةٍ من المحاضرات التي أُلقيت في جامعة سانت أندروز عامي ١٩٥٥–١٩٥٦. يحتوي على تاريخٍ مختصرٍ لنظريةِ الكَمِّ وعلى مناقشةٍ لتفسيرِ كوبنهاجن من أحد مؤسسي ميكانيكا الكَمِّ. والكتاب ليس رياضيًّا على الإطلاق.

Werner Heisenberg, *The Physicist's Conception of Nature*, Greenwood Press, Westport, Connecticut, 1970 (Harcourt Brace edition published 1958).

كتابٌ آخرُ شِبه فلسفي يستحق الذكر هنا بصفةٍ خاصة للتأكيد على عدم الخلط بينه وبين كتاب جاكديش ميهرا الذي يحمل الاسم نفسه! (انظر أسفله.)

Werner Heisenberg, *Physics and Beyond*, Harper & Row, New York, and Allen & Unwin, London, 1971.

يحمل الكتاب العنوان الفرعي «ميموريز أوف ألايف إن ساينس» (ذكريات حياة في العلم)، وهو سيرة ذاتية شخصية بها الكثير من الحكايات وقليل من العلم، لكنها حافلة بالرؤى العميقة عن هايزنبرج الإنسان.

Banesh Hoffmann, *The Strange Story of the Quantum*, Peter Smith, Magnolia, Massachusetts, 1963 (original edition published 1947).

رؤية شائقة لنظريةِ الكَمِّ التي كانت لا تزال جديدة نسبيًّا في أربعينيات القرن العشرين. يقع المؤلِّف أحيانًا في فخ التبسيط الزائد فتختل حجَّته بعض الشيء في محاولته الالتزامَ بلغةِ الحياة اليومية، لكنه لا يزال كتابًا جيدًا حتى بعد مرورِ ما يقرب من سبعين سنة على كتابته. هذا الكتاب يستحق البحث عنه، وإن لم يكن ذلك إلا للتذييل المكتوب سنة ١٩٥٩، الذي يصف التطورات التي وقعت في العَقد السابق بكل وضوح، بما في ذلك مخطَّطات فاينمان وانتهاء السببية.

Ernest Ikenberry, *Quantum Mechanics*, Oxford University Press, London, 1962.

كتاب للرياضيين والفيزيائيين، لكنه غير مناسب لغير المتخصصين. يركِّز الكتاب على «طرق» استخدامِ نظريةِ الكَمِّ لحل المشكلات، لكنه ضعيف فيما يتعلَّق بتفسيرِ ما تعنيه المعادلات.

Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York, 1966.

دراسة شاملة في مجلَّد واحد، لا يتضمَّن مقدارًا صادمًا من الرياضيات، ويمكنك الاستفادة منه بالكثير من الرؤى المثيرة للاهتمام حتى إذا تجاهلت معظم الرياضيات.

Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, New York and London, 1974.

كتابٌ عن تفسير ميكانيكا الكَمِّ ودلالتها الفلسفية. يُسهِب أحيانًا في ذكْر تفاصيلَ عن تاريخ تفسير كوبنهاجن مثلًا، لكنه يحتوي على أكثرَ من وصفات طهي الكَمِّ.

Pascual Jordan, *Physics of the 20th Century*, Philosophical Library, New York, 1944.

على غرار مؤلَّفات «دي بروي» المذكورة سابقًا، تُعَد أهمية هذا الكتاب تاريخية في الأساس بصفته سردًا بقلم أحد الرواد في ابتكار فيزياء القرن العشرين.

Horace Judson, *The Eighth Day of Creation*, Simon & Schuster, 1982.

كتابٌ ضخم غير متماسك إلى حدٍّ ما عن التطور الثوري للبيولوجيا الجزيئية خلال النصف الثاني من القرن العشرين، يستحق القراءة في حدِّ ذاته؛ وذلك لقصة البيولوجيا الجزيئية الي يتضمَّنها وما يذكره من رؤًى ثاقبة عن كيفية عمل العلماء. تتمثَّل صلته المحدَّدة بقصةِ ثورةِ الكَمِّ في الطريقة الواضحة التي يؤكِّد بها جادسون أن ميلاد ما نسمِّيه اليوم بالبيولوجيا الجزيئية قد حدث عندما استخدم لاينس بولنج قواعدَ ميكانيكا الكَمِّ لفهْم كيمياء الجزيئات المعقَّدة. ومن المؤسف أنَّ جادسون يقول أيضًا وهو على خطأ، إن نُسَخَ هايزنبرج وبورن وديراك لميكانيكا الكَمِّ قد ظهرت بعد نسخةِ شرودنجر، لكن لا أحدَ مثالي.

