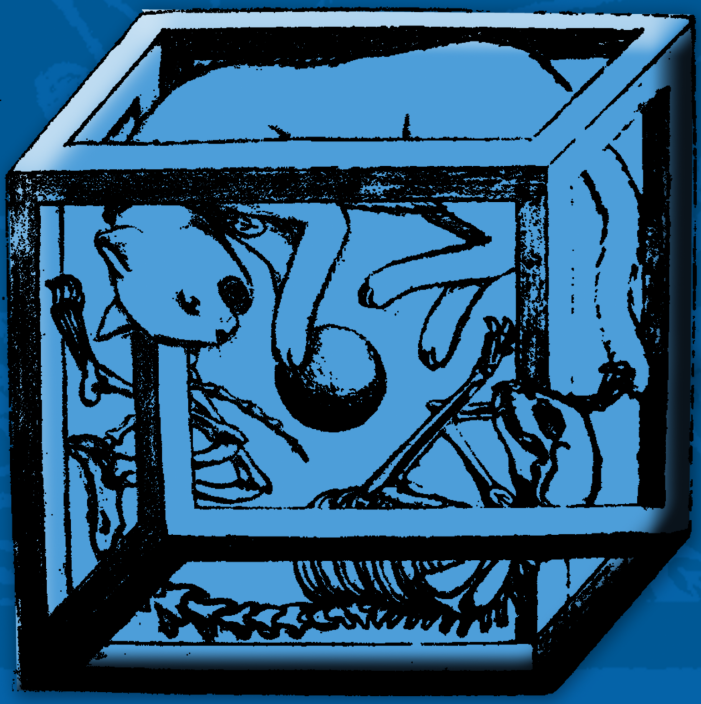
البحث عن قطة شرودنجر



جون جريبين

البحث عن قطة شرودنجر

البحث عن قطة شرودنجر

الفيزياء الكمية والواقع

تأليف

جون جريبين

ترجمة

أ.د. فتح الله محمد إبراهيم الشيخ

مراجعة

أ.د. أحمد عبد الله السماحى

كلمة
KALIMA

هنداوي

البحث عن قطة شرودنجر

In Search of Schrödinger's Cat

جون جريبين

John Gribbin

الطبعة الثانية ٢٠١٠م
رقم إيداع ٢٠٠٩/٣٥٧٥

جميع الحقوق محفوظة للناشر كلمة KALIMA ومؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
المشهرة برقم ٨٨٦٢ بتاريخ ٢٦/٨/٢٠١٢

كلمة
إن هيئة أبو ظبي للثقافة والتراث (كلمة) غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبّر الكتاب عن آراء مؤلفه
ص.ب. ٢٣٨٠ أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة
هاتف: ٦٣١٤٤٦٨ ٢ ٩٧١+ **فاكس:** ٦٣١٤٤٦٢ ٢ ٩٧١+
الموقع على شبكة الإنترنت: www.kalima.ae
البريد الإليكتروني: info@kalima.ae

مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
إن مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٥٤ عمارات الفتح، حي السفارات، مدينة نصر ١١٤٧١، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٠٦٣٥٢ ٢٠٢ + **فاكس:** ٣٥٣٦٥٨٥٣ ٢٠٢ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: http://www.hindawi.org

جريبين، جون.
البحث عن قطة شرودنجر / جون جريبين.
٣٢٠ص، ١٤,٥×٢١سم
تدمك: ٢ ٢٢ ٦٢٦٣ ٩٧٧ ٩٧٨

١- ميكانيكا الكم

أ- العنوان

٥٣٠,١٢

يُمنَع نسخ أو استعمال أي جزء من هذا الكتاب بأية وسيلة تصويرية أو إلكترونية أو ميكانيكية، ويشمل ذلك التصوير الفوتوغرافي والتسجيل على أشرطة أو أقراص مضغوطة أو استخدام أية وسيلة نشر أخرى، بما في ذلك حفظ المعلومات واسترجاعها، دون إذنٍ خطي من الناشر.

Arabic Language Translation Copyright © 2010 by Kalima and Hindawi Foundation for Education and Culture.
In Search of Schrödinger's Cat, Quantum Physics and Reality.
Copyright © John and Mary Gribbin, 1984
All rights reserved.

المحتويات

مقدمة المترجمين	٧
شكر وعرفان	٩
مقدمة	١٣
تمهيد	١٥
الباب الأول: الكـــــم	١٩
١- الضوء	٢١
٢- الذرات	٣٣
٣- الضوء والذرات	٤٩
٤- ذرة بور	٦٧
الباب الثاني: ميكانيكا الكم	٩٥
٥- الفوتونات والإلكترونات	٩٧
٦- المصفوفات والموجات	١١٩
٧- مطبخ الكوانتا	١٤٣
الباب الثالث: ... وما بعد	١٧٥
٨- الفرصة وعدم التيقن	١٧٧
٩- التناقضات والاحتمالات	١٩٩

١٠- برهان البودنج ٢٣٥
١١- العوالم المتعددة ٢٥٥
خاتمة ٢٧٥
بيبلوجرافيا ٢٩٧

مقدمة المترجمين

يتعرض كل من يترجم كتابًا علميًّا مكتوبًا لغير المتخصصين لصعوبات مضاعفة، أما إذا كان الكتاب موضوع الترجمة يتناول نظرية الكم، فإن الأمر يصبح في غاية الصعوبة، سواء للمترجم أو القارئ، لكن جون جريبين بالتضافر مع قطة شرودنجر الشهيرة قد جعلا من هذا العمل شيئًا ممتعًا ومفيدًا، في زعمنا. وليس أحوج من المكتبة العربية لمثل هذه الكتب، وليس أحوج من القارئ العربي لها. ومما لا شك فيه أن تصدي «كلمة» و«كلمات عربية» لترجمة كتب العلوم الحديثة والأساسية، وتقديمها إلى عالم الثقافة في الوطن العربي، يعني الكثير لهذه الثقافة؛ فقد ظل العقل العربي محرومًا من الاتصال — إلا في أضيق الحدود — بهذه العلوم وتلك الثقافة على مدى عدة قرون، فكانت نسبة ما تصدره المطابع العربية في مجال العلوم لا يزيد عن ٣٪ فقط من مجمل إنتاجه، أما وقد بدأت حركة الترجمة العلمية في تغذية المطابع والثقافة والعقول العربية بنهر من الترجمات فإن الوضع في الواقع سيختلف عن ذي قبل. والأمل معقود أن تتفتح العقول وتثري اللغة ويسود المنهج العلمي نواحي الحياة. وسيذكر التاريخ فضل كل من تصدى من دور النشر بشجاعة لأداء رسالة الترجمة عموما والترجمة العلمية على وجه الخصوص.

وقد شرفنا بترجمة الكتاب الذي بين أيديكم، وكلنا رجاء وأمل أن يضيف ولو لبنة صغيرة إلى صرح الثقافة العلمية في الوطن العربي، ويقرب

من ثقافتنا وثقافات العالم المتقدم الذي سبقنا — في الوقت الحاضر على الأقل — حتى نصل إلى مرحلة الإبداع الجموعي في شتى فروع العلوم والمعارف.

فتح الله محمد إبراهيم الشيخ
أحمد عبد الله السماحى
نوفمبر ٢٠٠٨

شكر وعرفان

ترجع معرفتي (بنظرية الكم) إلى أكثر من عشرين سنة مضت منذ أيام المدرسة، وذلك عندما اكتشفت الطريقة السحرية التي فسر بها الجدول الدوري للعناصر نموذج الأغلفة الإلكترونية في الذرة، والمفترض بذلك أنه يفسر كل الكيمياء التي ناضلت من أجلها وتحملت الكثير من الدروس المضجرة، وبتتبع هذا الاكتشاف بمعاونة كتب من المكتبة تَدَّعي أنها «متقدمة أكثر من اللازم» بالنسبة للمستوى المدرسي المتواضع الذي كنت عليه، واكتشفت في الحال البساطة الرائعة التي تفسر بها نظرية الكم الطيف الذري، وقد خبرت بنفسي للمرة الأولى إلهامًا بأن أفضل الأشياء في العلم هي التي تتمتع بالجمال والبساطة، وهى الحقيقة التي يخفيها كثير جدًّا من المعلمين عن تلاميذهم، إما عن قصد أو عن غير قصد، وقد شعرت بنفس شعور الشخصية في رواية سنو C. P. Snow البحث — التي قرأتها بعد ذلك بكثير — واكتشفت الشيء نفسه:

> «لقد شاهدت خليطًا من الحقائق المبعثرة تنتظم في خط وتترتب ... لكن ذلك كان حقيقيًّا» قلت لنفسي: «إنه جميل جدًّا وهو حقيقي» (طبعة ماكميلان ١٩٦٣ صفحة ٢٧).

وقد قررت دراسة الفيزياء في الجامعة جزئيًّا بفضل هذه البصيرة، وطبعًا تحقق هذا الطموح وأصبحت طالبًا لدرجة البكالوريوس في جامعة سوسيكس Sussex في برايتون Brighton، غير أن البساطة والجمال اللذين في أساس

الأفكار قد اختنقا في فيض من التفاصيل والوصفات الرياضية لحل المسائل النوعية بمساعدة معادلات ميكانيكا الكم، ويبدو أن تطبيق هذه الأفكار في عالم الفيزياء اليوم يحمل من الصدق والجمال مثل ما تحمله قيادة طائرة ٧٤٧ مقارنة بالطيران الشراعي، ومع ذلك فإن قوة البصيرة الأولى قد بقيت مؤثرًا رئيسيًّا في أعمالي، وقد أهملت عالم الكم فترة طويلة ورحت أستكشف في مرعى علمي آخر.

أضرمت عدد من الحقائق المتضامنة نيران الاهتمامات الأولى من جديد؛ ففي نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات من القرن العشرين بدأت تظهر كتب ومقالات تحاول تقديم عالم الكم الغريب للجمهور غير المتخصص وذلك بدرجات متفاوتة من التوفيق، وكان بعض الكتب التي تزعم أنها «تبسط» مفرطة في الخيال ومبتعدة عن الصدق لدرجة أنني أتصور أن أي قارئ لا يمكن أن يكتشف صدق وجمال العلم بقراءة هذه الكتب، وبدأت أشعر باندفاع نحو القيام بهذا العمل بصورة أكمل، في الوقت نفسه أخذت ترد الأنباء حول سلاسل التجارب المستمرة التي توصلت إلى واقعية بعض أكثر السمات غرابة في نظرية الكم.

وقد حمستني هذه الأنباء أن أعود للتنقيب والبحث في المكتبات وتجديد فهمي لهذه الأفكار الغريبة، وأخيرًا وفي أحد أيام عيد الميلاد طلبت منى بي بي سي (BBC) أن أشارك في برنامج إذاعي كنوع من الاتجاه المقابل لاتجاه مالكولم موجريدج (Malcolm Muggeridge) الذي أعلن حديثًا تحوله إلى الديانة الكاثوليكية وكان هو الضيف الرئيسي في زمن هذا المهرجان، وبعد أن قال هذا الرجل الكبير قوله مؤكدًا على أسرار المسيحية، استدار ناحيتي وقال: «غير أن هنا رجلًا يعرف كل الإجابات أو يدعي أنه يعرفها.» وفي الوقت المحدود الذي كان في حوزتي حاولت أن يكون رد فعلى هادئًا مشيرًا إلى أن العلم لا يدعي معرفة جميع الإجابات، وإنما الدين — وليس العلم — هو الذي يعتمد أساسًا على الإيمان المطلق والقناعة بـأن الحقيقة معروفة. وقلت: «أنا لا أعتقد في أي شيء.» وكنت بصدد الاستطراد في هذه الفلسفة عندما انتهى البرنامج، وقد حياني الأصدقاء وحيتني المعرفة طوال

موسم المهرجان كصدى لهذه الكلمات. وقد أمضيت الساعات في تفسير ما مفاده أن عدم إيماني المطلق بأي شيء لم يمنعني من الحياة بصورة عادية مستفيدًا من الافتراضات المنطقية السارية مثل الاحتمال الأقوى ألا تختفي الشمس ليلاً.

بلورت هذه العملية أفكاري حول ماهية العلم، وتضمنت الكثير من مناقشة الواقعية الأساسية — أو اللاواقعية — لعالم الكم، بما يكفي لإقناعي أنني كنت في الواقع مستعدًّا لكتابة الكتاب الذي تمسكون به الآن، وأثناء إعداد الكتاب راجعت الكثير من الحجج والأسانيد الدقيقة في مساهماتي العلمية المنتظمة في البرامج الإذاعية التي استضافني فيها تومي فانس Tommy Vance التي بثتها خدمة الإذاعة بالقوات البريطانية، وسرعان ما كشفت أسئلة توم الاختبارية العيوب في برامجي وأدت إلى تنظيم أفضل لأفكاري. كانت مكتبة جامعة سوسيكس المصدر الرئيسي لمراجع المادة المستخدمة في إعداد الكتاب، التي تملك واحدة من أفضل المجموعات من كتب نظرية الكم الموجودة في أي مكان، وقد تتبع ماندي كابلين Mandy Caplin من نيو ساينتست New Scientist من أجلي بعض أكثر المراجع غموضًا وهو يملك طريقة مقنعة فيما يتعلق برسائل التلكس، وقامت كريستين ساتون Christine Sutton بتعديل بعض اعتقاداتي الخاطئة حول فيزياء الجسيمات ونظرية المجال، ولم تزودني زوجتي بكل ما يلزم فيما يتعلق بالبحث وتنظيم المادة فقط بل عدَّلت أيضًا كثيرًا من الزوايا الحادة، وأنا ممتن أيضًا للأستاذ رودلف بيرلز (Rudolf Peierls) الذي تحمل مشقه الشرح التفصيلي لحدة الذهن الخاصة بتجربة «الساعة في الصندوق» و«تناقض EPR».

وهكذا فإن أي إطراء على جودة هذا الكتاب يجب أن يرفع إلى كتب الكيمياء «المتقدمة» التي نسيت أسماءها الآن، وكنت قد وقعت عليها في مكتبة مقاطعة كنت وأنا بعد في السادسة عشر من العمر، وللكتب «المبسطة» كذبًا وما نشر عن أفكار الكم التي أقنعتني أنني أستطيع أن أقوم بذلك بصورة أفضل، ومالكولم ماجريدج وبى بى سى (BBC) ومكتبة جامعة سوسيكس

وتومي فانس وبى.بى.إس، وماندى كابلين وكريستين ساتون وعلى وجه الخصوص مين. أما أي شكوى تتعلق بالسلبيات في الكتاب فمرجعها بالطبع إليّ.

جون جريبين
John Gribbin
يوليو ١٩٨٣

مقدمة

لو وضعت كل الكتب والمقالات التي كتبت لغير المتخصصين حول النظريات النسبية جنبًا إلى جنب فإنها قد تصل المسافة بين الأرض والقمر. و«يعرف كل إنسان» أن النظرية النسبية لأينشتاين هي أعظم إنجاز علمي في القرن العشرين، لكن الكل على خطأ. أما إذا وضعت كل الكتب والمقالات المكتوبة عن نظرية الكم لغير المتخصصين جنبًا إلى جنب فإنها قد تغطى بالكاد سطح الطاولة التي أجلس عليها، ولا يعنى ذلك أن نظرية الكم ليست معروفة خارج القاعات الأكاديمية، بل في الواقع أصبحت ميكانيكا الكم ذات شعبية جارفة في بعض الأوساط حيث إنها قد استخدمت لتفسير ظواهر مثل التخاطر عن بعد وانثناء الملاعق، وقدمت مادة خصبة من الأفكار لروايات عديدة من الخيال العلمي. وتعرف ميكانيكا الكم في الأساطير الشائعة، إذا كانت معروفة على الإطلاق، بأنها فرع العلوم الخفي والغريب المسئول عن التخاطر عن بعد وعلم النفس غير العادي وليس معروفًا إلا لفئة قليلة من الناس، والذي لا يفهمه أحد وليس له استخدام عملي.

وفي الحقيقة كتب هذا الكتاب لمواجهة هذا السلوك تجاه أكثر المجالات أهمية في الدراسات العلمية الأساسية. ويدين هذا الكتاب بنشأته إلى عدة عوامل تضافرت معًا في صيف ١٩٨٢، وأول هذه العوامل هو أنني كنت قد انتهيت لتوي من كتابة كتاب في النسبية وتحدب الفضاء، وشعرت أنه من المناسب أن أقتحم الفرع العظيم الآخر من علوم القرن العشرين وأحاول فك

طلاسمه. والعامل الثاني هو أنني كنت مستثارًا بصورة متزايدة بالاعتقادات الخاطئة التي كانت تُسَوَّق تحت اسم نظريه الكم في الأوساط غير العلمية. وقد أفرخ كتاب فريتجوف كابرا Fritjof Capra الرائع «طاوية الفيزياء» The Tao of Physics عددًا من المقلدين الذين لم يفهموا الفيزياء ولا الطاوية لكنهم تكهنوا بوجود مال يمكن كسبه بربط العلم الغربي بالفلسفة الشرقية. أما العامل الأخير فهو الأنباء التي جاءت في أغسطس/آب ١٩٨٢ من باريس عن نجاح فريق علمي في إجراء اختبار حاسم مؤكد لدقة وجهة نظر ميكانيكا الكم عن العالم وذلك للذين لا يزالون يشككون في نظرية الكم.

