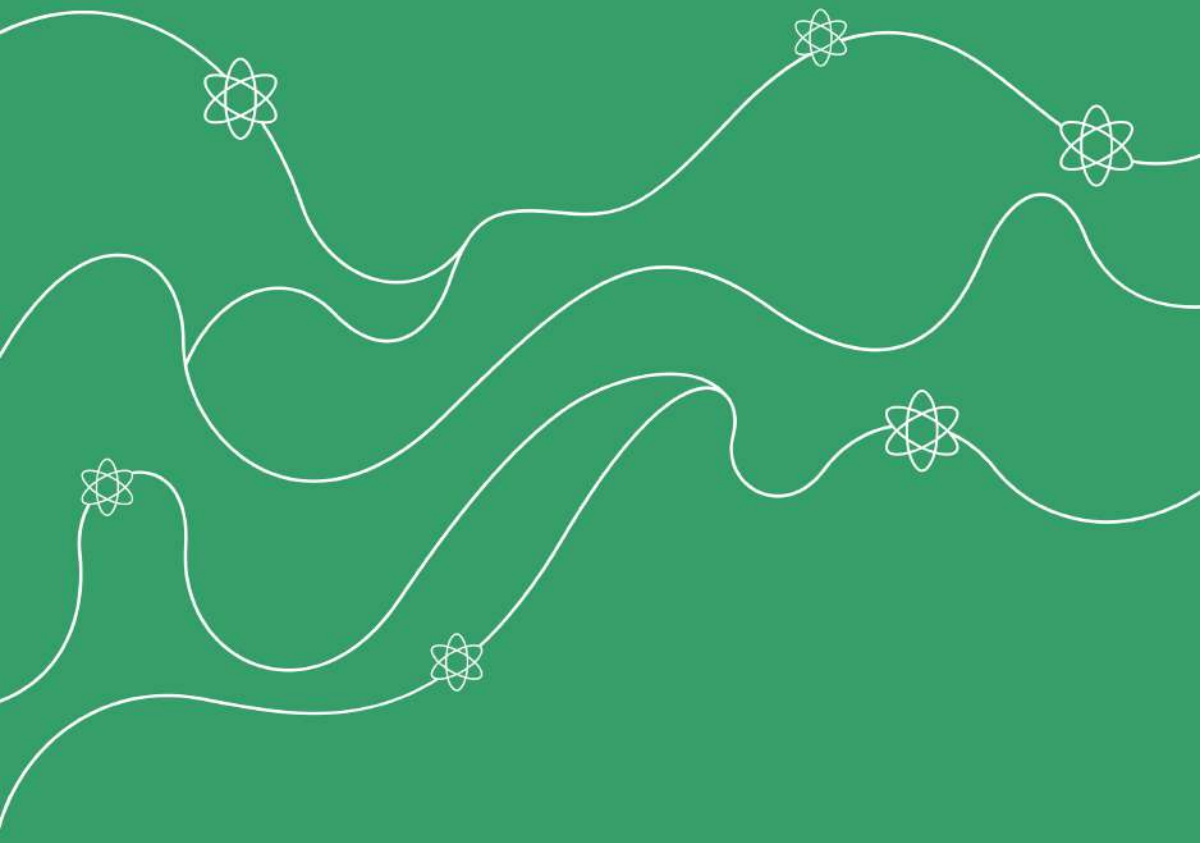
ستة أشياء مستحيلة

«كموم العزاء» وألغاز العالم دون الذرّي

جون جريبين



ترجمة دينا عادل غراب

ستة أشياء مستحيلة

«كموم العزاء» وألغاز العالم دون الذرِّي

تأليف

جون جريبين

ترجمة

دينا عادل غراب

مراجعة

شيماء طه الريدي

هنـــداوي

ستة أشياء مستحيلة

Six Impossible Things

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: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٧ ٢٨١٦ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠١٩.
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 © The John and Mary Gribbin Partnership, 2019.

المحتويات

تمهيد	١١
الفقرة الأولى: اللغز الجوهري	١٣
الفقرة الثانية: الشبكة المعقَّدة	٢١
العزاء الأول: تفسير كوبنهاجن المتواضِع	٢٩
العزاء الثاني: تفسير الموجة الدليلية غير المستحيل تمامًا	٣٧
العزاء الثالث: الأحمال الزائدة: تفسير العوالم المتعدِّدة	٤٥
العزاء الرابع: تفسير إزالة الترابط غير المترابط	٥٣
العزاء الخامس: لا تفسير المجموعة	٦١
العزاء السادس: تفسير المعاملات اللازمني	٦٩
الخاتمة	٧٧
قراءات إضافية	٧٩

ضحِكت أليس وقالت: «لا جدوى من المحاولة؛ فلا يمكن للمرء تصديق الأشياء المستحيلة.»

فقالت الملكة: «أخشى أنكِ لم تتدرَّبي على ذلك بالقَدْر الكافي. فحين كنت أصغر سنًّا، كان دأبي أن أفعل ذلك لمدة نصف ساعة يوميًّا. بل إنني كنت أحيانًا أصدِّق ستة أشياء مستحيلة قبل الفطور.»

العزاء: (اسم) يعني المواساة أو السلوى عند المِحَن.

تمهيد

ما المسألة؟
الحاجة إلى عزاء كمِّي

غريبٌ أمرُ فيزياء الكم. نراه غريبًا على الأقل؛ لأن قواعد عالَم الكَم، التي تحكُم آلية سَيْر العالَم على مستوى الذرَّات والجُسيمات دون الذَّرية (سلوك الضوء والمادة، على حدٍّ تعريف ريتشارد فاينمان)، ليست القواعد التي نألَفُها؛ تلك القواعد التي ندعوها «منطقية».

إن قواعدَ الكَمِّ فيما يبدو تُخبرنا بأنه من الوارد أن تكون هناك قطة حية وميتة في الوقت ذاته، بينما يمكن لجُسيمٍ أن يكون في مكانَين في آنٍ واحد. فالواقع أن ذلك الجُسيم يُعَد موجةً أيضًا، وكل شيء في عالَم الكَم يمكن وصفُه في إطار الموجات كليةً، أو في إطار الجُسيمات كليةً أيضًا، أيهما تفضِّل. فقد اكتشف إرفين شرودنجر المعادلات التي تصف العالَم الكمِّي للموجات، فيما اكتشف فيرنر هايزنبرج المعادلات التي تصف العالَم الكمِّي للجُسيمات، وأثبت بول ديراك أن هاتين الصيغتين للواقع كلتاهما مُكافئة تمامًا للأخرى كوصفٍ لذلك العالَم الكمِّي. كان كل هذا واضحًا بحلول نهاية عشرينيات القرن العشرين. لكن ما أثار انزعاجًا شديدًا للعديد من علماء الفيزياء، فضلًا عن غير المتخصِّصين، أن أحدًا لم يستطِع (آنذاك أو منذ ذلك الحين) أن يأتيَ بتفسيرٍ منطقي لما يجري.

كان من بين ردود الأفعال تجاه هذا تجاهُل المشكلة؛ أملًا في تلاشيها. إن المعادلات (أيًّا كانت الصيغة التي تفضِّلها لها) تؤدي الغرض منها إن أردت أن تقوم بأشياء على غِرار

تصميم جهاز ليزر، أو تفسير بنية الحمض النووي، أو صنْع جهاز كمبيوتر كمِّي. وظلَّت أجيال من الطلاب تؤمَر، في الواقع، «بالتزام الصمت وإجراء العمليات الحسابية»؛ فليس لهم السؤال عما «تعنيه» المعادلات، وإنما عليهم معالجة الأرقام فحسب. هذا أشبه بأن تضع إصبعَيك في أذُنَيك لكيلا تسمع شيئًا. لكن ثَمَّة علماء فيزياء أكثر تأمُّلًا التمسوا العزاء بأساليبَ أخرى. فجاءوا بمجموعة من الحلول البائسة بعض الشيء في سبيل «تفسير» ما يجري في عالَم الكَم.

تُدعى هذه الحلول، أو كموم العزاء، «تفسيرات». على مستوى المعادلات، ليس لأيٍّ من هذه التفسيرات أفضلية على الأُخريات، وإن كان أصحابها وأتباعهم سوف يُخبرونك بأن تفسيرهم المفضَّل هو العقيدة الصحيحة الوحيدة، وأن كلَّ من يتَّبع العقائد الأخرى مهرطِقون. من ناحية أخرى، لا يوجد بين هذه التفسيرات ما هو أسوأ من الآخر، من المنظور الرياضي. وأغلب الظن أن هذا يعني أننا نُغفِل شيئًا ما. ويومًا ما قد يُكتشف وصفٌ جديد فذٌّ للعالَم يقدِّم كل التكهنات والتنبؤات التي تقدِّمها نظرية الكَم الحالية، ولكنه سيكون منطقيًّا كذلك. حسنًا، لنا أن نأمُل ذلك على الأقل.

في الوقت ذاته، أعتقد أن الأمر قد يستحق تقديمَ نبذة عامة محايِدة عن بعض التفسيرات الأساسية لفيزياء الكَم. فكلها جامحة مقارنةً بالمنطق، وبعضها أكثر جموحًا وجنونًا، لكن الجموح في هذا العالَم ليس خطأً بالضرورة، وكون بعضها أشد جموحًا من غيرها ليس معناه بالضرورة أنها أشد خطأً. وقد وقع اختياري على ستة أمثلة، وهي الأمثلة الستة التقليدية، ويُعزى ذلك إلى حدٍّ كبير إلى تبرير استخدام الاقتباس المأخوذ من رواية «أليس». إن لديَّ آرائي في المزايا الخاصة بكلٍّ منها، التي أرجو ألا أُفصِح عنها؛ لأُفسحَ لكم المجال للاختيار، أو لوضع أصابعكم في آذانكم، بالطبع، التظاهر بعدم السمع.

لكن قبل تقديم هذه التفسيرات ينبغي أن أوضِّح ما نحاول تفسيره على وجه التحديد. غالبًا ما يسير العلم على نحوٍ متقطع بين نشاط وخمول. بَيد أنه يبدو ملائمًا في هذه الحالة أن نبدأ بفقرتين، في إشارة أخرى إلى تشارلز لوتويدج دودجسن (مؤلِّف «أليس في بلاد العجائب»، الذي كان يكتب الشعر مقسَّمًا لفقرات).

جون جريبين
يونيو ٢٠١٨

الفقرة الأولى:
اللغز الجوهري

تتلخَّص غرابة عالَم الكَم فيما يُعرَف رسميًّا باسم «تجربة الشق المزدوج». وكان ريتشارد فاينمان، الحاصل على جائزة نوبل لإسهاماته في مجال فيزياء الكَم، يفضِّل أن يُسمِّيَها «تجربة الثقبَين»، قائلًا إنها «ظاهرة يستحيل غايةَ الاستحالة تفسيرُها بأي طريقة كلاسيكية، وفيها يكمن جوهر ميكانيكا الكَم. فهي في الواقع تنطوي على اللغز «الوحيد» ... الخواص المميزة الأساسية لميكانيكا الكَم برُمَّتها.»[1] قد يُدهِش هذا أيَّ شخص لا يتذكَّر التجربة إلا من دروس الفيزياء في المدرسة، حيث تُستخدم «لإثبات» أن الضوء شكلٌ من أشكال الموجات.

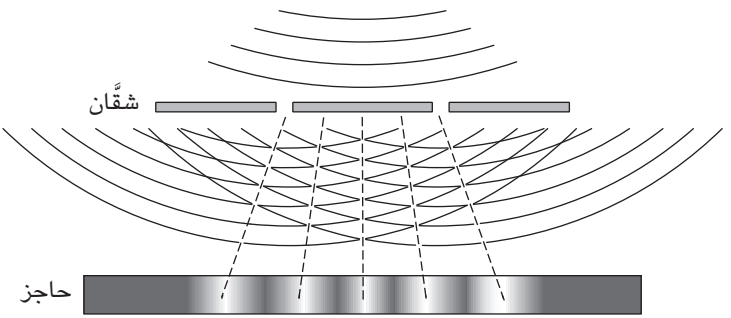
كانت التجرِبة في نسختها المدرسية عبارةً عن حجرة مُظلِمة، حيث يُسلَّط الضوء على حاجزٍ بسيط — قطعة من كرتون أو ورق — به ثقبان صغيران، أو شقَّان ضيِّقان مُتوازيان في بعض الأشكال الأخرى للتجربة. ووراء هذا الحاجز يوجد حاجز ثانٍ بلا أي ثقوب. ينتقل الضوء من خلال الثقبَين في الحاجز الأول إلى الحاجز الثاني، حيث يصنع نمطًا من الضوء والظل. تُسمَّى طريقة انتشار الضوء من خلال الثقبين حيودًا، أما النمط فيُسمَّى نمط التداخل؛ لأنه نتاج شعاعَين من الضوء، يأتي كل واحد منهما من أحد الثقبَين، فينتشران ويتداخلان أحدهما مع الآخر. وهو ينسجم تمامًا مع النمط المتوقَّع عند انتقال الضوء في شكل موجة. في بعض المواضع، تتجمَّع الموجات معًا وتصنع بقعةً ساطعة على الحاجز الثاني؛ وفي مواضعَ أخرى تتلاقى قمة إحدى الموجات مع قاع موجة أخرى، فتُلغي كلٌّ منهما الأخرى وتتركان بقعةً مُعتِمة. يمكن رؤية النوع نفسه من نمط التداخل في التموجات التي تنشأ في بِركةٍ راكدة إذا أُلقيت فيها حصاتان في الوقت نفسه. من السمات

المميزة لهذا النوع من التداخل أنَّ أزهى بُقَع الضوء على الحاجز الثاني لا تظهر خلف أيٍّ من الثقبَين مباشرةً، وإنما في المنتصف بالضبط بين هاتين النقطتين، بالضبط حيث تتوقَّع أن يكون الحاجز الثاني مُعتِمًا تمامًا لو كان الضوء حقًّا عبارة عن تيار من الجُسيمات. فلو كان الضوء مكوَّنًا من تيار من الجُسيمات، كنت ستتوقَّع أن ترى بقعةً مضيئة خلف كل ثقب، وعَتَمة فيما بين تِلكما البقعتين الضوئيتين.

ريتشارد فاينمان
«جيتي إيميدجز»

لا بأس حتى الآن. يُثبِت هذا أن الضوء ينتقل كموجة، كما أدرك توماس يونج في بداية القرن التاسع عشر. لكن للأسف جاءت في مطلع القرن العشرين تجارِبُ من نوعٍ آخر أثبتت أن الضوء ينتهج سلوك تيار الجُسيمات. تضمَّنت هذه التجارب إطلاق الإلكترونات من سطحٍ معدني عن طريق شعاع من الضوء، فيما يُعرَف بالتأثير الكهروضوئي. عند قياس طاقة الإلكترونات المقذوفة، تبيَّن أن طاقة الإلكترونات كانت دائمًا واحدة مع كل لون من ألوان الضوء. في حالة الضوء الساطع ينطلق عددٌ أكبر من الإلكترونات، لكنها

تظل متساوية في مقدار الطاقة، وكذلك الأمر مع طاقة كلٍّ من الإلكترونات التي تنطلق بعددٍ أقلَّ حين يكون الضوء خافتًا. كان ألبرت أينشتاين هو من فسَّر هذا الأمر في إطار جُسيمات الضوء، التي يُطلَق عليها الآن الفوتونات، أو كموم الضوء بلغتِه. تتوقَّف كمية الضوء التي يحملها الفوتون على لون الضوء، لكن طاقة جميع الفوتونات تتساوى في أي لون. وفي ذلك يقول أينشتاين: «أبسط تصوُّر هو أن الكَمَّ الضوئي ينقل طاقته برُمَّتها إلى إلكترونٍ واحد». إن زيادة الضوء تعطي فقط المزيد من الفوتونات (كموم الضوء)، لدى كلٍّ منها القَدْر نفسه من الطاقة لتُعطيه للإلكترونات. وقد نال أينشتاين جائزة نوبل عن هذا العمل، لا عن نظرياته في النسبية. وبعد مائة عام من اعتبار الضوء موجةً، اضطُرَّ علماء الفيزياء للبدء في التفكير فيه باعتباره جسيمًا، لكن كيف لذلك أن يفسِّر تجربة الثقبَين؟



تبيِّن الخطوط المنقَّطة أماكنَ تعزُّز الموجات،
ما ينتج عنه بقعٌ مضيئة على الحاجز

حين يمرُّ الضوء من خلال شقَّين في حاجزٍ ما، تنتشر الموجات من كل شق لتُحدِث نمطَ تداخُل، مثل تموُّجات في بِركة.

تفاقَم الأمر وازداد سوءًا. فبعد أن رأى الفيزيائيون تجاربَ التأثير الكهروضوئي تُلقي بظلال الشك على الطبيعة الموجية للضوء، أُصيبوا بالحيرة والإحباط في عشرينيات القرن العشرين حين اكتشفوا دليلًا على أن الإلكترونات، التي تُعَد الجسيمات النموذجية الأصلية للعالَم دون الذري، قد تسلك سلوك الموجات. انطوَت التجارب على إطلاقِ أشعة من

الإلكترونات من خلال صفائح رفيعة من رقائق الذهب، يتراوح سُمكها بين واحد على عشرة آلاف وواحد على مائة ألف من المِلِّيمتر، ورصدها على الجانب الآخر لفحصِها ودراستِها. بيَّنت الدراسات أن الأشعة الإلكترونية قد تشتَّتت عند مرورها عبر الفجوات الواقعة بين صفوف الذرات في المَعدِن، تمامًا مثلما تشتَّت الضوء عند مروره في تجربة الثقبَين. وقد حصل جورج طومسون الذي أجرى تلك التجارب على جائزة نوبل لإثباته أن الإلكترونات عبارة عن موجات. وكان والده، جيهجيه طومسون، قد حصل على جائزة نوبل لإثباته أن الإلكترونات عبارة عن جسيمات (وكان لا يزال على قيد الحياة، وشاهَد جورج وهو يتلقى جائزته). كلتا الجائزتين كانت مستحَقَّة. وليس هناك أدلُّ من ذلك على الغرابة التي تكتنف عالَم الكَم. لكن ليس هذا كلَّ ما في الأمر.

ما زال لغز ازدواجية الموجة والجسيم، كما صار معروفًا، يكمن في قلب التنظير بشأن معنى ميكانيكا الكَم منذ عشرينيات القرن العشرين فصاعدًا. وقد مَنَح قَدْرٌ كبير من هذا التنظير بشأن قواعد وأُسُس ميكانيكا الكَم العزاءَ لعلماء الفيزياء الذين سأتناولهم لاحقًا. بَيد أن اللغز قد شهد أوج تألُّقه في سلسلة من التجارب الجميلة بدأت في سبعينيات القرن العشرين؛ لذلك سأتخطَّى مؤقتًا نصف قرن من التماس العزاء من أجل تقديم أحدث الحقائق المتعلِّقة باللغز الجوهري. وإن وجدت ما سيأتي لاحقًا صعبَ التصديق، فتذكَّر ما قاله مارك توين: «الواقع أغرب من الخيال، لكن ذلك لأن الخيال لا بد أن يخضع للاحتمالات، أما الواقع فهو ليس كذلك.»

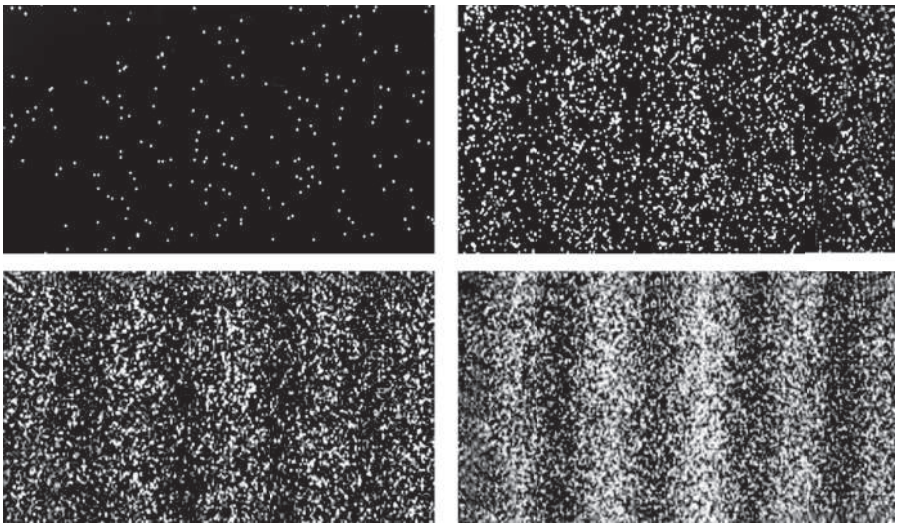
في عام ١٩٧٤، وضع ثلاثة فيزيائيين إيطاليين، هم بيير جورجيو ميرلي وجيان فرانكو ميسيرولي وجوليو بوتزي، تقنيةً لمراقبة التجربة المكافئة لتجربة الثقبَين مع الإلكترونات. واستخدموا بدلًا من شعاع الضوء شعاعًا من الإلكترونات، التي انفصلت بالغليان عن سلكٍ ساخن، وانتقلت من خلال جهاز يُسمَّى الموشور الثنائي الإلكتروني. تدخل الإلكترونات إلى الموشور الثنائي من خلال مدخل واحد، لكن يعترضها مجالٌ كهربائي يقسِّم الشعاع إلى نصفَين، فتنطلق نصف الإلكترونات من مخرج، فيما ينطلق النصف الآخر من مخرجٍ آخر. ثم تصل إلى شاشة جهاز كشف، أشبه بشاشة الكمبيوتر، حيث يصنع كل إلكترون بقعةً بيضاء حين يصل. تبقى البقع؛ لذا مع مرور مزيد ومزيد من الإلكترونات في التجربة يتكوَّن نمط على الشاشة. عند إطلاق إلكترون واحد من خلال الموشور الثنائي، تكون فرصته متعادلة في الذهاب في أي اتجاه من الاتجاهين، ويصنع بقعةً واحدة على الشاشة. أما عند إطلاق شعاع من عدة إلكترونات خلال التجربة، فإنها تصنع بقعًا متداخلة على الشاشة، وتندمج هذه البقع معًا لتصنع بذلك شكلًا أو نمطًا؛ نمط التداخل المتوقَّع للموجات.

هذا الأمر في حد ذاته لا يستدعي الانزعاج الشديد. فحتى إن كانت الإلكترونات جسيمات، فهناك الكثير منها في الشعاع، ويمكنها التفاعل بعضها مع بعض في طريقها خلال التجربة لتصنع نمط التداخل. فموجات الماء، على كل حال، تصنع أنماط تداخُل، والماء يتكوَّن من جزيئات، يمكن اعتبارها جسيمات. لكن هناك ما هو أكثر من ذلك.

كانت التجربة الإيطالية بالغةَ الدقة، حتى إنه كان يمكن إطلاق الإلكترونات المفردة خلالها واحدةً تلو الأخرى، وإرسالها في مسارها مثل طائرات رِحلات جوية تغادر من مطار مزدحِم. كان التباعد بين الإلكترونات واسعًا مثل التباعد بين تلك الطائرات. فكانت المسافة بين مصدر إطلاق الإلكترونات (في الواقع أن هذه العبارة أرقى قليلًا من السلك الساخن) لشاشة الكاشف عشرة أمتار، ولم يكن أي إلكترون في تيار شعاع الإلكترونات يغادر إلا بعد وصول سابقه إلى مستقَرِّه. يمكنك (على ما أرجو) تخمينُ ما حدث عند إطلاق آلاف الإلكترونات واحدًا تلو الآخر خلال التجربة لتكوين نمط على شاشة الكاشف. لقد صنعت نمطَ تداخُل. لو كانت الجسيمات المفردة تتفاعل معًا لتصنع نمطًا بنفس الطريقة التي تتفاعل بها جزيئات الماء لصنْع نمط؛ إذَن هذا يعني أن التفاعل كان يحدث عبر المكان والزمان على حدٍّ سواء. وقد صارت هذه التجربة تُعرَف باسم «حيود الإلكترون الواحد عبر شقٍّ مزدوج».

