مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
إدارة الثقافة العلمية



الكون الأنيق

تأليف
بريان غرين
أستاذ الفيزياء والرياضيات في جامعتي كولومبيا وكورنيل

ترجمة

الدكتور عبد الحليم منصور
أستاذ في كلية العلوم
في جامعة دمشق

الدكتور نضال شمعون
الأستاذ في المعهد العالي للعلوم
التطبيقية والتكنولوجيا في دمشق



سلسلة الكتب المترجمة

ISBN 99906-30-79-8 ردمك

مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
إدارة الثقافة العلمية

الكـــون الأنيـــق

تأليف

بريان غرين

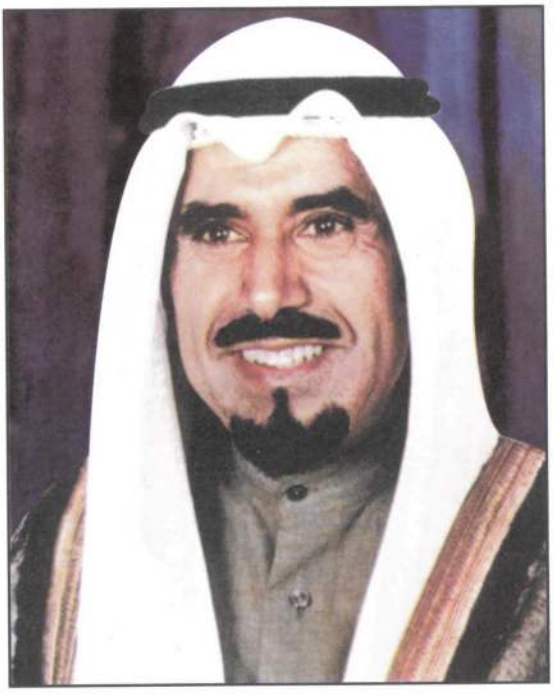
أستاذ الفيزياء والرياضيات في جامعتي كولومبيا وكورنيل

ترجمة

الدكتور/ عبد الحليم منصور
الأستاذ في كلية العلوم
في جامعة دمشق

الدكتور/ نضال شمعون
الأستاذ في المعهد العالي للعلوم
التطبيقية في دمشق

سلسلة الكتب المترجمة
الطبعة الأولى 2005



صاحب السمو

الشيخ جابر الأحمد الجابر الصباح

أمير البلاد



سمو الشيخ

سعد العبد الله السالم الصباح

ولي العهد



سمو الشيخ

صباح الأحمد الجابر الصباح

رئيس مجلس الوزراء

الكون الأنيق

الأوتار الفائقة والأبعاد الخفيّة والبحث عن النظرية النهائية

بريان غرين

يعمل اليوم كثير من الفيزيائيين والرياضيّاتيين في سائر أرجاء العالم في مجال "**نظرية الأوتار**" التي تعد مفتاحاً لفهم النظرية النهائية التي استعصت على أنشتاين، رغم عمله بها لأكثر من ثلاثين عاماً. وستقدم هذه النظرية الجوابَ عن مشكلة قائمة منذ قرن من الزمن، وتتعلق بالتناقض ما بين فيزياء الظواهر الكبيرة (وهي موضوع نظرية النسبية العامة)، وفيزياء الظواهر الصغيرة (وهي موضوع ميكانيك الكم). تعطي هذه النظرية صورة جديدة للكون، يتكون فيها من أوتار مهتزة؛ وهي تسمح بتفسير كل شيء فيه، من حركة الكواركات في الذرات إلى حركة المجرات في السماء، وكأنه انعكاس لقوانين فيزيائية واحدة تحكم سلوك هذه الأوتار المجهرية، التي لا تتعدى أبعادها جزءاً من مليار مليار جزء من الأبعاد الذرية.

يعد بريان غرين، مؤلف هذا الكتاب، من أشهر الفيزيائيين النظريين في العالم في يومنا هذا. وهو يعرض في كتابه " **الكون الأنيق** " قصة نظرية الأوتار وسَعْي الإنسان للوصول إلى النظرية النهائية بأسلوب بسيط وشيّق مليء بالاستعارات والتشبيهات المأخوذة من حياتنا اليومية، مما يجعل أكثرَ المفاهيم دقة في الرياضيات والفيزياء الحديثة سهلَ المنال والإدراك من قبل القارئ العادي غير المختص.

حصل هذا الكتاب على جائزة أفينتز (Aventis Prize) لعام 2000، وهي وفقاً لـ B.B.C **أهم جائزة علمية تخصص لكتاب علمي**، كما أنه حطّم كثيراً من الأرقام القياسية في المبيعات، وقد شعر كثير من قرائه، غير المختصين، أنهم غدوا أقربَ منهم في أي وقت مضى إلى فهم كيفية عمل الكون من حولنا.

أطرى كثير من النقاد على الكتاب، فقال عنه كريس كويغ C. Quigg في مجلة Scientific American: ***"يقدّم كتاب الكون الأنيق الأفكار الأساسية والتطلعات المستقبلية لنظرية الأوتار بلغة بسيطة وأنيقة. إنه سرد لوقائع من حياة المؤلف الشخصية وكذلك لقصة إنجاز علمي عظيم"*** . أما نيويورك تايمز فكتبت تقول: ***" يقدم كتاب الكون الأنيق السوية التي يجب على الفيزيائيين أن يحتذوا بها في سعيهم إلى تبسيط العلوم وكتابتها للعامة. وسيكون من الصعب جداً تخطّيه وتجاوزه".***

بريان غرين

يعتبر **بريان غرين Brian Greene** من أشهر الفيزيائيين النظريين في يومنا؛ فهو، بالإضافة لإنجازاته العلمية الخارقة في مجال نظرية الأوتار، من أكثر المؤلفين قدرة على إيصال المفاهيم العلمية المتقدمة إلى شريحة كبرى من الناس عبر مقالاته وكتبه غير الاختصاصية التي تعتبر من الأكثر رواجا.

وُلد بريان غرين في مدينة نيويورك 1962 وبدت عليه علامات النبوغ منذ الصغر؛ ولا يزال الأساتذة في جامعة كولومبيا Columbia يتذكرون ذلك الطالب الصغير الذي تمكّن من رياضيات المرحلة الثانوية بأكملها وكان يبحث عمّن يعلمه رياضيات متقدمة على مستوى جامعي.

درس الفيزياء في جامعة هارفارد Harvard (1980–1984)، حين سمع لأول مرة أن الركنين الأساسيين اللذين تقوم عليهما الفيزياء الحديثة – وهما ميكانيك الكمّ الذي يصف فيزياء الظواهر الصغيرة المجهرية والنسبية العامة التي تصف فيزياء الظواهر الكبيرة الكونية – غير منسجمين واحدهما مع الآخر.

حصل بعدها على منحة رودس Rhodes لتحضير الدكتوراة في جامعة أكسفورد Oxford تحت إشراف الأستاذ غراهام روس Graham Ross ، حيث قرّر، بعد الاستماع لمحاضرة عن نظرية الأوتار التي كانت تشهد ولادة ثانية في منتصف الثمانينيات كنظرية قادرة على توحيد ميكانيك الكم مع النسبية العامة، أن يعمل في هذا المجال.

تناولت أطروحته للدكتوراة 1987 موضوع الاختبار التجريبي لتنبؤات نظرية ناجمة عن هذه النظرية، تابع بعدها أبحاثه في مجالها وفي مجال الثقالة الكمومية كأستاذ محاضر في جامعة هارفارد ثم في جامعة كورنيل Cornell.

وأخيرا، وكأنه كان يدور حول دائرة، عاد إلى نيويورك ليؤسس مجموعة فيزياء نظرية الأوتار في جامعة كولومبيا حيث يعمل الآن كأستاذ في الفيزياء والرياضيات.

يعود واحد من أهم اكتشافات غرين إلى عام 1992 حين كان أستاذا زائرا في معهد الدراسات المتقدمة في برنستون Princeton، إذ بيّن كيف يمكن من خلال نظرية الأوتار، النظر إلى بنية الفضاء كأنها نسيج يتمزق ثم يرتق ذاته، ممّا يختلف مع النسبية العامة التي لا تسمح بوجود انقطاعات في نسيج الزمكان.

دعي لإلقاء محاضرات علمية في أكثر من 20 بلدا في العالم وظهر هذا العالِم الشاب مراراً على المنصات مع ألمع الفيزيائيين والرياضيّاتيين من أمثال **ستيفن هوكينغ S. Hawking** و**إدوارد ويتن E. Witten**، وهو محكّم في أكثر من مجلة علمية مهمة.

وهو، عدا كونه ذلك العملاق الأكاديمي الذي يساهم كممثل رئيس في الانطلاقة الثورية الأحدث لنظرية الأوتار والتي بدأت في منتصف التسعينيات (مفاهيم الثنوية والنظرية الأم M.Theory) ، ذو شخصية ودية ومتحدّث لبق يتمتع بموهبة خارقة في مجال العلاقات العامة وتبسيط العلوم. تشهد على ذلك محاضراته العامة التي تغص بالحضور وظهوره على التلفزيون بالإضافة إلى مؤلفاته وأهمها "الكون الأنيق" الذي حطم الأرقام القياسية في المبيعات. كذلك يشارك أحيانا هذا العالِم في نظرية الأوتار في التمثيل والعزف مع "رباعي الأوتار" لإمرسون Emerson String Quartet وهنا أيضا تعجّ القاعة في متحف غوغينهايم Guggenhaim Museum بالحضور.

إلى أمي وإلى ذكرى أبي،
مع كلّ الحب والامتنان

المحتويات

مقدمة

الباب الأول: حدود المعرفة

1- مكبّلون بالأوتار 3

الباب الثاني: معضلة المكان والزمان والكمّ

2- المكان والزمان وعين المراقب 26

3- حول الالتواءات والتموّجات 61

4- غرائب مجهرية 97

5- الحاجة إلى نظرية جديدة: النسبية العامة في مواجهة ميكانيك الكمّ 135

الباب الثالث: السيمفونية الكونية

6- لا شيء سوى الموسيقا: أساسيات نظرية الأوتار الفائقة 153

7- "الفائق" في الأوتار الفائقة 189

8- أبعاد أكثر مما تراه العين 210

9- المدفع الدخاني: بصمات تجريبية 237

الباب الرابع: نظرية الأوتار وبنية النسيج الزمكاني

10- الهندسة الكمومية 259

11- تمزّق نسيج بنية المكان 297

12- ما وراء الأوتار: البحث عن النظرية الأم 320

13- الثقوب السوداء: من منظور النظرية الأم/الوترية 363

14- تأمّلات حول علم الكون 391

الباب الخامس: التوحيد في القرن الحادي والعشرين
15- توقّعات مستقبلية 423

ملاحظات 441
مسرد بالمصطلحات العلمية 471
مراجع ومقترحات لقراءات أخرى 489

مقدّمة

كرّس أنشتاين السنوات الثلاثين الأخيرة من حياته للبحث عن "**نظرية حقل موحّد**"، من شأنها وصف قوى الطبيعة في إطار واحد شامل ومترابط . لم يكن دافعه إلى ذلك ما يهدف إليه البحث العلمي عادة من تفسير دلالاتٍ ومعطيات تجريبية قائمة، بل كان الإيمانَ بأن فهماً عميقاً للكون سيظهر إعجازه المتمثل ببساطة القوانين التي تحكمه؛ وقد حاول أن يصف لنا هذا الكون بوضوح غير معهود من قبل، ساعياً إلى كشف جماله وروعته.

لم يفلح أنشتاين في محاولاته وذلك لجسامة الصعوبات التي واجهته وكان عليه تجاوزها، إذ لم تكن معروفة آنئذ على نحو جيد الخصائص الأساسية للمادة وطبيعة القوى التي تحكمها. إلاّ أن ما تراكم من معارف خلال النصف الثاني من القرن العشرين مكّن العلماء من فهم كيفية عمل الكون بصورة أعمق. ويعتقد الفيزيائيون اليوم أنهم بلغوا ما أخفق أنشتاين في تحقيقه، وهو وضع نظرية واحدة نهائية قادرة، من حيث المبدأ، على وصف كل الظواهر الفيزيائية، تُعرف بنظرية "**الأوتار الفائقة**"، وهي موضوع هذا الكتاب.

وقد حرصت في كتابته على تقريب الأفكار الجديدة التي توصلتْ إليها البحوثُ الفيزيائية من ذهن القراء ولاسيما غير المتخصصين منهم بالفيزياء والرياضيات؛ وكان قد تبين لي، عن طريق المحاضرات العامة التي قدمتها في السنين الماضية عن نظرية الأوتار الفائقة، أن هناك اهتماماً كبيراً بين الناس لفهم ما تقدمه البحوثُ العلمية المعاصرة عن القوانين الأساسية للكون، وما تطلبته من إعادة صياغة شاملة لمفاهيمنا عنه، وللتعرف على التحديات التي واجهتنا في سعينا نحو وضع نظرية واحدة نهائية. وأتمنى أن يسهم هذا الكتاب، من خلال تقديمه الإنجازات العلمية الكبيرة التي تحققت في عهد أنشتاين وهايزنبرغ، وما أغنتها به الاكتشافات الحديثة في إشباع فضول القراء من محبي المعرفة.
أتمنى أيضاً أن يفيد هذا الكتاب على نحوٍ ما القراء الذين لديهم بعض المعرفة العلمية. وأتمنى لطلاب العلوم وأساتذتهم أن يسهم في بلْورة وإيضاح المفاهيم الأساسية للفيزياء الحديثة من مثل النسبية الخاصة والنسبية العامة وميكانيك الكمّ، وأن ينقل إليهم صورة عن

حماس العلماء في سعيهم للوصول إلى وضع هذه النظرية الواحدة. أما للقارىء التوّاق إلى الكتب العلمية العامة فقد حاولت أن أقدم شرحاً وافياً للتقدم العلمي الرائع الذي تحقق في السنوات العشر الماضية، وغيّر مفاهيمنا عن الكون. كما آمل أن يقدم لزملائي من العاملين في ميادين علمية أخرى، صورة أمينة وموضوعية عن سبب حماس العاملين في نظرية الأوتار الفائقة للتقدم الذي أحرزوه في سعيهم نحو نظرية واحدة نهائية للطبيعة.

إن موضوع نظرية الأوتار الفائقة عميق ومتسع يشمل معظم المفاهيم الأساسية في الفيزياء، فهذه النظرية توحّد ما بين قوانين **الظواهر الكبيرة** وقوانين **الظواهر الصغيرة**، أي ما بين القوانين التي تحكم الكون الكبير ككلّ، وتلك التي تحكم المكوّنات الأصغرية للمادة؛ لذلك فإن هناك طرقاً كثيرة لمقاربة هذا الموضوع. وقد اخترت أن أركز على ما رأيته أكثر توافقاً مع تطوّر فهمنا لمفهومي الزمان والمكان، وأنا أرى أن ذلك يعطينا صورة غنية وممتعة عن التطورات الجديدة. كان أنشتاين قد بيَّن للعالم أن الزمان والمكان يتصرفان على نحو مدهش وغير مألوف؛ وقد دمجت الأبحاثُ العلمية الجديدة اكتشافاتِه في إطار عالم كمومي متعدد الأبعاد قد تحمل معرفتُها (معرفة الأبعاد) مفتاحَ الحل لبعض القضايا العميقة في فهمنا للطبيعة. ومع دقة بعض هذه المفاهيم، فإنه يمكن إدراكها باتباع طرق بسيطة تعتمد القياس والمقارنة مع أمور مألوفة لدينا. وستزودنا هذه الأفكار بعد فهمها بتطلعات ثورية عن طبيعة عالمنا.

وقد حاولت خلال كتابتي أن أبقى قريباً ما استطعت من الصياغة العلمية جاهداً على تقديم إدراك حدسي للقارىء، مستعيناً غالباً بالتشبيهات والاستعارات لوصف الطريقة التي اعتمدها الباحثون العلميون في سبيل الوصول إلى مفهومهم الحالي عن الكون. ومع أنني تجنبت في ذلك اللغة والمعادلات التقنية، فإن المفاهيم الجذرية التي فيه قد تدفع القارىء إلى التوقف عندها ليعيد قراءة مقطع هنا أو يتمعن في شرح ما هناك، ليتمكن من متابعة الأفكار المطروحة بصورة جيدة. وقد تكون بعض مقاطع الباب الرابع التي ناقشت التطورات الأكثر حداثة في النظرية، أكثر تجريداً من سواها، لذلك حرصت على تنبيه القارىء إليها، كما حرصت على كتابتها بحيث لا يؤدي تجاوزها إلى انقطاع السياق المنطقي لأفكار الكتاب. كما ضمّنته مسرداً للكلمات العلمية ليكون مرجعاً يُيسّر للقارىء فهم الأفكار

المطروحة. وقد لا تعني الملاحظات والشروح القارئَ العادي، إلاّ أن القارىء الأكثر اهتماماً سيجد فيها شروحات تفصيلية لنقاط وردت في النص أو توضيحات لأفكار عرضت فيه على نحو مبسّط، كما قد تلبّي بعضُ الاستطرادات التقنية رغبةَ القرّاء المزوّدين بخلفية رياضياتية.

لا يسعني أخيراً إلاّ أن أتوجه بالشكر إلى الكثيرين الذين ساعدوني خلال كتابته. لقد قرأ ديفيد شتاينهاردت النسخة المخطوطة بإمعان، وقدم مشكوراً اقتراحات متعلقة بالطباعة، بالإضافة لتشجيعه المستمر لي. وقرأ المخطوطة أيضاً كلٌّ من ديفيد موريسون وكين فينبرغ ورافاييل كاسبر ونيكولاس بولز وستيفن كارليب وآرثر غرينسبون وديفيد ميرمين ومايكل بوبوويتس وشاني أوفن، وقدموا لي عدداً من الاقتراحات حسّنت كثيراً في تقديمها. كما قرأ آخرون المخطوطة أو أجزاء منها، وقدموا لي النصح والتشجيع، وإليهم أتقدم بشكري: بول أسبينوول، بيرسيس دريل، مايكل دوف، كورت غوتفريد، جوشوا غرين، تيدي جيفرسون، مارك كاميونكوفسكي، ياكوف كانتر، ديفيد لي، ميغان ماكاون، ناري ميستري، هاسان بادامسي، رونين بليسر، ماسيمو بوراتي، فريد شيري، لارس شترايتر، ستيفن شتروغاتز، أندرو شترومينغر، هنري تاي، كومرن فافا وغابرييل فينيزيانو، وأخص بالشكر أيضاً رافاييل غونر لانتقاداته المحفّزة في مرحلة مبكرة من الكتابة ممّا ساعد في إعطاء الكتاب شكله النهائي، وروبرت مالي لتشجيعه اللطيف والدائم لي على تجاوز مرحلة التفكير بكتابة الكتاب إلى مرحلة "*وضع القلم على الورق*".

أوجه شكري أيضاً إلى ستيفن واينبرغ وسيدني كولمان لإرشاداتهما القيّمة ومساعدتهما؛ ويسرني أن أقرّ بفضل التعاون مع كارول آرتشر، فيكي كارستنز، ديفيد كاسل، آنّ كويل، مايكل دونكان، جين فورمان، وِندي غرين، سوزان غرين، إريك جيندريسن، غاري كاس، شيفا كومار، روبرت موهيني، بام مورهاوس، بيير راموند، أماندا سولز وإيرو سيمونتشيللي. أنا مدين لـــ كوستاس إفثيميو لمساعدته في التدقيق ومن أجل تحويله مخططاتي البدائية إلى رسومات خطية خلق منها، بعدها، توم روكويل الصبور والفنان الأشكال الموضّحة الموجودة في النص. أشكر كذلك أندرو هانسن وَ جيم سيثنا لمساعدتهما في تحضير بعض الأشكال الخاصة.

أوجه الشكر كذلك إلى هوارد جيورجاي وشيلدون غلاشو و مايكل غرين وجوهن شفارتز وجوهن ويلر وإدوارد ويتن ومرة أخرى إلى أندرو شترومنغر وكومرن فافا وغابرييل فينيزيانو لموافقتهم على مقابلتي وتزويدي بآرائهم حول كيفية معالجة مواضيع كثيرة مطروحة في الكتاب.

أشكر كذلك المحرّرين في دار نشر نورتون: أنجيلا فون درّليبي وتريسي ناغل وكذلك جوهن بروكمان وَ كاتينكا ماتسن لاقتراحاتهم القيّمة ولخبرتهم في الإشراف على متابعة إنجاز الكتاب حتى مرحلة النشر.

أشكر أخيراً مؤسسة العلوم الوطنية ومؤسسة ألفرد سلون ووزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية للدعم الذي قدموه لي لإجراء البحوث خلال أكثر من خمسة عشر عاماً، وليس غريباً أن تتركز أبحاثي على ما كان لنظرية الأوتار الفائقة من أثر على مفهومنا للزمان والمكان. لقد ركّزتُ في فصلين من الكتاب على تقديم اكتشافات ساهمتُ بها شخصياً. ومع أملي في أن يجد القارئ متعة في قراءة هذه الروايات الداخلية، فإنني أدرك أنها قد تترك لديه انطباعاً مبالغاً فيه عن الدور الذي قمت به في تطوير نظرية الأوتار الفائقة؛ لذلك أنتهز الفرصة لأوجّه الشكر إلى الألف ونيّف فيزيائي يعملون في جميع أصقاع العالم لوضع النظرية النهائية للكون. أعتذر سلفا لكلّ من لم أُشر إلى عمله في هذا الكتاب حيث يعكس ذلك مجرّد اختياري لموضوعات منتقاة وضيق المكان عند تقديم معالجة عامة لا غير.

أخيراً أشكر من كل قلبي إلين أرتشر التي لولا حبها ودعمها الأكيدين ما كان لهذا الكتاب أن يرى النور.

البـــاب الأول

حدود المعـرفـــة

الفصل الأول

مكبّلون بالأوتار

كان الفيزيائيون على دراية، طيلة أكثر من نصف قرن، وفي خضم بعض أكثر الإنجازات العلمية إثارة في التاريخ، بأن غيوماً سوداء تلوح لهم بعيداً في الأفق. كان يقلقهم أن يروا أن النظريتين الأساسيتين اللتين تُعدان دعامتي الفيزياء الحديثة، لا تنسجمان واحدتهما مع الأخرى، أو بتعبير آخر، **لا يمكن أن تكونا صحيحتين معاً**. تضع أولى هاتين النظريتين، وهي نظرية النسبية العامة لأنشتاين، الإطار النظري لوصف الكون بأبعاده الكبيرة وما فيه من نجوم ومجرات وتجمعات لها وما بعدها في مدى الكون اللامتناهي، وتضع الثانية، وهي نظرية ميكانيك الكم، الإطار النظري لوصف الكون بأبعاده الصغيرة وما فيه من جزيئات وذرات وجسيمات دون ذرية، مثل الإلكترونات والكواركات. وتمكن الفيزيائيون خلال سنوات طويلة من البحث من التحقق تجريبياً وبدقة لامتناهية من صحة التوقعات والتنبؤات التي وضعتها كل من هاتين النظريتين. إلاّ أن تلك التوقعات والتنبؤات النظرية ذاتها قادتهم إلى نتيجة مقلقة تتلخص في أن هاتين النظريتين اللتين عبّرتا عن التطور الهائل الذي تحقق في الفيزياء خلال مئة السنة الأخيرة، ممّا سمح بتفسير توسّع الكون وتمدّده من جهة، وبنية المادة من جهة أخرى،متناقضتان فيما بينهما.

وقد يتساءل المرء عن سبب هذا التناقض إن لم يكن قد سمع به قبلاً. وليس الجواب عن تساؤله بعسير. ذلك أن الفيزيائيين، فيما عدا حالات نادرة جداً، كانوا يدرسون إما أشياء **صغيرة وخفيفة** (كالذرات ومكوناتها) أو أشياء **كبيرة وثقيلة** (كالنجوم والمجرات)، ولم يدرسوا هذين النوعين معاً أو يدرسوا تقاطعاتهما، وهو ما كان معناه حاجتهم إلى استخدام الميكانيك الكمي وحده، أو النسبية العامة وحدها، متجاهلين الآخر تماماً في كلتا الحالتين، واستمر ذلك حوالي خمسين سنة.

لكن الكون ليس على مثل هذه الصورة، فلو نظرنا إلى ثقب أسود لوجدنا في أعماقه كتلة هائلة وقد انسحقت فصغر حجمها إلى حد كبير. وقد يكون الكون كله نشأ عند لحظة الانفجار الأعظم من شذرة مجهرية صغيرة تبدو حبة الرمل ضخمة تجاهها، وهو ما يعني وجود أوضاع فيها أشياء **صغيرة** جداً، إلاّ أنها **ثقيلة** جداً، مما يقتضي، لوصفها، استخدام نظريتي ميكانيك الكم والنسبية العامة معاً. وكما سنرى لاحقاً فإن معادلات هاتين النظريتين ستبدأ بالترنّح عند جمعهما معاً، فتبدوان كسيارة تسير بعجلات تالفة أو كأسئلة ذات دلالات فيزيائية واضحة تلقى إجابات لا معنى فيزيائياً لها. ولو تركنا جانباً ماهية الثقب الأسود ولحظة بدء الكون، وتقبّلنا عدم فهمنا وإدراكنا لهما، فإننا لن نستطيع تجنب الشعور بأن عدم الانسجام بين ميكانيك الكمّ وبين النسبية العامة ليس سوى دلالة على حاجتنا لفهم أعمق للطبيعة، إذ هل يمكن حقاً أن يكون الكون في جوهره وأساسه منقسماً على نحو يوصف فيه بأشيائه الكبيرة بمجموعة من القوانين، وبأشيائه الصغيرة بمجموعة أخرى منها غير منسجمة معها؟

ويأتي الجواب عن ذلك بالنفي، وبصوت عال تطلقه نظرية الأوتار الفائقة الحديثة العهد، بالمقارنة مع نظريتي ميكانيك الكم والنسبية العامة، الأقدم منها والأكثر رسوخاً واستقراراً. فقد تبيّن من أبحاث دقيقة ومكثفة قام بها فيزيائيون ورياضيّاتيون في سائر أرجاء العالم خلال العقد الماضي، أن ما تقدمه نظرية الأوتار الفائقة من وصف للمادة في جوهرها وأساسياتها يحمل معه الحل لإزالة التناقض القائم بين تينك النظريتين؛ وتذهب هذه النظرية إلى أبعد من ذلك إذ تبين **حاجة كل واحدة من النظريتين إلى الأخرى** إذا ما أريد منها أن تكون منطقية، وهو ما يعني بمفهوم نظرية الأوتار الفائقة أن تزاوج قوانين ميكانيك الكمّ وقوانين النسبية العامة ليس أمراً مستحباً فحسب، بل هو أمر لا غنى عنه.

وتأخذ نظرية الأوتار الفائقة (وسندعوها اختصاراً نظرية الأوتار) هذا التزاوج خطوة عملاقة أخرى نحو الأمام تتجلى في وضع نظرية واحدة للكون. كان أنشتاين قد سعى طيلة نحو ثلاثة عقود إلى وضع نظرية موحّدة لكل قوانين الفيزياء تندرج في إطارها وفي نسيج واحد كل قوى الطبيعة وكل مكونات المادة، وفشل في مسعاه. أما الآن، ومع إطلالة الألفية الثالثة، فإن أنصار نظرية الأوتار يدّعون أن خيوط هذا النسيج

الواحد بدأت تتّضح للعيان، وأن لهذه النظرية القدرة على تبيان أن كل ظواهر الكون، من حركة الكواركات في الذرات إلى رقصة الفالس التي تدور فيها النجوم الثنائية واحدها حول الآخر، ومن كرة النار البدائية التي رافقت الانفجار الأعظم إلى الحركة الدوامية الجميلة للمجرات، ليست إلاّ انعكاساً لمبدأ فيزيائي واحد وكبير أو لمعادلة أساسية واحدة.

ولما كانت الخصائص المميّزة لنظرية الأوتار تتطلب منّا أن نغيّر جذرياً مفاهيمنا عن الزمان والمكان والمادة، فإن وقتاً سوف يمضي قبل أن نألف مفاهيمها الجديدة ونعتاد عليها ونتعامل معها بسهولة؛ وعندها، وكما سنرى لاحقاً، سوف تبدو لنا كتطور مثير، إلا أنه طبيعي، للاكتشافات الثورية التي تحققت في الفيزياء خلال مئة السنة الأخيرة. وسنرى أن التعارض ما بين ميكانيك الكم والنسبية العامة لم يكن التعارض الوحيد الذي عرفته الفيزياء، بل أنه، في الحقيقة، الثالث من سلسلة تعارضات أساسية شهدها القرن الماضي واقتضى كل واحد منها إعادة نظر شاملة في فهمنا للكون.

التعارضات الثلاثة

يتعلق أول هذه التعارضات بالخصائص المميّزة لحركة الضوء، ويرجع تاريخه إلى أوائل القرن التاسع عشر، ويمكننا أن نعبر عنه بإيجاز بقولنا أنه، تبعاً لقوانين نيوتن في الحركة، فإن بوسع المرء أن يلحق بحزمة ضوئية صادرة إذا ما جرى بسرعة كافية، في حين أنه لا يقدر على ذلك، تبعاً لقوانين ماكسويل في الكهرطيسية. وقد تغلب أنشتاين على هذا التعارض عن طريق نظريته في النسبية الخاصة، كما سنرى في الفصل الثاني من هذا الكتاب، إذ قلب مفهومنا للزمان والمكان رأساً على عقب، فلم يعودا، تبعاً لهذه النظرية، مفهومين عامين جامدين نشعر بهما كلنا بالطريقة ذاتها، بل أصبحا مفهومين مطواعين ليّنين يبدوان على نحو يتعلق بحالة المراقب وبحركته.

إلاّ أن هذه النظرية ذاتها مهدت الطريق أمام ظهور التعارض الثاني على خشبة المسرح، إذ كان من نتائجها القول باستحالة تحرك أي شيء (وفي الواقع أي جسم أو تأثير أو اضطراب) بسرعة أكبر من سرعة الضوء. لكن نظرية الثقالة لنيوتن، المرضية

منطقياً والمثبتة تجريبياً، تقتضي وجود تأثيرات تنتقل، على نحو آني، عبر مسافات شاسعة في الفضاء، كما سنرى في الفصل الثالث. ومرة أخرى يرجع الفضل إلى أنشتاين في التصدي لهذا التعارض وفي إيجاد حل له، عبر تقديمه مفهوماً جديداً للثقالة عن طريق نظرية النسبية العامة(1915). وكما بدلت النسبية الخاصة مفاهيمنا السابقة عن الزمان والمكان، كذلك فعلت النسبية العامة، إذ غدا بوسع الزمان والمكان، وعدا تأثّرهما بحركة المراقب، الانحناء والالتفاف تحت تأثير المادة أو الطاقة؛ وهذه التشوهات التي تلحق بنسيج الزمان والمكان هي ما ينقل قوى الثقالة من مكان إلى آخر كما سوف نرى. وبذلك يمكن القول إن الزمان والمكان لم يعودا ستارة المسرح الخلفية التي تُعرض أمامها أحداث الكون، بل هما ممثلان فاعلان في هذه الأحداث تبعاً لمفاهيم نظريتي النسبية.

وكما وضعت النسبية العامة حداً لهذا التعارض الثاني فإنها كانت بدورها سبباً في طرح تعارض جديد ثالث؛ لقد تم تطوير مبادىء ميكانيك الكمّ للإجابة عن تساؤلات أساسية بدت عند تطبيق مفاهيم فيزياء القرن العشرين على العالم المجهري، وظهر التعارض الثالث بسبب عدم الانسجام الذي نشأ بين مفاهيم هذا الميكانيك ومفاهيم النسبية العامة. فالمكان الذي تصفه النسبية العامة بأنه ذو شكل هندسي ينحني بلطف، يتناقض وتصرف الكون القلق الذي يقتضيه الميكانيك الكمي. وقد عُدَّ هذا التناقض القضية الأساسية في الفيزياء الحديثة، وكان علينا أن ننتظر حتى أواسط الثمانينيات لتحمل إلينا نظرية الأوتار حلاً له. ولهذه النظرية القائمة على مفاهيم نظريتي النسبية العامة والخاصة مفاهيمها الخاصة بها التي تطلبت بدورها إعادة نظر جذرية في مفهومنا للزمان والمكان. إن معظمنا يرى الكون عالماً ذا ثلاثة أبعاد فضائية، أما نظرية الأوتار فلا تراه كذلك بل تلمح فيه أبعاداً أكثر مما تراه أعيننا، تلتف بإحكام ضمن نسيج الكون القابل للطي. وسوف تكون هذه الأفكار الأساسية عن طبيعة الزمان والمكان دليلنا وموجهنا في ما سوف يأتي، إذ يمكن في الحقيقة قراءة نظرية الأوتار على أنها قصة الزمان والمكان منذ أنشتاين.

وحتى نرى على نحو أفضل ما قدمته لنا هذه النظرية، فإننا سنرجع قليلاً إلى الوراء، ونرى بإيجاز ما تعلمناه سابقاً عن البنية المجهرية للكون.

الكون في أصغر أبعاده : ماذا نعرف عن المادة؟

افترض اليونانيون القدامى أن الكون مؤلّف من مكونات صغيرة جداً غير قابلة للتجزئة، سمّوها **الذرات** (atoms، أي الجزء الذي لا يتجزأ)، وخمّنوا أنه، كما تُبنى من أبجدية ذات عدد محدود من الأحرف، تركيبات كلامية لا حصر لها، كذلك يُبنى الكون بكل ما فيه، من عدد محدود جداً من هذه الذرات، الوحدات العنصرية الأساسية. وكان تخمينهم صائباً كما لو أنهم كانوا يعلمون الغيب. والآن، وقد مضى أكثر من ألفي عام على افتراضهم هذا، فإننا لا نزال نعتقد بصحته، رغم ما لحق من تبدّل في نظرتنا إلى هذه الوحدات الأساسية. لقد توصل العلماء في القرن التاسع عشر إلى القول بأن المادة التي نراها حولنا على شكل عناصر مثل الأكسجين والكربون (ومركّبات من هذه العناصر)، تتكون من وحدات أساسية، حافظوا على إطلاق اسم **الذرات** عليها؛ غير أن ما تحقق من كشوفات من بدايات ذلك القرن وحتى ثلاثينياته، على أيدي ج.ج. تومسون وإرنست رذرفورد ونيلزبور وجيمس تشادويك، بيّن أن هذه الوحدات تقبل التجزئة، رغم تسميتها الدالة على عدم إمكانية ذلك. وتم وضع النموذج الذري، الشبيه بالنظام الشمسي، وفيه تتكون الذرات من نوى، تضم بروتونات ونترونات، تدور حولها إلكترونات على مدارات محدّدة.

وظن الفيزيائيون لمدة طويلة أن هذه البروتونات والنترونات والإلكترونات هي الوحدات التي لا يمكن تجزئتها. غير أن تجارب لاحقة أجريت في المسرّع الخطي في ستانفورد في سنة 1968، أظهرت أن البروتونات والنترونات ليست جسيمات أساسية عنصرية، بل إنها تتكون من وحدات أصغر منها هي **الكواركات**. (وكان الفيزيائي النظري ميري غيل مان قد تنبأ، قبل ذلك، بوجودها عن طريق الحدس، وهو الذي أطلق عليها هذه التسمية التي استقاها من عبارة وردت في مقطع مسجوع معناه: "**ثلاثة كواركات للسيد مارك**"، في قصة" يقظة فينغانز" لجيمس جويس)، وأظهرت هذه التجارب أن هناك نوعين من الكواركات سُمّيا **بالعلوي والسفلي**؛ فالبروتون يتكون من كواركين علويّين وكوارك سفلي، في حين يتكون النترون من كواركين سفليّين وكوارك علوي.

وهكذا فإن كل ما في عالمنا وسواه من عوالم مكوّن من تركيبات لإلكترونات وكواركات علوية وكواركات سفلية؛ وليس هناك أي دليل تجريبي على أن أيّاً من هذه المكونات الثلاثة يتكون بدوره من وحدات أصغر من ذلك. إلاّ أن هناك بالمقابل أدلة كثيرة تبيّن أن في تلك العوالم وحدات أساسية عنصرية أخرى، حيث برهن فريدريك رينز وكلايد كووان،تجريبياً وفي أواسط الخمسينيات، على وجود وحدة أساسية رابعة هي **النترينو**، الذي كان العالم وولفغانغ باولي قد تنبأ بوجوده في مطلع الثلاثينيات. وكان التأكد من هذا الوجود في غاية الصعوبة، فهو جسيم "**شبحي**" قلّ ما يتفاعل مع مكوّنات المادة الأخرى. فنترينو ذو طاقة متوسطة اعتيادية، يخترق مادة الرصاص، وقد يجتاز مليارات الأميال منها دون أن تتأثر حركته من جرّاء ذلك. إن مليارات ومليارات من هذه الوحدة الأساسية التي تحملها الأشعة الكونية، تخترق أجسامنا وتتابع مسارها خلال رحلتها في باطن الأرض. كما اكتشف الفيزيائيون خلال دراستهم الأشعة الكونية في أوائل الثلاثينيات، جسيماً آخر سمّوه **الميون**، وهو كالإلكترون إلا أنه أثقل منه بحوالي 400 مرّة؛ وقد استقبل الفيزيائي إيسيدور إسحق رابي، الحائز على جائزة نوبل، نبأ اكتشاف الميون بحماس فاتر دفعه إلى التساؤل **عمّن أمر بخلقه**.لأنه لم تكن هناك أي معضلة في الوضع الكوني للجسيمات يتطلب تفسيرُها وجودَ مثل هذا الجسيم. ومع ذلك فقد كان الميون موجوداً دوماً، وستكون هناك جسيمات أخرى سواه.

تابع الفيزيائيون، مزودين بتقنيات محدّثة ومطوّرة باستمرار، طريقهم في صدم المادة وقذفها بطاقات عالية جداً سمحت لهم بأن يحققوا للحظات شروطاً لم تلحظ منذ حدوث الانفجار الأعظم. وبحثوا ونقّبوا فيما بين مخلفات عمليات القذف تلك، عن مكونات عنصرية جديدة يضيفونها إلى قائمة ما يعرفونه منها، فوجدوا أربعة أنواع جديدة من الكواركات أسموها **الفاتن** و **الغريب** و **الذروي** و **القعري**؛ كما وجدوا قريباً آخر للإلكترون أثقل من الميون، سمّوه **التاو**. ووجدوا كذلك جسيمين آخرين تشبه خصائصُهما خصائصَ النترينو (وأسموهما لذلك **نترينو الميون** و **نترينو التاو** تمييزاً لهما عن النترينو الأصلي الذي أصبح يعرف **بنترينو الإلكترون**). تبدو هذه الجسيمات عند حوادث الصدم التي تتم بطاقات عالية جداً، وهي تبقى لفترة قصيرة جداً من الزمن، لا يمكن معها

عدّها من مكوّنات المادة التي نلقاها في حياتنا اليومية. لكن القصة لم تنته فصولاً إذ أن لكلٍ من هذه الجسيمات **قريناً مضاداً**، يماثله في كتلته ويعاكسه في شحنته الكهربائية. (وقد يتعاكسان بشحنات أخرى ترافق أنواعاً أخرى من القوى)؛ **فللبوزيترون** مثلاً، وهو مضاد الإلكترون، كتلة الإلكترون وشحنة مقدارها +1 في حين أن شحنة الإلكترون تساوي −1. وعند اصطدام الجسيمات بمضاداتها يفني واحدها الآخر وتتحرر طاقة، وهو ما يفسر ندرة وجود الجسيمات المضادة في عالمنا.

تعرّف الفيزيائيون في هذه الجسيمات على نمط تناظري، يبدو من خلال معطيات الجدول 1-1، حيث صنّفت ما بين ثلاث زمر، تعرف عادة **بالعائلات**، في كل واحدة منها كواركان وإلكترون، أو أحد قرينيه، وواحد من النترينوهات الثلاثة. تتشابه هذه الوحدات في خصائصها فيما بين العائلات الثلاثة باستثناء كتلتها التي تزداد من عائلة إلى أخرى. كما بيّنوا أن **كل ما حولنا من أشياء** يتكون من تركيبات من جسيمات هذه العائلات الثلاثة ومن مضاداتها. ومما يسترعي الانتباه في هذا المجال، قدرة الفيزيائيين في الوقت الحاضر على سبر أغوار المادة إلى أبعاد من مرتبة جزء من بليون بليون جزء من المتر.

العائلة الأولى		العائلة الثانية		العائلة الثالثة	
الجسيم	الكتلة	الجسيم	الكتلة	الجسيم	الكتلة
إلكترون	0.00054	ميون	0.11	تاو	1.9
نترينو الإلكترون	$< 10^{-8}$	نترينو الميون	< 0.0003	نيترينو التاو	< 0.033
كوارك علوي	0.0047	كوارك فاتن	1.6	كوارك ذروي	189
كوارك سفلي	0.0074	كوارك غريب	0.16	كوارك قعري	5.2

الجـدول 1-1: *عائلات الجسيمات الأساسية الثلاث وكتلها (مقدرة بواحدة كتلة البروتون). لم تُحدد حتى الآن كتلة النترينو تجريبياً.*

إن إلقاء نظرة سريعة على هذا الجدول، سوف يجعلنا نحس بالارتباك الذي اعترى العالم رابي عند اكتشاف الميون. فمع أن تصنيف الجسيمات إلى عائلات يوحي ببعض مظاهر الترتيب،إلاّ أنه لا تزال تطفو على السطح تساؤلات كثيرة تتعلق بأمور متعددة. لماذا هناك هذا العدد الكبير من الجسيمات الأساسية، علماً بأن معظم ما في عالمنا يتكون من إلكترونات ومن كواركات علوية وسفلية فقط؟ لماذا وضعت ثلاث عائلات وليس عائلة واحدة أو أربع عائلات أو أي عدد آخر منها؟ لماذا يكون لهذه الجسيمات هذا الطيف الواسع من الكتلة الذي لا يخضع ظاهرياً لأي ترتيب؟لماذا يكون التاو أثقل من الإلكترون بـ 3520 مرّة، ويكون الكوارك الذروي أثقل بـ 50200 مرّة من الكوارك العلوي؟ تبدو هذه الأرقام العشوائية أمراً غريباً، فهل كان ذلك بمحض المصادفة أم كان أمراً إلهياً، أم أن هناك تفسيراً علمياً لهذه الخصائص الأساسية لمكونات عالمنا.

القوى وموقع الفوتون

وتتعقد الأمور أكثر إذا ما أخذنا بالاعتبار أيضاً قوى الطبيعة. والعالم حولنا متخم بوسائل التأثير التي تنتقل بها هذه القوى: فبوسعنا ضرب الكرات بالعصيّ، كما بوسع المتحمّسين منا إلقاء أنفسهم من على سطح برجٍ ما؛ وبوسع المغانط الكبيرة أن تبقي القطارات الفائقة السرعة معلّقة فوق قضبانها المعدنية؛ وكما تؤثر المواد المشعة في عدادات غايغر، فإن بعضها قد يفجر قنبلة نووية. والإنسان يؤثر فيما حوله من أشياء بوسائل عدة من دفع وجر وشدّ ورجّ ومطّ وفتل وتدوير وتبريد وتسخين وتحطيم وحرق وسواها وسواها. فالتأثيرات المتبادلة بين مختلف الأشياء التي نراها في حياتنا اليومية لا حصر لها. وقد تمكن العلماء خلال مئة السنة الأخيرة من جمع دلالات تشير إلى أن هذه التأثيرات، وأيّاً كانت طبيعة المواد المتفاعلة، تُردّ إلى تركيبات لأربعة أنواع من القوى هي **قوة الثقالة والقوة الكهرطيسية والقوة النووية الضعيفة والقوة النووية الشديدة.**

تعدّ قوة الثقالة الأكثر شيوعاً بين هذه القوى، فهي المسؤولة عن بقاء كوكبنا في مداره حول الشمس، وهي ما يتيح لنا الوقوف وأقدامنا على سطح الأرض. وتعد كتلة جسم ما مقياساً لقوة الثقالة التي يؤثر بها هذا الجسم أو يتأثر بها في تعامله مع أجسام

أخرى. يلي هذه القوةَ شيوعاً وانتشاراً القوةُ الكهرطيسية التي يرجع إليها الفضل في تمتعنا بمنجزات الكشوف الحديثة من كهرباء نرى أثرها في أجهزة الإنارة وأجهزة التلفزيون والهاتف والحواسيب. تغطي شدة هذه القوة طيفاً واسعاً، فهي في الأثر الهائل للعواصف الرعدية كما هي في الأثر اللطيف لمداعبة باليد؛ تقوم الشحنة الكهربائية التي يحملها جسم ما، في هذه القوة، بالدور ذاته الذي تقوم به كتلة هذا الجسم بالنسبة لقوة (الثقالة)، فهي تدل على شدة التأثير الكهرطيسي الذي يتبادله مع أجسام أخرى.

أما القوتان الأساسيتان الأخريان فلا يُحَسُّ بهما في حياتنا اليومية لأن مداهما لا يتعدى الأبعاد الذرّيّة..تُعَدُّ أولاهما، وهي القوة النووية الشديدة، مسؤولة عن التصاق الكواركات بعضها ببعض ضمن البروتونات والنترونات، وعن ترابط هذه الأخيرة ضمن النوى الذرية؛ أما الثانية، وهي القوة النووية الضعيفة، فتتدخل في التحولات الجسيميّة أكثر من ظهورها كقوة جاذبة أو دافعة، وهي المسؤولة عن التحلل الإشعاعي لمواد مشعة كالأورانيوم والكوبالت.

وقد تلمّس الفيزيائيون في القرن الماضي خاصتين مشتركتين بين أنواع هذه القوى كافة، تتجلى أولاهما، وكما سنعرض في الفصل الخامس، بوجود جسيم على مستوى مجهري، يرافق كل نوع من أنواع القوى الأربعة، يُعَدُّ أصغر رزمة أو كمّة للقوة التي يرافقها.

فالفوتونات التي ترافق القوة الكهرطيسية هي الجسيمات الأصغرية لهذه القوة؛ أما المكوّنات الأصغرية المرافقة للقوى النووية الضعيفة والشديدة فهي جسيمات ندعوها، على التوالي، **بوزونات المعيار الضعيف والغليّونات.** (تعني الغليّونات بالإنكليزية الصمغيات، لذلك فهي تسمية ناجحة من الناحية الوصفية، حيث يمكن اعتبارها المكونات المجهرية للحقل الصمغي القوي الذي يجمع النوى الذرية فيما بينها*). وقد برهن العلماء تجريبياً، حتى نهاية عام 1984، على وجود هذه الأنواع الثلاثة من جسيمات القوى

---

* من أجل ذلك يستخدم بعضهم مصطلح "غرْيون" المشتق من كلمة "الغراء" للتعبير عن جسيم القوة الشديدة. المترجم

وحدّدوا خصائصها، المبينة في الجدول 1-2؛ وهم يعتقدون بوجود جسيم رابع يرافق قوة الثقالة، سمّوه الغرافيتون*، مع عدم تمكنهم حتى الآن من البرهان تجريبياً على وجوده.

أما الخاصة الثانية المشتركة بين أنواع هذه القوى فتتعلق بماهية السِمَة في الجسيمات التي تحدد كيفية تأثرها بحقول القوى. وكما تحدد كتلة الجسيم كيفية تأثره بقوة الثقالة، وتحدد شحنتُه الكهربائية كيفيةَ تأثره بالقوة الكهرطيسية، فإن في الجسيم سِمَتين مميّزتين أخريين هما الشحنة الشديدة والشحنة الضعيفة، تحدّدان كيفية تأثره بالقوى النووية الشديدة وبالقوى النووية الضعيفة على التوالي (وسنعرض هذه السِمات والخصائص تفصيلاً في الملاحظات الختامية الخاصة بالفصل الأول[1]). وكما في حال كتل هذه الجسيمات، ومع أن الفيزيائيين التجريبيين قاسوا بدقة هذه الشحنات، فليس هناك أي تفسير لتكوّن عالمنا من هذه الجسيمات الخاصة بكتلتها وشحنتها الخاصة أيضاً.