ولا تبحث هنا عن أي «صوفيه شرقية» أو انثناء الملاعق أو التخاطر عن بعد مع ظواهر علم النفس الغريب، لكن عليك أن تبحث هنا عن القصة الحقيقة لميكانيكا الكم، وهى حقيقة أغرب كثيرًا من الخيال، وهكذا هو العلم؛ فهو لا يحتاج إلى تجهيز ليصبح جاهزًا تمامًا لفلسفة أخرى، فهو مليء ببهجته الخاصة وأسراره ومفاجآته. والسؤال الذي يواجهه هذا الكتاب هو «ما الواقعية؟» وقد تفاجئك الإجابة (أو الإجابات) وقد لا تصدقها، ولكنك ستكتشف كيف يرى العلم المعاصر العالم.

تمهيد

لا شيء حقيقي

القطة الموجودة في عنوان هذا الكتاب حيوان خرافي أما شرودنجر فشخص حقيقي؛ كان إيرفين شرودنجر (Erwin Schrödinger) عالمًا نمساويًّا ساعد في تطوير معادلات فرع من العلوم المعروف الآن باسم ميكانيكا الكم وذلك في منتصف عشرينيات القرن العشرين، ومع ذلك فلا يصلح تعبير «فرع من العلوم» إلا بصعوبة هنا، لأن ميكانيكا الكم تزودنا بالأساس المتين القوي لكل العلوم الحديثة، وتصف المعادلات سلوك الأجسام المتناهية الصغر — بمعنى تلك التي في حجم الذرة أو أصغر — وتزودنا أيضًا بالطريقة الوحيدة لفهم عالم الأشياء المتناهية الصغر، وبدون هذه المعادلات لم يكن يمكن للفيزيائيين أن يصمموا محطات القوى النووية العاملة (أو القنابل النووية) ولا أن يحصلوا على أشعة الليزر، أو حتى يشرحوا الطريقة التي تحتفظ فيها الشمس بسخونتها، ولولا ميكانيكا الكم لظلت الكيمياء في عصورها المظلمة، ولما وجد علم البيولوجيا الجزيئية — ولا كنا سنفهم الدنا (DNA) أو الهندسة الوراثية — أبدًا.

وتمثل ميكانيكا الكم أعظم إنجازات العلم، وهى ذات مغزى مباشر وعملي بعيد جدًّا، أبعد بكثير من النظرية النسبية، ومع ذلك فلها بعض

التنبؤات الغريبة جدًّا. وعالم ميكانيكا الكم غريب جدًّا في الواقع، لدرجة أن ألبرت أينشتاين قد وجد أنها مبهمة وغير مفهومة ورفض أن يتقبل كل تضمينات هذه النظرية التي طورها شرودنجر وزملاؤه، وكان أينشتاين وكثير من العلماء الآخرين يجدون أنه من المريح أن يعتقدوا أن معادلات ميكانيكا الكم تمثل ببساطة نوعًا من الحيل الرياضية، التي تعطينا سبيلاً معقولاً يرشدنا إلى سلوك الذرات والجسيمات تحت الذرية، لكنه يخفى بعض الحقيقة الدفينة التي تتواءم بصورة أقرب مع إحساسنا العادي بالواقعية؛ ذلك أن ميكانيكا الكم تنادي بألا شيء حقيقي، ولا يمكننا قول أي شيء عما تفعله الأشياء عندما لا نشاهدها، وقد استخدمت قطه شرودنجر الأسطورية لتوضح بجلاء الفرق بين عالم الكم والعالم اليومي.

ففي عالم ميكانيكيا الكم تتوقف قوانين الفيزياء المألوفة في حياتنا اليومية عن العمل، وبدلاً من ذلك فإن الاحتمالات هي التي تتحكم في الأحداث؛ فقد تتفكك ذرة مشعة وتبث إلكترونًا مثلاً أو قد لا تفعل ذلك، ومن الممكن وضع تجربة بحيث تكون لإحدى الذرات في كتلة مشعة فرصة ٥٠:٥٠ (خمسين:خمسين) بالضبط أن تتفكك في زمن معين ويسجل تفككها إذا وجد جهاز كشاف، وقد حاول شرودنجر — المستاء مثل أينشتاين بالضبط — أن يبين سخف هذه التضمينات وذلك بتخيل تجربة مثل المذكورة موضوعة في غرفة مغلقة أو صندوق مغلق يحتوي على قطة حية وقنينة بها سم، وقد رتبت هذه الأشياء بحيث إذا حدث وتفككت الذرة المشعة تنكسر القنينة المحتوية على السم وتموت القطة، وهنالك فرصة ٥٠:٥٠ أن تموت القطة لو طبقنا مفاهيم عالم الحياة اليومية، ويمكن القول — دون أن ننظر داخل الصندوق، وبكل راحة — إن القطة إما حية أو ميتة. والآن لنأخذ في الحسبان غرابة عالم الكم، وتبعًا للنظرية فلا يمكن تطبيق أحد الاحتمالين بالنسبة للمادة المشعة ومن ثم للقطة، ولذا لا يوجد واقع إلا إذا شاهدناه، وليس معروفًا هل حدث التفكك الذري أم لم يحدث، وهل قتلت القطة أم لم تقتل إلا إذا نظرنا داخل الصندوق لنرى ماذا حدث. ويقول النظريون الذين يقبلون النسخة النقية من ميكانيكا الكم إن القطة موجودة في حالة

غير محددة، فهي ليست حية ولا ميتة حتى ينظر أحد المشاهدين داخل الصندوق ليرى ما الذي يجري هناك فلا شيء حقيقي إلا إذا شاهدناه.

كانت الفكرة منبوذة ومحرَّمة من أينشتاين وآخرين، وكان يقول: «إن الرب لا يلعب بالنرد.» مشيرًا إلى النظرية التي تحكم العالم بواسطة تراكم مخرجات فرص عشوائية في الأساس لاحتمالات على المستوى الكمي، وفيما يتعلق بعدم واقعية الحالة التي عليها قطة شرودنجر، فإن أينشتاين رفض هذه الفكرة، مفترضًا أنه لا بد أن يكون هناك نظام منضبط يصنع الأسس الأصلية لواقعية الأشياء، وقد أنفق سنوات عديدة محاولاً تصميم اختبارات يمكن بواسطتها استيضاح الواقعية الموجودة في أساس الأشياء وهى تعمل لكنه مات قبل أن يصبح من الممكن إجراء مثل هذا الاختبار، وربما بنفس القدر لم يمتد به العمر ليرى مخرجات أحد خطوط المنطق الذي بدأه بنفسه.

في صيف سنة ١٩٨٢ وفي جامعة جنوب باريس بفرنسا أكمل فريق يقوده آلان أسبكت Alain Aspect سلسلة من التجارب المصممة لاكتشاف الواقعية الموجودة في أساس عالم الكم غير الواقعي، وقد أطلقوا على الواقعية الموجودة في الأساس — المنظومة المنضبطة الأساسية — اسم «المتغيرات الخفية» Hidden Variables وقد قامت التجربة على سلوك فوتونَيْن أو جسيمين من جسيمات الضوء ينطلقان مبتعدين أحدهما عن الآخر في اتجاهين مضادين من أحد المصادر، وقد وصفت التجربة بالتفصيل في الفصل العاشر، لكن في جوهرها يمكن تخيلها كاختبار للواقعية، ويمكن مشاهدة الفوتونين المنطلقين من المصدر نفسه بواسطة كشافين اثنين يقومان بقياس خاصية تسمى الاستقطاب (Polarization)، وتبعًا لنظرية الكم، فإن هذه الخاصية غير موجودة إلا إذا قمت بقياسها. وتبعًا لفكرة المتغير الخفي، فإن كل فوتون يمتلك استقطابًا «حقيقيًّا» منذ اللحظة التي نشأ فيها، ولأن الفوتونين قد انبعثا معًا فإن استقطابيهما مرتبطان أحدهما بالآخر، غير أن طبيعة الارتباط المقاس بالفعل يختلف تبعًا لوجهتي النظر حول الواقعية.

ونتائج هذه التجربة الحاسمة ليست غامضة، فلم يثبت وجود نوع الارتباط الذي تنبأ به المتغير الخفي، أما نوع الارتباط الذي تنبأت به ميكانيكا الكم فقد ثبت وجوده، والأكثر من ذلك فإن القياس الذي يجري على أحد الفوتونين له تأثير لحظي على طبيعة الفوتون الآخر كما تنبأت بذلك نظرية الكم، ويرتبط الفوتونان بصورة لا سبيل إلى الخلاص منها بواسطة بعض التداخلات حتى وإن كانا يندفعان مبتعدين أحدهما عن الآخر بسرعة الضوء، وتبعًا للنظرية النسبية لا يمكن أن تنتقل أي إشارة أسرع من الضوء، وأثبتت التجارب أنه لا توجد واقعية في أساس العالم، وليست «الواقعية» طريقة جيدة تصلح للتفكير في سلوك الجسيمات الأساسية التي يتكون منها العالم، ومع ذلك، وفي الوقت نفسه، فيبدو أن هذه الجسيمات مرتبطة بشكل لا ينفصم في كل لا يتجزأ، بحيث يدرك كل واحد منها ما يحدث لغيره.

وما البحث عن قطة شرودنجر إلا البحث عن الواقعية الكمية، وقد يبدو من هذا المخطط الموجز أن البحث غير ذي جدوى، حيث لا توجد واقعية في المفهوم اليومي للكلمة، غير أن هذه ليست نهاية القصة، وقد يؤدي بنا البحث عن قطة شرودنجر إلى فهم جديد للواقعية الذي قد يفوق ويتضمن التفسير المتعارف عليه لميكانيكا الكم، وأثر ذلك بعيد، إلا أنه مع ذلك يبدأ من عالم من المحتمل أن يصاب بهلع أكثر من أينشتاين إذا وقع على الإجابات التي في حوزتنا الآن على الأسئلة المربكة التي وضعها. ولم يكن عند إسحق نيوتن (Isaac Newton) أدنى فكرة، عندما كان يدرس طبيعة الضوء منذ ثلاثة قرون، أنه كان بالفعل قد وقع على الأثر الذي سيؤدي إلى قطة شرودنجر.

الباب الأول

الكـــم

«أي شخص لا يصاب بصدمة من نظرية الكم فإنه لم يفهمها.»
نيلس بور ١٨٨٥–١٩٦٢

الفصل الأول

الضوء

اخترع إسحاق نيوتن الفيزياء، وتعتمد كل العلوم على الفيزياء، وبالتأكيد أسس نيوتن ذلك على أعمال آخرين، إلا أن نشر قوانينه الثلاثة عن الحركة ونظرية الجاذبية منذ ثلاثمائة سنة بالضبط هو الذي أطلق العلم ووضعه على الطريق التي أدت إلى الطيران في الفضاء، والليزر، والطاقة الذرية، والهندسة الوراثية، وفهم الكيمياء، وبقية العلوم. وعلى مدى مائتي عام سادت فيزياء نيوتن (التي تسمى الآن الفيزياء «الكلاسيكية») بقوة، وفي القرن العشرين أخذت الآراء الثورية الجديدة الفيزياء أبعد كثيرًا من نيوتن، إلا أنه بدون هذين القرنين من التطور العلمي لم يكن إنجاز هذه الآراء الجديدة ممكنًا. وليس هذا الكتاب تاريخًا للعلوم، وهو معني بالفيزياء الجديدة — فيزياء الكم — أكثر من تلك الأفكار الكلاسيكية، لكن حتى في أعمال نيوتن منذ ثلاثة قرون كانت هناك إشارات عن التغيرات التي ستأتي فيما بعد، ليس من دراساته لحركة الكواكب ومداراتها، ولا من قوانينه المشهورة الثلاثة، ولكن من أبحاثه عن طبيعة الضوء.

تدين أفكار نيوتن عن الضوء بالكثير لأفكاره عن سلوك الأجسام الجامدة ومدارات الكواكب، وقد أيقن نيوتن أن خبراتنا اليومية عن سلوك الأجسام قد تكون مضللة، وأن جسمًا ما — وليكن جسيمًا — غير خاضع لأي قوى خارجية لا بد أن يسلك بطريقة مختلفة جدًّا عن سلوك مثل هذه الجسيم لو كان على سطح الأرض. وتدلنا خبرتنا اليومية أن الأشياء تميل للبقاء في مكان واحد إلا إذا تعرضت لدفعة، وأنه بمجرد توقفك عن دفع

هذه الأشياء فإنها ستتوقف مباشرة بعد ذلك، إذن لماذا لا تتوقف الأجسام مثل الكواكب أو القمر عن الحركة في مداراتها؟ وهل يدفعها شيء ما؟ أبدًا على الإطلاق، إنما الكواكب هي التي في حالة طبيعية، وغير خاضعة لأي تدخل خارجي، والأجسام التي على سطح الأرض هي التي تتعرض للتدخل. وإذا حاولت أن أجعل قلمًا ينزلق على سطح طاولتي، فإن دفعي للقلم يقاومه احتكاك القلم بسطح الطاولة، وهذا ما يجعل القلم يتوقف عندما أتوقف عن دفعه، فإذا لم يكن هناك احتكاك لظل القلم في حركة دائمة. وينص القانون الأول لنيوتن على أنه يظل كل جسم في حالة سكون أو يتحرك بسرعة ثابتة إلا إذا أثرت عليه قوة خارجية. وينبئنا القانون الثاني بمدى التأثير الذي تؤديه قوة خارجية — دفعة — على جسم ما، فمثل هذه القوة تغير من سرعة الجسم، ويسمى التغير في السرعة التسارع؛ فإذا قسمت القوة على كتلة الجسم الذي تؤثر فيه القوة الخارجية فإن الناتج هو التسارع الذي ينتج عن تأثير القوة على الجسم، وعادة ما يكتب هذا القانون الثاني بطريقة مختلفة شيئًا ما: القوة هي حاصل ضرب الكتلة في التسارع. ويخبرنا قانون نيوتن الثالث بعض الشيء عن رد فعل الأجسام التي تُدفع: لكل فعل رد فعل مساو له ومضاد في الاتجاه؛ فإذا ضربت كرة التنس بمضربي، فإن القوة التي يدفع بها المضرب كرة التنس تطابق تمامًا القوة التي تدفع المضرب إلى الخلف. والقلم الموجود على سطح طاولتي يشد إلى أسفل بواسطة الجاذبية ويدفع في الاتجاه المضاد برد فعل مساو لها تمامًا بواسطة سطح الطاولة نفسه. وقوة عملية الانفجار التي تدفع الغازات إلى خارج غرفة الاشتعال في الصاروخ تنتج قوة رد فعل مضادًّا ومساويًا تمامًا على الصاروخ نفسه مما يدفعه في الاتجاه المضاد.

وتفسر هذه القوانين مدارات الكواكب حول الشمس ومدار القمر حول الأرض بالإضافة إلى قانون نيوتن عن الجاذبية، وإذا أخذنا في الاعتبار الاحتكاك فإن هذه القوانين تفسر كذلك سلوك الأجسام على سطح الأرض وهى تشكل بذلك أسس الميكانيكا، غير أنها تتضمن تضمينات فلسفية مربكة، فتبعًا لقوانين نيوتن يمكن بالضبط التنبؤ بسلوك جسيم على أساس

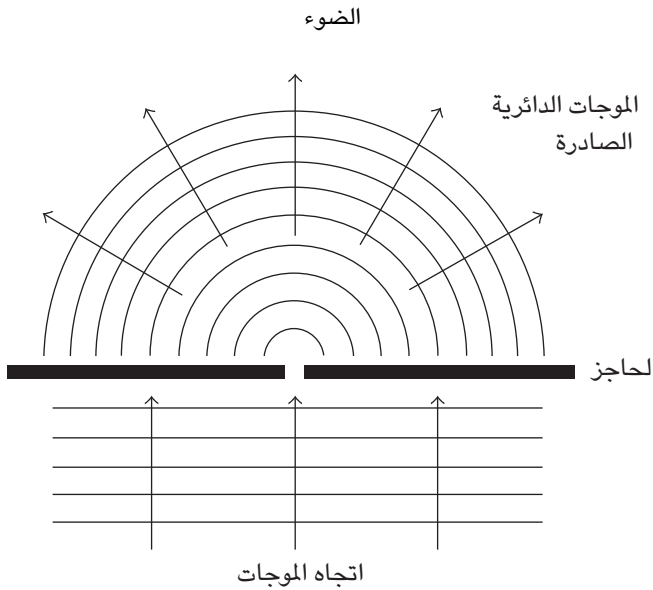
تداخله مع الجسيمات الأخرى والقوى التي تؤثر عليه، وإذا كان من الممكن في النهاية معرفة موقع وسرعة كل جسيم في الكون، فيكون من الممكن إذن التنبؤ بدقة كاملة بمستقبل كل جسيم ومن ثَمّ بمستقبل الكون. فهل يعنى ذلك أن الكون قد سار مثل الساعة بعد دفعة من الخالق وضعته في حركته على مسار معين معروف بدقة كاملة؟ وقد أمدت ميكانيكا نيوتن الكلاسيكية هذه النظرة الحتمية للكون بكثير من الدعم، في صورة لم تدع سوى القليل من حرية الإرادة أو الفرصة للإنسان. فهل يمكن في الواقع أن نكون جميعًا دمى نسير في مساراتنا المضبوطة مسبقًا في حياتنا، بدون فرص اختيار حقيقية على الإطلاق؟ كان معظم العلماء يتركون هذا الأمر للفلاسفة يتجادلون حوله، غير أن الأمر تغير بقوة، فأصبح السؤال في قلب الفيزياء الجديدة في القرن العشرين.