حين تنطلق الإلكترونات واحدًا تلو الآخر من خلال مكافئ تجربة الشق المزدوج للضوء، يُحدِث كل إلكترون بقعةً من الضوء على شاشة الكاشف. لكن تتراكم البقع شيئًا فشيئًا مع الوقت لتصنع نمطَ تداخُل، كما لو كانت موجات (انظر الشكل في الصفحة التالية).

رغم أن الفريق الإيطالي نشر هذه النتائج المذهِلة في عام ١٩٧٦، فقد فشِلت في إحداث أيِّ صدًى في عالَم الفيزياء. فقد كانت قلَّةٌ من الفيزيائيين مهتمةً آنذاك باكتشاف آلية عمل ميكانيكا الكَم، ما دامت تؤدي الغرض، من حيث إنها تمكِّنهم من استخدام المعادلات لإجراء عمليات حسابية والتنبؤ بنتائج التجارب تنبؤات صحيحة. أما كيفية وصول إلكترون، أو شعاع من الإلكترونات، من النقطة «أ» إلى النقطة «ب»، فهي لا تعني مهندسًا يصمِّم جهاز تلفزيون مثلًا. يمكننا تشبيههم بذلك النوع من سائقي سيارات السباق الموشِك على الاندثار، الذين لم يكونوا يأبَهون بما يجري تحت غطاء محرِّكات سياراتهم، ولكن كانوا يستطيعون الانطلاق في أنحاء حلبة السباق بأقصى سرعة. كانت النصيحة الوحيدة الممتزِجة بقليل من المُزاح للطلبة الذين يريدون معرفةَ «السبب» وراء نجاح المعادلات،



منقولة من بحثٍ لإيه تونومورا وآخرين، «أمريكان جورنال أوف فيزيكس» (١٩٨٩).

هي كما ذكرت: «التزِموا الصمتَ وأجْرُوا العمليات الحسابية»؛ أي استخدِموا المعادلات ولا تنشغلوا بما تعنيه.

صار ذلك الموقف موضعَ تساؤل على نحوٍ متزايد خلال ثمانينيات القرن العشرين، لا سيما بسبب التطورات التي سأتحدَّث عنها في الفقرة الثانية. لذلك حين أجرى فريقٌ ياباني، يترأسَّه أكيرا تونومورا، تجارب مماثلة لتجارب الإيطاليين الرواد، ولكن مع استخدام التقنية المتطورة التي ظهرت في أواخر ثمانينيات القرن العشرين، أحدثت نتائجهم، التي نُشرَت عام ١٩٨٩، دويًّا أكبر. حتى إنه في عام ٢٠٠٢، اختار استطلاع آراء لقُرَّاء دورية «فيزيكس وورلد» تجربة حيود الإلكترون الواحد عبر الشق المزدوج باعتبارها «أجمل تجربة في مجال الفيزياء». لكن ثَمَّة تفصيلة من تفاصيل هذه التجارب أثارت انتقادات. لا يوجد في تجارب الموشور الثنائي الإلكتروني حاجزٌ مادي، مثل الحاجز الأول في تجربة الشق المزدوج الكلاسيكية الخاصة بالضوء، وكلا المسارَين، أو القناتين، اللذين يمرَّان عبر الجهاز، مفتوح دائمًا. في عام ٢٠٠٨، خطا بوتزي ومجموعة أخرى من الزملاء خطوةً أبعد. فقد طوَّروا تجربةً أمكنَ فيها إطلاق كل إلكترون على حدة من خلال شقَّين حقيقيين ملموسين بحجم النانو في حاجز رفيع، ليُكتشف على الجهة الأخرى بالأسلوب المعهود.

وكما هو متوقَّع، صنعت الإلكترونات التي بلغت شاشة الكاشف نمطَ تداخُل. لكن حين سد الفريق الإيطالي أحد الشقَّين وأجرَوا التجربة مرةً أخرى، لم يحدُث تداخُل. لقد كان النمط الذي تكوَّن على شاشة الكاشف مجردَ بقعة خلف الشق مباشرةً، تمامًا كما كنتَ لتتوقع من تيار من الجزيئات. كيف لإلكترون فردي ينتقل بمفرده خلال التجربة من خلال ثقب في جدار أن «يعلم» ما إن كان ثَمَّة ثقب آخر قريب ربما مرَّ من خلاله، وما إن كان ذلك الثقب مفتوحًا أم مغلقًا، فيعدِّل مسارَ رحلته اللاحق بناءً على ذلك؟

كانت الخطوة التالية واضحة نظريًّا، لكنها في غاية الصعوبة عمليًّا. كانت تلك الخطوة هي إجراء تجربة بثقبين، بمقياس النانو، حيث يمكن فتح الثقبين أو غلقهما بينما لا تزال الإلكترونات في طور الانتقال. هل يمكن خداعها بتغيير الإعداد التجريبي بعد أن مضت في رحلتها؟ تبنَّى هذا التحديَ فريقٌ مقيم في الولايات المتحدة الأمريكية، ولكنه كان يرأسه هيرمان باتيلان، الهولندي المولد، الذي أعلن ما توصَّلوا إليه من نتائج في عام ٢٠١٣. وقد أوردتُ تجربتهم في مقالي الذي نُشِر على كيندل «لغز الكَم»، وبما أنه يشتمل على أرقام دقيقة، فلا يسعني تحسين ذلك الوصف؛ لذلك أسرده هنا مرةً أخرى.

صنع القائمون على التجربة شقَّين في غشاءٍ رقيق من السيليكون المطلي بالذهب. كان «سُمك» (أو بالأحرى «رفع») الغشاء ١٠٠ نانومتر فقط، مطليًّا بنانومترَين من الذهب. كان عرض كل شق ٦٢ نانومترًا، وطوله أربعة ميكرومترات (يعادل النانومتر واحدًا على مليار من المتر، بينما يعادل الميكرومتر واحدًا على مليون من المتر). كانت المسافة الفاصلة بين الشقَّين المتوازيين ٢٧٢ نانومترًا (بدءًا من مركز وسط أحد الشقَّين لمركز الشق الآخر)، وكانت الإضافة الجديدة الفاصلة هي مصراعًا دقيقًا يمكن زجُّه عبر الغشاء باستخدام آلية أوتوماتيكية (محرِّك كهروضغطي) لسدِّ أحد الشقين.

مرَّت الإلكترونات في التجربة من خلال الجهاز بمعدَّل إلكترون واحد في الثانية، مستغرِقةً ساعتين في تكوين النمط على الشاشة. سُجِّلت العملية برُمَّتها على الفيديو. وفي سلسلة متصلة من التجارب، لاحظ الفريق ما يحدث عند فتح كلا الشقَّين، وعند غلق شق واحد، وعند نقل المصراع لسد الشق الآخر. وكما هو متوقَّع، أظهر النمط الذي تكوَّن عند فتح الشقين تداخلًا، لكن لم يحدث ذلك عند فتح واحد فقط من الشقين. فكان على رأس كل الألغاز التي كشفت عنها (أو ربما يجب أن أقول أكَّدتها) التجارب الإيطالية واليابانية أن الإلكترونات «عرفت» مرة أخرى كَمْ شقًّا كان مفتوحًا. بدا الأمر وكأن كل إلكترون كان

«يعرف» إعدادات التجربة بدقة حين انطلق في رحلته عبر الجهاز، بل وما حدث أيضًا للإلكترونات التي انطلقت قبله وتلك التي جاءت بعده.

كان ريتشارد فاينمان قد تنبَّأ بحدوث هذا قبل نصف قرن. فقد تخيَّل إجراء تجربة الشق المزدوج بالإلكترونات، بناءً على ما كان يعلمه الناس آنذاك عن سلوك الضوء واكتشاف الموجات الإلكترونية. فقال في كتاب «محاضرات في الفيزياء» إنه سيصف تجربةً افتراضية «ليس عليكم أن تحاولوا إجراءها»؛ لأن «الجهاز سيتحتَّم إنشاؤه على مقياس صغير إلى حدِّ الاستحالة لتوضيح النتائج التي نريدها». لكن ما كان مستحيلًا في عام ١٩٦٥ صار ممكنًا في ٢٠١٣. وكان ذلك من شأنه أن يسُرَّ فاينمان الذي كان شغوفًا بتكنولوجيا النانو، من بين أشياء أخرى. فقد بلغوا، على حد قول باتيلان وزملائه، «التحقيق الكامل لتجربة فاينمان الافتراضية». وقد كشفت بالفعل عن اللغز الجوهري لعالم الكَم؛ «قلب فيزياء الكَم ... اللغز الوحيد». ولا أحد يعلم كيف يمكن للعالم أن يكون بذلك الشكل.

هوامش

(١) «محاضرات في الفيزياء»، المجلد الثالث. مصطلَحَا «فيزياء الكَم» و«ميكانيكا الكَم» متبادلان في هذا السياق. أما الفيزياء «التقليدية» فيُقصَد بها كل شيء قبل النِّسبية ونظرية الكَم.

الفقرة الثانية:
الشبكة المعقَّدة

قبل المضي قُدمًا، من المهم أن نستخلص درسًا آخرَ من تجربة الشقَّين. المسألة ليست رؤية أشياء مثل الإلكترونات تتصرَّف كأنها موجات وجسيمات في الوقت ذاته. يبدو أنها تنتقل خلال التجربة مثل الموجات، لكن يبدو أنها تصل إلى شاشة الكاشف وكأنها جسيمات. فهي تتصرف أحيانًا «كأنها» موجات، وأحيانًا أخرى تتصرف «كأنها» جسيمات. و«كأنها» كلمة مهمة هنا. فليس لدينا طريقة لمعرفة «الماهية الحقيقية» للكِيانات الكمية؛ لأننا لسنا كِيانات كمية. يمكننا فقط عقد مقارنات مع أشياءَ اختبرناها اختبارًا مباشرًا، مثل الموجات والجسيمات. وقد أشار عالَم الفيزياء آرثر إدينجتون لهذا بأسلوبٍ مأثور في عام ١٩٢٩. فقد قال في كتابه «طبيعة العالم الفيزيائي»:

> لا يمكن نسج مفاهيم مألوفة حول الإلكترون ... شيء مجهول يفعل شيئًا نجهله.
> لا تبدو (هذه) من النظريات التنويرية للغاية. لقد قرأت شيئًا شبيهًا بها في مكانٍ آخر:
>
> > راحت مخلوقات التوف اللزجة الهائجة.
> > تدور وتَحفِر جحورًا في جانب التل.

ربما من الأسهل لنا حقًّا أن نتخيَّل كائنات التوف وهي تدور وتصنع جحورًا في تجربة الثقبين، عن تصوُّر الإلكترونات وهي تسلك سلوك الموجات والجسيمات. وتجنبًا للإفراط، لن أستخدم لفظ «كأنها» كلما أشرت إلى حدث أو كِيان في عالَم الكَم. لكن اعتبرْ أنك قرأتها.

لا شك أن كلمة «يدور» قد تكون مصطلحًا أفضل من المستخدم عادةً للدلالة على خاصية كمية أساسية للإلكترونات و«الجسيمات» الأخرى، وهي الخاصية التي يُشار إليها عادةً بمصطلح «اللف المغزلي». إن مصطلح اللف المغزلي مصطلحٌ مريح ومألوف، مثل الموجة أو الجسيم، ومضلِّل تمامًا مثل أيٍّ منهما. تُخبرنا المعادلات من ناحية أن الكِيان الكمي لا بد أن يدور مرتين ليعود من حيث بدأ، بصرف النظر عما يعنيه ذلك فيزيائيًّا (والذي لا أستطيع تخيُّله بالتأكيد). لكن اللف المغزلي خاصيةٌ مفيدة في مناقشة العديد من الظواهر الكمية؛ نظرًا لوجود نوعين منه، يمكن وصفهما بأنهما لفٌّ «لأعلى» ولفٌّ «لأسفل». وهذا من شأنه أن يبسُط مناقشات ربما كانت ستصبح بالغة التعقيد.

لنضرب مثالًا هنا، وهو الاحتمالية. كان عالم الفيزياء الألماني ماكس بورن هو مَن وضع مفهوم الاحتمالية، في سياق ميكانيكا الكَم، على أساسٍ رياضي سليم. لكن بدون الخوض في التفاصيل الرياضية، يمكننا إدراك أهميتها باستخدام مثال اللف المغزلي للإلكترون (أو دوران كائن التوف، كما كان يفضِّل إدينجتون على الأرجح). من الممكن أن نصِف تجربةً تُطلِق فيها إحدى الذرات إلكترونًا ينتقل عبر الفضاء (علمًا بأن هذه عمليةٌ حقيقية، تُسمَّى اضمحلال بيتا)، وذلك باستخدام معادلات ميكانيكا الكَم. في نسخة نموذجية للتجربة، يكون للإلكترون لفٌّ مغزلي محدَّد. ويكون هذا اللف إما لأعلى أو لأسفل. لكن لا سبيل لأن نحدِّد مقدَّمًا كيف سيكون. فلكل احتمال فرصةٌ مُتساوية. فإن أجريت التجربة ألفَ مرة، أو بألف ذرة في آنٍ واحد، فستجد ٥٠٠ إلكترون (ربما أكثر أو أقل قليلًا) يدور لأعلى، و٥٠٠ إلكترون يدور لأسفل. لكن إن أخذت إلكترونًا واحدًا وقمت بقياس لفِّه المغزلي، فلن تستطيع تحديد اتجاهه حتى تنظر.

ليس هناك ما يستدعي الدهشة بعد. لكن أينشتاين أدرك أن معادلات نظرية الكَم قد تنبَّأت بشيء مُذهِل للغاية[1] يحدث عند انطلاق إلكترونين في اتجاهين متضادين. في ظروف معينة، ينطبق أحد قوانين الحفظ، الذي يقول إنه يجب أن يكون للإلكترونات لفٌّ مغزلي في اتجاهين متضادين، أحدهما لأعلى والآخر لأسفل؛ ومن ثَم يلغي كلٌّ منهما الآخر في الواقع. لكن المعادلات تقول إن الإلكترونات عند انبعاثها من مصدرها لا يكون لها لفٌّ مغزلي محدَّد. فكلٌّ منها يوجد فيما يُسمَّى تراكب، وهو عبارة عن مزيج بين حالتَي الدوران لأعلى وأسفل، و«يقرِّر» الإلكترون الدوران المغزلي الذي سيتخذه وفقًا لقواعد الاحتمالية، فقط حين يتفاعل مع شيء آخر. كانت النقطة التي أدركها أينشتاين أن الإلكترونات لا بد أن تدور في اتجاهاتٍ متعاكِسة، فحين «يقرِّر» الإلكترون «أ» اللفَّ لأعلى، لا بد أن يلف الإلكترون «ب»

لأسفل، مهما كانت المسافة الفاصلة بين الإلكترونين. وأُطلق على هذا «الفعل الشبحي عن بُعد»؛ إذ يبدو للوهلة الأولى وكأن الإلكترونات تتواصل أسرعَ من الضوء، وهو ما لا يجوز حدوثه وفقًا لنظرية النسبية الخاصة.

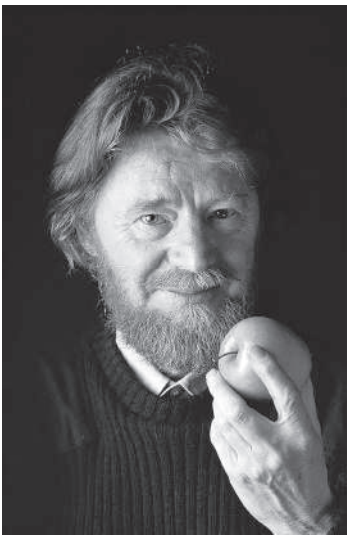
تطوَّرت فكرة أينشتاين إلى بحثٍ علمي، نُشر عام ١٩٣٣، بمساعدة زميلَين له، هما بوريس بودولسكي وناثان روزن (قد يقول البعض إنها كانت عرقلة لا مساعدة؛ إذ خرج البحث رديءَ الصياغة ولم يقدِّم الحجة بوضوح). يُعرَف هذا البحث باسم «بحث إي بي آر»، من الأحرف الأولى لأسمائهم، وصارت النقطة التي أراد أينشتاين إثارتها معروفةً باسم «مفارقة إي بي أر»، وإن كانت في الواقع ليست مفارقة على الإطلاق، وإنما مجرَّد لغز. في عام ١٩٣٥، وفي بحث علمي قدَّم «مفارقة» أخرى شهيرة، خلع شرودنجر اسم «تشابك» على الطريقة التي يتصل بها، على ما يبدو، نظامان كميان عن طريق الفعل الشبحي عن بُعد. قال بحث «إي بي آر» إن نظرية الكَم «تجعل واقع [خواص النظام الثاني] متوقِّفة على عملية قياس تُجرى على النظام الأول، لا تؤثِّر على النظام الثاني بأي طريقة. لم يكن بإمكانهم توقُّع أن يسمح أي تعريف منطقي للواقع بحدوث ذلك.» وجاء في حسمهم للغز «إننا لذلك مُضطرون لاستنتاج أن الوصف الكمي الميكانيكي للواقع الفيزيائي ... ليس كاملًا.» رأى أينشتاين أنه لا بد أن المسألة تنطوي على آليةٍ ما، تُعرَف باسم المتغيرات الخفية، من شأنها أن تضمن في هذا المثال أن الإلكترونات لم يكن لها خيار حقًّا في الدوران لأعلى أو لأسفل عند انطلاقها من مصدرها، وأن كل شيء كان مقررًا سلفًا.

رغم أن نشر بحث «إي آر بي» أثار جدلًا حاميَ الوطيس بين الخبراء، فقد تأخَّر التقدم الحقيقي نحو فهم تداعيات التشابك ثلاثة عقود، وهو ما يرجع إلى حدٍّ كبير إلى خطأٍ ارتكبه واحدٌ من أبرز العلماء الرياضيين في عصره، وهو جون فون نيومان، في كتاب مؤثِّر عن ميكانيكا الكَم نشره عام ١٩٣٢؛ أي «قبل» ظهور بحث «إي بي آر». قدَّم فون نيومان في ذلك الكتاب «برهانًا» على أن نظريات المتغيرات الخفية لم تستطِع تفسير سلوك عالَم الكَم، وأنها مستحيلة. ولشهرته وصِيته الذائع صدَّقه الجميع، دون التحقُّق من معادلاته. حسنًا ليس الجميع بالضبط. فقد اكتشفت باحثةٌ شابَّة في ألمانيا، وهي جريت هيرمان، موضعَ العوار في حجَّته، ونشرت بحثًا أُلقيَ عليه الضوء في عام ١٩٣٥، لكن في دورية فلسفية لا يقرؤها علماء الفيزياء فلم يُكتشَف إلا بعد ذلك بمدة طويلة. ورغم أن خطأ نيومان، كما سأوضِّح في العزاء الثاني، لم يمنع الناس تمامًا من العمل على نظريات المتغيرات الخفية «المستحيلة»، ظلت حجَّة نيومان قائمة حتى منتصف ستينيات القرن العشرين حين فنَّدها

أحد علماء الفيزياء، فكشف عمَّا يعتريها من خطأ، وأعاد إحياء فكرة المتغيرات الخفية. لكن ربما لم يكن إحياؤه للمتغيرات الخفية لِيُرضي أينشتاين؛ إذ أثبت أيضًا أن كل تلك النظريات لا بد أن تنطوي على الفعل الشبحي عن بُعد، الذي كان يُبغِضه، والذي يُعرَف رسميًّا أكثرَ باللاموضعية.

كان عالِم الفيزياء ذاك هو جون بيل، الذي كان في إجازة من عمله في مختبَر سيرن الأوروبي لفيزياء الجسيمات، للعمل في الولايات المتحدة الأمريكية بضعةَ أشهُر في أي شيء قد يستحوذ على اهتمامه. غيَّر البحثان اللذان انبثقا من عمله اليومي خلال هذه العطلة «معلومات الجميع» عن عالَم الكَم تغييرًا جذريًّا شأنَ أيِّ شيء منذ اكتشاف ازدواجية الموجة والجسيم. في البداية، شرح بيل الخطأ في حجَّة فون نيومان. ثم أوضح كيف سيكون ممكنًا من حيث المبدأ تصميم تجربة لاختبار آثار اللاموضعية. بعبارةٍ أدق، ستختبر التجربة فرضية «الواقع الموضعي». والمقصود بـ «موضعي» هنا أنه لا يوجد فِعل شبحي عن بُعد؛ فالأشياء تؤثِّر فقط على أشياءَ أخرى تقع في نطاق موضعها، الذي يتحدَّد بناءً على المسافة التي يمكن أن يقطعها الضوء في زمنٍ محدَّد. و«الواقع» هو مبدأ وجود عالَم واقعي، سواءٌ نظرنا إليه أم عاينَّاه أم لم نفعل. ونظرًا للطبيعة الاحتمالية لعالَم الكَم، كانت ثَمَّة حاجة لأن تنطوي التجربة التي اقترحها بيل على قياسات لعددٍ كبير من أزواج الجسيمات (مثل الإلكترونات أو الفوتونات) التي تمرُّ عبر الجهاز. وقد صُمِّمت التجربة الافتراضية بحيث تُنتج مجموعتين من القياسات بعد إجراء عدد كبير من المحاولات. في حال كانت مجموعة من الأرقام أكبرَ من الأخرى، سيُثبت ذلك أن فرضية الواقع الموضعي صحيحة. وقد صار هذا التناسب معروفًا باسم متباينة بيل، بينما عُرفت مجموعة الأفكار برُمَّتها باسم مبرهنة بيل. أما إن كانت المجموعة الأخرى من الأرقام أكبر، فستُخالف متباينة بيل، وهو ما يعني أن فرضية الواقع الموضعي لم تكن صحيحة. فإذا كانت ميكانيكا الكَم صحيحة، فلا بد من مخالفة متباينة بيل. فيمكن أن يكون هناك عالَم واقعي، حيث الفعل الشبحي عن بُعد. أو يمكن أن يكون هناك موضعية، ولكن على حساب القول إنه لا يوجد شيء واقعي إلا إذا رُصد.

خاض علماء الفيزياء مسارًا شبيهًا من قبل، وإن كان لا يروق للعديد من علماء الفيزياء أنفسهم. في القرن السابع عشر، حين وضع روبرت هوك وإسحاق نيوتن أفكارهما بشأن الجاذبية أدركا أن القمر يظل ثابتًا في مدارٍ حول الأرض بفعل قوةٍ تجذب كلًّا منهما للآخر، وأن الكواكب تظل ثابتة في مدارٍ حول الشمس بفعل النوع نفسه من القوة. وأدركا



جون بيل
«ساينس فوتو لايبراري»

أن هذا كان فعلًا عن بُعد. ورغم أن أيًّا منهما لم يَصِف هذا الفعل بأنه «شبحي»، فقد كان جهلهما بالآلية التي يعمل بها هو السبب وراء تعليق نيوتن الشهير «إنني لا أضع فرضيات»؛ بمعنى أن «تخميني لآلية عمل الجاذبية ليس أفضل من تخمينك». فقد كان حائرًا بشأن فِعل الجاذبية عن بُعد كحيرتنا إزاء الفعل الكمي عن بُعد. وفي القرن العشرين، جاء أينشتاين بالنظرية العامة للنسبية، ليستبدل بفكرة فِعل الجاذبية الشبحي عن بُعد فكرةَ وجود تشوُّهات في نسيج الفضاء ناتج عن وجود المادة (وإن كان لا بد من الإقرار بأن البعض يجِدون هذه الفكرة أيضًا شبحية). ربما يأتي في المستقبل عالِم مثل أينشتاين ليضع محلَّ الفعل الكمي الشبحي عن بُعد فكرةً أقلَّ غرابة. فقد أثبتت التجارب حتى الآن أن الظاهرة حقيقية.