القوة	الجسيم المرافق لها	كتلة الجسم
النووية الشديدة	الغليون	0
الكهرطيسية	الفوتون	0
النووية الضعيفة	بوزونات المعيار الضعيف	97...86
الثقالة	الغرافيتون	0

الجدول 1-2: *أنواع القوى الأربعة وجسيماتها المرافقة وكتلها مقدرة بمضاعفات كتلة البروتون. (هناك أنواع من جسيمات القوة النووية الضعيفة تأخذ كتلتها واحدةً من قيمتي الكتلة المذكورتين. وقد بينت الدراسات النظرية انعدام كتلة الغرافيتون).*

ومع وجود السمات المشتركة لهذه القوى الأساسية، فإن تفحّصها عن قرب لا يقود إلاّ إلى طرح مزيد من التساؤلات حولها: ما سبب وجود أربعة أنواع منها وليس خمسة أو ثلاثة أو نوعاً واحداً فقط؟، لماذا كان لهذه القوى مثل هذه الخصائص المتباينة؟ ولماذا تجتمع القوة الشديدة والقوة الضعيفة ويكون تأثيرهما في أمداء من مرتبة الأبعاد النووية،

---

* يستخدم بعضهم مصطلح "جذبون"، المشتق من كلمة "الجاذبية"، للتعبير عن جسيم قوة الثقالة، حيث أن هذه الأخيرة تتمتع دوماً بالخاصة التجاذبية. المترجم

في حين يكون للقوة الكهرطيسية ولقوة الثقالة أمداء تأثير غير محدودة، وما هو سبب الاختلاف الكبير في الشدّات الذاتية لهذه القوى؟

وحتى نبين مدى الاختلاف الذي يطرحه التساؤل الأخير، تصور نفسك وقد أمسكت إلكتروناً بكفك اليسرى وآخر بكفك اليمنى، وقرّبت كفّيك واحدهما من الآخر. سوف يعمل التجاذب الثقالي المتبادل بين هذين الجسيمين المشحونين بشحنتين كهربائيتين متماثلتين على التقريب فيما بينهما، في حين سوف يعمل تدافعهما الكهرطيسي على إبعاد واحدهما عن الآخر؛ ونتساءل أي التأثيرين هو الأقوى ؟ ويأتي الجواب قاطعاً بأن الغلبة لقوة التنافر الكهرطيسي الأكبر بـ 10^{42} مرّة، أي بـ مليون مليار مليار مليار مليار مرّة. ولمقارنة شدتي هاتين القوتين تخيل أن طول إبهامك اليمنى يمثل شدّة قوة الثقالة؛ إن على طول إبهامك اليسرى، حتى تمثل شدة القوة الكهرطيسية، أن تمتد إلى مسافات تتجاوز حدود عالمنا !! ونتساءل لماذا لا نشعر بهيمنة هذه القوة على قوة الثقالة؟ والجواب عن ذلك بسيط. ففي معظم الأجسام التي حولنا مقادير متساوية من شحنات كهربائية موجبة وسالبة، تلغي تأثيراتها المتبادلة بعضها بعضاً، في حين ليس هناك مثل هذا الإلغاء في حالة قوة الثقالة لأنها قوة تجاذب فقط تشد الأجسام بعضها إلى بعض وتكبر بكبر هذه الأجسام. لكن الكلام عن أساسيات الأمور يدفعنا إلى القول بأن قوة الثقالة قوة ضعيفة جداً (وهو ما يفسر الصعوبة التي يلقاها الباحثون التجريبيون في صدد إثبات وجود الغرافيتون، لأن البحث عن الكمّة الصغرى لهذه القوى يُعَدُّ تحدياً كبيراً). كما بينت التجارب أن القوة الشديدة أقوى بمئة مرة من القوة الكهرطيسية وبمئة ألف مرة من القوة الضعيفة. ومرة أخرى لا مندوحة من التساؤل عن سبب تمتّع عالمنا بمثل هذه السمات.

وليس هذا التساؤل سفسطة فلسفية عديمة الجدوى تطرح سبب حدوث بعض الأمور التفصيلية على نحو ما دون سواها؛ فالعالم كان سيبدو مكاناً آخر مختلفاً تماماً لو تغيرت خصائص دقائق المادة والقوة تغيراً طفيفاً عمّا هي عليه. إن وجود النوى المستقرة للعناصر المئة والنيف تقريباً التي يضمها الجدول الدوري والتي يتكون منها كل ما حولنا، يعتمد بصورة أساسية على نسبة شدتي القوتين الشديدة والكهرطيسية؛ فالبروتونات المحشورة في النوى الذرية تتنافر فيما بينها بسبب القوة الكهرطيسية، وتتجاذب بسبب

القوى الشديدة المؤثرة بين كواركاتها. ولحسن الحظ فإن هذه القوة تتغلب على قوة التنافر وتبقى البروتونات متراصة ومتماسكة في نوى الذرات. إلاّ أن أي تغيير طفيف في الشدتين النسبيتين لهاتين القوتين سوف يطيح بهذا التوازن مسبباً تحلّل معظم النوى الذرية المستقرة. ولو كانت كتلة الإلكترون أكبر بعدة مرات ممّا هي عليه، لَنَحَتْ الإلكترونات والبروتونات للاتحاد بعضها ببعض مشكّلة النترونات، ولاختفت من الوجود ذرة الهيدروجين (وهي أبسط ذرة كيميائية في نواتها بروتون واحد)، ولأعاق ذلك تشكل العناصر الأخرى الأثقل منها، ومن ثم أعاق تشكل النجوم القائم على الاندماج الحاصل ما بين نوى مستقرة. كما تلعب قوة الثقالة دوراً أساسياً؛ فالأفران النووية التي في قلب النجوم، والتي تسبب توهّجَها وتألّقها، تستمد طاقتها من الكثافة العالية للمادة فيها. ولو ازدادت شدة قوة الثقالة لتماسكت المادة في قلب النجم على نحو أكبر، ومن ثَمَّ لازداد معدّل التفاعلات النووية التي تجري فيه. وكما يستهلك الضوء الساطع وقوده بأسرع مما تفعله شمعة ذات ضوء خافت، فإن زيادة معدل التفاعلات النووية في نجم ما كالشمس ستكون ذات تأثير مدمر على أشكال الحياة التي نعرفها. وبالمقابل، لو انخفضت شدة الثقالة بصورة محسوسة لما أمكن للمادة ان تتجمع وتتماسك، ولما تكونت النجوم والمجرات.

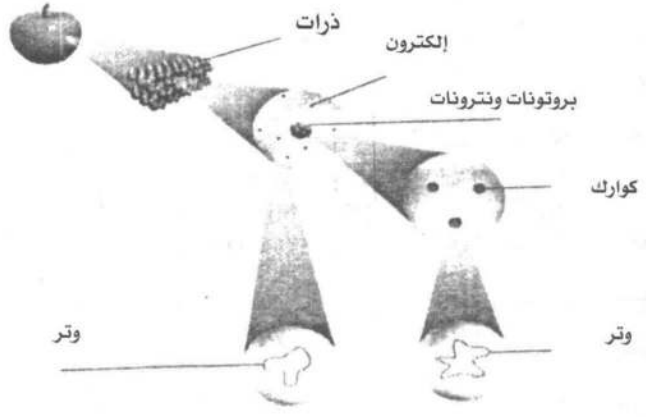
ونكتفي هنا بتقديم هذه الأمثلة التي هناك الكثير منها. ومعناها ودلالتها واضحان: فللكون صورته التي هو عليها والتي نعرفها لأن لجسيمات المادة والطاقة الخصائص التي لها. ولكن ! هل من تفسير علمي لامتلاك هذه الجسيمات تلك الخصائص؟

نظرية الأوتار، وفكرتها الأساسية

تقدم نظرية الأوتار نموذجاً قوياً متماسكاً، يضع أول مرة، إطاراً هيكلياً يسمح بالإجابة عن التساؤلات المطروحة.

وتتجلى الفكرة الأساسية في هذه النظرية في تجاوزها الأفكار السائدة القائلة بأن الوحدات الأساسية المكونة للمادة هي تلك التي يضمها الجدول 1-1، والتي يبدو أنه ليس لها بنية داخلية أدنى، إذ أن النظرية تقول بأننا لو استطعنا تفحص هذه الجسيمات

بدقة عالية جداً تفوق بمراتب الدقةَ التي تتيحها التقانات المعتمدة في وقتنا الحاضر، لرأينا فيها **حلقات** صغيرة ذات بعد واحد، أي أن في كل جسيم منها خيطاً دقيقاً قابلاً للاهتزاز مثل حلقة مطاطية رقيقة. وقد أطلق الفيزيائيون، الذين لم تكن لديهم بلاغة غيل مان الأدبية، اسم **الوتر** على هذا الخيط. تبدو هذه الفكرة على الشكل 1-1، إذ نرى أننا لو انطلقنا من قطعة بسيطة من المادة، تمثلها تفاحة على الشكل، وعمدنا إلى تضخيم بنيتها وتحرّي مكوناتها لوصلنا فيما بعد البنى المتتالية المعروفة من ذرات إلى كواركات، مروراً بالبروتونات والنترونات والإلكترونات، إلى طبقة مجهرية جديدة تضم هذه الأوتار المهتزة[2].



الشكل 1-1: *تتكون المادة من ذرات، تتكون بدورها من كواركات وإلكترونات. وتبعاً لنظرية الأوتار فإن هذه الجسيمات جميعها هي في الحقيقة حلقات loop صغيرة لوتر مهتز.*

وسنرى في الفصل السادس من هذا الكتاب أن إحلال الأوتار محل النقاط المادية للجسيمات الأساسية سيتيح، ولو على نحو غير بديهي، حلّ التناقض القائم بين ميكانيك الكم والنسبية العامة. فنظرية الأوتار قادرة على حل العقدة الغوردية* هذه التي تُعَدُّ المعضلة الرئيسة في الفيزياء النظرية المعاصرة، علماً بأن حل هذه العقدة لم يكن إلاّ واحداً من الأسباب التي جعلت من هذه النظرية محط الاهتمام ومصدر الإثارة.

---

* عقدة أحكم شدّها غورديوس ملك فريجيا. وقد زعموا أنه لن يحلّها إلاّ سيد آسيا المقبل، فجاء الاسكندر الكبير وقطعها بسيفه. المترجم

نظرية الأوتار: النظرية الموحّدة لكل شيء

لم تكن القوتان النوويتان الشديدة والضعيفة معروفتين في أيام أنشتاين. فكان يرى، حتى في وجود قوتين متمايزتين فقط هما قوة الثقالة والقوة الكهرطيسية، أمراً مقلقاً جداً، إذ لم يقبل أن تقوم الطبيعة على "*بناء*" بمثل هذا الإسراف! ومن هنا بدأت رحلته،عبر السنين الثلاثين الأخيرة من عمره، في البحث عن نظرية" **الحقل الموحّد**" التي كان يأمل منها أن تقدم البرهان على أن هاتين القوتين ليستا إلاّ مظهرين لمبدأ أساسي واحد. وكان هذا السعي الدين كيشوتي سبباً في انعزال أنشتاين وفي ابتعاده عن عالم الفيزياء الذي كان تبهره وتثير اهتمامه الإمكاناتُ الجديدةُ التي أتى بها ميكانيك الكمّ، فنراه يكتب في رسالة إلى أحد أصدقائه في أوائل الأربعينيات معبراً عن شعوره بهذه العزلة بقوله: ***لقد غدوت رجلاً عجوزاً وحيداً يعرفه الناس لأنه ينسى أن يلبس جواربه، ويعرضونه في مناسباتهم الخاصة كظاهرة مثيرة للفضول***"[3].

أما الحقيقة فهي، وبكل بساطة، أن أنشتاين كان رجلاً سابقاً عصره. لقد انقضى نصف قرن على حلمه بنظرية موحّدة، ولا يزال هذا الحلم يعد المعضلة الرئيسة في الفيزياء الحديثة. ويوماً بعد يوم يزداد اعتقاد أعداد كبيرة من الفيزيائيين والرياضيّاتيين بأن نظرية الأوتار قد تكون هي الحل. فهي، منطلقة من مبدأ واحد يقول بأن كل شيء يتكون في بعده المجهري الأدنى من تجمعات من أوتار مهتزة، تقدم إطاراً واحداً قادراً على تفسير كل خصائص القوى والمادة.

تقول النظرية إن خصائص الجسيمات المبينة في الجدولين 1-1، و1-2، ليست إلاّ انعكاساً للطرق المختلفة التي يمكن للوتر أن يهتز بها؛ وكما أن لأوتار البيانو والكمان تواترات رنينية تميل إلى الاهتزاز وفقها، وهو ما تميزه آذاننا كنغمات موسيقية مختلفة، فإن لحلقات الأوتار أنماطاً اهتزازية لا تبدو كنغمات موسيقية، بل تتجسد على شكل جسيمات يحدد نمطُ الاهتزاز كتلَتها وشحنَتها. فالإلكترون مثلاً هو اهتزاز لوتر بنمط معين، والكوارك العلوي هو اهتزاز بنمط آخر. وهكذا فإن خصائص الجسيمات لم تعد مجموعة معطيات تجريبية عشوائية في ظاهرها، بل غدت تجسيداً لخاصية فيزيائية

محدّدة واحدة هي نمط الحلقات الأساسية للوتر، أو بتعبير آخر هي موسيقى هذا الوتر. فكل شيء إذاً سواء أكان مادة أم قوة، غدا موحداً في إطار واحد من اهتزازات الوتر المجهرية، أو من النغمات التي يمكن أن يصدرها هذا الوتر.

وهكذا وضع الفيزيائيون ولأول مرة في تاريخ الفيزياء إطاراً واحداً قادراً على تفسير جميع سمات الكون، ولذلك عُدّت نظرية الأوتار أحياناً بأنها قد تكون ***"نظرية كل شيء"*** (ن.ك.ش)، أو ***"النظرية النهائية"***. وتعني هذه الأسماء الرنانة أنَّ هذه النظرية هي أعمق نظرية في الفيزياء، إذ تضم سائر النظريات الأخرى، وهي لا تحتاج، بل لا تسمح، بوجود فرضيات تفسيرية خارج إطارها. غير أن بعض العاملين في هذه النظرية يعتمدون مقاربة أكثر واقعية، إذ يرونها وبنظرة أكثر تحديداً قادرة على تفسير الخصائص الأساسية للجسيمات وخصائص القوى التي يؤثر فيها بعضها على بعضها الأخر. وقد يدّعي البعض أن هذا ليس تحديداً لأن كل شيء،من حيث المبدأ، من الانفجار الأعظم إلى أحلام اليقظة يمكن وصفه بعمليات فيزيائية أساسية صغيرة تقوم بها المكونات الأساسية للمادة، فإذا ما عرفنا خصائص هذه المكونات (الجسيمات) أمكننا فهم كل شيء.

لكن هذا التوجه الفلسفي الاختزالي ما لبث أن قاد إلى قيام مناقشات ساخنة، إذ وجد البعض أن من السخف والحماقة الادعاء بأن أمور الحياة وعجائب الكون ليست إلاّ نتيجة حركات إيقاعية راقصة تقوم بها جسيمات مجهرية تبعاً لقوانين فيزيائية. فكيف نقبل أن تكون مشاعرنا وأحاسيسنا بالفرح والحزن والملل ليست إلاّ نتيجة تفاعلات كيميائية تقوم بها في أدمغتنا، جزيئات وذرات، تقتضي بدورها، وعلى مستوى مجهري أدنى، تفاعلات تقوم بها بعض الجسيمات المذكورة في الجدول 1-1، والتي ليست في النهاية سوى أوتار مهتزة. وكَرَدٍ على هذا الاتجاه في النقد نورد ما قاله ستيفن واينبرغ، الحائز جائزة نوبل، في كتابه **أحلام حول نظرية نهائية:**

وهناك على الجانب الآخر أولئك الذين يعارضون الاتجاه الاختزالي والذين ترعبهم الصورة القاتمة للعلم الحديث، إذ يشعرون بضآلة هذا العالم الذي يرجع في نهايته إلى مجرد جسيمات مادية وحقول قوىً وما يمكن أن يقوم بينها من تأثيرات متبادلة. لن أحاول الرد على هذه الانتقادات بخطاب بليغ يتحدث عن جماليات العلم الحديث بل

سأكتفي بالقول بأن العالم الاختزالي بارد ومجرد من العواطف، ولكن يجب أن نقبله على ما هو عليه،لا لأننا نريده كذلك، بل وبكل بساطة لأنه هو كذلك[4].

وقد يقبل البعض هذا الرأي، وقد لا يقبله البعض الآخر.

وكما حاول آخرون أن يبرهنوا على أن تطورات جديدة من مثل نظرية الشواش تتطلب تدخّل أنواع جديدة من القوانين عندما تزداد درجة تعقيد النظام أو الجملة الفيزيائية. ففهم سلوك الإلكترون أو الكوارك شيء وتطبيقه لفهم سلوك عاصفة هوجاء شيء آخر. ويتفق معظم العلماء في ذلك ويختلفون فيما هو بعده. فهل هذه الظواهر الغريبة التي لا يمكن التنبؤ بها، والتي تحدث في نظم أكثر تعقيداً بكثير من مجرد جسيمات منفردة، تعبّر عن مبادىء وقوانين فيزيائية جديدة، أم أن القوانين التي تحكمها مشتقة، ولو بطريقة معقدة جداً، من قوانين الفيزياء التي تحكم العدد الكبير من المكونات العنصرية. أما أنا فلا أشعر أنها تعبّر عن قوانين فيزيائية جديدة ومستقلة. وأرى أن صعوبة تفسير سلوك عاصفة هوجاء، انطلاقاً من فهم فيزياء الإلكترونات والكواركات إنما يرجع إلى مشكلة تقتضيها الحسابات الضخمة اللازمة، ولا أرى فيها دليلاً على حاجتنا إلى قوانين فيزيائية جديدة. وهناك من يعارض هذا الرأي أيضاً.

وما أود التركيز عليه في هذا الكتاب، وهو خارج نطاق هذا الجدل، أنه، حتى ولو قبلنا وجهة النظر الاختزالية المختلف عليها، فإن المبدأ النظري شيء ونقله إلى حيز التطبيق شيء آخر.فمعظم العلماء يتفقون على أن نظرية كل شيء لا تعني في حال وجودها، أن علوم الكيمياء والبيولوجيا والجيولوجيا وعلم النفس وحتى علم الفيزياء، قد بلغت غايتها وحلّت ألغازها. إن الكون على درجة كبيرة من الغنى والتعقيد بحيث أن اكتشاف هذه النظرية، بالمعنى الذي تحدثنا عنه سابقاً، لا يعني نهاية العلم، بل على العكس من ذلك تماماً. إن اكتشاف هذه النظرية، أو التوصل إلى التفسير النهائي للكـــون على مستواه المجهري الأدنى وعن طريق نظرية لا تحتاج إلى أية فرضيات إضافية، سيزودنا بالأسس المتينة التي يمكن أن **نبني** عليها فهمنا للكون. إن هذا الاكتشاف سيكون نقطة البداية وليس نقطة النهاية، إذ ستقدم هذه النظرية دعامات التناسق الدائم الذي يؤكد أن عالمنا قابل للفهم والإدراك.

الحالة الراهنة لنظرية الأوتار

يهدف هذا الكتاب بصورة أساسية إلى تفسير ماهية الكون وفقاً لنظرية الأوتار مع التركيز بوجه رئيس على ما لذلك من نتائج على فهمنا للزمان والمكان. إلاّ أن مادته، وبخلاف الكثير مما كتب ويكتب عن الإنجازات والتطورات العلمية، ليست نظرية مكتملة أثبتتها التجربة وقبل بها الفيزيائيون كافة، لأن نظرية الأوتار، وكما سنرى في فصول قادمة، تتضمن بناء رياضيّاتياً نظرياً معقداً لم يُتمكن حتى الآن من سبر أغواره تماماً، رغم ما تحقق من تقدم هائل خلال العشرين سنة الماضية.

وهكذا يجب أن يُنظر إلى نظرية الأوتار كنظرية واعدة لا تزال قيد البناء، كشفت لنا حتى الآن، عن طريق فهمنا الجزئي لها، الكثيرَ من أسرار الطبيعة وبنية المادة والمكان والزمان. ويتجلى أحد نجاحاتها الكبرى في صياغتها للنسبية العامة والميكانيك الكمي ضمن بناء واحد متناسق. كما أنها قادرة، خلافاً للنظريات السابقة، على الإجابة عن أسئلة جوهرية تدور حول ماهية المكونات الأساسية للمادة والقوى. وعلى الدرجة ذاتها من الأهمية، يكمن الجمال الرياضياتي للبناء النظري للأجوبة التي تقدمها النظرية، على الرغم من صعوبة نقل الصورة الأنيقة لذلك. فكثير من ظواهر الطبيعة، كالخصائص الفيزيائية للجسيمات الأساسية وعددها، والتي نقبلها عادة قبولاً قد يبدو عشوائياً، إنما ينجم كنتيجة منطقية للبناء الهندسي للكون وفقاً لنظرية الأوتار. وإذا كانت هذه النظرية صحيحة فإن بنية الكون على المستوى المجهري تتألف من نسيج معقد متعدد الأبعاد تهتز الأوتار فيه وتتلوى بصورة دائمة؛ وبدلاً من أن تبدو الخصائص الفيزيائية للمكونات الأساسية عشوائية، فإنها تغدو مرتبطة بطراز بناء هذا النسيج. وستكون التجربة في نهاية المطاف هي البرهان الأخير والقاطع على صحة نظرية الأوتار، ولن يغني جمالها الرياضيّاتي عن ضرورة قدرتها على التنبؤ بأمور فيزيائية قابلة للاختبار، إن كانت حقاً هي النظرية النهائية التي ستكشف أسرار الكون.

و لا نزال الآن بعيدين عن هذا الهدف، وقد يمر وقت طويل قبل أن نتمكن من تحقيقه، مع أن الاختبارات التي ستجرى خلال السنوات العشر القادمة، وكما سنرى في الفصل التاسع، قد تقدم دليلاً عرضياً غير مباشر على صحة النظرية. وبالإضافة إلى ذلك، وكما سنرى في الفصل الثالث عشر، فإن نظرية الأوتار استطاعت مؤخراً حلّ

معضلة بقيت دون حلّ مدة تزيد على الخمس والعشرين سنة، وتخص ما يسمى بـــ " ***أنتروبية بيكنشتاين – هوكينغ للثقب الأسود***". وقد أقنع نجاحها في ذلك كثيراً من الفيزيائيين أنها ستقدم، مع اكتمال صياغتها، الصورة المطلوبة لفهم كيفية عمل النظام الكوني.

ويلخص إدوار ويتن، وهو واحد من ألمع روّاد هذه النظرية وخبرائها، حالتها الراهنة بقوله: ***إن نظرية الأوتار هي جزء من فيزياء القرن الحادي والعشرين، أتت بالمصادفة في القرن العشرين***"، وهذا ما كان عبّر عنه الفيزيائي الإيطالي الشهير دانيال أماتي[5]. يبدو الوضع كما لو أن فيزيائيي القرن التاسع عشر قد زُوّدوا بحاسوب فائق، مما نعرفه اليوم، دون إعطائهم تعليمات تشغيله، إذ كانت ستتبدّى لهم عن طريق التجربة والخطأ دلالات تشير إلى مدى قدرة هذا الحاسوب، وكان سيلزمهم وقت طويل حتى يتمكنوا من فهمه والسيطرة عليه. ولا تقف المقارنة عند هذا الحد، إذ وكما كانت تلك الدلالات عن قدرة الحاسوب ستعدّ حافزاً يدفع أولئك الفيزيائيين إلى محاولة الإلمام بأسراره، فإن ما لمحناه حتى الآن من قوة نظرية الأوتار سوف يحفز جيلاً بأكمله من فيزيائيي اليوم على دراسة نظرية الأوتار ومحاولة فهمها والإلمام بتقنياتها.

تدل ملاحظة ويتن السابقة، بالإضافة إلى ملاحظات مماثلة قدمها خبراء آخرون في نظرية الأوتار، على أنه قد تمر عقود أو قرون قبل أن تكتمل صياغة النظرية ويتم استيعابها وفهمها. وقد يكون ذلك صحيحاً، فالرياضيات التي تستخدمها النظرية معقدة جداً بحيث أنه لا يُعرف حتى الآن الشكل الصحيح لمعادلاتها، بل تعرف أشكال تقريبية لها، وهي بدورها معقدة جداً بحيث لا تعرف لها إلاّ حلولٌ جزئية. إلاّ أن ذلك لا يمنعنا من الإقرار بأن خروقات علمية ملهمة هائلة قد تحققت خلال النصف الثاني من حقبة التسعينيات، وهذا ما سمح بمعالجة مسائل نظرية فائقة الصعوبة. وقد يعني ذلك أن نهاية المطاف، لفهم نظرية الأوتار بصورة كمية، أكثر قرباً مما كان يُظن في البداية، إذ يطور الفيزيائيون اليوم في كل أرجاء العالم تقنيات رياضيّاتية جديدة وقوية تتفوق على التقنيات التقريبية الكثيرة المستعملة سابقاً، وتتضافر جهودهم بمعدل سريع في محاولة لمّ شمل العناصر المتفرقة لبناء نظرية الأوتار وتجميعها.

تُعدّ هذه التطورات اليوم فرصةً مؤاتية مذهلة لإعادة تفسير كثير من المفاهيم الأساسية لنظرية الأوتار والتي مضى على وضعها بعض الوقت. وقد يتساءل المرء مثلاً

عند رؤية الشكل 1-1 : لماذا الأوتار؟ لماذا لا تكون المكونات الأساسية أقراصاً صغيرة، أو شذرات فقاعية مجهرية، أو مزيجاً من الاثنين؟ وكما سنرى في الفصل الثاني عشر، فقد أظهرت التطورات الأخيرة أن هذه الأنواع الأخرى من المكوّنات تلعب فعلاً دوراً مهماً في نظرية الأوتار، وأنها بيّنت أن هذه النظرية هي في الواقع جزء من نظرية أعم وأشمل توضع الآن، وتسمى، لأسباب غامضة، نظرية الـ M (النظرية الأم). وستكون هذه التطورات الحديثة موضوع الفصول الأخيرة من هذا الكتاب.

وليست مسيرة العلم في تقدمه مسيرة منتظمة ومطردة، بل نراه يمر عبرها بدورات وقفزات. فقد تزخر بعض الفترات الزمنية باكتشافات علمية كثيرة ومثيرة، في حين تنقضي بعض هذه الفترات دون كشوف تذكر. ويعرض الفيزيائيون نتائج أبحاثهم النظرية والتجريبية أمام حشود من زملائهم لمناقشتها والتحاور حولها؛ وقد يُستبعد بعضها أحياناً كما قد يعدّل بعضها الآخر، إلاّ أن بعض هذه النتائج يعد نقاط انطلاق ملهمة لطرق جديدة أكثر دقة من سابقاتها لفهم فيزياء الكون. أو نقول بتعبير آخر أن طريق التقدم العلمي نحو غايته المنشودة لفهم الحقيقة الفيزيائية مليء بالتعرجات والانعطافات. وفي حين تُعرف بداية هذا الطريق من المحاولات التي بدأها الإنسان لسبر أغوار الكون، إلا أنه لا يمكن معرفة نهايته. وقد تكون نظرية الأوتار محطة عرضية على هذا الطريق، وقد تكون علامة بارزة تدل على منعطف أساسي فيه، وربما تكون هي نهاية المطاف التي يُسعى إليها. وأياً كان الأمر فقد بيّنت الأبحاث التي أنجزها مئات الفيزيائيين والرياضيّاتيين في بلدان متعددة خلال العقدين الأخيرين أننا على الدرب الصحيح، وقد نكون في المرحلة الأخيرة منه.

إن فهمنا الجزئي الحالي لما قدمته نظرية الأوتار من صور رائعة عن الكون يُعدّ دلالة بليغة على قوة هذه النظرية وعلى غناها، وسيكون الدور الرئيس، فيما سيأتي، للتطورات العلمية التي تكمّل القفزة الثورية في فهمنا للزمان والمكان الذي بدأ مع نظريتي أنشتاين في النسبية الخاصة والعامة. وسنرى، إن صحّت هذه النظرية، أن لنسيج عالمنا من الخصائص العجيبة ما كان سيدهش أنشتاين نفسه لو كان حياً.

الباب الثاني

معضلة المكان والزمان والكمّ

الفصل الثاني

المكان والزمان وعين المراقب

كان أنشتاين في السادسة والعشرين من عمره حين قدّم في شهر حزيران (يونيو) من سنة 1905 ورقة علمية إلى مجلة Annals of physics التي تصدر في ألمانيا، عرض فيها حلّه لمفارقة علمية عن الضوء كانت قد شغلته حوالي عشر سنين قبل ذلك. أدرك محرر المجلة (وكان العالم الشهير ماكس بلانك)، وبمجرد انتهائه من قراءة الورقة، أن مفاهيم الفيزياء قد قُلبت رأساً على عقب. وهكذا، وبعيداً عن كل مصادر الأضواء والإثارة، تمكن هذا الموظف في مكتب براءات الاختراع في مدينة برن في سويسرا من قلْب مفهومنا التقليدي للمكان والزمان واستبدل به مفهوماً جديداً ذا خصائص تبدو مغايرة لكل ما عرفناه وألفناه من تجاربنا السابقة.

تبدو المفارقة التي شغلت بال أنشتاين لعقد من الزمن من خلال ما يلي:

كان الفيزيائي الأسكتلندي جيمس كلارك ماكسويل قد تمكن في أواسط القرن التاسع عشر، وبعد دراسة دقيقة ومتأنية للنتائج التجريبية التي توصل إليها الفيزيائي الإنكليزي مايكل فاراداي، من توحيد الكهرباء والمغنطيسية في إطار واحد يُعرف بما يسمى **الحقل الكهرطيسي**، وهو حقل ستدرك معناه لأنك ستحسّ به، إن وقفت على قمة جبل قبل هبوب عاصفة رعدية، أو كنت قريباً من مولّد فان دي غراف. أما إذا لم تتح لك مثل هذه الفرصة فإن بوسعك أن تتخيل هذا الحقل وكأنه امتداد لخطوط القوى الكهربائية والمغنطيسية يخترق المنطقة التي يمر فيها. إن برادة الحديد التي تُرش بجوار مغنطيس تتوزع توزعاً منتظماً على طول خطوط القوى المغنطيسية غير المرئية؛ كما أن الطقطقة التي قد تسمعها أو الرعشة الفجائية التي قد تشعر بها عندما تخلع معطفك الصوفي في يوم جاف، هي شاهدٌ على وجود خطوط القوى الكهربائية التي تولّدها الشحنات الكهربائية الموجودة في نسيج معطفك. وقد بيّنت نظرية ماكسويل، بالإضافة إلى توحيد هذه القوى

وجميع الظواهر الكهربائية والمغنطيسية، وعلى نحو غير متوقع، أن الاضطرابات الكهرطيسية تنتشر دوماً بسرعة ثابتة مساوية سرعة الضوء، واستنتج ماكسويل من ذلك أن الضوء المرئي بدوره ليس إلا نوعاً خاصاً من الأمواج الكهرطيسية نعرف الآن أنها تتفاعل مع مواد كيميائية في شبكة العين فتجعلنا نحس بالإبصار. وفوق هذا وذاك فقد بيّنت النظرية أمراً على قدر كبير من الأهمية وهو أن الأمواج الكهرطيسية كافةً، بما فيها الضوء المرئي، تقدم صورة نموذجية لسائح جوال، فهي لا تتوقف ولا تتباطأ أبداً، بل تستمر **دوماً** في حركتها بسرعة مساوية سرعةَ الضوء.

يُعد ما تقدم أمراً يسهل فهمه وإدراكه، وهو خارج عمّا طرحه أنشتاين على نفسه وهو في ربيع عمره السادس عشر،حين تساءل عمّا سيحدث إذا ما تعقّبنا حزمة الضوء بسرعة تماثل سرعتها. يأتي الجواب المباشر عن ذلك، والقائم على قوانين نيوتن في الحركة، أن الضوء سيبدو لنا ساكناً لأننا نتحرك بالسرعة نفسها. لكن مفهوم الضوء الساكن غير ممكن في الطبيعة وفقاً لنظرية ماكسويل وللملاحظات التجريبية المعتمدة كافة. فنحن لا نقدر على الإمساك برزمة من الضوء واحتجازها في راحة كفنا. هذه هي المفارقة التي شغلت بال أنشتاين. ولعلّ من حسن الحظ أنه لم يكن على دراية في حينه بأن هذه المعضلة كانت تشغل بال مجموعة كبيرة من العلماء الفيزيائيين الذين كانوا يبحثون جاهدين عن إيجاد حل لها. لذلك نراه يتمعن وحيداً في خضم أفكاره الخاصة، في هذا التعارض القائم بين ماكسويل ونيوتن.

وسنناقش في هذا الفصل كيف توصل أنشتاين إلى حلّ هذا التعارض بواسطة نظريته في النسبية الخاصة، وكيف بدّل ذلك كل مفاهيمنا عن المكان والزمان. قد يبدو غريباً أن تركز النسبية الخاصة اهتمامها الرئيس للتوصل إلى فهم دقيق للكيفية التي يبدو فيها العالم لمجموعة من الأشخاص، ندعوهم المراقبين، يتحرك بعضهم بالنسبة إلى بعض. وقد يبدو ذلك مجرد تمرين ذهني محدود الأهمية، إلا أن العكس هو الصحيح. فقد تم بفضل أنشتاين وتصوره للمراقبين الذين يتعقبون الضوء، كشفُ حقائق ومفاهيم ضرورية لكي نفهم فهماً عميقاً كيف تبدو الطبيعة في معظم حالاتها لمجموعة من الأشخاص يتحركون في حركة نسبية.

الحدس وأخطاؤه

تبيّن تجاربنا اليومية أن نتائج الملاحظة تتباين ما بين مراقب وآخر. ومن ذلك ما تبدو عليه الأشجار المغروسة على جانبي طريق عام، فهي تُرى متحركة بالنسبة لسائق عربة، في حين تبدو ساكنة بالنسبة لمسافر ينتظر على جانب الطريق سيارة تقله؛ وكذلك لوحة أجهزة القياس في العربة، فهي تبدو ساكنة بالنسبة لسائقها (لنأمل ذلك!) ومتحركة، مثل كل أجزاء السيارة الأخرى، بالنسبة للمسافر المنتظر على قارعة الطريق. يدل هذان المثالان على خصائص أساسية وبديهية عن كيفية سير العالم من حولنا، قلّما نعيرها أي اهتمام.

وتؤكد نظرية النسبية الخاصة أن الاختلافات المشار إليها بين هذين المراقبين تحمل دلالات أعمق وأدق. فهي تقتضي، ما قد يبدو غريباً، أن المراقبين، وعن طريق حركاتهم النسبية، سوف تتكون لديهم إدراكات مختلفة للمسافة والزمن. يعني هذا، وكما سنرى لاحقاً، أن ساعتَي يد متماثلتين يحملهما مراقبان يتحرك أحدهما بالنسبة للآخر، ستتكّان **بمعدلين مختلفين**، ومن ثم ستعطيان نتائج مختلفة لقياس الوقت المنصرم بين حادثتين معينتين، دون أن يعني هذا، كما تؤكد النظرية، أن إحدى الساعتين غير دقيقة، بل هو دلالة صحيحة لمفهوم الزمن ذاته. وكذلك الأمر بالنسبة لمراقبين يتحرك بعضهم بالنسبة لبعض ويحملون مساطر متماثلة، إذ سيحصلون على نتائج مختلفة عند قياسهم أطوال مسافات معينة، دون أن يعني ذلك أيضاً عدم دقة بعض مساطر القياس أو أن بعض المراقبين قد أخطأ في استعمالها. وتؤكد أدق أجهزة القياس في العالم أن المكان والزمان – مقيسين بالمسافة والمدة – لا يعطيان نتائج متطابقة عند الجميع. إن نظرية النسبية الخاصة، وفقاً لما حدّده أنشتاين بدقة، قادرة على حلّ التعارض بين مفهومنا الحدسي عن الحركة وبين خصائص الضوء. لكن هناك ثمناً لذلك، وهو تقبّلنا لتباين نتائج قياس المكان والزمان لدى أشخاص يتحرك بعضهم بالنسبة لبعض.

لقد انقضى حوالي قرن من الزمان منذ أن طلع أنشتاين باكتشافه المثير على العالم. ومع ذلك فلا يزال الكثير منا ينظر إلى المكان والزمان على أنهما مفهومان مطلقان. ذلك أننا لا نشعر بالنسبية الخاصة في حياتنا اليومية، ولا تشغل مقتضياتها أو متطلباتها أيّ

حيّز في حدسنا. والسبب في ذلك بسيط، فآثار النسبية الخاصة تعتمد على سرعة المراقب، وعلى نحو يمكن معه تجاهلها وإهمالها إذا ما كانت هذه السرعة من مرتبة سرعة العربات أو الطائرات أو حتى المركبات الفضائية. إن هناك في الحقيقة **اختلافاً** في إدراك وقياس الزمان والمكان بين مراقب واقف على الأرض وآخر متحرك، يستقل سيارة أو طائرة. لكن هذا الاختلاف ضئيل جداً بحيث تتعذر ملاحظته. أما إذا تخيّلنا أنفسنا في مركبة فضائية مستقبلية تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء، فإن آثار النسبية الخاصة ستكون محسوسة وجليّة جداً، مع أن هذا ليس سوى ضرب من الخيال العلمي. وكما سنرى في الفقرات التالية فإن هناك تجارب دقيقة تسمح بملاحظة التباين في الخصائص النسبية للزمان والمكان كما تتنبأ بها نظرية أنشتاين.

ولإعطاء فكرة عن المقادير والمقاييس الواردة في عرضنا هنا، نتصور أننا في العام 1970، حيث كثرت السيارات الكبيرة والسريعة، وأن سليماً (شخصاً ما) أنفق كل مدخراته لشراء واحدة منها من طراز "ترانس إم "، وتوجه بها مع أخيه خالد إلى مضمار السباق المحلي ليختبر قدراتها وسرعتها. يدير سليم محرك سيارته وينطلق بها بسرعة 120 ميلاً في الساعة، في حين يقف أخوه خالد عند خط نهاية المضمار ليحدد لحظة مرور السيارة على هذا الخط، ومن ثم سرعتها. وزيادة في الوثوقية، يريد سليم أن يقيس هو أيضاً هذه السرعة ويحدد زمن اجتياز سيارته خط نهاية المضمار. ونتوقع من ميقاتيّتي سليم وخالد، المتماثلتين تماماً، أن تعطيا نتائج قياس متطابقة. إلاّ أن نظرية النسبية الخاصة تنبئنا أنه في حين تحدد ميقاتية خالد زمناً مقداره 30 ثانية، فإن ميقاتية سليم تحدد زمناً **أقل بقليل** من ذلك وهو 29,99999999999952 ثانية. إلاّ أن هاتين الميقاتيتين اليدويتين، وحتى ما هو أدق منهما مثل الميقاتيات المستخدمة في مسابقات الألعاب الأولمبية، أو حتى الساعات الذرية البالغة الدقة، غير قادرة على تمييز هذا الفرق بين الزمنين. من هنا نرى سبب عدم إحساسنا في مجريات حياتنا اليومية باعتماد قياس الزمن على حركة المراقب.

وإلى جانب هذا التباين في قياس الزمن فإن هناك تبايناً مماثلاً في قياس الأطوال. يريد سليم أن يتأكد من طول سيارته فيطلب من أخيه خالد أن يحدد على ميقاتيته الزمنَ

الفاصل بين مرور مقدمة السيارة ومرور مؤخرتها على خط نهاية المضمار. ولما كان خالد يعلم أن أخاه ينطلق بسيارته بسرعة 120 ميلاً في الساعة فإنه يحسب طولها من أخذ جداء سرعتها بالزمن المحدد على ميقاتيته. كانت الآراء متفقة قبل ظهور نظرية النسبية الخاصة على أن نتيجة القياس غير المباشر هذا لطول السيارة ستتوافق تماماً مع قياس سليم لهذا الطول عندما تكون سيارته واقفة أو مع هذا الطول المحدّد في كتيّب السيارة الذي زوده به البائع. إلاّ أن هذه النظرية تقول خلاف ذلك. فهي تؤكد أنه إذا قاس كل من سليم وخالد طول السيارة، وبطريقته التي ذكرناها، فإن نتائج القياس لن تكون متفقة فيما بينها. ففي حين يحدد سليم هذا الطول بـــ 16 قدم مثلاً، فإن خالد يحدده بـــ 15,9999999999974 قدم، أي بأقل قليلاً من قياس سليم. وكما في قياس الزمن فإن التباين الملاحظ ضئيل جداً لا يمكن كشفه بالوسائل المتاحة لنا.

إن هذه الاختلافات في نتائج القياس، على ضآلتها، ذات دلالة بيّنة على فداحة خطأ وفشل مفاهيمنا عن ثبات الزمان والمكان. وكلما زادت السرعة النسبية للمراقبين كان الخطأ أكبر وأشد وضوحاً. إلاّ أنه يلزم لملاحظة اختلافات محسوسة بين نتائج القياس أن تكون السرعات المقاسة قريبة أو من مرتبة أكبر سرعة ممكنة في الطبيعة وهي سرعة الضوء البالغة، تبعاً لنظرية ماكسويل ولقياسات تجريبية مجراة، حوالي 186000 ميل في الثانية، أو 670 مليون ميل في الساعة، وهي سرعة تُمكّن الضوءَ من الدوران حول الكرة الأرضية سبع مرات في ثانية واحدة. وتبين العلاقات الرياضيّاتية لنظرية النسبية الخاصة أنه لو انطلق سليم بسيارته بسرعة 580 مليون ميل في الساعة (بدلاً من 120 ميل)، أي بحوالي 87% من سرعة الضوء، فإن طول سيارته كما يحدده خالد، يبلغ 8 أقدام، وهو مقدار يختلف كثيراً عما يقيسه سليم حين تكون سيارته واقفة. ومثل ذلك فإن الزمن اللازم لاجتياز خط نهاية المضمار يكون عند خالد مساوياً **ضعفيه** عند سليم.

ولما كان تحقيق مثل هذه السرعة غير متاح لنا في عالمنا، فإننا لا نشعر بآثار هذه الظواهر المسماة تقنياً ظواهر *"تمدد الزمن و"تقلص الطول لـــ لورنتز"*، وذلك لضآلة قيمها في حياتنا اليومية. ولو أننا كنا نعيش في عالم تتحرك فيه الأشياء بسرعات قريبة من سرعة الضوء، لكانت خصائص الزمان والمكان مقبولة لدينا بالحدس لأننا كنا

سنشعر بها دوماً، ولما كنا أعطيناها من الاهتمام في هذا العرض بأكثر مما أعطينا للأشجار المزروعة على جانبي الطريق والتي تبدو متحركة بالنسبة لسائق العربة. إلاّ أن عالمنا غيرُ هذا العالم لذلك ترانا غير متآلفين مع مثل هذه الخصائص، وترانا نحتاج لتقبّلها وفهمها إلى مراجعة شاملة لنظرتنا إلى العالم.

مبدأ النسبية

تقوم نظرية النسبية الخاصة على ركنين أساسيين عميقَي الجذور، على بساطتهما. يعتمد أولهما على خصائص الضوء، وستتم مناقشته في الفقرة التالية؛ أما الثاني فأكثر تجريداً ولا يتعلق بقانون فيزيائي بعينه، بل يخص **كلّ** قوانين الفيزياء، ويعرف **بمبدأ النسبية**. يعتمد هذا المبدأ على حقيقة بسيطة مؤداها أنّ علينا عند الحديث عن السرعة (أي قيمة سرعة جسم ما واتجاه حركته)، أن نحدّد بدقةٍ المراقبَ، أو الآلة، الذي يقوم بعملية القياس. يمكن بسهولة فهم معنى هذا القول وأهميته بتأمل الوضع التالي:

تخيّل رائد الفضاء جورج وقد ارتدى بذّته الخاصة المزودة بمصباح صغير يُصدر وميضاً أحمر وقد أخذ يسبح في الفضاء المعتم الخاوي بعيداً عن أية كواكب أو نجوم أو مجرات. سيرى جورج نفسه، من وجهة نظره الخاصة، ساكناً تماماً في موقعه في هذا الفضاء الكوني الرحب. وفجأة يلمح من بعيد وميضاً من ضوء أخضر يقترب منه شيئاً فشيئاً حتى يصبح على مسافة يبدو له منها أن هذا الوميض يصدر من مصباح معلق ببذة رائدة الفضاء جين السابحة مثله. وحين مرورها بجواره يتبادلان التحية وتتابع جين تجوالها مبتعدة عنه. يمكن لجين، من وجهة نظرها، أن تروي مثل هذه الحكاية تماماً؛ فهي ساكنة في موقعها في الفضاء الخاوي والمعتم، وما تلبث أن تلمح من بعيد وميضاً من ضوء أحمر يقترب منها شيئاً فشيئاً حتى يصبح على مسافة يبدو لها منها أنه يصدر من مصباح معلق ببذة رائد الفضاء جورج السابح مثلها فيه؛ وحين مروره بجوارها يتبادلان التحية ويتابع جورج تجواله مبتعداً عنها.

تصف هاتان الحكايتان المشهدَ ذاته من وجهتَي نظر متباينتين إلا أنهما صحيحتان، كلتاهما. فكل مراقب يرى نفسه ساكناً في حين يرى الآخر متحركاً، وكلا الرؤيتين

صحيحة ومبرّرة. ولما كان رائدا الفضاء متماثلين تماماً فإنه لا يمكن تفضيل حكاية أحدهما على حكاية الآخر والقول بأن أحدهما على *"صواب"* وأن الثاني على *"خطأ"*، بل نقول أن لحكاية كل منهما النصيبَ ذاته من الحقيقة.

يوضح لنا هذا المثال معنى مبدأ النسبية. فالحركة مفهوم نسبي، وحين نتحدث عن حركة جسم ما فإن ذلك يكون بمقارنته (أو بنسبته) مع جسم آخر، إذ لا معنى لقولنا أن *"جورج يتحرك بسرعة 10 ميل في الساعة"* إذا لم نحدد مرجع مقارنة هذه الحركة، أو المرجع الذي تُنسب إليه، في حين **أن هناك** معنى لقولنا أن *"جورج يتحرك بسرعة 10 ميل في الساعة بالنسبة لجين"*، وهي هنا مرجع المقارنة. وقولنا الأخير هذا مكافيء لقولنا *أن جين تتحرك (في الاتجاه المعاكس) بسرعة 10 ميل في الساعة بالنسبة لجورج"*. ليس للحركة إذن مفهوم مطلق بل لها مفهوم نسبي.

هناك نقطة أساسية نود أن نؤكد عليها مع أننا لم نشر إليها في مثالنا السابق، وهي أن كلاً من رائدي الفضاء جورج وجين لم يكن خاضعاً، في سباحته في الفضاء، لأي قوة خارجية تدفعه في اتجاه ما أو تبعده عن اتجاه آخر، بل كانا مطلقَي الحرية في تحركهما، بعيدَين عن أي مؤثر خارجي يمكن أن يؤثر على حركتهما المنتظمة. ويجب لحظ ذلك عند كلامنا عن نسبية الحركة وذلك حتى يكون كلامنا أكثر دقة، فنقول: لا معنى للحديث عن حركة جسم حر لا يخضع لأي مؤثر خارجي إلاّ من خلال مقارنتها مع حركة جسم آخر. وهذه النقطة شديدة الأهمية لأن وجود قوة خارجية فعّالة قد يؤثر على سرعة المراقب (من حيث قيمتها أو اتجاه حركتها) تأثيراً يمكن تلمّسه. فلو كانت بذة جورج مزودة مثلاً بمحرّك نفّاث في مؤخرتها، فإن جورج سيشعر بالتأكيد أنه يتحرك عند تشغيل هذا المحرك، وهو شعور ذاتي داخلي، فهو سيحسّ به حتى ولو كانت عيناه مغمضتين ولم يكن بوسعه القول، حتى مع غياب هذه المقارنات، أنه ساكن في الفضاء في حين أن كل شيء حوله يتحرك بالنسبة إليه. لذلك نؤكد أن للحركة المنتظمة ذات السرعة الثابتة مفهوماً نسبياً في حين أنه ليس للحركات ذات السرعات المتغيرة، أو ما ندعوها بالحركات المتسارعة، مثل هذا المفهوم النسبي (وسنتفحص هذا القول في الفصل القادم عند الحديث عن الحركة المتسارعة ومناقشة نظرية أنشتاين في النسبية

العامة). وسوف يساعدنا النظر إلى الأمثلة السابقة على أنها تجري في عتمة فضاء كوني على فهم الأمور لأنه سيبعد عن أذهاننا أشياء كالطرق والبنايات التي نعتبرها ساكنة عادة دون أي مبرر مقبول لذلك. ومع ذلك فإن مبدأ النسبية يبقى صحيحاً أيضاً في حالة أوضاع تحدث حولنا في حياتنا اليومية[1]. تخيّل نفسك جالساً في مقصورة قطار وقد غلبك النعاس فاستسلمت للنوم، ثم استيقظت في اللحظة التي يمر فيها قطارك بمحاذاة قطار آخر يحجب عن ناظرَيك رؤيةَ أي شيء آخر سواه. إنك، ومؤقتاً، لن تستطيع الجزم إن كان قطارك هو الذي يتحرك أو أنه القطار الآخر أو القطاران معاً. وستشعر حتماً أن قطارك هو الذي يتحرك إذا ما ارتج قليلاً أو غيّر اتجاهه عند منعطف ما. أما إذا كانت قضبان السكة التي يسير عليها ملساء ناعمة بحيث تبقى سرعته ثابتة فإنك ستلاحظ حركة نسبية بين قطارين دون أن تستطيع تحديد القطار المتحرك منهما.