موجات أم جسيمات

ومثل هذا النجاح المزود بفيزياء عصر نيوتن حول الجسيمات، من الصعب أن نفاجأ بأنه عندما حاول أن يفسر سلوك الضوء لجأ إلى مصطلحات الجسيمات؛ ففي النهاية تنتقل أشعة الضوء في خطوط مستقيمة كما نشاهدها، كما أن الطريقة التي يرتد بها الضوء عن المرآة تشبه كثيرًا جدًّا الطريقة التي ترتد بها الكرة عن حائط صلب. وقد بنى نيوتن أول تلسكوب عاكس، وفسر الضوء الأبيض على أنه مزيج من كل الألوان في قوس قزح، وأجرى الكثير من الدراسات عن الضوء، لكن ظلت نظرياته تقوم على افتراض أن الضوء يتكون من تيار من دقائق، تسمى الجسيمات. تنثني أشعة الضوء عندما تعبر السطح الفاصل بين مادتين إحداهما خفيفة والأخرى ثقيلة مثل الهواء والماء أو الماء والزجاج (وهذا هو السبب الذي تبدو فيه عصا الكوكتيل وكأنها مثنية عند وضعها في محلول شفاف)، وتفسر نظرية الجسيمات هذا الانكسار بجلاء إذا كانت الجسيمات تنتقل أسرع في المادة الأكثر «كثافة ضوئية»، وحتى أيام نيوتن كانت هناك طريقة بديلة لتفسير كل ذلك.

كان الفيزيائي الهولندي كريستيان هوجينز Christiaan Huygens من معاصري نيوتن، لكنه كان أكبر منه بثلاثة عشر عامًا حيث ولد سنة ١٦٢٩، وقد قام بتطوير فكرة أن الضوء ليس تيارًا من الجسيمات لكنه موجة أقرب شبهًا بالموجات التي تتحرك على سطح البحر أو سطح بحيرة، إلا أنه ينتقل خلال مادة غير مرئية تسمى «الأثير الوضاء» (luminiferous ether). ومثل التموجات التي تحدثها حصاة ألقيت في بركة، فإن موجات الضوء يمكن تخيلها تنتشر من مصدر الضوء في جميع الاتجاهات، وقد فسرت نظرية الموجات الانعكاس والانكسار تمامًا مثل نظرية الجسيمات، مع أنها تقول إن موجات الضوء تتحرك أبطأ خلال المادة الأكثف ضوئيًّا، ولم تكن هناك وسيلة متاحة لقياس سرعة الضوء في القرن السابع عشر، وعليه فإن الفرق في السلوك كان سيفض الاشتباك والتناقض بين النظريتين، غير أن النظريتين تختلفان في أحد التنبؤات الحاسمة للمشاهد؛ فعندما يعبر الضوء حافة حادة فإنه ينتج ظلًّا ذا حافة حادة، وهذه هي بالضبط الطريقة التي يجب أن تسلكها تيارات الجسيمات التي تنتقل في خطوط مستقيمة، أما الموجة فإنها تنثني أو تحيد قليلاً متخذة طريقها خلال الظل (تذكر التموجات على سطح البركة التي تنثني حول صخرة). ومنذ ثلاثمائة سنة مضت كانت نظرية الجسيمات هي السائدة بناء على هذا الدليل، أما نظرية الموجات فمع استبعادها فإنها ظلت غير منسية، غير أن وضع النظريتين قد انعكس كلية ببداية القرن التاسع عشر.

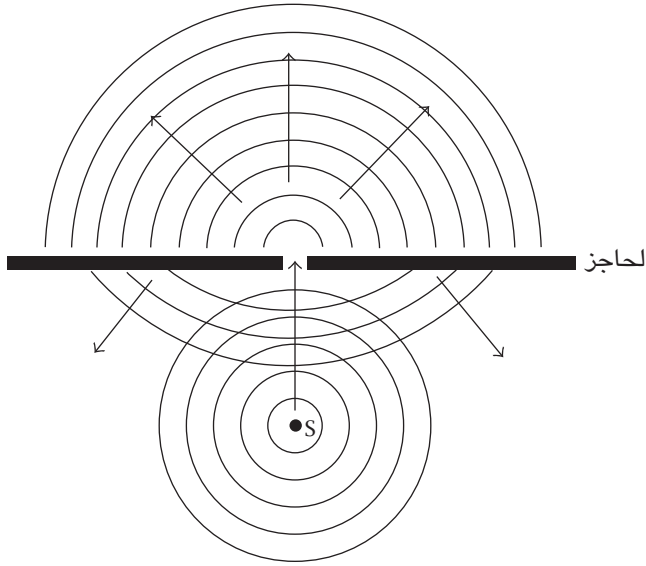
وفي القرن الثامن عشر كان عدد قليل من الناس يأخذون نظرية موجات الضوء بجدية، وكان أحد هؤلاء القليلين الذي لم يأخذ النظرية بجدية فقط بل كتب مؤيدًا لها العالم السويسرى ليونارد يولر(Leonard Euler)، رائد الرياضيات في عصره الذي أسهم بمساهمات رئيسية في تطوير الهندسة وحساب التفاضل والتكامل وحساب المثلثات. وتعبِّر المصطلحات الحسابية عن الرياضيات والفيزياء الحديثة بواسطة المعادلات، وقد قام يولر بتطوير التقنيات التي يعتمد عليها التوصيف الحسابي بصورة كبيرة، وأثناء هذا التطوير أدخل يولر طرق الاختزال بالرموز التي ظلت مستخدمة



شكل ١-١: تعبر موجات الماء المتوازية من خلال ثقب صغير في حاجز لتنتشر في دوائر مركزها الثقب ولا تترك «ظلالًا».

حتى الآن — يرجع إليه استخدام الاسم باي (pi) لنسبة محيط الدائرة إلى قطرها، والحرف i للدالة على الجذر التربيعي للعدد (−١) (الذي سنقابله مرة أخرى هو وباي (pi) وهو الذي أدخل الرموز المستخدمة بواسطة الرياضيين للدلالة على عمليات التكامل. (ومن الاستطراد: مع ذلك، فإن دائرة المعارف البريطانية لا تشير إلى وجهات نظره حول نظرية الموجات للضوء، وهى وجهات النظر التي قال عنها أحد معاصريه إنه لا يؤيدها «فيزيائي واحد من المشهورين».*) كان بنيامين فرانكلين Benjamin Franklin هو الفيزيائي الوحيد من ذوي الشهرة الذي شارك في وجهات النظر هذه، غير أن الفيزيائيين لم يجدوا صعوبة في إهمالها حتى أجرى الإنجليزي توماس يونج (Thomas Young) تجاربه الجديدة الحاسمة في

* مقتبسه من ص٢ من كتاب ميكانيكا الكم Quantum Mechanics تأليف إرنست إكنبري (Ernest Ikenberry) راجع الببليوجرافيا.

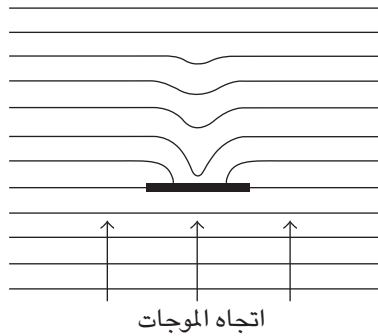


شكل ١-٢: التموجات الدائرية مثل تلك التي يحدثها حجر يلقى في بركة، تنتشر هي أيضًا على شكل موجات دائرية مركزها الثقب إذا عبرت من خلال فتحة ضيقه (وبالطبع ستنعكس الموجات التي تصطدم بالحاجز إلى الخلف مرة أخرى).

بداية القرن التاسع عشر، وتبعه الفرنسي أوجستين فرسنل (Augustin Fresnel) بعدد ذلك مباشرة.

انتصار نظرية الموجات

استخدم يونج معرفته عن حركة الموجات على سطح بركة ليصمم تجربة لاختبار ما إذا كان الضوء ينتشر بنفس الطريقة أم لا، ونحن نعرف جميعًا شكل موجات الماء، ومن الأفضل مع ذلك أن نفكر في التموجات بدلًا من الموجات الكبيرة لندقق التشابه بين التموجات (الماء والضوء). وما يميز الموجات هو أنها ترفع مستوى الماء إلى أعلى قليلًا ثم تخفضه بمرور الموجة، ويسمى ارتفاع قمة الموجة فوق مستوى الماء سعة الموجة وفي حالة الموجة



شكل ١-٣: مقدرة الموجات على الانثناء حول الأركان تعني كذلك أنها تستطيع ملء الظل خلف العائق بسرعة، إذا لم يكن العائق أكبر كثيرًا من طول الموجة.

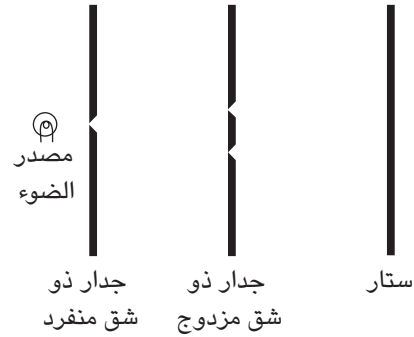
المثالية فإن هذه السعة مساوية تمامًا لانخفاض مستوى الماء عند مرور الموجة، وتتبع التموجات بعضها بعضًا في تسلسل مثل تسلسل التموجات الناتج عن إلقاء حجر في البركة، وتحتفظ هذه التموجات بمسافة منتظمة بين كل منها تسمى طول الموجة، وتقاس بين قمتين متتاليين، وتنتشر الموجات على شكل دوائر حول النقطة التي سقطت فيها الحصاة في الماء، غير أن موجات البحر أو التموجات التي تحدث على سطح بحيرة بفعل هبوب الرياح، قد تنتشر على شكل سلسلة من خطوط مستقيمة من موجات متوازية الواحدة تلو الأخرى، وفي كل الأحوال فإن عدد قمم الموجات التي تعبر نقطه مثبتة ومعينة — صخرة مثلًا — في الثانية الواحدة يخبرنا بتردد الموجة، والتردد هو عدد الموجات التي تعبر كل ثانية، وبذلك فإن سرعة الموجة، أو السرعة التي تتقدم بها كل قمة من قمم الموجات تساوي طول الموجة مضروبًا في التردد.

تبدأ التجربة الحاسمة بموجات متوازية، تشبه خطوط الموجات التي تتقدم نحو الشاطئ قبل أن تتحطم، ومن الممكن تخيل ذلك بالموجات التي يحدثها إلقاء جسم كبير جدًا في الماء وعلى مسافة كبيرة، وستشبه الرقرقات المنتشرة في دوائر متنامية الموجات المتوازية أو المستوية إذا كنت بعيدًا عن

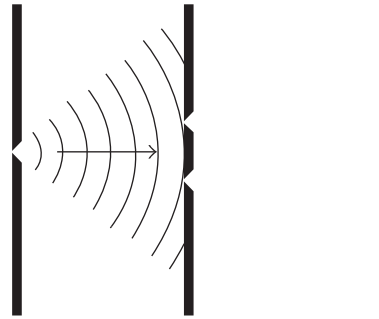
مصدر الرقرقات لأنه من الصعب اكتشاف استدارة الدوائر الكبيرة جدًا المتمركزة حول نقطة بداية الاضطراب، ومن السهل فحص ما يحدث لمثل هذه الموجات المستوية في خزان للماء عندما تقابل عائقًا في طريقها؛ فإذا كان العائق صغيرًا فإن الموجات ستنثني حوله وستملأ ما وراءه بواسطة الحيود تاركة «ظلًّا» صغيرًا جدًّا. أما إذا كان العائق كبيرًا جدًّا مقارنة بطول الموجة في الرقرقات، فإن الأخيرة ستنثني قليلًا في الظل خلف العائق تاركة منطقة من المياه غير المضطربة. فإذا كان الضوء موجة، فإنه من الممكن الحصول على ظل للحواف الحادة لو كان طول موجة الضوء صغيرًا جدًّا مقارنه بحجم الجسم الذي يلقي بظله.

والآن لنمعن في الفكرة من ناحية أخرى؛ تخيل مجموعة رائعة من الموجات المستوية تتقدم عبر خزان المياه وتقترب ليس من حاجز صغير محاط بالماء بل من جدار كامل يسد طريقها وبه ثقب في المنتصف، فإذا كان الثقب أكبر كثيرًا من طول موجة الاضطرابات، فإن الجزء من الموجات المواجه لهذا الثقب سيعبر وينتشر قليلًا جدًّا تاركًا معظم الماء خلف الجدار دون أي اضطراب، مثل الموجات التي تضرب حاجز الأمواج في الموانى وتدخل من فتحة الميناء فقط، أما إذا كان الثقب في الجدار صغيرًا جدًّا، فإن الثقب سيعمل عمل مصدر جديد لموجات دائرية، كما لو أن الحصى قد أُلْقِيَ في الماء عند هذه النقطة، وعلى الجانب الأبعد من الجدار تنتشر هذه الموجات الدائرية (أو بدقة أكثر نصف الدائرية) عبر سطح الماء دون أن تترك أي جزء فيه دون اضطراب.

تسير الأمور بشكل حسن حتى الآن، وفي النهاية نصل إلى تجربة يونج، ولنتخيل التجربة نفسها كما ذكرنا، حيث خزان للماء تترقرق فيه موجات متوازية، لكنها هذه المرة تصطدم بحاجز به ثقبان صغيران، سيعمل كل ثقب عمل مصدر جديد للموجات نصف الدائرية في المنطقة من الخزان الواقعة خلف الحاجز، ولأن هاتين الفئتين من الموجات قد نتجا عن الموجات المتوازية نفسها على الجانب الآخر من الحاجز، فإنهما سيتحركان في تناغم أو في الطور نفسه (in phase). عندنا الآن فئتان من التموجات التي تنتشر

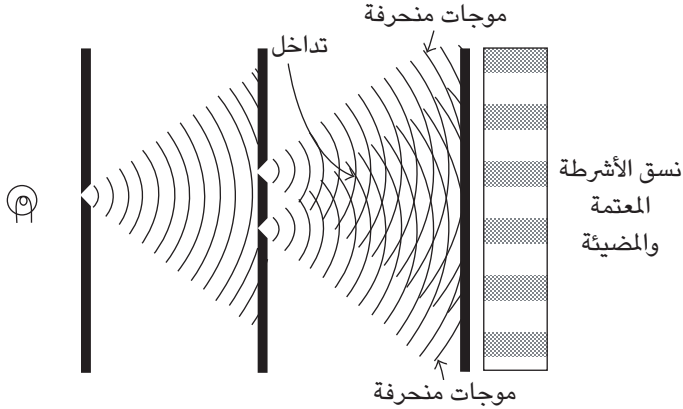


شكل ١-٤: مقدرة الضوء على التشتت حول الأركان ومن خلال الثقوب الصغيرة يمكن اختبارها استخدام شق منفرد لينتج موجة دائرية وشق مزدوج لينتج التداخل.



شكل ١-٥: موجات الضوء تنتشر في دوائر من الشق الأول مثل رقرقات الماء عندما تمر من ثقب، وتتحرك هذه الموجات في تناغم بعضها مع بعض.

عبر المياه، الأمر الذي ينتج عنه نسق أكثر تعقيدًا من التموجات على السطح؛ ففي الموقع الذي ترفع فيه الموجتان الماء إلى أعلى نحصل على قمة أكبر، وإذا كانت إحدى الموجات تحاول رفع الماء وإنشاء قمة والأخرى تحاول خفضه وإنشاء قاع فإن الاثنتين ستتلاشيان ولن يضطرب مستوى الماء، ويطلق على هذين التأثيرين التداخل البناء والتداخل الهدام، ومن السهل رؤيتهما



شكل ١-٦: الموجات الدائرية تقترب من كل ثقب في الستارة المزودة بالشقين وتتداخل لتنتج نسقًا من الضوء والظل يسلك كموجة — في سياق هذه التجربة.

إذا ألقيت بحصاتين في بركة ماء في نفس اللحظة؛ فإذا كان الضوء موجة فلا بد أن ينتج تداخل مماثل بين موجاته إذا أجريت عليه تجربة مكافئة الأمر الذي اكتشفه يونج.

أضاء يونج ستارة موضوعة في مسار الضوء وبها شقان ضيقان، وخلف هذا العائق انتشر الضوء وتداخل، فإذا كان التشبيه بموجات الماء صحيحًا فلا بد أن يكون نسق من التداخل خلف العائق على شكل مناطق متناوبة من الضوء والظلام، ناتجة عن التداخل البناء والتداخل الهدام. وعندما وضع يونج ستارة بيضاء خلف الشقين كان ذلك بالضبط ما شاهده؛ تناوب أشرطة من الضوء والظل على طول الستارة.

غير أن تجربة يونج لم تشعل حماس عالم العلوم، وبالذات في بريطانيا، فقد كانت المؤسسة العلمية هناك تنظر إلى أي معارضة لأي فكرة من أفكار نيوتن على أنها هرطقة تقريبًا وبالقطع عمل غير وطني. مات نيوتن سنة ١٧٢٧، وسنة ١٧٠٥ — أي أقل من مائة عام قبل إعلان يونج اكتشافاته — أصبح أول رجل يحصل على «الفروسية» على أعماله العلمية،

وكان مقدرًا لهذا الوثن أن يخلع عن عرشه في القريب العاجل في إنجلترا، وربما كان من المناسب في زمن حروب نابليون أن يقوم بذلك رجل فرنسي هو أوجستين فرسنل، الذي أخذ على عاتقه الفكرة «غير الوطنية» وأرسى في نهاية المطاف التفسير الموجي للضوء. ومع أن أعمال فرسنل جاءت بعد سنوات قليلة من أعمال يونج، فإنها كانت أكثر اكتمالًا، وقدمت تفسيرًا موجيًّا لكل السمات الافتراضية في سلوك الضوء. ومن بين أشياء أخرى، شرح فرسنل ظاهرة مألوفة لنا جميعًا اليوم وهى الانعكاسات الجميلة الملونة التي تنتج عندما يسقط الضوء على طبقة رقيقة من الزيت، ويرجع السبب في هذه الظاهرة إلى التداخل في الموجات؛ فبعض الضوء ينعكس من السطح العلوي لطبقة الزيت وينفذ البعض الآخر لينعكس على السطح السفلي لطبقة الزيت. وبهذا فهناك شعاعان مختلفان ينعكسان ويتداخلان أحدهما مع الآخر، ولأن كل لون من ألوان الضوء يقابل طول موجة مختلفًا، ويتكون الضوء الأبيض من خلط كل ألوان قوس قزح، فإن انعكاس الضوء الأبيض من طبقة الزيت سينتج كتلة من الألوان؛ لأن بعض الموجات (الألوان) تتداخل بصورة هدامة وتتداخل أخرى بصورة بناءة، وذلك تبعًا لوضع عينك إلى طبقة الزيت.