في الواقع ينطوي إجراء تجربة على غرار تجارب بيل على تقنيةٍ تفُوق ما كان متوافرًا في منتصف ستينيات القرن العشرين، ولم يتوقَّع بيل أن يشهد إجراء التجربة. لكن مع أوائل ثمانينيات القرن العشرين أُجريت تجارب (باستخدام الفوتونات بدلًا من الإلكترونات)

أثبتت خَرْق متباينة بيل. ومنذ ذلك الحين تأكَّد هذا من خلال مزيد ومزيد من التجارب على هذه الشاكلة، في ظل تنامي التطور التقني. ليس الواقع الموضعي بوصفٍ مقبول للعالَم؛ وبكلمات جون بيل نفسه التي ألقاها في اجتماعٍ عُقد في جنيف عام ١٩٩٠: «لا علمَ لي بأي تصوُّر للموضعية يتوافق مع ميكانيكا الكَم. لذلك أعتقد أننا عالقون في اللاموضعية.» ربما شعر أينشتاين أنه «لا يوجد تعريف منطقي للواقع» يمكن أن يسمح بهذا، لكن لا بد أن يكون الاستنتاج أن الواقع، على حدِّ تعبيره، غير منطقي. غير أن السمة الأروع للأمر برُمَّته كثيرًا ما تُغفل. فعلى الرغم أن نقطة الانطلاق لمبرهنة بيل كانت محاولة لفهم فيزياء الكَم، وأن تلك الكلمات أُلقيَت في مؤتمر عن فيزياء الكَم، فإن هذه النتائج لا تسري على فيزياء الكَم فقط. بل تنطبق على العالم، على الكون. وسواء كنتَ تعتقد أن فيزياء الكَم، باعتبارها وصفًا للآلية التي يعمل بها العالَم، قد يُستعاض عنها بشيء آخرَ يومًا ما أم لا، فهذا لن يغيِّر في الأمر شيئًا. فالتجارب تبيِّن أن الواقع الموضعي لا ينطبق على الكون. وسواء اخترت أن تجد العزاء في الحفاظ على الواقع وقبول اللاموضعية، أو في الحفاظ على الموضعية ورفض الواقع، فتلك مسألة اختيار شخصي، كما سنرى. لكن لا يمكن أن تختار الاثنين (وإن كان «بإمكانك» ألا تختار أيًّا منهما، إذا أردت أن توجِع رأسك بحق). ولكن قبل أن نلتمس العزاء لرءوسنا المتعَبة، يجدُر بنا الاطلاع على مستجدات قصة التشابك، لِما لها من تطبيقات عملية مهمة.

تشمل هذه التطبيقات ظاهرة تُعرف باسم النقل الكمي عن بُعد. وهو يقوم حاليًّا على الحقيقة المثبتة بالتجارب التي تقول إنه في حالة تشابُك كِيانين كميين، فوتونين على سبيل المثال، فإن ما يحدث لأحدهما يؤثِّر على الآخر مهما كانت المسافة بينهما. فهما في الواقع جزءان منفصلان من كِيان كمي واحد. لا يمكن استخدام هذا في نقل المعلومات بسرعةٍ تفوق سرعة الضوء؛ لأن ما يحدث لكل جسيم ينطوي على احتمالية وعشوائية. فإذا حدث تعديل في فوتون وتحوَّل إلى حالة كمية عشوائية، فسينتقل الآخر في الوقت ذاته إلى حالة كمية أخرى. لكن مَن يشاهد الفوتون الثاني إنما يرى فقط تغييرًا عشوائيًّا يخضع لقواعد الاحتمالية. ولكي ينقل هذا التغيير معلومة، يجب على من عدَّل الفوتون الأول أيًّا كان أن يرسل رسالة بوسائل مألوفة (أبطأ من الضوء) ليخبر الباحث الثاني بما يحدث. لكن من المحتمل بتعديل فوتون بطريقةٍ ما أن يتغيَّر الفوتون الثاني إلى نسخةٍ طِبق الأصل (تُسمَّى أحيانًا مستنسَخًا) من الفوتون الأول، بينما تضطرب حالة الفوتون الأول. في الواقع، لقد نُقل الفوتون الأول نقلًا كميًّا عن بُعد إلى موقع الفوتون الثاني. لكن لما كان الفوتون الأول

في حالة اضطراب، فإن هذا لا يُعَد استنساخًا. مرة أخرى، لا بد من إتمام العملية بإرسال معلومات من خلال عملية دون سرعة الضوء. إن النقل الكمي عن بُعد يوصِّل المعلومات، لكنه يحتاج إلى «قناة كمية» و«قناة تقليدية».

بُذلت جهود بحثية جبَّارة في سبيل تطوير مثل تلك الأنظمة، لا سيما أن التقنية تمنح فرصةَ إنتاج شفرات لا يمكن اختراقها، وهو شيء بالغ الأهمية للصناعة والحكومات. والنقطة الجوهرية أنه إذا حاول أيُّ متلصِّص التنصُّت على القناة الكمية فستنهار البيانات، وهو ما يجعلها بلا قيمة ويكشف عن التداخل. ولا يهمُّ إذا قرأ المتلصِّص القناة التقليدية؛ فهي لن تفيد المتلصِّصين في شيء؛ إذ يمكن أن تُطبَع في الصحف أو تُنشَر على وسائل التواصل الاجتماعي، حسبما يشير كاتبو الشفرات. لا بد من وجود القناتَين لفكِّ شفرة المعلومات المشفَّرة. كذلك يدخل التشابك في تطوير أجهزة الكمبيوتر الكمية، وهو الموضوع الذي كثيرًا ما يتصدَّر عناوين الصحف هذه الأيام. فيتطلع الباحثون إلى إنترنت كمي آمن تمامًا، باستخدام الحوسبة الكمية والتشابك والنقل الكمي عن بُعد لمشاركة المعلومات بأمانٍ تام.

لقد غادرت هذه الفئة من التجارب المختَبَرَ نحو العالَم الواسع، وما وراءه. ففي عام ٢٠١٢، نقل فريقٌ صيني معلوماتٍ كميةً بهذه الطريقة عبر بحيرة تشينجهاي، لمسافة ٩٧ كيلومترًا. وفي العام ذاته، نقل فريقٌ أوروبي فوتوناتٍ لمسافة ١٤٣ كيلومترًا، بين جزيرتَي لا بالما وتنريفي في جُزر الكناري. وجدير بالذكر أن التجربتين أكَّدتا عدم جواز متباينة بيل، وهو الشيء الذي يعتبره علماء الفيزياء الآن من المسلَّمات إلى حدٍّ كبير، مثل حقيقة سقوط التفاح من أشجاره.

تضمَّنت تجربة جُزر الكناري محطاتٍ أرضية على جبال بارتفاع نحو ٢٤٠٠ متر فوق سطح البحر، حيث يؤدي الهواء الرقيق إلى تقليل التداخل الجوي. لكن الهواء يزداد رقةً كلما ارتفعنا، علمًا بأن الارتفاع لأقل من ١٤٣ كيلومترًا عن جزيرة لا بالما يجعلنا على حافة الفضاء. في عام ٢٠١٦، أطلقت الصين القمر الصناعي ميكيوس (نسبةً لفيلسوف صيني من العصور الغابرة)، أُرسلت منه حُزَم إشعاعية من أزواج الفوتونات المتشابكة لمحطاتٍ مستقبِلة متفرقة على جبال التبت يفصل بينها ١٢٠٠ كيلومتر. كان القمر الصناعي يتحرَّك بسرعة ٨ كيلومترات في الثانية تقريبًا أثناء التجربة، لكن مع الحرص على استهداف حُزَم الفوتونات بدقة. أكَّد سلوك الفوتونات التوقُّعات المتسِقة مع مبرهنة بيل، وهو ما لم يُثِر اندهاش أحد، لكنه كان انتصارًا للتكنولوجيا. ورغم أن التجربة لا يصلح إجراؤها إلا ليلًا؛

لأن أشعة الشمس تبهر أجهزة الكشف وتحجُب عنها الرؤية، ومعدَّل نجاح «استعادة» الفوتونات على الأرض كان واحدًا من كل ستة ملايين أرسلها القمر الصناعي (لحسن الحظ أن الفوتونات رخيصة)، توجد بالفعل خططٌ لإطلاق مجموعة من الأقمار الصناعية بأشعةٍ أقوى يمكن الكشف عنها حتى في النهار، لتضع الأساس لشبكة اتصال كمية، ولِنقلِ الفوتونات إلى القمر الصناعي من الأرض. ربما سيكون هناك المزيد من التطور، والمزيد من العناوين الرئيسية، عند قراءتك هذا. لكن بينما قد يستمر خبراء التكنولوجيا في «التزام الصمت وإجراء العمليات الحسابية»، لا يزال علماء الفيزياء غير قادرين على الاتفاق على مغزى كل ذلك، ألا وهو «لماذا» يسير العالَم بهذا الشكل الذي يسير به.

حان الوقت للنظر بمزيد من التفصيل في بعض الطرُق التي يلتمسون بها العزاء. لكن على سبيل العودة إلى أرض الواقع، فكِّر مرةً أخرى في تجربة الثقبَين. يبدو كل إلكترون في التجربة أنه «يعلم» عدد الثقوب المفتوحة، وأين سيذهب. فهل التشابك — الفعل الشبحي عن بُعد — يلعب دورًا في هذه القصة كذلك؟ إذا كان زوج من الفوتونات ينطلق في اتجاهين متضادين جزءًا من نظام كمي واحد في الواقع، فهل لنا أن نعتبر تجربة الشق المزدوج برُمَّتها والإلكترون — كل الإلكترونات — جزءًا من نظام كمي واحد؟ ربما يعلم الإلكترون الثقوب المفتوحة؛ لأن حالة الثقوب هي أيضًا جزء من حالة الإلكترون. لكن حتى فكرة التشابك كانت لا تزال في علم الغيب حين بحث علماء الفيزياء عن عزاء لأول مرة في تفسير لميكانيكا الكَم صار هو المعيار المعترَف به لعقود.

هوامش

(١) ناقَش أينشتاين هذه المفاجأة بالفعل بمصطلحات مختلفة قليلًا، لكن صيغة اللف المغزلي أسهل في تناولها.

العزاء الأول:
تفسير كوبنهاجن المتواضِع

يقوم تفسير فيزياء الكَم الذي صار الطريقة المعيارية لرؤية الأشياء طيلةَ عقود على فكرة الموجات؛ وبدرجة كبيرة على نسيان التحذير الخاص بـ «كأن». في عشرينيات القرن العشرين، كان علماء الفيزياء يعلمون بالفعل أن عالم الكَم يمكن وصفُه بواحدة من طريقتَين رياضيتين. إحداهما تتضمن الموجات، وتلخِّصها معادلة شرودنجر. أما الأخرى فتنطوي على أرقامٍ محضة، في صورة مجموعات تُسمَّى مصفوفات، طُوِّرت من بحث فيرنر هايزنبرج وبول ديراك. وقد أعطت كلتا الطريقتين نفس الإجابات، فكان العمل بإحداهما مسألةَ تفضيل، ولما كان أغلب علماء الفيزياء معتادين على المعادلات الموجية إلى حدٍّ ما، كانوا يختارونها. غير أن ما تحسبه في أي حسابات كمية هو العلاقة بين حالتَي نظامٍ ما، حيث قد يكون النظام إلكترونًا، أو تجربة الثقبين، أو (نظريًّا) الكون بأكمله، أو أي شيء فيما بين الإلكترون والكون. فإن كان لديك مجموعة من المعايير تصف النظام في الحالة «أ»، فيمكنك حساب احتمالية تحوُّله إلى الحالة «ب» بعد فترة زمنية محددة. لكن لا يوجد ما يخبرك بما سيحدث أثناء ذلك.

المثال النموذجي على ذلك هو الإلكترون داخل الذرة. يمكن، في بعض التقديرات، أن نرى الإلكترونات كأنها (ذلك التحذير) في مدارات مكافئة لكميات مختلفة من الطاقة. حين تطلق الذرة طاقةً في شكل ضوء، يختفي إلكترون من أحد المدارات ويظهر في مدارٍ آخر أقرب إلى نواة الذرة. وحين تمتصُّ الذرة ضوءًا، يختفي إلكترون من أحد المدارات ويظهر في مدارٍ أبعدَ عن نواة الذرة. ولكنه لم «يتحرك» من مدارٍ إلى الآخر. كلُّ ما هنالك أنه كان في البداية هنا، ثم صار هناك. ويُعرَف هذا بالقفز الكمي (أو القفزة الكمية).[1] أراد

نيلز بور
«جيتي إيميدجز»

شرودنجر بميكانيكا الموجات الخاصة به تفسيرَ ما يحدث أثناء القفزة، لكنها لم تفعل، وفي ذلك قال: «إن بقيت مسألة القفز الكمي اللعينة هذه برُمَّتها لزمن طويل حقًّا، فسوف أندم على تدخُّلي في نظرية الكَم يومًا.» للأسف يا شرودنجر، لقد بقيت، وما زالت باقية. ومنهج المصفوفة أكثر أمانة وصدقًا؛ إذ لا يدَّعي أنه يحاول إخبارنا بما يحدث بين الحالة «أ» والحالة «ب»، لكنه يمنح عزاءً أقلَّ مما تمنحه معادلة شرودنجر.

صار ما ظل لعقودٍ الأسلوبَ القياسي للنظر إلى عالَم الكَم يُعرَف بتفسير كوبنهاجن؛ لأن نيلز بور الذي جعل يروِّج له ترويجًا، كان من الشخصيات المؤثِّرة التي كانت تقيم في تلك المدينة. وقد أثارت هذه التسمية (الذي أطلقها في الواقع فيرنر هايزنبرج على مجموع الأفكار التي تضمَّنها هذا التفسير) قدرًا كبيرًا من الضيق لماكس بورن، الذي لم يكن عضوًا في فريق بور، ولم يكن يعمل في كوبنهاجن، لكن كانت أفكاره عن الاحتمالية جزءًا لا يتجزأ من التفسير. فقد كان بور مسيطرًا تمامًا على أي نقاش عن فيزياء الكَم في نهاية عشرينيات القرن العشرين، حتى إنه علاوةً على أن جعل بلدته معروفة على هذا النحو، ظل ينتقد

بشدة تفسيرًا بديلًا عمليًّا تمامًا لميكانيكا الكَم، حتى إنه ظل مغفلًا طيلة عقدَين. وسوف أقدِّمه بصفته العزاء الثاني.

كان بور في الأساس براجماتيَّ الطابع، يروق له تجميعُ أفكارٍ متفرقة من هنا وهناك معًا ليصنع منها مجموعةَ أفكار صالحة للتطبيق، دون أن يشغل باله كثيرًا بما تعنيه في مجملها. ونتيجةً لذلك لا توجد جملة مباشرة محدَّدة تفيد بما يعنيه تفسير كوبنهاجن، وإن كان بور قد اقترب من البوح به في محاضرة ألقاها في كومو، في إيطاليا، عام ١٩٢٧؛ أي قبل أن يكتسب التفسير اسمه بمدة طويلة. كان المؤتمر الذي أُلقيت فيه المحاضرة لحظةً فارقة في عالَم الفيزياء؛ إذ كانت إيذانًا ببدء مرحلة تزويد علماء الفيزياء بالأدوات التي سيحتاجون إليها لكي «يَلزموا الصمت ويؤدوا العمليات الحسابية»، مطبِّقين حلول ميكانيكا الكَم على مشكلاتٍ عملية تتعلَّق بالذرَّات والجزيئات (مثل الكيمياء والليزر والبيولوجيا الجزيئية) من دون الحاجة للتفكير في أساسياتِ ما تعنيه المسألة برُمَّتها.

وقد طال أسلوبُ بور البراجماتي تفسيرَه. فقد قال إننا لا نعلم شيئًا سوى نتائج التجارِب. وهذه النتائج تعتمد على ما صُمِّمت التجارب لقياسه؛ أي على الأسئلة التي نختار طرحها بشأن عالَم الكَم (بشأن الطبيعة). وهذه الأسئلة تتأثَّر بخبراتنا اليومية في الحياة، على نطاق أكبر بكثير من الذرات وغيرها من الكِيانات الكمية. لذا لنا أن نخمِّن أن الإلكترونات جُسيمات، ونُعِدَّ تجربة لاختبار ذلك بطريقة واضحة من خلال قياس كمية الحركة لأحد الإلكترونات، معتبرين الإلكترون كرة بلياردو صغيرة. وللغرابة أننا حين نحذو هذا الحذو، تقيس التجربة كمية حركة الإلكترون؛ وهو ما يؤكد اعتقادنا بأن الإلكترونات جسيمات. لكن لنا صديقة لديها رأيٌ مختلف. فهي ترى أن الإلكترونات موجات، وتصمِّم تجربة لقياس الطول الموجي للإلكترون. وللغرابة أن تجربتها تعطينا قياسًا للطول الموجي؛ وهو ما يؤكد اعتقادها بأن الإلكترونات موجات. لكن بور لا يرى مشكلة. فمجرد تصرُّف الإلكترونات «كأنها» جسيمات حين تكون بصدد البحث عن جسيمات، أو «كأنها» موجاتٌ حين تكون بصدد البحث عن موجات، لا يعني أنها أيٌّ منهما، فضلًا عن كليهما. فأنت تجِدُ ما تتوقعه، وما تتوقعه يتوقف على ما تختار البحث عنه. فلا جدوى، بحسب تفسير كوبنهاجن، من التساؤل عن ماهية كِيانات كمية مثل الإلكترونات والذرات، أو ما تفعله، حين لا يكون هناك مَن يقوم بقياسها، أو رصدها إذا شئت.

حتى الآن يبدو بور براجماتيًّا لأقصى الحدود، ولا يوجد ما يدعو للانزعاج الشديد. بيد أن بور ما لبث أن زاد الموقف تعقيدًا. وهنا يأتي دور الاحتمالية. حين توصَّل شرودنجر إلى

معادلته الموجية، كان يراها وصفًا دقيقًا للإلكترون (أو كِيانًا كميًّا آخرَ؛ فالإلكترونات هي أبسط مثال يُستخدم للتوضيح). كان من وجهة نظره أن الإلكترون «كان» موجة. لكن بور أخذ فكرة شرودنجر وانطلق بها، دامجًا بينها وبين أفكار بورن عن دور الاحتمالية ليخرج بمزيج عجيب ومزعج، كان ناجعًا (وما زال)، فيما يتعلق بالحسابات الكمية، لكنه يسبِّب لك صداعًا حين تتوقف لتأمُّله. إن المعادلة التي يقدِّمها لنا شرودنجر، في هذه الصورة الجديدة، يُنظَر إليها باعتبارها «موجة احتمالية»، ويتحدَّد احتمال العثور على أي إلكترون عن طريق «مربع الدالة الموجية»، الذي يتم التوصُّل إليه بالأساس بضرب المعادلة التي تصف الموجة في نفسها، في أي مرحلة. حين نُجري قياسًا، أو نرصد كِيانًا كميًّا، «تنهار» الدالة الموجية عند نقطةٍ ما، تتحدَّد من خلال الاحتمالات. لكن رغم أن بعض المواضع أرجحُ من غيرها، فقد يظهر الإلكترون، نظريًّا، في أي مكان انتشرت فيه الدالة الموجية. وثَمَّة مثال بسيط جدًّا يُبرز غرابة هذا السلوك.

لنتخيَّل إلكترونًا وحيدًا محبوسًا داخل صندوق. تنتشر موجة الاحتمالية لتملأ الصندوق بالتساوي؛ وهو ما يعني تساوي احتمالات العثور على الإلكترون في أيٍّ موقع داخل الصندوق. الآن ضعْ فاصلًا في منتصف الصندوق. يقتضي المنطق البديهي أن يكون الإلكترون حتمًا محبوسًا الآن في أحد نِصفَي الصندوق. لكن تفسير كوبنهاجن يقول إن موجة الاحتمالية ما زالت تملأ كلا نصفَي الصندوق، وإن الإلكترون قد يكون موجودًا على أيٍّ من جانبَي الفاصل وتتساوى الفرص في ذلك. والآن قسِّم الصندوق إلى جزأين من منتصف الفاصل. احتفِظ بأحد نصفَي الصندوق في مختبَرك، وضعِ النصف الآخر في صاروخ لينطلق به إلى المريخ. تظل احتمالات ظهور الإلكترون في الصندوق الذي في المختبَر أو على المريخ متعادلة، حسب رأي بور. والآن افتح الصندوق الذي في مختبرك. إما أنك ستجد الإلكترون أو لن تجده. لكن في كلتا الحالتين انهارت الدالة الموجية. إن كان صندوقك فارغًا، فالإلكترون في المريخ، وإن كان الإلكترون معك، فالصندوق الآخر فارغ. «ليس» هذا مثل القول بأن الإلكترون «كان دائمًا» في أحد نصفَي الصندوق؛ إذ يصرُّ تفسير كوبنهاجن على أن الانهيار يحدث فقط عند تفحُّص محتويات الصندوق الذي في المختبر. وهذا هو جوهر الفكرة وراء «مفارقة» بحث «إي بي آر» ولغز شرودنجر الشهير الذي يتضمَّن القطة الميتة الحية. لكن قبل الخوض في تلك القصة، أودُّ أن ألقي نظرة على طريقة «شرح» تفسير كوبنهاجن لتجربة الثقبَين.

وفقًا لتفسير كوبنهاجن الذي تعلَّمته حين كنت طالبًا، والذي ما زال العديد من الطلاب يتلقَّونه في الوقت الحاضر، باعتباره السبيل إلى «فهم» ميكانيكا الكَم، يُطلَق إلكترونٌ من

إرفين شرودنجر
«جيتي إيميدجز»

مصدرٍ ما — مدفع إلكتروني — في جانب من التجربة باعتباره جسيمًا. يتحلل الإلكترون في الحال متحولًا إلى «موجة احتمالية» تنتشر في أنحاء التجربة وتتجه نحو شاشة الكاشف على الجانب الآخر. تمرُّ هذه الموجة عبر الثقوب المفتوحة أيًّا كان عددها، متداخلةً مع نفسها أو غير متداخلة حسب الاقتضاء، ويصل إلى شاشة الكاشف في صورة نمط من الاحتمالات، يعلو في بعض الأماكن وينخفض في أخرى، تنتشر في أنحاء الشاشة. في تلك اللحظة، «تنهار» الموجة وتعود جسيمًا، يتم اختيار مكانه على الشاشة عشوائيًّا، لكن بما يتوافق مع الاحتمالات. ويُسمى هذا «انهيار الدالة الموجية». ينتقل الإلكترون كموجة لكنه يصل كجسيم.

بيْد أن الموجة تحمل أكثرَ من مجرد احتمالات. إذا كان للكِيان الكمي حالاتٌ عدة يمكن أن يكون فيها، مثل الإلكترون الذي قد يدور لأعلى أو يدور لأسفل، فالدالة الموجية تتضمن بطريقةٍ ما كلتا الحالتين، ويُسمَّى الموقف «تراكب الحالات»، وكذلك تتحدَّد الحالة التي يستقر عليها الكِيان عند مرحلة الكشف، أو التفاعل مع كِيان آخر، في لحظة انهيار

فيرنر هايزنبرج
«جيتي إيميدجز»

الدالة الموجية. في محاضرة في جامعة سانت أندروز عام ١٩٥٥، قال فيرنر هايزنبرج إن «الانتقال من «الممكن» إلى «الفعلي» يحصل أثناء عملية الرصد.»