Jagdish Mehra (editor), *The Physicist's Conception of Nature*, Kluwer, Boston, 1973.

وقائعُ مؤتمر عُقِد في تريستا سنة ١٩٧٢ تكريمًا لعيد ميلاد بول ديراك السبعين. تجعل قائمة المشاركين الرائعة، وجميعهم ممَّن قدَّموا إسهاماتٍ مهمةً في نظريةِ الكَمِّ، هذه الملحمة التي تحتوي على ٨٣٩ صفحة في مجلَّد واحد، أحدُ أفضل المصادر لذوي المعرفة العلمية، للاطلاع على الكيفية التي تغيَّرت بها الفيزياء في القرن العشرين.

Jagdish Mehra and Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, Springer–Verlag, New York, 1982.

دراسةٌ شاملة لتاريخ فيزياءِ الكَمِّ. نُشِر منه حتى الآن أربعة أجزاء، تعود بالقصة حتى سنة ١٩٢٦، ومن المخطَّط إصدارُ خمسة أجزاء أخرى لاكتمال القصة حتى الوقت الراهن. ومع أن هذا العمل الهائل لا يتضمَّن أيَّ صعوبات رياضية، فإنَّ المعادلات الكثيرة الموجودة به محاطةٌ بثروة من المعلوماتِ المكتوبةِ بأسلوبٍ سهلٍ ومستساغ.

Abraham Pais, *Subtle Is the Lord …*, Oxford University Press, London and New York, 1982.

كتابٌ شامل عن حياة أينشتاين وأعماله.

Heinz Pagels, *The Cosmic Code*, Simon & Schuster, New York, 1982.

محاولةٌ جريئة لشرْحِ نظريةِ النسبيةِ ونظريةِ الكَمِّ، وفيزياءِ الجسيمات الحديثة في جزء واحد. يكمُن صميم هذا الكتاب المكتوب بقلم أحد فيزيائي الجسيمات، في العرْض التفصيلي للجسيمات: الكواركات والجليونات، وبقية الجسيمات بأكملها. تَرِد نظريةُ الكَمِّ في الكتاب على نحوٍ موجزٍ بصفتها خلفيةً ضرورية لفهْم الجسيمات، ولا يتضمَّن الكتاب أيَّ منظورٍ تاريخي. يُعَد الكتاب مصدرًا جيدًا إذا أردت معرفة المزيد عن انتشار الجسيمات. يمثِّل الكتاب أيضًا مقارنةً مثيرةً للاهتمام مع مؤلَّفات كابرا وزوكاف.

Jay M. Pasachoff and Marc L. Kutner, *Invitation to Physics*, W. W. Norton, New York and London, 1981.

بالرغم من أن هذا الكتاب ظاهريًّا مقرَّرٌ دراسي لغير المتخصصين في العلوم، فإنه يقدِّم رؤية عامة للفيزياء بأكملها مع قليل من الرياضيات على نحوٍ يسهُل فهْمه، يمكن أن نوصي به بكل ارتياحٍ لأي شخص مهتمٍّ بالعلوم الحديثة.

Max Planck, *The Philosophy of Physics*, W. W. Norton, New York, 1963 (original edition 1936).

للكتابِ أهميةٌ تاريخية فحسب، لكنه يقدِّم نظرةً ثاقبة عن تفكير الشخص الذي أسَّس نظريةَ الكَمِّ للإشعاع، دون إدراك منه في البداية لضخامة الخطوة التي اتخذها.

Erwin Schrodinger, *Collected Papers on Wave Mechanics*, Chelsea Publishing Company, New York, 1978

(ترجمة عن الطبعة الألمانية المنشورة سنة ١٩٢٨):

تلك هي المقالات الأساسية التي وضع فيها شرودنجر أسسَ الميكانيكا الموجية، بما في ذلك تحليله الذي أوضح تكافؤ المصفوفة والميكانيكا الموجية. جُمِعَت المقالات الأساسية الأصلية حول ميكانيكا المصفوفات بواسطة فان درفيرون (انظر أسفله).

Erwin Schrodinger, *What Is Life?*, Cambridge University Press, New York, 1967 (original edition 1944; this edition combined in one volume with Mind and Matter, originally published 1958).

كتابٌ مكتوب بطريقةٍ جميلة، له أهمية تاريخية بصفته مؤثرًا رئيسيًّا على الأشخاص الذين كشفوا الغموض عن بنية الجزيئات الحية. ولا يزال الكتاب جديرًا بالقراءة مع أنه صار من المعروف الآن أن جزيء الحياة هو الحمض النووي «دي إن إيه»، وأن الجينات ليست مصنوعة من البروتينات مثلما افترض شرودنجر عندما كتب هذا الكتاب. وإذا لم يقنعك هذا الكتاب بأن لنظريةِ الكَمِّ أهميةً محورية في الهندسة الوراثية، فلن يقنعك شيء آخر.