وعندما توصل الفيزيائي الفرنسي ليون فوكولت Léon Foucault — الذي اشتهر بالبندول الذي يحمل اسمه — في منتصف القرن التاسع عشر إلى أن سرعة الضوء أقل في الماء عن الهواء، على عكس تنبؤات نيوتن ونظرية الجسيمات، كان ذلك مجرد توقع من عالم حسن السمعة، وفي هذا الوقت كان «كل إنسان يعرف» أن الضوء شكل من أشكال الحركة الموجية تنتشر خلال الأثير، مهما كان يعنى ذلك. لكن مع ذلك كان من المستحسن معرفة ما الذي «يترقرق» في شعاع الضوء. وفي ستينيات وسبعينيات القرن التاسع عشر بدا أن نظرية الضوء قد اكتملت أخيرًا عندما توصل الفيزيائي الاسكتلندي العظيم جيمس كلارك ماكسويل (James Clerk Maxwell) إلى وجود موجات تتضمن مجالات كهربية ومغناطيسية متغيرة، وقد تنبأ ماكسويل بهذه الإشعاعات الكهرومغناطيسية لتتضمن

أنساقا من مجالات كهربية ومغناطيسية أقوى وأضعف بالطريقة نفسها التي تتضمن بها موجات الماء قممًا وقيعانًا في مستوى الماء، وقد نجح هنريش هيرتز Heinrich Hertz سنة ١٨٨٧ — أي منذ مائة عام فقط — في بث واستقبال إشعاع كهرومغناطيسي على شكل موجات راديو، تشبه موجات الضوء لكن موجاتها أطول كثيرًا من موجات الضوء، وأخيرًا اكتملت النظرية الموجية للضوء — تمامًا في الوقت نفسه الذي قلبت فيه المفاهيم بواسطة الثورة العظمى في الفكر العلمي منذ أيام نيوتن وجاليليو. وبحلول نهاية القرن التاسع عشر لم يكن لأحد أن يقترح أن الضوء جسيمات إلا إذا كان هذا الشخص عبقريًّا أو غبيًّا؛ كان اسمه ألبرت أينشتاين، لكن قبل أن نفهم لماذا اتخذ هذه الخطوة الجريئة لا بد لنا من زيادة خلفيتنا حول الأفكار الفيزيائية في القرن التاسع عشر.

الفصل الثاني

الذرات

تقول كثير من المؤلفات الشائعة في تاريخ العلوم إن فكرة الذرات يرجع تاريخها إلى الإغريق القدماء، أي منذ عصر ميلاد العلوم، وتمتدح هذه المؤلفات القدماء على بصيرتهم النافذة حول الطبيعة الحقيقية للمادة، إلا أن هذا التقرير يضخم الحقيقة قليلًا؛ ففي الحقيقة كان ديمقريطس Democritus من أبديرا، الذي توفي نحو ٣٧٠ ق.م.، قد افترض أن الطبيعة المعقدة للعالم يمكن تفسيرها إذا كانت كل الأشياء تتكون من أنواع مختلفة من ذرات غير قابلة للتغير، بحيث يكون لكل نوع من الذرات شكله وحجمه الخاص، وهي في حركة دائمة، وقال ديمقريطس إن «الأشياء الوحيدة الموجودة هي الذرات والفراغ، وماعدا ذلك فمجرد آراء».* وقد تبنى كل من إيبكيوريوس Epicurius من ساموس ورومان ليوكريتيوس Roman Lucretius Carus هذه الفكرة بعد ذلك، لكن هذه الفكرة لم تكن هي الرائدة في تلك الأيام على النظريات الأخرى في تفسير طبيعة العالم، بل كان اقتراح أرسطو بأن كل شيء في الكون مصنوع من «العناصر» الأربعة: النار، والأرض، والهواء، والماء، هو الذي حقق شعبية «أكبر كثيرًا» وظل صامدًا. وقد نسيت تمامًا فكرة الذرات في فترة ميلاد المسيح، وتقبل العالم عناصر أرسطو الأربعة على مدى ألفي عام.

ومع أن روبرت بويل Robert Boyle الإنجليزي قد استخدم مفهوم الذرات في أعماله الكيميائية في القرن السابع عشر، وكان نيوتن يفكر فيها

* مقتبسة من كتب كثيرة بما في ذلك دعوة إلى الفيزياء Invitation to Physics تأليف جاى م. باساتشوف ومارك ل. كوتنر (Jay M. Pasachoff & Marc L. Kutner) (صفحة ٣).

في أبحاثه في الفيزياء والضوء، فإن الذرات لم تصبح جزءًا من الفكر العلمي إلا في القسم الأخير من القرن الثامن عشر، عندما درس الكيميائي الفرنسي أنطوان لافوازيه Antoine Lavoisier سبب احتراق الأشياء، وقد حدد لافوازيه عناصر حقيقية عديدة، وهي المواد الكيميائية النقية، التي لا تتفكك إلى مواد كيميائية أخرى، وقد تحقق لافوازيه أن الاحتراق هو ببساطة العملية التي يتحد بواسطتها أكسجين الهواء الجوي بالعناصر الأخرى، وفي السنوات الأولى من القرن التاسع عشر تمكن جون دالتون John Dalton من وضع دور الذرات في الكيمياء على قدمين ثابتتين، وقد قرر أن المادة تتكون من ذرات غير قابلة للانقسام، وأن ذرات كل عنصر متماثلة، وللعناصر المختلفة أنواع مختلفة من الذرات (أحجام وأشكال مختلفة)، وأن الذرات لا تخلق ولا تفنى، لكنها تخضع لإعادة ترتيب أثناء التفاعلات الكيميائية، وأن المركبات الكيميائية المصنوعة من عنصرين أو أكثر، تتكون من جزيئات، كل منها يتكون من عدد بسيط ثابت من ذرات العناصر الداخلة في تركيب المركب، وبذلك يكون المفهوم الذري للعالم المادي لم يصبح في الواقع على الصورة التي يدرس بها في المراجع اليوم إلا منذ أقل من مائتي عام مضت.

ذرات القرن التاسع عشر

ومع ذلك فإن الفكرة لم تكتسب ثقة الكيميائيين إلا ببطء خلال القرن التاسع عشر، وقد توصل جوزيف جاى-لوساك (Joseph Gay-Lussac) بالتجربة إلى أنه عندما تتحد مادتان غازيتان فإن حجم أي غاز منهما المطلوب دائمًا نسبته بسيطة إلى حجم الغاز الآخر، وإذا كان المركب الناتج غازيًّا فإن حجم هذا الغاز الثالث هو الآخر نسبته بسيطة إلى الغازين الآخرين. ويعتبر ذلك متوافقًا مع فكرة أن جزيء المركب يتكون من ذرة أو ذرتين من أحد الغازين متحدة بعدد قليل من ذرات الغاز الآخر، وقد استخدم الإيطالي آماديو أفوجادرو Amadeo Avogadro هذا البرهان سنة

١٨١١ ليتوصل إلى فرضيته الشهيرة التي تنص على أنه عند درجة حرارة وضغط ثابتين تحتوي الحجوم المتساوية من الغازات على العدد نفسه من الجزيئات، مها اختلفت الطبيعة الكيميائية لهذه الغازات. وقد أكدت التجارب اللاحقة أن فرضية أفوجادرو صحيحة، ومن الممكن إثبات أن كل لتر من الغاز تحت ضغط جوي واحد ودرجة حرارة صفر سلزية يحتوي تقريبًا على ٢٧٠٠٠ بليون بليون (٢٧ × ٢١٠) جزيء. لكن لم تتطور الفكرة إلا على يد ابن بلد أفوجادرو، واسمه ستانيسلاو كانيزارو Stanislao Cannizzaro في خمسينيات القرن التاسع عشر الذي طورها بحيث بدأ بعض الكيميائيين يأخذونها مأخذ الجد. ومع ذلك فحتى في تسعينيات القرن التاسع عشر كان مازال كثير من الكيميائيين لا يتقبلون أفكار دالتن وأفوجادور. لكن قد تخطتهم الأحداث في ذلك الحين في سياق تطور الفيزياء، حيث فُسِّر سلوك الغازات بالتفصيل، وذلك باستخدام مفهوم الذرات بواسطة الاسكتلندي جيمس كلاك ماكسويل والنمساوي لودفيج بولتزمان Ludwig Boltzmann.

وخلال ستينيات وسبعينيات القرن التاسع عشر طور هؤلاء الرواد فكرة أن الغاز يتكون من ذرات أو جزيئات كثيرة جدًّا (يعطيك الرقم الذي تستنتجه من فرضية أفوجادرو فكرة عن هذا العدد)، وهى دقائق فائقة الصغر على شكل كرات صلبة تتحرك في كل الاتجاهات متصادمة بعضها مع بعض ومع جدران الوعاء الذي يحتويها، ويرتبط ذلك مباشرة بفكرة أن الحرارة شكل من أشكال الحركة؛ فعندما يسخن الغاز تتحرك الجزيئات أسرع، الأمر الذي يرفع من الضغط على جدران الوعاء، أما إذا لم تكن الجدران مثبتة فإن الغاز سيتمدد، وكانت السمة الرئيسية في هذه الأفكار الجديدة هي أن سلوك الغاز يمكن تفسيره بتطبيق قوانين الميكانيكا — قوانين نيوتن — بطريقة إحصائية على أعداد كبيرة من الذرات أو الجزيئات؛ ففي أي وقت يمكن أن يتحرك أي جزيء في أي اتجاه، لكن التأثير الجمعي لهذه الجزيئات الكثيرة المتصادمة مع جدران الإناء كل ثانية هو حدوث ضغط ثابت، وقد أدى ذلك إلى التوصل إلى توصيف رياضي لعمليات الغازات،

التي تسمى الميكانيكا الإحصائية، لكن لا يزال لا يوجد برهان مباشر على وجود الذرات، وقد جادل بعض الفيزيائيين العظام في ذلك الوقت ضد الفرضية الذرية، بل حتى في تسعينيات القرن التاسع عشر كان بولتزمان نفسه يشعر (ربما خطأً) بأنه وحده يناضل ضد مد الأفكار العلمية. وسنة ١٨٩٨ نشر حساباته التفصيلية على أمل أنه «عندما يعاد النظر في نظرية الغازات مرة أخرى، لن يكون هناك الكثير ليعاد اكتشافه»* وسنة ١٩٠٦ كان يعاني المرض والإحباط والتعاسة لمواصلة كثير من العلماء الرواد في معاداة أفكاره حول نظرية الحركة للغازات، مما دفعه للانتحار، غير مدرك أن أحد النظريين المغمورين ويدعى ألبرت أينشتاين قد نشر قبل بضعة أشهر مقالة علمية توصل فيها إلى حقيقة وجود الذرات دون أدنى شك.

ذرات أينشتاين

لم تكن هذه المقالة سوى واحدة من ثلاث مقالات نشرها أينشتاين في نفس المجلد من حوليات الفيزياء Annalen der Physik سنة ١٩٠٥، وكانت أي واحدة منها كفيلة بحجز مكان له في سجل تاريخ العلوم. تناولت إحدى المقالات تقديم نظرية النسبية الخاصة وهى بعيدة عن مجال كتابنا هذا، وقد عنيت المقالة الثانية بالتدخل الفعال بين الضوء والإلكترونات، وقد اعترف بها فيما بعد كأول عمل علمي يتناول ما نطلق عليه اليوم ميكانيكا الكم، وكانت هذه المقالة هي التي حصل بسببها أينشتاين على جائزة نوبل سنة ١٩٢١. أما المقالة الثالثة فقدمت تفسيرًا بسيطًا بدرجة خادعة لأحجية حيرت العلماء من سنة ١٨٢٧؛ التفسير الذي أسس، كما لم تفعل أي مقالة نظرية أخرى، واقعية الذرات.

وقد صرح أينشتاين فيما بعد أن هدفه الأساسي في ذلك الوقت كان «اكتشاف الحقائق التي تؤكد بوضوح ما أمكن وجود الذرات بأحجام

* مقتبسة من التطور التاريخي لنظرية الكم (The Historical Development of Quantum Theory)، الجزء الأول صفحة ١٦ تأليف جاجديش ميهرا وهيلموت ريتشنبرج (Jagdish Mehra & Helmut Rechenberg).

محددة.»* وهو الهدف الذي ربما يدل على أهمية الأبحاث في مطلع القرن العشرين. وفي وقت نشر هذه الأبحاث كان أينشتاين يعمل فاحصًا للاختراعات في برن — ولم تجعله طريقته غير التقليدية في تناول الفيزياء مرشحًا واضحًا لمنصب أكاديمي عندما أنهى تعليمة الرسمي، فكانت الوظيفة في مكتب الاختراعات مناسبة له. وقد أثبت عقله المنطقي أنه قادر على التمييز بين الغث والثمين في الاختراعات الجديدة، وتركت له خبرته في الوظيفة المزيد من الوقت الحر ليفكر في الفيزياء حتى أثناء ساعات عمله في المكتب، وقد عنيت بعض أفكاره تلك بالاكتشاف الذي توصل إليها عالم النبات البريطاني توماس براون (Thomas Brown) منذ ثمانين عامًا تقريبًا؛ فقد لاحظ براون أن حبوب اللقاح التي تسبح في قطرة ماء عند فحصها بالميكروسكوب تتحرك حركة عشوائية غير منتظمة تسمى الآن حركة براونيان Brownian motion. وقد أثبت أينشتاين أنه مع أن هذه الحركة عشوائية، فإنها تخضع لقانون إحصائي تمامًا، وأن نسق السلوك هو بالضبط ما يجب أن نتوقعه إذا كانت حبة اللقاح «تضرب» باستمرار بجسيمات لا ترى وأصغر من أن يرصدها الميكروسكوب، وتتحرك في توافق مع الإحصاء الذي استخدمه كل من بولتزمان وماكسويل لوصف الطريقة التي تتحرك بها الذرات في غاز أو سائل، وتبدو الصورة واضحة اليوم لدرجة أنه من الصعب إعطاء الأولوية في الاكتشاف لتلك المقالة. وقد تعودنا أنا وأنت على فكرة الذرات ونستطيع أن نحكم في الحال أنه إذا كانت حبوب اللقاح تضرب بواسطة صدمات غير مرئية، فلا بد أن تكون هذه هي الذرات المتحركة التي تدفع بحبوب اللقاح من حولها. غير أنه قبل أن يبين أينشتاين السبب، كان علماء محترمون لا يزالون يشككون في حقيقة الذرات، أما بعد ظهور مقالته فلم يعد هناك مجال للشك، لقد كان الأمر بسيطًا وسهلًا عند شرحه، مثل وقوع التفاحة من الشجرة، وحسنا، إذا كان الأمر بهذا الوضوح فلماذا لم يتوصل إليها

* مقتبسة من «مذكرات تاريخ حياة أينشتاين الذاتية» (Autobiographical Notes) في كتاب: ألبرت آينشتاين: الفيلسوف والعالم (Albert Einstein: Philosopher Scientist) تحرير ب. أ. شليب (P. A. Schlipp) وتيودور Tudor، نيويورك، ١٩٤٩ (صفحة ٤٧).

أحد في العقود الثمانية الماضية؟ ومن سخريات القدر أن هذه المقالة العلمية كان مقدرًا لها أن تنشر بالألمانية (في مجلة حوليات الفيزياء لأنها كانت معروضة لمشاهير العلماء المتحدثين بالألمانية مثل إرنست ماخ Ernst Mach ووليهلم أوستوالد Wilhelm Ostwald الذين يبدو أنهم أقنعوا بولتزمان أنه كان الصوت الوحيد في البرية. وفي الحقيقة، مع بداية القرن العشرين كان هناك الكثير من الأدلة على واقعية الذرة، حتى ولو قلنا بتحفظ إن هذه الأدلة يمكن وصفها بأنها ظرفية أو ثانوية، وقد تعهد الفيزيائيون البريطانيون والفرنسيون النظرية الذرية بإدانة شديدة أكثر كثيرًا من زملائهم الألمان، وكان ج. ج. طومسون J. J. Thomson الإنجليزي هو الذي اكتشف الإلكترون — الذي نعلم الآن أنه أحد مكونات الذرة — سنة ١٨٩٧.

الإلكترونات

دار كثيرٌ من الجدل والنقاش في أواخر القرن التاسع عشر فيما يتعلق بطبيعة الإشعاع الناتج من سلك يمر به تيار كهربي موجود في أنبوبة مفرغة من الهواء. قد تكون أشعة الكاثود تلك — كما كانت تدعى — نوعًا من الإشعاع ناتجًا من ذبذبة الأثير لكنها مختلفة في خواصها عن الضوء وعن موجات الراديو المكتشفة حديثًا، وقد تكون تيارات من جسيمات دقيقة. أيد معظم العلماء الألمان فكرة موجات الأثير، أما معظم البريطانيين والفرنسيين فكان رأيهم أن أشعة الكاثود لا بد أن تكون جسيمات، وقد تسبب اكتشاف أشعة-X صدفة بواسطة ويلهلم رونتجن Wilhelm Röntgen سنة ١٨٩٥ (حصل رونتجن سنة ١٩٠١ على أول جائزة نوبل في الفيزياء على هذا الاكتشاف) في زيادة تعقيد الوضع، إلا أن ذلك لم يكن سوى سمكة رنجة مدخنة.* ومع أهمية هذا الاكتشاف — كما ثبت سريعًا بعد ذلك — فإنه قد حدث قبل وجود الإطار النظري من الفيزياء الذرية التي تناسبه، وسنقابل هذه الأمور في سياق أكثر منطقية مع تطور روايتنا.