يصلح هذا كطريقة لحساب السلوك الكمي، كأن الأشياء التي من قبيل الإلكترونات كانت تتصرَّف هكذا بالفعل. لكنه كذلك يطرح العديد من الألغاز. ولعل أحد أكثر هذه الألغاز استغلاقًا تجربةٌ يُطلَق عليها «الاختيار المتأخر»، التي اختلقها عالِم الفيزياء جون ويلر. بدأ ويلر تجربته انطلاقًا من حقيقة أن الفوتونات عند إطلاقها، كلٌّ واحدة على حدة خلال تجربة الثقبين، تُكوِّن نمطَ تداخُل على شاشة الكاشف. لكن حسب تفسير كوبنهاجن، إذا وضعنا جهازًا بين الثقبين وشاشة الكاشف لرصد الثقب الذي تمرُّ عبره الفوتونات، فسيختفي نمط التداخل؛ وهو ما يدل على أن كل فوتون قد مرَّ بالفعل عبر ثقب واحد فقط من الثقبين. يحدث «الاختيار المتأخر»؛ لأننا نستطيع أن نقرِّر إذا ما كنا سنراقب الفوتونات «بعد» مرورها من الحاجز ذي الثقبين أم لا. لا شك أن ردود الأفعال البشرية ليست سريعةً بما يكفي للقيام بذلك. ولكن أُجريت تجارب باستخدام أجهزة رصد أوتوماتيكية للقيام بذلك تحديدًا؛ إذ يتم تشغيل أجهزة الرصد أو إغلاقها بعد مرور الفوتونات من الثقبين.

تبيِّن هذه التجارب أن نمط التداخل يختفي بالفعل عند رصد الفوتونات؛ وهو ما يعني أن كل فوتون (أو الموجة الاحتمالية) يمرُّ من خلال ثقب واحد فقط، وإن كان قرار رصد الفوتون قد حُسِم فقط بعد مرورها من الثقبين.

أشار ويلر إلى أن من الممكن تخيُّل تجربةٍ مماثلة على مستوًى كوني حرفيًّا. ففي ظاهرة تُعرف باسم التأثر العدسي التثاقلي، يتركَّز الضوء القادم من جسمٍ بعيد، نجم زائف مثلًا، بفعل جاذبية جسم دخيل، وليكن مجرة مثلًا، بحيث يتبع مسارين (أو أكثر) حول عدسة الجاذبية. يصنع هذا صورتين للجسم في الكواشف الموجودة هنا على الأرض. بدلًا من تكوين هاتين الصورتين، يجوز نظريًّا دمج الضوء القادم من طرق شتَّى حول العدسة لتكوين نمط تداخل، ينتج عن اتباع الموجات كلا المسارين حول العدسة. إنها نسخة كونية لتجربة الثقبين. لكن يمكن عندئذٍ مراقبة الفوتونات قبل أن تتسنَّى لها فرصة تكوين نمط التداخل لنرى أي طريق سلكته حول العدسة. في تلك الحالة، ووفقًا لنتائج التجارب المختبرية، سيختفي نمط التداخل. قد يكون النجم الزائف على بُعد ١٠ مليارات سنة ضوئية، وقد تكون المجرة القائمة مقام عدسة الجاذبية على بُعد خمسة مليارات سنة ضوئية. لكن بناءً على كلِّ ما نعرفه من التجربة، يتأثَّر ما كانت الفوتونات تفعله قبل مليارات السنين وعلى بُعد مليارات السنين الضوئية بما نختار قياسه هنا والآن. فما الذي يحدث؟ «يأمرنا تفسير كوبنهاجن بألا نطرح مثل تلك الأسئلة»، على حدِّ تعبير ويلر نفسه.[٢] إنه ليس تفسيرًا رائعًا للغاية إذَن.

يقول تفسير كوبنهاجن، في الأصل، إن الكِيان الكمي لا تكون له خاصية معينة — أي خاصية — حتى يتم قياسه. وهو ما يثير شتَّى التساؤلات حول مقوِّمات القياس. هل يجب أن يكون لذكاء البشر دخلٌ في ذلك؟ هل يكون القمر في مكانه حين لا ينظر إليه أحد؟ هل يوجد الكون فقط لأن البشر لديهم الذكاء الكافي لملاحظته؟ أو هل التفاعل بين كِيان كمي وجهاز كاشف يُعَد قياسًا؟ أو أين بين هذين الطرفين تجد الحدَّ الفاصل بين عالَم الكَم وعالَم فيزياء نيوتن القديمة السلسة «الكلاسيكي»؟ كان هذا النوع من التساؤلات هو ما حدا بشرودنجر للتوصل إلى لُغزه الشهير حول القطة الحبيسة في حجرة (وقد استخدم الكلمة الألمانية لـ «حجرة»، وليس كلمة «صندوق») مع جهاز مرعب مهيَّأ لقتل القطة، لكنها في حالتَي تراكب بنسبة متساوية. على سبيل تحديث مثاله، تخيَّل كاشفًا في حجرةٍ يقيس دوران الإلكترون. إذا كان لأعلى، دار الجهاز وماتت القطة. وإن كان لأسفل، كانت القطة في مأمن. فالإلكترون يكون في حالةِ تراكب قبل رصده. لكن لا يوجد أحد في الحجرة

ليرى ما يحدث عند دوران الكاشف. هل تنهار الدالة الموجية أم لا؟ هل تكون القطة هي الأخرى في حالة من التراكب، ميتة وحية في آنٍ واحد، حتى يفتح أحد الأشخاص باب الحجرة ليُلقي نظرة؟

يتضمَّن تطويري لهذه الفكرة اثنتين من نسل القطة (بافتراض أنها بقيت على قيد الحياة) سأسمِّيهما هِرَّتَي شرودنجر.[٣] تعيش هاتان الهرَّتان المتطابقتان المنحدرتان من نسل قطة شرودنجر في كبسولتين فضائيتين متطابقتين، مجهَّزتين بكل ضروريات الحياة، بل وبعض الألعاب للهو بها. تتصل الكبسولتان بواسطة أنبوب، وفي منتصف الأنبوب يوجد صندوق يحتوي على إلكترون واحد. تملأ موجة الإلكترون الصندوق على نحوٍ متساوٍ. يُوضع فاصل لتقسيم الصندوق إلى نصفين وللفصل بين الكبسولتين؛ وبذلك تكون كل كبسولة متصلةً الآن بصندوقٍ يحتوي على نصف موجة إلكترون. تذهب الكبسولتان في رحلتين طويلتين منفصلتين، في اتجاهين متعاكسين وبالسرعة نفسها بالضبط، حتى تصيرا على بُعد عامين ضوئيين. ويكون لكلٍّ منهما كاشف لرصد وجود الإلكترون. بعد مدة زمنية معينة (ليس بالضرورة أن تكون المدة واحدة في كل كبسولة) يُفتَح نصف الصندوق في كل كبسولة عن طريق جهاز أوتوماتيكي. إن كان الإلكترون موجودًا فيه، تموت القطة التي صارت بالغةً الآن. وإن لم يكن موجودًا، عاشت القطة. لكن لا يوجد مُراقِب ذكي ليعلم ما يحدث. فهل كلٌّ من القطتين في حالة تراكُب؟ يستحوذ كائن فضائي ذكي في مركبة فضائية عابرة على إحدى الكبسولتين وينظر بداخلها، فيرى إما قطة ميتة أو قطة حية. هل هذه هي اللحظة التي تنهار فيها الدالة الموجية في «كلٍّ» من الكبسولتين، فيكون ما يراه الفضائي هو ما يحدِّد مصير القطة الأخرى الكائنة على بُعد عامين ضوئيين؟ نعم، وفقًا لتفسير كوبنهاجن المتواضع.

ما البديل إذَن؟ البدائل عديدة، وإن كنت قد تراها مثيرةً للضحك تمامًا مثل تفسير كوبنهاجن، وأولها ذلك الذي شرع يظهر في نفس توقيت ظهور تفسير كوبنهاجن، وكاد بور أن يقضي عليه في مهده، ولكن كُتب له البقاء.

هوامش

(١) على خلافِ ما يعتقد المعلِنون، القفزة الكمية تغيير صغير جدًّا يأتي عشوائيًّا.

(٢) اقتبسه فيليب بيل.

(٣) أخذ علماء فيزياء الجسيمات الاسم واستخدموه في سياقٍ آخر. وذاك حقٌّ أصيل لهم.

العزاء الثاني:
تفسير الموجة الدليلية غير المستحيل تمامًا

سعى لوي دي بروي إلى حل لغز ازدواجية الموجة والجسيم لا بالقول إن كِيانًا مثل الإلكترون قد يكون موجة أو جسيمًا، حسب الطريقة التي تنظر إليه بها، ولا بالقول إنه موجة وجسيم في الوقت ذاته. فقد أشار إلى احتمال وجود كِيانين منفصلين، موجة وجسيم، يعملان معًا من أجل تحقيق النتائج التي نراها في تجاربنا.

كان دي بورلي أحدَ رواد فكرة الموجات في ميكانيكا الكَم. فكان هو مَن أوعَز بأنه، كما أشار أينشتاين، ما دام من الممكن لشيء كنا نراه فيما سبق موجات (الضوء) أن نعتبره جسيمات (الفوتونات) أيضًا؛ إذَن من الممكن للأشياء التي كنا نعتبرها جسيمات (الإلكترونات) أن تُعامَل أيضًا باعتبارها موجات. وسرعان ما أكَّدت التجارب هذا الطرح، وقاد شرودنجر لوضع معادلته الموجية. كان من البديهي أن يُمعن دي بروي التفكيرَ في معنى ازدواجية الموجة والجسيم هذه، وطرح حله للغز في نفس المؤتمر الذي عُقد في كومو، حيث وضع بور قواعدَ ما صار معروفًا بتفسير كوبنهاجن.

يُعَد تفسير «الموجة الدليلية» لدي بروي، من عدة نواحٍ، الطريقَ الأبسط والأوضح لتفسير ازدواجية الموجة والجسيم. فقد اقترح أن الموجة والجسيم كلاهما حقيقي، وأن الموجة (التي صارت معروفة بالموجة الدليلية) توجِّه الجسيم إلى وِجهته، مثل مَن يركب الأمواج في البحر. في تجربة الثقبين، تنتشر الموجة الدليلية من خلال كلا الثقبين، وتتداخل مع نفسها لتصنع نمطًا من الموجات المتداخلة. تنتشر الجسيمات التي تُطلَق خلال تجربة الثقبين بتفاوتات طفيفة في السرعة أو الاتجاه؛ لذا تتخذ في النهاية اتجاهات مختلفة قليلًا، متَّبعةً الموجات لبناء نمط تداخُل على شاشة الكاشف. نحن نقيس خواص الجسيمات،

لكننا لا نستطيع أبدًا قياس خواص الموجة، وإنما نستدل فقط على وجودها من سلوك الجسيمات، التي تظل خفية عنا حتى تُكتشف. وصار هذا النهج معروفًا بنظرية «المتغيرات الخفية».

ولنا في أوراق اللعب المختلطة جيدًا خيرُ تشبيه. تخيَّلْ مجموعةً من أوراق اللعب صغيرةً بما يكفي لأن تخضع لقوانين فيزياء الكَم، داخل جهازٍ دون مجهري يُمكِّنك من قلب الأوراق واحدةً بواحدة للكشف عن قيمتها. وفقًا لنظريات المتغيرات الخفية، حين تقلب الورقة تتحدَّد القيمة التي تراها عشوائيًّا من بين الاحتمالات الاثنين والخمسين التي تتيحها لك المجموعة. فاحتمال أن تكون البطاقة حمراء ٥٠:٥٠، واحتمال أن تكون ورقة الخمسة إسباتي ١:٥٢، وهكذا دوالَيك. كانت قيمة الورقة مخفيَّة حتى نظرت إليها. لكنها طالما كانت بتلك القيمة، حتى وأنت لا تنظر إليها (وبذلك المفهوم لا تكون متغيرًا بحق!). بعد رؤية هذه الورقة الأولى — لنفترض أنها كانت بالفعل خمسة إسباتي — يصير بذلك احتمال العثور على الخمسة إسباتي صفرًا، واحتمال العثور على ورقة حمراء ٥١:٢٦، وهكذا دوالَيك. قارِن هذا بتفسير كوبنهاجن، الذي يقول إن الورقة تظل بلا قيمة حتى النظر إليها. إن فعل النظر هو ما يُرغمها على الاختيار من بين الاحتمالات المتاحة. ولكن في كلتا الحالتين، إذا ظلِلتَ تقلِّب الأوراق فسترى النوع نفسه من نمط العشوائية الذي تُمليه الاحتمالات؛ فلن تجد مثلًا ورقة الخمسة إسباتي مرتين. لا تفرِّق التجربة بين تفسير وآخر. لكنَّ ثَمَّة اختلافًا هائلًا في تفسير الشيء الذي أدَّى لظهور ذلك النمط.

يشبِّه ديفيد ليندلي الأمر بلاعب جولف يتدرَّب على منطقة حفرة الجولف. يقذف اللاعب مجموعة من كرات الجولف موجَّهةً كلها للحفرة نفسها، ولكنَّ كلًّا منها تنطلق بسرعة مختلفة قليلًا متجهةً في اتجاه مختلف قليلًا نتيجةً للتفاوتات البسيطة الحتمية في طريقة ضرب اللاعب للكرات. كما أن سطح الملعب ليس منبسِطًا تمامًا. ومن ثَم تذهب كل كرة في اتجاه مختلف قليلًا، وتسير مسافة مختلفة بعض الشيء. بعد أن ضرب اللاعب مائة كرة، تنتشر الكرات في أرجاء السطح العشبي في نمطٍ حدَّده عدم انتظام السطح الذي انطلقت عليه. لكن يمكن نظريًّا تحديد الموقع النهائي لكل كرة إذا كنت تعرف شكل السطح والسرعة والاتجاه الذي ابتدأت به الكرة حركتها معرفة دقيقة. من هذا المنطلَق، يكون تفسير الموجة الدليلية حتميًّا، مستبعدًا عنصر الاحتمال المرتبط بانهيار الدالة الموجية، إضافة إلى استبعاد انهيار الدالة الموجية نفسه. فلكل جسيم خواصُّ محدَّدة تظل معه طوال الوقت. كلُّ ما هناك أننا لا نعلم تلك الخواص حتى نراها، شأن أوراق اللعب المختلطة جيدًا.

لوي دي بروي
«جيتي إيميدجز»

شرح دي بروي حجةَ الموجة الدليلية في مؤتمر كومو شرحًا تفصيليًّا، فلم يكن محض نقاش مبهَم على غِرار ما قدَّمته. وحين عاد جون بيل لتأمُّلها بعد فترة من الزمن، كتب في عام ١٩٨٧ في كتابه «اليسير والمستعصي في ميكانيكا الكَم»: «تبدو هذه الفكرة أكثرَ بديهية وبساطة من أن تحل معضلة الموجة والجسيم بأسلوب واضح ومألوف هكذا، حتى إن هذا التجاهل العام الذي قوبلت به يبدو لي لغزًا كبيرًا.»

إنه ليس باللغز الكبير في الواقع. والسبب الأول في ذلك، كما ذكرت، أن بور، بمساعدة فولفجانج باولي وبتحريض منه، انهال على الفكرة بالسخرية والاستخفاف حتى قضى على دي بروي الأكثر منهما حياءً، وكان ذلك لقوة شخصيتَيهما وذيوع صيتهما لا لصحة حُججهما. لكن الصيت ليس كل شيء. السبب الثاني وراء تحطُّم فكرة دي بروي، إلى جانب نظريات المتغيرات الخفية الأخرى، هو «البرهان» الخاطئ الذي توصَّل إليه فون نيومان على استحالة مثل تلك النظريات. امتنع دي بروي عن أي محاولة للترويج لفكرته، فنسيَها الفيزيائيون تمامًا، حتى إن ديفيد بوم عندما توصَّل إلى فكرةٍ شبيهة في أوائل خمسينيات القرن العشرين لم يكن يعلم أي شيء عن العمل السابق. وأدَّى هذا في البداية إلى بعض

التوتر بينه وبين دي بروي، الذي انزعج لعدم الاعتراف بفضله، ولكن هدأ هذا الخلاف، وصارت فكرةُ الموجة الدليلية الآن يُشار إليها عادةً بتفسير دي بروي-بوم.

إن الطريقة التي توصَّل بها بوم لصيغته للموجة الدليلية ذاتُ أهمية خاصة في السياق الحالي. فقد كتب بوم كتابًا دراسيًّا عن فيزياء الكَم حين كان باحثًا شابًّا، نشره في أوائل عام ١٩٥١، شرح فيه بالتفصيل تفسير كوبنهاجن حتى إنه نال استحسان باولي نفسه، وهو المعروف بكونه ناقدًا لاذعًا لأي شخص يراه دونه على المستوى الفكري (وهو ما يعني الكل). كذلك شعر أينشتاين أن بوم قد أبلى بلاءً حسنًا في شرح تفسير كوبنهاجن قدرَ ما استطاع. غير أنه تواصل مع بوم وشدَّد على رأيه الخاص بشأن خطأ تفسير كوبنهاجن. فقرَّر بوم أن يرى إن كانت ثَمَّة طريقة أخرى لشرحِ ما يحدث في عالَم الكَم، وسرعان ما اكتشف أن هناك طريقة أخرى بالفعل. كان نموذجه للموجة الدليلية مكافئًا لتفسير كوبنهاجن رياضيًّا، وقدَّم نفس الإجابات على الأسئلة الكمية التي قدَّمها ذلك التفسير؛ فلم يكن يختلف تمامًا في أساسه عن نموذج دي بروي، لكنه زاد عنه قليلًا من ناحية وصف التفاعل بين عالَم الكَم والعالَم التقليدي. غير أنه كان قائمًا على المتغيرات الخفية، التي قال عنها فون نيومان إنها مستحيلة. ولذلك السبب على الأخص (وكذلك لما كان يُشاع عنه، على الأقل في الولايات المتحدة، بشأن تعاطفه مع الشيوعية إبَّان الحملة المكارثية ضد الشيوعيين)، لم يكترث العديد من الفيزيائيين ببوم؛ إذ كانوا يرون أنه ما دام فون نيومان قال إنه مستحيل فلا بد أن في النموذج خطأً. وكان هناك استثناءٌ واحد مهم.

في عام ١٩٥٢ كان جون بيل يعمل في مؤسسة بحوث الطاقة الذرية التابعة للمملكة المتحدة في مالفيرن، في ورشسترشاير، واختِير ليكون واحدًا من العلماء الشبان الذين سُمح لهم بإجازة لمدة عام لإجراء أبحاث. فاختار أن يذهب للعمل والدراسة في جامعة برمنجهام، حيث تقصَّى نظرية الكَم، واطَّلع على فكرة الموجة الدليلية التي وضعها بوم. وفي الحال تبنَّى وِجهة النظر المضادَّة لوجهة نظر أغلب الفيزيائيين. ما دامت فكرة بوم منطقية، وقال فون نيومان إنها مستحيلة، فهذا يعني حتمًا أن «فون نيومان» هو الذي ارتكب خطأً. لسوء الحظ، كان كتاب فون نيومان قد نُشر آنذاك بالألمانية فقط، التي لم يكن بيل يجيد قراءتها، واضطُر بيل إلى العودة لوظيفته اليومية في تصميم مُسرعات الجسيمات، قبل الانتقال إلى المختبر الأوروبي لفيزياء الجسيمات عام ١٩٦٠. بحلول عام ١٩٦٣، نُشر كتاب فون نيومان باللغة الإنجليزية، واكتشف بيل الخطأ، وراح يدوِّن نتائجه خلال إجازة تفرُّغ علمي لمدة عام في الولايات المتحدة. وكذلك وضع صيغته الخاصة لنظرية المتغيرات

ديفيد بوم
«جيتي إيميدجز»

الخفية كدليل إضافي على أن فون نيومان كان مخطئًا. لكنه أوضح، كما ذكرت، أن كل نظريات المتغيرات الخفية، بما في ذلك فكرة الموجة الدليلية، غير موضعية. وكما ذكر في أحد الأبحاث التي كتبها وهو بالولايات المتحدة: «إنه اشتراط الموضعية، أو بتعبير أدقَّ ألا تتأثر نتيجةُ قياس أُجري على نظامٍ ما بالعمليات التي جرت على نظامٍ بعيد كان قد تفاعل معه في الماضي، هو مكمن المشكلة الأساسية» في أشياءَ من قبيل لغز إي بي آر (أو فكرتي عن هِرتَي الفضاء بالطبع، حيث يظل الإلكترون دائمًا في أحد نصفَي الصندوق ولا يوجد تراكب وفقًا لنظرية دي بروي-بوم). يقتضي تفسير الموجة الدليلية صراحةً أن تظل أيُّ خواص آنية للجسيم، كالسرعة، أو طريقة تغييره لاتجاه حركته، معتمدةً على الخواص الكائنة «في اللحظة ذاتها» لكل الجسيمات الأخرى التي تفاعل معها.

رغم أنني لم أرَ شخصًا آخر يقول بهذا الارتباط، فإن هذا يذكِّرني بلغزٍ يُعرف بمبدأ ماخ. لفت عالِم الفيزياء إرنست ماخ — الذي كان له تأثير مهم على أينشتاين — الانتباهَ إلى اللغز الذي ظل يؤرِّق العلماء بالفعل منذ عصر نيوتن على الأقل. وهو يتعلق بالقصور. إنك

حين تدفع شيئًا، فإنه يقاوم تحريكه. لا أتحدَّث عن الاحتكاك، وإنما عن موقف مثالي، حيث يسبح جسمٌ ما بحرية في الفراغ. سوف يظل ساكنًا أو يواصل الحركة في خط مستقيم (حسبما أشار روبرت هوك الذي كان أول مَن لفت النظر إلى ذلك) إلى أن يُدفَع؛ إذ سيغيِّر سرعته، أو اتجاهه، أو كليهما معًا. لكن كيف يعرف أنه سيغيِّر اتجاهه أو سرعته؟ وعلى أي أساس يُقاس هذا التغيير؟ لا يستلزم الأمر كثيرًا من الرصد لنلاحظ أن القصور يمثِّل مقاومة للتغيير في الحركة بالنسبة إلى الكون عامةً.

لستَ بحاجة لأن تتخيَّل أنك في الفضاء لترى اللغز في أوضح صوره. فقد وصف إسحاق نيوتن نفسه، في كتابه الرائع «المبادئ»، تجربةً حقيقية يمكن إجراؤها بين جدران المنزل. فقد أخذ دلوًا من الماء تدلَّى من مقبضه بحبل طويل، وظلَّ يلويه مرارًا حول نفسه ثم تركه. بدأ الدلو يدور، لكن ظل مستوى المياه في الدلو كما هو في البداية. فلم يتأثَّر مستواه حين كان الدلو يتحرك بالنسبة إلى المياه. بعد ذلك، حين انتقل تأثير الدوران إلى المياه وبدأت في الدوران، هبطت في المنتصف، فصار سطحها مقعَّرًا. حين أمسك نيوتن الدلو من الجانب، توقَّف عن الدوران، لكن استمرت المياه في الدوران، وظل سطحها محتفِظًا بشكله المقعَّر، الذي تحوَّل تدريجيًّا إلى التسطح مع تباطؤ سرعتها. توقَّف شكل سطح المياه على الطريقة التي تحرَّكت بها المياه بالنسبة إلى إطار إسنادٍ ما ثابت مبهَم، ولم يكن له أي صلة بكيفية حركته بالنسبة إلى الدلو؛ وقد صار إطار الإسناد هذا الآن يُعرَّف بأنه متوسط توزيع كل شيء في الكون. في الواقع لا حاجة حتى إلى دلوٍ لرؤية تأثير الكون بأسره على الأشياء الموضعية؛ حسبُك أن تشاهد سطح السائل وأنت تقلِّب فنجان شاي أو قهوة!