ولنتقدم خطوة أخرى إلى الأمام في مثالنا هذا. تخيّل أنك أسدلت ستائر النافذة في مقصورتك بحيث حجبت عن ناظرَيك رؤيةَ أي شيء خارجها؛ ولنتصور أن قطارك يسير بسرعة منتظمة ثابتة. عندها لن تستطيع أن تتعرف على وضعك الحركي وهل أنت ساكن أو متحرك. فالمقصورة حولك ستبدو على حالها سواء أكان القطار لا يزال واقفاً في المحطة أو أنه كان يسير بسرعة كبيرة. وقد عبّر أنشتاين عن هذه الفكرة، التي تعود في الحقيقة إلى أيام غاليله، بتأكيده على أنه يستحيل على أي مراقب مسافر في هذه المقصورة أن يقوم بأي تجربة تسمح له بمعرفة إن كان القطار متحركاً أو ساكناً. وهنا أيضاً يتجلى أمامنا مبدأ النسبية. فحركة الجسم الحر الذي لا يخضع لأي مؤثر لن تكتسب معناها أو دلالتها إلا عند مقارنتها (أو نسبتها) مع مراقبين آخرين يتحركون بدورهم بصورة حرة أيضاً لا تخضع لأي قوة أو مؤثر. ولن تستطيع بأي حال تحديد حالتك الحركية دون إجراء مقارنة مباشرة أو غير مباشرة مع أشياء خارجية، مما يعني، وبكل بساطة، أنه لا معنى فيزيائياً للحركة المنتظمة المطلقة، لأن المقارنة وحدها تعطي الحركة معناها الفيزيائي. أما أنشتاين فأدرك أن مبدأ النسبية يطال أموراً أبعد من ذلك. فكل قوانين الفيزياء يجب أن تكون متماثلة على نحو مطلق بالنسبة لمراقبين يتحركون بسرعة ثابتة. ولو لم يكن جورج وجين مجرد سابحَين منفردَين في الفضاء، بل كان على

كل منهما أن يجري في مركبته الفضائية المجموعة ذاتها من التجارب التي يجريها الآخر، فسيتوصلان بالتأكيد إلى نتائج متطابقة. ومرة أخرى فإن مبدأ النسبية يسوّغ لكليهما الشعورَ بأنه المراقِب الساكن حتى ولو كانا في حركة نسبية فيما بينهما. وإذا ما زُودت المركبتان بمخبرَين فيهما الأجهزة ذاتها، فإن مجموعة التجارب التي ستُجرى فيهما ستكون متماثلة، وستكون متماثلة كذلك القوانين الفيزيائية التي سيخلص إليها كل من رائدي الفضاء من تجاربه. وهكذا لا يمكن لهما (كمراقبَين) أن يشعرا بحركتهما المنتظمة، أي أن نتائج تجاربهما لن تعتمد على هذه الحركة. يبرهن هذا المفهوم على وجود تناظر كامل بين مراقبين مثلهما وهو ما يقتضيه مبدأ النسبية الذي سنستخدمه قريباً في دراستنا للحصول على نتائج أعمق.

سـرعة الضـوء

يعد الضوء وخصائص حركته أحد الركنين الأساسيين اللذين تقوم عليهما نظرية النسبية الخاصة؛ فعلى خلاف ما ذكرناه من خُلُوّ قولنا *"أن جورج يتحرك بسرعة 10 ميل في الساعة"* من أي معنى فيزيائي إذا لم نحدد معلماً أو مرجعاً تقارن حركة جورج به، فإن الضوء، وكما دلت تجارب فيزيائية أجريت على مدى قرن من الزمن، يتحرك بسرعة 670 مليون ميل في الساعة **بقطع النظر عن أي مرجع للمقارنة.**

وقد اقتضت هذه الحقيقة إدخالَ تغيير ثوري على فهمنا للضوء. لنبدأ أولاً في استكناه مدلولاتها عن طريق مقابلتها مع أحوال مماثلة نعيشها في حياتنا اليومية. تخيّل أنك خرجت وصديقتك في يوم مشمس جميل لتلعبا الكرة، حيث يرميها أحدكما للآخر، فيلتقطها ويعيدها إليه وهكذا... وبقيتما على هذه الحال تتقاذفان الكرة التي كانت تنتقل بينكما بسرعة 20 قدماً في الثانية، حتى هبّت عاصفة رعدية دفعتكما إلى الهرب والاختباء منها. وما إن تنقضي العاصفة حتى تعودا إلى ما كنتما عليه من لعب. إلاّ أنك تلاحظ أن شيئاً ما قد تغيّر، فملامح صديقتك اللطيفة قد انقلبت فجأة، فجحظت عيناها ووقف شعر رأسها وأمسكت بيدها بدل الكرة قنبلة يدوية تريد أن ترميك بها. لن تهتم بالتأكيد بمتابعة اللعب بل ستبادر إلى الفرار بعيداً عنها. وترمي صديقتُك القنبلَة باتجاهك

وتركض أنت مبتعداً عنها، لذلك ستكون سرعة اقترابها منك أقل من 20 قدماً في الثانية، بسبب هروبك بعيداً عنها. فإذا ما كنت تركض بسرعة 12 قدماً في الثانية فإن القنبلة ستقترب منك بسرعة 8 أقدام في الثانية (20-12=8). لننظر في مثال آخر. تخيّل أنك كنت تتزلج على جبل مغطى بالثلج، وإذ بك ترى فجأة انهياراً ثلجياً يتجه نحوك. ومرة أخرى ستبادر إلى التزلج مبتعداً عنه طلباً للنجاة، حتى تقلل من سرعة اقترابه منك. إلاّ أن مراقباً ساكناً يقف على الجبل ويتابع ما يحدث، يرى أن سرعة الانهيار هي أكبر مما تراه أنت، الذي يركض مبتعداً عنه.

لنقارن الآن ملاحظاتنا هذه عن الكرة والقنبلة والانهيار الثلجي مع ما يحدث في حالة الضوء. ولكي تكون المقارنة أسهل تقبلاً سننظر إلى الحزمة الضوئية على أنها تتكون من رزم أو جسيمات صغيرة هي الفوتونات (وسنتحدث عنها بالتفصيل في الفصل الرابع). إذا أخذنا بيدنا مصباح جيب كهربائي أو مولد ليزر وأشعلناه، ووجهنا ضوءه في اتجاه ما، فإننا في الحقيقة نطلق حزمة من الفوتونات في هذا الاتجاه. لنرَ الآن كيف ستبدو حركة هذه الفوتونات لشخص يتحرك مبتعداً عنها. تخيّل أن صديقتك، وقد مسّها ضرب من الجنون، قد استبدلت جهازاً ليزرياً ذا استطاعة عالية بالقنبلة التي كانت بيدها. فعندما تطلق حزمة الفوتونات نحوك فإنك ستجد، إن كنت مزوداً بأجهزة قياس مناسبة، أن الفوتونات تقترب منك بسرعة 670 مليون ميل في الساعة. لكن ماذا سيحدث لو ركضت مبتعداً عنها كما هربت من قنبلتها اليدوية، وكم ستكون سرعة الفوتونات التي تقيسها أجهزتك. لنجعل الأمر أكثر واقعية. تخيّل أنك قفزت إلى مكّوك فضائي ينطلق مبتعداً عن صديقتك المجنونة بسرعة 100 مليون ميل في الساعة. فماذا ستجد؟ تتوقـــــع ولاشك، ومن معرفتك التامة بوجهة النظر التقليدية للميكانيك النيوتني، أن تكون سرعة اقتراب الفوتونات منك **أبطأ** (لأنك تركض مبتعداً عنها)، ومن ثم سوف تسجل أجهزتك سرعةً للفوتونات أقل من 670 مليون ميل في الساعة، كما تتوقـــع أن تكـــون هذه الســـــرعة 570 مليون ميل في الساعة (670-100=570).

غير أن ما توقعته **لن** يتحقق. فقد دلت النتائج التجريبية لمجموعة من الاختبارات ترجع إلى أواخر القرن التاسع عشر، كما دلت التحليلات النظرية والتفسيرات الدقيقة لنظرية ماكسويل في الكهرطيسية، والتي أقنعت جميع الفيزيائيين، **أن سرعة الفوتونات التي تقترب منك هي دوماً 670 مليون ميل في الساعة، ولن تقل عن ذلك قيد أنملة.** قد

يبدو ذلك غريباً وغير مقبول للوهلة الأولى، فهو غير ما رأيته في حال الكرة والقنبلة والانهيار الثلجي. إن ثبات سرعة اقتراب الفوتونات الضوئية منك ومحافظتها على قيمتها البالغة 670 مليون ميل في الساعة، يعني أن سرعة الضوء تبقى ذاتها دوماً بقطع النظر عن الحركة النسبية بين مصدر الفوتونات والمراقب[2].

وتحول صعوبات تقنية في الوقت الحاضر دون التأكد بصورة مباشرة من هذه النتيجة عن طريق إجراء تجارب ضوئية كتلك التي وصفناها سابقاً؛ إلا أنه يمكن إجراء تجارب مقارنة على الضوء ذات دلالات على ذلك، كتلك التي اقترح إجراءها الفيزيائي الهولندي وليام ديسيتر سنة 1913، باستخدام منظومات النجوم الثنائية المبتعدة عنا (تتألف المنظومة من نجمين يدور أحدهما حول الآخر) لدراسة تأثير حركة المنبع الضوئي على سرعة الضوء. وقد دلت التجارب الكثيرة التي اعتمدت هذا النظام طوال العقود الثمانية السابقة أن سرعة الضوء التي يصدرها نجم متحرك **تساوي** سرعة الضوء الصادر عن نجم ثابت ومقدارها 670 مليون ميل في الساعة، وذلك ضمن حدود ارتياب الأجهزة المستعملة، والتي ما انفكت تزداد دقة. وكذلك فإن جميع التجارب التي أجريت في القرن الماضي لقياس سرعة الضوء بصورة مباشرة وفي ظروف مختلفة، وكذلك التجارب التي تختبر المقتضيات الناجمة عن هذه الخاصية المميزة للضوء، أكدت كلها ثبات سرعته.

وإذا كنت ترى أن هذه النتيجة غير قابلة للتصديق، فاعلم أنك لست وحدك في ذلك. فقد حاول كثير من الفيزيائيين في مطلع القرن العشرين تفنيد صحة هذه النتيجة دون أن يفلحوا في ذلك. بخلاف أنشتاين الذي قال بثبات سرعة الضوء، إذ وجد فيه حلاً للمفارقة التي أقلقته في مطلع شبابه. لذلك وأيّاً كان سبيلك للّحاق بحزمة الضوء فإنك لن تفلح في ذلك لأنها ستبتعد عنك دوماً بسرعتها الثابتة، ولن تستطيع أبداً أن تجعل السرعة الظاهرية لانطلاق الضوء أقل ولو بقيد أنملة من 670 مليون ميل في الساعة، فكيف بإبطائها إلى الحد الذي يبدو فيه ساكناً. هنا صدر الحكم ورُفعت القضية! ولم يكن هذا الانتصار في حل المفارقة المعضلة انتصاراً بسيطاً إذ رأى أنشتاين في ثبات سرعة الضوء انهيار الفيزياء النيوتنية.

الحقيقة والنتائج

تعبّر سرعة جسم ما عن مقدار المسافة التي يقطعها خلال فترة محدّدة من الزمن؛ فإذا ما كنا في سيارة تسير بسرعة 65 ميلاً في الساعة، فإننا سنقطع 65 ميلاً إذا حافظت السيارة على حالتها الحركية، أي على سرعتها، مدة ساعة من الزمن. وقد يعني مثل هذا القول أن السرعة مفهوم مادي خاص بحياتنا اليومية وألاّ حاجة، لذلك، لكل هذه الجَلَبة التي أحدثناها عن سرعة الكرات والانهيار الثلجي والفوتونات. لكن! دعنا نلاحظ أن **المسافة** هي مفهوم خاص بالمكان، إذ هي بوجه خاص قياسٌ لمقدار المكان الموجود بين نقطتين، وأن **الفترة** هي مفهوم خاص بالزمان، إذ هي قياسٌ لمقدار الزمان المنقضي بين حادثتين؛ لذلك فإن السرعة تتعلق تعلقاً كبيراً بمفهومَي المكان والزمان. فإذا ما نظرنا إليها من هذا الجانب، أو من هذا المنظار، فإننا سنرى أن أي حقيقة فيزيائية مثبتة تجريبياً وتخالف مفهومنا الحدسي للسرعة، مثل ثبات سرعة الضوء، يمكن أن تتحدى مفاهيمنا العامة ذاتها عن الزمان والمكان بل وتخالفها. لذلك فإن الخاصية الغريبة لسرعة الضوء تستحق تمعّناً تفصيلياً وعميقاً، وهو ما فعله أنشتاين، وهو ما قاده إلى ما خلص إليه من استنتاجات استثنائية في أهميتها.

الآثار على مفهوم الزمان: القسم الأول

يمكن بقليل من الجهد وباستعمال خاصية ثبات سرعة الضوء، أن نبين أن الصورة المألوفة في أذهاننا عن مفهوم الزمان صورة خاطئة. تخيل أن حرباً تقوم بين بلدين وأن رئيسيهما قد جلسا، الواحد قبالة الآخر، على طرفَي طاولة مفاوضات طويلة، وتوصّلا بعد عناء إلى الاتفاق على وقف إطلاق النار بين بلديهما. إلاّ أن كلاً من رئيسَي الدولتين يرفض أن يكون هو البادئ بالتوقيع على الاتفاقية. فيتدخل الأمين العام للأمم المتحدة ويقدم حلاً ذكياً للخلاف الناشب إذ يأتي بمصباح كهربائي يضعه في منتصف الطاولة وعلى مسافة واحدة من كلٍ من الرئيسين ويخبرهما أن الضوء الذي سيصدر عن المصباح عند تشغيله سيصلهما في الوقت ذاته، وأن على كلّ منهما أن يوقّع على نسخة

الاتفاقية التي بين يديه بمجرد رؤيته الضوء. يقبل الرئيسان بهذا الاقتراح ويتم التوقيع على نسختي الاتفاقية على نحو يرضي الطرفين.

ويبدو أن اقتراح الأمين العام هذا قد أعجبه، فيقرر اعتماده لحل نزاع قائم بين بلدين متحاربين آخرين توصّلا إلى اتفاقية سلام فيما بينهما، إلاّ أن رئيسَي الدولتين كانا في هذه المرة على طرفَي طاولة مفاوضات طويلة في قطار يتحرك بسرعة ثابتة، فكان اتجاه رئيس إحدى الدولتين (الدولة الأولى) باتجاه حركة القطار، وكان اتجاه رئيس الدولة الثانية بعكس هذه الاتجاه. لم يُعر الأمين العام للأمم المتحدة هذا الوضع أي أهمية لعلمه أن قوانين الفيزياء تأخذ الشكل ذاته بغض النظر عن سرعة الجملة ما دامت هذه السرعة ثابتة. وهكذا تجري مراسيم التوقيع على اتفاقية السلام، تبعاً للضوء الصادر عن المصباح الذي وضعه الأمين العام في منتصف طاولة المفاوضات، وعلى مسافة واحدة من الرئيسين، ويعلن المجتمعون انتهاء حالة الحرب ويحتفلون بذلك.

إلاّ أن الأخبار سرعان ما تصلهم بأن الحرب قد اندلعت من جديد بين البلدين حيث كان المواطنون فيهما يتابعون مراسم التوقيع من على الرصيف من خارج القطار المتحرك. وأحس كل من في القطار بالإحباط عندما عُلم أن سبب اندلاع الحرب هو ادعاء شعب الدولة الأولى بأنه قد غُرّر بهم وأن رئيسهم كان البادئ بتوقيع الاتفاقية، فوقّعها **قبل** أن يوقّعها رئيس الدولة الثانية. إلاّ أن كل من كان في القطار من كلا الجانبين أقرّ بأن الاتفاقية قد وقّعها كلا الرئيسين في وقت واحد، فكيف تأتّى للمراقبين الذين كانوا يتابعون الحدث من خارج القطار أن يدّعوا خلاف ذلك؟

لنتمعّن بدقة في وجهة النظر التي يعرضها مراقب على الرصيف. كان المصباح مطفأً على طاولة المفاوضات؛ وعندما أُشعِل في لحظة معينة أرسل حزمتين ضوئيتين باتجاه رئيسَي الدولتين الجالسين على طرفي الطاولة. يرى هذا المراقب، من موقعه، أن رئيس الدولة الأولى يتقدم باتجاه الضوء وأن رئيس الدولة الثانية يبتعد عنه، مما يعني بالنسبة إليه أن الحزمة الضوئية تقطع حتى تصل إلى رئيس الدولة الأولى مسافةً أقل من تلك التي تقطعها حتى تصل إلى رئيس الدولة الثانية. (من الضروري أن نؤكد أننا نتحدث هنا عن **المسافة** التي يقطعها الضوء حتى يصل إلى كل من الرئيسين ولا نتحدث

عن **سرعة** هذا الضوء، لأن هذه السرعة تبقى ثابتة بغض النظر عن سرعة المنبع الضوئي أو سرعة المراقب). لذلك وصل الضوء، من وجهة نظر هذا المراقب، إلى رئيس الدولة الأولى أولاً، ومن هنا كان شعور مواطني هذه الدولة أنه قد غُرّر بهم إذ كان رئيسهم هو البادئ بالتوقيع.

لم يصدق الأمين العام ولا رئيسا الدولتين أو معاونوهم ما أذاعته شبكة الـ CNN نقلاً عن شهود عيان (مراقبين) كانوا على الرصيف، من أن رئيس الدولة الأولى وقع الاتفاقية قبل رئيس الدولة الثانية. كان المصباح في منتصف الطاولة وعلى مسافة واحدة من الرئيسين مما يعني أن الضوء الصادر عنه يجتاز **المسافة نفسها** حتى يصل إليهما؛ وسرعة الضوء ثابتة وواحدة في كلا الاتجاهين. لذلك فإن كل من في القطار يعتقد، وقد لاحظوا ذلك فعلاً، أن الضوء قد وصل إلى الرئيسين في وقت واحد.

ونتساءل: من كان على صواب، أهُمُ الذين في القطار أم الذين خارجه على الرصيف؟ إن ملاحظات **كلا** الفريقين واستنتاجاتهما صائبة كلها، لذلك نقول أن الطرفين كانا على صواب، وأن وجهتَي نظرهما متكافئتان بالنسبة للحقيقة الفيزيائية، كما كان حال رائدَي الفضاء جورج وجين. إلاّ أن ما يجب التأكيد عليه هنا هو أن وجهتَي النظر هاتين تبدوان متعارضتين. وتضعان مستقبل العلاقات بين البلدين على المحك، مما يتطلب إيجاد مخرج سياسي للأزمة. فهل **تزامن** توقيع الرئيسين على الاتفاقية حقاً، أي هل حصل ذلك في الوقت ذاته؟ يدفعنا كل ما ذكرناه آنفاً إلى القول بأن ذلك **قد حدث فعلاً بالنسبة لمن كانوا في القطار في حين أنه لم يحدث بالنسبة لمن كانوا خارجه على الرصيف**، وهو ما يعني أن ما يبدو متزامناً، أو متواقتاً، لمجموعة من المراقبين، قد لا يبدو كذلك لمراقبين آخرين إذا كانت المجموعتان في حركة نسبية فيما بينهما.

تعد هذه النتيجة المروّعة واحدة من أعمق ما تم التوصل إليه عن طبيعة الحقيقة. وإذا ما قُدّر لك أن تنسى ما قرأته في هذا الفصل، بعد انتهائك من قراءة الكتاب بمدة طويلة، ولم تتذكر منه سوى محاولة الأمين العام الفاشلة لمصالحة ذينك البلدين المتحاربين، فإنك ستكون قد احتفظتَ على الأقل بجوهر أو بكنه اكتشاف أنشتاين. تتأتى هذه الصفة الغريبة وغير المتوقعة للزمان كما ترويها الحكاية، بصورة مباشرة ودونما

حاجة إلى اللجوء إلى رياضيات متقدمة أو إلى محاكمات منطقية معقدة، من خاصية ثبات سرعة الضوء. لاحظ أنه إن لم تكن هذه السرعة ثابتة، ونظرنا إليها كما نظرنا إلى سرعة الكرة والانهيار الثلجي، فإن المراقب على الرصيف كان سيصل إلى النتيجة ذاتها التي توصل إليها ركاب القطار. وهو، مع احتفاظه بحقه بالظن أن الفوتونات المتجهة نحو رئيس الدولة الأولى تكون قد قطعت عند وصولها إليه مسافة أقصر من تلك التي قطعتها الفوتونات المتجهة نحو رئيس الدولة الثانية، سيخلص إلى القول بأن الضوء المتجه إلى رئيس الدولة الثانية يسير بسرعة أكبر من سرعة الضوء المتجه إلى رئيس الدولة الأولى، لأن القطار المتجه إلى الأمام يزوده بدفقة إضافية على سرعته. وعلى مثل هذا النحو فإن هذا المراقب سيرى أن الضوء المتجه إلى رئيس الدولة الأولى سيكون أبطأ لأن القطار سيسحبه معه في حركته. ومع أخذ هذين الانطباعين الخاطئين بالاعتبار فإن هذا المراقب سيرى أن الضوء يصل إلى الرئيسين في الوقت ذاته. لكن الأمور لا تسير على مثل هذا النحو، حيث لا يمكن تسريع حركة الضوء أو إبطاؤها، ولا يمكن دفعه إلى الأمام لزيادة سرعته، أو جرّه إلى الخلف لإنقاصها. من هنا كان قول المراقب على الرصيف أن الضوء قد وصل إلى رئيس الدولة الأولى أولاً قولاً صحيحاً.

إن ثبات سرعة الضوء يقتضي منا أن نُسقط من أذهاننا ما رسخ فيها من زمن بعيد، بأن التواقت أو التزامن هو مفهوم عالمي شامل يتفق عليه الجميع وأياً كانت حالة حركاتهم. إن الساعة الكونية التخيّلية التي تتكّ بأمانة تكّاتها النظامية في أي مكان في الكون، سواء على سطح الأرض أو المريخ أو المشتري أو حتى على المجرات البعيدة، هي ساعة غير واقعية، والأمر هو بخلاف ذلك إذ أن المراقبين الذين يتحرك بعضهم بالنسبة لبعض لن يتفقوا على ماهية الحوادث المتواقتة، التي تحدث في الوقت ذاته. وهذه الخاصية، على غرابتها، حقيقة ومميزة للكون الذي نعيش فيه، ويرجع سبب عدم تقبّلنا لها وإلفتنا إياها إلى ضآلة الآثار الناجمة عنها، عندما تكون سرعات المراقبين من مرتبة السرعة التي اعتدنا عليها في حياتنا اليومية. لنتأمل فيما يلي: إذا كان طول طاولة المفاوضات في القطار 100 قدم، وكانت سرعته 10 أميال في الساعة، فإن المراقب على الرصيف "سيرى" الضوء وقد وصل إلى رئيس الدولة الأولى قبل وصوله إلى رئيس

الدولة الثانية بجزء من مليون مليار جزء من الثانية. وهذا المقدار حقيقي وموجود إلاّ أن تمييزه يستعصي على قدراتنا البشرية. أما لو كانت سرعة القطار 600 مليون ميل في الساعة، فإن هذا المراقب سيرى أن زمن وصول الضوء إلى رئيس الدولة الثانية أكبر بعشرين ضعفاً من زمن وصوله إلى رئيس الدولة الأولى. إن الآثار الهائلة لنظرية النسبية الخاصة تبدو أكثر وضوحاً وتميّزاً كلما ازدادت السرعة.

الآثار على مفهوم الزمان: القسم الثاني

يصعب إعطاء تعريف مجرد للزمان، إذ غالباً ما ينتهي ذلك بذكر هذه "*الكلمة*" ذاتها، أو باستخدام عبارات لغوية ملتوية لتفادي ذلك. لن نلجأ إلى هذه الطريقة الملتوية، وسنعرّف الزمان، تعريفاً واقعياً، بأنه " ما تقيسه الساعات". إلاّ أننا بذلك نكون قد تفادينا تعريف كلمة "*الزمان*" وصرنا أمام ضرورة تعريف كلمة "*الساعة*". وسنعطيها هنا تعريفاً فضفاضاً فنقول إنها جهاز "*يمر بدورات حركة منتظمة تماماً*". ويقاس الزمان بعدد الدورات التي تنقضي بين حادثتين. تتوافق ساعة اليد مع هذا التعريف، فعقاربها تتحرك في دورات منتظمة، ويكفي لقياس الزمن المنصرم بين حادثتين معرفةُ عدد الدورات، أو أجزائها، التي تتمها عقاربها خلال ذلك.

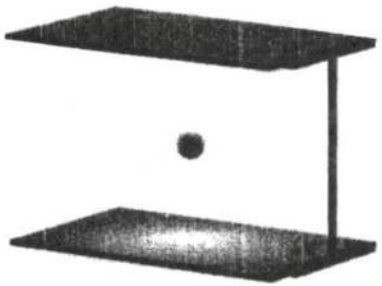
تتضمن عبارة "*دورات حركة منتظمة تماماً*" مفهوماً للزمن، لأن كلمة "*منتظم*" فيها تعني قضاء أزمنة متساوية لانقضاء كل دورة. ويمكن عملياً تجاوز ذلك بصنع ساعات من عناصر ميكانيكية بسيطة نتوقع منها أن تقوم بحركات دورية متكررة لا يطرأ عليها أي تحوّل ما بين دورة وأخرى. وهكذا يمكن اعتبار ساعات سلفنا القديمة ذات النواس الذي يتأرجح جيئة وذهاباً، وكذلك الساعات الذرية التي تعتمد على تحولات ذرية متكررة، مثالاً على هذه الساعات.

أما ما نسعى إلى فهمه فهو معرفة كيفية تأثير الحركة على مرور الزمان. ولما كنا عرّفنا الزمان بصورة عملية بدلالة الساعات، لذلك يصبح تساؤلنا معنياً بكيفية تأثير الحركة على "*تكّة*" الساعات. ومن الأهمية بمكان أن نوضح، قبل الدخول بأية تفاصيل، أن مناقشتنا لن تتعرض إلى كيفية استجابة العناصر الميكانيكية للساعة لما قد تسببه حركة

متخبطة من اهتزاز أو احتكاك، إذ سنقصر مناقشتنا على أكثر الحركات بساطة وانتظاماً وهي حركة ذات سرعة مطلقة الثبات لا تتعرض لأي اهتزاز أو احتكاك. وسينصب اهتمامنا على مناقشة السؤال العام الكوني عن **تأثير الحركة على مرور الزمان**، ومن ثم على تأثيرها على ثبات أي ساعة **وكلّ** الساعات، أيّاً كان مصمّمها أو صانعها أو مادة صنعها.

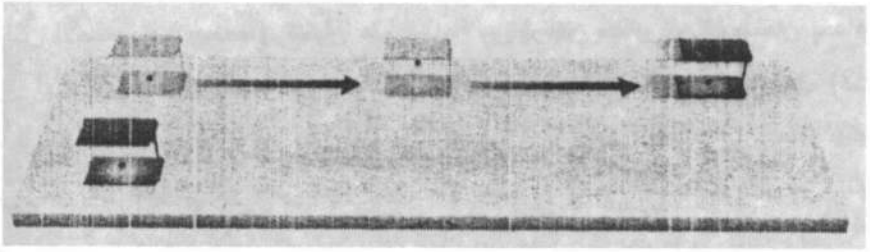
وسوف نعتبر مفهوم ما يعرف "*بالساعة الضوئية*" وهي الساعة الأبسط في مبدئها (ولكن الأصعب في صنعها). تتكون هذه الساعة من مرآتين صغيرتين تتوضّعان إحداهما فوق الأخرى ويتحرك بينهما فوتون ضوئي وحيد جيئة وذهاباً كما يبدو في الشكل (2-1). فإذا كانت المسافة بين المرآتين 6 إنشات تقريباً، فإن الفوتون يحتاج في رحلته بينهما إلى زمن يقدّر بحوالي جزء من مليار جزء من الثانية. تتكّ هذه الساعة في كل مرة ينهي فيها الفوتون رحلته هذه بين المرآتين، أي أنها ستتكّ مليار تكّة بعد مرور ثانية واحدة.

يمكن استعمال هذه الساعة الضوئية ساعة توقيت لقياس الزمن المنصرم بين حادثتين، ويكفي لذلك أن نعد عدد تكّات الساعة خلال هذه الفترة الزمنية ثم نأخذ جداءه بزمن التكّة الواحدة. فلو كنا في مضمار سباق للجياد وبلغ عدد الرحلات التي قام بها الفوتون فيما بين بداية السباق ونهايته 55 مليار رحلة، خلصنا إلى القول أن السباق قد استغرق 55 ثانية.



الشكل 2-1: *تتألف الساعة الضوئية من مرآتين متوازيتين ينتقل بينهما فوتون ضوئي واحد. تتكّ الساعة كلما أتمّ الفوتون رحلة كاملة بين المرآتين.*

يرجع سبب استخدام الساعة الضوئية في مناقشتنا إلى بساطتها الميكانيكية وبعدها عن كل التفاصيل التقنية غير الأساسية، فهي بذلك الوسيلة الأمثل لتفهّم كيفية تأثير الحركة على مرور الزمان. تخيّل لذلك أنك تراقب مرور الزمان عبر ساعة ضوئية موضوعة على منضدة بقربك؛ وفجأة ترى ساعة ضوئية ثانية تنزلق على هذه المنضدة متحركة بسرعة، كما في الشكل (2-2)، فتتساءل هل ستتكّ هذه الساعة الضوئية المتحركة بمعدل تكّات الساعة الضوئية "الساكنة" نفسه؟



الشكل 2-2: تبدو في مقدمة الصورة ساعة ضوئية ساكنة، في حين تنزلق وراءها ساعة ضوئية متحركة بسرعة ثابتة.

لنتفحص، للإجابة على هذا التساؤل، الطريق الذي سنرى الفوتون يسلكه في الساعة المتحركة على الشكل (2-2) لتحقيق تكّة واحدة. يبدأ الفوتون رحلته من المرآة السفلى متجهاً نحو المرآة العليا. لكن، لمّا كنا نرى هذه الساعة تتحرك نحو اليمين، فإن الفوتون سيسلك طريقاً كالذي يبدو على الشكل (2-3)، إذ لو لم يفعل ذلك فإنه لن يلتقي بالمرآة العليا بل سيتابع طريقه في الجو خارج الساعة الضوئية.



الشكل 2- 3: *يسلك الفوتون في الساعة المتحركة، من وجهة نظرنا، طريقاً مائلاً.*

إلاّ أننا نعلم يقيناً أنه سيلاقي هذه المرآة في الساعة المنزلقة، التي ترى نفسها (من وجهة نظرها الخاصة) ساكنة، في حين أن كل ما عداها يتحرك. لذلك فإن الطريق التي

رسمناها لحركة الفوتون صحيحة. وعندما يصل الفوتون إلى المرآة العليا يصدمها ويرتد عنها، وسيسلك أيضاً طريقاً مائلاً في عودته نحو المرآة السفلى، محدثاً تكّة عند وصوله إليها. تكمن الفكرة الأساسية والبسيطة في أن الطريق المائل الذي نرى نحن أن الفوتون يسلكه في الساعة المتحركة **أطول** من الطريق الشاقولي الذي يسلكه الفوتون في حركته صعوداً وهبوطاً في الساعة الساكنة، إذ أنه في الساعة المتحركة، بالإضافة إلى حركته هذه، يتحرك من وجهة نظرنا نحو اليمين أيضاً. وعدا ذلك فإن ثبات سرعة الضوء ينبئنا أن فوتون الساعة المتحركة سيتحرك بالسرعة ذاتها التي يتحرك بها فوتون الساعة الساكنة. لكن لمّا كان عليه أن يجتاز مسافة أطول لإحداث تكّة واحدة، فإن تكّات الساعة المتحركة ستكون **أقل تواتراً**. ترينا هذه المناقشة البسيطة أن الساعة الضوئية المتحركة ستتك، من وجهة نظرنا، بصورة أبطأ من الساعة الضوئية الساكنة. ولما كان عدد التكّات يعبر، كما سبق ورأينا، عن مقدار الزمن المنصرم، فإن مرور هذا الزمن يتباطأ في الساعة المتحركة.

ونتساءل إن كانت هذه النتيجة تعكس خاصية للساعة الضوئية فقط أم أنها تصح أيضاً في الساعات القديمة ذات النواس أو في ساعات الرولكس الدقيقة، أو بتعبير آخر هل سيتباطأ الزمان المقاس بهذه الساعات عند حركتها أيضاً؟ يجيب مبدأ النسبية عن ذلك بالإيجاب، بصوت عالٍ. لنتخيل ساعة رولكس وقد علّقت فوق كل واحدة من ساعتَينا الضوئيتين، ولنُعد إجراء التجربة السابقة. ستعطي الساعة الضوئية الساكنة وساعة الرولكس المعلّقة بها قيماً متطابقة لقياس الزمن، حيث يوافق كلّ مليار تكّة في الساعة الضوئية مرورُ ثانية واحدة في ساعة الرولكس. لكن ماذا عن الساعة الضوئية المتحركة وساعة الرولكس المعلّقة بها؟ وهل سيتباطأ معدل التكّ في ساعة الرولكس هذه بحيث تظل متواقتة مع ساعتها الضوئية المتحركة؟ وللتحقق من ذلك، تخيّل أن سبب تحرّك المجموعة المؤلفة من الساعة الضوئية ومن ساعة الرولكس المعلقة بها هو تثبيتها على أرضية مقصورة في قطار يتحرك بسرعة ثابتة على قضبان ملساء لسكة حديدية مستقيمة. ينبئنا مبدأ النسبية ألاّ سبيل لمراقب في المقصورة لاكتشاف أية آثار ناجمة عن حركة القطار. فإذا لم تبق ساعة الرولكس متواقتة مع الساعة الضوئية المرتبطة بها، فإن

هذا المراقب سيلاحظ تأثيراً لحركة القطار، وهو ما يتناقض ومبدأ النسبية؛ لذلك **يجب** أن تبقى الساعة الضوئية المتحركة وساعة الرولكس المرتبطة بها **متوافقتين** وتعطيان قيماً متساوية لقياس الأزمنة، أي أن ساعة الرولكس المتحركة **يجب** أن تتباطأ بالمعدل ذاته الذي تتباطأ به الساعة الضوئية. وهكذا، وبقطع النظر عن نوع الساعة وعن صانعها ومادة صنعها، فإن الساعات المتحركة بعضها بالنسبة لبعض تسجل مرور الزمن بمعدلات مختلفة.

تدل خاصية الساعة الضوئية السابقة هذه على أن الاختلاف الدقيق في قياس الزمن بين الساعة المتحركة والساعة الساكنة يعتمد على طول المسافة التي يتحتم على فوتون الساعة المتحركة اجتيازها في رحلته جيئة وذهاباً بين المرآتين والموافقة لتكّة واحدة. تعتمد هذه المسافة بدورها على سرعة تحرك الساعة المنزلقة من وجهة نظر مراقب ساكن، إذ كلما ازدادت هذه السرعة تحتم على الفوتون اجتياز مسافة أطول نحو اليمين، وهو ما يعني أن معدل التكّ في الساعة المنزلقة، يتباطأ، بالمقارنة مع مثيله في الساعة الساكنة، أكثر فأكثر مع ازدياد سرعتها[3].

ولأخذ فكرة عن المقاييس والأبعاد التي تحدثنا عنها، نلاحظ أن الفوتون يتم رحلته الموافقة لتكّة واحدة خلال زمن هو تقريباً جزء من مليار جزء من الثانية. فإذا أردنا من الساعة المتحركة أن تقطع مسافة ملحوظة خلال هذا الزمن، كان عليها أن تتحرك بسرعة كبيرة جداً ومن مرتبة سرعة الضوء، إذ لو كانت سرعتها من مرتبة السرعات المألوفة في حياتنا اليومية، ولتكن 10 أميال في الساعة مثلاً، فإن المسافة التي ستقطعها إلى اليمين خلال تكّة واحدة صغيرة جداً وتبلغ فقط حوالي 15 جزءاً من مليار جزء من القدم، ولن يكون هناك أي تأثير ملحوظ لهذه المسافة الإضافية الضئيلة، التي يتحتم على الفوتون اجتيازها، على معدل تكّ الساعة المتحركة. يصح هذا القول، تبعاً لمبدأ النسبية، على كل الساعات، أي على مفهوم الزمن نفسه، وهو السبب في عدم شعورنا في حياتنا اليومية بأية آثار تدل على تغير مرور الزمن، عندما يتحرك بعضنا بالنسبة لبعض بسرعات بطيئة جداً بالمقارنة مع سرعة الضوء. فهذه الآثار موجودة، إلاّ أنها لا تُلاحظ لضآلتها. أما لو استطعنا التحكم بسرعة انزلاق الساعة الضوئية، وحرّكناها بسرعة هي

ثلاثة أرباع سرعة الضوء، فإن المعادلات الرياضيّاتية لنظرية النسبية الخاصة تدل على أن الساعة المتحركة ستتكّ، كما تبدو لمراقب ساكن، بمعدل هو ثلثا معدل تكّ ساعته الساكنة، وهو تأثير كبير وملحوظ.

الحياة التي تفرّ منّا

يقتضي ثباتُ سرعة الضوء، كما رأينا، أن تتكّ الساعات الضوئية المتحركة بوجه أبطأ من الساعات الضوئية الساكنة. ويقتضي مبدأ النسبية أن يصح ذلك أيضاً على كل أنواع الساعات، وليس الضوئية منها فقط، مما يعني صحته كذلك على الزمان نفسه. فالمراقب المتحرك يرى الوقت يمر بوجه أبطأ مما يراه المراقب الساكن. أفلا يعني ذلك، إذا كانت المناقشة البسيطة التي أوصلتنا إلى هذه النتيجة صحيحة، أننا نعيش حياة أطول إذا ما تحركنا بدلاً من البقاء ساكنين؟ إن مرور الوقت مروراً أبطأ بالنسبة لمراقب متحرك مما هو بالنسبة لمراقب ساكن يؤدي، في نهاية الأمر، إلى ظهور هذا التباين ليس فقط في الزمن الموافق لما تقيسه ساعاتنا، بل كذلك في الزمن كما تقيسه نبضات القلب وتدل عليه شيخوخة أعضاء الجسد، وهو ما يحدث فعلاً في الطبيعة إذ أثبتته تجارب مباشرة كثيرة، لا تتعلق بمتوسط العمر المتوقع للإنسان، بل تتعلق ببعض جسيمات عالمنا المجهري وهي الميونات. ويرتبط بذلك أمر شديد الأهمية، ندعه الآن قيد الكتمان، يمنعنا من الادعاء باكتشاف طريقة جديدة لإطالة الشباب.

يتفكك الميون الساكن في المختبر، في عملية مماثلة لظاهرة التحلّل الإشعاعي، وخلال زمن وسطي مقداره جزآن من مليون جزء من الثانية. وهذا التفكك حقيقة واقعة تدعمها إثباتات تجريبية كثيرة، ويمكن تصوره وكأن الميون واقع تحت تهديد بندقية موجهة إليه يُطلَق زنادها عندما يصبح عمره جزئين من مليون جزء من الثانية، فيتفجر مطلقاً إلكترونات ونترينوهات. أما إذا لم يكن الميون ساكناً في المختبر بل كان يتحرك فيه بسبب وجوده في مسرّع جسيمات قادر على تزويده بسرعة كبيرة جداً تقرب من سرعة الضوء، فإن متوسط عمره المتوقع، كما يعيشه مراقب ساكن في المختبر، سيزداد زيادة كبيرة، وهو ما يحدث **فعلاً**. فإذا ما بلغت سرعة الميون 667 مليون ميل في

الساعة (أي ما يعادل 99.5% من سرعة الضوء)، فإن عمره، أو زمن حياته، سيزداد بمقدار عشرة أضعاف. يسهل تفسير ذلك بدلالة نظرية النسبية الخاصة. *ساعة اليد* التي يحملها الميون المتحرك تتك تكّات أبطأ بكثير مما تفعله ساعة المراقب في المختبر؛ لذلك، وعندما يحين وقت إطلاق الزناد وتفجير الميون كما تدل عليه ساعة المختبر، فإن برهة طويلة ستنقضي قبل أن يحين هذا الوقت على ساعة الميون. يُعد ذلك برهاناً مباشراً وقوياً على تأثير الحركة على مرور الزمن. ولو استطاع الناسُ التحركَ بسرعات قريبة من سرعة الميون المتحرك السابق الذكر، فإن عمرهم، أو زمن حياتهم، سيزيد أيضاً بالنسبة ذاتها، وسيعيشون 700 سنة بدلاً من 70 سنة[4].

لِنُمط اللثام الآن عن الأمر الهام الذي أبقيناه طي الكتمان. يرجع ما يراه المراقبون في المختبر، من أن الميونات المتحركة بسرعة تعيش مدة أطول من مثيلاتها الساكنة، إلى أن **الوقت يمر عندها مروراً بطيئاً**؛ ولا يقتصر تباطؤ الوقت هذا على ساعاتها التي تحملها، بل ينطبق أيضاً على كل ما تقوم به من أنشطة. فلو كان الميون الساكن مثلاً قادراً على قراءة 100 كتاب خلال حياته القصيرة، فإن مثيله المتحرك سيكون قادراً مثله على قراءة 100 كتاب فقط، مع أن حياته تبدو أطول، لأن معدل قراءته سيتباطأ، مثل أي أمر آخر في حياته. ويرى المراقبون في المختبر أن الأمر يبدو وكأن الميون المتحرك يعيش حياته بحركة بطيئة، فهو سيعيش حياة أطول من الميون الساكن، إلاّ أن *"كمية الحياة"* التي سيعيشها ستكون هي ذاتها التي يعيشها الميون الساكن. يصح هذا القول أيضاً على الأشخاص الذين يتحركون بسرعة كبيرة وبعمر (أو بمدة حياة) متوقع كبير يقدّر بمئات السنين. وهم *"من وجهة نظرهم"*، سيعيشون حياة طبيعية في حين نراهم نحن يعيشون حياة بطيئة جداً تقتضي، لإتمامها، مقداراً كبيراً من **زمننا**.

لكن ! من الذي يتحرك؟

تعد نسبية الحركة مفتاحاً لفهم نظرية أنشتاين، لكنها تعد أيضاً مصدراًمحتملاً للالتباس والخلط بين الأشياء. وربما تكونَ لاحظتَ أن بوسعنا بتبديل المنظورَين، أو بعكس وجهتَي النظر، أن نعكس الأدوار ما بين الميونات *"المتحركة"* ذات الساعات

البطيئة والآخرى *"الساكنة"*. وكما كان الحال مع جورج وجين، حيث كان بوسع أيّ منهما الادعاء بأنه هو الساكن وأن الآخر هو المتحرك، فإن الميونات التي وصفناها بالمتحركة لها الحق بالادعاء من منظورها، أو من وجهة نظرها، بأنها هي *"الساكنة"* وأن الميونات التي اعتبرناها *"ساكنة"* تتحرك بالاتجاه المعاكس. كما يصح تطبيق الحجج والمناقشات، التي سبق وقدمناها على هذا المنظور أيضاً، مما يؤدي إلى نتائج تبدو متعاكسة وهي أن الساعات التي تحملها الميونات التي اعتبرناها ساكنة تسير على نحو أبطأ بالمقارنة مع الساعات التي تحملها الميونات التي اعتبرناها متحركة.

لنتذكر أننا قابلنا وضعاً مشابهاً لهذا عند حديثنا عن مراسم حفل التوقيع على إنهاء حالة الحرب وما كاد أن يسببه المصباح الضوئي من تجدّد هذه الحالة، وذلك لما قد تؤدي إليه وجهات نظر مختلفة من نتائج قد تبدو متناقضة. وقد أدى اعتمادنا النسبية الخاصة في تحليل مجريات ما جرى إلى أن نبعد عن أذهاننا الفكرة الراسخة القائلة بأن جميع المراقبين، وأياً كانت حالة حركتهم، يتفقون على مجموعة الحوادث المتواقتة، أي التي تحدث في وقت واحد. أما الآن فيبدو التعارض أسوأ، إذ كيف يمكن أن يدّعي كل واحد من مراقبَين اثنين أن ساعة الآخر تسير بصورة أبطأ من ساعته؟ وقد يبدو الأمر أكثر مأساوية، من خلال منظورَي (أو من وجهتَي نظر) مجموعتَي الميون، المتباينتَين فيما بينهما والصالحتَين كليهما، حيث نصل ظاهرياً إلى القول بأن كل واحدة منهما ستدّعي أن الأخرى ستُقتل قبلها. نعلم أن عالمنا يزخر بالخصائص الغريبة وغير المتوقعة إلاّ أننا نأمل ألاّ نصل إلى عالم ينتفي فيه منطق العقل. فما الذي يجري إذن؟

وكما في سائر المفارقات الظاهرية التي تبدو لنا عن طريق نظرية النسبية الخاصة، وما يؤدي إليه دوماً تفحّصنا الدقيق لها من أفكار جديدة عن كيفية عمل الكون، دعنا نبتعد عن عالم الميونات التي خلعنا عليها صفات بشرية، ولنعد إلى عالم جورج وجين، ولنزوّد كلاً منهما، بالإضافة إلى مصباحه ذي الوميض، بساعة رقمية كبيرة مضيئة مثبتة بإحكام على بذته الفضائية. سيرى جورج نفسه ساكناً في حين تبدو له جين تتحرك وهي تقترب منه من بعيد بمصباحها ذي الوميض الأخضر وساعتها الرقمية الكبيرة. وحين تمر بجواره وتجتازه مبتعدة عنه لتكمل مسيرها في الفضاء الخاوي فإنه سيكون قد لاحظ أن

ساعتها تسير بسرعة أبطأ من سرعة ساعته (و أن معدل تباطئها يعتمد على سرعتها بالنسبة إليه)؛ كما سيلاحظ، بالإضافة إلى ذلك، أن كل ما تقوم به من حركات، كحركة يدها حين تُلوّح له بها، أو غمزة عينها له، يبدو له بطيئاً بالمقارنة مع ما هو مألوف. أما جين فإنها سترى بمنظورها، ومن وجهة نظرها، أن كل ما لاحظه جورج من ملاحظات ينطبق عليه.

وقد تبدو في ذلك مفارقة فيها تناقض داخلي، إلاّ أن الأمر ليس كذلك. دعنا نسلط الضوء على تجربة دقيقة تبدو فيه ساعتا جورج وجين على الرقم 12:00 عندما يتجاوز واحدهما الآخر. ومع ابتعادهما فإن كلاً منهما سيدّعي أن ساعة الآخر تسير بصورة أبطأ. وكان عليهما، لمواجهة هذا التعارض أن يعودا ويلتقيا ثانية ليقارنا الزمن المنصرم كما سجّلته كلٌ من ساعتيهما. لكن كيف يتأتى لهما ذلك؟ إن بذة جورج مزودة بمحرك نفاث يمكنه، من وجهة نظره، أن يستخدمه ليلحق بجين. لكنه لو فعل ذلك لقضى على التناظر بين منظورَيهما (والذي يُعد سبب التعارض الظاهري بينهما)، إذ يكون قد خضع لحركة **متسارعة** تسببها قوة خارجية. وعندما يلتقيان على هذا النحو فإن زمناً أقل يكون قد انقضى على ساعة جورج، لأن بوسعه الآن أن يؤكد أنه كان في حالة حركة لإحساسه بها بسبب تسارعه. ولا يمكننا أن نرى منظورَي جورج وجين على قدم المساواة لأن جورج باستخدامه المحرك النفاث يكون قد تخلّى عن ادعائه بأنه المراقب الساكن.