* تعبير يقال للشيء الذي يصرف الانتباه (المترجمان).

عمل طومسون في معمل كافندش، وهو مركز أبحاث في كمبريدج أسسه ماكسويل حين كان أول أستاذ كرسى كافندش في سبعينيات القرن التاسع عشر. وقد صمم طومسون تجربة تعتمد على الموازنة بين الخواص الكهربية والمغناطيسية للجسيمات المشحونة المتحركة، ومن الممكن تغيير مسار مثل هذه الجسيمات باستخدام المجال المغناطيسي أو المجال الكهربي، وقد صمم* جهاز طومسون بحيث يلغي أحد هذين المجالين تأثير الآخر ليمر شعاع أشعة الكاثود في خط مستقيم من لوح الفلز المشحون سالبًا (أو الكاثود) إلى شاشه استكشاف. ولا تصلح هذه الطريقة إلا مع الجسيمات المشحونة كهربيًّا، وهكذا توصل طومسون إلى أن أشعة الكاثود هي في الحقيقة جسيمات مشحونة شحنة سالبة (تسمى إلكترونات الآن).† وقد تمكن طومسون من استخدام الاتزان بين القوى الكهربية والقوى المغناطيسية لحساب نسبة شحنة الإلكترون الكهربية إلى كتلته (e/m). وقد حصل على نفس النتائج مهما غير من الفلز المصنوع منه الكاثود، مما جعله يستنتج أن الإلكترونات جزء من الذرات، ومع أن العناصر المختلفة مصنوعة من ذرات مختلفة فإن كل الذرات تحتوى على الإلكترونات نفسها.

لم يكن ذلك اكتشافًا بالصدفة مثل ما حدث في اكتشاف أشعة-X، لكنه جاء نتيجة تخطيط محكم وتجارب عن خبرة؛ أنشأ ماكسويل معمل كافندش، لكن بقيادة طومسون أصبح هذا المعمل مركزًا رائدًا للفيزياء التجريبية — وربما كان المعمل الرائد عالميًّا في الفيزياء — حيث كان في قلب أحدث الاكتشافات التي أدت إلى الفهم الحديث للفيزياء في القرن العشرين، وكما حصل نفسه على جائزة نوبل، كذلك حصل سبعة من الذين عملوا

* كلمة صمم هي الكلمة الصحيحة هنا، فمن المشهور عن ج. ج. طومسون أنه كان أخرق لكنه كان يصمم تجارب مذهلة ليقوم بها أناس آخرون. ويصرح ابنه جورج أن ج. ج. (كما كان معروفا دائما) «قادر على تشخيص أخطاء أي جهاز بدقة خارقة، بنفس الدرجة التي تمنعه من التعامل معه» (راجع الاستبيانات Questioners تأليف باربارا لوفيت كلاين ص ١٣).

† ليست الشاشة التي تشاهد عليها صور التليفزيون إلا جزءًا من مثل هذه الأنبوبة، وتسمى أنبوبة أشعة الكاثود، وما أشعة الكاثود التي تشكل صور التليفزيون إلا إلكترونات تمسح الشاشة بواسطة مجالات مغناطيسية متغيرة تمامًا مثل تلك التي درسها طومسون.

تحت قيادته في معمل كافندش على الجائزة نفسها في فترة ما قبل سنة ١٩١٤، وقد ظل هذا المعمل مركزًا عالميًّا للفيزياء حتى يومنا هذا.

الأيونات

اتضح أن أشعة الكاثود التي تنتج من لوح مشحون شحنة سالبة في أنبوبة مفرغة من الهواء جسيمات مشحونة شحنة سالبة هي الإلكترونات، وحيث إن الذرات متعادلة كهربيًّا، من المنطق أن يكون هناك أجزاء مقابلة للإلكترونات، لكن بشحنة موجبة، هي الذرات التي بها قطعة من الشحنة السالبة التي تقذف إلى الخارج. وقد كان ويلهلم فاين Wilhelm Wien من جامعة فورزبرج Würzburg من أوائل من درسوا هذه الأشعة الموجبة سنة ١٨٩٨، وتوصل إلى أن الجسيمات المكونة لهذه الأشعة أثقل كثيرًا من الإلكترونات، كما تتوقع إذا كانت هذه مجرد ذرات فقدت إلكترونها، وبعد أبحاثه على أشعة الكاثود أخذ طومسون على عاتقه تحديات دراسة هذه الأشعة الموجبة في سلسلة من التجارب الصعبة امتدت حتى عشرينيات القرن العشرين، ويطلق على هذه الأشعة اليوم الذرات المتأينة، أو ببساطة أيونات، أما في أيام طومسون فكانت تسمى أشعة القنال canal rays، وقد درس طومسون هذه الأشعة باستخدام أنبوبة معدلة لأشعة الكاثود، كانت تحتوى قليلًا من الغاز الذي لم يفرغ حتى النهاية بواسطة مضخة التفريغ. كانت الإلكترونات التي تتحرك خلال الغاز تتصادم مع ذراته لتركل إلكترونات أخرى منها تاركة الأيونات المشحونة شحنة موجبة، التي يمكن التعامل معها بالمجالين الكهربي والمغناطيسي بالطريقة نفسها التي تعامل بها طومسون مع الإلكترونات نفسها. وبحلول سنة ١٩١٣ كان فريق طومسون يجري قياساته على حيود الأيونات الموجبة للهيدروجين والأكسجين وغازات أخرى، وكان أحد الغازات الذي استخدمه طومسون في هذه التجارب هو النيون، ووجد أن آثارًا من النيون في الأنبوبة المفرغة تتوهج بشدة إذا مر خلالها تيار كهربي، وبذلك يكون جهاز طومسون هو

الرائد لأنابيب النيون الحديثة، وما وجده طومسون كان أهم كثيرًا جدًّا من مجرد اكتشاف نوع جديد من إشارات الدعاية.

وعلى عكس الإلكترونات التي كان لها جميعًا النسبة e/m نفسها، فقد اتضح وجود ثلاث أيونات مختلفة للنيون، لها جميعًا كمية الشحنة نفسها مثل الإلكترون (e+ بدلًا من e−) لكنها تختلف في الكتلة. وكان ذلك أول دليل على أن العناصر الكيميائية تحتوي عادة على ذرات لها كتلة مختلفة (أوزان ذرية مختلفة) لكن لها جميعًا الخواص الكيميائية نفسها، ويطلق على هذه التغيرات في العناصر «النظائر»، إلا أن الوقت كان مبكرًا جدًّا قبل أن يتوصل إلى تفسير لوجودها، ومع ذلك، فقد كان لدى طومسون معلومات كافية ليبدأ أولى محاولات تفسير ماهية الذرة وما تشبهه من الداخل؛ فهي لم تكن جسيمة نهائية غير قابلة للانقسام — كما كان يظن قليل من الفلاسفة الإغريق — لكنها خليط من شحنات موجبة وسالبة بحيث يمكن طرد الإلكترونات منها.

وقد تصور طومسون الذرة شيئًا مثل البطيخة، أي كرة كبيرة نسبيًّا تنتشر خلالها الشحنة الموجبة، أما الإلكترونات الصغيرة فمدفونة فيها مثل بذور البطيخ، ويحمل كل منها شحنته السالبة الصغيرة الخاصة به، وقد اتضح خطأه، لكنه قدم للعلماء الهدف الذي يوجهون أسلحتهم نحوه بالفعل، وقد أدت خبرتهم في التعامل مع هذا الهدف إلى الفهم الدقيق للبنية الذرية، وحتى نرى كيف حدث ذلك علينا أن نرجع خطوة للوراء في تاريخ العلوم لنتمكن عندئذ من الإقدام للأمام.

أشعة X

اتضح أن مفتاح فك أسرار بنية الذرة هو اكتشاف النشاط الإشعاعي سنة ١٨٩٦، وكما حدث في اكتشاف أشعة X قبل بضعة أشهر، فإن ذلك كان توفيقًا وحظًّا طيبًا، إلا أن هذا التوفيق وذلك الحظ قد تصادف أن وقعا في بعض معامل الفيزياء في ذلك الوقت. كان ويلهلم رونتجن يجري تجاربه

على أشعة الكاثود مثل كثيرين من الفيزيائيين في تسعينيات القرن التاسع عشر، وقد تبين أنه عند اصطدام هذه الأشعة — الإلكترونات — بجسم مادي فإن الصدمة ينتج عنها أشعة ثانوية، وهذه الأشعة غير مرئية إلا أنه يمكن الكشف عنها بواسطة تأثيرها في الألواح الفوتوغرافية أو الأفلام أو بتأثيرها في قطعة من جهاز يسمى الشاشة الفلورسنتية، التي تصدر شررًا من الضوء عندما تصطدم بها الأشعة. وقد حدث أن رونتجن كان لديه شاشة فلورسنتية موضوعة على طاولة بجوار تجربته بأشعة الكاثود، وسرعان ما لاحظ أن هذه الشاشة تتوهج كلما حدث تفريغ خلال أنبوبة أشعة الكاثود في التجربة، وقد أدى به ذلك إلى اكتشاف الأشعة الثانوية التي أطلق عليها «X» لأن x ترمز عادة إلى كمية مجهولة في المعادلات الرياضية، وسرعان ما تبين أن أشعة X تسلك مثل الموجات (نحن نعرف الآن أنها نوع من الأشعة الكهرومغناطيسية، تشبه إلى حد بعيد موجات الضوء لكن أطوالها أقصر كثيرًا منه) وقد ساعد هذا الاكتشاف الذي وقع في معمل ألماني في تأكيد وجهة نظر العلماء الألمان حول أشعة الكاثود التي لا بد أن تكون هي الأخرى موجات.

أُعلن عن اكتشاف أشعة X في ديسمبر سنة ١٨٩٥ وأحدث ذلك ثورة في المجتمع العلمي، وقد حاول باحثون آخرون اكتشاف طرق أخرى لإنتاج أشعة X أو أنواع أخرى من الأشعة، وكان أول من نجح في ذلك هو هنري بيكريل Henri Becquerel في باريس. وكانت أكثر سمات أشعة X المخادعة هي الطريقة التي تمر بها خلال كثير من المواد المعتمة دون أي إعاقة، مثل الأوراق السوداء لينتج عنها صورة على لوح فوتوغرافي لم يتعرض من قبل للضوء، وكان بيكيريل مهتمًّا بظاهرة الفسفرة Phosphorescence التي تعنى انبعاث الضوء بواسطة مادة سبق أن امتصت الضوء، ولا تبعث الشاشة الفلورسنتية — مثل تلك التي وردت في اكتشاف أشعة X — بالضوء إلا إذا أثيرت بواسطة إشعاع ساقط عليها. ومن خصائص المواد الفوسفورية المقدرة على اختزان الأشعة الساقطة عليها ثم إعادة بثها على شكل ضوء يخفت ببطء على مدى ساعات بعد وضعها في الظلام، وكان من الطبيعي

البحث عن علاقة بين ظاهرة الفسفرة وأشعة X، إلا أن ما اكتشفه بيكيريل لم يكن متوقعًا، تمامًا مثل اكتشاف أشعة X.

النشاط الإشعاعي

قام بيكيريل بتغطية لوح فوتوغرافي بورق أسود مزدوج وذلك في فبراير/شباط سنة ١٨٩٦، ثم غطى الورق بأملاح بيكبريتات اليورانيوم والبوتاسيوم وعرض كل هذه اللفة للشمس لعدة ساعات، وعندما تم إظهار اللوح ظهرت خطوط وأشكال الكيماويات التي تغطي اللوح. اعتقد بيكيريل أن أشعة X قد تولدت في ملح اليورانيوم الذي يغطي اللوح بواسطة ضوء الشمس، تمامًا كما في حالة الفسفرة، وبعد يومين قام بتحضير لوح آخر بنفس الطريقة بغرض تكرار التجربة، إلا أن السماء كانت ملبدة بالغيوم في هذا اليوم واليوم الذي يليه، فظل اللوح الذي أعده بيكيريل محفوظًا داخل خزانة. قام بيكيريل عمومًا بإظهار اللوح في الأول من مارس/آذار فوجد مرة أخرى الخطوط والأشكال الخاصة بملح اليورانيوم، ومهما كان الأمر الذي تسبب في تضبيب أو تغميق اللوحين إلا أنه لا علاقة له بضوء الشمس أو الفسفرة، ولكنه كان شكلًا غير معروف من قبل من الإشعاع الذي اتضح أنه يصدر من اليورانيوم نفسه تلقائيًّا دون أي مؤثر خارجي، وتسمى هذه المقدرة على بث الأشعة تلقائيًّا بالنشاط الإشعاعي.

شرع علماء آخرون في دراسة النشاط الإشعاعي بعد أن أثارهم اكتشاف بيكيريل، وسرعان ما أصبحت ماري وبيير كوري اللذان يعملان في السوربون* خبيرين في هذا الفرع الجديد من العلم، وقد حصلا على جائزة نوبل في الفيزياء سنة ١٩٠٣ عن أبحاثهما في النشاط الإشعاعي وعن اكتشاف عناصر مشعة جديدة، وسنة ١٩١١ حصلت ماري على جائزة نوبل ثانية في الكيمياء وذلك عن أبحاثها التالية في المواد النشطة إشعاعيًّا (حصلت إيرين ابنة

* لم يعمل بير كوري أو ماري كوري في السوربون في هذه الفترة قط، بل قاما بجميع أبحاثهما الرئيسية التي حصلا على جائزة نوبل عنها في مدرسة تقنية متوسطة (المترجمان).

مارى وبيير كوري هي الأخرى على جائزة نوبل عن أبحاثها في النشاط الإشعاعي* في ثلاثينيات القرن العشرين). وفي بداية العقد الأول من القرن العشرين كانت الاكتشافات التجريبية في النشاط الإشعاعي متقدمة كثيرًا عن النظرية وذلك بوجود سلسلة من التطورات الجديدة التي لم يتضمنها الإطار النظري إلا فيما بعد، وقد لمع أحد الأسماء خلال هذه الفترة في دراسة النشاط الإشعاعي، وهو اسم إرنست رذرفورد Ernest Rutherford.

كان رذرفورد من نيوزيلندا وقد عمل مع طومسون في معمل كافندش خلال تسعينيات القرن التاسع عشر، وفي عام ١٨٩٨ عين أستاذًا للفيزياء في جامعة ماك جيل في مونتريال، وهناك أثبت هو وفريدريك سودي Frederick Soddy سنة ١٩٠٢ أن النشاط الإشعاعي يتضمن تحول العنصر المشع إلى عنصر آخر. وكان رذرفورد هو الذي اكتشف إنتاج نوعين من الإشعاع بواسطة هذا «التحلل» أو «التفكك» الإشعاعي كما يسمى الآن، وقد أطلق عليهما أشعة ألفا وأشعة بيتا، وعندما اكتشف نوعًا ثالثًا من الإشعاع فيما بعد، كان من الطبيعي أن يطلق عليه أشعة جاما، وقد ثبت أن أشعة ألفا وأشعة بيتا جسيمات سريعة الحركة. وسرعان ما اتضح أن أشعة بيتا ما هي إلا الإلكترونات، وهى المكافئ الإشعاعي لأشعة الكاثود، واتضح أيضًا أن أشعة جاما نوع آخر من الأشعة الكهرومغناطيسية مثل أشعة X بأطوال موجات أقصر كثيرًا من الأخيرة، غير أنه قد تبين أن جسيمات ألفا شيء مختلف تمامًا؛ فهي جسيمات كتلتها أربعة أضعاف كتلة ذرة الهيدروجين تقريبًا وعليها شحنة كهربية موجبة وليست سالبة مقدارها ضعف شحنة الإلكترون.

داخل الذرة

وحتى قبل أن يعرف أي أحد ما هي أشعة ألفا، ولا كيف تنطلق بسرعة عالية جدًا من ذرة تتحول أثناء هذه العملية إلي ذرة عنصر أخرى، تمكن

* لم تحصل إيرين وزوجها فردريك جولي كوري على جائزتهما عن النشاط الإشعاعي، بل على تحضير مواد مشعة صناعيًّا وليس طبيعيًّا (المترجمان).