إذَن يعطي متوسط توزيع كل شيء في الكون إطارًا إسناديًّا لقياس مثل تلك التغيرات استنادًا إليه. فبطريقةٍ ما، يتأثر الجسم «الموضعي» بكل شيء «من حوله». ويخبرنا مبدأ ماخ أن القصور الذاتي للجسيم ناتج عن تفاعلٍ ما بين ذلك الجسيم وكل الأجسام الأخرى في الكون. أما طبيعة ذلك التفاعل فطالما كان لغزًا. وقد يكون تفسير الموجة الدليلية واللاموضعية هما حل ذلك اللغز.

يقودنا هذا إلى استنتاجٍ آخرَ مثير للاهتمام، يتجلَّى كذلك في تفسير آخر (العزاء الثالث). ينطبق تفسير دي بروي-بوم للموجة الدليلية على الكون بأسْره. فسلوك جسيم واحد في المكان والزمان الحاليَّين يتوقَّف على مواضعِ كل جسيم آخر في الكون في هذه اللحظة. لكن من الأفضل استكشاف التبعات في سياق ذلك العزاء الثالث؛ تفسير العوالم المتعددة. ولكن قبل الانتقال إليه، يجدُر بي أن أذكر تعليقًا مدهِشًا على نظرية بوم، من شخص ربما كان

المتوقَّع منه أن يؤيدها. فعلى الرغم من أن أينشتاين كان مَن حثَّ بوم على محاولة إيجاد بديل لتفسير كوبنهاجن، فقد كتب في ١٢ مايو عام ١٩٥٢ إلى ماكس بورن قائلًا:

> هل لاحظت أن بوم يعتقد (كما اعتقد دي بروي، قبل ٢٥ عامًا بالمناسبة) أنه قادر على تفسير نظرية الكَم في نموذجٍ حتمي؟ تبدو لي تلك الطريقة مبتذَلة للغاية.

لا أحد يعلم يقينًا ما كان يقصده بذلك، لكنه يسلِّط الضوء على البلبلة التي أحاطت بكل تفسيرات ميكانيكا الكَم.

العزاء الثالث:
الأحمال الزائدة: تفسير العوالم المتعدِّدة

إذا كنتَ قد سمعتَ عن تفسير العوالم المتعدِّدة، فمن المرجَّح أنك تعتقد أن الأمريكي هيو إفريت هو مَن ابتكره في منتصف خمسينيات القرن العشرين. وهذا صحيح إلى حدٍّ ما. فقد جاء بالفكرة وحدَه تمامًا. لكنه لم يكن يدري أن الفكرة نفسَها في مجملها كانت قد خطرت لإرفين شرودنجر قبله بخمس سنوات. يغلِب على صيغة إفريت الطابع الرياضي، فيما يغلِب على صيغة شرودنجر طابعٌ فلسفي، لكن بيت القصيد أن كليهما كان مدفوعًا برغبة في التخلص من فكرة «انهيار الدالة الموجية»، وأفلح كلاهما.

كما اعتاد شرودنجر أن يشير لأي شخص مستعد للإنصات، لم يَرِد في المعادلات (بما في ذلك معادلته الموجية الشهيرة) أيُّ شيء بشأن الانهيار. كان ذلك شيئًا أضافه بور إلى النظرية الأصلية حتى «يفسِّر» السبب وراء رؤية نتيجة واحدة فقط للتجربة — قطة ميتة أو قطة حية — وليس خليطًا، أو تراكبًا للحالتين. لكن «تبيُّن» نتيجة واحدة فقط — حل واحد للدالة الموجية — لا يعني بالضرورة أن الحلول البديلة ليس لها وجود. ففي بحثٍ نشره عام ١٩٥٢، أشار شرودنجر إلى سذاجة توقُّع انهيار تراكب كمي لمجرَّد أننا نظرنا إليه. فكتب يقول إن «من العبث البيِّن» أن تخضع الدالة الموجية «للسيطرة بطريقتين مختلفتين كليةً، بالمعادلة الموجية أحيانًا، وبالتدخُّل المباشر للمراقب أحيانًا أخرى، ولا يخضع لسيطرة المعادلة الموجية».

بالرغم من أن شرودنجر نفسه لم يطبِّق فكرتَه على القطة الشهيرة، فإنها تحُلُّ ذلك اللغز بإجادة ودقة. على سبيل تجديد مصطلحاته، لنقل إنه يوجد كونان، أو عالمان، متوازيان حيث القطة حية في واحد وميتة في الآخر. عند فتح الصندوق في أحد الكونين،

يُكشَف عن قطة ميتة. وفي الكون الآخر، توجد قطة حية. لكن طالما كان هناك عالمان، يطابق كلٌّ منهما الآخر حتى اللحظة التي حسم فيها الجهاز الخبيث مصيرَ القطة (أو القطتين). فلا يوجد انهيار للدالة الموجية. وقد توقَّع شرودنجر ردَّ فِعل زملائه في خطبةٍ ألقاها في دبلن، حيث كان يقيم آنذاك، في عام ١٩٥٢. فبعد التأكيد على أن معادلته التي تحمل اسمه، رغم أنها تصف احتمالات مختلفة فيما يبدو، فإنها «ليست بدائل، وإنما تحدث كلها في آنٍ واحد في الواقع»، قال:

> تكاد كل نتيجة يعلن عنها [المُنظِّر الكمي] أن تكون عن احتمال ... حدوث هذا أو ذاك، مع وجود العديد من البدائل في الغالب. وفكرة أنها قد لا تكون بدائل وإنما تحدث كلها في آنٍ واحد في الواقع تبدو له ضربًا من الجنون؛ لكونها مستحيلة تمامًا. فهو يعتقد أنه إذا اتخذت قوانين الطبيعة هذا الشكل لمدة ربع ساعة، مثلًا، فسنجد محيطنا يتحوَّل سريعًا إلى مستنقَع، أو نوع من الهلام أو البلازما بلا ملامح، وقد راحت معالمه تُطمس، وقد نصبح نحن أنفسنا قناديل بحر. ومن الغريب أن يعتقد ذلك. فأنا أدرك أنه يُقرُّ بأن الطبيعة غيرَ المرصودة تتصرف على هذا النحو بالفعل؛ أي وفقًا للمعادلة الموجية. ولا يبدأ دور البدائل المذكورة آنفًا إلا حين نقوم برصدٍ ما، وليس بالضرورة أن يكون رصدًا علميًّا بالطبع. لكن يبدو، بحسب المُنظِّر الكمي، أن لا شيء لا يمنع الطبيعة من التحوُّل سريعًا إلى هلامٍ سوى إدراكنا أو رصدِنا له ... وهو استنتاجٌ غريب.

في الواقع، لم يستجِب أحدٌ لفكرة شرودنجر. فقد قُوبلت بالتجاهل وباتت في طي النسيان، واعتُبرت مستحيلة. لذا وضع إفريت صيغته الخاصة لتفسير العوالم المتعددة بمعزلٍ تامٍّ عنها، وكادت تلقى التجاهل التام ذاته. لكن كان إفريت هو مَن قدَّم فكرة «انقسام» الكون إلى نسخٍ مختلفة من نفسه عند مواجهة اختيارات كمية؛ مما زاد الأمور تعقيدًا طيلة عقود.

توصَّل إفريت إلى هذه الفكرة في عام ١٩٥٥، حين كان طالبَ دكتوراه في جامعة برينستون. في النسخة الأصلية لفكرته، التي وضعها في مسودة لرسالة الدكتوراه لم تُنشر آنذاك، قارن الموقف بأميبا تنقسم إلى خليتين وليدتين. لو كان لخليتَي الأميبا دماغ، لاحتفظت كل خلية وليدة بسجل طِبق الأصل لتاريخها حتى مرحلة الانقسام، ثم تكوِّن ذكرياتها الخاصة. في تشبيه القطة الشائع، يظل لدينا كونٌ واحد، وقطة واحدة، قبل أن يدور الجهاز الخبيث، فيصير لدينا حينها كونان، في كلٍّ منه قطة، وهكذا. وقد شجَّعه

جون ويلر، الذي كان مُشرِفًا على رسالته للدكتوراه، على وضع وصفٍ رياضي لفكرته من أجل الرسالة، ومن أجل بحثٍ نُشِر في دورية «ريفيوز أوف مودرن فيزيكس» في عام ١٩٥٧، لكن أُغفلت مقارنة الأميبا وسط الأحداث، ولم تظهر نشرًا إلا فيما بعد. غير أن إفريت أشار بالفعل إلى أنه نظرًا لعدم وجود المراقب الذي من شأنه أن يدرك وجود العوالم الأخرى قط، فإن الادعاء بأنها لا يمكن أن تكون موجودة لأننا لا نستطيع أن نراها ليس أصحَّ من الادعاء بأن الأرض لا تدور حول الشمس لأننا لا نستطيع الشعور بحركة دورانها.

لم يروِّج إفريت نفسه قط لفكرةِ تفسير العوالم المتعددة. حتى إنه قبل الانتهاء من رسالة الدكتوراه، قبِل عرضًا لوظيفة في البنتاجون للعمل ضمن «مجموعة تقييم أنظمة الأسلحة» من أجل تطبيق تقنيات رياضية (سُمِّيت نظرية الألعاب) على مشكلات سرية متعلِّقة بالحرب الباردة (وكان بعض من مهامِّ عمله من السِّرية حتى إنها ما زالت مصنَّفةً معلوماتٍ سريةً يُحظَر الاطلاع عليها) واختفى أساسًا من على الرادار الأكاديمي. ولم يكن قبل أواخر ستينيات القرن العشرين حين اكتسبت الفكرة بعضَ الزَّخم، حين تبنَّاها برايس ديويت من جامعة كارولينا الشمالية، وروَّج لها بحماس؛ إذ كتب يقول: «كل تحوُّل كمي يقع في كل نجم، وكل مجرَّة، في كل زاوية بعيدة من الكون، يشطر عالَمنا المحلي على الأرض إلى نسخٍ عديدة من نفسه.» هنا عظُم الأمر على ويلر الذي تراجع عن دعمه الأول لتفسير العوالم المتعدِّدة، فكان أن قال في سبعينيات القرن العشرين: «لقد اضطُررت على مضضٍ إلى التخلي عن دعمي لوجهةِ النظر تلك في النهاية؛ لأنني أخشى أنها تحمل عبئًا ميتافيزيقيًّا أضخمَ من اللازم.»[١] المفارقة أنه في نفس ذلك التوقيت بالضبط أُعيد إحياء الفكرة وتعديلها، من خلال تطبيقات في علم الكونيات والحوسبة الكمية.

بدأت صلاحية التفسير تَلقى تقديرًا حتى ممن كانوا متردِّدين في منحه التأييدَ التام. فقد أشار جون بيل إلى أن «الأشخاص لا شك يتضاعفون مع العالَم، ولن يختبر أولئك القابعون في فرع معيَّن إلا ما يحدث في ذلك الفرع فحسب»، وأقرَّ على مضضٍ بأنه قد يكون به شيء من الأهمية:

> يبدو لي «تفسير العوالم المتعدِّدة» فرضيةً مُبالَغًا فيها، بل فرضية مبهَمة لدرجةٍ مُبالَغ فيها. بل إنني كِدت أنبذها باعتبارها فرضية ساذَجة. ولكنها ... ربما تُفصح عن شيء مختلف يتعلق بـ «لغز أينشتاين-بودولسكي-روزن»، وأعتقد أنه سيكون من المفيد أن تُصاغ منها صيغة دقيقة لنرى إن كان الأمر كذلك

حقًّا. ولعل وجود كل العوالم المحتملة يجعلنا أكثرَ اطمئنانًا حيال وجود عالمنا ... الذي يبدو مستبعدًا إلى حدٍّ كبير من بعض النواحي.[٢]

جاءت الصيغة الدقيقة لتفسير العوالم المتعددة من ديفيد دويتش، بجامعة أكسفورد، والواقع أنها قد وضعت صيغة شرودنجر على أساسٍ راسخ ومتين، وإن كان دويتش لم يكن على دراية بصيغة شرودنجر حين وضع تفسيره. عمل دويتش مع ديويت خلال سبعينيات القرن العشرين، وفي عام ١٩٧٧ التقى بإفريت في مؤتمر نظَّمه ديويت، وكانت المرة الوحيدة التي قدَّم فيها إفريت أفكاره أمام جمهور عريض. ولقناعة دويتش بأن تفسير العوالم المتعددة هو السبيل الصحيح لفهْم عالم الكم، صار رائدًا في مجال الحوسبة الكمية، ليس من خلال أيِّ اهتمام بالكمبيوتر في حد ذاته، وإنما لإيمانه بأن وجود كمبيوتر كمي فعَّال من شأنه أن يُثبت واقعيةَ تفسير العوالم المتعددة.

يعود بنا هذا إلى صيغة لفكرة شرودنجر. في صيغة إفريت للغز القطة، يظل هناك قطة واحدة حتى المرحلة التي يعمل فيها الجهاز. حينها ينقسم الكون بأكمله إلى جزأين. بالمثل، كما أشار ديويت، حين يواجه إلكترون في مجرة بعيدة خيارَ اتخاذ مسارين كمِّيَّين (أو أكثر)، يؤدي ذلك بالكون بأكمله، بما في ذلك نحن أنفسنا، إلى الانقسام. في صيغة دويتش-شرودنجر، توجد مجموعة لا نهائية من الأكوان (نظرية الأكوان المتعددة) مناظرة لكل الحلول الممكنة لدالة الموجة الكمية. أما فيما يتعلق بتجربة القطة، فهناك العديد من الأكوان المتطابقة ينشئ فيها مجرِّبون متطابقون أجهزةً فتَّاكة متطابقة. تظل هذه الأكوان متطابقة حتى اللحظة التي يدور فيها الجهاز. عندئذٍ، تموت القطة في بعض الأكوان، وتعيش في بعضها، وتختلف الأحداث التالية في المقابل. لكن لا يمكن للعوالم المتوازية أن تتواصل بعضها مع بعض أبدًا. أم تستطيع؟

يذهب دويتش إلى أنه حين يُضطر كونان، أو أكثر، كانا متطابقين فيما سبق لأن يصبحا مستقلَّين من خلال عمليات كمية، كما في تجربة الثقبين، يحدث تداخلٌ مؤقَّت بين الأكوان، ينحسر مع تطوُّرها. وهذا التفاعل هو ما يؤدي إلى النتائج المرصودة لتلك التجارب. ولديه حُلم بأن يشهد اختراع جهاز كمي ذكي — كمبيوتر — يرصد ظاهرةً كمية تتضمَّن حدوث تداخُل بداخل «رأسه». يزعم دويتش، مستخدمًا حجةً حاذقة نوعًا ما، أن الكمبيوتر الكمي الذكي سيكون قادرًا على تذكُّر تجربة الوجود مؤقتًا في عوالمَ متوازية. لعلها تجربةٌ أبعدُ ما تكون عن العملية. لكن لدى دويتش كذلك «دليل» أبسط كثيرًا على وجود الأكوان المتعددة.

ديفيد دويتش
«جيتي إيميدجز»

إن ما يجعل الكمبيوتر الكمي مختلفًا نوعيًّا عن الكمبيوتر العادي أن «المفاتيح» التي بداخله توجَد في حالاتٍ متراكبة. يتكوَّن الكمبيوتر العادي من مجموعة من المفاتيح (وحدات في دوائر كهربائية) قد تكون في حالة عمل أو توقُّف، بما يقابل الرقمين واحدًا أو صفرًا. يتيح هذا إجراء العمليات الحسابية بمعالجة سلاسل الأرقام في شفرات ثنائية. يُعرف كل مفتاح باسم البت، وكلما زاد عدد البتات، كان الكمبيوتر أقوى. يتكوَّن البايت الواحد من ثمانية بتات، وقد صارت ذاكرة الكمبيوتر اليوم تُقاس بمليارات البايتات؛ فيما يُعرف بالجيجابايت، أو Gb. وتحرِّيًا للدقة، بما أننا نتعامل بنظام ثنائي، فإن الجيجابايت تساوي ٢٣٠ بايت، لكن غالبًا ما يُعد ذلك من المسلَّمات. بيْد أن كل مفتاح في الكمبيوتر الكمي هو كِيان يمكن أن يكون في حالات تراكبية. وغالبًا ما تكون هذه الحالات ذرات، لكن يمكنك أن تعتبرها إلكترونات في حالة دوران مغزلي إما لأعلى أو لأسفل. الفَرق أنها في التراكب تكون في دوران لأعلى وأسفل في الوقت ذاته؛ أي صفر وواحد. ويُسمَّى كل مفتاح بتًّا كميًّا أو كيوبت.

وبسبب هذه الخاصية الكمية، يساوي كل كيوبت اثنين من البتات. لا يبدو الأمر باهرًا من أول وهلة، لكنه كذلك. فإذا كان لديك مثلًا ثلاثة كيوبتات، فمن الممكن ترتيبها بثماني طرُق: ٠٠٠، ٠٠١، ٠١٠، ٠١١، ١٠٠، ١٠١، ١١٠، ١١١. فالتراكب يسعُ كلَّ هذه الاحتمالات. من ثَم لا تساوي الكيوبتات الثلاثة ستة بتات (٢ × ٣)، وإنما ثمانية بتات (٢ مرفوعة للقوة ٣). فدائمًا ما يساوي عدد البتات ٢ مرفوعة إلى قوة عدد الكيوبتات. فعشرة كيوبتات تساوي ٢١٠ بتات؛ أي ١٠٢٤، لكنها غالبًا ما يُشار إليها بكيلوبيت. سريعًا ما تتطور مثل تلك الأسيات. يعادل جهاز الكمبيوتر الذي يحتوي على ٣٠٠ كيوبت فقط الكمبيوترَ العادي الذي لديه من البتات أكثرُ مما في الكون المرئي من ذرات. فكيف يُجري مثل ذلك الكمبيوتر العمليات الحسابية؟ صار السؤال أكثرَ إلحاحًا نظرًا لإنشاء أجهزة كمبيوتر كمية بسيطة بالفعل، تضم القليل من الكيوبتات، وأثبتت الكفاءة المتوقَّعة في العمل. فهي حقًّا أقوى من أجهزة الكمبيوتر العادية التي تحتوي على نفس عدد البتات.

يُجيب دويتش على السؤال بأن العملية الحسابية تجري في نفس الوقت على أجهزة كمبيوتر متطابقة في كلٍّ من الأكوان المتوازية المناظرة للحالات المتراكبة. فبالنسبة إلى كمبيوتر ذي ثلاثة كيوبتات، يوجد ثماني حالات تراكب لعلماء كمبيوتر يعملون على المسألة نفسها باستخدام أجهزة كمبيوتر متطابقة للوصول إلى حل. ولا غرابة في أن «يتعاونوا» على هذا النحو، ما دام المجرِّبون متطابقين، ولديهم أسباب متطابقة لحل نفس المسألة. ليس من الصعب تخيُّل ذلك. لكننا حين ننشئ جهازًا من ٣٠٠ كيوبت — وهو ما سيحدث يقينًا — سوف نشارك في «تعاون» بين أكوان يفوق عددها عددَ الذرات في كوننا المرئي، هذا إذا كان دويتش على حق. إنها مسألةُ اختيار ما بين الاعتقاد بأن ذلك عبء ميتافيزيقي ثقيل جدًّا أم لا. لكن إذا كنت تظن ذلك، فسوف تحتاج إلى طريقةٍ أخرى لشرح سبب كفاءة الكمبيوتر الكمي.

يفضِّل أغلب علماء الكمبيوتر الكمي ألا يفكِّروا في هذه التبعات. لكن ثَمَّة مجموعة من العلماء اعتادوا التفكير حتى في أكثرَ من ستة أشياء مستحيلة قبل الفطور، وهم علماء الكونيات. فبعضهم تبنَّى تفسير العوالم المتعددة باعتباره أفضلَ طريقة لتفسير وجود الكون نفسه.

والنقطة التي ينطلقون منها هو ما أشار إليه شرودنجر بشأن عدم وجود شيء في المعادلات يشير إلى انهيار للدالة الموجية. وهم يعنون الدالة الموجية، واحدة فقط، التي تصف العالم بأسْره باعتباره حالات متراكبة؛ أي كونًا متعددًا مكوَّنًا من تراكب للأكوان.

كانت النسخة الأولى من رسالة إفريت للدكتوراه (التي عُدِّلت لاحقًا وقُصِّرت بناءً على نصيحة ويلر) تحمل في الحقيقة اسم «نظرية الدالة الموجية الكونية».[٣] وكان يقصد بكلمة «كونية» المعنى الحرفي لها؛ إذ يقول:

> بما أنه قد ثبتت صحَّة وصف دالة الحالة عامةً، فلنا أن نعتبر دوال الحالات أنفسها باعتبارها الكِيانات الأساسية، بل يمكن أن ندرُس دالة حالة الكون بأسْره. ويمكن من هذا المنطلَق أن تُسمَّى هذه النظرية نظرية «الدالة الموجية الكونية»؛ إذ يُعتقد أن الفيزياء كلَّها مترتِّبة على هذه الدالة وحدها.

... حيث يُقصد بـ «دالة الحالة» في هذا السياق «دالة موجية». ويُقصد بـ «الفيزياء كلها» كل شيء، بما في ذلك نحن؛ «المراقبون» بلغة الفيزياء. وهذا مما يُلهِب حماسة علماء الكونيات؛ ليس لأنهم مشمولون في الدالة الموجية، وإنما لأن فكرة دالة موجية واحدة غير منهارة هي الطريقة الوحيدة لوصف الكون بأكمله في إطار ميكانيكا الكَم مع بقاء الوصف منسجِمًا مع النظرية العامة للنسبية. في النسخة القصيرة من أطروحته المنشورة عام ١٩٥٧، خلَص إفريت إلى أن صياغته لميكانيكا الكَم «بناءً على ذلك قد تثبت أنها إطار مثمِر لتكمية النسبية العامة». ورغم أن ذلك الحُلم لم يتحقَّق بعدُ، فقد شجَّع علماء الكونيات على إنجازِ قدرٍ كبير من الأعمال والأبحاث منذ منتصف ثمانينيات القرن العشرين، منذ بدأ ولعُهم بالفكرة. لكنها حقًّا تجلب معها أعباءً جمَّة.

تصف الدالة الموجية الكونية موقعَ كل جسيم في الكون في لحظة محدَّدة من الزمن. لكنها تصف كذلك كلَّ موقع ممكن لتلك الجسيمات في تلك اللحظة. وتصف كذلك كل موقع محتمل لكل جسيم في أي لحظة أخرى من الزمن، وإن كان عدد الاحتمالات مرهونًا بالتحبُّب الكَمِّي للمكان والزمان. وسيكون بين هذا الكَم من الأكوان المحتملة نُسخٌ عديدة لا يمكن أن تُوجَد بها نجوم وكواكب مستقرة، ولا بشر يعيشون على تلك الكواكب. لكن سيكون هناك على الأقل بعض الأكوان مشابهة لكوننا، شبهًا دقيقًا بدرجة أو أخرى، على النحو الذي كثيرًا ما تصوِّره قصص الخيال العلمي. أو غيره من الأدب في الواقع. فقد أشار دويتش إلى أنه وفقًا لتفسير العوالم المتعددة، أي عالم يُوصف في عملٍ أدبي يكون موجودًا حقًّا في مكانٍ ما في الكون المتعدد، شريطة أن يكون خاضعًا لقوانين الفيزياء. فعلى سبيل المثال، هناك بالفعل عالَم «مرتفعات وذرينج» (لكن لا يوجد عالَم «هاري بوتر»).