و لو تمكّن جورج بذلك من اللحاق بجين، فإن فرق الزمن الذي يبدو على ساعتيهما يتوقف على سرعتهما النسبية وعلى تفاصيل كيفية استخدام جورج محركه النفاث؛ وكما أصبح معروفاً لدينا، فإن فرق الزمن بينهما سوف يكون ضئيلاً إن كانت سرعتاهما صغيرتين. أما لو كانت هذه السرعات قريبة من سرعة الضوء فإن فرق الزمن هذا قد يبلغ الدقائق والأيام والسنين حتى والقرون. لنعرض مثالاً محدوداً. تخيّل أن السرعة النسبية لجورج وجين كانت حين لقائهما، وقبل أن يبتعد أحدهما عن الآخر، مساوية 99.5% من سرعة الضوء. دعنا أيضاً نَقُل أن جورج انتظر ثلاث سنوات، على ساعته، قبل أن يطلق محركه النفاث ويعكس اتجاه حركته وينطلق للّحاق بجين بالسرعة ذاتها وهي 99.5% من سرعة الضوء. عندما يلحق بها يكون قد انقضى ست سنوات على

ساعته، إذ يلزمه ثلاث سنوات للّحاق بها. وتظهر الاعتبارات الرياضياتية للنسبية الخاصة أن 60 سنة سوف تكون قد انصرمت على ساعة جين. وليس في هذا القول أي حيلة رياضيّاتية. لذلك فإن على جين أن تعود بذاكرتها فعلاً ستين سنة إلى الوراء لتستعيد ذكرى لقائها الأول بجورج؛ أما هو فيكون قد أمضى ست سنوات، من وجهة نظره، على ذلك اللقاء. لقد جعلت حركةُ جورج منه مسافراً عبر الزمن، وإن تمثّل ذلك، بمعنى دقيق، بقولنا إن جورج قد سافر نحو مستقبل جين.

إن جمع الساعتين معاً لإجراء مقارنة مباشرة بينهما قد يبدو أمراً غير ضروري، إلاّ أنه، في الحقيقة، في لب الموضوع وجوهره. تخيّل جورج وجين وقد عمدا إلى مقارنة ساعتيهما عبر اتصال بهاتف خَلَوي بينهما بدلاً من جمع ساعتيهما لمقارنتهما. سوف يجابهنا، إن كان مثل هذا الاتصال الهاتفي آنياً، تناقض ذاتي لا يمكن التغلب عليه يتمثل فيما يلي: إن ساعة جورج تسير ببطء، من وجهة نظر جين، لذلك فهو سيخبرها بانقضاء زمن أقل؛ كما أن ساعة جين تسير ببطء، من وجهة نظر جورج، لذلك فهي ستخبره بانقضاء زمن أقل. ولا يمكن أن يكون كلاهما على حق، وتبدو المفارقة وكأن لا حلّ لها. يكمن المفتاح الحل في أن الاتصالات الخلوية كسواها من وسائل الاتصالات الأخرى، لا تنقل الإشارة آنياً: فالهواتف الخَلَوية تعمل بالأمواج الراديوية، وهي أمواج ضوئية، لذلك فإن الإشارات التي تحملها تنتقل بسرعة الضوء، مما يعني أن زمناً سينقضي قبل تلقّي الإشارة، وهذا التأخر الزمني هو ما يجعل وجهتي نظر جورج وجين متوافقتين الواحدة والأخرى.

لنرَ ذلك أولاً من وجهة نظر جورج. تخيّل أن جورج يرسل في هاتفه في كل ساعة وفور انقضائها العبارة التالية: *إنها الساعة الثانية عشرة، كلّ شيء على ما يرام*" .. ثم *إنها الساعة الواحدة بعد الظهر، كلّ شيء على ما يرام*". وهكذا .. لكن! لما كانت ساعة جين، من وجهة نظر جورج، تسير بصورة أبطأ من ساعته، فإنه سيظن للوهلة الأولى أن جين تستلم رسائله قبل بلوغ ساعتها الزمنَ الذي تدل عليه ساعته، ويخلص إلى القول بأنها ستوافقه على ما يراه من أن ساعتها هي الأبطأ. لكنه يعيد التفكير بالأمر ويناجي نفسه: *إن جين تبتعد عني لذلك فإن رسائلي إليها عبر الهاتف الخَلَوي ستقطع مسافات*

أطول فأطول قبل وصولها إليها، وقد يعوّض الزمن اللازم لقطع هذه المسافة الإضافية تباطؤ ساعتها" ؛ وإذ يرى أن هناك تأثيرين متنافسين، أحدهما تباطؤ ساعة جين بالنسبة إليه، وثانيهما الزمن الذي تستغرقه إشاراته للوصول إليها، فإنه يخلُص من أخذهما كليهما بالاعتبار إلى أن **الغَلَبة** هي لثاني التأثيرين، مما يوصله إلى استنتاج غير متوقع مؤدّاه أن جين ستتسلم إشاراته الدالة على بلوغ الساعة في ساعته **بعد** بلوغها في ساعتها. في الحقيقة، ولما كان جورج يعلم أن جين ضليعة في الفيزياء فإنها لا بد أن تأخذ بالاعتبار، فيما ستخلص إليه من نتيجة عن **ساعته**، مبنية على ما أرسله لها من إشارات عبر الهاتف الخَلَوي، الزمنَ الذي تستغرقه رحلة هذه الإشارات. ويبيّن حساب كمي دقيق أنه، مع أخذ هذا الزمن بالاعتبار، فإن تحليل جين لإشارات جورج سوف يقودها إلى نتيجة مؤدّاها أن ساعة جورج ستتكّ بصورة أبطأ من ساعتها.

يمكن لجين أن تعتمد هذا المنطق بتمامه، من وجهة نظرها، عندما تبعث برسائلها الخَلَوية إلى جورج في كل ساعة، وبعد انقضائها. وسيدفعها تباطؤ ساعته، من وجهة نظرها، إلى الظن أولاً بأنه سيستلم إشاراتها الساعيّة **قبل** إرسال إشاراته هو. لكنها ستدرك، عندما تفطن إلى ضرورة اجتياز إشاراتها مسافاتٍ أطول فأطول حتى تصل إلى جورج الذي يبتعد عنها، أنه سيستلم إشاراتها **بعد** إرسال إشاراته هو. وهي ستدرك أنه سيرى، بعد أخذه بالاعتبار زمن رحلة إشارات اتصالات جين الخلوية به، أن ساعتها تسير بصورة أبطأ من ساعته.

وستبقى وجهتا نظر جورج وجين متكافئتين، ما لم يخضع أحدهما لتسارع يسبّبه مؤثر خارجي. وسيدرك كلّ منهما أن من المنطقي جداً له أن يظن بأن ساعة الآخر تتباطأ في سيرها مع ما قد يوحي به ذلك من تناقض.

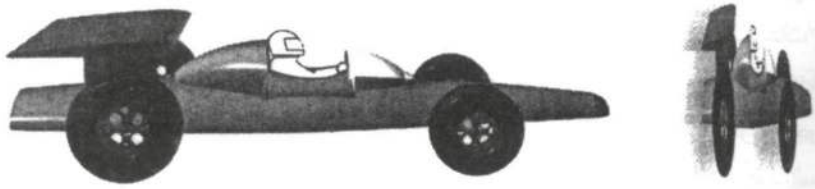
تأثير الحركة على المكان

بيّنت المناقشات السابقة أن راصداً ساكناً يرى الساعة المتحركة تتكّ بصورة أبطأ من ساعته، مما يعني أن للحركة تأثيراً على الزمان. إلاّ أن للحركة أيضاً تأثيراً مماثلاً على المكان. لنعد إلى سليم وخالد ومضمار السباق. كان سليم قد قاس طول سيارته،

عندما اشتراها من معرض السيارات، بشريط قياس. ويريد خالد أن يقيس هذا الطول والسيارة متحركة على المضمار، وهو لن يقدر على ذلك بصورة مباشرة، لذلك يلجأ إلى طريقة غير مباشرة، يستخدم فيها ساعته، ويحدد الفترة الزمنية ما بين مرور مقدمة السيارة ومرور مؤخرتها من أمامه، ويحسب طولها بأخذ جداء هذه الفترة بسرعة السيارة.

إن نظرتنا الجديدة لمفهوم الزمن تدفعنا إلى القول بأن سليماً يرى نفسه، من وجهة نظره، ساكناً، في حين يرى أخاه خالداً متحركاً، وبذلك فإن ساعته (ساعة خالد) تسير على نحو بطيء؛ ويستنتج سليم من ذلك أن طول السيارة، كما سيقيسه خالد، سيكون **أقصر** من الطول الذي قاسه هو بصورة مباشرة، لأن خالداً استخدم لقياس الفاصل الزمني ما بين مرور مقدمة السيارة ومرور مؤخرتها من أمامه ساعة تسير ببطء، أي أن قياسها للزمن يكون أقل، وبذلك يعطي قيمة أقل لطول السيارة.

يشعر خالد أن طول سيارة سليم، عندما تتحرك أمامه، أصغرُ من طولها مقيساً في حال سكونها. وليس شعوره هذا سوى إحساس عام يشعر به كل واحد يتطلع إلى جسم يتحرك أمامه، إذ يرى طوله وقد تقلّص باتجاه حركته. وتنبئنا معادلات النسبية الخاصة أنه إذا تحرك جسم ما بسرعة تبلغ 98% من سرعة الضوء فإن راصداً ساكناً سيراه أقصر من طوله الحقيقي في حالة السكون بـ 80% منه، ويوضح الشكل 2-4 هذه الظاهرة[5].



الشكل 2-4: *يقصر طول الجسم المتحرك باتجاه حركته*

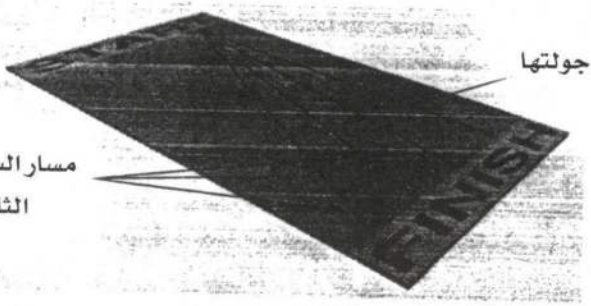
الحركة عبر الزمكان

أدى ثبات سرعة الضوء إلى أن نستبدل بنظرتنا التقليدية عن الزمان والمكان، ككيانَين جامدين وموضوعيين، مفهوماً جديداً يعتمدان فيه، على نحو وثيق، على الحركة النسبية بين شخصين يراقب أحدهما الآخر وهما المراقِب والمراقَب. ويمكننا أن ننهي مناقشتنا هذا الموضوع بتلخيص ما انتهينا إليه من أن الأجسام المتحركة تبدو بطيئة، كما يبدو طولها وقد تقلص. ولكن في الحقيقة تزودنا نظرية النسبية الخاصة بمنظور موحّد أكثر عمقاً، قادر على استيعاب هاتين الظاهرتين معاً، أي تباطؤ حركة المتحرك وتقلص طوله.

لنتخيّل، لتوضيح ذلك، وجود سيارة افتراضية قادرة على الانطلاق مباشرة فور تشغيل محركها بسرعة 100 ميل في الساعة، والمحافظة على هذه السرعة دون زيادة أو نقصان حتى لحظة إطفاء محركها وتوقفها. ولنتخيل أنه قد طُلب إلى سليم، المشهود له بالمهارة والخبرة في قيادة السيارات اختبار هذه السيارة في مضمار طويل وعريض يمتد على استقامة واحدة في وسط الصحراء. تبلغ المسافة بين نقطة الانطلاق ونقطة الوصول 10 أميال بحيث تقطعها السيارة في 6 دقائق.

لنتخيّل أيضاً أن خالداً كان يتابع حركة السيارة، عن طريق قياس الزمن الذي تستغرقه ما بين نقطتَي الانطلاق والوصول. وقد حدّد هذا الزمن لعشرات من الجولات فكان دوماً 6 دقائق؛ لكنه يفاجأ بأن الجولات الثلاث الأخيرة التي قام بها سليم تطلّبت زمناً أطول من ذلك إذ بلغ 6.5 و7 و7.5 دقيقة على التوالي. وأول ما يتبادر إلى ذهنه أن هناك خللاً ما في عمل السيارة، جعلها تسير في جولاتها الأخيرة هذه بسرعات أبطأ من سرعتها الاعتيادية. يفحص سليم السيارة ولا يرى فيها أي خلل، ويحار في أمره ولا يجد جواباً لتباطؤ سرعتها. ويتوجه بالسؤال إلى سليم مستفسراً عن أحوال جولاته الأخيرة هذه، وسرعان ما يجد لديه الجواب عمّا شغل باله. يقول سليم: كنت أقود السيارة على المضمار من الشرق إلى الغرب، ومع اقتراب غروب شمس النهار، فإن أشعة الشمس بدأت تواجهني مباشرة، وتفاديتها في الجولات الثلاث الأخيرة، حيث أخذت تزعجني، بتوجيه السيارة في خط مائل، كما هو مبين على الشكل 2-5، بحيث أصبح طول المسار ما بين خطّي البداية والنهاية أطول، كما أصبح الزمن الذي تستغرقه السيارة لقطعه، بسرعتها الثابتة، أطول. يمكن التعبير عن هذه النتيجة بصورة أخرى فنقول إن

جزءاً من سرعة السيارة البالغة 100 ميل في الساعة، سوف يُصرف، عند سيرها منحرفة على المضمار المتّجه من الشرق إلى الغرب، لانتقالها من الجنوب إلى الشمال، مما يؤدي إلى أن اجتياز المضمار يستغرق زمناً أطول.



الشكل 2-5: *يقود سليم سيارته على مسار مائل خلال جولاته الثلاث الأخيرة في فترة ما بعد الظهر تفادياً لأشعة الشمس المواجهة له.*

لنبدّل قليلاً من صياغة التفسير الذي قدّمه سليم، على بساطته، تمهيداً لقفزة في المفاهيم سنقدم عليها. يمثل الاتجاهان شمال-جنوب، وشرق-غرب بُعدَين مكانيّين تستطيع السيارة التحرك فيهما (وتستطيع أيضاً التحرك في الاتجاه الشاقولي إذا ما سارت في طريق جبلي صاعد، إلاّ أننا لن نعرض هنا هذه الإمكانية لعدم حاجتنا إليها). يقول سليم إن سيارته سارت دوماً بسرعة 100 ميل في الساعة في كل جولة وفي جميع الجولات، لكنها وزعت هذه السرعة في جولاتها الثلاث الأخيرة ما بين البُعدين السابقين، فبدت بذلك وكأنها تسير بسرعة أقل من 100 ميل في الساعة في الاتجاه شرق-غرب، أو بتعبير آخر، إن سرعة السيارة البالغة 100 ميل في الساعة كانت مخصصة بكاملها، في جولاتها الأولى، لحركتها في الاتجاه شرق-غرب، في حين استخدمت قسماً من هذه السرعة، في جولاتها الثلاث الأخيرة للتحرك في الاتجاه جنوب-شمال أيضاً.

وجد أنشتاين أن هذه الفكرة بالذات، أي تقاسم الحركة ما بين أبعاد مختلفة، تدعم كل جوانب فيزياء النسبية الخاصة، طالما أدركنا أن الأبعاد المكانية ليست وحدها التي تتقاسم حركة الجسم، بل يمكن **لبعد الزمان** أن يتقاسمها معها أيضاً. وفي الحقيقة فإن **معظم الحركة** يتم في أغلب الحالات عبر الزمان وليس عبر المكان. لنرَ ماذا يعني ذلك.

تعد الحركة عبر المكان مفهوماً ألفناه مبكراً في حياتنا اليومية؛ أما **الحركة عبر الزمان**، مع عدم حديثنا عنها، فإننا نقوم بها نحن وأصدقاؤنا وكل ما يحيط بنا. فعندما نتطلع إلى ساعة يدنا ونحن أمام شاشة التلفاز، نلاحظ أن قراءة ما تشير إليه عقاربها تتغير باستمرار، ممّا يعني "*أنها تتحرك إلى الأمام عبر الزمان*". ونحن، وكل شيء حولنا، نهرم باستمرار منتقلين من لحظة زمنية إلى اللحظة التي تليها. كان الرياضياتي منكوفسكي (وتبعه لاحقاً أنشتاين) أول من قال باعتبار الزمان بعداً إضافياً رابعاً للكون يشبه تماماً أبعاده المكانية الثلاثة التي حولنا؛ ومع أن هذا الاعتبار يبدو أمراً مجرداً، فهو واقع وقائم. فلو أردنا مثلاً لقاء شخصٍ ما، حدّدنا له **مكان** اللقاء كأن يكون في الطابق التاسع من البناء القائم عند تقاطع الشارع 53 مع الجادة السابعة. تحدد هذه المعطيات الثلاثة: الطابق التاسع، الشارع 53 والجادة السابعة موقعاً محدداً ضمن الأبعاد المكانية الثلاثة للكون. لكن، وكما حدّدنا مكان اللقاء، فإن تحديد **زمانه** لا يقل أهمية عن ذلك. فإذا ما حددناه في الساعة الثالثة بعد الظهر مثلاً، نكون قد حدّدنا موقع هذا اللقاء في *البعد الزماني*"، وهكذا تتحدد الحوادث **بأربع** معطيات أو معلومات، ثلاثة منها لتعيين موقع الحادثة في المكان وواحدة لتعيين هذا الموقع في الزمان، أو كما يقول الفيزيائيون فإن هذه المعطيات الأربعة تحدد موقع الحادثة في الزمان والمكان، أو اختصاراً في **الزمكان**، وهذا ما نعنيه بقولنا أن الزمان بعد آخر.

تدل هذه الأمثلة على أن الزمان والمكان هما مثالان مختلفان لمفهوم واحد هو مفهوم الأبعاد. وكما نتحدث عن مفهوم حركة الجسم عبر المكان، فإن بوسعنا الحديث أيضاً عن مفهوم هذه الحركة عبر الزمان.

يكمن مفتاح فهم ذلك في فكرة سبق أن عرضناها عند حديثنا عن جسم يتحرك، بالنسبة لنا، عبر المكان، وما رأيناه من تباطؤ حركة ساعته بالنسبة لحركة ساعاتنا، ممّا يعني **تباطؤ سرعة حركته عبر الزمان**. وهنا تكمن القفزة التي سبقت الإشارة إليها والتي عبّر عنها أنشتاين بقوله: إن جميع الأجسام في الكون تتحرك **دوماً** عبر الزمكان بسرعة واحدة ثابتة هي سرعة الضوء. قد تبدو هذه الفكرة غريبة لأننا ألفنا الحديث دوماً عن حركة الأجسام بسرعة تقلّ كثيراً عن سرعة الضوء، وأكدنا في أكثر من مرة أن ذلك هو سبب عدم شعورنا بآثار النظرية النسبية في حياتنا اليومية. كل ذلك صحيح، إلاّ أننا نتكلم الآن عن شيء جديد آخر، هو سرعة الجسم في حركته **ضمن الأبعاد الأربعة**، أبعاد

المكان الثلاثة وبعد الزمان؛ وسرعة الجسم في هذا المعنى المعمّم، هي ما يساوي دوماً سرعة الضوء.

ولكي نفهم ذلك جيداً ونوضح أهميته، لنقارن الأمر مع ما رأيناه في حالة السيارة الافتراضية ذات السرعة الواحدة والثابتة التي سبق الحديث عنها. إن سرعة الضوء الواحدة والثابتة هنا يمكن أن تتوزع ما بين أبعاد المكان والزمان المختلفة. فلو ظل الجسم ساكناً بالنسبة إلينا، ومن ثمّ لم يتحرك عبر المكان أبداً، فإن حركته، على غرار حركة تلك السيارة في رحلاتها الأولى، سوف تستخدم كلها للانتقال في بعد واحد هو بعد الزمان، في هذه الحالة؛ وكذلك تفعل جميع الأجسام الساكنة بالنسبة إلينا، والساكنة أيضاً فيما بينها، إذ تتحرك كلها عبر الزمان، أي تهرم بمعدل السرعة ذاته. أما إذا تحرّك جسم عبر المكان فإن جزءاً من حركته السابقة عبر الزمان سوف يأخذ الآن اتجاهاً آخر. وكما في حالة السيارة الافتراضية عندما كانت تسير منحرفة، حيث كانت حركتها تتوزع على أكثر من اتجاه، فإن حركة هذا الجسم عبر الزمان ستكون أبطأ من حركة جسم ساكن، لأن قسطاً من حركته هذه عبر الزمان سوف يُصرف الآن في حركته عبر المكان، وهو ما يعني أن الساعة التي يحملها هذا الجسم ستتك على نحو أبطأ، أي أن الزمان سيتباطأ عند هذا الجسم المتحرك بالنسبة إلينا، بسبب تحوّل جزء من حركته عبر الزمان إلى حركة عبر المكان، وستكون سرعته في حركته الأخيرة انعكاساً لمقدار هذا الجزء[6].

تتضمّن وجهة النظر هذه حقيقة وجود نهاية عظمى لسرعة حركة الجسم في المكان التي يدركها إذا ما تحولت حركته عبر الزمان بسرعة الضوء **كلّها** إلى حركة عبر المكان بسرعة الضوء أيضاً. ولما كانت كل حركته عبر الزمان قد استُنفذت، فإن هذه السرعة هي السرعة **الأعظم** عبر المكان التي يستطيع الجسم، وأيّ جسم، بلوغها. والحال هنا يشبه حالَ السيارة الافتراضية التي انطلق بها سائقها في الاتجاه جنوب –شمال مباشرة، حيث لم تتبقَّ له أي سرعة للحركة في الاتجاه شرق–غرب. فالجسم المتحرك في المكان بسرعة الضوء لا تتبقّى له أي سرعة للحركة عبر الزمان، مما يعني أن الضوء لا يهرم أبداً، وللفوتون الذي انطلق من الانفجار الأعظم من العمر الآن ما كان له حين انطلاقه، أي أن الأجسام التي تتحرك بسرعة الضوء لا تعترف بمرور الزمان.

ماذا عن المعادلة الشهيرة $E=mc^2$

يبدو من مناقشاتنا السابقة أن معنى كلمة *"النسبية"* أصبح واضحاً وجلياً، مع أن أنشتاين لم يؤيد تسمية نظريته بالنسبية (بل اقترح لها تسمية أخرى هي *" نظرية اللاتغيّر"*، ليدل بذلك على خاصية ثبات سرعة الضوء من بين أمور أخرى). وقد بيّنت أعماله أن مفاهيم مثل مفهوم المكان ومفهوم الزمان، اللّذين كان يُظن سابقاً أنهما مفهومان مطلقان ومستقل أحدهما عن الآخر، أصبحا الآن مفهومين نسبيّين محبوكَين في كينونة واحدة. وذهب أنشتاين إلى أبعد من ذلك فبيّن أن مثل هذا الحبك يلحق بخصائص فيزيائية أخرى من الطبيعة بخلاف ما كان يظن سابقاً عنها. وتقدم معادلته $E=mc^2$، وهي الأكثر شهرة من بين كل ما وضع من معادلات، واحداً من أكثر الأمثلة أهمية ودلالة على ذلك. فطاقة جسم ما E وكتلته m ليسا مفهومين منفصلين أحدهما عن الآخر، بل هما مرتبطان على نحو يسمح بحساب أحدهما من معرفة الآخر. فطاقة الجسم تساوي جداء كتلته بمربع سرعة الضوء، وكتلته تساوي حاصل قسمة طاقته على مربع سرعة الضوء، لذلك يُعد هذان المقداران، الطاقة والكتلة، وكأنهما وحدتا نقد، كالدولار والفرنك الفرنسي، يمكن تحويل إحداهما إلى الأخرى. إلاّ أن سعر الصرف هنا ثابت دوماً، بخلاف ما هو عليه حال الدولار والفرنك، ويساوي مربع سرعة الضوء، وهو سعر مرتفع جداً (c^2 عدد كبير)، ويعني أن *"كتلة"* صغيرة يمكن أن تتحـــــول إلى *"طاقة"* كبيرة جداً. لقد حبس العالم أنفاسه عند تفجير القنبلة الذرية الأولى فوق مدينة هيروشيما في اليابان بسبب الأثر المدمر الرهيب الذي نجم عن تحول كتلة من اليورانيوم تزن أقل من 1% من رطلين إلى طاقة. ونأمل أن يأتي اليوم الذي يمكن فيه تطبيق معادلة أنشتاين هذه تطبيقاً مفيداً يؤمّن حاجة العالم كلها من الطاقة باستخدام محطات تقوم على مبدأ الاندماج النووي وتستخدم المخزون الكبير لمياه البحار التي لا تنضب.

تقدم معادلة أنشتاين هذه، وعن طريق المفاهيم التي أكدنا عليها في هذا الفصل، التفسير الأكثر واقعية وتجسيداً لحقيقة استحالة تحرّك أي جسم بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وقد يتساءل سائل: ماذا لو أخذنا ميوناً يتحرك في مسرّع بسرعة 667 مليون

ميل في الساعة، أي بما يعادل 99.5% من سرعة الضوء، ودفعناه قليلاً إلى الأمام فازدادت سرعته حتى بلغت 99.9% من سرعة الضوء، ثم دفعناه **فعلاً** دفعاً قليلاً آخر، وهكذا .. حتى نُكرهه على اختراق جدار الضوء. تجيب معادلة أنشتاين على هذا التساؤل بقولها: إن هذه المحاولات محكوم عليها بالفشل، إذ كلما ازدادت سرعة الجسم ازدادت طاقته، ومن ثم كتلته، فأصبح أثقل. فالميونات التي تتحرك بسرعة تساوي 99.9% من سرعة الضوء، أثقل من مثيلاتها الساكنة بحوالي 22 ضعفاً (نشير إلى أن قيم الكتل الواردة في الجدول 1-1 هي قيم كتل الجسيمات في حال السكون)؛ وكلما ثقل الجسم ازدادت صعوبة تسريعه. فدفع (تسريع) طفل صغير على دراجته أمر، ودفع (تسريع) شاحنة ثقيلة أمر آخر؛ وهكذا.. وكلما ازدادت سرعة الميون صعبت إمكانية تسريعه (زيادة سرعته) أكثر فأكثر بسبب تزايد كتلته. فكتلة الميون المتحرك بسرعة تبلغ 99.999% من سرعة الضوء، أكبر من كتلته في حالة السكون بحوالي 224 ضعفاً، وتصبح أكبر بحوالي 70000 ضعفاً إذا ما بلغت سرعته 99.99999999% من سرعة الضوء، وهو ما يعني أن كتلة الميون تزداد على نحو غير محدود مع اقتراب سرعته من سرعة الضوء، مما يتطلب تزويده (أي دفعه) بمقادير **لا متناهية في الكبر** من الطاقة لبلوغ سرعة الضوء أو لتجاوزها، وهو أمر محال. ونخلص من ذلك إلى القول بعدم استطاعة أي جسم التحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء.

يغرس هذا الاستنتاج، كما سنرى في الفصل القادم، بذور التناقض الكبير الثاني الذي تعرضت له الفيزياء في القرن الماضي، والذي أدى في نهاية المطاف إلى تحطم نظرية أخرى مهيبة وعزيزة على قلوبنا، وهي نظرية نيوتن الشاملة في الثقالة.

الفصل الثالث

حول الالتواءات والتموّجات

أزال أنشتاين، عن طريق نظرية النسبية الخاصة، التناقض القائم بين إحساسنا الحدسي بالحركة وخاصية ثبات سرعة الضوء؛ ويكمن الحل الذي قدمه لذلك، كما رأينا، في قوله بخطأ إحساسنا، هذا الإحساس الناشيء عن تعوّدنا وتآلفنا مع حركات ذات سرعات أبطأ بكثير من سرعة الضوء، ممّا يحجب الطبيعة الحقيقية للمكان والزمان. وقد أوضحت هذه النظرية حقيقة هذه الطبيعة وبيّنت اختلافها، على نحو جذري، عن كل المفاهيم التي أعطيت لهما سابقاً. لم يكن تحسين فهمنا لهذه الطبيعة أمراً سهلاً، ذلك أن أنشتاين سرعان ما أدرك الأهمية البالغة لإحدى النتائج التي قادت إليها نظريته عن النسبية الخاصة، فالقول بعدم إمكانية التحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء يتعارض ولا ينسجم مع نظرية نيوتن الشاملة عن الثقالة، والتي رسّخت أقدامَها على نحو مهيب خلال النصف الثاني من القرن السابع عشر. وهكذا، وإذ أدّت النسبية الخاصة إلى حلّ أحد التعارضات، فإنها سرعان ما أدت إلى قيام تعارض آخر سواه. إلاّ أن أنشتاين تمكّن بعد لأي وجهدِ عشر سنوات من الدراسة المكثفة العميقة، من حل هذا التعارض المعضلة عن طريق نظريته العامة عن النسبية التي بدّل فيها مرة أخرى وعلى نحو جذري، مفهومنا عن المكان والزمان عندما بيّن أنهما يلتويان وينحنيان لنقل قوى الثقالة.

نظرة نيوتن إلى الثقالة

وُلد إسحق نيوتن عام 1642 في لنكولنشاير في إنكلترا. كان عبقرية بذاته إذ سرعان ما بدّل صورة البحث العلمي المألوفة في حينه عندما حمل إليه لغة الرياضيات، وألقاها بكل ثقلها في خدمة هذا البحث؛ وتجلّت عبقريته الفذّة، عندما رأى قصور الرياضيات المعروفة آنئذ عن تلبية بعض متطلبات البحوث، فلم يستكن لذلك بل تصدّى للأمر وقام

بوضع الرياضيات المناسبة. وكان على العالم أن ينتظر حوالي ثلاثة قرون من الزمن قبل أن يشهد مولد عبقرية علمية فذة أخرى شبيهة بعبقرية نيوتن. وسنكتفي هنا، من بين كل أعماله العديدة والأساسية المتعلقة بفهم طبيعة عمل الكون، بالحديث عن نظريته الشاملة عن الثقالة.

تنتشر قوة الثقالة في معظم مظاهر حياتنا اليومية. فهي المسؤولة عن بقائنا، وبقاء كل شيء حولنا، مستقرّين على سطح الأرض؛ وهي ما يمنع الهواء الذي نستنشقه من الهروب إلى الفضاء الخارجي، وهي المسؤولة عن بقاء القمر في مداره حول الأرض، وعن بقاء الأخيرة في مدارها حول الشمس. كما تُملي الثقالة إيقاعَ الرقصة الكونية التي تقوم بها بكل دقة ودون أي كلل مليارات من مليارات المكوّنات الكونية من كويكبات وكواكب ونجوم ومجرات. وقد بقي العالم لأكثر من ثلاثة قرون، خاضعاً لأفكار نيوتن، وهو ما جعلنا نقبل دون نقاش، بوجود قوة وحيدة، هي قوة الثقالة، مسؤولة عن جميع الظواهر الأرضية والسماوية. لم يكن أحد يدرك، قبل نيوتن، أن سقوط التفاحة عن الشجرة يخضع للقانون الفيزيائي ذاته الذي يبقي الكواكب في مداراتها حول الشمس. وجاء نيوتن وأبرز قوة العلم عندما وحّد، وبكل جرأة، قوانين الفيزياء التي تحكم الظواهر الأرضية والسماوية بقوله إن قوة الثقالة هي اليد الخفيّة التي تعمل في كلّ عالم ومجال.

يمكن تسمية نظرة نيوتن إلى الثقالة بالمسوّي الأكبر إذ قال إن كل شيء، وفقاً لها، يؤثر بقوة جذب على كل شيء آخر سواه. **فكل شيء**، وأياً كان تركيبه الفيزيائي، يؤثر بقوة الثقالة ويتأثر بها. وقد استنتج نيوتن، عن طريق دراسته المتأنية والدقيقة لتحليلات حركة الكواكب التي أجراها جوهان كبلر، أن قوة التجاذب الثقالي بين جسمين تعتمد على أمرين **فقط** هما مقدار "المادة" الذي يكوّن كلاً من هذين الجسمين، "والمسافة" بينهما. وتعني كلمة المادة هنا العدد الكلي للبروتونات والنترونات والإلكترونات التي تحدد بدورها **كتلة** الجسم. وتؤكد نظرية نيوتن الشاملة للثقالة أن قوة التجاذب بين جسمين كبيري الكتلة أكبر مما هي عليه بين جسمين صغيري الكتلة؛ كما أن هذه القوة تكبر كلما صغرت المسافة بين الجسمين، وتصغر كلما كبرت هذه المسافة. لم يكتفِ نيوتن بتقديم هذا الوصف الكيفي لقوة الثقالة، بل ذهب أبعد من ذلك بكثير، وعبّر بمعادلات رياضيّاتية

تصف بصورة كمية شدة هذه القوة بين جسمين وهو ما يمكن صياغته بقولنا، "إنها تتناسب طرداً مع جداء كتلتيهما وعكساً مع مربع المسافة الفاصلة بينهما".

يسمح "قانون الثقالة" هذا بمعرفة حركة الكواكب والمذنّبات حول الشمس، وحركة القمر حول الأرض، وحركة الصواريخ في رحلاتها الفضائية؛ كما يسمح بمعرفة حركات أرضية أخرى مثل حركة كرة القدم في الهواء أو الحركة اللولبية التي يقوم بها سابح عندما يقفز إلى الماء من على منصة الوثب. وتتوافق، على نحو مذهل، نتائجُ الحسابات النظرية التي يقود إليها وما نراه فعلاً من حركات هذه الأجسام. وقد أعطى هذا النجاح المنقطع النظير دعماً لا مثيل ولا حدّ له لنظرية نيوتن استمر حتى مطلع القرن العشرين، حين وضعتْها نظرية النسبية الخاصة لأنشتاين أمام معضلة بدا وكأنّ لا حلّ لها لديها.

التعارض بين الثقالة النيوتنية والنسبية الخاصة

يُعتبر الحد الأعلى المطلق للسرعة، وهو سرعة الضوء، ركناً أساسياً من أركان نظرية النسبية الخاصة. ومن الأهمية بمكان أن نوضح هنا أن هذا الحد الأعلى للسرعة لا ينطبق فقط على حركة الأجسام المادية، بل يشمل أيضاً سرعة كل أنواع الإشارات والتأثيرات، حيث لا يمكن نقل أي معلومة أو اضطراب من مكان لآخر بسرعة أكبر من سرعة الضوء. والعالم مليء من حولنا بالطرق التي تنتقل بها الاضطرابات بسرعة **أبطأ** من سرعة الضوء، فكلامنا مثلاً تحمله اهتزازات تنتقل في الجو بسرعة 700 ميل في الساعة تقريباً، وهي سرعة ضئيلة جداً لا يمكن مقارنتها بسرعة الضوء البالغة 670 مليون ميل في الساعة تقريباً. يتضح هذا التباين الكبير بين سرعة الضوء وسرعة الصوت إذا ما كنا نشاهد مباراة في كرة القدم وكان مكان جلوسنا في الصفوف الخلفية من المدرّج. فعندما يركل لاعبٌ الكرة بقدمه فإن صوت هذه الركلة يصلنا **بعد** رؤيتنا لها بلحظات؛ كما يتضح لنا عندما نرى وميض البرق قبل سماعنا صوت الرعد عند هبوب العاصفة، رغم أن الرعد والبرق يحدثان معاً في وقت واحد. وتنبئنا النسبية الخاصة بأن الوضع المعاكس لذلك، وهو وصول إشارات إلينا **قبل** وصول الضوء المرافق لها، أمر غير ممكن، فلاشيء أسرع من الفوتونات ولاشيء يسبقها.

وفي هذه الحقيقة تكمن المشكلة. ذلك أن نظرية الثقالة لنيوتن تنص على أن شدة قوة الجر الثقالي التي يؤثر بها جسم على آخر تتحدد بكتلتي هذين الجسمين والمسافة الفاصلة بينهما فقط، وبذلك نرى أنه لا علاقة لها بالتالي بالزمن الذي مضى على وجود أحدهما مقابل الآخر. يعني ذلك أنه لو قدّر لهاتين الكتلتين، أو لتلك المسافة، أن تتغير على نحو ما، فإن هذين الجسمين سيشعران حالاً، تبعاً لنظرية نيوتن، بتغيّر شدة قوة التجاذب الثقالي بينهما. فلو حدث انفجار ما على الشمس مثلاً، فإن الأرض التي تدور حولها على مدار إهليليجي يبعد عنها حوالي 93 مليون ميل ستشعر آنياً بهذا الانفجار من خلال تأثّر مدارها به. وهكذا فإن معرفتنا بالانفجار الذي وقع في الشمس، والتي ستنتقل إلينا آنياً عبر التغير المفاجيء في قوة الثقالة التي تخضع لها الأرض في حركتها حولها ستصلنا قبل وصول الضوء الناجم عن هذا الانفجار إلينا والذي يستغرق حوالي ثماني دقائق. تتعارض هذه النتيجة على نحو واضح مع نظرية النسبية الخاصة التي تؤكد بأنه لا يمكن لأي معلومة أن تنتقل بأسرع من الضوء، لذلك يعد ذلك الانتقال الآني انتقاداً صارخاً لتلك النظرية.

أدرك أنشتاين إذن، منذ مطلع القرن العشرين أن نظرية نيوتن الشاملة والعريقة والتي حققت نجاحات باهرة، تتعارض مع نظريته عن النسبية الخاصة. ولثقته المطلقة بصحة نظريته فإنه لم يأبه بذلك القدر الهائل من البراهين التجريبية التي تدعم نظرية نيوتن، وبدأ بالبحث عن نظرية جديدة للثقالة تنسجم ونظريته عن النسبية الخاصة، وقاده ذلك إلى وضع نظرية النسبية العامة التي تعرّض فيها مفهوما الزمان والمكان مرة ثانية إلى تغيير جذري.

الفكرة التي أسعدت أنشتاين

كانت نظرية نيوتن في الثقالة، وحتى قبل وضع نظرية النسبية الخاصة، مقصّرة في أحد جوانبها. فهي، رغم قدرتها على التنبؤ بدقة عالية عن كيفية تحرك الأجسام بتأثير الثقالة، لم تقدم أي تفسير **لماهية** الثقالة، أو بتعبير آخر، لم توضح كيف يمكن لجسمين، يبعد أحدهما عن الآخر مسافة كبيرة قد تصل إلى مئات ملايين الأميال، أن يؤثر أحدهما في الآخر ويتأثر به، وبأي وسيلة تحقق الثقالة مهمتها في نقل هذا التأثير. كان نيوتن على دراية بهذا القصور وكان يقول بشأنه: "لا يعقل أن تكون مادة جامدة غير عاقلة،

قادرة دون الاستعانة بشيء غير مادي آخر، على التأثير على مواد أخرى ليست على تماس مباشر معها. إن القول بأن الثقالة ملازمة لمفهوم المادة ومتأصلة وأساسية فيه، بحيث يستطيع أي جسم أن يؤثر على أي جسم آخر بعيد عنه وعبر الفراغ الكائن بينهما، ودون الاستعانة بأي شيء آخر يمكن من خلاله نقل هذا التأثير والقوى المسببة له، لهو بالنسبة لي أمر جلل لا يمكن لعاقل أن يقبله. لذلك لابد من وجود عامل يخضع لقوانين معينة، يمكن عدّه مسؤولاً عن قوة الثقالة. وأدع لاعتبارات القراء أمر تحديد طبيعة هذا العامل وماهيته وهل هو مادي أو غير مادي"[1].

لقد قبل نيوتن بوجود الثقالة، ومضى يعبّر عنها بمعادلات تصف تأثيراتها بدقة، لكنه لم يقدم أي تفسير لها أو لطبيعة تأثيرها. لقد أعطى نيوتن العالمَ "كتيّب التعليمات العائد للمالك" الخاص بالثقالة، الذي يتحدث عن كيفية "استخدامها"، أي انه أعطى التعليمات التي استخدمها الفيزيائيون والفلكيون والمهندسون، بنجاح، لتحديد مسارات الصواريخ في رحلاتها نحو القمر والمريخ والكواكب الأخرى، ومن أجل التنبؤ بمواعيد الكسوف والخسوف ولمعرفة حركة النيازك وغيرها، لكنه أبقى آلية عملها الخاصة – أي محتويات الصندوق الأسود للثقالة – سراً يكتنفه الغموض. قد تجد نفسك في مثل هذه الحالة من الجهل أمام معرفة آلية عمل آلة التسجيل أو الحاسب الشخصي اللذين تستخدمهما. لكنك سترضى بجهلك هذا طالما كان بوسعك معرفة كيفية استخدام هذه الأجهزة، إذ لا حاجة لك أو لسواك لمعرفة **كيفية** قيام الجهاز بتأدية المهام المناطة به طالما كان قادراً على ذلك. لكنك ستكون، دون أدنى ريب، بحاجة لهذه المعرفة، أي لمعرفة الآلية الداخلية الدقيقة لعمل الجهاز إذا ما تعطل عن العمل، وذلك بغية إصلاحه. وبمثل ذلك أدرك أنشتاين ضرورة معرفة الطبيعة الحقيقية والكاملة لمفهوم الثقالة بغية إصلاح نظرية نيوتن التي أدت النسبية الخاصة إلى تعريضها للعطب.

كان أنشتاين يفكر ملياً في هذه المسائل خلال عمله في مكتب براءات الاختراع في سويسرا. وفي سنة 1907 خطرت على باله فكرة خلاّقة ستقوده تدريجياً إلى وضع نظرية جديدة للثقالة. لم يكتفِ التقرّب الذي اعتمده بسد الثغرة في نظرية نيوتن فحسب، بل قدّم فهماً جديداً مغايراً للثقالة، أهم ما فيه انسجامه التام والنسبية الخاصة.

تتعلق الفكرة الخلاّقة التي خطرت على بال أنشتاين، بسؤال قد يكون أقلقك على نحو ما في الفصل الثاني من هذا الكتاب، حين أكدنا على القول بأن ما يهمنا فعلاً هو معرفة كيف يبدو العالم لأشخاص يتحرك بعضهم فيه بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضهم الآخر، ووجدنا من خلال المقارنة الدقيقة لملاحظات أولئك الأشخاص ما لذلك من نتائج مأساوية على طبيعة الزمان والمكان. لكن ماذا لو تحرك أولئك الأشخاص بحركات **متسارعة؟** سيكون تحليل ملاحظاتهم أكثر تعقيداً من تحليل ملاحظات سابقيهم، ونتساءل، مع ذلك، إن كانت هناك طريقة ما تسمح بالسيطرة على هذا التعقيد الجديد وبشمول الحركات المتسارعة في فهمنا الجديد لطبيعة المكان والزمان.

بينت فكرة أنشتاين السبيل إلى ذلك؛ ولفهمها، تخيّل أننا في العام 2050، وأنك تعمل خبيراً رئيسياً للمتفجرات لدى مكتب التحقيقات الفيدرالي (FBI)، وقد وصلتك للتّو مكالمة مستعجلة تدعوك لتفحّص ما يبدو قنبلة متطورة مزروعة في قلب مدينة واشنطن. وإذ تهرع إلى مكان وجود القنبلة وتتفحّصها تشعر بكابوس رهيب يضغط على أنفاسك؛ فالقنبلة نووية، وشدتها رهيبة، وسوف تكون الأضرار الناجمة عن انفجارها مدمرة، حتى لو دُفنت عميقاً في باطن الأرض أو في أعماق المحيط. وتبدأ بتحرّي آلية تفجيرها وسرعان ما تدرك ألاّ أمل لك بإبطال مفعولها أو بنزع فتيلها، فهي ليست من طراز القنابل المألوفة، إذ وضعت علىمقياس مدرّج، وستنفجر حين ينحرف مؤشر المقياس عن وضعه الحالي بما يزيد عن 50% منه؛ ووفقاً لآلية التوقيت المستخدمة في القنبلة، فإن أمامك أسبوعاً واحداً فقط قبل وقوع الانفجار، وتحمل على عاتقيك مصيرَ ملايين البشر. فماذا تفعل؟

وإذ ترى أنه لا مكان آمن على سطح الأرض أو في باطنها لتفجير القنبلة فيه على نحو آمن لا يلحق الأذى بأحد، تفكر بإطلاقها إلى أعماق الفضاء الخارجي حيث تنفجر دون ضرر. وتدعو فريق عملك من مكتب التحقيقات للتشاور، وتعرض فكرتك أمامهم؛ وسرعان ما يقف أحد مساعديك الشباب وهو إسحق، مبيناً رأيه حولها قائلاً: "إن هناك مشكلة تعترض تنفيذ هذه الفكرة، فوزن النظام المتفجر سينقص عند ابتعاده عن الأرض، لانخفاض قوة جذبه الثقالي، وستنخفض قراءة ما يدل عليه مؤشر المقياس مما يسبب

انفجار القنبلة قبل وصولها إلى بر الأمان في أعماق الفضاء الخارجي". وقبل أن تتاح لك الفرصة للتفكّر بدلالة هذا الاعتراض، يقوم مساعد شاب آخر هو ألبرت قائلاً: "إن هناك مشكلة أخرى لا تقل أهمية عمّا طرحه إسحق، إلاّ أنها تحتاج إلى تأمل وتبصّر، لذلك أرجو أن تعيروني انتباهكم وصبركم إذ أعرضها أمامكم". ولاتفلح محاولاتك لإسكات ألبرت، حتى يتاح لك المجال للتفكير فيما عرضه إسحق، إذ لا مجال لإيقاف ألبرت عن الكلام إذا ما بدأه، فيتابع قائلاً:

"إن إطلاق النظام إلى الفضاء الخارجي يقتضي حمله على صاروخ. وعندما **يتسارع** هذا الأخير في حركته للدخول في الفضاء الخارجي، فإن قراءة مؤشر القياس سوف **تزداد**، ممّا يسبّب، مرة أخرى، انفجار القنبلة قبل أوانه.هل ترون ذلك؟ إن قاعدة القنبلة ترتكز على كفة المقياس، وسوف تضغط على هذه الكفة، عندما ينطلق الصاروخ، بأكثر مما كانت تفعل في حالة السكون. إن الوضع شبيه بما يجري لك حين تكون جالساً على مقعد في سيارة متسارعة؛ وكما يضغط ظهرك على ظهر هذا المقعد، فإن القنبلة سوف تضغط على كفة المقياس. ومع تزايد هذا الضغط ترتفع قراءة المؤشر، وستنفجر القنبلة عندما يتجاوز هذا الارتفاع نسبة الـ 50% ".

تشكر ألبرت على مداخلته هذه، وتتفكر فيها فتراها تؤكد لك ما ذكره إسحق عن عدم جدوى المشروع، وتعلن لرفاقك أن خطأ واحداً في الفكرة التي عرضتها يكفي لوأد المشروع، وأن ملاحظة إسحق الحصيفة قد فعلت ذلك حتماً. وتتوجه إليهم سائلاً، وقد فقدت الأمل تقريباً، إن كان لديهم أفكار أو اقتراحات جديدة يقدمونها. وهنا ينهض ألبرت من جديد، وكأن وحياً قد نزل عليه، ليقول: "لو أعدنا التفكّر بالأمر، نرى أن ما طرحته قد يكون جيداً. إن ملاحظة إسحق عن تناقص قوة الجذب الثقالي، مع انطلاق الصاروخ في الفضاء الخارجي، تعني أن قراءة مؤشر المقياس سوف **تنخفض**. وما ذكرته أنا عما يحدثه تسارع الصاروخ المنطلق من ضغط أكبر على كفة المقياس، تعني أن قراءة المؤشر سوف **ترتفع**، فإذا ما اعتبرنا الملاحظتين معاً، فقد نصل، إذا ما استطعنا التحكّم بتسارع الصاروخ وضبطه ما بين لحظة وأخرى، إلى وضع **يُلغي فيه أحدُ هذين التأثيرين التأثير الآخر**. فالصاروخ، في مراحل انطلاقه الأولى وإذ لا يزال خاضعاً إلى

كامل قوة الجذب الثقالي للأرض، لا يحتاج إلى تسارع كبير ليبقى في المجال الموافق للتزايد المسموح به للمؤشر. ومع ابتعاده أكثر فأكثر عن الأرض، وتناقص قوة تأثير الثقالة عليه، فإنه يحتاج إلى تسارع أكبر لتعويض ذلك التناقص. وإذا ما استطعنا موازنة هذين التأثيرين، أي تأثير التسارع الذي يؤدي إلى ارتفاع قيمة المؤشر، وتأثير الثقالة الذي يؤدي إلى انخفاض هذه القيمة، فقد نستطيع الوصول إلى وضع يحافظ فيه مؤشر المقياس على قيمة ثابتة".