الباحثون من أمثال رذرفورد من استخدامها، ومن الممكن استخدام مثل هذه الجسيمات عالية الطاقة — التي هي نفسها نتاج تفاعل ذري — كمجسات لدراسة بنية الذرة. وقد اكتشف مصدر جسيمات ألفا بالمقام الأول، في بحث علمي غير مباشر ومثير. انتقل رذرفورد سنة ١٩٠٧ من مونتريال ليصبح أستاذًا للفيزياء في جامعة مانشستر بإنجلترا، وقد حصل على جائزة نوبل في الكيمياء سنة ١٩٠٨ عن أعماله في مجال النشاط الإشعاعي، وهى الجائزة التي سببت له بعض التسلية الساخرة؛ فمع أن لجنة نوبل كانت تعتبر دراسة العناصر من الكيمياء، فإن رذرفورد كان يعتبر نفسه فيزيائيًّا وليس له علاقة بالكيمياء إلا في أضيق الحدود، وكان يعتبرها فرعًا من العلوم أدنى كثيرًا. (ومع الفهم الجديد للذرات والجزيئات الذي زودتنا به الفيزياء الكمية، فإن النكتة القديمة التي كان يرددها الفيزيائيون من أن الكيمياء هي ببساطة فرع من الفيزياء أصبحت أكثر من نصف الحقيقة). وسنة ١٩٠٩ قام هانس جايجر Hans Geiger وإرنست مارسدن Ernest Marsden أثناء عملهم في قسم رررذرفورد بمانشستر، بإجراء تجارب وُجِّه فيها شعاع من جسيمات ألفا على شريحة رقيقة من فلز ليمر خلالها، وقد جاءت جسيمات ألفا من ذرات لها نشاط أشعاعي طبيعي؛ فلم يكن متاحًا في ذلك الوقت معجل صناعي للجسيمات. وقد حُدِّد مصير الجسيمات الموجهة على شريحة الفلز بواسطة عدادات الوميض وشاشة فلورسنتيه كانت تصدر وهجًا عندما تصطدم بها جسيمة مثل هذه. عبرت بعض الجسيمات في خط مستقيم خلال شريحة الفلز، وانحرف البعض الآخر وخرج يصنع زاوية مع الشعاع الأصلي، والمفاجأة كانت أن البعض انعكس عائدًا إلى الخلف من الشريحة في الجانب نفسه الذي تسقط منه الأشعة، فكيف يمكن حدوث ذلك؟!

جاء رذرفورد بالإجابة: كتلة كل جسيمة من جسيمات ألفا أكبر ٧٠٠٠ مرة من كتلة الإلكترون (في الحقيقة جسيمة ألفا تماثل ذرة هليوم أزيل منها إلكترونان) ويمكن أن تنتقل بسرعة تقارب سرعة الضوء، فإذا اصطدمت مثل هذه الجسيمة بأحد الإلكترونات فإنها ستزيحه جانبًا وتستمر في مسارها

دون أن تتأثر، ولا بد أن يكون سبب الحيود وجود شحنات موجبة في ذرات شريحة الفلز (تتنافر الشحنات المتشابهة)، فإذا كان نموذج البطيخة لطومسون صحيحًا لما انعكست بعض الأشعة إلى الخلف وإذا كانت كرة الشحنة الموجبة تملأ الذرة فإن جسيمات ألفا كانت ستعبر خلالها دون أن تنحرف، ولكن التجربة قد بينت أن معظم الجسيمات قد عبرت في خطوط مستقيمة خلال الشريحة، فإذا سمح نموذج البطيخة بعبور جسيمة واحدة من خلاله فلا بد أن يسمح لكل الجسيمات بذلك، فإذا تركزت كل الشحنة الموجبة في حيز دقيق جدًا وأدق كثيرًا من الذرة ككل، فإنه قد تصطدم جسيمة ألفا أحيانًا بهذا التركيز الدقيق للكتلة والشحنة وبذلك تنعكس عائدة إلى الخلف، وستمر معظم جسيمات ألفا بسرعة خلال الفراغ الموجود بين الأجزاء المشحونة شحنة موجبة في الذرات. ومثل هذا الترتيب فقط هو الذي يجعل الشحنة الموجبة للذرة تتنافر أحيانًا مع جسيمات ألفا موجبة الشحنة وتعكسها إلى الخلف، وأحيانًا تجعلها تحيد قليلًا عن مسارها الأصلي، وأحيانًا أخرى تتركها تعبر دون أي تتدخل في مسارها.

وهكذا اقترح رذرفورد سنة ١٩١١ نموذجًا جديدًا للذرة، وهو النموذج الذي أصبح الأساس في فهمنا الحديث لبنية الذرة، قال رذرفورد بضرورة وجود منطقة مركزية صغيرة في الذرة أطلق عليها النواة تحتوي على كل الشحنة الموجبة للذرة وكمية مساوية تمامًا ومضادة من شحنة سالبة في سحابة الإلكترونات التي تحيط بالنواة، وهنا تصنع النواة والإلكترونات معًا ذرة متعادلة كهربيًّا. وقد بينت التجارب فيما بعد أن حجم النواة* يبلغ جزءًا من مائة ألف جزء من حجم الذرة؛ فقطر النواة عادة نحو $١٠^{-١٣}$ سم داخل سحابة إلكترونية قطرها عادة $١٠^{-٨}$ سم، ولتصور هذه الأرقام تخيل رأس دبوس بقطر ربما يصل إلى ملليمتر واحد وموجود في منتصف (مركز) كاتدرائية سان بول ومحاط بسحابة من دقائق الغبار الميكروسكوبية تملأ قبة الكاتدرائية التي تمتد مسافة ١٠٠ متر من رأس الدبوس، يمثل رأس

* المقصود قطر النواة أصغر مائة ألف مرة من الذرة ويكون حجم النواة بذلك أصغر $١٠^{١٥}$ مرة أي ألف تريليون مرة من حجم الذرة (المترجمان).

الدبوس نواة الذرة وتمثل دقائق الغبار الحاشية من الإلكترونات. ويدل ذلك على كم الفراغ الموجود في الذرة، وقد صنعت من هذا الفراغ كل الأجسام التي تبدو لنا صلبة والتي يتماسك بعضها مع بعض بواسطة الشحنات الكهربية. (وقد حصل رذرفورد، لو نذكر، على جائزة نوبل عندما توصل إلى هذا النموذج الجديد للذرة؛ النموذج المبني على التجارب التي صممها). غير أن طريقه لم يكن قد بلغ نهايته بعد، لأنه أعلن سنة ١٩١٩ أول تحول صناعي لأحد العناصر، وفي العام نفسه خلف ج. ج. طومسون في منصب مدير معمل كافندش. وقد تم منحه لقب فارس (سنة ١٩١٤) أولًا ثم منح لقب البارون رذرفورد من نيلسون سنة ١٩٣١. ومع كل ذلك، بما في ذلك جائزة نوبل، فإن أعظم مساهماته في العلم كانت بلا شك النموذج النووي للذرة، وكان مقدرًا لهذا النموذج أن ينقل الفيزياء، ويؤدي كما حدث بالفعل إلى سؤال بادي الوضوح: بما أن الشحنات المختلفة تتجاذب فيما بينها بنفس شدة تنافر الشحنات المتشابهة، فلماذا إذن لا تسقط الإلكترونات السالبة على النواة الموجبة؟ وقد جاءت الإجابة من تحليل الطريقة التي تتداخل بها الذرات مع الضوء، بشيرًا بالعصر الآتي لنموذج نظرية الكم الأول.

الفصل الثالث

الضوء والذرات

قام اللغز الذي أثاره نموذج رذرفورد على الحقيقة المعروفة التي تنص على أن الشحنة الكهربية المتحركة بتسارع تشع طاقة على شكل إشعاع كهرومغناطيسي — ضوء، أو أي شيء من هذا القبيل، أما إذا كان الإلكترون يجلس دون حركة خارج نواة الذرة، فلا بد له من السقوط داخل هذه النواة، ولن تصبح الذرة ثابتة ومستقرة، وبانهيار الذرة فإنها لا بد أن تبعث بكمية من الطاقة مثل الانفجار، والطريقة الواضحة لمقاومة ميل الذرة للانهيار هي أن نتصور أن الإلكترونات تدور في أفلاك حول النواة، مثل الكواكب التي تدور في أفلاكها حول الشمس في مجموعتنا الشمسية، غير أن الحركة المدارية (الحركة في مدارات) تتضمن التسارع المستمر، وقد لا تتغير سرعة الجسمية التي تدور في فلكها إلا أن الاتجاه الذي تتحرك فيه يتغير، ويحدد كلٌّ من السرعة والاتجاه متجه السرعة (Velocity) وهو الأمر الذي يعنينا، ومع تغير متجه سرعة الإلكترونات فإنها لا بد أن تشع طاقة، ونتيجة فقدها للطاقة فإنها لا بد أن تسقط في مسار حلزوني إلى داخل النواة، ولم يستطع المنظرون (العلماء النظريون) أن يمنعوا انهيار ذرة رذرفورد حتى بابتكار الحركة المدارية.

وعندما نُقِّحَ هذا النموذج، بدأ النظريون من صورة الإلكترونات التي تدور في أفلاك حول النواة، وحاولوا إيجاد أي طريقة للاحتفاظ بهذه الإلكترونات في مداراتها دون أن تفقد طاقة وتنهار في مسار حلزوني إلى الداخل، ولم تكن تلك سوى نقطة بداية طبيعية تتواءم بشكل طيب مع

التشبيه الواضح بالمجموعة الشمسية، إلا أن ذلك كان خطأ، وكما سنرى فيما بعد، فإن ذلك لا يختلف عن وضع الإلكترونات لو كانت موجودة خارج النواة فقط على مسافة معينة ولا تدور حولها، والمشكلة هي نفسها: كيف نوقف سقوط الإلكترونات إلى الداخل؟ لكن الصورة التي نتحايل بها مختلفة جدًّا عن صورة الكواكب التي تدور حول الشمس، وهو أمر جيد تمامًا، وقد استخدم النظريون الحيلة نفسها لتفسير عدم سقوط الإلكترونات سواء استخدمنا التشابه مع المدارات أم لا، وهو تشابه غير ضروري ومخادع، ولا يزال معظم الناس يحتفظون بصورة معينة سواء من المدرسة أو من المقالات المبسطة، لذرة تشبه بالأحرى المجموعة الشمسية، لها نواة دقيقة في المركز وتطن حولها الإلكترونات طائرة في مدارات دائرية، وهنا المكان المناسب لنتخلص من تلك الصورة، ونحاول الاقتراب من العالم الغريب للذرة — عالم ميكانيكا الكم — بعقل متفتح، ولنفكر ببساطة في نواة وإلكترونات موجودة معًا في الفراغ، واسأل نفسك لماذا لا يتسبب التجاذب بين الشحنات الموجبة والسالبة في انهيار الذرة وإطلاق طاقة في هذه الأثناء؟

وفي هذا الوقت الذي بدأ فيه العلماء النظريون محاولاتهم لحل هذا اللغز في العقد الثاني من القرن العشرين، حدثت الاكتشافات الهامة التي كان لا بد لها أن تمنح العلماء النموذج المتطور للذرة، وقد اعتمد العلماء على دراساتهم للطريقة التي تتداخل بها المادة (الذرات) مع الإشعاع (الضوء).

وفي بداية القرن العشرين كانت أفضل وجهة نظر علمية حول العالم الطبيعي تتطلب فلسفة مزدوجة فمن الممكن وصف الأجسام المادية بمدلول الجسيمات أو الذرات، لكن الإشعاع الكهرومغناطيسي، الذي يتضمن الضوء، لا بد من وصفه بمدلول الموجات. ولذا وجد أن الطريقة التي يتداخل بها الضوء والمادة تقدم أفضل فرصة لتوحيد الفيزياء في بداية القرن العشرين، وقد حدث أثناء محاولة وصف كيفية التداخل بين الإشعاع والمادة أن تحطمت الفيزياء الكلاسيكية التي نجحت تقريبًا في كل ما سبق.

وأبسط طرق مشاهدة (حرفيًّا) الكيفية التي تتداخل بها المادة مع الإشعاع هو النظر إلى جسم ساخن؛ يشع الجسم الساخن طاقة

كهرومغناطيسية، وكلما كان الجسم أسخن أطلق طاقة أكثر، بأطوال موجات أقصر (ترددات أعلى)، وهكذا فإن عصا النار الساخنة لدرجة الاحمرار تكون أبرد من تلك الساخنة لدرجة البياض. أما عصا النار الأبرد للدرجة التي لا يشع عندها ضوء مرئي فقد تكون دافئة لأنها تبعث بالأشعة تحت الحمراء منخفضة التردد. وحتى في نهاية القرن التاسع عشر كان واضحًا حتمية ارتباط الإشعاع الكهرومغناطيسي بحركة الشحنات الكهربية الدقيقة؛ كان الإلكترون قد اكتشف حديثًا في ذلك الوقت، لكن كان من السهل رؤية الكيفية التي يتذبذب بها جزء مشحون من ذرة (الذي نعرفه الآن على أنه إلكترون) للأمام وللخلف لينتج تيارًا من الموجات الكهرومغناطيسية، التي تشبه إلى حد ما الطريقة التي يمكنك بها صنع رقرقات الماء (في الحمام) بذبذبة إصبعك للأمام وللخلف، وكانت المشكلة أن أفضل النظريات الكلاسيكية — الميكانيكا الإحصائية والكهرومغناطيسية — تتنبأ بشكل من أشكال الإشعاع مختلف جدًّا عن النوع الذي جرت ملاحظة انبعاثه من الأجسام الساخنة.

لغز الجسم الأسود

وللتوصل إلى مثل هذه التنبؤات، استخدم النظريون، كعادتهم دائما، مثالًا نموذجيًّا خياليًّا، وهو في هذه الحالة ماص أو باعث للإشعاع، ويسمى مثل هذا الجسم «بالجسم الأسود» لأنه يمتص كل الإشعاع الذي يسقط عليه، وهو اختيار غير موفق للاسم، لأنه يتضح أن الجسم الأسود هو الأكثر كفاءة في تحويل الطاقة الحرارية إلى إشعاع كهرومغناطيسي — وبنفس السهولة يمكن للجسم الأسود أن يكون ساخنًا لدرجة الاحمرار أو البياض — وبشكل ما فإن سطح الشمس هو نفسه بالأحرى يعمل مثل جسم أسود، وعلى عكس المفاهيم النموذجية للنظريين، فإن من السهل مع ذلك عمل جسم أسود في المعمل: خذ كرة مجوفة أو أنبوبة مغلقة من طرفيها، واصنع بها ثقبًا صغيرًا في جانبها، فإذا دخل أي إشعاع، كضوء مثلًا، من خلال الثقب فإنه يكون قد دخل إلى مصيدة وسينعكس ويرتد من على الجدران حتى

يُمْتَصّ، ومن المستبعد أن يرتد الشعاع ليخرج من الثقب الذي دخل منه، وبذلك فإن الثقب يصبح في الواقع جسمًا أسود، ويعطي هذا الأمر الاسم الألماني البديل إشعاع الفجوة (التجويف).

إلا أننا مهتمون أكثر بما يحدث للجسم الأسود عند تسخينه وهو مثل عصا النار فهي ستسخن أولًا ثم تتوهج محمرة أو مبيضة حسب درجة حرارته، ومن الممكن دراسة طيف الإشعاع المنبعث — كمية الإشعاع عند كل طول موجة في المعمل بملاحظة ما يصدر عن الثقب الصغير الموجود في جانب الوعاء الساخن — وقد أظهرت مثل هذه الدراسات أن ذلك يعتمد فقط على درجة حرارة الجسم الأسود، وسيكون هناك القليل جدًّا من الإشعاع عند أطوال الموجات شديدة القصر (ترددات عالية)، والقليل جدًّا عند أطوال الموجات مفرطة الطول، أما معظم الطاقة المشعة فستقع في حزمة متوسطة من الترددات، وتزاح النهاية العظمى للطيف تجاه أطوال موجات أقصر كلما صار الجسم أسخن (من تحت الحمراء إلى الحمراء فالزرقاء ففوق البنفسجية). لكن لوحظ دائمًا وجود انقطاع في الطيف عند أطوال الموجات القصيرة جدًّا وهذا ما جعل قياسات إشعاع الجسم الأسود التي جرت في القرن التاسع عشر تتعارض مع النظرية.

وللغرابة، فإن أفضل التنبؤات تبعًا للنظرية الكلاسيكية، تؤكد أن التجويف المملوء بالإشعاع لا بد أن يحتوي على كمية لانهائية من الطاقة عند أقصر طول موجة، بدلًا من النهاية العظمى في طيف الجسم الأسود والانخفاض إلى الصفر عند طول موجة مساو للصفر، كان لا بد للقياسات أن تظهر عند طول موجة مساو للصفر ارتفاعًا خارج المقياس عند الطرف الخاص بالموجات القصيرة، وقد جاءت الحسابات من الافتراض الذي يبدو طبيعيًّا بأن موجات الإشعاع الكهرومغناطيسي في التجويف من الممكن التعامل معها بالطريقة نفسها مثل موجات الوتر، كأوتار الكمان، وأنه من الممكن أن توجد موجات من جميع الأحجام — أي طول موجة أو أي تردد — ولأن هناك الكثير جدًّا من أطوال الموجات (أنماط كثيرة من التذبذب) للتعامل معها، ولا بد من تطبيق قوانين الميكانيكا الإحصائية

باستعادتها من عالم الجسيمات إلى عالم الموجات للتنبؤ بالمظهر العام للإشعاع من التجويف، الأمر الذي يؤدي مباشرة إلى استنتاج أن الطاقة المشعة عند أي تردد تتناسب طرديًّا مع ذلك التردد، والتردد هو معكوس طول الموجة، وبذا فأطوال الموجات القصيرة جدًّا لها ترددات عالية، وعليه فإن كل إشعاعات الجسم الأسود لا بد أن تنتج كميات مهولة من الطاقة عالية التردد في المنطقة فوق البنفسجية وما بعدها؛ فكلما زاد التردد زادت الطاقة، ويطلق على هذا التنبؤ «الكارثة فوق البنفسجية»، وهى تظهر أنه لا بد من وجود خطأ ما في الافتراضات التي بنيت عليها هذه التنبؤات.

غير أنه ليس كل شيء خطأ، فعلى الجانب الخاص بالترددات المنخفضة في منحنى الجسم الأسود، تتفق المشاهدات بصورة جيدة جدًّا مع التنبؤات القائمة على النظرية الكلاسيكية، والمعروفة باسم قانون رايلى-جنيز Rayleigh-Jeans Law، وعلى الأقل تعتبر النظرية الكلاسيكية نصف صحيحة، ويكمن اللغز في السبب في أن طاقة التذبذب عند الترددات العالية ليست كبيرة، لكنها في الواقع تنقطع وتصبح صفرًا عندما تزداد ترددات الإشعاع.