لا ينتهي الأمر عند هذا الحد. فالدالة الموجية الواحدة تصف كلَّ الأكوان المحتملة في جميع الأوقات الممكنة. لكنها لا تقول شيئًا عن التغير من حالة لأخرى. فالزمن لا

يتدفَّق. وعلى سبيل البقاء قرب الأرض، يضم معامل إفريت، المسمَّى متَّجه الحالة، وصفًا لعالمٍ نوجَد فيه وتوجَد كذلك كل سجلات تاريخ ذلك العالم، ابتداءً من ذكرياتنا، مرورًا بالأحفوريات، وصولًا للضوء الذي يصلنا من المجرات البعيدة. سيكون هناك أيضًا كون آخر مثله تمامًا، عدا أن «خطوته الزمنية» تسبقنا، لنقُلْ بثانية (أو ساعة، أو عام). لكن لا يوجد إيحاء بانتقال أي كون من خطوة زمنية لأخرى. سيكون هناك نسخة مني في هذا الكون الثاني، تصفه دالة موجية كونية، لديه كل الذكريات التي لديَّ في اللحظة الأولى، علاوةً على تلك الذكريات المواكبة للحظة التي بعدها (أو الساعة أو العام أو أي مدة زمنية كانت). لكن من المستحيل القول إن هذه النُّسخ مني هي نفس الشخص. يمكن ترتيب الحالات الزمنية المختلفة وفقًا للأحداث التي تصفها، لتحديد الفارق بين الماضي والمستقبل، لكنها لا تتغيَّر من حالة إلى أخرى. كل الحالات تُوجَد فحسب. فالزمن، بالطريقة التي اعتدنا أن نراه بها، لا «يتدفَّق» في تفسير إفريت للعوالم المتعددة.

أما ما أراه أنا، فهو أن الوقت قد حان للتغيير. وقت البحث عن نوعٍ آخر من العزاء، هذه المرة في إزالة الترابط.

هوامش

(١) ورد في كتاب «بعض الغرابة في النسبة»، تحرير إتش وولف (أديسون-ويزلي، ١٩٨١).

(٢) «اليسير والمستعصي في ميكانيكا الكَم» (دار نشر جامعة كمبريدج، ١٩٨٧).

(٣) نُشرت في النهاية في عام ١٩٧٣ في كتاب «تفسير العوالم المتعددة لميكانيكا الكَم»، من تحرير بي إس ديويت وإن جراهام (دار نشر جامعة برينستون).

العزاء الرابع:
تفسير إزالة الترابط غير المترابط

لكي يحدث إزالة ترابط، لا بد أن يكون لدينا شيء مترابط في الأساس. لدى الفيزيائيين فهمٌ واضح لما يقصدونه بالترابط، ويجادل أنصار تفسير إزالة الترابط بأن الترابط، في واقع الأمر، هو ما يجعل عالَم الكَم يسلك سلوكه.

كالعادة توضِّح تجربة الثقبَين ما يحدث. لقد جاءت موجات الضوء (أو أيًّا كانت طبيعتها) التي تنتشر من الثقبين في الأصل من مصدر واحد؛ ولذلك فهي مُتماشية إحداهما مع الأخرى. فالثقبان، ببساطة، يُرسلان الموجات المترابطة عبر مسارات مختلفة، وتؤثِّر الاختلافات في أطوال تلك المسارات في الطريقة التي تتفاعل بها مجموعتا الموجات إحداهما مع الأخرى؛ إذ تنسجم في موضع، وتتنافر في آخر. ويوجد نمطٌ منتظم في قمم الموجات وقيعانها، وهو ما يُمكِّنها من التداخل بعضها مع بعض بحيث تخلق نمطًا منتظمًا من الضوء والظل. إذا لم يكن هناك ترابط بين الموجات، كما هو الحال مع الضوء المنبعِث من مصباحَين، الذي يسقط مباشرةً على جدار، لا يكون هناك نمط تداخل؛ يوجد تداخل، لكن كل الأشياء مختلطة تمامًا لدرجةِ عدم وجود نمط معين. ووفقًا لتفسير إزالة الترابط، تختفي «الكمية» حين تختلط الأشياء. لكن الضوء الصادر من المصباحين لم يكن مترابطًا من الأساس. فقد كان غير مترابط. ولدينا تشبيه آخرُ مواتٍ، وهو «الموجة المكسيكية» التي تراها أحيانًا في الساحات الرياضية. إذا رفع كلُّ مَن في الساحة ذراعَيه عشوائيًّا، فلن ترى سوى أيادٍ مختلطة تلوِّح في عشوائية. لكن إذا رفع كل شخص ذراعَيه وأنزلهما في الوقت المناسب، مقلدًا مَن يجاورونه، فسترى موجة تنساب عبر أنحاء الاستاد. الموجة مترابطة، أما التلويح العشوائي فليس مترابطًا. لذلك فإن مصطلح «إزالة الترابط» ليس مناسبًا كثيرًا

في السياق الكمي. قد يكون من المنطقي أكثرَ أن نسمِّي هذا النموذج التفسير غير المترابط لميكانيكا الكَم، لكن ربما يشعر أنصاره المتحمِّسون له أنه سيُعطي انطباعًا خاطئًا عن فكرتهم المفضَّلة!

إذا كان أولئك الأنصار على حق، فالحد الفاصل بين الكمية والعالَم المألوف يتوقَّف على الترابط وليس على الحجم. كان بور وزملاؤه يعمدون حتمًا إلى الإبهام في هذا الصدد. فقد استطاعوا أن يجادلوا، جدلًا منطقيًّا تمامًا، بأن جسمًا في حجم القطة وتعقيدها أكبر من أن يكون في حالة تراكب كمي، وإن كانت الذرات المفردة من الممكن أن تكون في تراكب. لكن إذا كان لنا أن نتخيَّل أشكالًا مختلفة للقطة في تجربة الصندوق الافتراضية، فأين لنا أن نتوقف؟ هل البرغوث كبير بما يكفي لنعرف ما إن كان حيًّا أم ميتًا، أو في حالة تراكب؟ ماذا عن الميكروب؟ لم يعلم أحد.

أخذ أحد الأشخاص على عاتقه تحدِّي المعرفة. فقد عزم أنطوني ليجت، الذي كان يعمل في جامعة ساسكس في أواخر الستينيات وسبعينيات القرن العشرين، على إجراء تجارب لمعرفةِ ما إذا كان لا يزال ممكنًا استخدام قواعد ميكانيكا الكَم لوصفِ سلوكٍ ما يسمَّى بالأجسام «الماكروسكوبية»، تلك الأشياء الكبيرة كفايةً لتُمسَك باليد، أو أكبر. وأدَّى به هذا إلى اختراع أجهزة تُسمَّى «سكويد» (اختصارًا لجهاز التداخل الكمي الفائق التوصيل). كان النموذج الأصلي لجهاز السكويد في حجم خاتم الزواج تقريبًا، فكان من الممكن وضعه في اليد بالفعل،[1] لكن كان لا بد من تبريده تبريدًا مفرطًا حتى يعمل؛ لذا لم يكن من الممكن حملُه أثناء عمله. ثَمة تيار كهربائي يظل يتدفَّق دون توقُّف عند دورانه في موصِّل فائق بمجرد أن يبدأ الجهاز في العمل، ويمكن رصد سلوك مثل ذلك التيار وتعديله أثناء دورانه في جهاز سكويد باستخدام المجالات الكهربائية والمغناطيسية. تبيِّن هذه التجارب أن موجة الإلكترون عند دورانها في الحلقة تتصرف ككيانٍ كمي منفرِد، أكبر من الذرة بنحو مائة مليون مرة (وأكبر بكثير بالطبع من البكتيريا، أو حتى البرغوث). حقَّق ليجت هدفه الأول. لكن هناك المزيد. قد تعتقد أن الموجة قد تتدفَّق لتدور في اتجاه واحد من الاتجاهين في الحلقة، لكن ليس في كلا الاتجاهين في نفس الوقت. لكنك ستكون مخطئًا في اعتقادك هذا. فالتجارب التي أُجريت في مطلع القرن الحادي والعشرين أوضحت آثارَ تدفُّق الموجة في الحلقة في كلا الاتجاهين في نفس الوقت. ليست موجتين مختلفتين في اتجاهين مختلفين، وإنما «نفس» الموجة تتدفَّق في الاتجاهين في آنٍ واحد؛ أي تراكب. ليس حجم الشيء هو ما يحدِّد كميته، بل حقيقة أن الموجات مترابطة.

أنطوني ليجت
«ساينس فوتو لايبراري»

ظلَّت هذه الأبحاث تتطور تطورًا هائلًا منذ بدايتها، وفي الأثناء حصل ليجت على جائزة نوبل ولقب فارس؛ ومع تكبير حجم أجهزة السكويد، صار لها تطبيقات عملية في الطب؛ حيث تُستخدم ككواشف حسَّاسة للمجالات المغناطيسية الناتجة عن الجسد البشري، ويُتوقَّع أن تصير من مكونات أجهزة الكمبيوتر الكمية. لكن ما يعنينا الآن أنها تسلك سلوك مثال ماكروسكوبي يمرُّ بحالات كمية مختلفة حين تكون الموجات مترابطة، ولكنها تتوقَّف عن إظهار الكمية حين تسخن وتتفكك الموجات. وبلغة بور، يبدو أن إزالة الترابط يؤدي إلى «انهيار الدالة الموجية». يرى البعض أن هذا يعني ببساطةٍ أن تفسير إزالة الترابط ليس سوى تفسير كوبنهاجن ولكن باسمٍ آخر. لكن هذا الاعتقاد يُغفِل الدور المحوري للتراكب والتشابك في تفسير إزالة الترابط الدقيق.

إن التراكب والتشابك وجهان لعملة واحدة. فحين يتفاعل «جسيمان» معًا يصيران متشابكين، ويتأثر كلٌّ منهما بما يحدث للآخر من بعد حدوثه وإلى الأبد. فقد صارا في الواقع كِيانًا واحدًا. بالمثل، يمكن اعتبار الموجة التي تدور في الاتجاهين في نفس اللحظة في حلقة السكويد موجتين في حالة تراكب؛ أي متشابكتين معًا. والنتيجة كِيان كمي واحد،

موجة لا تسلك اتجاهًا واحدًا وإنما اتجاهين. ولا عجب في أن تفسير إزالة الترابط لم يظهر إلا في نفس توقيت التجارب التي أُجريَت في ثمانينيات القرن العشرين التي أثبتت أن التشابك وصفٌ صحيح للآلية التي يسير بها العالم.

إذَن ما الذي يحدث فعلًا حين يتفاعل كِيان كمي «بحت» مع العالَم الخارجي و«يصير غير مترابط»؟ لا يصير «أقل» تشابكًا، بل «أكثر» تشابكًا. تخيَّل جسيمًا وحيدًا في حالة كمية بحتة. إن هذا الجسيم يصير متشابكًا بمجرد أن يصطدم بجسيم آخر (أو إذا تفاعل حتى مع فوتون من فوتونات الضوء). وإذا تفاعَل أيٌّ من الكِيانين المتشابكين مع كِيان ثالث، يصير الثلاثة متشابكين، وحالاتهم الكمية في تراكب. فالتشابك أسرعُ من النار في الهشيم كما يقول المثل، حتى إنه لا يوجد عمليًّا ما يسمَّى بنظام كمي «بحت» بمعزل عن العالم الخارجي (إلا في ظروف خاصة جدًّا مثل تجارب السكويد)، وإنما يوجد نظام متشابك مكوَّن من كليهما؛ تراكب لكل شيء تفاعل مع الجسيم الأصلي وكل شيء تفاعل معه على الإطلاق، وكل شيء تفاعل معه ذلك الكل شيء يومًا أو حتى احتكَّ به في وقتٍ من الأوقات. إن «إزالة الترابط» في حقيقة الأمر تنطوي على الربط بين كل شيء في العالم بأسره — الكون — في نظام كمي واحد. فلا نجد بعد ذلك حالةً كمية للجسيم الذي كان معزولًا فيما مضى؛ لأنه امتزج مع كل شيء آخر. وانعدام الترابط الناتج يجعل الكشف عن الحالة الكمية الكامنة لأي شيء غايةً في الصعوبة ما عدا أبسط الأنظمة. سيخبرك علماء الرياضيات أن ذلك قد يكون ممكنًا نظريًّا؛ إذ إن المعادلات التي تصف عالم الكَمِّ قابلة للعكس زمنيًّا. لكن لا تتوقَّع أن يتولى أحدٌ مهمة إجراء التجربة العملية.

كما أشار فيليب بول، تؤدي إزالة الترابط سريعًا جدًّا إلى خلق حالة من انعدام الترابط تُعادل تراكبًا لحالات كمية تفوق الجسيمات الأساسية في الكون المرئي. ويتساءل: «هل يمكن القول عن مشكلةٍ ما إنها مستعصية على الحل تأسيسًا على عدم وجود معلومات كافية لحلها في الكون فحسب؟»[٢] كذلك يعطي بول بعض التقديرات للفترة التي يستغرقها نظامٌ ما لفقدان ترابطه. تحدث إزالة الترابط أسرعَ مع الأجسام الكبيرة؛ لأنها تحتوي على أجزاء أكثر لتتفاعل مع الأشياء الأخرى ومع بعضها. ففي حالة ذرة غبار سابحة في الهواء وتتدافع بفعل الجزيئات من حولها، يستغرق إزالة الترابط وقتًا أقلَّ من المطلوب لفوتون، ينتقل بسرعة الضوء، ليعبر مسافةً تساوي قُطر بروتون. وحتى في الفضاء بين النجمي، حيث تسبح بحُرية ولا تتفاعل إلا مع فوتونات إشعاع الخلفية الكوني الميكروي، تفقد ذرة الغبار ترابطَها في نحو ثانية. «إن إزالة الترابط في واقع الأمر سريع وحتمي.» وينطبق هذا

على قطة شرودنجر الشهيرة. فلكَي تكون «حية وميتة في آنٍ واحد»، لا بد أن تكون القطة «مُعَدة» في حالةٍ مترابطة مستبعدة تمامًا من الكمية البحتة. إن إعداد جهاز سكويد في حالة كمية بحتة شيء، وفِعل ذلك بقطةٍ شيءٌ آخرُ تمامًا. وإن فعلتَه، فسوف تتحول بفعل إزالة الترابط إما إلى قطة حية أو قطة ميتة بأسرعَ مما يزول ترابط ذرة الغبار المتطايرة في الهواء.

من شأن ذلك أن يُسحب البساط أيضًا من تحت أحد الاعتراضات الفلسفية على تفسير كوبنهاجن. يقول تفسير كوبنهاجن، في ظاهره، إنه «لا شيء يكون حقيقيًّا» إلا عند رصده أو قياسه. يمكن لأشياء مثل القطط التي في الصناديق أن توجد في حالات من التراكب. من ثَم يتساءل المعارضون للفكرة: هل يظل القمر موجودًا حين لا ينظر إليه أحد، أم يكون في تراكب من كل الحالات الكمية الممكنة؟ وبهذا المنطق، هل كان موجودًا قبل أن تكون هناك حياة على الأرض؟ لم يكن لدى بور جواب شافٍ لذلك. لكن تفسير إزالة الترابط لديه الجواب؛ إذ إن فوتونات إشعاع الخلفية الكوني الميكروي، فضلًا عن فوتونات أشعة الشمس، كافية تمامًا لإحداث إزالة الترابط وجعل القمر «حقيقيًّا».

لكن ليست هذه هي نهاية قصة إزالة الترابط. فبدلًا من تطبيق الفكرة على المكان والزمان الحاليَّين (أيًّا كان ما يعنيه «المكان والزمان» في كونٍ متشابك)، طبَّق بعض الناس طريقة التفكير هذه على تاريخ — أو تواريخ — الكون بالكامل. فما كان تفسيرًا قائمًا بذاته، «تفسير التواريخ المتَّسِقة»، صار الآن «تفسير التواريخ غير المترابطة». لكنني سأبدأ بالجزء الخاص بـ «الاتساق» من القصة.

يذكِّرنا هذا بفكرة أننا لا نعلم عن عالَم الكَم (أو العالَم عامةً) إلا الأشياء التي نستطيع رؤيتها وقياسها. قبل إجراء تجربة أو قياسٍ ما، نستطيع فقط أن نقدِّر احتمالات النتائج المختلفة المتوقعة للتجربة. لكن بمجرد أن نُجري عملية القياس، يصير لدينا نتيجة محدَّدة، منتقاة بطريقةٍ ما من مجموعة الاحتمالات. وتقوم حجة نهج التواريخ المتسقة على فكرة أن نتيجة ذلك القياس — لأي شيء كان يحدث في العالم — لا بد أن تكون متسقة مع الماضي، أي مع التاريخ، أيًّا كانت تلك النتيجة. لذلك حين نتأمل نمط التداخل الناتج في تجربة الثقبين، لا يسعنا سوى أن نقول إن النمط «متسق مع» مرور الموجات من الثقبين وتداخلها معًا. وحين ينفصل إلكترون عن سطح معدني بفعل الضوء، لا يسعنا سوى أن نقول إن هذا «يتسق مع» وصول الضوء في شكل فوتون.

نُوقشت التبعات الكونية لكل هذا نقاشاتٍ موسَّعة، كان أبرزها مناقشات ستيفن هوكينج وزملائه. وصف هوكينج الطريقة التقليدية لمحاولة فَهْم أصل الكون من المنظور الكمي بأنها نهج «تصاعدي». فتبدأ بتخمين الشكل الذي ربما كان الكون يبدو عليه في

البداية، وتحاول أن تتبيَّن كيف تحوَّل من تلك الحالة إلى الحالة التي نراه عليها اليوم. وقد فضَّل هو النهج «التنازلي» البديل، حيث تبدأ من الحاضر متجهًا للماضي، بأسلوب متسق، لتحديد الدالات الموجية التي أسهمت في نشأته.

المشكلة أنه قد يكون (بل غالبًا سيكون) هناك أكثر من طريقة مختلفة للوصول للنتيجة التي نراها؛ أي أكثر من تاريخ واحد متسق. فهذا النهج لا يكشف عن «تاريخ للكون» وحيد من نوعه. في صيغة الإلكترونات لتجربة الشق المزدوج، حين يصل الإلكترون إلى بقعة معينة على شاشة الكاشف، لا توجد طريقة نعرف من خلالها أيُّ الثقبين مرَّ من خلاله. فكلا التاريخين متسق مع ما نرصده. والعالم بصفة عامة أكثر تعقيدًا بكثير من تجربة الثقبين؛ إذ يتيح قاعدة احتمالات أوسع كثيرًا للتواريخ المتسقة. سوف أعود لتلك النقطة. لكن لنتساءل أولًا، أين يأتي دور إزالة الترابط في القصة؟

إذا كان كل «قياس» — كل تفاعل كمي — يختار من مجموعة من التواريخ المحتملة، فلنا أن نتخيَّل أننا نعود إلى الماضي، وصولًا إلى الانفجار العظيم (وربما قبل ذلك، لكنني لن أخوض في ذلك هنا)، وفي الأثناء تقوم إزالة الترابط (فذلك هو محور الأمر) بغربلة الصيغ المتسقة من التاريخ. في البداية يكون أي شيء ممكنًا. لكن بمجرد حدوث أي تفاعل كمي، تُستبعد بعض الاحتمالات، وتتقلص مجموعة الأكوان المختلفة. أي إن نطاق الأكوان «القديمة» المتسقة يقل. ويستمر هذا وصولًا إلى الحاضر، لاختيار تاريخ كوننا (لكن الأهم أن الاختيار لا يقتصر على كوننا فقط) من مجموعة كبيرة من الاحتمالات. فنهج التواريخ غير المترابطة لا يختار كونًا فريدًا. وبذلك نعود إلى شكل من أشكال فكرة العوالم المتعدِّدة، لكننا نبلغه بطريق مختلف.

بدا لبعض الفيزيائيين أن إمكانية استخدام إزالة الترابط لتحويل فكرة العوالم المتعددة إلى فكرة «تواريخ متعددة» ستقضي على عبء العوالم العديدة المتوازية، التي تتَّسم جميعًا بأنها حقيقية بالقدر ذاته، وتستعيض عنها بتواريخ مختلفة، وُجِدت فقط في حالاتٍ أشبه بالأطياف بين الاحتمالات. لكن تبيَّن في منتصف تسعينيات القرن العشرين أن الأمور لم تكن بهذه البساطة. فبعد حضور مؤتمر استمع فيه إلى فاي دوكر وهي تناقش الاحتمالات، شعر لي سمولين، الذي يعمل في معهد بريمتر في كندا، بنفحة من الإلهام وصَفها فيما بعدُ في كتابه «ثلاثة طرق إلى الجاذبية الكمية»:[٣]

> بينما قد يكون العالم «التقليدي» الذي نرصده، حيث للجسيمات مواقعُ محدَّدة، أحد العوالم المتسقة التي وصفها أحد الحلول التي طرحتها النظرية، فإن نتائج

> دوكر و[أدريان] كِنت أوضحت أنه لا بد أنه كان هناك أيضًا عددٌ لا نهائي من العوالم الأخرى. كان هناك، علاوةً على ذلك، عددٌ لا نهائي من العوالم المتسقة التي ظلَّت تقليدية حتى هذه اللحظة، لكنها لن تماثل عالمنا في أي شيء خلال خمس دقائق. ومما يثير الحيرةَ أكثرَ أنه كان هناك عوالم كانت تقليدية حتى هذه اللحظة، لكنها كانت حالات متراكبة مختلطة عشوائيًّا من [عوالم] تقليدية في أي مرحلة في الماضي ... وإن كان تفسير التواريخ المتسقة صحيحًا، فليس لدينا الحق في الاستدلال من الأحفوريات الموجودة حاليًّا على أن الديناصورات كانت تجول الكوكب قبل مائة مليون عام.

كل التواريخ واقعية بالقَدْر نفسه، وما نعتبره «تاريخ» عالمنا يتوقَّف على الأسئلة التي نطرحها عن العالم. وعلى غرار ما يحدث حين نُجري تجارب على الإلكترونات، إذا بحثنا عن موجات، حصلنا على موجات، لكن إذا بحثنا عن جسيمات، حصلنا على جسيمات، وإذا بحثنا عن دليل على وجود الديناصورات في الماضي، وجدنا حينئذٍ تاريخًا متسقًا مع وجود الديناصورات في الماضي. لا يعني هذا بالضرورة أنه «كان بالفعل هناك» ديناصورات في الماضي، بل يعني فقط أن حالة العالم اليوم متسقة مع احتمال وجود ديناصورات في الماضي. وعلى حد تعبير سمولين، لدينا «نظرية نستطيع بها صياغة الإجابات، وليس الأسئلة».

لا تبدو الأشياء كلها واحدة لكل الناس، لكنك قد ترى أن تفسير إزالة الترابط إما نسخة أخرى من تفسير كوبنهاجن، أو نسخة من تفسير عوالم متعددة، حسب هواك. لكن لا تقلق إن لم يَرُق لك أيٌّ منها. فربما تجد العزاء في تفسير المجموعة.

هوامش

(١) لقد أمسكته في يدي.

(٢) بالطبع لم يكن ديفيد دويتش ليرى في هذا الأمر مشكلةً على الإطلاق! لكن هذا العزاء يتعلق بإزالة الترابط في المقام الأول، وليس بتفسير العوالم المتعددة.

(٣) (ويندفيلد آند نيلسون، لندن، ٢٠٠٠). كتاب دَسم.