وإذ بدأتَ تدرك ما يعنيه اقتراح ألبرت تبادره القول: "إن معنى ذلك أنّ تسارع الصاروخ قد يقدم البديل الذي يقوم مقام الثقالة، أي أن بوسعنا أن نقلّد تأثيرَ الثقالة عن طريق حركة ذات تسارع مناسب". ويؤكد ألبرت صحة كلامك فتتابعه قائلاً: "سيكون **باستطاعتنا** إذن إطلاق الصاروخ نحو الفضاء الخارجي وضمان بقاء مؤشر المقياس على قيمة ثابتة له من خلال تحكّم دقيق بتسارع الصاروخ، وهو ما يعني تأخير انفجار القنبلة حتى وصولها إلى مكان آمن بعيد عن أرضنا". وهكذا تدرء الكارثة من خلال موازنة تأثيرَي الثقالة والحركة المتسارعة، وباستخدام التقانات الدقيقة لعلم الصواريخ التي يحملها القرن الحادي والعشرون.

شكّل هذا الإدراك بوجود صلة عميقة تجمع بين مفهومَي الثقالة والحركة المتسارعة، مفتاحَ الإلهام الذي حلّ ذات يوم سعيد على أنشتاين وهو جالس على مكتبه في مكتب براءات الاختراع في مدينة برن. ومع أن أسلوب حديثنا عن القنبلة يسلط الضوء على جوهر فكرة أنشتاين، فإن من المفيد إعادة صياغة هذه الفكرة على نحو قريب من النهج الذي قدمنا بها أفكارنا في الفصل الثاني من هذا الكتاب. تذكّر لذلك أنك إذا ما وُضعت في مقصورة محكمة الإغلاق لا نوافذ لها في قطار يسير بحركة منتظمة **غير** متسارعة، فإنك لن تكون قادراً بأية صورة، على تحديد سرعتك، وستبدو لك المقصورة دوماً بالمظهر نفسه أيّاً كانت سرعتها المنتظمة، وستعطيك أية تجارب تجريها في داخلها النتائجَ ذاتها، بحيث يمكن القول ألاّ سبيل أمامك لتحديد حالتك الحركية وإعطاء أي قيمة لسرعتك في حال غياب أية معالم خارجية يمكن العودة إليها للمقارنة. أما إذا تسارع القطار في حركته، ومع أن ملاحظاتك تبقى مقتصرة على ما يحدث في مقصورتك

المغلقة، فإنك **ستشعر** بقوة تؤثر على جسمك؛ فإذا كان مقعدك المتجه إلى الأمام مثبتاً بأرض المقصورة، وكانت حركة هذه الأخيرة متسارعة إلى الأمام،فإنك ستشعر بقوة المقعد على ظهرك تماماً كما في حالة السيارة التي ذكرها ألبرت. وبصورة مماثلة، ولو كانت مقصورتك متسارعة نحو الأعلى فإنك ستحسّ بقوة أرض المقصورة على قدميك. وما أدركه أنشتاين هو أنه لن يمكنك، في حدود التقييدات المفروضة على مقصورتك الصغيرة، أن تميز هذه الحالات المتسارعة عن حالات أخرى **غير متسارعة ولكنها خاضعة لتأثير الثقالة**، إذ لا يمكن التمييز ما بين قوتين، تنجم أولاهما عن حقل ثقالي وتنجم الثانية عن حركة متسارعة إذا ما أمكن تحقيق تساوي شدتيهما بحصافة. فلو كانت مقصورتك ساكنة على سطح الأرض لأحسست بالقوة الاعتيادية لأرض المقصورة على قدميك، تماماً كإحساسك في مشهد التسارع نحو الأعلى. وهذا التكافؤ هو تماماً ما استخدمه ألبرت في الحل الذي قدمه لإطلاق قنبلة الإرهابيين نحو الفضاء الخارجي. وكذلك الأمر لو استندت مقصورتك بمؤخرتها على سطح الأرض فإنك ستحس بقوة مقعدك على ظهرك (وهي تمنعك من السقوط)، تماماً كإحساسك في مشهد التسارع الأفقي. دعا أنشتاين عدمَ التمييز هذا بين الحركة المتسارعة والثقالة **بمبدأ التكافؤ**[2]، وسيلعب هذا المبدأ دوراً هاماً في نظرية النسبية العامة.

نرى مما تقدم وكأن النسبية العامة تكمل عملاً بدأته النسبية الخاصة؛ فهذه الأخيرة، ومن خلال مبدئها في النسبية، تحقق المساواة ما بين مراقبين مفضّلين، وهم هنا المراقبون الذين يتحرك بعضهم بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضهم الآخر، إذ تكون كل قوانين الفيزياء متماثلة أمام جميع هؤلاء. لكن هذه المساواة جزئية في الواقع وغير شاملة لأنها تستبعد آراء كل المراقبين الذين يتحركون حركات متسارعة. ويرينا الآن التبصّر الذي خلص إليه أنشتاين في سنة 1907 كيف يمكننا جمع آراء **كلّ** المراقبين – من يتحرك منهم بسرعة ثابتة ومن يتحرك حركة متسارعة – في إطار مساواتي واحد. ولما كان لا فرق هناك بين نقطة مراقبة مفضّلة متسارعة **لا يوجد** فيها حقل ثقالي، ونقطة مراقبة مفضّلة أخرى غير متسارعة **فيها** حقل ثقالي، فإن بوسعنا الاستشهاد بذلك والقول: **إن بوسع جميع المراقبين، وبغض النظر عن حالتهم الحركية، الادعاء بأنهم ساكنون وأن**

"بقية العالم تتحرك من حولهم"، إذا ما أدخلوا حقلاً ثقالياً مناسباً لوصف البيئة المحيطة بهم. وهكذا تؤكد النسبية العامة في هذا المجال، وعبر إدخال الثقالة، أن جميع نقاط المراقبة المفضلة والممكنة تكون على قدم المساواة فيما بينها (يعني هذا، كما سنرى لاحقاً، أن التمييز بين المراقبين الذي تحدثنا عنه في الفصل الثاني، والذي اعتمد على الحركة المتسارعة – كما كان حال جورج عندما لحق بجين بعد استخدام محركه النفّاث ليجد عند لقائهما أنها شاخت أكثر منه – يمكن ان يوصف، بصورة مكافئة، باعتماد وجود حقل ثقالي وبدون تسارع).

يعتبر هذا الارتباط الوثيق بين الثقالة والحركة المتسارعة إنجازاً كبيراً لأنشتاين، لكن لماذا جعله ذلك سعيداً إلى ذلك الحد؟ يرجع ذلك، وببساطة، إلى غموض مفهوم الثقالة. فهي قوة كبيرة تعمّ أرجاء الكون، لكنها مراوغة وغير ملموسة، في حين أن الحركة المتسارعة، مع أنها أكثر تعقيداً من الحركة المنتظمة، إلا أنها ملاحظة وملموسة. وقد أدرك أنشتاين، من خلال إيجاده الصلة التي تجمع بين هذين المفهومين، أن بوسعه استخدام فهمه للحركة كأداة قوية بغية الحصول على فهم مماثل للثقالة. لم يكن وضع هذه الفكرة قيد التنفيذ بمهمة سهلة حتى على عبقرية أنشتاين. لكن الدرب الذي سار عليه أوصله في نهاية المطاف إلى مبتغاه متمثلاً بنظرية النسبية العامة. احتاج أنشتاين لبلوغ هدفه إلى وضع حلقة ثانية في السلسلة التي تربط بين مفهومي الثقالة والحركة المتسارعة تتمثل في فكرة **انحناء (أو تقوّس)** المكان والزمان، وهو ما سنعرضه الآن.

تسارع المكان والزمان والتواؤهما

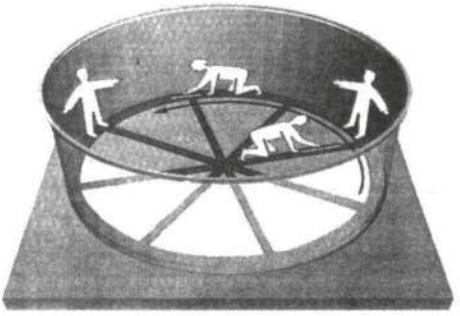
عمل أنشتاين بهمة عالية ودون أي كلل من أجل فهم ماهية الثقالة. وبعد حوالي الخمس سنين من التبصّر الذي نزل عليه وأدخل البهجة والفرح إلى قلبه وهو في مكتب براءات الاختراع في مدينة برن، كتب إلى الفيزيائي أرنولد سمرفيلد يقول: "أعمل الآن في موضوع الثقالة... هناك شيء (و)احد أكيد، وهو أنني لم أرهق نفسي وأعذبها طيلة حياتي مثلما أفعل الآن... تبدو لي النسبية الأصلية (أي الخاصة)، بالمقارنة مع هذا الموضوع، وكأنها لعبة أطفال[3] ".

حقّق أنشتاين الاختراق المفتاح الثاني في سنة 1912؛ وجاء نتيجةً بسيطة، إلا أنها بارعة، لتطبيق النسبية الخاصة على الرابطة التي تجمع بين الثقالة والحركة المتسارعة. ولفهم هذه الخطوة من تفكير أنشتاين ومحاكمته، لنفعل ما يبدو أنه فعله هو، ونوجّه اهتمامنا إلى مثال خاص عن حركة متسارعة[4]. نذكّر أن الجسم يتسارع إذا تغيّرت قيمة سرعته أو تغيّر اتجاه حركته. وللتبسيط والتسهيل سوف نعتبر مثالاً عن حركة متسارعة يتغير فيها اتجاه حركة الجسم، في حين تبقى سرعته ثابتة. لنعتبر لذلك حركة دائرية يجريها زائر إلى مدينة الملاهي في لعبة مركبة "الإعصار". ونوضّح لمن لم يجرّب هذه اللعبة ويختبر استقرار جسمه في المركبة، أن اللعبة تكمن في أن تقف مستنداً بظهرك على الجدار الداخلي لمبنى دائري صنعت جدرانه من زجاج خاص للحماية، يدور حول محوره بسرعة عالية جداً. سوف تحسّ بتسارع حركة المركبة، كإحساسك بأي حركة متسارعة أخرى، من خلال إحساسك بقوة طرد مركزية تحاول دفعك بعيداً عن مركز المركبة، ومن ثمّ ستحسّ بضغط الجدار الزجاجي على ظهرك ممّا يحافظ على حركتك الدائرية (نشير إلى أن الحركة الدورانية تثبت جسمك على الجدار الزجاجي بقوة تكفي لتحول دون سقوطك نحو الأسفل إذا ما وقعت الخشبة التي تقف عليها). ولو كانت المركبة ملساء جداً وأغمضْت عينيك عند دورانها لأحسست أن جدارها حولك مثل السرير، إذ سيشعرك ضغطه على ظهرك"وكأنك" مستلق على سرير. نقول "وكأنك"، لأنه لا يمكن خداعك تماماً وأنت في هذا الوضع إذ أنك لا تزال تشعر بقوة الثقالة "الشاقولية". لكن، لو قدّر لك أن تركب عربة "الإعصار" هذه في الفضاء الخارجي وهي تدور حول نفسها بسرعة مناسبة، فإنك عندها ستشعر تماماً وكأنك مستلق على سريرك في غرفة نومك؛ ولو" نهضْت" وسرْت على الجدار الداخلي للمركبة الزجاجية الدائرة، فإنك ستشعر بضغط قدميك على هذا الجدار تماماً كما ستشعر عندما تسير على أرض غرفتك في منزلك. وفي الحقيقة فإن المحطات الفضائية تصمّم بحيث تدور حول نفسها بهذه الطريقة بغية خلق إحساس مصطنع بالثقالة في الفضاء الخارجي.

لنحذُ الآن، وبعد محاكاة الثقالة أو تقليدها بحركة متسارعة لمركبة إعصار دوّارة، حذْو أنشتاين، ونرى كيف يبدو المكان والزمان لمراقب في هذه المركبة. يتلخص تحليل أنشتاين، بعد تكييفه وملاءمته على مثالنا، بمايلي: نستطيع نحن كمراقبين ساكنين قياس محيط المركبة الدوّارة ونصف قطرها بسهولة وباستخدام مسطرة قياس ننقلها مرات عدة

بمحاذاة ذلك المحيط، منطلقين من إحدى نقاطه وعائدين إليها؛ وكذلك الأمر بالنسبة لنصف القطر حيث تنتقل مسطرة القياس على طول الخط الواصل بين محور العربة المركزي وبين حافتها الخارجية. وسنجد أن النسبة بين طول محيط المركبة وطول نصف قطرها تساوي ضعفي العدد باي (π)، أي ما يقرب من 6.28، كما هو الحال في أي دائرة مرسومة على صفحة من الورق. لكن، كيف تبدو الأمور بالنسبة لمراقب موجود في المركبة الدوّارة ذاتها؟

للإجابة عن ذلك، سنطلب من سليم وخالد اللذين يلهوان الآن بالركوب في مركبة الإعصار، أن يجريا لنا بعض القياسات، وسنزودهما لذلك بمسطرتَي قياس ونطلب من سليم أن يقيس طول محيط المركبة ومن خالد أن يقيس طول نصف قطرها، ولنراقب ما يجري من منظور عين طائر يتطلع إلى المركبة من عل كما في الشكل 3-1، الذي أشّرنا عليه بسهم يدل على الاتجاه الآني لحركتها في كل نقطة.



الشكل 3-1: *تتقلص مسطرة سليم المتوضعة باتجاه حركة المركبة. أما مسطرة خالد المتوضعة على الدعامة نصف القطرية للمركبة، المتعامدة مع اتجاه حركتها، فلا تعاني أي تقلّص.*

عندما يبدأ سليم قياسه طولَ المحيط، نرى من منظور عين الطائر أنه سيعطي نتيجة مختلفة عمّا قسناه نحن لأننا نرى، عندما يضع مسطرته بمحاذاة محيط المركبة، أن **طول هذه المسطرة قد قصر**. يرجع ذلك إلى ظاهرة تقلص الأطوال للورنتز التي تحدثنا عنها في الفصل الثاني حين رأينا أن طول جسم متحرك ما يبدو أقصر في الاتجاه الموازي لحركته. يعني تقلص هذا الطول أننا سنحتاج لنقل المسطرة مرات **أكثر** للمرور على

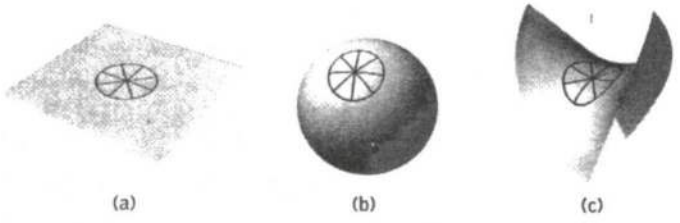
محيط المركبة بأكمله. ولما كان سليم لا يزال يعتبر طول مسطرته مساوياً قدماً واحداً (بسبب عدم وجود حركة نسبية بينه وبينها، فهي له مسطرة اعتيادية طولها قدم واحد)، فإنه سيقيس محيطاً **أطول** مما قسناه نحن. لكن، ماذا عن نصف القطر؟ سيعتمد خالد طريقة القياس ذاتها، وسينقل المسطرة على طول الدعامة نصف القطرية للمركبة، وسنرى من منظور عين الطائر أن نتيجة قياسه تتوافق وما قسناه. يرجع سبب ذلك إلى أن اتجاه المسطرة لا يوازي اتجاه الحركة الآني للمركبة، كما كان الحال عند قياس محيطها، بل هو عمودي عليه، وهي لذلك لا تتقلص باتجاه طولها، وستتوافق نتيجة القياس الذي يجريه خالد لنصف القطر مع قياسنا له.

وسيجد سليم وخالد، عندما يحسبان نسبة طول محيط المركبة إلى طول نصف قطرها، عدداً أكبر ممّا وجدناه وهو ضعفا العدد باي (π)، لأن محيط المركبة قد طال، في حين بقي نصف قطرها ثابتاً. وهذا أمر غريب، إذ كيف يمكن لشيء دائري في عالمنا أن ينقض أو ينتهك ما وصل إليه اليونانيون القدامى من أن نسبة طول محيط أي شكل دائري إلى طول نصف قطره تساوي تماماً ضعفي العدد باي (π).

وقد فسّر أنشتاين هذا التعارض بقوله: إن ما وضعه اليونانيون القدامى صحيح في حالة دوائر مرسومة على سطوح مستوية؛ أما هنا فالأمر شبيه بما تظهره المرايا الملتوية أو المنحنية في مدن الملاهي من تشويه لعلاقات الأبعاد الطبيعية في صورة وجهك المنعكسة عليها. إن رسم دائرة على سطح ملتو أو منحن سوف يشوه علاقات أبعادها الطبيعية، **ولن** تكون نسبة طول محيطها إلى طول نصف قطرها مساوية تماماً ضعفي العدد باي (π).

لنقارن، على سبيل المثال، الدوائر الثلاث المرسومة على الشكل 3-2. إن لها كلها نصف القطر ذاته، إلاّ أن أطوال محيطها **ليست** نفسها: فطول محيط الدائرة (b)، المرسومة على سطح كرة منحن، أقصر من طول محيط الدائرة (a) المرسومة على سطح مستوٍ، لأن الطبيعة المنحنية لسطح الكرة تقرّب الخطوط نصف القطرية للدائرة المرسومة عليها بعضها من بعض، مما يؤدي إلى نقص صغير في طول محيطها؛ أما طول محيط الدائرة (c) المرسومة أيضاً على سطح منحن – له شكل السرج – **فأكبر** من طول محيط الدائرة (a)، لأن الطبيعة المنحنية لسطح السرج تبعّد الخطوط نصف القطرية للدائرة المرسومة عليه بعضها عن بعض مما يؤدي إلى زيادة صغيرة في طول

محيطها. لذلك تكون نسبة طول محيط الدائرة (b) إلى طول نصف قطرها أقل من ضعفي العدد باي (π)، وتكون هذه النسبة في الدائرة (c) أكبر من ضعفي هذا العدد، وهو ما وجدناه أيضاً في حالة مركبة الإعصار الدوّارة. دفعت هذه النتيجة أنشتاين إلى اقتراح فكرة "انحناء المكان" لتفسير انتهاك الهندسة الإقليدية "الاعتيادية"، حيث لا يمكن، ببساطة، لمراقب في مركبة دوّارة أن يطبق مباديء الهندسة المستوية التي تعلّمها طلاب المدارس على مرّ آلاف السنين. بل يجب أن يحلّ محلّها تعميمُها على سطح منحن، كما هو مبين على (c) من الشكل 3-2 [5].



الشكل 3-2: *للدوائر الثلاث (a)، (b)، (c) نصف القطر ذاته. ومع ذلك فإن طول محيط الدائرة المرسومة على الكرة (b)، أقصر من طول محيط الدائرة المرسومة على صحيفة مستوية (a)، في حين أن طول محيط الدائرة المرسومة على سطح منحن على شكل سرج (c) هو الأطول.*

وهكذا أدرك أنشتاين أن ما اعتدنا عليه من علاقات الأبعاد الهندسية التي صنّفها اليونانيون، والتي تلائم أشكالاً "مستوية"، كدائرة مرسومة على صحيفة مستوية **لا تصح** في منظور مراقب متسارع. ورغم أننا لم نعرض إلاّ نوعاً خاصاً فقط من الحركات المتسارعة، فقد بيّن أنشتاين أن ما وصلنا إليه عن التواء المكان يصحّ كذلك في كل ظروف الحركة المتسارعة.

هذا ولا تسبّب الحركة المتسارعة التواءً في المكان فحسب، بل إنها تسبب التواء مماثلاً في الزمان أيضاً. (كان أنشتاين قد ركّز تاريخياً على التواء الزمان أولاً، ثم أدرك لاحقاً أهمية التواء المكان[6]). ويجب ألاّ يفاجئنا تأثر الزمان بالحركة المتسارعة لأن النسبية الخاصة أرتنا بجلاء ووضوح في الفصل الثاني من هذا الكتاب وجودَ وحدة تجمع

بين مفهومَي المكان والزمان، إذ هما محبوكان في كينونة واحدة. وقد لخّصت كلمات منكوفسكي الشاعرية البليغة هذه الوحدة بقوله، في محاضرة ألقاها سنة 1908 عن النسبية الخاصة: "لن يكون هناك بعد اليوم مكان وزمان مستقلان واحدهما عن الآخر، إذ سيفقدان أهميتهما وسيتحولان إلى شبحين باهتين، وسيعطيان باتحادهما معاً كائناً جديداً هو وحده من سيكتب له البقاء، وسيظل محافظاً على استقلاليته"[7]. فالنسبية الخاصة، وعبر حياكتها لمفهومي المكان والزمان معاً في نسيج واحد هو الزمكان، تعلن بلغة تماثل كلمات منكوفسكي الشاعرية في افتقارها إلى الدقة، ولكنها أقرب منها إلى العبارات التي نستخدمها في حياتنا اليومية: "إن ما يصح من أجل المكان يصح أيضاً من أجل الزمان". لكن هذا القول يثير السؤال التالي: ماذا نعني حقيقة بالتواء الزمان، مع العلم أن بوسعنا تصوّر التواء المكان بإعطائه شكلاً منحنياً؟

ولتلمّس الجواب، دعنا نطلب من سليم وخالد اللذين يتابعان لهوهما في مركبة الإعصار، أن يجريا التجربة التالية: يقف سليم على طرف إحدى الدعامات نصف القطرية للمركبة مستنداً بظهره على جدارها الزجاجي، ويحبو خالد نحوه على هذه الدعامة منطلقاً من مركز المركبة. نطلب من خالد أن يتوقف كلّما تقدم عدة خطوات في حبوه ليقارن قراءة ساعته مع قراءة ساعة أخيه سليم، ونتساءل ماذا سيجدان؟ يمكننا التنبؤ بالجواب، من خلال المنظور الساكن لعين الطائر الذي اعتمدناه، والقول بأن ساعتَي الأخوين لن تكونا متوافقتين فيما بينهما، لأنهما يتحركان في المركبة بسرعتين مختلفتين. فسليم، الأبعد عن المركز، يقطع مسافة أطول من أخيه لقضاء دورة واحدة، وبذلك هو يتحرك بسرعة أكبر من سرعته. وتنبئنا النسبية الخاصة بأن تكّات ساعته ستتباطأ أكثر من تباطؤ ساعة أخيه بسبب سرعته الزائدة. ومع اقتراب خالد منه في حبوه على الدعامة (ومن ثمّ تزايد سرعته) فإن تكّات ساعته هو ستتباطأ أيضاً أكثر فأكثر مع ابتعاده عن مركز المركبة لتقترب من معدل تكّ ساعة سليم.

نستنتج من ذلك أن معدّل مرور الزمان، بالنسبة لمراقب في المركبة الدوّارة مثل خالد وسليم، يرتبط بموقعه الدقيق في المركبة، وهو، في حالتنا هذه بعده عن مركزها. وهذا ما نعنيه "بالتواء الزمان". فالزمان يلتوي إذا تغيّر معدل مروره من نقطة إلى أخرى. كما أن خالداً يلاحظ أمراً آخر بالغ الأهمية في مناقشتنا هذه، إذ يشعر كلما حبا

أكثر على الدعامة مبتعداً عن مركز المركبة الدوارة، أن قوة دفع متزايدة تشده إلى خارجها؛ فليست سرعته وحدها هي التي تزداد بل يزداد تسارعه أيضاً. لذلك يترافق تباطؤ تكات الساعة مع ازدياد قيمة التسارع، أو نقول بتعبير آخر إن ازدياد التسارع يسبب التواءً أكبر للزمان.

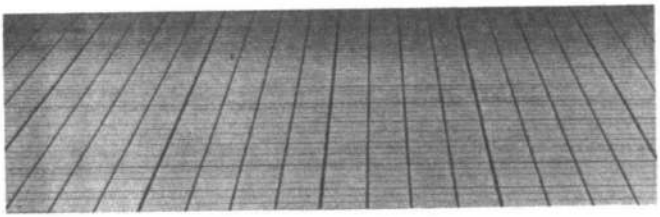
قادت هذه المشاهدات أنشتاين إلى القيام بقفزته الأخيرة. لقد سبق له أن بيّن عدم إمكانية التمييز بين مفهومي الثقالة والحركة المتسارعة؛ وهو يبين الآن ارتباط مفهوم الحركة المتسارعة بالتواء المكان والزمان، لذلك يخلص إلى تقديم الاقتراح التالي حول طبيعة البنية الداخلية "للصندوق الأسود" للثقالة، أو ماهيتها، بغية معرفة آلية عملها: إن الثقالة هي **تعبير** عن التواء المكان والزمان. لنرَ ماذا يعني ذلك.

أسس النسبية العامة

ولتفهّم معنى هذه النظرية الجديدة للثقالة، سنتطلع إليها عن طريق نموذج مألوف هو كوكب الأرض في دورانه حول الشمس. لننظر في هذه المجموعة أولاً من خلال وجهة نظر الثقالة النيوتنية. تمسك الشمسُ الأرضَ بحبل ثقالي يمتد عبر مسافات شاسعة في الفضاء، وتشدها إليها محكمة قبضتها عليها (كذلك تمسك الأرض الشمسَ بهذا الحبل ذاته). أما نظرة أنشتاين لما يحدث فعلاً فمختلفة عن ذلك وسيساعدنا على تفهمها وجود نموذج مرئي للزمكان نستطيع التعامل معه بصورة مريحة. لذلك، سنبسّط المعالجة من خلال أمرين اثنين، يتلخص أولهما في تجاهل الزمان، بصورة مؤقتة، والتركيز على نموذج مرئي للمكان (نعود بعدها وندخل الزمان في مناقشتنا)، ويتلخص الثاني باعتماد فضاء ذي بعدين **اثنين** مماثل للفضاء المكاني ذي الأبعاد الثلاثة، وذلك حتى نستطيع تصوّر ما يجري عن طريق رسم ومعاملة صور مرئية يمكن تقديمها على صفحات هذا الكتاب. وسنرى أن معظم التصورات التي يوصلنا إليها التفكير في إطار هذا النموذج الثنائي الأبعاد يمكن تطبيقها مباشرة في محيطنا الفيزيائي الثلاثي الأبعاد، وبذلك فإن النموذج البسيط الذي سنعتمده يعد وسيلة تعليمية قوية.

وباعتبار هذين الأمرين التبسيطيين، نعرض في الشكل 3-3 تمثيلاً تخطيطياً لمكان مستو محدّد ببعدين اثنين. تعتبر مثل هذه البنية الشبكية وسيلة ملائمة لتحديد موقع ما، كما تحدد شبكة الطرق المواقع في المدينة. والمرء يحدد عنواناً ما في المدينة عبر تحديده

موقعه على شبكة طرق ذات بعدين وكذلك عبر تحديده موقعاً له في البعد الشاقولي الثالث كأن يحدد مثلاً رقم الطابق. إن هذه المعلومة الأخيرة، أي تحديد الموقع في البعد المكاني الثالث، هي ما يلغيه نموذجنا التماثلي ذو البعدين، بغية زيادة التوضيح المرئي.



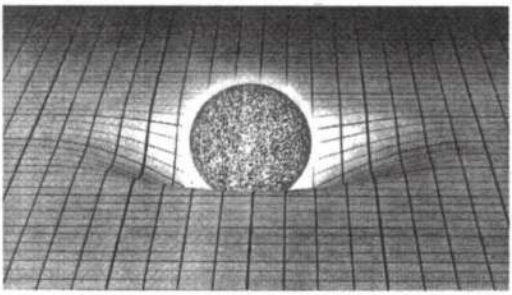
الشكل 3-3: *تمثيل تخطيطي لمكان مستو.*

تصوّر أنشتاين أن المكان يكون **مستوياً** عند غياب أي مادة أو طاقة تؤثر عليه، وأن "شكله" في نموذجنا ذي البعدين، سيكون كسطح طاولة ملساء، أو كالتمثيل التخطيطي المبين على الشكل 3-3. وهذه هي صورة كوننا المكاني كما اعتقدناها عموماً لآلاف السنين. لكن، ماذا يحصل لهذا المكان، في حال وجود شيء كتلي(ثقيل) كالشمس مثلاً؟ كان الجواب، قبل أنشتاين، **لاشيء**. إذ كان يُظن أن المكان (والزمان) ليسا سوى خشبة المسرح الخاملة التي تجري عليها أحداث الكون. إلاّ أن أفكار أنشتاين تقودنا إلى استنتاج مخالف لذلك.

فالجسم الكتلي الثقيل، كالشمس أو أي جسم آخر، يؤثر على الأجسام الأخرى بقوة ثقالية. وقد رأينا في مثال قنبلة الإرهابيين أنه لا يمكن التمييز (أو الفصل) بين القوى الثقالية والحركة المتسارعة؛ كما رأينا في مثال المركبة الدوارة أن الوصف الرياضياتي لحركة متسارعة **يتطلب** وجود علاقات فضاء منحن. وقد خلص أنشتاين من هذه العلاقات والروابط ما بين الثقالة والحركة المتسارعة والفضاء المنحني إلى تقديم اقتراح رائع يقول بأن وجود كتلة، كالشمس، يسبّب **التواء** نسيج بنية المكان حولها كما في الشكل 3-4؛ والأمر هنا شبيه بما تسببه كرة بولنغ من تشويه لسطح مطاطي وضعت عليه. فوجود جسم كتلي ثقيل مثل الشمس يشوه نسيج بنية المكان. أي أن هذا الأخير لم يعد خشبة

المسرح الخاملة التي تجري فوقها أحداث الكون، بل غدا شكله متبدلاً على نحو يستجيب فيه للأجسام التي في جواره.

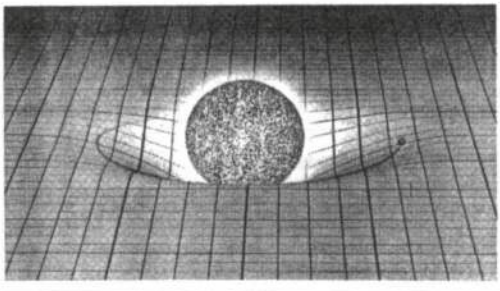
يؤثر هذا الالتواء بدوره على الأجسام الأخرى المتحركة بجوار الشمس، لأن عليها الآن أن تسير في نسيج مكاني مشوّه. لنستعر ثانية التشابه الجزئي مع الغشاء المطاطي وكرة البولنغ، ولنضع محمِل كريات صغيراً على سطح هذا الغشاء ولندفعه عليه بسرعة ابتدائية ما. يعتمد الطريق الذي سيسلكه المحمِل على وجود، أو عدم وجود، كرة البولنغ في مركز الغشاء؛ فإن لم تكن موجودة فإن سطح الغشاء سيكون مستوياً، وسيتحرك محمِل الكريات على خط مستقيم عليه. أما إن وجدت الكرة على سطح الغشاء فإنها ستسبب تشوهه والتواءه، وبذلك سوف يسير المحمل في طريق منحنية؛ فإذا ما زودناه بسرعة ابتدائية مناسبة ووجهناه في اتجاه مناسب، وأهملنا قوى الاحتكاك، فإن المحمِل سيستمر في حركته على الطريق المنحني ذاته حول كرة البولنغ، أو أنه بتعبير آخر "سيتخذ مداراً له حولها". لنطبق هذا التشابه الجزئي على حالة الثقالة.



الشكل 3-4: *يسبب وجود جسم ثقيل مثل الشمس، التواءَ في نسيج بنية المكان مماثلاً، على نحو ما، لما تحدثه كرة بولنغ في سطح مطاطي وُضعت عليه.*

تسبب الشمسُ، ككرة البولنغ، التواءَ النسيج المكاني المحيط بها؛ لذلك فإن حركة الأرض حولها، مثل حركة محمِل الكريّات حول كرة البولنغ، ستتحدد بشكل هذا الالتواء. فإن كانت سرعة الأرض واتجاه حركتها مناسبين، اتخذت لنفسها مداراً حول الشمس. وهذا التأثير على حركة الأرض هو ما نعنيه بكلامنا عن التأثير الثقالي للشمس، كما يبدو على الشكل 3-5. وهكذا فإن الاختلاف بين وجهتي نظر كل من أنشتاين ونيوتن حول

الثقالة، الذي أشرنا إليه في مطلع هذه الفقرة، هو أن أنشتاين، وخلافاً لنيوتن، حدّد لنا **آلية** انتقال الثقالة، فهي تنتقل عبر التواء المكان. والحبل الثقالي الذي يقيد حركة الأرض في مدارها حول الشمس لا ينجم عن تأثير ما، آنيّ وغامض، تسببه الأخيرة، بل هو التواء في نسيج بنية المكان يسبّبه وجود الشمس فيه.



الشكل 3-5: *تبقى الأرض في مدارها حول الشمس بسبب دورانها بمحاذاة وادٍ في النسيج المكاني الملتوي، أو نقول بتعبير أكثر دقة: إن الأرض تسير في الطريق الأقل مقاومة في المنطقة المشوّهة حول الشمس.*

تتيح لنا هذه الصورة فهماً جديداً لخاصتَي الثقالة الأساسيتين، حيث نرى بالنسبة لأولاهما أنه كلما كانت كرة البولنغ أكبر وأثقل، كان التشويه الذي تحدثه في الغشاء المطاطي أكبر؛ وكذلك الأمر في مفهوم أنشتاين للثقالة: فكلما كان الجسم أثقل وأكبر كتلة كان التشويه الذي يحدثه في جواره أكبر، ومن ثمّ ازدادت قوة الجذب الثقالي التي يؤثر بها على الأجسام الأخرى، وهو ما يتوافق والدلالات التجريبية. أما بالنسبة للخاصية الثانية فنرى، كما أن تشوّه الغشاء المطاطي الذي تسببه كرة البولنغ يصبح أصغر فأصغر كلما ابتعدنا عنها، فإن التشوه المكاني الذي يسببه وجود جسم ثقيل ذي كتلة كبيرة كالشمس يتضاءل كلما ابتعدنا عنها. وتتفق هذه النتيجة أيضاً مع مفهومنا عن الثقالة إذ نعلم أن تأثيرها بين أجسام مختلفة يتضاءل مع كبر المسافة التي تفصل بينها.

كما أن محمل الكريات ذاته، يحدث تشويهاً في الغشاء المطاطي، كذلك تحدث الأرض باعتبارها جسماً ثقيلاً (ذا كتلة كبيرة) قائماً بذاته، التواءً في النسيج المكاني حولها (أقل بكثير مما تحدثه الشمس)، وهو ما يسمح للأرض، بلغة النسبية العامة، بإبقاء

القمر في مدار حولها، وبإبقائنا نحن ثابتين مستقرين على سطحها؛ وعندما يلقي مظلّي بنفسه باتجاه الأرض فإنه ينزلق في منخفض في النسيج المكاني أحدثته كتلة الأرض؛وأكثر من ذلك فإن كل واحدٍ منا، بثقله وكتلته، يحدث أيضاً التواءً في بنية المكان في الجوار القريب منه لا يتعدى انبعاجاً صغيراً في النسيج المكاني بسبب الكتلة الصغيرة نسبياً للجسم البشري. وهكذا يتفق أنشتاين مع قول نيوتن بوجود عامل مسؤول عن إحداث الثقالة، ويرقى في مستوى ما يصل إليه عن تحديد طبيعة هذا العامل وماهيته التي تركها نيوتن معلقة لاعتبارات القراء، فيقول: إنها نسيج الكون.

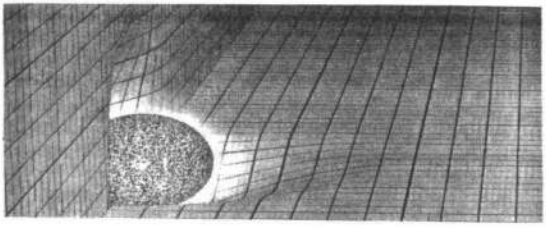
بعض التوضيحات

إن التشابه ما بين النسيج المكاني والغشاء المطاطي وكرة البولنغ مفيد لأنه يقدم لنا صورة مرئية نستطيع منها إدارك معنى التواء النسيج المكاني للكون وتلمّسه. وغالباً ما يستعمل الفيزيائيون هذا التشبيه وسواه لتوجيه أفكارهم حول الثقالة والتقوّس. إلاّ أن هذا التشابه، على فائدته، ليس دقيقاً تماماً، ونورد فيما يلي بعضاً من جوانب قصوره بغية توضيح الأمور.

يرجع الجانب الأول إلى أن التواء النسيج المكاني الذي تحدثه الشمس حولها ليس نتيجة لشدها بقوة الثقالة نحو الأسفل، كما هو حال كرة البولنغ التي تسبب التواء الغشاء المطاطي بسبب انجذابها بقوة الثقالة نحو الأسفل، إذ ليس هناك، في حالة الشمس، جسم آخر "يسبب عملية الشد والجذب هذه". والتواء المكان، كما قال أنشتاين **هو** الثقالة؛ إن وجود جسم ذي كتلة يستدعي، بحد ذاته، استجابة المكان له بالتوائه. وبقاء الأرض في مدارها لا ينجم عن قوة شد ثقالية يسببها جسم خارجي توجّه حركتها عبر منخفضات النسيج المكاني الملتوي، كما هو حال محملِ الكريات على الغشاء المطاطي الملتوي، بل لأن الأرض، وكل الأجسام الأخرى كما بيّن أنشتاين، تتحرك عبر المكان (أو عبر الزمكان، بصورة أدق) على أقصر الطرق الممكنة، أو أسهلها، وهي الطرق الأقل مقاومة. وتكون هذه الطرق منحنية إن كان المكان ملتوياً. ومع أن مثال الغشاء المطاطي وكرة البولنغ يقدم تشابهاً مرئياً جيداً لكيفية توليد جسم ما، كالشمس، التواء في المكان حوله، ومن ثم تأثيره على حركة الأجسام الأخرى، فإن الآلية الفيزيائية لحدوث هذه

التشوهات مختلفة فيما بين الحالتين، إذ تبقى الثقالةُ، في حالة الغشاء المطاطي، في الإطار النيوتني التقليدي، في حين نجدها في حالة الشمس إعادةً لصياغة مفهومها بلغة انحناء المكان.

أما الجانب الثاني في هذا القصور، فمرده كون الغشاء المطاطي ببُعدين، في حين، تُحدث الشمس (والأجسام الثقيلة ذات الكتلة كافةً) التواءً حولها في مكان ثلاثي الأبعاد، وهذا أصعب على التصوّر. تبدو على الشكل 3-6 محاولة لإظهار جانب من هذا الالتواء.



الشكل 3-6: *صورة لجانبٍ من التواء المكان الثلاثي الأبعاد حول الشمس.*

فالمكان حول الشمس سيتعرض **كله**، في أعلاه وفي أسفله وعلى جوانبه إلى التشوه ذاته؛ وستتحرك الأرض، وأي جسم آخر، **في** هذا النسيج المكاني الثلاثي الأبعاد الملتوي. قد تجد هذه الصورة مقلقة بعض الشيء، وتتساءل لماذا لا تضرب الأرض بعنف "الجزء الشاقولي" من المكان المنحني المبين في الصورة. لكن، تذكر أن المكان، وبخلاف الغشاء المطاطي، لا يشكل حاجزاً حقيقياً. فالشبكة المتصالبة الملتوية المبينة في الصورة ليست سوى زوج من الشرائح الرقيقة في المكان الكلي الملتوي، بأبعاده الثلاثة، الذي يغمرك بكلّيتك أنت والأرض وكل شيء آخر فتتحركون فيه بحرّية. وقد تظن أن ذلك يجعل الأمر يبدو بصورة أسوأ، وتتساءل لماذا إذن **لا نشعر** بالمكان حولنا مادام نسيجه يغمرنا؟ لكننا نشعر به من خلال إحساسنا بالثقالة، فهو الوسط الذي تنتقل قوتها عبره؛ ويوضح ذلك ما قاله مراراً الفيزيائي المرموق جوهن ويلر في وصفه الثقالة: "تستحوذ الكتلة على المكان من خلال إعلامه بكيفية انحنائه، ويستحوذ المكان على الكتلة من خلال إعلامها بكيفية تحركها فيه"[8].

أما الجانب الثالث من ذلك القصور فمردّه إلغاؤنا بُعْد الزمان. وقد فعلنا ذلك بغية توضيح الصورة المرئية، لأن من الصعوبة بمكان "رؤية" الزمان، مع أن النسبية الخاصة تقضي باعتبار هذا البعد مثل الأبعاد المكانية الثلاثة المألوفة؛ والتسارع، ومن ثمّ الثقالة، يسبب **التواء المكان والزمان كليهما**، كما رأينا في مثال مركبة الإعصار الدوّارة (علماً بأن رياضيات أنشتاين تبين أن التواء الزمان، في حالة جسم يتحرك بسرعة بطيئة نسبياً مثل حركة الأرض في دورانها حول الشمس، ذو تأثير أكبر على هذه الحركة من تأثير التواء المكان). وسنعود لمناقشة موضوع التواء الزمان في الفقرة بعد التالية.

ومع ما لجوانب القصور الثلاثة هذه من أهمية، فإن بوسعك، إذا ما أبقيتها في خلفية تفكيرك، أن تستشهد بصورة المكان الملتوي الذي تحدثه كرة البولنغ على الغشاء المطاطي كخلاصة حدسية لوجهة نظر أنشتاين الجديدة في الثقالة.

إزالة التعارض

قدّم أنشتاين صورة ذهنية واضحة عن كيفية عمل الثقالة عن طريق إدخاله الزمان والمكان كلاعبين ديناميكيين. ويبقى التساؤل قائماً حول مدى قدرة إعادة صياغة مفهوم الثقالة على إزالة التعارض، الذي سبق وأشرنا إليه، ما بين نظرة نيوتن للثقالة والنسبية الخاصة. ويأتي الرد بالإيجاب وعن طريق التشابه الذي قدمه مثال الغشاء المطاطي. تخيّل محمل الكريّات يتحرك على خط مستقيم فوق هذا الغشاء المستوي بغياب كرة البولنغ. فإذا ما وضعنا الكرة فوق الغشاء فإن حركة المحمل سوف تـتأثر من جراء ذلك، ولكن هذا التأثر **لن يكون آنياً**، إذ لو قدّر لنا أن نصور تتابع ما يجري ثم نعرضه بالسرعة البطيئة، لرأينا أن التشوه الذي أحدثه وضعُ الكرة على سطح الغشاء سينتشر، كما تنتشر الأمواج فوق سطح ماء البركة، حتى يصل إلى مكان محمل الكريّات. ولن تلبث الاهتزازات المؤقتة على السطح المطاطي أن تهدأ، مخلفة وراءها غشاء ملتوياً ساكناً.

يحدث الأمر نفسه في النسيج المكاني؛ ففي غياب أي جسم ذي كتلة عنه، يظل هذا النسيج مستوياً ويبقى أي جسم صغير موضوع عليه إمّا ساكناً أو متحركاً بسرعة منتظمة، حتى إذا ما دخل على المشهد جسم ثقيل، انحنى المكان، ولن يكون هذا الانحناء أو التشوه آنياً، وذلك كما في حالة الغشاء المطاطي، بل سينتشر من موقع هذا الجسم

الثقيل، ليستقر أخيراً على هيئة شكل ملتو ينقل قوة الشد الثقالية التي يؤثر بها هذا الجسم. وكما ينتقل الاضطراب على سطح الغشاء المطاطي بسرعة يحددها تركيب نسيجه، فقد بيّن أنشتاين، وفي إطار النسبية العامة، أن سرعة انتشار الاضطراب في النسيج الكوني **تساوي سرعة الضوء.**

يعني ذلك، في المثال الذي عرضناه سابقاً عن انفجار الشمس وما لذلك من تأثير على حركة الأرض بسبب تغيّر قوة تجاذبهما الثقالي المتبادل، أن هذا التأثير لن ينتقل آنياً. فإذا ما غيّر جسم موضعه، أو إذا ما تعرض لانفجار ما، أدى ذلك إلى إحداث تشوه في بنية النسيج الزمكاني حوله، ينتشر بسرعة الضوء، ممّا يتفق وما تقوله النسبية الخاصة عن أن هذه السرعة هي الحد الأعلى المطلق لكل السرعات. فإذا ما انفجرت الشمس "رأينا" انفجارها من الأرض في اللحظة ذاتها التي نشعر بها بالنتائج الثقالية لهذا الانفجار، وذلك بعد حوالي الثماني دقائق من حدوثه. هكذا يلغي أنشتاين هذا التعارض، فالاضطراب الثقالي يجاري الفوتونات دون أن يسبقها.

العودة ثانية إلى التواء الزمان

تسمح الصورة التوضيحية المبينة في الأشكال 3-2 و3-4 و3-6، بفهم جوهر معنى عبارة "التواء المكان"، حيث "يشوّه" الالتواءُ شكلَ المكان. وقد وضع الفيزيائيون صوراً مشابهة لتوضيح معنى عبارة "التواء الزمان"، إلا أنها جاءت صوراً معقدة يصعب تفسير دلالاتها، مما يحول دون تقديمها هنا. وكبديل عنها، وفي محاولة تهدف لفهم معنى هذا الالتواء الذي تحدثه الثقالة، سنعتمد مثالاً شبيهاً بمـــــا اعتمدناه في مثالنا عن سليم وخالد في مركبة الإعصار.

لنعد لذلك إلى زيارة جورج وجين، السابحين الآن حول الشمس، وليس في أعماق الفضاء الخارجي، وحيث لايزال كلّ منهما يحمل على بذته الفضائية ساعته الرقمية المتواقتة مع ساعة زميله. سنعتبر، للتبسيط، تأثير حقل الشمس الثقالي لوحده، متجاهلين الحقول الثقالية للكواكب الأخرى. لنتخيل أيضاً مركبة فضائية تحوم حول الشمس وقد تدلّى منها حبل طويل يمتد حتى سطحها. يستخدم جورج هذا الحبل ويتدلى عليه باتجاهها، ويتوقف أثناء ذلك، وعلى نحو دوري، ليقارن مع جين معدّل مرور الوقت في

ساعتيهما. يقتضي التواء الزمان، الذي تقول به نظرية أنشتاين في النسبية العامة، أن تسير ساعة جورج بصورة أبطأ من ساعة جين، وأن يزداد هذا التباطؤ شيئاً فشيئاً مع تزايد شدة الحقل الثقالي للشمس، أي مع تزايد اقتراب جورج منها. هذا تماماً هو ما نعنيه بقولنا أن الثقالة "تشوه" الزمان، كما تشوه المكان.

نشير هنا إلى أن ما يجري في هذا المثال، مخالف لما جرى في الفصل الثاني، حين كان جورج وجين يسبحان في الفضاء الخارجي ويتحركان فيه بسرعة ثابتة، واحدهما بالنسبة للآخر، إذ لم يعد لذلك التناظر بينهما من وجود الآن. فجورج، وخلافاً لجين، سوف **يشعر** بقوة الثقالة تزداد عليه تدريجياً، مما يدفعه لإحكام قبضته على الحبل الذي يهبط عليه، وإلى زيادة هذا الإحكام أكثر فأكثر مع ازدياد قربه من الشمس لتفادي انجراره نحوها. وسيتفق مع جين بأن ساعته تسير على نحو أبطأ من ساعتها. وليس في هذا المشهد أي منظور يتيح إمكانية التكافؤ فيما بين الرائدين ويسمح لهما بتبادل دورَيهما بصورة تبدّل أو تعكس تلك النتيجة. تشبه هذه الحقيقة ما سبق وخلصنا إليه في الفصل الثاني، عندما تعرض جورج لتسارع، لدى تشغيل محركه النفاث للّحاق بجين وما أدى إليه ذلك من تباطؤ ساعته بالنسبة لساعتها على نحو واضح لهما معاً. فالإحساس بتأثير حركة متسارعة هو تماماً كالإحساس بتأثير قوة ثقالية. لذلك فإن ساعة جورج بوضعه الحالي الذي يمسك فيه الحبل المتدلّي، تسير بصورة أبطأ من ساعة جين، وكذلك الأمر بالنسبة لكل شيء آخر في حياته.