وقد اجتذب هذا اللغز اهتمام كثير من الفيزيائيين في العقد الأخير للقرن التاسع عشر، وكان أحد هؤلاء الفيزيائيين هو ماكس بلانك Max Planck، عالم ألماني من المدرسة القديمة، كان بلانك في داخله محافظًا علميًّا وليس ثوريًّا ويعمل بعناية وجدية شديدة، وكان اهتمامه الخاص ينصب على الديناميكا الحرارية، وكان أمله الأكبر في ذلك الوقت أن يحل الكارثة فوق البنفسجية بتطبيق قواعد الديناميكا الحرارية، وفي أواخر العقد الأخير من القرن التاسع عشر كانت هناك معادلتان تقريبيتان، ومن المعروف أنهما يقدمان فيما بينهما تمثيلًا غير دقيق لطيف الجسم الأسود، وكانت نسخة مبكرة من قانون رايلى-جينز تعمل عند الموجات الطويلة، وكان ويلهلم فاين Wilhelm Wien قد طور صيغة تناسب تقريبًا المشاهدات عند الموجات القصيرة، وتنبأ أيضًا بطول الموجة التي تقع عندها النهاية العظمى في المنحنى عند أي درجة حرارة. بدأ بلانك بمتابعة الكيفية التي يشع بها

المذبذب الكهربي الصغير وميض الموجات الكهرومغناطيسية، وهي طريقة تختلف عما اتبعه رايلي في بداية القرن العشرين وجينز بعده بقليل، لكنها كانت الطريقة التي ينتج عنها بالضبط المنحنى القياسي الكامل بما في ذلك الكارثة فوق البنفسجية، وقد عمل بلانك من سنة ١٨٩٥ وحتى سنة ١٩٠٠ على هذه المشكلة ونشر عددًا من المقالات البحثية المؤثرة التي أرست العلاقة بين الديناميكا الحرارية والكهربية الديناميكية، لكنه لم يحل بعد لغز طيف الجسم الأسود. وسنة ١٩٠٠ أنجز فتحًا وتقدمًا مفاجئًا في الموضوع، ولم يكن ذلك نتيجة تفكير وبصيرة علمية هادئة ورائعة بل جاء ذلك نتيجة مزيج يائس من الحظ والبصيرة مع توفيق في الفهم الخاطئ لواحدة من الأدوات الرياضية التي استخدمها.

وطبيعي ألا يستطيع أحد اليوم أن يتأكد بصورة جازمة عما دار في ذهن بلانك عندما اتخذ الخطوة الثورية التي أدت إلى ظهور ميكانيكا الكم، لكن قام مارتن كلاين Martin Klein المؤرخ المتخصص في تاريخ الفيزياء، ودراسة أعمال بلانك بالتفصيل في الفترة التي شهدت مولد نظرية الكم. ويُعد إعادة ترتيب الأدوار التي لعبها بلانك وأينشتاين في هذا الميلاد تقريرًا موثقًا أصيلًا كأفضل ما يمكن الحصول عليه، وهو يضع الاكتشافات نفسها في سياقها التاريخى، ولا تدين أول خطوة اتخذت في نهاية صيف سنة ١٩٠٠ للحظ بأي شيء، لكنها جاءت فقط نتيجة بصيرة عالم فيزياء ورياضيات قد تدرب جيدًا؛ فقد أيقن بلانك أن الوصفين غير الكاملين لطيف الجسم الأسود يمكن ضمهما في صيغة رياضية واحدة بسيطة تصف شكل المنحنى كله، في الواقع استخدم القليل من الخداع الرياضي ليعبر الفجوة بين الصيغتين: قانون فاين وقانون رايلي-جنيز وكان ذلك نجاحًا كبيرًا. فقد توافقت معادلة بلانك بصورة رائعة مع مشاهدات إشعاع التجويف، لكنها على خلاف نصفي القانونين اللذين جاءت منهما، فإنها لا تقوم على أساس فيزيائي، وقد حاول كل من فاين ورايلى — بل وحتى بلانك في السنوات الأربع الأخيرة — بناء نظرية ابتداء من افتراضات فيزيائية محسوسة ليصلوا في النهاية إلى منحنى الجسم الأسود، والآن قام بلانك

بسحب المنحنى المضبوط من قبعته ولم يعرف أحد أي افتراضات فيزيائية كانت «تنتمي» لهذا المنحنى، وقد اتضح أنها لم تكن محسوسة بصورة جيدة على الإطلاق.

ثورة ليست موضع ترحيب

أُعلن عن معادلة بلانك في اجتماع للجمعية الفيزيائية في برلين في أكتوبر/تشرين الأول ١٩٠٠، وعلى مدى الشهرين التاليين أغرق بلانك نفسه في مشكلة إيجاد أساس فيزيائي للقانون، محاولاً ذلك بتشابك افتراضات فيزيائية مختلفة ليرى أيها يناسب المعادلات الرياضية، وقد صرح فيما بعد بأن هذه الفترة كانت أكثر الفترات بذلًا للجهد والعمل في حياته كلها، وقد فشلت محاولاته العديدة إلى أن أصبح بلانك أخيرًا أمام بديل واحد فقط لا يلقى ترحيبًا عنده.

وقد وصفتُ بلانك على أنه فيزيائي من المدرسة القديمة، وكان كذلك بالفعل؛ فقد كان في أبحاثه المبكرة يكره تقبل الفرضية الجزيئية، وكان يكره على وجه الخصوص فكرة التفسير الإحصائي للخاصية المسماة أنتروبيه (Entropy)، وهى تفسير أدخله بولتزمان في علم الديناميكا الحرارية، والأنتروبيه دالة حاكمة في الفيزياء، وتتعلق في أساسها بعملية سريان الزمن، ومع أن القوانين البسيطة للميكانيكا — قوانين نيوتن — انعكاسية تمامًا إذا اعتبرنا الزمن، إلا أننا نعلم أن العالم الحقيقي ليس بهذا الشكل؛ فكر في إسقاط حجر على الأرض، فعندما يصطدم الحجر بالأرض تتحول طاقة حركته إلى حرارة، لكن إذا وضعنا حجرًا مماثلًا على الأرض وسخناه بنفس المقدار، فإنه لن يقفز في الهواء، ولماذا لا يقفز؟ في حالة الحجر الذي يسقط على الأرض تتحول صورة مرتبة من الحركة (كل الذرات والجزيئات تسقط في نفس الاتجاه) إلى صورة غير مرتبة (عديمة الترتيب) من الحركة (كل الذرات والجزيئات تتدافع بعضها مع بعض بطاقة عشوائية). ويتفق ذلك مع أحد قوانين الطبيعة الذي يبدو أنه يتطلب أن يزداد عدم الترتيب

باستمرار، ويعرف عدم الترتيب في هذا المعنى بالأنتروبيه، والقانون هو القانون الثاني للديناميكا الحرارية، وينص على أن العمليات الطبيعية تتجه دائمًا نحو زيادة عدم الترتيب، أو تزداد الأنتروبيه باستمرار، فإذا وضعت طاقة حرارية عديمة الترتيب في حجر، فإنه في هذه الحالة لا يستطيع استخدام هذه الطاقة ليخلق حركة مرتبة لكل الجزئيات في الحجر لتقفز جميعها إلى أعلى معًا.

أم ترى من الممكن ذلك؟ أدخل بولتزمان أحد التنويعات في هذا الموضوع. قال بولتزمان إن مثل هذا الحدث المتميز قد يحدث، لكنه بعيد الاحتمال جدًّا، وبالطريقة نفسها، وكنتيجة للحركة العشوائية لجزيئات الهواء، فمن الممكن أن يتركز كل هواء الغرفة فجأة في الأركان (لا بد أن يوجد أكثر من ركن لأن الجزئيات تتحرك في فراغ ثلاثي الأبعاد)، لكن حدوث ذلك أمر بعيد الاحتمال جدًّا هو الآخر، لدرجة أنه يمكن إهماله في الأمور العملية. كان بلانك يجادل طويلًا وبعنف ضد هذا التفسير الإحصائي للقانون الثاني للديناميكا الحرارية، علنًا وفي مراسلاته مع بولتزمان؛ فقد كان القانون الثاني بالنسبة إليه قانونًا مطلقًا، ولا بد أن تزداد الأنتروبيه، بلا تدخل من الاحتمالات في ذلك، لذلك من السهل أن ندرك كيف أحس بلانك قرب نهاية العقد الأول من القرن العشرين عندما استهلك كل الاحتمالات، ثم حاول على مضض أن يقحم نسخة بولتزمان المعدلة إحصائيًّا للديناميكا الحرارية في حساباته لطيف الجسم الأسود، وتبين له أنها تصلح لذلك. ويزداد الوضع مع ذلك سخرية وإثارة عندما نعرف الحقيقة؛ فلأن بلانك ليس معتادًا على معادلات بولتزمان، فإنه طَبَّقَ بطريقة غير منتظمة فحصل بلانك على الإجابة الصحيحة، لكن بطريق الخطأ، ولم تتضح قيمة ومغزى أبحاث بلانك إلا على يد أينشتاين الذي تولى توضيح الفكرة.

ومن الأمور التي تستحق التأكيد عليها الخطوة الكبرى للأمام في العلوم التي خطاها بلانك ليرسي تفسير بولتزمان الإحصائي لزيادة الأنتروبيه كأفضل وصف للواقع، وتبعًا لأعمال بلانك، لا يمكن في الواقع الشك أبدًا أن الأنتروبيه تزداد، وهي عالية الاحتمال لكنها لا يمكن أن تؤخذ كيقين مطلق، ولهذا الأمر

تضمين مهم في علم الكون، وهو علم دراسة العالم ككل، حيث نتعامل مع امتدادات شاسعة للزمان والفضاء؛ فكلما اتسع النطاق الذي نتعامل معه زادت فرص حدوث الأشياء بعيدة الاحتمال في موقع ما وفي زمن ما داخل هذا النطاق، بل إنه حتى من المحتمل (مع أن ذلك لا يزال بعيد الاحتمال) أن يمثل العالم كله، وهو مكان مرتب على العموم نوعًا من التأرجحات الإحصائية الديناميكية الحرارية في غاية الضخامة، مثل فُوَاق (زُغُطّة) نادر جدًا، أدى إلى نشوء منطقة منخفضة الأنتروبية، وهى تندفع الآن إلى أسفل، وقد أوضح «خطأ» بلانك مع ذلك، أمرًا ما من أكثر الأمور في طبيعة العالم.

تضمنت معالجة بولتزمان الإحصائية للديناميكا الحرارية تقطيع الطاقة إلى قطع صغيرة رياضيًّا، والتعامل مع هذه القطع على أنها كميات حقيقية يمكن التعامل معها بواسطة معادلات الاحتمالات، ويجب إعادة تجميع قطع الطاقة التي قُطِّعَت قبل هذا الجزء من الحسابات، (أو تكاملها) في مرحلة متأخرة للحصول على الطاقة الكلية؛ الطاقة المقابلة لإشعاع الجسم الأسود في هذه الحالة، وفي منتصف الطريق أثناء هذه الإجراءات أيقن بلانك أنه قد حصل بالفعل على الصيغة الرياضية التي كان يبحث عنها، وقبل أن يصل إلى مرحلة تكامل قطع الطاقة ليحصل على الطاقة الكلية المستمرة، كانت معادلة الجسم الأسود هناك قابعة في الرياضيات، وهكذا أخذها بلانك، وكانت تلك خطوة عنيفة وغير مبررة بالمرة في سياق الفيزياء الكلاسيكية.

ولو بدأ أي عالم فيزيائي كلاسيكي جيد المستوى بمعادلات بولتزمان ليتوصل إلى صيغة لإشعاع الجسم الأسود لكان قد أتم التكامل، وعندئذ، كما بين أينشتاين فيما بعد، فإن إضافة قطع الطاقة إلى بعضها كان سيؤدي إلى استعادة الكارثة فوق البنفسجية فعلاً، وأشار أينشتاين إلى أن أي تعامل كلاسيكي مع المشكلة سيؤدي حتمًا إلى هذه الكارثة، ولأن بلانك فقط كان يعرف الإجابة التي يبحث عنها، فقد كان قادرًا على إيقاف الحل الكامل، الذي بدأ سليمًا كحل كلاسيكي للمعادلة، قبل نهايته. ونتيجة لذلك وجد نفسه وحيدًا مع قطع من الطاقة لا بد من تفسير لها، وقد فسر بلانك هذا التقسيم الظاهر للطاقة الكهرومغناطيسية إلى قطع مفردة بأن المذبذب

الكهربي داخل الذرة يستطيع أن يبعث أو يمتص الطاقة على شكل قطع من أحجام معينة، تسمى الكوانتا (الكم)، وبدلًا من تقسيم الكمية المتاحة من الطاقة بعدد لانهائي من الطرق، فإنها يمكن أن تقسم فقط إلى عدد محدد من القطع بين المذبذات وأن طاقة قطعة مثل هذه (E) لا بد أن تعتمد على ترددها (ويرمز له بالحرف الإغريقي نيو ν) تبعا للصيغة الجديدة

$$E = h\nu,$$

حيث h ثابت جديد يسمى الآن ثابت بلانك.

ما هو h؟

من السهل رؤية الكيفية التي حلت بها هذه المعالجة الكارثة فوق البنفسجية؛ عند الترددات المرتفعة جدًّا، تكون الطاقة اللازمة لإطلاق كوانتم واحد من الإشعاع كبيرة جدًّا، ولن يملك مثل هذه الطاقة الكبيرة إلا عدد قليل من المذبذبات (تبعًا للمعادلات الإحصائية) وبذلك لن يبعث إلا بعدد قليل من الكوانتات عالية الطاقة، أما عند الترددات المنخفضة جدًّا (أطوال الموجات الطويلة) فتنبعث أعداد كبيرة من الكوانتات منخفضة الطاقة، ولأن كل واحد منها لا يملك إلا طاقة ضئيلة للغاية فإن مجموعها إذا أضيف بعضها إلى بعض لا يبلغ قيمة تذكر، ولا توجد أعداد وفيرة في المذبذبات إلا في المدى الأوسط من الترددات، وهى تملك بذلك طاقة كافية تسمح لها ببث قطع متوسطة الحجم منها والتي يضاف بعضها لبعض لينتج عنها النهاية العظمى الموجودة على منحنى الجسم الأسود.

غير أن إعلان اكتشاف بلانك سنة ١٩٠٠ قد آثار من الأسئلة أكثر مما أجاب عنه، وفشل في إشعال وإثارة عالم الفيزياء حينئذ، وليست المقالات العلمية المبكرة الخاصة ببلانك عن نظرية الكم نموذجية في الوضوح (وربما تعكس الطريقة المضطربة التي أجبر على إقحامها في الديناميكا الحرارية المحببة له). وعلى مدى فترة طويلة كان كثير من الفيزيائيين، بل معظمهم — الذين على علم بأبحاثه — ينظرون إليها على أنها ببساطة حيلة

رياضية، وترتيب معين للتخلص من الكارثة فوق البنفسجية، وليس لها سوى القليل من المغزى الفيزيائي، بل حتى ليس لها منه شيء، وبالتأكيد كان بلانك نفسه مشوشًا، وقد كتب في أحد خطاباته إلى روبرت وليم وود (Robert William Wood) سنة ١٩٣١ ملقيًا نظرة على أعماله سنة ١٩٠٠ قائلًا: «يمكن أن أشخص كل العملية على أنها عمل يائس ... ولا بد من إيجاد تفسير نظري بأي ثمن،* مهما كان هذا الثمن.» لكنه كان يعلم أنه قد تعثر في شيء ذي مغزى، وتبعًا لهايزنبرج فإن ابن بلانك قد أخبره أن والده وصف له عمله في تلك الفترة وشرح له كيف أن هذا الاكتشاف قد يرقى لمرتبة اكتشافات نيوتن،† وذلك أثناء تجولهما طويلًا في جرونولد من ضواحي برلين.

انشغل الفيزيائيون في العقد الأول من القرن العشرين في استيعاب الاكتشافات الجديدة التي تضمنت الإشعاع الذري ولا يبدو أن «الحيلة الرياضية» الجديدة لبلانك في تفسير منحنى الجسم الأسود كانت ذات أهمية طاغية مقارنة بهذه الاكتشافات، وقد استغرق الأمر حتى سنة ١٩١٨ ليحصل بلانك على جائزة نوبل عن أبحاثه، وهى فترة طويلة إذا قورنت بالسرعة التي جرى الاعتراف فيها بأعمال آل كوري ورذرفورد. (يرجع ذلك جزئيًّا لأن الاعتراف بالتقدم النظري المفاجئ والعاصف يستغرق وقتًا أطول، فالنظرية الجديدة ليست محسوسة مثل جسيمة جديدة، أو أشعة X، وعليها أن تواجه اختبار الزمن والتجارب التأكيدية قبل أن تحصل على الاعتراف الكامل.) وهناك كذلك شيء ما غير عادي لثابت بلانك الجديد h. فهو ثابت صغير جدًّا ٦,٦ × ١٠$^{-٣٤}$ جول ثانية، ولا يمثل ذلك أي لغز لأنه لو كان أكبر كثيرًا لجرى التعرف عليه قبل أن يبدأ الفيزيائيون في حل لغز إشعاع الجسم الأسود بمدة طويلة. كلا، والغريب في الأمر أن وحدات قياس h هي الطاقة (بالإرج ergs) مضروبة في الزمن (بالثواني). وتسمى مثل هذه الوحدات الفعل أو الأثر Actions، ولم تكن سمة عادية من سمات

* استشهد بها ميهرا وريتشنبرج (Mehra & Rechenberg) الجزء الأول.

† راجع الفيزياء والفلسفة Physics and philosophy، صفحة ٣٥.