العزاء الخامس:
لا تفسير المجموعة

كان تفسير المجموعة أول وأبسط بديل لتفسير كوبنهاجن، والتفسير المفضَّل لأينشتاين؛ إذ قال:

> إن محاولة تصوُّر الوصف الكمي النظري باعتباره الوصف الكامل للأنظمة المفردة تؤدي إلى تفسيرات نظرية غريبة، سرعان ما تصير غير ضرورية فور تقبُّل المرء التفسير القائل إن الوصف يشير إلى مجموعات من الأنظمة وليس أنظمة مفردة.[1]

يوضِّح ليزلي بالينتاين، أحد أوائل المؤيدين المعاصرين للفكرة، والذي يعمل في جامعة سايمون فريزر في كندا، أن «نقد أينشتاين للتفسير الذي تقبَّله العديد من الفيزيائيين، حتى وإن لم يبوحوا بذلك، تمثَّل في أن دالة الحالة الكمية [الموجة] لا تقدِّم وصفًا لنظام منفرد بل لمجموعة من أنظمة متشابهة». لكن هذا «التفسير» في الحقيقة لا يفسِّر أيَّ شيء على الإطلاق. فهو ينص ببساطة على أن كلَّ ما يبدو غريبًا بشأن عالَم الكَم يمكن تفسيره في إطار الإحصائيات (لذا يُعرف أحيانًا بالتفسير الإحصائي). إنه أشبه بالشرطي في مسرح الجريمة الذي يأمر حشود المتفرجين قائلًا: «لا يوجد ما يستدعي المشاهدة، برجاء المغادرة.»

الإحصائيات هي تلك الخاصة بالمجموعات المتجانسة. لكنها ليست من نوع المجموعات المتجانسة التي تتبادر إلى ذهن أغلب الناس حين يسمعون عنها. في اللغة الدارجة، تُعرَّف المجموعة المتجانسة بأنها مجموعة من الأشياء بينها سِمة مشتركة، أو تعمل معًا، على غرار

فرقة من عازفي الآلات الوترية. من وجهة نظر الإحصائي، من الممكن أن تشكِّل مجموعة من ٦٠٠ حجر نرد متطابق مجموعة متجانسة، وإذا أُلقي كل هذا النرد معًا، فإن قوانين الاحتمالية ستحملنا على توقُّع رؤية نحو ١٠٠ رقم ستة، و١٠٠ رقم خمسة، و١٠٠ رقم أربعة، و١٠٠ رقم ثلاثة، و١٠٠ رقم اثنين، و١٠٠ رقم واحد. لكن ثَمة طريقة أخرى للحصول على الناتج الإحصائي نفسه. أحضِرْ حجرَ نرد واحدًا سليمًا، وارمِه ٦٠٠ مرة. لك أن تتوقَّع أن يأتي رقم ٦ مائة مرة، ورقم ٥ مائة مرة، وهكذا. هذا هو نوع المجموعات المتجانسة التي يشير إليها علماء فيزياء الكَم. إن صندوقًا مليئًا بجزيئات الغاز لن يشكِّل مجموعة متجانسة بهذا المعنى، لكن عدة صناديق متطابقة من الغاز خضعت لنفس التجارب ستكون كذلك. في أفضل الظروف، ستجري نفس التجربة على نفس الجسيم بالضبط عدة مرات، وترصد نتيجة كلٍّ من هذه «المحاولات». أي المجموعة المتجانسة. وسوف تتبع النتائج توزيعًا للاحتمالات يتفق والقواعد التي وضعها ماكس بورن.

سيكون من الصعوبة بمكان إجراء مثل تلك التجربة المثالية، لكن ليس هذا بيت القصيد في الحقيقة. بدلًا من إجراء تجربة الشق المزدوج على مليون إلكترون مثلًا في الوقت نفسه والكشف عنها على الجانب الآخر، تأمَّل نفس الإلكترون وهو يمرُّ مرارًا وتكرارًا مليون مرة، مع ملاحظة الموضع الذي يصل إليه على الجانب الآخر في كل مرة يمرُّ فيها. النقطة الحاسمة التي تروق لمؤيدي هذا التفسير أن الجسيمات دائمًا ما تكون جسيمات حقيقية بالاستخدام الدارج للمصطلح. لا تنطبق الدالة الموجية على الجسيمات المفردة؛ لذا فكل إلكترون مفرد، على سبيل المثال، سيدور في الواقع إما لأعلى أو لأسفل، لكن حين يكون لديك عدة جسيمات تكون احتمالية أن تجد أيًّا من الاحتمالين عند فحص إلكترون فردي (على أن تتكافأ الظروف الأخرى) ٥٠:٥٠. لا توجد ازدواجية للموجة والجزيء، ولا تراكب، ولا قطط حية وميتة. بالطبع سيكون من الصعب إجراء تجربة القطة مائة مرة أو أكثر باستخدام القطة نفسها، لكن إذا أجريتها على مائة قطة الواحدة تلو الأخرى، فسوف يعيش النصف، وفقًا لتفسير المجموعة، ويموت النصف، لكن لن تكون أي واحدة منها في حالة تراكب.

يبدو الأمر مغريًا. فهو يتفق مع المنطق البديهي. لكن كما أشار يوان سكوايرز، لا بد ألا «ندَّعي أننا قد حللنا مشكلات [التفسير]. لقد تجاهلناها فحسب ... فالأنظمة الفردية موجودة.» وكيف يفترض تطبيقه عمليًّا؟ كما هو الحال دائمًا في نظريات الكَم، تزداد الأمور تعقيدًا وغموضًا عند محاولة تبيُّن ما يحدث عند دراسة النظام — المجموعة في

هذه الحالة — أو تفاعله مع العالم الخارجي. ينطوي إعداد النظام على قدرٍ معيَّن من العشوائية، وينطوي رصده على مستوًى آخر من العشوائية. لقد عُدنا لمشكلةٍ أين ينتهي النظام وأين يبدأ العالم الخارجي، مثل التشابك الذي ينتشر في أنحاء الكون في تفسير إزالة الترابط. ومن الأمثلة على هذا التفاعل مع العالم الخارجي المستخدمة أحيانًا لدعم تفسير المجموعة ما يُسمى بتجربة «القِدْر المُراقَب».

خلاصة هذه الفكرة أنه رغم أن معادلات فيزياء الكَم تصف احتمال العثور على نظام في حالة أو أخرى من الحالات، فهي لا تفيد بشيء بخصوص انتقال الأنظمة «من» حالة إلى أخرى. لا يوجد في المعادلات شيء يصف «انهيار الدالة الموجية». ولم يسبق لتجربةٍ أن رصدت دالة موجية وهي في حالة انهيار. في عام ١٩٥٤، أشار آلان تورنج إلى أن النظام الكمي الذي «يُراقب» باستمرار لن يتغير أبدًا. فكتب قائلًا:

> من السهل أن نستخدم نظرية قياسية لندلِّل على أنه إذا بدأ نظامٌ ما في حالة ذاتية كمية ميكانيكية[٢] ذات طبيعة قابلة للرصد والمشاهدة، وأُخذت قياسات تلك السمات القابلة للرصد عدد N من المرات في لحظة، فعندئذٍ حتى إن لم تكن الحالة ثابتة، فسيكون احتمال أن يظل النظام في نفس الحالة بعد ثانية مثلًا يساوي واحدًا حتى إذا صار المتغير N لا نهائيًّا؛ أي إن الرصد المستمر سيمنع الحركة.[٣]

يسعى الفيزيائيون إلى تفسير هذا بشتى الأساليب. إليك أحدها. تخيَّلْ نظامًا في حالة واضحة المعالم ذا موجة احتمالية تتمدَّد وتزيد تدريجيًّا من احتمال العثور عليه في حالة أخرى. إذا انتظرت مدةً طويلة، ثم نظرت، فستراه غالبًا في حالةٍ مختلفة. لكن إن نظرت سريعًا جدًّا، فلن تكون الاحتمالية قد وسعها الوقت للتغيير، وعندئذٍ سيظل في الحالة نفسها. لا يمكن أن يكون في حالة وسيطة؛ لأنه لا يوجد حالات وسيطة. لذلك لا بد أن تبدأ الموجة في الانتشار مرةً أخرى من الموقع ذاته. انظر مرارًا، ولن تجد أيَّ تغيير أبدًا. إن «القِدْر» الكمي لن يغلي إذا ظلِلتَ تنظر إليه. كان هذا تخمين تورنج، وقد خضع حديثًا للتجارب.

انطوت هذه التجارب على تنويعات على نفس الفكرة. عادةً ما يكون «القِدْر» هو بضعة آلاف من أيونات عنصر كالبريليوم مثلًا، محتجزة بواسطة مجالات كهربائية ومغناطيسية. والأيون هو ذرة سُلب منها إلكترون أو أكثر، فصارت ذات شحنة موجبة؛ مما يجعل من السهل التلاعب بمثل تلك المجالات. يمكن إعداد الأيونات في مستوًى من الطاقة «ترغب» في الهروب منه، بالقفز إلى مستوًى أدنى من الطاقة. ويمكن مراقبة حالة النظام بتقنية

دقيقة تشتمل على أجهزة ليزر، لمعرفة عدد الأيونات التي تحلَّلت بهذه الطريقة بعد مدة زمنية معينة.

في واحدة من التجارب النمطية، تحلَّل نصف عدد الأيونات بعد ١٢٨ ملِّي ثانية. لكن إذا «نظر» الليزر بعد ٦٤ ملِّي ثانية، كان ربع عدد الأيونات فقط هو الذي يختفي. وحين ومض الليزر مرةً كل ٤ ملِّي ثانية، لينظر ٦٤ مرة خلال ٢٥٦ ملِّي ثانية، كانت كل الأيونات تقريبًا ما زالت في حالتها الأصلية. من ناحية الاحتمالات المرتبطة بالدالة الموجية، يعود هذا الإخفاق في «الغليان» إلى أنه بعد ٤ ملِّي ثانية كان احتمال تحوُّل الأيون ٠،٠٠١ بالمائة فقط؛ لذلك كان لا بد أن يظل ٩٩,٩٩ بالمائة من الأيونات في المستوى الأول. ويسري هذا الأمر مع كل فاصل مدته ٤ ملِّي ثانية. وكلما قصرت مدة الفاصل بين المشاهدات، كان التأثير أقوى. فالدوال الموجية لا تنهار أبدًا حين تكون تحت المراقبة. فلماذا تتوقَّع أنت أن تنهار من الأساس؟ يذهب بالينتاين إلى أنها لا تنهار، وأن هذا الدليل التجريبي يدعم تفسير المجموعة.

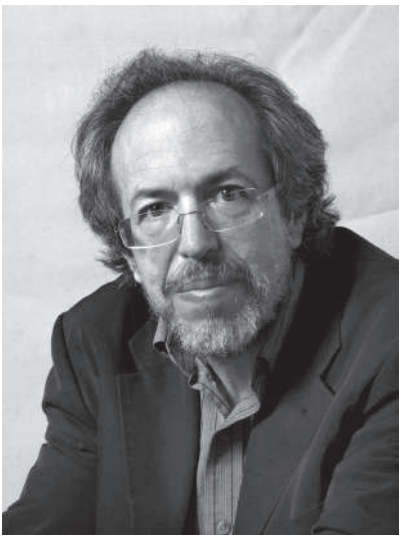
بَيد أنه ثَمَّة مشكلة كبيرة تتعلق بتفسير المجموعة. يقول التفسير بكل وضوح إن الدالة الموجية لا تنطبق على الكِيانات الكمية الفردية، وإنه لا يوجد ما يسمَّى بتراكب الحالات. لكن المجرِّبون صاروا معتادين على التلاعب بكيانات كمية مستقلة، مثل الإلكترونات، في المواقف (مثل الحوسبة الكمية) التي يبدو فيها أنها تتبع وصف الدالة الموجية، ويبدو أن حلقة جهاز السكويد قادرة على تقديم مثال توضيحي عملي لكِيان كمي مستقل ماكروسكوبي (الموجة الإلكترونية التي تسلك الاتجاهين في آنٍ واحد) في حالة التراكب. طالما اعتقدت أن هذا كان بمثابة الضربة القاضية للفكرة. لكن لي سمولين أعاد إحياءها في شكل جديد.

تتبنَّى هذه الصيغة الجديدة من تفسير المجموعة تمامًا مفهوم اللاموضعية، الذي توضح التجارب حاليًّا أنه سِمة رئيسة للكون. ربما ما كان أينشتاين سيرضى عن هذا التحول الذي طال التفسير الذي كان مؤيدًا له. لكن سمولين في غاية الرضا به، حتى إنه بجسارته المعهودة، يطلق عليه تفسير المجموعة الحقيقي. يكمن الاختلاف الأساسي في أن تفسير المجموعة الأصلي لا يوجَد فيه أعضاء المجموعة المتجانسة جميعًا حقًّا في الوقت ذاته، بينما في صيغة سمولين تكون كلها حقيقية وموجودة في الوقت ذاته. ولدينا هنا مصطلح لا بد أن ننتهي من أمره حتى نوضح هذه المسألة بإيجازٍ أكثر. تُسمَّى المكونات الكمية المحتملة للمجموعة (لنقل ذرات الهيدروجين مثلًا) «مقدرات»؛ لأنها أشياء يحتمل أن يكون لها وجود. لكن كما في حالة رمي حجر نرد واحد ٦٠٠ مرة بدلًا من رمي ٦٠٠ حجر مرة

واحدة، فإنها ليست كلها موجودة معًا. إن ما سأشير إليه بدافع الاحترام لسمولين اختصارًا باسم «آر إي آي» (تفسير المجموعة الحقيقي) يقول إن المقدرات التي تشكِّل المجموعة موجودة حقًّا في آنٍ واحد، مثل أحجار النرد الستمائة التي رُميت معًا، وليس مثل حجر النرد الواحد الذي أُلقي ٦٠٠ مرة. ففي أي نظام كمي توجد حالة راهنة حقيقية في كل وقت بعينه، تتحدَّد بقيم المقدرات.

يبدأ سمولين من المبدأ المنطقي القائل إن أي شيء يفترض أنه يؤثِّر على سلوك نظام حقيقي في الكون لا بد أن يكون في حد ذاته نظامًا حقيقيًّا في الكون. فيقول إنه ليس من المقبول أن «نتخيَّل أن ثَمَّة طريقةً شبحية «تؤثِّر بها الاحتمالات على الواقع»». في تفسير الموجة الدليلية مثلًا، تكون الموجة سِمةً حقيقية من سمات الكون؛ أي مُقدَّرًا، وليس «موجة احتمالية» شبحية. لكن ذلك التفسير يخالف تمامًا فرضية أخرى طرحها سمولين، حين قال إنه ينبغي ألا يكون في أي مكان في الطبيعة «فِعل غير متبادل». ويُعَد هذا امتدادًا لقانون نيوتن الذي ينصُّ على أن الفعل وردَّ الفعل في الأنظمة التقليدية متساويان ومتضادان. في تفسير الموجة الدليلية، تؤثِّر الموجة على الجسيم، لكن لا يؤثِّر الجسيم على الموجة؛ أي لا يبادلها التأثير. لكن في المجموعات التي تصوَّرها سمولين، يؤثِّر كل مقدَّر من مقدرات المجموعة على الأخرى على نحوٍ تبادلي؛ لإنتاج السلوك الذي نراه في تجاربَ من قبيل تجربة الثقبين. وإن كانت كل مكونات المجموعة حقيقية، فلا يوجد سببٌ لا يجعل هناك تفاعلات جديدة (بمعنى لم تكن اكتُشفت قبل ذلك) فيما بينها.

وفي ذلك يضرب مثالًا، يتضمن ذرات هيدروجين في أدنى حالات طاقتها، التي تسمَّى الحالة الأرضية. توجد مجموعة من كل ذرة هيدروجين من ذلك النوع في الكون؛ مجموعة حقيقية من مقدرات حقيقية. تتفاعل مكونات المجموعة هذه كلٌّ مع الأخرى على نحوٍ لا موضعي، حيث ينسخ كل مقدَّر حالات المقدَّرات الأخرى وفقًا لقواعد الاحتمالية المرتبطة بتلك الحالات الكمية. لا تتوقف احتمالات عمليات النسخ على موضع المكونات في الفضاء، وإنما تتوقف على طريقة توزيع المقدَّرات في المجموعة. لذا تجيز الإحصاءات الكمية الحصول على قائمة بالأماكن التي ستُوجَد فيها ذرات الهيدروجين في حالتها الأرضية، لكنها لا تخبرنا بمكان كل ذرة هيدروجين على وجه التحديد. استطاع سمولين أن يبرهن رياضيًّا أنه من خلال بضع قواعد بسيطة كتلك حول كيفية تأثير أزواج من المقدرات بعضها على بعض، تستطيع هذه العملية إنتاج كل السلوكيات المرصودة للأنظمة الكمية. وتستطيع كذلك أن تفسِّر لماذا لا يمكن لأشياء مثل القطط والبشر أن تكون في حالة تراكب.



لي سمولين
«تصوير نير بيركت»

يقول سمولين إن ميكانيكا الكَم تنطبق على أنظمة الكون الفرعية الصغيرة التي تأتي في نُسخٍ متعدِّدة، مثل ذرات الهيدروجين في حالتها الأرضية. أما الأنظمة الماكروسكوبية مثل القطط والبشر، فليس لها نُسَخ في أي مكان في الكون؛ ومن ثَم لا تتأثر بعملية النسخ التي تطول المقدَّرات الكمية المتفاعلة. فليس لديها شيء لتتفاعل معه من هذا المنطلق.

لهذا بعض التبعات المثيرة للاهتمام. أولًا، لا بد أن يكون الكون متناهيًا. ففي كونٍ لا متناهٍ سوف يكون هناك نُسَخ لا نهائية منك؛ ومن ثَم سيكون للتفاعلات التي وصفتها معادلات سمولين تأثير عليك، وستتصرَّف مثل جسيم كمي! ثانيًا، علاوة على اشتقاق معادلة شرودنجر الموجية من قواعده الرياضية البسيطة، يستطيع سمولين كذلك اشتقاق قوانين الميكانيكا الكلاسيكية — قوانين نيوتن، وما إلى ذلك — كصيغة تقريبية لميكانيكا الكَم. لكنه يظن أن ميكانيكا الكَم في حد ذاتها صيغةٌ تقريبية لوصفٍ أعمق للكون (لا شك أن هذا كان دافعه الحقيقي وراء التوغل في هذه الأمور الغامضة المعقَّدة)، بل إنه يذهب لأبعد من ذلك بالإشارة إلى أنه قد يحدث إرسال حقيقي للإشارات أسرعُ من الضوء إن كان هذا هو الحال.

ومن الإشارات القوية إلى أننا لم نتوصل بعدُ إلى النظرية النهائية، أن التفاعل بين المقدَّرات، كما قد تكون لاحظت، يوحي على ما يبدو بأن هناك زمنًا كونيًّا أوحَد، بحيث يمكن للتفاعلات أن تتم متزامنةً، وهو ما يستلزم امتدادًا لنظرية النسبية.[٤] وفي ذلك يقول: «لا بد أن تكون فيزياء الكَم أقربَ لنظرية كونية مصاغة بمصطلحات مختلفة.» وقد يكون المكان الأمثل للبحث عن تلك القوانين الأساسية هو التجارب المشتملة على أنظمةٍ يرجَّح أن تُوجَد في أعداد صغيرة من النسخ في الكون، في الخط الفاصل بين العالَم الميكروسكوبي والماكروسكوبي. والتجارب التي تُجرى على أشياءَ من قبيل أجهزة الكمبيوتر الكمية قد تجعل من الممكن معرفةُ ما إذا كان يوجد منها أي نسخ في الكون. فقد يكون هناك نتائج حقيقية قابلة للرصد والملاحظة منبثِقة من تصحيحات لفيزياء الكَم تعتمد على حجم المجموعة.

إذا بدا كل هذا غريبًا، فلدى سمولين شيء يذكِّرنا به. في وقتٍ من الأوقات وجد الناس استحالةً في تصديق أن الشمس تؤثِّر على السلوك الديناميكي للكواكب؛ لأن ذلك من شأنه أن ينطوي على فِعل عجيب عن بُعد. وكما ذكرت من قبل، حتى نيوتن لم يحاول أن يفسِّر طريقة حدوثه، معلِنًا في عبارته الشهيرة: «إنني لا أضع فرضيات». إن تفسير المجموعة الحقيقي يتضمن تفاعلًا لا موضعيًّا من نوع «جديد» بين المقدرات، لكن يجب ألا يكون هذا مزعجًا أكثر من حقيقةِ أنه منذ أكثر من مائة سنة فقط كان تفسير التفاعل بين الشمس والأرض يتضمن نوعًا «جديدًا» من التفاعل، تصفه الآن النظريةُ العامة للنسبية. تبدو اللاموضعية غامضة لغير الفيزيائيين؛ لأنهم لم يعتادوها، لكنها صارت الآن لعددٍ متزايد من الفيزيائيين حقيقةً مسلَّمًا بها مثل حقيقة الجاذبية. ليست بالكثير للهضم قبل الفطور على الإطلاق. إن التفاعلات التي تتجاهل المكان صارت من السمات الراسخة للعالم. لكن ماذا عن التفاعلات التي تتجاهل الزمن؟ هل يمكننا أن نلتمس عزاءً لديها؟

هوامش

(١) انظر كتاب «ألبرت أينشتاين: العالم الفيلسوف»، تحرير بي إيه شيلب (دار نشر هاربر آند روو، نيويورك، ١٩٤٩).

(٢) حالة كمية ميكانيكية تُوازي قيمة واحدة لمعادلة موجية.

(٣) منقول عن أندرو هودجز في كتاب «آلان تورنج: حياة وإرث مفكِّر عظيم» (هاتشينسون، لندن، ١٩٨٣).

(٤) للعلم، ثَمَّة منظِّرون يعتقدون بوجود مقياس مفضَّل للتزامن في النظرية العامة للنسبية، لكن ذلك مجالٌ أعمق من أن أخوض فيه هنا.

العزاء السادس:
تفسير المعاملات اللازمني

تعود أصول تفسير المعاملات لميكانيكا الكَم إلى لغزٍ يتعلَّق بطبيعة الضوء التي حيَّرت ألبرت أينشتاين. ولما كانت حيرة أينشتاين بشأن طبيعة الضوء هي التي قادته إلى وضع النظرية الخاصة للنسبية، فهذا وحده كفيل بأن يجعلنا نأخذها على محمل الجِد. إن الإدراك الذي أدَّى إلى النظرية الخاصة للنسبية يتمثل في أن المعادلات التي تصف سلوك الضوء، وسائر الإشعاعات الكهرومغناطيسية الأخرى، تقول إن سرعة الضوء واحدة لجميع الأشخاص، يمثِّلها ثابت يُشار إليه الآن بالرمز c. إذا سلَّطت مصباحًا نحوي وأنا واقف بجوارك، سأقيس سرعة الضوء القادم من المصباح بالرمز c. ولكن حتى إذا كنت منطلقًا نحوك، أو بعيدًا عنك، بسرعة عالية، فستظل سرعة الضوء المنبعث من المصباح تُقاس بالرمز c. ومن هذه الحقيقة البسيطة استنبط أينشتاين نظرية النسبية.