Erwin Schrodinger, Science, *Theory and Man*, Dover Publications/Allen & Unwin, London 1957 (original edition 1935).

يتضمَّن الخطابَ الذي ألقاه شرودنجر عندما مُنح جائزة نوبل، وهو خطاب واضح ومليء بالمعلومات، ويُعَد مصدرًا أساسيًّا للقراءة لجميع المهتمين بتطور ميكانيكا الكَمِّ.

Erwin Schrodinger, *Letters on Wave Mechanics*, Philosophical Library, New York, 1967.

خطابات من شرودنجر وإليه، أما المراسلون الآخرون فهم أينشتاين، وبلانك، ولورنتز. يقدِّم الكتاب رؤًى تاريخيةً مثيرةً للاهتمام عن عقول هؤلاء الرجال العظام، بما في ذلك بعض المراسلات الرئيسية عن مفارقة القطة الشهيرة.

John Slater, *Modern Physics*, McGraw–Hill, New York, 1955.

كتاب يحتوي على الحد الأدنى من الرياضيات، لكنه موجَّه للطلاب الجادين. وبالرغم من قِدَمه، فإنه يُعَد ممتازًا لنظريةِ الكَمِّ في مستوى الطلاب الجامعيين.

J. Gordon Stipe, *The Development of Physical Theories*, McGraw–Hill, New York, 1967.

مقدمة أساسية على مستوى طلاب الجامعة في السنة الأولى، وهو يختلف كثيرًا عن غيره من الكتب الموجَّهة لذلك الجمهور في أنه يتضمَّن مقدمةً جيدةً لنظريةِ الكَمِّ والفيزياء النووية. وهو كتاب دراسي وليس لعموم الجمهور.

B. L. van der Waerden (editor), *Sources of Quantum Mechanics*, Peter Smith, Magnolia, Massachusetts, 1967.

تجميعٌ للمقالات الأساسية الأصلية، وجميعها نُسَخٌ باللغة الإنجليزية، بما في ذلك المقالات التي أرسَت أساسيات ميكانيكا المصفوفات (هايزنبرج وبورن وجوردان وديراك) لكنها لا تحتوي على مقالات الميكانيكا الموجية لشرودنجر (مجمَّعة وحدها؛ راجع شرودنجر). يورد الكتابُ مقدِّماتٍ مختصرةً لكنها شاملة لكل مقال ليضعها في السياق الصحيح.

James D. Watson, *The Double Helix*, Atheneum, New York, 1968.

عرْضٌ شخصي وقوي وواضح عن اكتشافِ بِنية الحمض النووي. ربما يركِّز الكتاب على «العيوب»، لكنه مسلٍّ للغاية ويستحق القراءة.

Harry Woolf (editor), *Some Strangeness in the Proportion*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1980.

يقدِّم هذا الكتاب وقائعَ مؤتمر عُقِد في «معهد الدراسات المتقدمة»، في برينستون، احتفالًا بمئوية ميلاد أينشتاين. تضم قائمة المشاركين أسماءً معروفةً للغاية في مجال الفيزياء النظرية، ويضم الكتاب جزءًا شاملًا عن إسهام أينشتاين في نظريةِ الكَمِّ. ومع أن الكتاب لا يحتوي على الكثير من الرياضيات فإنه يتسمُ بالعمق وغير مناسب للقارئ العادي.

Gary Zukav, *The Dancing Wu Li Masters*, Bantam, New York, 1980.

يُعَد هذا الكتاب في الحقيقة مضادًّا لكتاب كابرا The Tao of Physics؛ إذ يروي القصةَ نفسَها من منظورِ شخص «ليس» بفيزيائي متمرِّس. ينبغي على كل العلماء الاطلاع على هذا الكتاب لمعرفة الطريقة التي يفهم بها غيرُ العلماء الفيزياءَ الجديدة، ويجب التحذير من أن زوكاف أحيانًا يسمح لحماسه بالتملُّك منه، وأن المعرفة العلمية الواردة في هذا الكتاب ليست دقيقةً على الدوام في طريقةِ عرْضها، وعلى غِرار كابرا، فإنه لا يهتم، إلا قليلًا، بطريقة بناء الأفكار، وبالرغم من ذلك، فهو لا يزال مصدرًا جيدًا للقراءة.

الخيال العلمي

Gregory Benford, *Timescape*, Pocket Books, New York, 1981.
أفضل تصوير في الخيال العلمي لما يمكن أن يحدث حين تكون باحثًا في الفيزياء يتمتَّع بتصوُّر خيالي بارع لنوعِ السفر عبر الزمن المحتمَل وجوده في واقع العوالم المتعددة.