الميكانيكا الكلاسيكية؛ فليس هناك «قانون الحفاظ على الفعل» ليقف على قدم المساواة مع قانون الحفاظ على الكتلة أو الطاقة، لكن للفعل خاصية مثيرة بالذات، وهي مشتركة ضمن أشياء أخرى، مع خاصية الأنتروبية. فالفعل الثابت هو ثابت مطلق وله نفس الحجم لكل المشاهدين في الزمان والمكان، وهو ثابت رباعي الأبعاد، ولم يتضح مغزى ذلك إلا عندما كشف أينشتاين النقاب عن نظريته النسبية فقط.

وحيث إن أينشتاين هو اللاعب التالي الذي سيدخل إلى مسرح ميكانيكا الكم، فقد يستحق الأمر أن نتحول قليلًا إليه لنرى ما الذي يعنيه ذلك. تتعامل نظرية النسبية الخاصة مع ثلاثة أبعاد فضائية وبعد واحد زماني ككل رباعي الأبعاد، ويقع المشاهدون الذين يتحركون في الفضاء بسرعات مختلفة على مناظر مختلفة للأشياء وهم لن يتفقوا مثلًا على طول عصا يقيسونه أثناء عبورها بجوارهم، ويمكن تخيل أن العصا موجودة في أربعة أبعاد، وتتحرك «خلال» الزمن لتصنع سطحًا لمستطيل فائق ارتفاعه طول العصا وعرضه كمية الزمن الذي قطعته، و«مساحة» هذا المستطيل تقاس بوحدات الطول × الزمن، وستصبح المساحة هي نفسها لجميع المشاهدين الذين يقيسونها، مع اختلافهم حول قيم الطول والزمن، وبالطريقة نفسها فإن الفعل (الطاقة × الزمن) هو مكافئ رباعي الأبعاد من الطاقة، ويكون الفعل هو نفسه لكل المشاهدين حتى وإن اختلفوا حول حجم الطاقة والزمن المكونين للفعل، وهناك قانون للحفاظ على الفعل في النسبية الخاصة، وهو في أهمية قانون الحفاظ على الطاقة تمامًا، وكان ثابت بلانك فقط هو الذي يبدو غريبًا لأنه اكتشف قبل النظرية النسبية.

وربما يؤكد ذلك على الطبيعة الشاملة للفيزياء، وتبدو النسبية الخاصة مختلفة بين المساهمات العلمية الثلاث لأينشتاين والمنشورة سنة ١٩٠٥ وهى عن الحركة البراونية والظاهرة الفوتوكهربية. لكن كلها ترتبط معًا بإطار من الفيزياء النظرية، ومع ذيوع الصيت الذي جلبته النظرية النسبية فإن أعظم مساهمات أينشتاين العلمية هي أبحاثه حول نظرية الكم التي خرجت من أبحاث بلانك عن طريق الظاهرة الفوتوكهربية.

كانت السمة الثورية لأبحاث بلانك سنة ١٩٠٠ هي أنها أظهرت قصور الفيزياء الكلاسيكية، وليس مهمًّا بالضبط ما هي أوجه القصور، ومجرد حقيقة وجود ظواهر لا يمكن تفسيرها بأفكار مبنية على أعمال نيوتن فقط كانت كافية للتبشير بعصر جديد في الفيزياء. كانت الصورة الأصلية لأبحاث بلانك، مع ذلك محددة أكثر كثيرًا مما تبدو عليه في الكتابات الحديثة، وهناك مدرسة في كتابة المغامرات تجعل البطل يفلت من المواقف التي تحبس الأنفاس في نهاية كل حلقة بشكل إعجازي، فيما يمكن إيجازه في العبارة: «تحرر جاك بقفزة واحدة.» ويمكن قراءة مولد ميكانيكا الكم في العديد من الكتابات العلمية على أنها قفزة واحدة لجاك؛ «وصلت الفيزياء الكلاسيكية في نهاية القرن التاسع عشر إلى طريق مسدود (في مواجهة الجدار). وفي قفزة واحدة اخترع بلانك الكم، وتحررت الفيزياء.» لكن بعيدًا عن ذلك لم يقترح بلانك سوى أن المذبذبات الكهربية داخل الذرة قد تكون مكنتمة فقط، وكان يعنى بذلك أن هذه المذبذبات تستطيع أن تبعث فقط بحزم من الطاقة ذات أحجام معينة، لأن هناك شيئًا بداخلها يمنعها من امتصاص أو إشعاع كميات من الإشعاع، «بين تلك الكميات».

ويعمل الصراف الآلي في البنك الذي أتعامل معه في لندن بالطريقة نفسها تقريبًا؛ فعندما أدخل بطاقة الصرف ستناولني الماكينة أي مبلغ أرغب فيه، بشرط أن يكون من مضاعفات ٥ جنيهات وليس كميات فيما بين ذلك (ولا يستطيع منح ما هو أقل من ٥ جنيهات استرليني)، ولا يعني ذلك أن القيم البينية مثل ٨,٤٧ جنيهًا استرليني لا توجد. ولذا فإن بلانك نفسه لم يقترح أن الإشعاع مكنتم، وكان يبدو دائما أنه على حذر من التضمينات الأعمق لنظرية الكم. وفي السنوات التالية، ومع تقدم نظرية الكم ساهم بلانك في العلم الذي أسسه، لكنه أنفق معظم حياته العلمية محاولًا التوفيق بين الأفكار الجديدة والفيزياء الكلاسيكية، ولم يكن الأمر أنه قد غير رأيه، لكنه لم يعترف أبدًا، في المقام الأول، بمدى ابتعاد معادلة الجسم الأسود عن الفيزياء الكلاسيكية؛ فقد توصل إلى المعادلة عن طريق

تزاوج الديناميكا الحرارية مع الديناميكا الكهربية، وكلاهما من النظريات الكلاسيكية. وبدلًا من اعتناق مذهب آخر كانت جهود بلانك لإيجاد مكان وسط بين أفكار الكوانتم والنظريات الكلاسيكية، تمثل في الواقع حيودًا مدويًّا، بالنسبة إليه، بعيدًا عن الأفكار الكلاسيكية التي شب عليها، غير أن أساسياته في الأفكار الكلاسيكية كانت شاملة للدرجة التي لا يفاجئنا فيها أن التقدم الحقيقي قد تم على يد جيل جديد من الفيزيائيين الذين لم يتوطد موقفهم بعد والذين هم أقل التزامًا بالأفكار القديمة، والذين اشتعل حماسهم بالاكتشافات الجديدة في الإشعاع الذري وكانوا يبحثون عن إجابات جديدة لكل من الأسئلة القديمة والأسئلة الجديدة.

أينشتاين والضوء والكوانتا

كان أينشتاين في الواحد والعشرين من عمره في مارس/آذار سنة ١٩٠٠. وقد تقلد وظيفته الشهيرة في مكتب الاختراعات السويسري في صيف سنة ١٩٠٢، وقد كرس معظم اهتماماته العلمية في تلك السنوات الأولى من القرن العشرين لمشاكل الديناميكا الحرارية والميكانيكا الإحصائية، وكانت أولى المقالات (العلمية) المنشورة له تقليدية في الأسلوب وفي المسائل التي عالجتها، كما هو الحال في الجيل السابق بمن في ذلك بلانك؛ فنجد أنه في أول بحث نشره وأشار فيه إلى أفكار بلانك حول طيف الجسم الأسود (نشر سنة ١٩٠٤)، قام أينشتاين بتمهيد أرض جديدة وطور أسلوبًا لحل الألغاز الفيزيائية خاصًا به وحده، ويضيف كلاين كيف أن أينشتاين كان أول شخص يأخذ التضمينات الفيزيائية لأبحاث بلانك بجدية ويتعامل معها على أنها أكثر من حيلة رياضية،* وقد أدى تقبل المعادلات على أن لها أساسًا في

* راجع مساهمات كلاين في «بعض الغرابة في التناسب» (Some Strangeness in the proportion) تحرير هاري وولف وفي الجزء نفسه يذهب توماس كوهن من MIT أبعد من معظم المسئولين الذين دفعوا بأن بلانك «لم يكن لديه مفهوم عن تقطيع طيف الطاقة عندما قدم أول إثبات لقانون التوزيع للجسم الأسود»، وكان أول من رحب بـ«الدور الأساسي للكنتمة في نظرية الجسم الأسود» يقول كوهين إن «أينشتاين بالأحرى وليس بلانك هو أول من كنتم مذبذب بلانك.» ويمكننا ترك هذا الجدل للأكاديميين، إلا أنه لا شك في أن مساهمات أينشتاين كانت في غاية الفعالية في تطوير نظرية الكم.

الواقع الفيزيائي، خلال عام واحد، إلى بصيرة درامية جديدة، وهى إعادة إحياء نظرية الجسيمات للضوء.

والنقطة الثانية التي كانت قفزة سنة ١٩٠٤ مثل أعمال بلانك، هي دراسة الظاهرة الفوتوكهربية بواسطة فيليب لينارد (Phillip Lenard) وج. ج. طومسون (J. J. Thomson)، اللذين عملا مستقلين أحدهما عن الآخر في نهاية القرن التاسع عشر. ولد لينارد سنة ١٨٦٢ في الجزء من المجر الذي أصبح الآن في تشيكوسلوفاكيا وحصل على جائزة نوبل في الفيزياء سنة ١٩٠٥ عن أبحاثه على أشعة الكاثود، وقد أثبت أثناء هذه الأبحاث سنة ١٨٩٩ أن أشعة الكاثود (الإلكترونات) يمكن أن تتولد بسقوط الضوء على سطح فلز في الفراغ، وتتسبب طاقة الضوء بطريقة أو بأخرى في جعل الإلكترونات تقفز خارج الفلز.

تضمنت تجارب لينارد استخدام أشعة ضوء أحادي اللون (مونوكروماتي Monochromatic)، بمعنى أن كل موجات الضوء لها التردد نفسه، وقد فحص الكيفية التي تؤثر بها شدة الضوء على الطريقة التي تنطلق بها الإلكترونات خارج الفلز، ووجد نتيجة مفاجئة؛ باستخدام ضوء أشد إضاءة (كان في الواقع يحرك مصدر الضوء ليقترب أكثر من سطح الفلز ليحدث التأثير نفسه) تسقط طاقة أكثر على كل سنتيمتر مربع من سطح الفلز، وإذا امتص الإلكترون طاقة أكثر فإنه سينطلق خارجًا من الفلز طائرًا بسرعة أكبر، غير أن لينارد قد اكتشف أنه مادام طول الموجة يظل ثابتًا فإن الإلكترونات تنطلق بالسرعة نفسها وبتحريك مصدر الضوء أقرب إلى الفلز ينطلق عدد أكبر من الإلكترونات، لكن انطلاق كل إلكترون منها سيحدث بالسرعة نفسها التي تنطلق بها الإلكترونات نتيجة سقوط شعاع ضوء أضعف لكن من اللون نفسه، ومن جهة أخرى تتحرك الإلكترونات أسرع عندما يستخدم شعاع ضوء ذو تردد أعلى — من الأشعة فوق البنفسجية مثلًا — بدلًا من الأشعة الزرقاء أو الحمراء.

وتوجد طريقة بسيطة جدًا لشرح ذلك، بشرط أن تكون مستعدًّا لأن تهجر أفكار الفيزياء الكلاسيكية المتأصلة فيك، وأن تأخذ معادلات بلانك

على أنها ذات معنى فيزيائي شامل، وتتضح أهمية هذه الشروط من حقيقة أنه لم يتخذ أي شخص هذه الخطوة التي تبدو بسيطة على مدى السنوات الخمس التي أعقبت أبحاث لينارد الأولى على الظاهرة الفوتوكهربية وتقديم بلانك لمفهوم الكوانتم، وحقيقة كان كل ما فعله أينشتاين هو تطبيق المعادلة $E = h\nu$ على الإشعاع الكهرومغناطيسي، بدلًا من تطبيقها على المذبذبات الصغرى داخل الذرة، قال أينشتاين أن الضوء ليس موجة مستمرة — كما كان يعتقد العلماء على مدى مائة سنة — وبدلًا من ذلك يجيء في حزم محددة أو كوانتات، ويجيء كل الضوء ذو التردد المحدد ν، أي الذي له لون محدد في حزم لها الطاقة نفسها E، وفي كل مرة يصطدم فيها واحد من هذه الكوانتات بإلكترون، تمنحه الكمية نفسها من الطاقة والسرعة نفسها ويعني الضوء الأكثر شدة أن هناك المزيد من الكوانتات الضوئية (وندعوها اليوم فوتونات) لها جميعًا الطاقة نفسها، لكن تغيير لون الضوء يغير من ترددها، وهكذا يغير من كمية الطاقة التي يحملها كل فوتون.

كان ذلك هو البحث الذي حصل بموجبه أينشتاين في النهاية على جائزة نوبل سنة ١٩٢١. ومرة أخرى، كان لا بد للإنجاز النظري أن ينتظر الاعتراف الكامل به، ولم تكتسب فكرة الفوتونات تقبلًا لحظيًّا، ومع أن تجارب لينارد اتفقت مع النظرية بشكل عام، فإن الأمر قد استغرق أكثر من عقد للتنبؤ الدقيق بالعلاقة بين سرعة الإلكترونات وطول موجة الضوء واختبارها وإثباتها. وقد أنجز التجريبي الأمريكي روبرت ميليكان Robert Millikan ذلك، وهو الذي أرسى طريقة في غاية الدقة لقياس قيمة h، ثابت بلانك، وقد حصل ميليكان سنة ١٩٢٣ على جائزة نوبل في الفيزياء عن هذه الأبحاث ولدقة قياساته لشحنة الإلكترون.

وهكذا انشغل أينشتاين عامًا كاملًا فهناك البحث الذي أدى إلى جائزة نوبل، وبحث آخر أكد للجميع في النهاية واقعية الذرات، وبحث ثالث شهد ميلاد النظرية التي أصبح يعرف بها أينشتاين؛ النسبية. وفي الوقت نفسه من عام ١٩٠٥، وبشكل طارئ كان أينشتاين على وشك استكمال قطعة صغيرة أخرى من أبحاثه تتعلق بحجم الجزيئات، التي قدمها لنيل الدكتوراه

من جامعة زيوريخ، وقد منح درجة الدكتوراه سنة ١٩٠٦، ومع أن درجة الدكتوراه لم تكن هي مفتاح الحياة العلمية الفعالة كما هو الحال اليوم، إلا أنه من الملفت للنظر أن الأبحاث الثلاثة التي نشرت سنة ١٩٠٥ قد نشرها رجل لم يكن يستطيع التوقيع في ذلك الوقت إلا بلقب مستر ألبرت أينشتاين.

استمر أينشتاين في السنوات القليلة التالية في العمل على دمج نظرية الكوانتم لبلانك في مجالات أخرى من الفيزياء، وقد وجد أن الفكرة تشرح (تفسر) الألغاز التي صمدت طويلًا والمتعلقة بنظرية الحرارة النوعية (الحرارة النوعية لمادة ما هي كمية الحرارة المطلوبة لرفع درجة حرارة كمية ثابتة من المادة درجة حرارة واحدة تُخْتار، وهى تعتمد على الطريقة التي تتذبذب بها الذرات داخل المادة، وقد اتضح أن هذه الذبذبات مكنتمة). وهذه المنطقة من أعمال أينشتاين هي الأقل إثارة وسحرًا، وعادة ما تغفل عنها الكتابات التي تتناول أبحاث أينشتاين، إلا أن نظرية الكم للمادة قد حظيت بالقبول أسرع كثيرًا من نظرية أينشتاين المماثلة للإشعاع وبدأت تقنع الكثير من الفيزيائيين من أتباع المدرسة القديمة بأنه يجب أخذ الأفكار الكمية بجدية، قام أينشتاين بتنقيح أفكاره حول الإشعاع الكمي على مدى السنوات التالية وحتى سنة ١٩١١، وأرسى فكرة أن البنية الكمية للضوء تضمين حتمي لمعادلة بلانك، وأشار أثناء ذلك إلى عالم علمي لم يتفتح بعد يضم فهمًا أفضل للضوء على أساس دمج نظريتي الموجات والجسيمات اللتين عاشتا جنبًا إلى جنب منذ القرن السابع عشر، وفي عام ١٩١١ تحولت أفكاره ناحية أمور أخرى؛ فقد أقنع نفسه بحقيقة الكوانتا، ولم يكن يهمه سوى أفكاره الشخصية. كانت مشكلة الجاذبية هي اهتمامه الجديد، وعلى مدى السنوات الخمس التالية حتى سنة ١٩١٦ طور نظريته: النظرية النسبية العامة، أعظم أعماله على الإطلاق، وقد استغرق الأمر حتى سنة ١٩٢٣ لإرساء واقعية الطبيعة الكمية للضوء دون أي شك، وقد أدى ذلك بدوره إلى جدال جديد حول الجسيمات والموجات، وقد ساعد ذلك في تحويل نظرية الكم والأخذ بيدها لتصبح النسخة الحديثة، ميكانيكا الكم، وقد حلت

كثير من تلك الأفكار محل القديمة. جاء أول ازدهار لنظرية الكم في العقد الذي أدار فيه أينشتاين وجهه عن الموضوع وركز اهتماماته على أمور أخرى، وقد جاء هذا الازدهار من دمج هذه الأفكار مع نموذج رذرفورد للذرة، وجاءت خصوصًا نتيجة لأعمال العالم الدانمركي نيلز بور، الذي كان يعمل مع رذرفورد في مانشستر. بعد أن وضع بور النموذج الخاص به للذرة لم يستطع بعدها أن يشكك في قيمة نظرية الكم كوصف للعالم الفيزيائي في المستوى الصغير جدًا.