تُعرَف المعادلات التي تقول، ضمن أشياء أخرى، إن سرعة الضوء واحدة لأي مراقب، بمعادلات ماكسويل، نسبة إلى الفيزيائي الذي اكتشفها في القرن التاسع عشر. لكن معادلات جيمس كلارك ماكسويل تتَّسم بسمةٍ أخرى غريبة. فهي متناظرة في الزمن. في أي مسألة تتعلق بإشعاع كهرومغناطيسي، مثل الإشعاع المرتبط بإلكترون متحرك، يوجد دائمًا حلَّان للمعادلات. يصف أحدهما ما يُدعى موجة «متأخرة»، تخرج من مصدرٍ ما وتمضي في الزمن لتُمتص في مكانٍ ما في العالم. أما الآخر فيصف موجةً «متقدمة في الزمن»، تأتي من ممتصات في العالم بالخارج وتتلاقى فيما نعتقد أنه المصدر (الإلكترون المتحرك في هذه الحالة) من المستقبل. يتجاهل أغلب الفيزيائيين هذا «الحل المتقدم». لكن أينشتاين قال في عام ١٩٠٩:

> في الحالة الأولى يُحسب المجال الكهربائي من إجمالي العمليات التي ينتج عنها، وفي الحالة الثانية يُحسب من إجمالي العمليات التي تمتصه ... يمكن دائمًا استخدام التصورين، بصرف النظر عن تخيُّلنا لمدى بُعد الأجسام المتصة. وهكذا لا يمكن استنتاج أن [الحل المتأخر] له أي أفضلية على الحل [المحتوي على أجزاء متساوية من الموجات المتقدمة والمتأخرة].[١]

«بصرف النظر عن تخيُّلنا لمدى بُعد الأجسام المتصة». ليس هذا بالشيء الذي ينطبق فحسب على الإلكترونات المتفاعلة مع جيرانها، وإنما، على سبيل المثال، على الإشارات التلفزيونية المنبعثة من الأرض في أرجاء الكون. دائمًا ما تتضمَّن المعادلات التي تصف هذه العملية حلًّا يصف الموجات المتقدمة التي تجمع من الكون الإشارات المنبعثة منها على هوائيات التلفزيون. توجد هنا إشارة إلى نوعٍ آخر (أو لعله نفس النوع؟) من اللاموضعية التي صادفناها من قبل، لكن بالطبع لم يكن هذا في ذهن أينشتاين في عام ١٩٠٩.

كان ريتشارد فاينمان من القلائل الذين أخذوا الفكرة على محمل الجِد، حين كان طالب أبحاث في جامعة برينستون في أربعينيات القرن العشرين. فبتشجيع من جون ويلر[٢] المشرِف على رسالته، طوَّر فكرة أنه حين يتفاعل إلكترون مع جسيم آخر مشحون يسافر شيء أشبه بموجة نصفية إلى المستقبل والماضي. وحيثما تلتقي الموجة بجسيم آخر مشحون، ينتج الجسيم الآخر موجته النصفية التي تمضي إلى كلٍّ من المستقبل والماضي في الزمن. لكن في صيغة فاينمان للنظرية، تتداخل الموجتان النصفيتان لتُلغي كلٌّ منهما الأخرى في كل مكان عدا المساحة بين الجسيمين، حيث تُعزز كلٌّ منهما الأخرى ليصنعا موجةً كاملة. حين ألقى فاينمان خطابًا حول الموضوع في جامعة برينستون، كان من بين الأعلام الحاضرين أينشتاين وفولفجانج باولي. قال باولي إنه لا يعتقد أن الفكرة ناجعة، وسأل أينشتاين إن كان متفقًا معه. فقال أينشتاين: «لا، لكنني أرى فقط أنه سيكون من الصعوبة بمكانٍ أن نضع نظريةً مناظرة لتفاعل الجاذبية.»

بالرغم من هذا التأييد، أُهملت الفكرة؛ لأن الناس ببساطة كانوا لا «يعتقدون» في فكرة قدوم الموجات من المستقبل. لكن في أواخر سبعينيات القرن العشرين، وفي أثناء عمل جون كريمر بالتدريس في جامعة واشنطن في سياتل، وهو الذي أَسَرَته فكرة فاينمان منذ صادفها وهو طالب جامعي قبل عشرين عامًا، خطرت له رؤية عبقرية لكيفية دمج الفكرة في ميكانيكا الكَم. وشأن العديد من الأفكار الجيدة، أصبحت بارزة بمجرد أن أشار إليها أحدهم.

كانت رؤية كريمر مدفوعةً بالتفكير فيما يحدث لـ «الموجة الاحتمالية» في نظامٍ كمي عند كشف موقع محدَّد للجسيم الذي ترتبط به. كيف «تعرف» الموجة الموجودة في كل مكان آخر أنها ستختفي في تلك اللحظة؟ يشبِّه كريمر هذا الأمر بزجاجةٍ يُلقى بها في المحيط الأطلنطي من شاطئ في فلوريدا. لتتخيَّل أنها زجاجة كمية تختفي داخل موجة ممتدة عبر أنحاء المحيط حتى أوروبا. ثم على شاطئ في إنجلترا تظهر الزجاجة. في تلك اللحظة تختفي الموجات الممتدة في أنحاء المحيط. أدرك كريمر أنه لا بد من وجود موجات متقدمة ومتأخرة «تتصافح» كميًّا في أرجاء المكان، وأن تلك الموجات المتأخرة التي صنعت «أصداءً» لموجات متقدمة هي وحدها التي تستطيع التأثير على موقع الجسيمات؛ أي انتقالها الكمي الميكانيكي الغامض من «أ» إلى «ب» (أو من مستوى طاقة لآخر) من دون اجتياز المسافة بينهما. لقد سافرت موجات من الزجاجة في إنجلترا في اتجاه عكسي في الزمن إلى فلوريدا، عابرةً المحيط، لإنشاء اتصال فريد وإلغاء الموجات الأخرى. بدا هذا لكريمر شديد الشبه بنموذج الموجة الدليلية، الذي يحتوي على موجاتٍ تدل الجسيمات أين تذهب، لكن مع اختلافٍ حاسم، وهو أنه لا يحتوي على تأكيد التصافح المعكوس زمنيًّا.

يفسِّر هذا كذلك لغز «إي بي آر». فالجسيمان اللذان تفاعلا مرةً يظلان متصلَين، على الدوام وللأبد، عن طريق المصافحات فيما بينهما وموقع تفاعلهما. وكل هذا يتسق مع الوصف الصحيح (من وجهة نظر كريمر) لمعادلة شرودنجر الشهيرة.[٣]

لكي نطبِّق أفكارَ نظرية المتص على ميكانيكا الكَم، لا بد من معادلة كمية تعطينا حلَّين، مثل معادلات ماكسويل، يعادل أحدهما موجةَ طاقة موجبة تتدفَّق داخل المستقبل، ويصف الآخر موجة طاقة سالبة تتدفَّق داخل الماضي. تبدو معادلة شرودنجر للوهلة الأولى لا تفي بالغرض؛ لأنها تصفُ تدفقًا في اتجاهٍ واحد فقط، نفسِّره (بالطبع) بأنه يمتد من الماضي للمستقبل. لكن كما يتعلَّم كل الفيزيائيين في الجامعة (وينساه أغلبهم سريعًا)، فإن الصيغة الأكثر استخدامًا من هذه المعادلة ليست متكاملة. فهي لا تراعي شروط نظرية النسبية كما أدرك رواد فيزياء الكَم أنفسهم. وهذا ليس بالأمر المهم في أغلب الحالات؛ ولذلك فإن طلاب الفيزياء، وحتى أغلب مَن يمارسون ميكانيكا الكَم عمليًّا، يستخدمون الصيغة المبسَّطة من المعادلة دون أي مبالاة بذلك. لكن الصيغة الكاملة للمعادلة الموجية، التي تراعي التأثيرات النسبوية بالقدر المناسب، أشبه بمعادلات ماكسويل إلى حدٍّ كبير. وعلى نحوٍ خاص، تعطي هذه الصيغة مجموعتين من الحلول، إحداهما تتفق ومعادلة شرودنجر البسيطة المألوفة، والأخرى توازي صورةً طِبق الأصل من معادلة شرودنجر؛ إذ تصف تدفُّق الطاقة السالبة في الماضي.

تتجلى هذه الازدواجية في أوضح صورها في حساب الاحتمالات في سياق ميكانيكا الكَم. ثَمة مصطلح رياضي يصف خواص النظام الكمي، يُدعى متجه الحالة، وهو المصطلح الذي تصفه معادلة شرودنجر الموجية. وهو عدد مركَّب بوجهٍ عام. والعدد المركَّب هو عدد يتضمن الجذر التربيعي لسالب واحد، ويُكتب i. لذا بينما a وb عددان عاديَّان، سيكون $(a + ib)$ عددًا مركبًا، وكذلك $(a - ib)$. تتوقَّف حسابات الاحتمالات اللازمة لحساب احتمال العثور على إلكترون (مثلًا) في مكانٍ معيَّن في زمن معيَّن على حساب تربيع متجه الحالة الموافق لتلك الحالة بعينها للإلكترون.

لكن حساب تربيع متغير مركَّب لا يعني ببساطةٍ ضربه في نفسه. وإنما يجب، بدلًا من ذلك، الإتيان بمتغيرٍ آخر، وهو صورة طِبق الأصل منه تُسمَّى مرافق العدد المركَّب، بتغيير العلامة أمام الجزء التخيلي: فإذا كانت + صارت −، والعكس بالعكس. وبذلك يكون $(a - ib)$ المرافق المركَّب لـ $(a + ib)$. ثم يضرب كلا العددين المركَّبين في الآخر لإعطاء الاحتمالية. أما بالنسبة إلى المعادلات التي تصف كيفية تغيُّر نظامٍ ما مع مرور الوقت، فإن عملية تغيير علامة الجزء التخيلي وإيجاد مرافق العدد المركب تعادل عكس اتجاه الزمن! تحتوي معادلة الاحتمالات الأساسية نفسها، التي وضعها ماكس بورن عام ١٩٢٦، على إشارة صريحة لطبيعة الزمن، وإلى إمكانية وجود نوعين من معادلات شرودنجر؛ أحدهما يصف موجات متقدمة، والآخر يمثِّل موجات متأخرة.

الأثر الجدير بالملاحظة هو أنه منذ عام ١٩٢٦، كان كلما أخذ فيزيائيٌّ مرافق العدد المركب لمعادلة شرودنجر المبسَّطة واستخدمه لحساب احتمال كمي، كان في الواقع يأخذ في حسبانه حل الموجة المتقدمة للمعادلات، وتأثير الموجات التي تنتقل في اتجاه عكسي في الزمن، دون أن يدرك ذلك. إن رياضيات تفسير كريمر لميكانيكا الكَم لا تشوبها أيُّ شائبة على الإطلاق؛ لأن الرياضيات، وصولًا لمعادلة شرودنجر، هي نفسها الموجودة في تفسير كوبنهاجن. الفرق حرفيًّا في التفسير فقط.

تتمثَّل الطريقة التي يصف بها كريمر معاملة كمية نموذجية في مصافحة جسيم لجسيم آخر في مكانٍ ما آخر في الزمان والمكان. فبدأ من فكرة انبعاث إشعاع كهرومغناطيسي من إلكترون ليمتصه إلكترون آخر، لكن ينطبق الوصف بالمثل على متجه الحالة لكِيان كمي يبدأ في حالة وينتهي في حالة أخرى نتيجةً لتفاعلٍ ما؛ لنقُلْ مثلًا متجه حالة إلكترون انبعث من مصدر في جانب من تجربة الثقبين وامتصَّه كاشف على الجانب الآخر من التجربة.

من الصعوبات التي تصاحب أي وصف من ذلك النوع باللغة الدارجة هو كيفية تناول التفاعلات التي تسير في الاتجاهين في الزمن في آنٍ واحد؛ ومن ثَم تحدث آنيًّا بالمعنى الذي تشير إليه الساعات في حياتنا اليومية. يفعل كريمر هذا بالوقوف فعليًّا خارج الزمن، واستخدام حيلة دلالية للوصف في إطارِ نوع من الزمن الاستعاري. ولا تعدو هذه كونها حيلةً دلالية، لكنها قطعًا تساعد أغلب الناس على استحضار الصورة في أذهانهم بوضوح.

يسير الأمر على النحو التالي. حين يتفاعل كِيان كمي (الباعث) مع العالم الخارجي، في هذه الصورة، يحاول أن يفعل ذلك بإنتاج مجال هو خليط متناظر زمنيًّا من موجة متأخرة تمتد للمستقبل وموجة متقدمة تمتد للماضي. كخطوة أولى لتخيُّل ما يحدث، تجاهل الموجة المتقدمة وتابع قصة الموجة المتأخرة. تتجه هذه الموجة نحو المستقبل حتى تلتقي بكِيان (الممتص) يمكنها التفاعل معه. تتضمن عملية التفاعل جعل الكِيان الثاني ينتج مجالًا متأخرًا جديدًا يلغي المجال المتأخر الأول تمامًا. من ثَم يكون التأثير النهائي في مستقبل الممتص هو عدم وجود مجال متأخر.

لكن الممتص ينتج كذلك موجةً متقدمة سالبة تسافر للوراء في الزمن نحو الباعث، في أثر الموجة المتأخرة الأصلية. عند الباعث، تُمتص هذه الموجة المتقدمة؛ وهو ما يجعل الكِيان الأصلي يرتدُّ بحيث يشع موجةً متقدمة ثانية تتجه نحو الماضي. تلغي هذه الموجة المتقدمة «الجديدة» الموجة المتقدمة «الأصلية» تمامًا، فلا يعود إشعاع فعَّال للماضي قبل لحظة حدوث الانبعاث الأصلي. كلُّ ما يتبقى هو موجة مزدوجة تصل الباعث بالممتص، مكوَّنة من موجة نصفية متأخرة تحمل طاقة موجبة متجهة نحو المستقبل، وموجة نصفية متقدمة تحمل طاقة سالبة متجهة نحو الماضي (في اتجاه الوقت السالب).

ولأن حاصل السالبين موجب، تُضاف هذه الموجة المتقدمة إلى الموجة المتأخرة الأصلية كما لو كانت هي الأخرى موجةً متأخرة متجهة من الباعث للممتص. تُجمع الطاقة السالبة والزمن السالب ليعطيا طاقةً موجبة تتقدَّم في الزمن. وبكلمات كريمر:

> يمكن أن نعتبر الباعث ينتج موجةً يقدمها كـ«عرض» تتجه إلى الممتص. والممتص بدوره يردُّ بموجة «تأكيد» للباعث، لتتم الصفقة بـ«مصافحة» عبر الزمكان.[٤]

لكن هذا مجرد تسلسل للأحداث من منظور الزمن الاستعاري. فالعملية في الواقع لا زمنية؛ إذ تقع مرةً واحدة.

يقول كريمر: «إن كان ثَمَّة رابط بعينه مميَّز في سلسلة الأحداث، فهو ليس ذلك الذي ينهي السلسلة. وإنما هو ذلك الرابط الذي في بداية السلسلة حين يتلقى الباعث موجاتِ

تأكيدٍ عدةً من موجة العرض الخاصة به، فيدعم واحدة منها، يتم اختيارها عشوائيًّا وفقًا لقواعد الاحتمالية، بحيث يجسِّد موجة التأكيد تلك في الواقع كصفقة مكتملة. فالتبادل اللازمني ليس له «وقت» في النهاية.»

كيف يُحَلُّ هذا الغموض الجوهري الذي يكتنف تجربة الثقبين؟ وفقًا لتفسير المعاملات، تنتشر موجة «عرض متأخرة» من خلال كلا الثقبين في التجربة، وتحفز «موجة تأكيد» متقدمة من شاشة الكاشف فتسافر عائدةً من خلال الثقبين في التجربة إلى المصدر. يختار كل جسيم أيُّ العروض يُقبَل عشوائيًّا، منتِجًا نمطَ تداخل. لكن إذا حدث في صيغة اختيار متأخر مراوغة من التجربة، وسُدَّ أحد الثقبين بعد أن مضى الجسيم في رحلته، فإن الجسيم «يعلم» هذا بالفعل؛ لأن موجة التأكيد كان لديها ثقب واحد فقط لتمرَّ من خلاله عند عودتها من أجل إجراء المصافحة. وفي ذلك يقول كريمر:

> لم تَعُد مسألةُ متى يقرِّر المراقب أي تجربة سيُجري مهمةً. فقد قرَّر المراقب تكوين التجربة والشروط الحدية وتمَّت المعاملة بناءً على ذلك. علاوةً على ذلك، فإن حقيقة أن حدث الكشف ينطوي على قياس (على عكس أي تفاعل آخر) لم يَعُد مهمًّا؛ ولذلك لا يكون للمراقب دور خاص في العملية.

تحقَّق هذا النجاح في حلِّ لغز فيزياء الكَم في مقابل قبول فكرة واحدة فقط تبدو منافية للمنطق؛ وهي فكرة أن جزءًا من الموجة الكمية يمكنه فعلًا العودة للوراء خلال الزمن. للوهلة الأولى، يتناقض هذا تناقضًا صارخًا مع فِكرنا البديهي بأن العلل لا بد دائمًا أن تسبق الأحداث التي تسبِّبها. لكن عند التأمل من كثَبٍ يتبيَّن أن السفر عبر الزمن الذي يتطلَّبه تفسير المعاملات لا يخالف مفهوم السببية الدارج مطلقًا. فحين يقع تصافح لا زمني بمساعدة موجة كمية متقدمة تسافر إلى الوراء في الزمن، لا يكون للأمر أيما تأثير على النمط المنطقي للسببية في عالمنا اليومي.

لا ينبغي الاندهاش من اختلاف تفسير المعاملات عن المنطق في طريقة تعامله مع الزمن؛ لأن تفسير المعاملات يتضمن بوضوحٍ تأثيرات نظرية النسبية. أما تفسير كوبنهاجن، على النقيض، فيعامل الزمن بالطريقة «النيوتونية» الكلاسيكية، وهذا من صميم أي تناقضات في أي محاولة لتفسير نتائج التجارب الكمية التي تقيس متباينة بيل وفقًا لتفسير كوبنهاجن. لو كانت سرعة الضوء لا نهائية، لتلاشت المشكلات؛ فلن يكون هناك حينها اختلاف بين الوصف الموضعي واللاموضعي للعمليات التي تتضمن متباينة بيل،

وستكون معادلة شرودنجر البسيطة وصفًا دقيقًا لما يحدث؛ فمعادلة شرودنجر البسيطة هي في الواقع المعادلة «النسبوية» الصحيحة حين تكون سرعة الضوء لا نهائية.

كيف يؤثِّر التصافح اللازمني على احتمال الإرادة الحرة؟ قد يبدو للوهلة الأولى وكأن كل شيء مُحدَّد بهذه الاتصالات بين الماضي والحاضر. فكل فوتون ينبعث «يعلم» مسبقًا متى وأين سيُمتص؛ وكل موجة احتمالية كمية، تنسل بسرعة الضوء من خلال الشقَّين في تجربة الثقبين، «تعلم» مسبقًا أيُّ نوع من الكواشف ينتظرها على الجانب الآخر. نحن أمام صورة لكونٍ جامد، ليس للزمان ولا المكان أي معنًى فيه، وكل ما كان أو سوف يكون يومًا قائم فحسب.

لكن في إطاري الزمني تُتَّخذ القرارات بإرادة حرة حقيقية ومن دون معرفة أكيدة بنتائجها. فالأمر يستغرق وقتًا (في العالم الماكروسكوبي) كي تُتَّخذ القرارات (القرارات البشرية و«الاختيارات» الكمية مثل تلك المتعلقة بتحلل ذرة، على حدٍّ سواء) التي تصنع الواقع اللازمني للعالم المجهري.

لا يتوانى كريمر عن التأكيد على أن تفسيره لا يضع تكهنات تختلف عن تلك التي تضعها ميكانيكا الكَم التقليدية، وأنه يُقدِّم، كنموذج تصوري ربما يساعد الناس على تأمُّل ما يحدث في عالم الكَم بوضوح، أداةً يحتمل أن تكون مفيدة في التدريس خاصةً، وذات قيمة كبيرة في تنمية المدارك والرؤى الخاصة بالظواهر الكمية التي كانت ستصبح غامضة لولا هو. لكن لسنا في حاجة للشعور بأن تفسير المعاملات يعاني مقارنةً بتفسيرات أخرى في هذا الصدد؛ إذ لا يزيد أيٌّ منها عن كونه نموذجًا تصوريًّا صُمِّم لمساعدتنا على فَهْم الظواهر الكمية، وكلها تعطي نفس التوقعات.

وهنا تكمن المشكلة. إن جميع سبُل العزاء تتساوى في المزايا، وتتساوى جميعًا في العيوب أيضًا. وغاية ذلك على الأقل أنك حر في اختيارِ ما يمنحك أكبرَ قدرٍ من العزاء، وتجاهَلْ ما دونه.

هوامش

(١) انظر «الأبحاث المجمَّعة لألبرت أينشتاين»، المجلد الثاني، تحرير إيه بيك وبي هافاز (دار نشر جامعة برينستون، ١٩٨٩)؛ مقتبسة أيضًا في كتاب جون كرامر «المصافحة الكمية» (انظر قائمة المراجع).

(٢) جون ويلر مرة أخرى. فقد كان لديه سِجل أعمال طويل وباهر.
(٣) الجزء التالي مأخوذ من كتابي «هِرَّتا شرودنجر».
(٤) «ريفيوز أو مودرن فيزيكس»، مجلد رقم ٥٨، صفحة ٦٤٧، ١٩٨٦.

الخاتمة

لا يوجد بندٌ يشترط سلامة العقل

على مدار التسعين عامًا الماضية، ظل العديد من أفضل العقول العلمية على وجه الأرض يُمعِنون التفكير في معنى ميكانيكا الكَم.

إن سبُل العزاء الستة التي وصفتها هنا هي أفضل الأفكار التي توصَّلتْ إليها تلك العقول، ويمكن تلخيصها بإيجاز على النحو الآتي:

أولًا: العالَم غير موجود إلا إذا نظرتَ إليه.

ثانيًا: الجسيمات توجِّهها موجةٌ غير مرئية، لكن ليس للجسيمات تأثير على الموجة.

ثالثًا: كلُّ ما يجوز حدوثه يحدث، في مجموعة من العوالم المتوازية.

رابعًا: كلُّ ما كان ممكنًا حدوثه حدث بالفعل، ونحن إنما لاحظنا جزءًا منه فقط.

خامسًا: يؤثِّر كل شيء على كل شيء آخر في الحال، كأنه لا وجود للمكان.

سادسًا: يؤثِّر المستقبل على الماضي.

وكما كتب فاينمان في كتابه «طبيعة القانون الفيزيائي»: «أعتقد أن بإمكاني أن أقول مطمئنًّا إنه لا أحد يفهم ميكانيكا الكَم ... لا تظل تردِّد لنفسك، إذا استطعت أن تتحاشى ذلك: «لكن كيف له أن يكون هكذا؟» لأنك سوف «تضل السبيل» إلى طريقٍ مسدود لم يفلت منه أحدٌ بعد. فلا أحد يعلم كيف يمكن أن يكون هكذا.»

قراءات إضافية

مراجع سهلة

Philip Ball, *Beyond Weird* (Bodley Head, London, 2018).

Brian Clegg, *The Quantum Age* (Icon Books, London, 2014).

John Gribbin, *The Quantum Mystery* (Kindle Single).

David Lindley, *Where Does The Weirdness Go?* (Basic Books, New York, 1996).

George Musser, *Spooky Action at a Distance (Scientific American*/Farrar, Strauss & Giroux, New York, 2015).

Heinz Pagels, *The Cosmic Code* (Michael Joseph, London, 1982).

Euan Squires, *The Mystery of the Quantum World*, second edition (Institute of Physics, Bristol, 1994).

مراجع متوسطة

John Cramer, *The Quantum Handshake* (Springer, Heidelberg, 2016).

Richard Feynman, *The Character of Physical Law*, new edition (Penguin, London, 1992).

مراجع صعبة

John Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 1987).

Richard Feynman, Robert Leighton and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Volume III (Addison–Wesley, Reading, MA, 1965).

Leonard Susskind and Art Friedman, *Quantum Mechanics* (Allen Lane, London, 2014) (very hard, but very thorough).

مراجع مسلية

https://www.poetryfoundation.org/poems/43909/the–hunting–of–the–snark

هنـــداوي