Philip Dick, *The Man in the High Castle*, Gregg Press, Boston, 1979.
قصةٌ عن واقعٍ موازٍ حيث هُزِمت الولايات المتحدة في الحرب العالمية الثانية. نصٌّ لطيف مع الحد الأدنى من المعرفة العلمية، لكنَّ مفاجأة في الحبكة تجعله غيرَ اعتيادي.

Randall Garrett, *Too Many Magicians*, Ace Books, New York, 1981.
قصصُ «احتمالات» تحدُث في الواقع الموازي؛ حيث عاش ريتشارد ليونهارت «قلب الأسد» فترةً كافية ليضمن ألا يرث أخوه جون العرشَ الإنجليزي بعده. القصص فقيرة علميًّا لكنها قصصٌ بوليسية جيدة ومسلية.

David Gerrold, *The Man Who Folded Himself*, Amereon, Ltd., Mattituck, New York, 1973.
تصويرٌ مسلٍّ وشائق للتأثيرات المربِكة للسَّفر عبر الزمن للأمام وللخلف ضمن العوالم المتعددة في الواقع العمودي. من السهل تجاهل «العلم» في هذا الكتاب واعتباره محضَ هراء، لكن المعاني المضمَّنة قريبة جدًّا من بعض الأفكار التي ذُكرت في الفصل الحادي عشر من كتابنا.

John Gribbin, *Timeswitch*, PS Publishing, Hornsea, 2009.
قصة عن السفر عبر الزمن استنادًا إلى تفسير كوبنهاجن.

Keith Roberts, *Pavane*, Hart-Davies, London, 1968 (paperback Panther).
ربما تدور أحداث هذه القصة في كونٍ موازٍ وربما لا. وفي كلتا الحالتين فهو كتاب جيد للقراءة.

Jack Williamson, *The Legion of Time*, Sphere, London, 1977.
نُشرت أولًا كحلقات في مجلةٍ سنة ١٩٣٨، وهي قصةُ مغامرةٍ محكَمة من الخيال العلمي في زمانها، وهي جديرة بالذكر لأمرٍ واحد فقط. ذلك أنه بحسبِ ما تمكَّنت

من التعقُّب، فتلك هي المرة الأولى لظهورِ مفهومِ العوالم الموازية الذي أصبح فيما بعدُ تفسيرَ العوالم المتعددة لميكانيكا الكَمِّ، سواء في الأعمال الواقعية أو الخيال. توجد قصصٌ على طريقة «ماذا لو» أقدَمُ بالطبع تقع في عوالمَ بديلة، لكن وليمسون استخدم لغةً علمية ملائمة في رواية أحداثه، بعد عَقدٍ واحد فقط من إرساء أساسيات ميكانيكا الكَمِّ. «للخطوط الجيوديسية انتشار غير محدود من الفروع المحتملة التي تخضع لهوى اللايقين على المستوى تحت الذري». إنَّ هيو إيفرت لم يستطِع ذكْرَ ذلك بطريقةٍ أكثرَ دقةً في رسالته للدكتوراه بعد ١٩ عامًا، وإن كان قد وصفه على أساسٍ رياضي سليم. نادرًا ما يتنبَّأ الخيال العلمي بالفعل بالتقدُّم الذي سيحدث في العلوم النظرية، وذلك أمرٌ يستحق الإشادة به عند حدوثه.

Robert Anton Wilson, the *Schrödinger's Cat* trilogy (*The Universe Next Door, The Trick Top Hat, The Homing Pigeons*), all published by Pocket Books, New York, 1982.

ربما يكون من المحال أن نصفَ هذه الثلاثية المسلية الجريئة والعبقرية، التي تقدِّم ثلاثة تنويعات مختلفة على الأفكارِ الكَمِّية (واحد في كل جزء من الثلاثية)، وهي مطبَّقة بعنايةٍ شديدةٍ لتُقدِّم إطارًا للأحداثِ نفسِها تقريبًا بالشخصياتِ نفسِها إلى حدٍّ كبير. وبشكلٍ ما، قدَّمت هذه الثلاثية لنظريةِ الكَمِّ ما قدَّمته «رباعية الإسكندرية» بقلم لورنس دوريل لنظرية النسبية، لكن ويلسون ممتعٌ بدرجةٍ أكبر. إنها عملٌ من النوع الذي ينبغي التدرُّب عليه لتتمكَّن من تذوقه، لكنك إن تمكَّنت من ذلك، فستدرك النكهة الحقيقية لعالَمِ الكَمِّ.

هنـــداوي