ويظل هذا التباطؤ الذي يسببه الحقل الثقالي للشمس صغيراً جداً، إذ لو ظلت جين على مسافة مليار ميل من الشمس، فإن معدّل تكّ ساعة جورج، عندما يكون على بعد بضعة أميال منها، سيكون مساوياً 99.9998% من معدّل تكّ ساعة جين، وهذا تباطؤ، على ضآلته[9]. أما لو استطاع جورج النزول على حبل إلى جوار سطح نجم نتروني مسحوق ذي كتلة ككتلة الشمس وكثافة أكبر من كثافتها بمليون مليار مرّة، فإن الحقل الثقالي لهذا النجم سيسبب تباطؤ معدّل تكّ ساعته إلى حوالي 76% من معدّل تكّ ساعة جين. كما تسبّب الحقول الثقالية الأقوى، كتلك التي إلى جوار الثقوب السوداء، تباطؤاً أكبر في حركة الزمن، أي أنها تسبب التواء أكثر شدة للزمان، وهو ما سنعرضه لاحقاً.

التحقق التجريبي من صحة النسبية العامة

تأسر النسبية العامة قلوب دارسيها لأناقتها الجذابة. وقد حاك أنشتاين الثقالة فيها في النسيج الأساسي للكون عندما استبدل، بوجهة نظر نيوتن الميكانيكية الباردة عن المكان والزمان والثقالة، وصفاً هندسياً ديناميكياً؛ فلم تعد الثقالة شيئاً إضافياً خارجياً مفروضاً على الكون، بل أصبحت جزءاً منه ولبنة أساسية من لبناته. فهي روح الحياة تنفثها في المكان والزمان فينحنيان ويلتويان ويتموجان.

وإذا ما تركنا الاعتبارات الجمالية جانباً، فإن الحكم النهائي على أية نظرية فيزيائية يكون من خلال قدرتها على تفسير الظواهر الفيزيائية والتنبؤ بها بدقة؛ وقد اجتازت نظرية الثقالة لنيوتن هذا الاختبار بنجاح كبير، منذ وضعها في أواخر القرن السابع عشر وحتى مطلع القرن العشرين، إذ زوّدتنا، ولاتزال، بتفسيرات دقيقة جداً لما نلاحظه عن حركة كرات مقذوفة في الهواء، أو أجسام ملقاة من أعلى أبراج مائلة، أو عن حركة مذنّبات تندفع حول الشمس، أو كواكب تسير في مداراتها، بالإضافة لما قدّمته من تنبؤات تم التأكد مراراً من صحتها في حالات كثيرة ومتنوعة. لذلك فإن التشكيك بهذه النظرية كان مرده فقط تعارض خاصيتها في النقل الآني لتأثيرات قوى الثقالة مع النسبية الخاصة.

ومع ما للنسبية الخاصة من دور أساسي في فهم طبيعة المكان والزمان والحركة، فإن آثارها وتأثيراتها ضئيلة جداً في عالمنا حيث السرعات مهملة تجاه سرعة الضوء. وكذلك الأمر في الاختلافات الملاحظة ما بين النسبية العامة لأنشتاين (وهي نظرية للثقالة تتوافق والنسبية الخاصة وتنسجم معها) وثقالة نيوتن، فيما يعود إلى الأوضاع الاعتيادية المألوفة، إذ هي تباينات ضئيلة جداً. ولهذه النتيجة جانبان أحدهما إيجابي والثاني سلبي. يكمن الجانب الإيجابي لضآلة هذا التباين في توافقه مع الفكرة القائلة بأن على كل نظرية تُعارض نظرية سبقتها لتحل محلها (كما هو حال النسبية العامة وثقالة نيوتن) أن تتوافق معها بشكل كبير في تفسير ما تفسره من ظواهر الطبيعة؛ ويبدو الجانب السلبي في صعوبة الحكم تجريبياً بين النظريتين، إذ يستدعي التمييز بين نظريتي أنشتاين ونيوتن

إجراء قياسات دقيقة جداً لتجارب حسّاسة جداً فيما تختلفان فيه. إن التنبؤ بموقع سقوط كرةٍ ألقيت في الجو أمر ممكن بكلتا النظريتين، لأن التباين بين النتائج التي تعطيانها هو على حد من الضآلة يتجاوز مقدرتنا على كشفه وتمييزه تجريبياً. لذلك لابد من تحرّي تجـــارب أكثر مهارة تسمح بكشف هذا التمييز. وقد اقترح أنشتاين واحدة من هذه التجارب[10].

إن النجوم تُرى ليلاً ولاتُرى نهاراً، رغم وجودها، لأن بُعدها يجعل ضوء الشمس يطغى على ضوئها فيحجبه؛ وهي لذلك تُرى في حالة الكسوف حيث يحجب القمر مؤقتاً ضوء الشمس فتصبح النجوم البعيدة مرئية. إلا أن وجود الشمس يستمر في لعب دوره حتى في حالة الكسوف. فالضوء الصادر عن النجوم البعيدة يمر في طريقه نحو الأرض بجوار الشمس؛ وهي، تبعاً لنظرية النسبية، تسبب التواء المكان والزمان حولها. وسوف **يؤثر هذا التشويه على الطريق الذي يسلكه ضوء النجم**، فينحرف مساره لأن الفوتونات الصادرة عن نجوم بعيدة تسير في النسيج الكوني؛ فإن كان هذا النسيج ملتوياً تأثرت حركتها به، كما تتأثر حركة أي جسم مادي آخر. ويكبر هذا التأثير كلما اقترب ضوء النجم، المتجه صوب الأرض، من الشمس ويبلغ مداه في الإشارات الضوئية التي تمسّها؛ وسوف يمكّن كسوفها من رؤية هذا الضوء دون أن يحجبه تماماً ضوء الشمس ذاته.

يقاس انحراف مسار الضوء بطريقة بسيطة، إذ ينجم عن انحراف مسار ضوء نجم ما انزياح موقعه، فيبدو، ظاهرياً، في غير موقعه الفعلي؛ ويقاس الانحراف بدقة من خلال مقارنة الموقع **الظاهري** للنجم بموقعه **الحقيقي** الذي تحدده مراقبتنا له ليلاً، وفي غياب تأثير الالتواء الذي تسببه الشمس. يجري هذا القياس عندما يكون كوكب الأرض في موقع ملائم (يلي كسوف الشمس أو يسبقه بحوالي ستة اشهر). وقد استخدم أنشتاين فهمه الجديد للثقالة لحساب زاوية انحراف إشارات ضوئية نجمية تكاد تمسّ الشمس، فوجدها تبلغ 0.00049 درجة (أي 1.75 قوس ثانية، حيث قوس الثانية يساوي 3600/1 من الدرجة). نشير لزيادة الإيضاح أن هذه الزاوية الصغيرة تساوي الزاوية التي تُرى منها قطعة النقد الأمريكية الكوارتر، المنتصبة من على بعد ميلين، إذ كانت تقانات تلك الأيام تسمح بقياس زوايا صغيرة كهذه. ونتيجة لإلحاح السير فرانك دايسون، مدير

مرصد غرينيتش، نظّم السير أرثر إيدينغتون، العالم الفلكي المعروف وسكرتير الجمعية الملكية الفلكية في إنكلترا، بعثة فلكية لزيارة جزيرة البرينسيبي قرب شواطيء أفريقيا الغربية، لوضع ما "تنبّأ" به أنشتاين موضع الاختبار وذلك خلال كسوف الشمس الذي كان يتوقع حدوثه في التاسع والعشرين من شهر أيار (مايو) لعام 1919.

وفي السادس من تشرين الثاني (نوفمبر) من ذلك العام، أي بعد حوالي خمسة أشهر استغرقها تحليل المعطيات والصور المأخوذة أثناء ذلك الكسوف (بالإضافة لصور أخرى له التقطها فريق بريطاني آخر قاده كل من تشارلز ديفيدسون وأندروكروملين في منطقة سوبرال في البرازيل)، أعلن في اجتماع مشترك للجمعية الملكية والجمعية الملكية الفلكية أنه قد تمّ التأكد تجريبياً من صحة "تنبؤ" أنشتاين القائم على النسبية العامة؛ وما لبث نبأ هذا النجاح، الذي قلب كل المفاهيم السابقة عن المكان والزمان، أن انتشر إلى خارج حدود مجتمع الفيزيائيين والعلماء المعنيين، وجعل من أنشتاين شخصية مشهورة في سائر أرجاء العالم. فكتبت صحيفة التايمز اللندنية في صدر الصفحة الأولى من عددها الصادر في السابع من ذلك الشهر: " **ثورة في العلم – نظرية جديدة عن الكون – لقد أطيح بأفكار نيوتن**[11]". وكانت تلك لحظة انتصار أنشتاين.

أُخضعت تأكيدات إيدينغتون على صحة تنبؤات النسبية العامة، إلى تفحّص دقيق وحاسم طيلة سنوات لاحقة تلت إجراء تلك التجربة. وقد أثارت صعوبة تكرارها (لوجود جوانب عديدة ومعقدة في إجراء عمليات القياس) بعض التساؤلات حول مدى وثوقيتها؛ إلاّ أن تجارب متنوعة أخرى أجريت خلال السنوات الأربعين الأخيرة، مستفيدة ممّا تحقق من تقدم تقاني، اختُبرت فيها جوانب عدة من النسبية العامة، أكدّت كلها صحة تنبؤاتها.

ولا يخامِرَنْ أحداً الشكُّ اليوم في أن وصف أنشتاين للثقالة لا ينسجم والنسبية الخاصة فحسب، بل يقود إلى تنبؤات أقرب إلى الدلالات التجريبية من تنبؤات نظرية نيوتن.

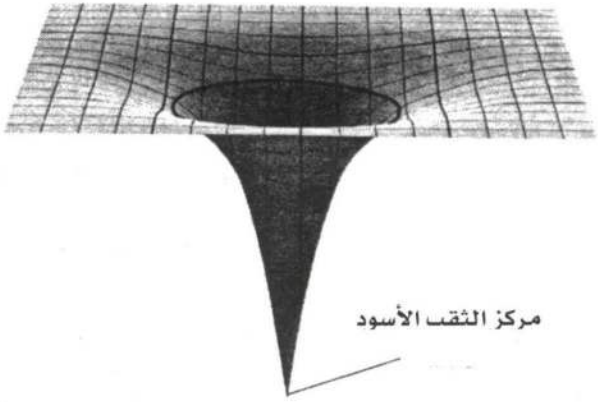
الثقوب السوداء، الانفجار الأعظم وتمدّد المكان

تتجلى آثار النسبية الخاصة عندما تتحرك الأجسام بسرعات كبيرة جداً، في حين تتجلى آثار النسبية العامة في حالة الأجسام ذات الكتل الكبيرة جداً، وحيث يكون التواء الزمان والمكان الناجم عنها كبيراً بالتالي. لنعط مثالين عن ذلك.

يبدو المثال الأول من خلال أعمال الفلكي الألماني كارل شفارتزشيلد الذي درس رؤى أنشتاين للثقالة أثناء حساباته لمسارات قذائف المدفعية على الجبهة الروسية في الحرب العالمية الأولى عام 1916، إذ استطاع، وعلى نحو لافت للنظر، أن يستخدم مفاهيم النسبية العامة للوصول إلى فهم كامل وصحيح للطريقة التي يتلوى بها المكان والزمان في جوار نجم متناظر كروياً، وذلك بعد أشهر قليلة من وضع أنشتاين لمساته الأخيرة عليها. وبعث شفارتز شيلد نتائج دراساته وحساباته من الجبهة الروسية إلى أنشتاين الذي قدمها نيابة عنه إلى الأكاديمية البروسية.

وقد كشفت أعمال شفارتز شيلد، التي أصبحت تعرف الآن بـــ " حل شفارتز شيلد"، عن تطبيقات مذهلة للنسبية العامة، إلى جانب تأكيدها ظاهرة الالتواء الممثـــلة على الشكل 3-5، ووصفها وصفاً رياضيّاتياً دقيقاً لها؛ فبيّنت أنه إذا ما تركزت كتلة نجم ما في منطقة كروية صغيرة جداً بحيث يتجاوز ناتج قسمة كتلته على نصف قطره قيمة خاصة حرجة، فإن التواء الزمكان حوله يكون شديداً لدرجة لا يستطيع معها الإفلات من قبضته الثقالية أي **شيء** يقترب منه اقتراباً كافياً، بما في ذلك الضوء.

وقد دُعيت بداية أمثال هذه النجوم المنضغطة، " **بالنجوم المظلمة**" أو " **الباردة**"، إذ لاشيء، حتى الضوء، يفلت من قبضتها. ثم أطلق عليها جوهن ويلر، بعد ذلك ببضعة سنين، اسماً أكثر جاذبية ودلالة فدعاها **الثقوب السوداء**. فهي ثقوب لأن كل ما يقترب كثيراً منها يسقط فيها دون عودة؛ وهي سوداء إذ لا ضوء يصدر عنها. وقد ترسّخت لها هذه التسمية. تبدو صورة حل شفارتزشيلد على الشكل 3-7.



الشكل 3-7: *يلوي الثقب الأسود النسيجَ المكاني المحيط به ليّاً شديداً بحيث لا يفلت من قبضته الثقالية أي شيء ينفذ إلى داخل أفق حدثه الذي تدل عليه الدائرة السوداء. كما أن أحداً لايعرف بدقة ما يجري عند أعمق نقطة في داخل الثقب، أي في مركزه.*

ومع ما يعرف عن شراهة الثقوب السوداء، فإنها تحرف الأجسام التي تمر بجوارها، على مسافة "آمنة" منها، كما يحرفها أي نجم عادي تمر بجواره، فتتابع مسيرها. أما إذا اقتربت منها الأجسام وجاوزت في ذلك ما يعرف **بأفق حدث** الثقب الأسود*، فإن مصيرها الهلاك، أيّاً كانت بنيتها وتركيبها، إذ سوف تؤثر عليها قوة رهيبة لا ترحم تشدها نحو مركز الثقب، وتعرّضها بالتالي لإجهادات ثقالية تزداد تدريجياً حتى تصبح مدمرة في النهاية. فلو وقعتَ، مثلاً، وقدماك أولاً، داخل أفق حدث ثقب أسود فإنك ستشعر بانزعاج يزداد شيئاً فشيئاً مع اقترابك من مركزه، وسوف تزداد قوته الثقالية المؤثرة عليك بصورة مأساوية، وتكون قوة شدها على قدميك أكبر من قوة شدها على

* اخترنا تعبير "أفق الحدث" من أجل المصطلح event horizon، وذلك انسجاماً مع الصياغة اللغوية، مع أنه يعبّر عن مجموعة النقاط (الحوادث) في متنوّع الزمكان التي تشكّل سطحاً يحدّ منطقةً زمكانية لا يمكن الإفلات منها، وكان يمكن ترجمته بـــ "حادثة (أو حوادث) الأفق". المترجم

رأسك (الأبعد قليلاً عن مركز الثقب)، وسوف يؤدي هذا التباين في قوة الشد إلى مطّ جسمك وتمدّده وتمزّقه إرباً إرباً.

أمّا لو كنتَ أكثر حذراً في تجوالك في جوار هذا الثقب، وحرصتَ على عدم تخطي حدود أفق حدثه، فإن بوسعك الاستفادة منه للقيام بعمل مذهل. تخيّل أن عليك استكشاف ثقب أسود تزيد كتلته بحوالي ألف مرة تقريباً عن كتلة الشمس، وأنك لذلك ستتدلّى على حبل، كما فعل جورج قرب الشمس، إلى ارتفاع إنش واحد عن حدود أفق حدث هذا الثقب. تسبب الحقول الثقالية، كما سبق وذكرنا، التواء الزمان، وهو ما يعني أن معدل مرورك عبره (أي زمن حياتك) سيتباطأ، وسيكون هذا التباطؤ **كبيراً جداً** بسبب شدة الحقل الثقالي للثقب الأسود، وستتكّ ساعتك على نحو أبطأ من ساعة زميلك الذي تركته وراءك على الأرض بحوالي العشرة آلاف مرة. ولو قدّر لك أن تحوم فوق أفق حدث الثقب الأسود تماماً لمدة سنة من زمنك (المتباطئ)، ثم تسلقت الحبل المتدلي ثانية وعدت إلى سفينتك الفضائية فأقلّتك في رحلة عودتك إلى الأرض، فإنك ستجد عند وصولك إليها أن أكثر من عشرة آلاف سنة قد انقضت مذ غادرتَها. وهكذا يكون قد قيّض لك أن تستخدم الثقب الأسود كآلة زمنية سمحت لك بالسفر نحو مستقبل الأرض البعيد.

ولنلمّس أبعاد المقادير الاستثنائية الواردة في هذا المثال، نشير إلى أن نجماً بكتلة ككتلة الشمس تقريباً يغدو ثقباً أسود إذا ما قل نصف قطره عن الميلين (بدلاً من قيمته الفعلية البالغة 450000 ميل). تخيّل، لذلك، الشمس وقد ارتصّت وحُملت ووُضعت على نحو مريح في حي مانهاتن. إن وزن ملء ملعقة شاي من هذه الشمس يعادل وزن جبل إفرست بتمامه تقريباً؛ ولو أردنا أن نجعل من الأرض ثقباً أسود، وجب علينا سحقها ورصّها في كرة، يقل نصف قطرها عن نصف الإنش. لذلك ظل الفيزيائيون مدة طويلة يشككون في إمكانية وجود مثل هذه الأحوال الاستثنائية للمادة، وظن الكثيرون منهم أن الثقوب السوداء ليست إلاّ أوهاماً وتخيّلات تتراءى لفيزيائيين نظريّين أرهقوا أنفسهم بالعمل.

إلا أن أدلة وبراهين تجريبية متعددة أخذت تتزايد وتتكاثر خلال العقد الأخير جميعها تؤكد على وجود هذه الثقوب السوداء التي، وإن كانت لا تُرى عند مسح السماء بالتلسكوبات، فإنها تلاحَظ بما لها من أثر. لذلك يبحث الفلكيون عن هذه الثقوب من خلال تحرّيهم وتقصّيهم عن سلوك غير مألوف تبديه نجوم اعتيادية مصدرة للضوء تقع تماماً على تخوم أفق حدث ثقب أسود. فعندما تسقط سحب من مزيج من غاز وغبار نجمي من الطبقات الخارجية لواحد من هذه النجوم القريبة من أفق الحدث نحوه فإنها تتسارع حتى تقترب سرعتها من سرعة الضوء. وسوف يولّد الاحتكاك ما بين جسيمات هذا المزيج، التي تتحرك بسرعات هائلة في دوّامة مادية مضطربة، كميات هائلة من الحرارة تسبّب توهجه وإصداره ضوءاً مرئياً وأشعة سينية. وستتمكن هذه الإشعاعات من الإفلات من قبضة الثقب الأسود لوقوعها مباشرة خارج أفق حدثه، وستنتقل عبر الفضاء ممّا يتيح لنا إمكانيةً مباشرةً لملاحظتها ودراستها. تسمح النسبية العامة بالتنبؤ بما لإصدارات الأشعة السينية هذه من خصائص، لذلك فإن ملاحظتنا لها (أي للخصائص) تعد دليلاً قوياً، وإن كان غير مباشر، على وجود الثقوب السوداء. نذكر، على سبيل المثال، وجود أدلة متزايدة تشير إلى وجود ثقب أسود ثقيل جداً في قلب مجرتنا، درب التبانة، أثقل من الشمس بحوالي مليونين ونصف المليون مرة. وهذا الثقب، على ضخامته، يبدو باهتاً وضئيلاً تجاه ما يعتقد الفلكيون بوجوده من ثقوب سوداء، تزيد كتلتها عن كتلة الشمس **بمليارات** المرات، في قلب الكوازر المتبعثرة في أرجاء النظام الكوني والتي تضيء على نحو مدهش.

توفي شفارتز شيلد وهو في الثانية والأربعين من عمره، وبعد أن قدّم حلّه الشهير بأشهر عدة، جرّاء إصابته بمرض جلدي أصابه على الجبهة الروسية. وقد أماط تعامله مع نظرية الثقالة لأنشتاين، القصير الأمد للأسف، اللثام عن واحد من أكثر مظاهر عالمنا الطبيعي غرابة وغموضاً.

أما المثال الثاني الذي تتجلى فيه النسبية العامة مظهرة إمكاناتها وقدراتها فذو صلة بأصل الكون وتطوره عبر الزمان. إذ بيّن أنشتاين، كما سبق ورأينا، أن المكان والزمان يستجيبان بالتوائهما لوجود الكتلة أو الطاقة، وأن هذا الالتواء يؤثر على حركة الأجسام الكونية الأخرى التي تتحرك في جواره. تؤثر حركة هذه الأجسام بدورها، بما لها من

كتلة وطاقة، على الزمكان فتلويه، ويعود هذا الالتواء فيؤثر بـــدوره على حـــركة الأجسام... وهكذا، على نحو تتواصل فيه الرقصة الكونية المترابطة الأجزاء. وقد تمكن أنشتاين، عن طريق معادلات النسبية العامة التي تجذّرت وبزغت في أفكار هندسية عن فضاءات منحنية، كان قد ابتدعها أصلاً رياضيّاتي القرن التاسع عشر العظيم جورج برنارد ريمان (وسنعود للحديث عنه لاحقاً)، من وصف التأثيرات المتبادلة بين المكان والزمان والمادة بصورة كمية. وعندما طبق معادلاته على حالة الكون بأكمله، خارج إطار بنية معزولة فيه مثل حالة كوكب أو مذنّب في مدار حول نجم، خلص إلى نتيجة مذهلة أدهشته: إن **حجم الكون المكاني يتغير مع الزمن.**

يعني ذلك أن النسيج الكوني لا يمكن أن يبقى على حاله، فهو إمّا إلى تمدّد أو إلى تقلّص. ويبدو ذلك واضحاً من خلال معادلات النسبية العامة.

صعُب، على أنشتاين نفسه، تقبّلُ مثل هذه النتيجة. لقد قلب أنشتاين مفاهيمنا عن طبيعة الزمان والمكان، وهي مفاهيم دعمتها التجارب على مر آلاف السنين، ولكن مفهوم الكون السرمدي والثابت أبداً كان راسخاً لدرجة أن أنشتاين، على ما يتمتّع به من فكر ثوري خلاّق، لم يرضَ التخلي عنه فعمد إلى تعديل معادلاته على نحو يجنبها الوصول إلى هذه النتيجة عن تبدل حجم الكون، وذلك بإدخال حدّ إضافي إليها سماه **الثابت الكوني**، وعاد بنا بذلك إلى طمأنينة الإقرار بوجود عالم ثابت غير متبدل. ولم تمض اثنتا عشرة سنة على ذلك حتى عاد الفلكي الأمريكي إدون هَبّل ليؤكد تجريبياً، وعن طريق قياسات دقيقة أجراها على مجرات بعيدة، فكرة **تمدد الكون واتساعه.** عندها عاد أنشتاين إلى معادلاته الأصلية داعياً تغييره المؤقت لها "أكبر حماقة ارتكبها في حياته"[12] (وهذه قصة صار يُتندر عليها في حوليات العلوم). لقد تنبأت نظرية أنشتاين بتمدد الكون، رغم عدم تقبّله الأوّلي لهذه النتيجة. ومن المفيد أن نذكر هنا أن عالم الأرصاد الجوية الروسي ألكسندر فريدمان كان قد استخدم في أوائل عشرينيات القرن العشرين، أي قبل إجراء هَبّل قياساته بعدة سنين، معادلات أنشتاين الأصلية، وبيّن بدقة أن سائر المجرات تُحمل على طبقة أساسية من نسيج مكاني ذي بنية متمددة بحيث تبتعد هذه المجرات بعضها عن بعض بسرعة. تدعم هذه النتائج، كما تدعم ملاحظات هَبّل وسواها، النتيجة المذهلة التي

أوصلت إليها النسبية العامة. وبذلك يكون أنشتاين قد حقق عبر تقديمه تفسيراً لتمدد الكون، واحداً من أعظم الإنجازات العقلية على مر العصور.

يؤدي تمدد النسيج المكاني إلى تزايد المسافات الفاصلة بين المجرّات السابحة في الفضاء الكوني. لننظر إلى الأمر من جانبه المقابل، أي لنتطلع إلى التطور الزمني الحاصل بالرجوع عبر الزمن حتى لحظة نشوء الكون. سيتقلص هذا النسيج وينكمش على ذاته مقرباً المجرات بعضها من بعض وعاملاً على زيادة انضغاطها ومن ثمّ على رفع درجة حرارتها وذلك على نحو مذهل تبدأ معه النجوم بالتحطّم والتحلّل مشكلة بلازما بدائية حارة من مكونات المادة الأولية. ومع استمرار هذا النسيج بالانكماش والتقلص، يزداد ارتفاع درجة الحرارة على نحو كبير، وتزداد معه كثافة البلازما الأولية. فإذا ما عدنا القهقرى ابتداءً من عمر الكون المرئي كما نعرفه اليوم، أي حوالي 15 مليار سنة، فإن حجم هذا الكون سيتقلص أكثر فأكثر، وستنضغط المادة التي تكوّن **كل شيء** فيه: كلّ سيارة وكل بناء وجبل على أرضنا، والأرض نفسها والقمر وزحل وعطارد وجميع الكواكب الأخرى، والشمس وكل نجم مثلها في مجرة درب التبانة، ومجرة الأندروميدا (المرأة المسلسلة)، بنجومها البالغ عددها المائة مليار نجم تقريباً، وكذلك جميع نجوم المجرات الأخرى التي يزيد عددها على المائة مليار مجرة، كل هذا سينضغط وسيرتص في ملزمة كونية لتبلغ كثافته حداً رهيباً. وإذا ما ذهبنا أعمق وأبعد في هذا الماضي السحيق، فإن الكون برمته سينسحق فيغدو بحجم برتقالة فخوخة فحبة بازلاء فحبة رمل فأصغر وأصغر من ذلك. وإذا ما تابعنا دربنا ووصلنا، بالاستقراء، إلى لحظة "نشوء الكون وبدايته"، فإننا سنراه **كنقطة** سُحقت فيها المادة والطاقة كلتاهما فبلغت كثافتها ودرجة حرارتها قيماً لا يمكن تخيلها. ويعتقد أن كرة نارية كونية، وهي الانفجار الأعظم قد انبثقت من هذا المزيج المتطاير المتفجر حاملة في ثناياها البذور التي تَشكّل الكونُ منها وتطور حتى وصل إلى حالته الراهنة التي نعرفها.

إن الصورة المرتسمة في أذهاننا عن الانفجار الأعظم على أنه انفجار كوني يطلق محتوى الكون المادي كما يطلق انفجار القنبلة شظاياها، هي صورة مفيدة إلا أنها مضللة بعضَ الشيء؛ فانفجار القنبلة يحدث في موقع محدّد **في المكان** وفي لحظة معينة **من**

الزمان، وتنطلق الشظايا في الجوار "حوله". أما في حالة الانفجار الأعظم فلا جوار "حوله". إن محتويات الكون المادية ترتص كلها عندما نعود به في طريقنا إلى لحظة بدايته، لأن **المكان كله** يأخذ بالانكماش؛ وعندما نتحدث عن حجمه الذي يصبح بحجم البرتقالة فحجم حبة البازلاء فحجم حبة الرمل، فإنما نصف **الكون بأكمله**، وليس شيئاً فيه، حتى إذا ما وصلنا إلى نقطة البداية لم يعد هناك وجود "لمكان" خارج هذه النقطة – القنبلة. وليس الانفجار الأعظم سوى إطلاق هذا "المكـــان" المـــرتص وتحريره فانتشاره. ولا يزال هذا الانتشار ممتداً إلى يومنا هذا، كانتشار موجة مدّية* تحمل معها المادة والطاقة إلى يومنا هذا.

هل النسبية العامة صحيحة؟

لم تظهر كل التجارب المجراة في إطار مبادىء النسبية العامة، وباعتماد سائر التقانات المتاحة، ما يخالف هذه المبادىء؛ والزمن وحده كفيل بتأكيد ذلك أو بنفيه، وذلك من خلال ما قد يحمل معه من تقانات جديدة أكثر دقة ونجاعة. وستبقى هذه النظرية، مع احتمال قيام ما يعارضها تجريبياً، تقدم وصفاً تقريبياً لكيفية عمل الطبيعة. إن الاختبار المنهجي للنظريات العلمية بوسائل تجريبية تزداد دقتها يوماً بعد يوم هو واحد من طرق تقدم العلم، إلاّ أنه ليس الطريق الوحيد. لقد رأينا أن البحث عن نظرية جديدة للثقالة لم يكن نتيجة دحض تجريبي لنظرية نيوتن، بل كان لتعارضها مع **نظرية** أخرى هي نظرية النسبية الخاصة. ولم يتم التعرض إلى ما في نظرية نيوتن من قصور تجريبي إلاّ بعد وضع النسبية العامة كنظرية منافسة لها والبحث بالتالي عن بعض الأمور الدقيقة، ولكن القابلة للقياس، بحيث نستطيع الحكم تجريبياً بين النظريتين المختلفتين. لذلك فإن التناقضات النظرية الضمنية يمكن أن تلعب دوراً أساسياً في تقدم العلم لا يقل أهمية عن دور المعطيات والدلالات التجريبية.

---

* الموجة المدّية هي موجة بحرية شديدة الارتفاع تعقب الزلازل أحياناً. المترجم

وقد واجهت الفيزياء خلال نصف القرن المنصرم تعارضاً نظرياً آخر لا يقل أهمية عن تعارض ثقالة نيوتن والنسبية الخاصة. فالنسبية العامة، كما يبدو، لا تنسجم على نحو أساسي مع نظرية أخرى تم التأكد بامتياز من صحتها، وهي **نظرية الكمّ**. ونكتفي هنا بالقول إن هذا التعارض حال بين الفيزيائيين وفهم ما يحدث فعلاً للزمان والمكان والمادة عندما تسحق كلها، بكل ما تحمله هذه الكلمة من معنى، في لحظة الانفجار الأعظم وفي مركز الثقب الأسود. ولكن، بصورة أعم، يدل هذا التعارض على قصور أساسي في فهمنا للطبيعة. وقد استعصى حلّ هذا التعارض رغم المحاولات الجمّة التي بذلها أعظم الفيزيائيين النظريين، مما جعله يستحق بحق ما وُصف به من أنه **المشكلة الرئيسية** في الفيزياء الحديثة. يقتضي فهم هذا التعارض تآلفاً مع بعض الخصائص النظرية الأساسية لنظرية الكم، وهو ما سنعرضه فيما يلي.

الفصل الرابع

غرائب مجهرية

يعود جورج وجين إلى الأرض وهما يشعران ببعض التعب بسبب رحلتهما عبر النظام الشمسي، ويتوجهان إلى مقهى يحمل اسماً غريباً هو " إتش – بار" (H-Bar) لتناول بعض المرطبات المنعشة علّها تعيد إليهما بعض الراحة من عناء رحلتهما وإقامتهما في الفضاء الخارجي. يطلب جورج كأساً من عصير البابايا المثلج ويطلب لجين كأساً من الفودكا، ويلقي بنفسه على كرسي ويدفعه للوراء شابكاً يديه خلف رأسه. ثم يأخذ سيجاراً ويشعله ليستمتع بتدخينه؛ وما إن يهم بسحب نفس عميق حتى يُصعق إذ يرى السيجار وقد اختفى، فيظن أنه سقط من بين أسنانه على نحوٍ ما، فيعتدل في جلسته ليبحث عنه وعمّا يكون قد أحدثه من ضرر في قميصه أو في بنطاله. لكن، لا أثر للسيجار، ولا أثر أيضاً لمثل هذا الضرر. تثير تحركات جورج وانفعالاته اهتمام جين فتبدأ تبحث معه، وسرعان ما ترى السيجار ملقىً على طاولة خلف كرسيه. ويعجب جورج، ويتساءل: " كيف أمكن للسيجار أن يسقط خلفي وكأنه فر من خلال رأسي، دون أن يترك وراءه أي حروق على لساني أو يحدث أي ثقب في رأسي؟ وتتفحصه جين بدقة وتؤكد له أن لسانه ورأسه سليمان لم يلحقهما أي أذى. وعندما يُحمل إليهما ما طلباه من شراب يهزان كتفيهما بلا مبالاة ويعزوان وقوع السيجار خلف جورج إلى أحد أسرار الحياة الصغيرة. لكنّ غرائب المقهى تتوالى، إذ يرى جورج مكعبات الثلج في كأس شراب البابايا وقد أخذت تتراقص فيه مصطدمة بعضها ببعض وكذلك بجدران الكأس، وكأنها سيارات تصادم في حلبة مدينة ملاه تعج بالسيارات؛ وترى جين الأمر ذاته في مكعبات الثلج في كأس شرابها، الذي يعادل حجمه نصف حجم كأس جورج تقريباً، إذ تتحرك المكعبات وتتصادم وتكون أكثر جلبة مما في كأس جورج؛ ولا يستطيع الاثنان أن يميزا هذه المكعبات التي يتداخل بعضها ببعض مشكلة كتلة ثلجية غير واضحة المعالم. ويستمر توالي غرائب المقهى حين يرى جورج وجين أن إحدى قطع الثلج قد **مرت عبر**

جدار الكأس ووقعت على الأرض، ويمسكان بالكأس ويتفحصانه فيجدانه سليماً لم يخدش مما يجعل الأمر يبدو وكأن مكعب الثلج قد مر من جدار الكأس دون أن يتسبب بكسره. ومرة أخرى يقول جورج: "إنها هلوسات ما بعد رحلة السير في الفضاء"، ويرشف الاثنان ما في كأسيهما بصعوبة بسبب حركة مكعبات الثلج فيهما، وينهضان لينطلقا إلى دارهما ينشدان فيها بعض الراحة التي تعيد الصفاء إلى ذهنيهما. وإذ يهمان بالخروج من المقهى لا يلحظان أنهما أخطأا الطريق فلم يتوجها نحو بابه بل سارا باتجاه رسمة لباب على جداره ومرّا منها. ولا يستغرب ذلك عمّال المقهى ورواده إذ يبدو أنهم اعتادوا على رؤية زبائنهم يمرون عبر الحائط.

كان العالِم الفيزيائي الألماني ماكس بلانك أول من سلّط شعاعا من نور، منذ حوالي قرن من الزمن، على عالَم ميكانيك الكم، هذا العالَم الذي يرى هذه الأحداث الغريبة وغير المألوفة طبيعيةً لا يحتاج تفسيرها إلى القول بوجود قوى غريبة وغامضة، عندما تصغر مقاييسها وتغدو في مجال العالم المجهري، إذ أنها صورة أو نموذج لما يجري في عالم صغرت مقاييسه وأبعاده إلى حدٍ فائق الصغر.

الإطار الكمومي

يُعد ميكانيك الكم الإطارَ المفاهيمي الذي نرى منه الخصائص المجهرية للكون؛ وكما اقتضى اعتماد نظريتي النسبية الخاصة والعامة إدخال تغييرات جذرية على نظرتنا للكون إذا ماتحركت فيه الأجسام بسرعات بالغة العظم (النسبية الخاصة)، أو إذا ما كانت ذات أثقال بالغة العظم أيضاً (النسبية العامة)، فإن ميكانيك الكم ينبئ بأن يكون للكون خصائص غريبة أيضاً إذا ما كانت الأجسام فيه بمقاييس بالغة الصغر، كأن تكون أبعادها من مرتبة الأبعاد الذرية أو ما دونها. وقد كتب فاينمان، وهو واحد من أشهر من عملوا في مجال ميكانيك الكم، ما يلي وذلك في سنة 1965 :

" أتى حين قيل فيه أن هناك اثني عشر رجلاً فقط في العالم يفهمون النظرية النسبية؛ ولا أظن ذلك صحيحاً بل أقول كان هناك في وقت ما رجل واحد يفهم هذه النظرية لأنه كان الوحيد الذي أمسك بزمامها قبل أن يكتب عنها؛ وعندما كتب فَهمَها، بطريقة أو بأخرى،

كثيرون سواه يزيد عددهم بالتأكيد عن الاثني عشر. إلاّ أنني أقول، من جهة أخرى وبكل ثقة، أن ليس من أحد في العالم يفهم ميكانيك الكم"[1].

مرت أكثر من ثلاثة عقود على هذا القول، لكنه لا يزال يصلح حتى يومنا هذا. وقد أراد فاينمان أن يقول به أنه رغم ما اقتضته النسبية بنظريتيها من إجراء مراجعة جذرية لكيفية رؤيتنا العالمَ، فإن رؤيتها الجديدة وغير الاعتيادية لطبيعة الزمان والمكان تتأتى من خلال استنتاج دقيق ومنطقي بمجرد قبولنا الأسس التي تقوم عليها. فلو تأملْت بتمعن كافٍ ما ذكر في الفصلين السابقين عن عمل أنشتاين، أدركتَ، ولو للحظة وجيزة، حتمية الاستنتاجات التي ذكرناها فيهما. أما ميكانيك الكم فأمر آخر. لقد وضعت له منذ حوالي العام 1928 قواعد وعلاقات رياضيّاتية كثيرة استخدمت للوصول إلى أكثر **التنبؤات** في تاريخ العلوم دقة وصواباً. لكن حقيقة الأمر تكمن في أن استخدام هذه القواعد والعلاقات التي وضعها "الآباء المؤسسون" للنظرية، والتي تعد وسائل حسابية يمكن تطبيقها مباشرة، لا يعني أبداً أن من استخدموها قد فهموا حقاً **ماذا** تعني **ولماذا** تعمل. لذلك وبخلاف نظرية النسبية، فإن عدداً قليلاً من الناس، إن كان هناك فعلاً مثل هذا العدد، تمكن من فهم **كنه وجوهر** ميكانيك الكم.

ماذا يعني ذلك؟ هل معناه أن الكون يعمل، على المستوى المجهري، بطرق غامضة وغير مألوفة لا يستطيع معها العقل البشري، الذي تطور عبر الزمان ليتلاءم مع ظواهر الحياة اليومية بمقاييسها التي نعرفها، أن "يفهم حقيقة ما يحدث"، أم معناه أن الفيزيائيين وضعوا صياغة معقدة جداً لميكانيك الكم تخفي طبيعة الحقيقة الفيزيائية، رغم نجاحها في تقديم شروح وتفسيرات لعدد من الظواهر. ولا يملك أحد الإجابة عن ذلك. وقد يحمل المستقبل معه شخصاً ذكياً نافذ البصيرة، ذا رؤية واضحة توصله إلى وضع صياغة جديدة يجيب بها عن تساؤلات **ماذا** و **لماذا** حول ميكانيك الكم، وقد لا يستطيع الإجابة عنها. إن كل ما نستطيع تأكيده اليوم هو أن ميكانيك الكم يرينا، على نحو جلي لا لبس فيه، أن عدداً من المفاهيم الأساسية اللازمة لفهم حقيقة ما يجري في العالم حولنا، تصبح **لاغية ولا معنى لها** إذا ما قصرنا اهتمامنا وركزناه فقط على ما يجري على المستوى المجهري. وهكذا نخلص إلى القول بأن علينا أن نعيد النظر بلغتنا وبطريقة تفكيرنا إذا ما أردنا فهم وتفسير ما يجري في الكون على المستويين الذري ومادونه.

وسنقدم في الفقرات التالية أسس هذه اللغة الجديدة ومبادئها، كما سنقدم بعض المفاجآت الرائعة التي تقتضيها. لكن لو رأيت ميكانيك الكم من خلالها أمراً غريباً يدعو إلى الضحك أحياناً فلا يفاجئك ذلك، بل ضع نصب عينيك أمرين اثنين، أولهما أن سبب تقبل ميكانيك الكم، عدا حقيقة كونه نظرية رياضيّاتية مترابطة، هو ما يؤدي إليه من استنتاجات وتنبؤات تم التحقق من صحتها بصورة ممتازة. فلو التقيت مثلاً بشخص أخبرك عن عشرات ومئات الأمور الشخصية عن طفولتك وعن عائلتك وبكثير من التفاصيل، فإنك لن تستطيع القول بأنه ليس أخاك الذي ضيعته منذ زمن طويل. أما الأمر الثاني فهو أنك لست الوحيد في نظرتك الغريبة هذه لميكانيك الكم. لقد كان لبعض أكثر الفيزيائيين وقاراً في التاريخ مثل هذه النظرة، فقد رفضه أنشتاين جملة وتفصيلاً، وقال عنه نيلز بوهر (وهو أحد رواده الأساسيين ومن أقوى أنصاره) ذات مرة: إن لم يصبك الدوار أحياناً وأنت تفكر بميكانيك الكم فإن معنى هذا أنك لم تفهمه حقيقةً.

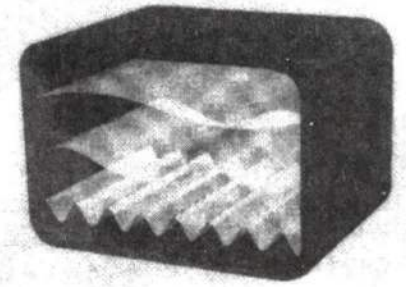
الجو حارٌّ جداً في المطبخ

بدأ التوجه نحو عالم ميكانيك الكم إثر طرح لغزٍ محيّرٍ. تخيّل أنك عزلت الفرن في مطبخك عزلاً تاماً وضبطت درجة حرارته على الدرجة 400° فهرنهايت مثلاً، ثم انتظرت الوقت الكافي حتى يسخن. يولّد تسخين جدران الفرن في داخله أمواجاً من الإشعاع حتى لو كان قد فُرّغ تماماً من الهواء قبل تشغيله، ويكون هذا الإشعاع، بمظهرَيه الضوئي والحراري، على شكل أمواج كهرطيسية كالتي تصدر عن الشمس أو التي يصدرها مِحراك جمر حديدي متوهج.

هنا يكمن اللغز. إن الأمواج الكهرطيسية تحمل الطاقة معها، والحياة على أرضنا تعتمد بصورة أساسية على الطاقة الشمسية التي تحملها إليها أمواج كهرطيسية قادمة من الشمس. لذلك اهتم الفيزيائيون في مطلع القرن العشرين بحساب الطاقة الكلية التي يحملها الإشعاع الكهرطيسي المتولد في داخل فرن مسخن إلى درجة حرارة ما، وتوصلوا، باستخدام طرائق حسابية معروفة بصحتها،إلى نتيجة مضحكة، وقد تبدو سخيفة، مؤداها أن الطاقة الكلية في داخل الفرن **لا متناهية** في كبرها أياً كانت درجة حرارته.

لا تبدو هذه النتيجة مقبولة لأحد. فالفرن قد يحتجز مقادير كبيرة من الطاقة، لكنه لن يحتجز، بالتأكيد، مقداراً لا متناهياً منها. ولفهم كنه الحل الذي قدمه بلانك لهذه المسألة،

ينبغي أن ننظر إليها بشيء من التفصيل. تقول نظرية ماكسويل في الكهرطيسية، أن الإشـــعاع المتولـــد في داخـــل الفرن يكون على شكل أمواج ذات عدد صحيح من الذُرى والأغوار تتسع لها تماماً المسافة الفاصلة بين جدارين متقابلين فيه. وتبدو على الشكل 4-1 بعض أنماط هذه الأمواج التي يصفها الفيزيائيون بثلاثة وسطاء أو مقادير هي طول الموجة وتواترها وسعتها.



الشكل 4-1: *تقول نظرية ماكسويل بأن لأمواج الأشعة المتشكلة في داخل الفرن أعداداً صحيحة من الذرى والأغوار تشغل تماماً المسافة الكائنة بين جدارين متقابلين فيه.*

فطول الموجة، أو الطول الموجي، هو المسافة بين ذروتين (أو غَورين) متتاليين فيها، كما يبدو على الشكل 4-2. ويصغر هذا الطول مع تزايد عدد ذرى الأمواج بين جداري الفرن المتقابلين الثابتين.



الشكل 4-2: *الطول الموجي هو المسافة بين ذروتين (أو غورين) متتاليتين في الموجة؛ أما سعتها فهي أقصى ارتفاع لذروتها أو انخفاض لغَورها.*

أما **تواتر** الموجة فهو عدد الدورات الاهتزازية في الثانية الواحدة، بذراها وأغوارها. يتناسب تواتر الموجة تناسباً عكسياً مع طولها الموجي، بحيث توافق الأطوالَ الموجية الكبيرة تواتراتٍ منخفضة، والعكس بالعكس. يمكنك ملاحظة هذه النتيجة إذا ما أمسكتَ بطرف حبل ثبت طرفه الآخر إلى جدار؛ فعندما تحرك يدك حركة خفيفة متأنية من الأعلى الى الأسفل وبالعكس، يهتز طرف الحبل الذي تمسكه بها اهتزازاً خفيفاً مولداً موجة طويلة منخفضة التواتر لأن هذا الأخير يتوافق وعدد حركات يدك صعوداً وهبوطاً في ثانية واحدة؛ أما إذا رغبت بتوليد موجات ذات طول موجي قصير، فإن عليك أن تزيد من تواتر حركة يدك، وبذلك تتولد أمواج ذات تواتر مرتفع.

أما **سعة** الموجة فهي طول أقصى بعد لارتفاع ذروتها أو أدناها لانخفاض غَورها، كما يبدو على الشكل 4-2.

وإذا ما وجدتَ مفهوم الموجة الكهرطيسية هذا مجرداً على نحو ما، فإننا نعرض أمامك مثالاً جيداً عبر موجات وتر الكمان، أي من الأمواج التي تتشكل عند النقر على الوتر، وهي موجات ذات تواترات متباينة، وبذلك تتوافق مع إشارات موسيقية مختلفة تزداد حدة مع ارتفاع تواتر الموجة. تتحدد سعة الموجة التي يصدرها وتر الكمان بشدة النقر عليه، وكلما ازدادت هذه الشدة أي ازدادت الطاقة المبذولة لذلك، ازدادت سعة الاضطراب الموجي وكانت النغمة الموسيقية الصادرة أكثر دوياً ؛ في حين ينخفض صوت النغمة إذا ما نقر على الوتر بقوة أقل، إذ تكون سعة الاضطراب الموجي عندها أقل أيضاً، أي أن طاقة الموجة تتناسب مع سعتها. وقد حدد الفيزيائيون، باستخدام علاقات ترموديناميك القرن التاسع عشر، مقدار الطاقة التي تضخّها (أو تحمّلها) جدران الفرن الساخنة للأمواج الكهرطيسية المتشكلة فيه، وذلك لكل موجة متاحة، أي لكل طول موجي متاح، وهي الشدة التي ستنقر بها هذه الجدران على كل موجة متشكلة، وتوصلوا الى القول بأن هذه الأمواج، **وبقصر النظر عن أطوالها الموجية**، تحمل كلها المقدارَ ذاته من الطاقة، (الذي يتحدد بدقة من معرفة درجة حرارة الفرن)؛ أو نقول بتعبير آخر إن الأنماط الموجية المتاح تشكلها في داخل الفرن، تتساوى فيما بينها بما تحمله من طاقة.

تبدو هذه النتيجة مثيرة للاهتمام، للوهلة الأولى، ودون أية تداعيات أو نتائج ثانوية لها. إلاّ أنها ليست كذلك في الحقيقة، لأنها تحمل في ثناياها نهاية ما أصبح يعرف بالفيزياء التقليدية. ونرى السبب في ذلك إذا ما تذكّرنا أن الشرط الذي فرضناه على الأمواج الكهرطيسية المتشكلة في داخل الفرن، من ضرورة تملكها عدداً صحيحاً من الذرى والأغوار، يستبعد تشكيلة كبيرة جداً من الأنماط الموجية التي لا تتفق معه؛ إلا أنه يبقي، مع ذلك، عدداً لا نهائياً من الأنماط المتاحة الموافقة لأمواج أكثر فأكثر تراصاً. ولما كانت هذه الأنماط، على تباينها، تحمل المقدار ذاته من الطاقة، ومن ثم فإن أعداداً لا نهائية منها ستحمل مقداراً لا متناهياً في الكبر من الطاقة، وهو ما سبق أن وصفناه بأنه نتيجة مضحكة إلى حد السخف، إذ تعني أن الطاقة الكلية في داخل الفرن ستكون لا متناهية في كبرها أياً كانت درجة حرارته. وهكذا حطّت، مع حلول القرن العشرين، ذبابة عملاقة فوق مستحضر معالجة الفيزياء النظرية، أو بعبارة أخرى، فقد غدونا أمام مأزق.

التكميم، مع نهاية القرن

ومع مطلع العام 1900، عرضَ لبلانك حدسٌ ملهم سمح له بوضع حل للخروج من هذا المأزق، نال عليه جائزة نوبل للفيزياء للعام 1918 [2]. ولفهم كنه هذا الحل، تخيّل أنك حُشرتَ مع عدد لامتناه من الأشخاص في مستودع بارد يملكه رجل بخيل متسلط، وقد وُضعت على أحد جدرانه ترموستات رقمية تسمح بالتحكم بدرجة حرارته. ستتفاجأ ومن معك بما يطالبكم صاحب المستودع بدفعه من مبالغ لقاء تدفئته، وهو دولار من كل واحد منكم، عن كل درجة يسجلها الترموستات، فلو ضُبطت درجة حرارته على الدرجة 50° فهرنهايت مثلاً، فإن على كل واحد منكم دفع مبلغ خمسين دولاراً؛ ولو ضبطت على الدرجة 60° لكان على كل منكم دفع مبلغ ستين دولاراً، وهكذا... ولأن عددكم في المستودع لا متناهٍ في كبره، فإن هذا المتسلط سيتقاضى منكم مبلغاً لامتناهياً من المال عند تشغيل نظام التدفئة على أية درجة حرارة كانت. وإذ تقرأ بتمعن شروط الدفع التي وضعها صاحب المستودع ترى فيها المخرج مما حُشرتم فيه. فهو، لكثرة انشغاله، غير

راغب برد ما يترتب عليه رده مما يدفع له، وخاصة لعدد لا متناه من المستأجرين؛ لذلك يعتمد نظاماً عماده الثقة: فمن يقدر منكم على دفع ما يترتب عليه بتمامه فليفعل ذلك، وإلا فليدفع ما يتيسر له دون مطالبة بالرد. ولرغبتك في تدفئة المستودع وفي تحمّل جميع من فيه الأجور المترتبة على ذلك، وحتى لا ترهق نفسك وصحبك بدفع مبالغ طائلة، تعمل على إعادة توزيع ما تحملون من مال على النحو التالي: تودع كل قطع البنسات التي تحملونها مع واحد منكم، وتودع كل قطع النايكلات مع آخر، وقطع الدايمات مع ثالث وقطع الكوارترات* مع رابع.... وهكذا حتى الأوراق النقدية من فئة الدولار وخمسة الدولارات والعشرة فالعشرين فالخمسين فالمئة فالألف فالأعلى من ذلك إن وُجد. ثم تقوم، ودون أي تردد، بضبط درجة حرارة التروموستات على الدرجة 80° فهرنهايت وتنتظر وصول صاحب المستودع. وما أن يصل حتى يتوجه إليه حامل البنسات فيناوله 8000 قطعة منها، ثم يتوجه إليه حامل النايكالات ويدفع له 1600 قطعة منها، في حين يعطيه حامل الدايمات 800 قطعة وحامل الكوارترات 320 قطعة. أما حامل الأوراق النقدية من فئة الدولار الواحد فيعطيه 80 ورقة، ويعطيه حامل الأوراق من فئة الخمسة دولارات 16 ورقة، ويعطيه حامل الأوراق من فئة العشرة دولارات ثمانية وحامل الأوراق من فئة العشرين أربعة وحامل الأوراق من فئة الخمسين دولاراً ورقة واحدة، (إذ لو أعطاه ورقتين اثنتين لترتب على صاحب المستودع ردّ 20 دولاراً، خلافا لما نصت عليه شروط الدفع). أما أولئك الذين يحملون أوراقاً نقدية من فئات تتجاوز وحدتُها المبلغَ المطلوب وهو ثمانون دولاراً، فلا يدفعون شيئاً. وهكذا يتقاضى صاحب المستودع لقاء تدفئته مبلغاً تافهاً هو 690 دولاراً بدلاً مما كان يمنّي نفسه بالحصول عليه من مبلغ لا متناه من المال.

وكما تدبّرت أمرك وأمر زملائك بعدم دفع مبلغ لامتناه في الكبر لصاحب المستودع. كذلك تدبّر بلانك استراتيجية مشابهة تماماً لما فعلته أنت بغية تجاوز النتيجة القائلة بأن الطاقة في داخل الفرن لا متناهية في كبرها، إذ قال إن الطاقة التي تحملها الأمواج

---

* البنس هو جزء من مئة جزء من الدولار، والنايكل هو جزء من عشرين جزءاً من الدولار، والدايم جزء من عشرة أجزاء والكوارتر جزء من أربعة أجزاء. المترجم

الكهرطيسية في داخل الفرن تكون على شكل حبّات أو كمومات، كما النقود، تتوزع على "فئات طاقية" محددة. وقد تحمل الموجة وحدة من فئة طاقية ما، كما قد تحمل وحدتين أو أكثر منها، أي أن بوسعها حمل أي مضاعف صحيح لهذه الوحدة، لكن ليس بمقدورها حمل جزء منها، فالكسور غير مسموح بها في حالة الطاقة، كما في حالة الفئات النقدية، إذ قد تحمل في جيبك بنسَين أو عشرة أو أربعين، لكنكلن تستطيع حمل نصف بنس أو ثلثه. وكما يعيّن المصرف المركزي في الولايات المتحدة الأمريكية وحدات الفئات النقدية لعملتها، قال بلانك بأن ما يعيّن وحدات الفئات الطاقية التي تحملها الأمواج الكهرطيسية هو تواتر هذه الأمواج. فوحدة الفئة الطاقية، أي الطاقة **الأصغرية** التي يمكن لموجة حملها، **تتناسب وتواترها**؛ فوحدة الفئة الطاقية الخاصة بالموجة ذات التواتر الأعلى (الموافق للطول الموجي الأصغر) أكبر من وحدة الفئة الطاقية الخاصة بالموجة ذات التواتر الأدنى (الموافق للطول الموجي الأكبر). والأمر هنا شبيه بأمر أمواج البحر حيث الأمواج الوديعة طويلة وهادئة(أي ذات طاقة منخفضة)، والأمواج الصاخبة قصيرة ومتلاطمة(أي ذات طاقة مرتفعة). وكذلك الإشعاع. فالإشعاع ذو طول الموجة الأكبر يحمل طاقة أقل مما يحمله الإشعاع ذو طول الموجة الأصغر.

هنا يكمن جوهر الموضوع. فقد بيّنت حسابات بلانك أن تكميم الطاقة (أي اعتبارها مكونة من وحدات أو كمومات أو حبات) التي يمكن لكل موجة حملها كفيل بتعديل النتيجة التي خُلص إليها سابقاً والقائلة بلا نهائية الطاقة الكلية في داخل الفرن. لقد تنبأت الحسابات القائمة على قواعد ترموديناميك القرن التاسع عشر بمقدار المساهمة الطاقية الافتراضية لكل موجة في مجمل الطاقة الكلية للأمواج كافة، لكن، وكما كان حال المقيمين في المستودع الذين لا يقدّمون لصاحبه المبلغ المحدّد، وفقاً لأسلوب الدفع المعتمد، لأن وحدة الأوراق النقدية التي يحملونها من فئات أعلى من القيمة المحددة للمساهمة الفردية، فكذلك تفعل الأمواج الكهرطيسية في داخل الفرن. فالموجة التي تحمل طاقةً وحدتُها أكبر من مقدار مساهمتها لن تقدم شيئاً من طاقتها، وستبقى بذلك في حالة سبات لا تقدم معها شيئاً. ولما كانت وحدة الطاقة التي تحملها موجة ما تتناسب وتواترها، وفقاً لبلانك، فإن الأمواج الكهرطيسية في الفرن، ذات التواترات الأعلى

فالأعلى (ومن ثَمّ ذات الأطوال الموجية الأقصر فالأقصر) لن تساهم كلها في الطاقة الكلية في الفرن، وستمتنع عن ذلك، عاجلاً أم آجلاً، الأمواج التي **تصبح** وحدة فئتها الطاقية أكبر من مساهمتها. وكحال المقيمين في المستودع الذين يحملون أوراقاً نقدية من فئات أكبر من 50 دولاراً، والذين لا يساهمون في دفع أي مبلغ لقاء نفقات التدفئة، فإن الأمواج ذات التواترات الأعلى فالأعلى لن تساهم في تزويد الفرن بالطاقة، تبعاً لفيزياء القرن التاسع عشر، إذ كما ساهم عدد محدود فقط ممن هم في المستودع في دفع نفقات التدفئة مما جعل المبلغ الذي دُفع لصاحبه محدوداً، فإن عدداً محدوداً أيضاً من الأمواج سيساهم في خلق طاقة الفرن الكلية، ممّا يجعل هذه الطاقة محدودة أيضاً. وهكذا وسواء تعاملنا مع النقود أو مع الطاقة، فإن اعتبارهما مكوّنين من وحدات منفصلة (أي تكميم وحداتهما الأساسية)، وتزايد قيمة هذه **الكمومات** لدى الانتقال إلى أوراق نقدية من فئات أعلى، أو إلى أمواج كهرطيسية بتواترات أكبر، سوف يحيل المقادير اللامتناهية في كبرها إلى مقادير منتهية ومحددة[3].

هكذا حقق بلانك إنجازاً كبيراً بإلغائه فكرة الطاقة اللامتناهية في الكبر في داخل الفرن. أما ما جعل الناس يؤمنون حقاً بصدق حدسه وبصحته، فكان توافق القيمة المنتهية والمحدّدة لطاقة الفرن، وفقاً لطريقته وعلى نحو مذهل، مع ما أعطته القياسات التجريبية لهذه الطاقة. وقد وجد بلانك أن ضبط وسيط **واحد** فقط أدخله في حساباته، يتيح على نحو دقيق وصحيح تحديد قيمة طاقة الفرن عند تسخينه إلى درجة حرارة محددة؛ هذا الوسيط هو عامل التناسب بين تواتر الموجة ووحدة الطاقة (أو الطاقة الأصغرية) التي يمكنها حملها. وقد وجد بلانك أن قيمة هذا العامل (الذي حمل اسمه وأصبح يعرف **بثابت بلانك**، ويرمز له بـ $\hbar$ ، ويلفظ إتش – بار) تساوي تقريباً جزءاً من مليار مليار مليار جزء من الوحدات المستعملة في حياتنا اليومية [4]. تعني ضآلة هذه القيمة أن وحدة طاقة الموجة صغيرة جداً، وهو ما يفسر سبب ما **يبدو** من إمكانية تغيير طاقة موجة وتر الكمان (وبالتالي حجم الصوت الذي يصدره) وعلى نحو مستمر، فهذه الطاقة تقفز أثناء تزايدها في مراحل أو خطوات منفصلة (تبعاً لرأي بلانك)، إلاّ أن هذه القفزات ضئيلة جداً بحيث يبدو الانتقال من مرحلة منفصلة إلى أخرى وكأنه مستمر. ويزداد ما تمثّله هذه القفزات

من طاقة مع تزايد تواتر الموجة (وبالتالي مع تناقص طولها الموجي). وهنا يكمن المعيار الفاصل والحاسم الذي أنهى مفارقة فكرة الطاقة اللامتناهية في الكبر. وكما سوف نرى فإن نتائج فرضية بلانك الكمومية تتجاوز إلى حد بعيد مجرّد فهم وتفسير المحتوى الطاقي للفرن، ذلك أنها تقلب رأساً على عقب الكثيرَ مما اعتدنا عدّه أمراً بديهياً. إلاّ أن ضآلة قيمة ثابت بـــلانـــك $\hbar$ (إتش- بار) لا تجعلنا نرى أثر ذلك في ما حولنا إذ تقصره على ما يجري في العالم المجهري. أما لو كانت قيمة هذا الثابت أكبر بكثير مما هي عليه فإننا كنا سنرى مألوفاً وطبيعياً ما اعتبرناه غريباً وشاذاً مما جرى مع جورج وجين في مقهى الـــ **إتش – بار** (H-Bar)؛ إذ سنرى أن المقابلات المجهرية لما جرى ليست إلا شيئاً عادياً فعلاً.

ما هي هذه الكمومات؟

لم يعطِ بلانك أي تفسير لإدخاله مفهوم تكميم الطاقة البالغ الأهمية سوى القول بأنه "يعمل"، ولم يقدم هو أو سواه أي دليل مقنع على صحته. كان الأمر يبدو،كما قال ذات مرة الفيزيائي جورج غامو،وكأن الطبيعة سمحت لأحدنا بأن يشرب كأساً مليئاً من البيرة بجرعة واحدة أو ألاّ يرتشف منه أيّ رشفة، ولا مجال لأي شيء آخر بين هذا وذاك[5]. وقد قدم أنشتاين في سنة 1905 الدليل على صحة هذا المفهوم ومُنح لذلك جائزة نوبل في الفيزياء عن عام 1921.

كان أنشتاين يعمل على حل لغز ما كان يعرف بالمفعول الكهرضوئي،حين توصل إلى وضع تفسيره لمفهوم تكميم الطاقة. وكان الفيزيائي الألماني هاينريش هرتز أول من لاحظ في سنة 1887 أن بعض الفلزات تصدر إلكترونات عند تسليط الضوء (وهو شعاع كهرطيسي) عليها؛ لم تكن هذه الملاحظة، بحد ذاتها، جديرة بالاهتمام، لأن للفلزات خاصية تتجلى في ضعف ارتباط بعض إلكتروناتها في ذراتها (وهي ما يفسر ناقلية الفلزات الجيدة للكهرباء)؛ لذلك فإن الشعاع الضوئي المسلط على سطح الفلز يتخلى له عن طاقته (كما يفعل إذا سلطته على يدك فيجعلك تشعر بالسخونة). تعمل هذه الطاقة

على تحريك الإلكترونات في الفلز، كما قد تعمل على اقتلاع بعضها، من ذوات الارتباط الواهي في ذراته، عن سطحه.

وإذا ما تمعّنا في دراسة خصائص الإلكترونات المقتلعة، لاحظنا المظاهر الغريبة للمفعول الكهرضوئي، إذ قد يظن للوهلة الأولى أن سرعة هذه الإلكترونات ستزداد مع زيادة شدة الضوء المسلط (أو سطوعه)، لتزايد الطاقة التي تحملها موجته. لكن **ليس** هذا ما يحدث، وما يحدث فعلاً هو **ازدياد** عدد الإلكترونات المقتلعة مع بقاء سرعتها ثابتة. كما لوحظ تجريبياً أن هذه السرعة **تزداد** بازدياد **تواتر** الضوء المسلّط وتتناقص بتناقصه (نذكر أن تواتر الأمواج الكهرطيسية في القسم المرئي من الطيف الضوئي يزداد مع تغير لون هذا الطيف من الأحمر فالبرتقالي فالأصفر فالأخضر فالأزرق فالنيلي ثم البنفسجي. أما التواترات الأعلى من تواتر موجة اللون البنفسجي فتعود إلى أمواج كهرطيسية غير مرئية تتوافق والأشعة فوق البنفسجية وتليها الأشعة السينية؛ كما تعود التواترات الأدنى من تواتر موجة اللون الأحمر إلى أمواج كهرطيسية غير مرئية أيضاً تتوافق والأشعة تحت الحمراء)، لذلك نصل، مع تناقص تواتر الضوء المسلّط إلى قيمة تنعدم فيها سرعة الإلكترونات الصادرة عن سطح المعدن، إذ يتوقف اقتلاعها منه، **وذلك بقطع النظر عن شدة المنبع الضوئي بالغاً ما بلغت من الكبر. فلون** الحزمة الضوئية المسلّطة إذن، وليس طاقتها الكلية، هو ما يتحكم، ولسبب غير معروف، باقتلاع الإلكترونات من سطح المعدن أو بعدمه، وكذلك بطاقة هذه الإلكترونات حال اقتلاعها.

وحتى نفهم التفسير الذي قدمه أنشتاين لهذه المظاهر الغريبة للمفعول الكهرضوئي، دعنا نعد ثانية إلى المستودع بعد أن اعتدلت درجة الحرارة فيه حول الدرجة 80° فهرنهايت.لنتخيل أن صاحبه المتسلط يكره الأطفال، لذلك عزل كلَّ من يقلّ عمره منهم عن خمسة عشر عاماً في قبو المستودع المظلم بحيث يراهم الراشدون الذين ظلوا في المستودع عبر شرفة ضخمة مطلة على ذلك القبو، وفرض على كل من يرغب مغادرة القبو دفع رسم لذلك مقداره 85 بنساً؛ وسيكون بوسع أولئك الراشدين مساعدة هؤلاء الصغار بإعطائهم ما يحتاجونه من مال بإلقائه إليهم من الشرفة التي يقفون عليها. لنرَ ما سيحدث.

لقد وزع أصحاب النقود ما يحملونه منها على النحو الذي سبق ذكره؛ لذلك فإن حامل البنسات سيلقي بعضاً منها في بداية الأمر، إلاّ أن أيّاً من هؤلاء الصبية لن يتمكن من جمع ما يكفيه منها لدفع رسم الخروج، لضآلة قيمتها من جهة، ولوجود "بحر لا متناه" من الصبية يتدافعون لالتقاط البنسات الملقاة إليهم. حتى لو ألقى حامل هذه البنسات كمية كبيرة جداً منها فإن أي طفل لن يكون قادراً على التقاط 85 قطعة منها يدفعها لحارس القبو لقاء خروجه منه. ويصح هذا القول أيضاً على حاملي قطع النايكل والدايم والكوارتر، إذ حتى لو ألقى كل واحد منهم كمية كبيرة جداً ممّا يحمله منها فإن معظم الصغار لن يتمكنوا من التقاط أي قطعة منها، ولو تمكن بعضهم من ذلك، فإن أيّاً منهم لن يكون قادراً، بالتأكيد، على التقاط ما يعادل مبلغ رسم الخروج وهو 85 بنساً.أما عندما يبدأ حامل الأوراق النقدية من فئة الدولار الواحد بإلقاء بعضها دولاراً دولاراً، فإن بعض المحظوظين من هؤلاء الصبية الذين سيتمكن كل واحد منهم من التقاط دولار واحد، سيغادرون القبو مباشرة بعد تسديد رسم الخروج. ولو أطلق حامل هذه الأوراق العنان لنفسه وألقى ما تحويه براميل ممتلئة بها، فإن عدد الأطفال القادرين على مغادرة القبو سيزداد على نحو كبير جداً، وسيحمل كل واحد منهم معه 15 سنتاً بعد أن يكون قد سدّد رسم الخروج إلى الحارس. ويبقى هذا الأمر صحيحاً مهما كان عدد الدولارات الملقاة.

لنرَ الآن علاقة هذا المثال بالمفعول الكهرضوئي بغية فهم التفسير الذي قدمه أنشتاين له. اقترح أنشتاين، منطلقاً من المعطيات التجريبية التي سبق ذكرها، تبنّي مفهوم تكميم طاقة الموجة الكهرطيسية الذي قدمه بلانك لوضع تصوّر جديد للضوء، فتخيّل الحزمة الضوئية وكأنها **دفق حبات** صغيرة جداً من جسيمات الضوء الصغيرة التي أطلق عليها الكيميائي جيلبرت–لويس اسم **الفوتونات**، (وقد سبق أن استخدمنا هذه الصورة في مثالنا عن الساعة الضوئية في الفصل الثاني). نذكر، لتصور المقاييس التي تعطيها النظرية الجسيمية للضـــوء، أن مصباحاً استطاعته 100 واط، يصدر حوالي مئة مليار مليار (أي 10^{20}) فوتون في الثانية. استخدم أنشتاين هذا المفهوم الجديد لوضع آلية مجهرية لأساس المفعول الكهرضوئي، يُقتلع فيها إلكترون من سطح المعدن إذا ما صدمه فوتون يحمل طاقة تكفي لذلك. ولتحديد طاقة الفوتون الواحد، ولتفسير تلك المعطيات التجريبية، حذا

أنشتاين حذوَ بلانك وقال بتناسب طاقة **كل** فوتون وتواتر موجته الضوئية (وعامل التناسب هنا أيضاً هو ثابت بلانك).

ونصل الآن إلى عرض مقارنة المفعول الكهرضوئي بخروج الصبية من القبو. فكما كان على صغير يود الخروج دفع رسم حده الأدنى 85 بنساً، فإن على كل إلكترون يُقتلع من سطح المعدن(أي يخرج منه) أن يُصدم بفوتون مزود بحد أدنى من الطاقة، (وكما كان حال الصبية المتدافعين لالتقاط القطع النقدية الملقاة،فإن احتمال صدم إلكترون ما بأكثر من فوتون واحد هو احتمال ضئيل جداً؛ كما أن معظم الإلكترونات لن تتعرض لأي صدمة). فإذا كان تواتر الموجة المسلّطة منخفضاً جداً، فإن فوتوناتها، كل واحد منها بمفرده، لن تكون مزودة بما يلزمها من طاقة لاقتلاع الإلكترونات (وكما كان الصبية غير قادرين على مغادرة القبو، على ضخامة عدد قطع النقود المعدنية التي كان الكبار يلقون بها إليهم، أو يزودونهم بها، فإن أي إلكترون لن يُقتلع من سطح المعدن أيّاً كانت ضخامة الطاقة التي تحملها الحزمة الضوئية المسلطة عليها، إن كان تواترها، وبالتالي إن كانت طاقة كل فوتون بمفرده فيها، ضئيلاً جداً).

كذلك وكما غدا بوسع الأطفال مغادرة القبو ما إن أصبحت فئة القطع النقدية الملقاة إليهم كبيرة، وأكبر من رسم الخروج(وهي دولار واحد)، فإن الإلكترونات ستقتلع من سطح الفلز إذا ما أصبح تواتر الضوء المسلّط عليها (أي فئته النقدية) كبيراً إلى حد كاف. وكما تزداد كمية النقود التي يلقيها حامل الأوراق النقدية من فئة الدولار بتزايد ما يلقيه من هذه الأوراق،فكذلك تزداد الطاقة الكلية لحزمة ضوئية، ذات تواتر محدّد، بتزايد عدد الفوتونات التي تحملها. وكما يعني تزايدُ الأوراق النقدية الملقاة تزايدَ عدد الأطفال القادرين على مغادرة القبو،فكذلك يعني تزايدُ عدد الفوتونات التي تصدم سطح الفلز تزايدَ عدد الإلكترونات المقتلعة القادرة على مغادرة هذا السطح. وكذلك، وكما يحمل كل واحد من الصبية عند مغادرته القبو 15 بنساً أياً كان عدد الدولارات التي ألقاها إليهم حامل أوراقها، فإن كل إلكترون يُقتلع من سطح الفلز يحمل معه الكمية ذاتها من الطاقة التي تحملها الإلكترونات المقتلعة الأخرى، مزوداً بالتالي بالسرعة ذاتها التي تتزود بها تلك الإلكترونات، أيّاً كانت طاقة الضوء المسلّط. ترتبط هذه الطاقة بطاقة الفوتون الذي

يضرب سطح المعدن، والتي يحددها تواتر حزمته الضوئية وليس طاقتها أو شدتها الكلية،. ونقول اختصاراً: إن تزايد كمية النقود الملقاة على الصبية يعني تزايد عدد القادرين منهم على مغادرة القبو، وكذلك فإن تزايد كمية الطاقة الكلية التي تحملها الحزمة الضوئية يعني تزايد عدد الإلكترونات التي تُقتلع من سطح الفلز وتغادره. وإذا أردنا أن يغادر الصبية القبوَ وهم يحملون كمية أكبر من النقود فإننا نلقي إليهم أوراقاً من فئات نقدية أعلى، فكذلك إذا أردنا تزويد الإلكترونات المقتلعة بطاقة أكبر(أي بسرعة أكبر)، فعلينا أن نوجه إليها فوتونات من فئات طاقية أعلى، أي أن علينا زيادة تواتر الحزمة الضوئية المسلّطة على سطح الفلز.

يتوافق هذا القول بدقة مع ما تدل عليه المعطيات التجريبية: فتواتر الضوء المسلّط (أو لونه) يحدد سرعة الإلكترونات المقتلعة، في حين تحدد الطاقة الكلية لهذا الضوء (أو شدته) عدد هذه الإلكترونات.

هكذا بيّن أنشتاين أن تخمين بلانك عن طاقة متقطعة يعكس في الحقيقة سمةً أساسية للأمواج الكهرطيسية وهي تكوّنها من حبّات (فوتونات) هي **كمومات** الضوء، وأن سبب تقطع الطاقة التي تحملها الأمواج الكهرطيسية هو أن هذه الأمواج مكونة أصلاً من كمومات متقطعة. حقق فكر أنشتاين الخلاق تقدماً كبيراً؛ لكن القصة، وكما سنرى الآن، ليست بمثل الجمال والأناقة الذي قد تبدو عليه.

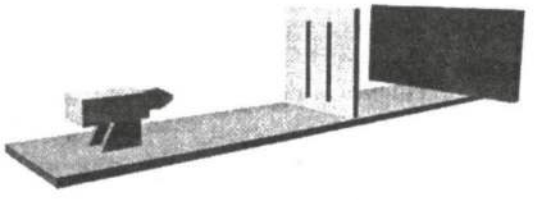
هل الضوء موجة أو جسيم؟

نعلم أن الماء – والأمواج المائية بالتالي– يتكون من عدد لامتناه من جسيمات (هي جزيئات الماء)؛ ونتساءل هل من المستغرب حقاً أن تتكون الأمواج الضوئية من جسيمات (هي الفوتونات)؟ ونجيب بأن ذلك مستغرب فعلاً، ولكن غرابته تكمن في تفاصيله. ليست فكرة تكون الضوء من جسيمات فكرة جديدة إذ قال بها نيوتن منذ أكثر من ثلاثمائة سنة. إلا أن بعض زملائه وبخاصة الفيزيائي الهولندي كريستيان هويغنز عارضه في ذلك متبنياً فكرة تكوّن الضوء من أمواج. وقام جدال مرير بين الجانبين حسمته التجارب التي

أجراها الفيزيائي الإنكليزي توماس يونغ في مطلع القرن التاسع عشر، إذ بيّنت خطأ وجهة نظر نيوتن.

يبدو على الشكل 4-3 أحد الترتيبات التي وضعها يونغ وأجرى بها تجربته الشهيرة - المعروفة بتجربة الشقّين - التي كان فاينمان يقول عنها، إن ميكانيك الكم برمته يمكن فهمه من خلال التفكير المتأني بمقتضيات هذه التجربة الفريدة*. لذلك سنتحدث عنها هنا بشيء من التفصيل.

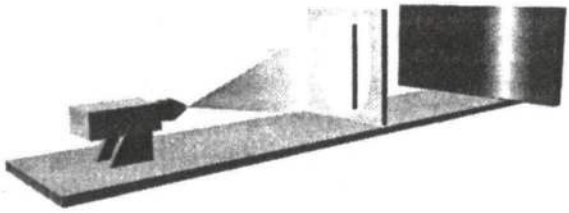
يوضع حاجز فيه شقان رأسيان أمام منبع ضوئي، وتوضع خلف الحاجز لوحة تصوير تسمح بتحديد كمية الضوء الوارد إليها في مختلف نقاطها، فالمناطق الأكثر سطوعاً تدل على ورود ضوء بكميات أكبر. تتلخص التجربة بمقارنة الصور المتشكلة على هذه اللوحة عند تشغيل المنبع الضوئي وفتح أحد شقي الحاجز أو كليهما. الجزء الأيمن من لوحة التصوير.فإذا ما أُغلق الشق الأيسر وفتح الشق الأيمن، بدت لوحة التصوير كما في الشكل 4-4، حيث يمر الضوء عبر الشق المفتوح ويتركز وراءه في الجزء الأيمن من لوحة التصوير.



الشكل 4-3: *تُسلط في تجربة الشقين حزمة ضوئية على حاجز فيه شقّان رأسيان، ويسجل على لوحة تصوير - توضع وراء الحاجز- مقدار الضوء المار من خلاله وذلك عند فتح أحد الشقين أو كليهما.*

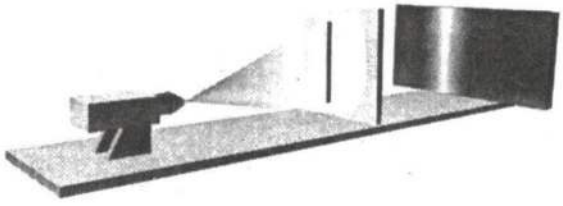
---

* يمكن فهم هذا القول إذا ما تذكرنا أن المثنوية "موجة / جسيم" تُعد قطب الرحى في نظرية الكم. المترجم



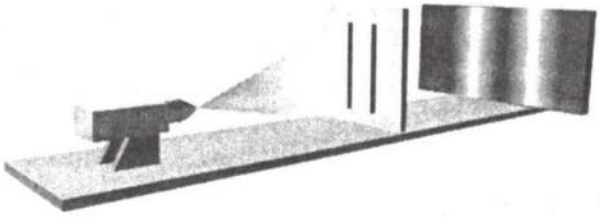
الشكل 4-4: *لوحة التصوير، كما تبدو عند فتح الشق الأيمن.*

أما إذا أغلق الشق الأيمن وفتح الشق الأيسر فإن الصورة على اللوحة تبدو كما في الشكل 4-5.



الشكل 4-5: *لوحة التصوير، كما تبدو عند فتح الشق الأيسر.*

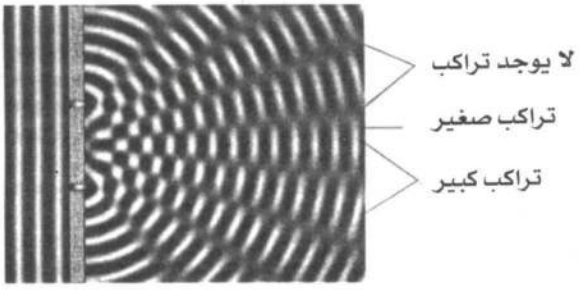
أما إذا فُتح الشقان **معاً**، فإن بوسعنا القول، تبعاً لرأي نيوتن، بأن لوحة التصوير ستبدو كما في الشكل 4-6، الذي يمكن النظر إليه على أنـــه جمعٌ لصورتَي الشـــــكلين 4 - 4 و 4 - 5.



الشكل 4-6: *تنبئ نظرية نيوتن بأن الصورة المتشكلة عند فتح الشقين معاً، هي جمع لصورتَي الشكلين 4-4 و 4 - 5.*

يمكن رؤية ذلك بالقول، تبعاً لنظرية نيوتن الجسيمية للضوء، إن جسيمات الضوء المسلّط من المنبع على الحاجز، تشبه كريّات صغيرة تطلق على جدار؛ وسيتجمع ما يمر منها عبر شقّي الحاجز في المنطقتين الواقعتين وراءهما على لوحة التصوير. أما النظرية الموجية للضوء فتنبئ بخلاف ذلك تماماً عند فتح الشقين. لنرَ ذلك.

تخيّل للحظة أننا نتعامل مع أمواج مائية بدلاً من الأمواج الضوئية، فتصوّرُ الماء أيسرُ من تصوّر الضوء، علماً بأننا سنصل إلى النتيجة ذاتها في كلتا الحالتين. عندما تصطدم الأمواج المائية المسلّطة بالحاجز، تتشكل وراءه، منطلقة من كل واحد من شقّيه، أمواج دائرية كتلك التي تشكلها حصاة ألقيت في بركة ماء، كما يبدو على الشكل 4 –7، (يمكن رؤية ذلك بسهولة بوضع حاجز كرتوني فيه شقان في حوض ماء).



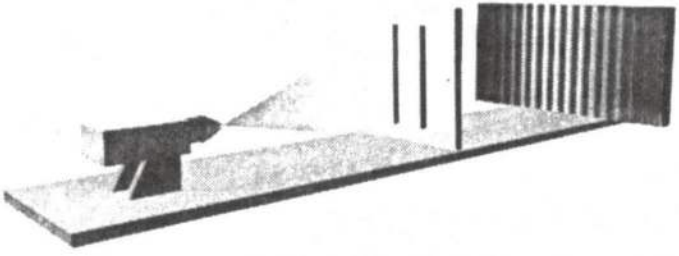
الشكل 4 – 7: *تتراكب الأمواج الدائرية الصادرة عن كل واحد من الشقين، بعضها مع بعض، مسببة كبَر الموجة الكلية المتشكلة في بعض النقاط، وصغرها في بعضها الآخر.*

تتراكب الأمواج الصادرة عن كل واحد من الشقين بعضها مع بعض، وعلى نحو مثير للاهتمام: فإذا تراكبت ذروتا موجتين علَت الموجة المتشكلة في نقطة تراكبهما وكان ارتفاعها مساوياً مجموع ارتفاعَي ذروتي الموجتين المنفردتين المتراكبتين؛ وإذا تراكب غورا موجتين، كان غور الموجة المتشكلة أكثر انخفاضاً. أما إذا تراكبت ذروة موجة صادرة عن أحد الشقين مع غور موجة صادرة عن الشق الآخر، فإن الموجتين تتفانيان، **أي أن إحداهما تفني الأخرى** (هذا هو، في الحقيقة، مبدأ عمل سماعات الرأس المتقنة التي تلغي صوت الضجيج، فهي تحدد شكل موجة الصوت الواردة، ثم تولد موجة ذات شكل "معاكس" تماماً، فتتراكب الموجتان وتلغي إحداهما الأخرى). وتقوم فيما بين هذين الشكلين الحدّيين من التراكب أشكال كثيرة أخرى منه.

تصور أنك وعدداً من رفاقك وقد ركب كل واحد منكم في قارب صغير،فشكلتم نسقاً منها اصطف بصورة موازية للحاجز، وكان على كل منكم أن يصرّح بما يشعر به من شدة الاهتزاز الذي تسببه الأمواج المتشكلة المرتطمة بقاربه. ستكون النتيجة مشابهة لما يبدو إلى أقصى يمين الشكل 4 – 7، حيث يكون الاهتزاز الأكبر في مواقع التقاء ذرى (أو أغوار) الأمواج الصادرة عن كلا الشقين، في حين ينعدم الاهتزاز في مواقع التقاء ذرى الأمواج الصادرة عن أحد الشقين مع أغوار تلك الصادرة عن الشق الآخر.

ولما كانت لوحة التصوير تتحسّس بمقدار "الاهتزاز" الذي يلحقه بها الضوء الوارد إليها، فإن المحاكمة المنطقية السابقة ستنبئنا، إذا ما طبقناها على صورة موجة الحزمة الضوئية، أن لوحة التصوير هذه ستبدو، عند فتح شقيّ الحاجز، كما في الشكل 4-8، الذي تتوافق فيه المناطق المضيئة مع النقاط التي تلتقي فيها ذرى (أو أغوار) الأمواج الصادرة عن كلا الشقين، في حين تتوافق مناطقه المظلمة مع النقاط التي تلتقي فيها ذرى الأمواج الصادرة عن أحد الشقين مع أغوار تلك الصادرة عن الشق الآخر. يُعرف تتالي المناطق المضيئة والمظلمة باسم **أهداب التداخل**.

تختلف هذه الصورة اختلافاً جذرياً عن تلك التي في الشكل 4-6، وبذلك فإن بين أيدينا تجربة حاسمة وفاصلة تسمح بالتمييز ما بين المظهرين الجسيمي والموجي للضوء. وقـد أجرى يونغ تجربة تتفق وما ذكرناه سابقاً فجاءت نتيجتها متوافقة وصورة الشكل 4-8، ممّا أكدّ تجريبياً الصفة الموجية للضوء. وهكذا حاقت الهزيمة بنظرية نيوتن الجسيمية (رغم أن الفيزيائيين لم يقروا بذلك إلاّ بعد مضي بعض الوقت). ولم يمض وقت طويل حتى أكد ماكسويل هذه الصورة الموجية للضوء، وصاغها بعلاقات رياضيّاتية متينة.



الشكل 4-8: *تبعاً للنظرية الموجية للضوء، تتداخل الأمواجُ الصادرة عن كل واحد من الشقين بعضها مع بعض، عند فتحهما معاً.*

لكن أنشتاين، الذي أسقط نظرية نيوتن في الثقالة، ما لبث أن أحيا، عبر **مفهوم الفوتونات**، المظهر الجسيمي للضوء الذي كان نيوتن قد تبناه. ونتساءل هنا كيف يمكن لهذا المظهر الجسيمي أن يفسر تشكل أهداب التداخل المبيّنة في الشكل 4-8 ؟ وقد نجيب عن ذلك، لأول وهلة بالقول التالي : يتكون الماء من جزيئات، هي " جسيماته "؛ وعندما يسيل عدد كبير جداً من هذه الجسيمات، الواحد بجانب الآخر، فإنها تولد أمواجاً مائية مصحوبة بخصائص تداخلية كما في الشكل 4-7. لذلك يبدو لنا منطقياً القولُ بأن الخصائص الموجية، كما في حالة أهداب التداخل، يمكن أن تتولد من مظهر جسيمي للضوء شريطة مشاركة أعداد كبيرة جداً من جسيماته (وهي الفوتونات) فيها.

إلاّ أن العالَم المجهري أكثر عمقاً وتعقيداً من ذلك بكثير. فلو أضعفنا من شدة المنبع الضوئي في الشكل 4-8، الى الحد الذي يطلق فيه فوتونات منفردة **الواحد تلو الآخر**، وبمعدل فوتون واحد في كل عشر ثوان مثلاً، **ظلت** الصورة على هذا الشكل على حالها، شريطة الانتظار مدة كافية من الزمن يمر خلالها عدد كبير جداً من حبات الضوء المنفصلة هذه عبر الشقين. وسنلاحظ، لو وضعنا إشارة على نقطة اصطدام كل حبة بمفردها بلوحة التصوير، أن هذه النقاط تشكل بمجموعها الصورة التي في الشكل،أي صورة أهداب تداخل. تبدو هذه النتيجة غريبة ومذهلة، إذ كيف يتأتى لفوتونات الضوء، أي لجسيماته **المنفردة**، التي تمر متتابعة الواحد بعد الآخر عبر الحاجز، ويضرب كل واحد منها بمفرده لوحة التصوير، أن تولد حزماً مضيئة وأخرى مظلمة تشكل بمجملها أهداب تداخل؟ إن منطق الأمور يقضي بمرور كل واحد من هذه الفوتونات إما من شق الحاجز الأيسر أو من شقه الأيمن، وهو ما يعني تشكل صورة كتلـــــــك الـــتي في الشكل 4 -6، ولكننا لا نحصل عليها.

وإذا لم تفاجئك هذه الحقيقة فمعنى ذلك أنك رأيتها أو سمعت بها قبلاً ومللتَ تكرارها، أو أننا لم نفلح في تقديمها إليك بصورة أكثر حياة؛ فإن كان ثاني الأمرين هو السبب، فسنحاول عرضها ثانية بطريقة مختلفة قليلاً. يغلق الشق الأيسر في الحاجز وتسلط عليه حزمة فوتونات واحداً تلو الآخر؛ سيجتاز بعضُ هذه الفوتونات الحاجزَ، بمرورها عبر الشق، في حين لن يجتازه بعضُها الآخر، وستشكل الفوتونات المارة

صورةً على لوحة التصوير، كتلك المبيّنة على الشكل 4 – 4، مشكّلة نقطة فنقطة من آثار اصطدام الفوتونات باللوحة. تعاد التجربة باستخدام لوحة تصوير جديدة، وبفتح شقّي الحاجز معاً. من الطبيعي الظن للوهلة الأولى أن ذلك سيؤدي إلى زيادة عدد الفوتونات التي ستجتاز الحاجز عبر شقيّه، ومن ثَمَّ زيادة عدد نقاط الإصابة على لوحة التصوير، أي تعريض هذه الأخيرة إلى كمية من الضوء أكبر مما في التجربة السابقة. وإذ تتفحص هذه اللوحة متوقعاً أن ترى مواقع عليها كانت معتمة في التجربة الأولى فغدت مضيئة الآن، تُفاجأ إذ ترى، إضافةً إلى ما توقعته، أن هناك مناطق كانت مضيئة فأعتمت، كما في الشكل 4–8. يعني ذلك أن **زيادة** عدد الفوتونات المنفردة التي تضرب لوحة التصوير قد **أنقصت** شدة إضاءتها في بعض مناطقها، مما يعني، بصورة أخرى،أن الفوتونات التي تصدم اللوحة في لحظات زمنية متعاقبة، قادرة على إلغاء بعضها بعضاً، أي أن الفوتونات التي كانت ستمر عبر الشق **الأيمن** في الحاجز وتصدم لوحة التصوير فتنيرها في بعض المناطق المعتمة في الشكل 4–8، لن تعود قادرة على ذلك عند فتح الشق **الأيسر** في الحاجز (وهذا هو سبب كون تلك المنطقة معتمة). هل فكرتَ لحظة بما تعنيه لا معقولية هذا القول؟ كيف يمكن لحبة صغيرة من الضوء تعبر أحد شقّي الحاجز، أن تتأثر بفتح أو بإغلاق شقّه **الآخر**؟ قال فاينمان، ذلك غريب حقاً؛ إنه أشبه بإطلاق نيران مسدس رشاش على حاجز، حتى إذا ما أحدث فيه في لحظة ما شقّان، فإن الطلقات المنفردة التي كانت تأتي منفصلة عليه، سيلغي بعضها بعضاً مخلفة مواقع سليمة كانت **ستصيبها** عند فتح شق واحد.

تبين هذه التجارب أن جسيمات أنشتاين الضوئية (الفوتونات) تختلف تماماً عن جسيمات نيوتن؛ فالفوتونات، على كونها جسيمات، تتمتع بالخصائص الموجية للضوء أيضاً. ويدل ارتباط طاقتها بمقدار هو من سمات الصفة الموجية(وهو التواتر) على وجود نوع غريب من الارتباط يسمح بفهمه فعلاً اعتبارنا كلاً من المفعول الكهرضوئي وتجربة الشقين. يرينا المفعول الكهرضوئي أن للضوء خصائص جسيمية، وترينا تجربة الشقين أن له خصائص موجية (كالتداخل)، وترينا التجربتان معاً أن كلا الخصائص الجسيمية والموجية موجودة في الضوء. يتطلب فهم العالَم المجهري أن نسقط من أذهاننا حدسنا

القائل بأن طبيعة جسم ما إما أن تكون موجية أو جسيمية، وأن نقبل بإمكانية كونه موجة وجسيماً معاً. وفي هذا السياق يتضح قول فاينمان " بأن لا أحد يفهم حقاً ميكانيك الكم". إن بوسعنا التحدث عن "مثنوية جسيم /موجة"، وصياغتها بعلاقات رياضياتية قادرة على وصف تجارب حقيقية بدقة كبيرة، إلا أن من الصعب جداً علينا فهم حقيقة هذه السمة الرائعة للعالم المجهري، وعلى مستوى حدسي عميق.

الجسيمات المادية هي أيضاً أمواج

جهد كثير من أعظم الفيزيائيين النظريين في العقود الأولى من القرن العشرين لتطوير فهم قائم على أسس رياضيّاتية وفيزيائية متينة لتلك السمات المجهرية الخفية في حينه. ونشير منها إلى ما تحقق من تقدم كبير بإشراف نيلز بوهر في كوبنهاغن في تفسير خصائص الضوء الذي تصدره ذرات الهيدروجين المسخنة المتوهجة. وكان هذا العمل وسواه مما تحقق حتى منتصف عشرينيات ذلك القرن، وكأنه جمعٌ بديلٌ مؤقت لأفكار القرن التاسع عشر وللمفاهيم الكمومية الجديدة أكثر من كونه إطاراً متناسقاً يفهم من خلاله عالم الفيزياء. فالنظرية الكمومية، المتطورة جزئياً، كانت في حالة من التشويش والاضطراب إذا ما قورنت بقوانين نيوتن الواضحة والمنطقية في الحركة، وبنظرية الكهرطيسية لماكسويل.

وفي سنة 1923 أضاف الفرنسي النبيل الأمير لويس دوبروي عنصراً جديداً إلى الجدل القائم حول النظرية الكمومية، ما لبث أن وجه الفيزيائيين نحو إطار رياضيّاتي لميكانيك الكم الحديث، وحاز بفضله جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1929. استلهم دوبروي أفكاراً تعود جذورها إلى نظرية النسبية الخاصة لأنشتاين، إذ رأى أن معادلة النسبية الخاصة تربط الكتلة بالطاقة، كما ربط أنشتاين وبلانك الطاقةَ بتواتر الأمواج. ومن ذلك، وعند دمج الأمرين معاً، قال دوبروي بأن للكتلة مظهراً موجياً، بحيث أن مثنوية الجسيم والموجة لا تصح في حالة الضوء فقط، بل تصح أيضاً في حالة المادة. وبعد عمل دقيق في نطاق هذه الفكرة اقترح دوبروي بأنه كما تُضفي نظريةُ الكم الصفةَ الجسيمية على الفوتون، وهو ضوء (أو موجة)، فإنها تضفي الصفة الموجية على الإلكترون وهو جسيم.

وما لبث أنشتاين أن تبنّى فكرة دوبروي، التي جاءت نتيجة منطقية لإسهاماته هو في النظرية النسبية وفي طبيعة الفوتونات. إلاَ أن لاشيء يمكن أن يحل محل البرهان التجريبي، الذي ما لبث أن توفر من خلال أعمال كلينتون دافيسن وليستر جرمر. كان هذان الفيزيائيان التجريبيان العاملان في شركة بل للهواتف يدرسان في أواسط الأعوام 1920 كيفية ارتداد حزمة من الإلكترونات عند اصطدامها بدريئة من فلز النيكل. وما يهمنا هنا من تجربتهما هو أن بلورات النيكل تسلك كالشقين في تجربة يونغ الموضحة في الفقرة السابقة. لذلك يمكن اعتبار تجربتهما هذه كتجربة يونغ بعد أن نستبدل فيها حزمة إلكترونات بحزمة الضوء. تفحص دافيسن وجرمر الإلكترونات المارة عبر الشقين نحو الدريئة عن طريق اصطدامها بشاشة فسفورية متألقة، حيث تبدو عليها بقعة مضيئة في كل نقطة يصدمها إلكترون (كما يحدث فعلاً على شاشة التلفزيون)، ووجدا شيئاً لافتاً للنظر، إذ تشكلت على الشاشة صورة كتلك التي في الشكل 4-8. فالإلكترونات تبدي حادثة التداخل الدالة على وجود أمواج، إذ يلغي وجودُ بعضها وجودَ بعضها الآخر في المناطق المعتمة من الشاشة الفسفورية، كما يلغي بعضُ الأمواج بعضَها الآخر عند تراكب ذرى الأولى مع أغوار الثانية، ولو عمدنا إلى "إضعاف" حزمة الإلكترونات المنطلقة على نحو يصدر معه واحد منها فقط كل عشر ثوان، لرأينا أن هذه الإلكترونات المنفردة، التي تتحرك بفواصل زمنية محددة، ترسم على الشاشة الفسفورية حزماً مضيئة وأخرى معتمة، فحالها، كحال الفوتونات، إذ " تتداخل" فيما بينها مشكلة أهداباً هي من خصائص الأمواج. وهكذا نغدو ولا مفر لنا من القول بأن الإلكترون، الذي ألفناه جسيما، ذو صفة موجية أيضاً.

يلاحظ أننا قصرنا كلامنا السابق على حالة الإلكترونات؛ إلاَ أن تجارب مماثلة أخرى تدفع إلى القول بأن **لكل** أشكال المادة صفات موجية أيضاً. ونتساءل، كيف ينسجم هذا القول مع معرفتنا للمادة بأنها جامدة وثابتة لا يُرى لها أي مظهر موجي؟

لقد وضع دوبروي علاقة تسمح بحساب الطول الموجي للأجسام المادية يتناسب فيها وثابت بلانك $\hbar$ (الطول الموجي يساوي حاصل قسمة هذا الثابت على اندفاع الجسيم المادي). ومع صغر قيمة $\hbar$ فإن قيم الأطوال الموجية تكون صغيرة جداً بالمقارنة مع

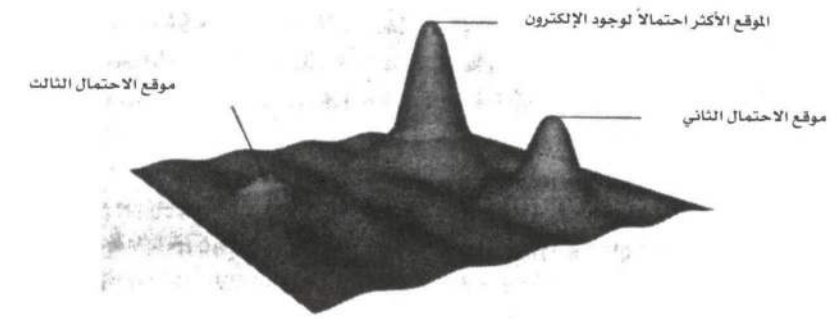
المقاييس التي نألفها في حياتنا اليومية، مما يقصر ظهورَ الصفة الموجية للمادة على العالم المجهري فقط، وهكذا، وكما تحجبُ القيمة الكبيرة لسرعة الضوء الكثيرَ من الطبيعة الحقيقية للزمان والمكان، فإن القيمة الصغيرة لثابت بلانك تحجب المظاهر الخاصة بالطبيعة الموجية للمادة في عالمنا.

ما هي هذه الأمواج؟

أظهرت تجارب تداخل الإلكترونات التي أجراها دافيسن وجرمِر، أن للإلكترونات طبيعة موجيه واضحة. لكن، **ما هي** هذه الأمواج؟ كان الفيزيائي النمسوي إرْون شرودنغر قد قال، بداية، إنها إلكترونات " ممسوحة"، أي إلكترونات مشذّبة تعمل كمجموعة على نحو يخفي ملامحها الفردية؛ وقد يعطي هذا القول بعض "الإحساس" بموجة إلكترونية، إلا أنه إحساس خشن وتقريبي جداً؛ ذلك أن تشذيب شيء ما يعني توزيعَ بعض منه هنا وبعض منه هناك، وهو ما لم يُر قط في حالة الإلكترونات، فليس هنا نصف إلكترون أو هناك ثلثه أو أي كسر آخر منه. لذلك يصعب فهم المقصود بالإلكترون المشذّب. وفي سنة 1926 قدّم الفيزيائي الألماني ماكس بورن بديلاً لموجة الإلكترون عدّل فيه بصورة جذرية تفسير شرودنغر؛ وظل هذا البديل، الذي طوّرته لاحقاً أعمال بوهر وزملاؤه، سائداً حتى يومنا هذا. كان اقتراح بورن واحداً من أغرب مظاهر نظرية الكم، إلاّ أن معطيات تجريبية كثيرة جداً جاءت تؤكده. يقول هذا الاقتراح بوجوب تفسير موجة الإلكترون من وجهة نظر **احتمالية**، فاحتمال وجود إلكترون في موقع ما **يزداد** إن كانت سعة موجته فيه (أو بالأحرى مربع هذه السعة) **كبيرة، ويقلّ** إن كانت هذه السعة **صغيرة**. ويوضح الشكل 4 – 9 هذه النتيجة.

تبدو هذه الفكرة غريبة حقاً، إذ ما صلة الاحتمالية بصَوْغ مبادئ الفيزياء الأساسية؟ إن الاحتمالية كما نعرفها أمر يجري الحديث عنه في ميادين سباق الخيل، وفي إلقاء قطعة نقود في الهواء، وعلى موائد الروليت، وهي تعكس في هذه الحالات معرفتنا **غير التامة** بحقائق الأمور؛ إذ لو عرفنا **تماماً** سرعة عجلة الروليت ووزن كريّة الرخام الصغيرة البيضاء التي تتراقص عليها، ودرجة قساوتها وسرعتها حين سقوطها على

العجلة، وعرفنا كذلك كلّ خصائص المادة التي تُصنع منها فجوات العجلة، وسواها من الأمور، وتيسرت لنا حواسيب قوية تتيح لنا إجراء الحسابات اللازمة، لتمكنّا، وبكل تأكيد، من تحديد الفجوة التي ستقع فيها الكريّة، وذلك وفقاً لقوانين الفيزياء الأساسية. وعلى عدم القدرة على معرفة كل هذه المؤثرات والعوامل، وعلى إمكانية إجراء الحسابات المعقدة اللازمة قبل وضع مبلغ الرهان، تقوم صالات لعبِ الميسر. إن الاحتمالية على موائد الروليت لا تقدم شيئاً أساسياً خاصاً بكيفية عمل العالَم، أما الاحتمالية في ميكانيك الكم فأمر مختلف تماماً، إذ يضعُها في مقام رفيع في فهم هذه الكيفية. لقد أكّد اقتراح بورن، كما أكّدت تجارب لاحقة تلته على مدى نصف قرن، وبصورة أساسية، أن الطبيعة الموجية للمادة تؤكد ضرورة وصفها (أي وصف المادة) بطريقة احتمالية. وتؤكد قاعدةُ دوبروي عدمَ إمكانية ملاحظة هذه الطبيعة الموجية في الأشياء العيانية مثل فنجان القهوة أو مائدة الروليت، حيث لا يكون للاحتمالية الخاصة بميكانيك الكم أي دور البتة؛ أما على المستوى المجهري، فأفضل ما يمكن قوله هو أن هناك احتمالاً محدداً لوجود الإلكترون في موقع محدّد.



الشكل 4-9: *تكون موجة الإلكترون أعظمية حيث يزداد احتمال وجوده، وأصغرية حيث يقل هذا الاحتمال.*

ولهذا التفسير الاحتمالي لموقع الإلكترون ميزةٌ تتجلى في أنه إذا كان بوسع الموجة الإلكترونية أن تسلك كما الأمواج الأخرى، كأن تولّد بعدَ اصطدامها بعقبة ما أشكالاً

مختلفة من التموجات، فإن هذا لايعني أن الإلكترون قد انقسم على نفسه إلى أجزاء منفصلة، بل يعني بالأحرى وجود عدد من المواقع **يمكن** توقّع احتمال وجود الإلكترون فيها، وهو ما يعني عملياً أننا لو كرّرنا مرات ومرات وعلى النحو ذاته تجربة معينة يشارك فيها إلكترون ما، فإن موقعه، كما تحدده هذه التجربة، لن يكون هو نفسه دوماً في المرات المختلفة، بل سيعطى هذا التكرارُ نتائجَ متعددة متباينة يتحكم فيها شكل الموجة الاحتمالية بعدد مرات وجود الإلكترون في موقع ما. فإذا كانت هذه الموجة (أو بتعبير أدق إن كان مربّع سعتها) أكبرَ في الموقع A بمرّتين مما هو في الموقع B، فإن النظرية تتبىء بأننا سنجد الإلكترون، خلال فترة تكرار التجربة الواحدة، في الموقع A عدداً من المرات يبلغ ضعفَي عدد مرات وجوده في الموقع B. وهكذا فإن أفضل ما يمكن قوله هو **إمكانية** التنبؤ باحتمال حدوث نتيجة ما لهذه التجربة، إذ لا يمكن التنبؤ بنتائجها الحقيقية.

وهكذا، وإذا كان بوسعنا أن نحدد رياضيّاتياً الشكلَ الدقيق للأمواج الاحتمالية، فإن **بوسعنا** كذلك أن نختبر التنبؤات الاحتمالية لنتائج تجربة ما عبْر تكرارها عدداً كبيراً من المرات، أي عبر التحديد التجريبي لأرجحية حصول نتيجة ما أو سواها.

وقبل مضي أشهر قليلة على إعطاء دوبروي الصفةَ الموجية للمادة، حقق شرودنغر خطوة حاسمة لتجسيد فكرة دوبروي، فوضع معادلة تتحكم بشكل الأمواج الاحتمالية وبتطورها، وهو ما أصبح يعرف **بالتوابع الموجية**. وما لبثت هذه المعادلة وتفسيرُها الاحتمالي أن أعطت تنبؤات صحيحة وعلى درجة عالية من الدقة.

ومع حلول عام 1927 فقدَ العالمُ براءتَهَ التقليدية، وغابت، إلى غير رجعة، عن أذهاننا صورةُ الكون المنتظم بمكوناته الفردية التي، إن حُددت لها في لحظة ما شروط ابتدائية لحركتها، سارت في طريق مرسوم لا تحيد عنه. فالكون، تبعاً لمفاهيم ميكانيك الكم، يتطور وفق صياغة رياضيّاتية دقيقة وصارمة، إلاّ أن هذا الإطار الرياضيّاتي يحدّد فقط احتمالية وقوع حدثٍ ما دون أن يحدّد أي حدث سيقع فعلاً.

ويجد الكثيرون هذا الاستنتاج مقلقاً بل وغير مقبول على الإطلاق؛ كان أنشتاين واحداً من هؤلاء، وقد حذّر أنصارَ ميكانيك الكم في واحدة من أشهر العبارات التي قيلت في تاريخ الفيزياء: "إن الله لا يلعب النرد فيما يخصّ أمور الكون "، فهو كان يرى أن الاحتمالية حلّت محل الفيزياء التقليدية للسبب ذاته الذي تسيطر فيه على ما يجري على مائدة الروليت، وهو نقص أساسي في فهمنا وفي معطياتنا، إذ لا مكان في هذا الكون من

وجهة نظره لمستقبل يتحكم فيه عنصر المصادفة؛ وعلى الفيزياء أن تتنبأ بكيفية تطور الكون وليس باحتمال حدوث تطور ما. إلا أن التجارب الكثيرة المتلاحقة (والتي جرى بعضُ أكثرها إقناعاً، بعد وفاة أنشتاين) أثبتت، وعلى نحو لا يرقى إليه الشك، خطأ ما كان يراه أنشتاين. وكما قال الفيزيائي النظري البريطاني الشهير ستيفن هوكينغ:"إن أنشتاين هو من كان مشوشاً، لا نظرية الكم"[6].

ورغم ذلك فإن الجدل لا يزال قائماً حول ما يعنيه حقاً ميكانيك الكم، فالجميع متفقون على كيفية استخدام معادلاته للوصول إلى تنبؤات صحيحة، لكنهم غيرُ متفقين حول ما تعنيه حقيقة الأمواج الاحتمالية، أو حول كيفية " اختيار" جسيم ما طريقاً لمستقبله يتبعه دون سواه من بين طرق عديدة ممكنة أو متاحة له، أو حتى إن كان هذا الجسيم يختار فعلاً طريقاً ما أم أنه يتشعب في تفرعات مختلفة يسلك عبرها كلّ هذه الطرق المتاحة،في عالم لا يني يتّسع لأكوان متوازية. وتتطلب هذه التساؤلات الكثيرَ من النقاش حولها، وقد وُضعت كتب كثيرة وجيدة تعرض هذه الجوانب المختلفة لميكانيك الكم. لكن أياً كان تفسيرنا له، فهو ينبيء على نحو أكيد لا يرقى إليه الشك أن الكون يقوم على مبادئ غريبة عن دلالات حياتنا اليومية وتجاربها.

وهكذا نخلص من النسبية ومن ميكانيك الكم إلى أننا سنرى، عندما نسبر بعمقٍ كيفيةَ عمل الكون، مظاهرَ تختلف كلية عمّا نألفه. وقد تقتضي الشجاعةُ في طرح أسئلة عميقة، مرونة كبيرة في تقبّل الإجابات.

منظور فاينمان

يُعد ريتشارد فاينمان من أشهر الفيزيائيين النظريين منذ أنشتاين؛ وقد قبل بدايةً بمفهوم الكمّ الاحتمالي لنظرية الكم، إلاّ أنه ما لبث أن عاد وقدم في السنوات التي تلت نهاية الحرب العالمية الثانية منظوراً جديداً ناجعاً لكيفية رؤيته هذه النظرية **يتفق** في تنبؤاته العددية وكلّ ما سبق من آراء أو وجهات نظر، ويختلف عنها تماماً في صياغته؛ لنرَ هذا المنظور في نطاق تجربة الشقين.

إن ما يقلق في الشكل 4-8 هو تصوّرنا أن الإلكترون سيمر عبر أحد الشقين، الأيسر أو الأيمن، لذلك نتوقع أن جمع الشكلين 4-4 و 4-5، على النحو المبين على

الشكل 4-6، يقدم صورة صحيحة ودقيقة لما يحدث فعلاً، فعلى الإلكترون في مروره عبر الشق الأيمن ألا **يهتم** بوجود، أو بعدم وجود، شق أيسر، والعكس بالعكس. إلا أنه **يهتم** بذلك. فأهداب التداخل الحاصلة تقتضي تراكبَ أو تمازج **شيء ما** يتحسس الشقين معاً حتى لو أطلقنا الإلكترونات واحداً تلو الآخر. وقد فسّر شرودنغر ودبروي وبورن ما يحدث بقرَنْهم كل إلكترون بموجة احتمالية ؛ "وسترى" هذه الموجةُ، كما الأمواج المائية في الشكل 4-7، كلا الشقين، وستتعرض بالتالي لنوع التداخل نفسه الذي يسببه تمازجها، وستدل الأماكن التي تكبر فيها الموجه الاحتمالية (بسبب التمازج)، كمواقع الاهتزازات الكبيرة في الشكل 4-7، على المواقع التي يزداد فيها احتمال وجود الإلكترون، كما ستدل الأماكن التي تصغر فيها الموجة الاحتمالية (بسبب التمازج)، كمواقع الاهتزازات الصغيرة أو المعدومة في الشكل 4-7 على المواقع التي يقلّ أو ينعدم فيها احتمال وجود الإلكترون، وستتوزع الإلكترونات التي تضرب اللوحة الفوسفورية واحداً واحداً، تبعاً لهذه الصورة الاحتمالية، مشكلة أهداب تداخل كما في الشكل 4-8.

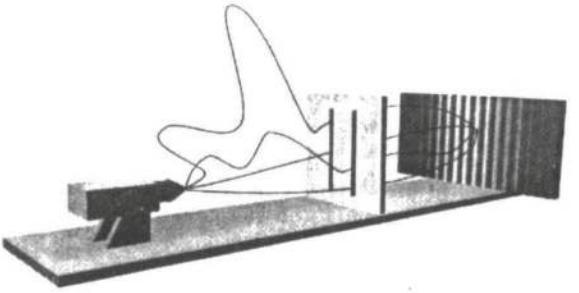
إلا أن فاينمان رأى الأمور من منظار آخر، وتحدّى الفرضية الأساسية القائلة بأن الإلكترون سيمر عبر واحد من الشقين، الأيمن أو الأيسر. وقد تبدو لك بعضُ الحماقة في تحدّيه هذه الفرضية التي تُعد أمراً بديهياً وأساسياً.

ونتساءل، هل نستطيع حقاً معرفةَ الشق الذي مر منه الإلكترون إذا ما **نظرنا** إلى المنطقة الواقعة بين الشقين واللوحة الفسفورية ؟ ونجيب على ذلك بالإيجاب. إلا أنك لتفعل ذلك **تُغيّر في** شروط التجربة. إن **رؤية** الإلكترون، لتحديد مساره، تقتضي **تلمسه** على نحو ما، كأن نسلط عليه ضوءاً ؛ وعلى الفوتونات، حتى تراه، أن تصدمه وترتد عنه. إن تسليط الضوء على ما حولنا من أشجار أو لوحات أو أشخاص يجعلنا نراها عندما ترتد الفوتونات عنها، دون أن يؤثر هذا الارتداد على وضعها بسبب كبرها النسبي. أما الإلكترونات فحبّات مادية صغيرة جداً، وأياً ما كان حرصك وانتباهك عند محاولة تحديد الشق الذي مر منه الإلكترون، فإن الفوتونات التي ستصطدم به وترتدّ عنه، ستؤثر على وضعه وعلى حركته. وتبيّن المعطيات التجريبية أن تغيّر شروط التجربة على نحو يسمح فقط بتحديد الشق الذي مرّ منه الإلكترون، سيغير النتائج التي

سبق ورأيناها على الشكل 4 – 8، لتصبح كالتي على الشكل 4 – 6، حيث لم يكن أي تداخل!، أي أن ميكانيك الكم يقضي بزوال ظاهرة التداخل عند تحديد الشق الذي مر منه الإلكترون.

وهكذا كان فاينمان محقاً في طرح تحدّيه، فقد أيقن الفيزيائيون مع نهاية عشرينيات القرن العشرين أنه رغم قولنا بضرورة مرور الإلكترون عبر أحد الشقين فقط، فإن أي محاولة للتحقق من ذلك ستؤدي إلى تغيير شروط التجربة الأصلية وإلى سقوطها.

ادّعى فاينمان أن كل إلكترون يخترق الحاجز في طريقه إلى اللوحة الفسفورية يمر في **شقّيه** كليهما. قد يبدو ذلك ضرباً من الجنون، لكن تمهّل قليلاً فقد تكون الأمور أكثر إثارة. ذلك أن فاينمان كان يدلّل في مناقشاته على أن كل إلكترون منفرد يسلك في طريقه من منبعه وحتى اللوحة الفسفورية **كل المسارات الممكنة له بآن واحد**. وتبدو على الشكل 4–10 بعض هذه المسارات. فالإلكترون قد يمر بسهولة ويسر من الشق الأيسر، كما قد يمر بسهولة ويسر أيضاً من الشق الأيمن؛ وقد يتجه نحو الشق الأيسر ثم يبدل مساره فجأة ليمر عبر الشق الأيمن، أو قد يروح جيئة وذهاباً ليعود فيمر من الشق الأيسر. وقد يقوم برحلة طويلة تحمله إلى مجرة الأندروميدا(المرأة المسلسلة) قبل أن يعود فيمر من الشق الأيسر، متجهاً نحو اللوحة الفسفورية ...وهكذا..أي أن الإلكترون "يستشم" **كل** طريق ممكن ينقله من موقعه الأولي إلى محطته الأخيرة.



الشكل 4–10: *يرى منظور فاينمان لميكانيك الكم أن الجسيمات تسلك في رحلتها من موقع إلى آخر كلّ السبل الممكنة لها. وتبدو على هذا الشكل بعضُ المسارات اللامتناهية العدد التي يسلكها إلكترون متفرد في رحلته من منبعه إلى اللوحة الفسفورية، حيث يُرى أن هذا الإلكترون يمر عبر الشقين معاً.*

بيّن فاينمان إمكانية قرْنِ كل واحد من المسارات الممكنة بعددٍ ما بحيث يعطي متوسطُ هذه الأعداد جميعاً النتيجةَ ذاتها التي تعطيها الاحتمالية، محسوبة بدلالة التوابع الموجية. وهكذا تنتفي الحاجةُ بمنظور فاينمان لقرْن موجةٍ احتمالية بالإلكترون، من خلال تخيّل أمر آخر قد يكون أكثر غرابة من ذلك. فاحتمال وصول الإلكترون (باعتباره جسيماً) إلى موقع محدد على اللوحة الفسفورية، هو حصيلة جمع المساهمات المختلفة لكل الطرق التي تتيح له هذا الوصول، وهو ما يُعرف بمقاربة فاينمان لميكانيك الكمّ عبر "جمع المسارات"[7].

وقد تقف مشدوهاً ومعترضاً أمام هذه النتيجة، إذ كيف يتسنى لإلكترون واحدٍ أن يسير **في الوقت ذاته** في مسارات مختلفة، عدا عن عددها اللانهائي؟ واعتراضك هذا وجيه وفي محله. لكن ميكانيك الكم، وهو أساس فيزياء عالمنا، يطلب إليك أن تدع اعتراضك هذا جانباً ولو مؤقتاً. إن نتائج الحسابات تبعاً لمقاربة فاينمان، وتبعاً كذلك لطريقة التوابع الموجية، تتوافق والمعطيات التجريبية؛ لذلك علينا أن نقبل من الطبيعة أن تملي علينا ما هو مدرَك وما هو غير مدرَك؛ وقد كتب فاينمان مرة يقول: يصف [ميكانيك الكم] الطبيعة بالسخف وباللامعقولية، بالنسبة للحس العام؛ إلا أن تنبؤاته تتوافق والمعطيات التجريبية، لذلك فإن علينا أن نقبلها كما هي: إنها سخيفة ومنافية للعقل [8]. لكن، ومهما بدت الطبيعة سخيفة ومنافية للعقل عند تفحّصها في مستواها المجهري، فإن **على أشيائها التآمر بحيث تستعيد واقعيتها التي نألفها في حياتنا اليومية.**

و قد بيّن فاينمان أننا لو تفحصنا حركة مثل هذه الأجسام المألوفة، مثل كرات القدم أو الطائرات أو الكواكب، فإن مقاربته، بقرْن عددٍ ما بكل مسار محتمل، كفيلة بأن **تُلغي بعضُ هذه المسارات بعضَها الآخر، عدا واحداً منها**، عند جمع مساهماتها كلها. وهذا المسار الوحيد المتبقي من بين كل المسارات اللامتناهية العدد هو تماماً المسار الذي نلاحظه والذي تتنبأ به قوانين نيوتن في الحركة. لذلك **تبدو** لنا هذه الأجسام وقد سلكت مساراً وحيداً يمكن التنبؤ به بين نقطة انطلاقها وموقع وصولها. أما في حالة الأجسام المجهرية، فتنبىء مقاربة فاينمان بوجود مسارات عديدة ومختلفة (تُقرن عدداً بكل واحد منها) قادرة على المساهمة في خلق حركة الجسم، وهي غالباً ما تساهم في ذلك. ففي

تجربة الشقين مثلاً يمر بعضٌ من هذه المسارات عبر شقين مختلفين وتنشأ أهداب التداخل، بحيث لا يمكننا القول بأن الإلكترون يمر عبر شق واحد فقط، إذ يؤكد تشكل أهداب التداخل، كما تؤكد صياغة فاينمان البديلة لميكانيك الكم، على مروره عبر الشقين معاً. وبمثل ما تقدم لنا الشروحُ أو التعليقات المختلفة التي تتحدث عن عمل فني ما، ككتاب أو فيلم سينمائي، العونَ لحسن تفهّمه، فإن المقاربات المختلفة لميكانيك الكم تفعل ذلك أيضاً. ورغم توافق التنبؤات التي يعطيها منهج التابع الموجي، توافقاً تاماً مع ما تعطيه مقاربة فاينمان في جمع المسارات، فإن هذين المنهجين يقدمان طريقتين مختلفتين للتفكير بما يجري فعلاً، وسنعتمد لاحقاً هذا المنهج أو ذاك كإطار لتفسير ما يجري حولنا.

غرائب كمومية

لا بد بعد كل ما تقدّم من أن تكون قد تكونتْ لديك فكرة ما عن الطريقة الجديدة المثيرة التي يعمل بها الكون، من منظور ميكانيك الكم. وإذا لم تكن قد شعرتَ بعد بأنك أصبحتَ من ضحايا الإصابة بالدوار، الذين تحدث عنهم بوهر، فإن ما سنعرضه الآن من غرائب كمومية سيشعرك ببعض الصداع على الأقل.

إن الإحساس بميكانيك الكم في أعماقنا على درجة كبيرة من الصعوبة تفوق صعوبةَ تقبّل نظريات النسبية؛ ذلك أن هذا الإحساس يقتضي منا أن نفكر بمثل تفكير شخص مجهري، وُلِد ونشأ في عالم مجهري. إلاّ أن هناك مظهراً للنظرية الكمومية يُمثل السمةَ الرئيسة للتفكير الكمومي وتمايزَه عن التفكير الكلاسيكي، وهو **مبدأ الارتياب** (الذي اكتشفه الفيزيائي الألماني فرنر هايزنبرغ عام 1927) قد يكون الدليلَ الذي يوجه حدسنا نحو فهم هذا العالَم (الكمومي).

ترجع فكرة هذا المبدأ إلى اعتراض قد يكون خطر على بالك سابقاً، حيث لوحظ أن تحديد الشق الذي يمر منه الإلكترون (أي تحديد موقع الإلكترون) يؤثر على حركته (أي على سرعته)؛ ونتساءل إن كان بوسعنا تحديدُ هذا الموقع بواسطة منبع ضوئي " لطيف إلى أبعد حد"، بغية الإقلال، إلى أقصى حد، من تأثير فوتوناته على حركة الإلكترون

(وذلك تماماً كما نستطيع التأكد من وجود شخص ما بلمسه بلطف، أو بالربت على كتفه بلطف أيضاً)؟ تجيب فيزياء القرن التاسع عشر على ذلك بالإيجاب؛ فاستخدام منبع ضوئي شديد الخفوت مع كاشف ضوئي شديد الحساسية، يضعف من تأثير المنبع على حركة الإلكترون وقد يلغيه. لكن ميكانيك الكم يدل على وجود خلل في هذا التفكير. ذلك أن إضعاف شدة المنبع الضوئي يعني إنقاص عدد الفوتونات التي يصدرها؛ وإذا ما وصلنا في ذلك إلى الحد الذي يُصدر المنبعُ فيه فوتوناتٍ منفردة الواحد تلو الآخر، فلن يكون بوسعنا أن نضعف شدة الضوء أكثر من ذلك إلا بإطفاء منبعه، أي أن هناك حداً ميكانيكياً – كمومياً أساسياً لرقة المسبار المستخدَم. لذلك فإن تحديد موقع الإلكترون سيؤثر، ولو بحدّ أدنى، على تحديد سرعته.

وهذا القول صحيح إلى حد ما. ذلك أن قانون بلانك يقول بتناسب طاقة الفوتون مع تواتره (أي عكساً مع طوله الموجي)، ولذلك فإن استخدام ضوء بتواتر ينخفض شيئاً فشيئاً، يعني إصدارَ فوتونات منفردة بطاقات تنخفض تدريجياً إلى الحد الذي نريد. وهنا يكمن الفخ. إذ عندما تصدم موجةٌ جسماً ما وترتدّ عنه، فإن ذلك يسمح بتحديد موقع الجسم **ضمن حدود خطأ مساوٍ لطول الموجة**. تخيّل، لإدراك ذلك، أنك تريد تحديد موقع صخرة كبيرة مغمورة قليلاً بالماء، وذلك من معرفة تأثيرها على أمواج المحيط المارة بجوارها. ترِد هذه الأمواج، باقترابها من الصخرة، على شكل قطار من دورات موجية متعاقبة الواحدة تلو الأخرى، متحركة نحو الأعلى والأسفل؛ وبعد أن تجتازها تتشوه الدورات الموجية المنفردة دالة بتشوهها على وجود الصخرة المغمورة. تُعد الدورة الموجية المنفردة المتحركة نحو الأعلى والأسفل أصغرَ وحدة يتكون منها قطار الأمواج، ومن خلال مراقبة هذه الدورات وكيفية تشوهها نستطيع فقط أن نحدد موقع الصخرة المغمورة وذلك بهامش خطأ يساوي طولَ الدورة الموجية أي طولَ الموجة المائية. أما في حالة الضوء فتُمثل الفوتونات، التي تكوّن الموجةَ الضوئية، الدورات الموجية المنفردة (بحيث يحدد عددها ارتفاع هذه الدورات). لذلك يمكن استخدام الفوتون لتحديد مكان وجود جسم ما بهامش خطأ يساوي طول موجة الفوتون.

وهكذا نجد أنفسنا أمام عملية توازن ميكانيكية – كمومية؛ فلو استخدمنا ضوءاً بتواتر عال (أي بطول موجي صغير)، أمكننا تحديد موقع الإلكترون بدقة أكبر، لكن طاقة الفوتونات ذات التواترات المرتفعة، مرتفعة بدورها أيضاً، ولذلك فإن تأثيرها على حركة الإلكترون (أي على سرعته) يكون كبيراً؛ ولو استخدمنا ضوءاً بتواتر منخفض (أي بطول موجة كبير) فإن ضآلة طاقة فوتوناته تضعف من تأثيرها على حركته (أي على سرعته)، لكننا، بالمقابل، نضحّي بالدقة في تحديد موقعه. درس هايزنبرغ هذه المنافسة بين التأثيرَين ووضع علاقة رياضياتية كمومية بين الدقة في تحديد موقع الإلكترون والدقة في تحديد سرعته، تبيّن، وعلى نحو ينسجم وما ذكرناه، أن هاتين الدقّتين تتناسبان بصورة عكسية فيما بينهما؛ فتحديد موقع الإلكترون بدقة كبيرة يعني ارتياباً أكبر في تحديد سرعته، والعكس بالعكس. ومن الضروري أن نشير هنا إلى نتيجة شديدة الأهمية، فرغم أننا قصرنا مناقشتنا على طريقة معينة لتحديد موقع الإلكترون، فقد بيّن هايزنبرغ أن عملية المنافسة المتبادلة بين الدقة في تحديد الموقع والدقة في تحديد السرعة، تعدُ حقيقة أساسية تصلح دوماً أياً كانت طريقة القياس المتبعة أو الجهاز المعتمد. ويبين الميكانيك الكمي، وخلافاً لمفاهيم نيوتن وحتى لمفاهيم أنشتاين، حيث توصف حركة جسم ما بتحديد موقعه وسرعته، أننا **لا نقدر على تحديد هذين المقدارين بدقة كبيرة**، في العالم المجهري، إذ كلما ازدادت الدقة في تحديد أحدهما نقصت في تحديد الآخر. كما أن هذه النتيجة التي خلصنا إليها في حالة الإلكترونات تصحّ كذلك من أجل **كلّ** مكونات الطبيعة.

حاول أنشتاين أن يقلّل من أهمية هذا التباعد عن الفيزياء التقليدية، وكانت حجته في ذلك أن الإلكترون **لا يزال** يشغل موقعاً محدداً تماماً ويتحرك بسرعة محددة كذلك، رغم مايبدو من تقييد تفرضه المقاربة الكمومية على معرفتنا لهذه السرعة ولذلك الموقع. وقد أكدت الدراسات النظرية، التي قادها، في العقدين الأخيرين من القرن الماضي، الإيرلندي الراحل جوهن بيل، وكذلك النتائج التجريبية التي توصل إليها آلان أسبكت ومعاونوه، وعلى نحو لا يرقى إليه الشك، خطأ موقف أنشتاين، إذ لا يمكن القول بأن للإلكترون، ولكل شيء مادي آخر، موقعاً بقيمة ما محدّدة بدقة وَ، **في الوقت نفسه**، سرعةً بقيمة معطاة بدقة كذلك؛ ذلك أن ميكانيك الكم، إضافة لما يبيّنه من عدم إمكانية التحقّق تجريبياً

من صحة هذا القول، فإنه يبيّن تناقضه المباشر مع حقائق تجريبية أخرى تم إثباتها مؤخراً.

فلو قُدر لك أن تحتجز إلكتروناً منفرداً في صندوق كبير صلب، ثم أخذتَ تضغط ببطء على جدرانه بغية حشر الإلكترون في موقع يمكن تحديده بدقة، فستجده وقد اهتاج بشدة وصار ينتقل ما بين جدار وآخر بسرعات متزايدة لا يمكن التنبؤ بها، كما لو أنه أصيب بمرض رهاب الاحتجاز؛ فالطبيعة، على ما يبدو، لا تسمح بحشر مكوّناتها في زاوية ما. وبمثل ذلك تهتز مكعبات الثلج بشدة في كأسي شراب جورج وجين، كما لو كانت هي أيضاً تعاني من رهاب الاحتجاز الكمومي. إن تخيّلنا أن قيمة $\hbar$ ، في مقهى الإتش بار (H-Bar) أكبر **بكثير** من قيمتها الحقيقية يُخضع كل الأجسام التي حولنا إلى تأثيرات كمومية؛ إلا أن قيمة $\hbar$ في الواقع صغيرة جداً، لذلك فإن مقهى الإتش – بار (H-Bar) لا يعدو كونه أرضاً خيالية، وبذلك فإن هذا النوع من رهاب الاحتجاز هو من سِمات العالَم المجهري حيث تزداد حركة الجسيمات المجهرية هياجاً عند تفحّصها ومحاولة حصرها في منطقة صغيرة.

يؤدّي مبدأ الارتياب أيضاً إلى قيام تأثير مدهش يُعرف **بمفعول النفق الكمومي**، يمكن ملاحظته من خلال المثال التالي: إذا أطلقتَ كريّة بلاستيكية على جدار إسمنتي سميك، فإن الفيزياء التقليدية تؤكد ما تتوقع حدوثه وهو ارتداد الكريّة عن الجدار لأنها لا تملك الطاقة الكافية لاختراقه؛ أما لو نظرنا إلى هذا المثال على المستوى المجهري، فإن الميكانيك الكمي ينبىء، وعلى نحو لا لبس فيه، أن في كل التوابع الموجية للجسيمات التي تكون الكريّة جزءاً صغيراً **يندلق خارجاً** عبر الجدار، وهو ما يعني وجود احتمال ضئيل. لكنه غير معدوم، **لإمكانية** اختراق الكريّة الجدار، وخروجها من جهته الأخرى. ونتساءل: كيف يحصل ذلك؟ ومرة أخرى نجد سبب حدوثه في مبدأ الارتياب لهايزنبرغ.

ولإيضاح ذلك، تخيّل أنك كنت فقيراً معدماً، وفجأة تعلم أن قريباً لك توفي في بلاد المهجر مخلفاً ثروة كبيرة يمكنك المطالبة بها. ولأنك لا تملك ثمن بطاقة السفر، تتوجه إلى رفاقك وتشرح حالَك لهم وتسألهم مساعدتَك في التغلّب على هذه العقبة التي تحول بينك وبين هذه الثروة الجديدة، بإقراضك مؤقتاً ثمن البطاقة على أن تعيده إليهم مضاعفاً

بعد عودتك؛ وتجدهم، لسوء حظك، لا يملكون هذا المبلغ، فتتذكر أن لك صديقاً قديماً يعمل في إحدى شركات الطيران، فتتوجه إليه وتسأله ما سألتَهم. وإذ يجد نفسه غير قادر على أن يقدّم لك المالَ فإنه يقدّم لك الحل. إن نظام المحاسبة في الشركة التي يعمل لديها منظم على نحو يتيح لك دفع ثمن بطاقة الطائرة خلال أربع وعشرين ساعة من وصولك إلى وجهتك دون أن يلاحظ أحد أنك لم تدفع ثمنها قبل سفرك. وبذلك ستتمكن من المطالبة بهذا الميراث.

ونظام المحاسبة في الميكانيك الكمي شبيه تماماً بنظام المحاسبة في شركة الطيران هذه ؛ وكان هايزنبرغ قد بيّن من جهة أخرى وجود علاقة تبادليّة بين الدقة في قياس **الطاقة** والدقة في تحديد **الفترة الزمنية** اللازمة لهذا القياس (شبيهة بالعلاقة التبادلية بين الدقة في تحديد الموقع والدقة في قياس السرعة)، بحيث لا يسمح الميكانيك الكمي بالقول، إن الطاقة التي يملكها جسيم ما في لحظة محددة بدقة، ذاتُ قيمة محددة بدقة أيضاً. فتحديد قيمة هذه الطاقة بدقة كبيرة يقتضي إجراءَ هذا التحديد في فترات زمنية أطول (أي في زمن غير محدد بدقة)، وإجراءُ القياس في فترة زمنية قصيرة (أي في زمن محدّد بدقة) يعني عدمَ إمكانية إعطاء قيمة دقيقة للطاقة، ويعني بالتالي إمكانية تغيّرها على نحو كبير. وهكذا، وكما " يسمح" نظام المحاسبة في شركة الطيران باستعارة " المبلغ" اللازم لشراء البطاقة، شريطة ردّه خلال فترة قصيرة جداً، فإن ميكانيك الكم يسمح للجسيم أن " يستعير" طاقة كبيرة طالما أنه سيعيدها خلال فترة قصيرة جداً، يحددها مبدأ الارتياب لهايزنبرغ.

وتبيّن رياضيات ميكانيك الكم أنه كلما ارتفع الحاجز الطاقي، تضاءل احتمال حدوث عملية المحاسبة المجهرية المبدعة هذه؛ أما الجسيمات المجهرية التي تواجه جداراً مصمتاً فقادرة (وهي تفعل ذلك أحياناً) على استعارة ما يكفيها من طاقة لتحقيق ما تعتبره الفيزياء التقليدية أمراً مستحيلاً، وهو نفاذها عبر نفق إلى منطقة لا تسمح لها طاقتُها الابتدائية بالعبور إليها؛ وكلما تعقّدت تلك الأجسام وازداد عددُ مكوناتها، تضاءلت إمكانية حدوث هذه النفقية الكمومية، على احتمال حدوثها، لأن عبور الجسيم كله عبر النفق يقتضي تملك **كل** جسيماته الفردية حظاً وافراً يتيح لها أن تُنجز كلها معاً وفي الوقت ذاته

عملية العبور النفقي الكمومي. إن سلسلة الحوادث الغريبة التي شهدناها في مقهى الإتش- بار (H-Bar)، من اختفاء سيكار جورج أو من عبور المكعب الثلجي جدار الكأس، أو من مرور جورج وجين عبر جدار المقهى، أمور **يمكن** أن تحدث، كعمليات عبور نفقي كمومي في أرض خيالية مثل المقهى المذكور تكون فيها قيم $\hbar$ كبيرة جداً، وعلى نحو تُعد معه تلك الحوادث أمراً اعتيادياً مألوفاً؛ لكن قواعد الاحتمالات في ميكانيك الكم، وبخاصة ضآلة القيمة الحقيقية لـ $\hbar$ في العالَم الحقيقي تبين ضآلة إمكانية حدوثها في عالَمنا. فلو توجهتَ في كل ثانية باتجاه جدار صلب، فقد تظل تفعل ذلك طيلة زمن أطول من عمر الكون الحالي حتى تتاح لك فرصة للمرور عبر هذا الجدار في واحدة من محاولاتك، أي لو أعطيت صبراً وطول عمر أبديين، لأتيح لك أن تمر عبره نحو طرفه الآخر.

يُعد مبدأ الارتياب حجرَ الرحى أو الأساسَ في مفهوم ميكانيك الكم. وما نراه حولنا من ظواهر أساسية غير قابلة للنقاش (كأن يكون للأجسام مواقع محددة وسرعات محددة، وأن تكون لها أيضاً طاقات محددة في أزمنة محددة) مردّه إلى ضآلة قيمة $\hbar$ في عالمنا. والأمر البالغ الأهمية هو أن تطبيق هذا الفهم الكمومي على نسيج بنية الزمكان يظهر وجود عيوب أساسية في " غرزات نسيج الثقالة"، ويقود إلى التعارض الرئيس الثالث الذي واجهتْه فيزياءُ القرن العشرين.

الفصل الخامس

الحاجة إلى نظرية جديدة
النسبية العامة في مواجهة ميكانيك الكم

تعمّق فهمنا للكون الفيزيائي على نحو كبير خلال القرن الماضي، إذ سمحت الأسس النظرية لميكانيك الكم وللنسبية العامة بوضع تنبؤات قابلة للتجربة والاختبار عن كثير من الظواهر الفيزيائية، وبفهمها. تقع هذه الظواهر في مجال واسع جداً يتراوح بين ما يجري في العوالم الذرية وما دونها إلى ما يحدث على مستوى المجرات فمجموعاتها فما هو أبعد من ذلك حتى بنية الكون كله ذاتها. ويعد هذا الفهم إنجازاً خارقاً تتجلّى قيمته الخلاّقة في تمكّن الإنسان، الذي يعيش على كوكب صغير يدور حول نجم متوسط يقع في الأطراف القصيّة لمجرة عادية، من فهم أكثر الخصائص غرابة في الكون الفيزيائي وذلك من خلال التفكير والتجربة. لكن الفيزيائيين لن يكتفوا، بطبيعتهم، بما حققوه حتى الآن، ولن يشعروا بالرضى إلاّ عندما يرون حقيقة أنهم كشفوا النقاب عن المفاهيم الأساسية الأعمق في هذا الكون، وهو ما لمّح إليه ستيفن هوكنغ وعبّر عنه بقوله إنه الخطوة الأولى لمعرفة " عقل الإله[1]".

والأدلة كثيرة ومتوافرة حول عدم قدرة ميكانيك الكم والنسبية العامة على الوصول بنا إلى هذا المستوى الأعمق من الفهم. لكلٍّ من هاتين النظريتين مجال تطبيق خاص بها يختلف إلى حد كبير عن مجال تطبيق النظرية الأخرى، بحيث أن معظم الأوضاع التي نراها حولنا تقتضي تطبيق هذه النظرية أو تلك، وليس الإثنتين معاً؛ ولا تُرى الحاجة إلى اعتماد النظريتين معاً، من أجل فهم سليم لما يحدث، إلاّ في بعض الحالات الحدّية التي تكون الأجسام فيها ثقيلةً جداً وصغيرةً جداً، كما في مراكز الثقوب السوداء مثلاً أو في لحظة الانفجار الأعظم عند بدء نشوء الكون. ولكن اعتماد النظريتين معاً يقود إلى نتائج

مأساوية، كما يحصل عند تقريب النار من مسحوق البارود، حيث يعطي إجابات لا معنى فيزيائياً لها لأسئلة منطقية ذات دلالات محدّدة. وتبدو هذه اللامعقولية غالباً من خلال التنبؤ الذي يعطيه ميكانيك الكم لاحتمال حدوث عملية ما، حيث لا يأخذ هذا الاحتمال قيمة محدّدة مثل 20% أو 73% أو 91%، بل يأخذ قيمة **لا متناهية في الكبر**. ونتساءل عن معنى احتمالٍ تزيد قيمته عن الواحد (أي 100%)، إذا ما تجاوزنا ذكر قيمةٍ لا نهائية له. يقودنا ذلك إلى الإقرار بوجود خطأ أساسي ما، ويسمح التفحص الدقيق للخصائص الأساسية لنظريتي النسبية العامة وميكانيك الكم بالتعرف على ماهية هذا الخطأ.

جوهر ميكانيك الكم وكنهه

عبَرت الفيزياء، مع اكتشاف هايزنبرغ مبدأ الارتياب، منعطفاً حاداً لا عودة منه. ورغم أن مفاهيم الاحتمالية والتوابع الموجية والتداخل والكوانتا حملت معها مضامين وطرقاً جديدة مختلفة بصورة جذرية عن الطرق القديمة لرؤيتنا الحقيقة، فقد ظل الفيزيائي التقليدي المعاند يتشبّث بخيط رفيع من الأمل في أن التباعد عن المفاهيم التقليدية، الذي أتت به تلك المفاهيم، لن يكون ذا بال في نهاية المطاف عندما تُكتشف كل القوانين وتصل قصة البحث عن الحقيقة إلى نهايتها. إلاّ أن مبدأ الارتياب جاء ليقضي بصورة أكيدة على كل محاولة للتشبّث بالماضي والعودة إلى مفاهيمه.

يخبرنا هذا المبدأ أن الكون يصبح بذاته مضطرباً وهائجاً عندما نتفحصه في أبعاده الأصغر فالأصغر وفي فتراته الزمنية الأقصر فالأقصر. وقد سبق ورأينا بعض الأدلة على ذلك عندما حاولنا تحديد مواقع بعض الجسيمات الأساسية مثل الإلكترونات التي وصفناها في الفصل السابق. فتسليط ضوء بتواتر عالٍ جداً على الإلكترون يسمح بتحديد موضعه بدقة عالية جداً، ولكن مقابل دفع ثمن غالٍ إذ تصبح التجربة إتلافية، لأن الفوتونات العالية التواتر تملك طاقة كبيرة وهي تعطي الإلكترون، عند تسليطها عليه، ركلة كبيرة تبدّل سرعته بصورة ملموسة. والأمر شبيه بحالة الهياج والفوضى التي تسود في غرفة مليئة بالأطفال، حيث يمكن تحديد مواضعهم اللحظية بدقة كبيرة، إلا أنه لا يمكن التحكم بسرعاتهم، بمقاديرها وباتجاه حركتها. ويعني عدم القدرة هذا على تحديد

مواضع الجسيمات الأساسية وسرعاتها، بآن واحد معاً، أن العالَم المجهري، بذاته، في حالة هيجان واضطراب.

يعرض هذا المثال العلاقة الأساسية الكائنة بين الارتياب والهيجان إلاّ أنه لا يكشف إلاّ جانباً جزئياً منها؛ وهو قد يدفع إلى الاعتقاد بأن ظاهرة الارتياب لا تظهر إلاّ عند تدخّل مراقب غرٍّ على مسرح الأحداث، وهذا **غير** صحيح. وقد ينقلنا خطوةً باتجاه الحقيقة مثالُ الإلكترون المحتجَز في صندوق صغير وردّ فعله القوي على هذا الاحتجاز، بتحركه بعنف وبسرعات كبيرة كأنه يحاول الإفلات من أسره؛ وستعاني سرعته ما بين لحظة وأخرى تغيّرات كبيرة لا يمكن التنبّؤ بها حتى بغياب الركلات المباشرة التي يوجهها إليه الفوتون في اختبارات قد تغدو إتلافية. ومرة أخرى فإن هذا المثال لا يكشف تماماً الخصائص المجهرية المذهلة للطبيعة التي يقتضيها اكتشاف هايزنبرغ؛ ذلك أن مبدأ الارتياب ينبئ بوجود مقدار هائل من النشاط والفعالية حتى في أكثر البنى هدوءاً في مخيلتنا، مثل منطقة خاوية في المكان. وتزداد هذه الفعالية نشاطاً كلما تفحصناها بمقاييس أصغر وفي فترات زمنية أقصر.

وتبدو طريقة المحاسبة الكمومية ضرورية لفهم ذلك؛ فقد رأينا في الفصل السابق أن بوسع شخص ما استعارة مبلغ من النقود، لفترة مؤقتة، وذلك للتغلب على عقبة مالية تعترضه. وكذلك فإن بوسع جسيم ما، مثل الإلكترون، أن يستعير قسطاً من الطاقة لفترة مؤقتة وذلك للتغلب على عقبة فيزيائية تعترضه؛ ويدفعنا ميكانيك الكم خطوة إلى الأمام في مجال هذا التشابه. تخيّل أن شخصاً مكرهاً على الاستدانة، يمضي يطلب النقود من صديق لآخر، وعلى نحو تزداد معه قيمة المبلغ المقترض مع قصر مدة الاقتراض. وهكذا يستعير هذا الشخص مبلغاً من النقود ليردّه ويستعير مبلغاً آخر فيردّه...، أي أن المبلغ الذي بحوزة هذا الشخص في لحظة ما يخضع لتغيّرات وتبدّلات حادة، كما قيمة الأسهم التي ترتفع وتنخفض في بورصة وول ستريت خلال يوم حافل بالنشاط؛ إلا أن رصيده لن يكون في نهاية المطاف أفضل مما كان عليه في البداية.

يؤكد مبدأ الارتياب لهايزنبرغ حدوث عملية مشابهة تجري على نحو دائم في الكون، ويتم فيها، جيئةً وذهاباً، تبادل مسعور للطاقة والزخم (كمية الحركة-الاندفاع)، وذلك عندما يُنظَر إلى الكون بأبعاده المجهرية وفي فترات زمنية مجهرية أيضاً. ووفقاً

لهذا المبدأ، فإن قيم الطاقة والزخم، حتى في منطقة فارغة من المكان مثل جوف صندوق خاوٍ، **ليست قيماً ثابتة ومؤكدة** بل إنها تتراوح في مجال واسع بين حدود قصوى وحدود دنيا. ويكبر مجال التراوح كلما صغر حجم الصندوق أو قصرت الفترة الزمنية التي تُحدَّد فيها هذه القيم. كلّ شيء يجري إذن كما لو أن المنطقة الفارغة من المكان داخل الصندوق هي المستدين المكرَه دوماً وأبداً على " اقتراض" الطاقة والزخم من الكون و" ردّها" إليه ثانية. لكن ما هو الشيء الذي يشارك في عملية التبادل هذه التي تحدث في هذه المنطقة الهادئة و**الفارغة** من المكان؟ والجواب هو كلّ شيء. فالطاقة (والزخم كذلك) هي العملة القابلة للتبادل والتحويل. وكما تنبئ معادلة أنشتاين الشهيرة، $E=mc^2$، بأن الطاقة تتحول إلى مادة كما تتحول المادة إلى طاقة، وإذا ما كان مجال تغيّر الطاقة كبيراً جداً (أي إذا كان مقدار الطاقة القابل للتحويل كبيراً) فقد يعمل ذلك على تحوّلها، ولفترة مؤقتة، إلى إلكترون ومضاده البوزيترون حتى لو كانت المنطقة فارغةً في البداية. ولما كان على المستدين أن يرد هذه الطاقة المقترضة بسرعة، فإن هذين الجسيمين سيتفانيان بعد برهة قصيرة محرِّرَين الطاقة ذاتها التي استُخدمت في تشكلّهما. يصح هذا القول على كافة الأشكال الأخرى التي يمكن للطاقة والزخم أخذها –مثل تشكل جسيمات أخرى وفنائها، وتغيرات الحقل الكهرطيسي المسعورة، وتبدلات حقول القوى الشديدة والضعيفة–. وينبئنا مبدأ الارتياب الخاص بميكانيك الكم أن الكون، بمقاييسه المجهرية، يشكل مسرح أحداث يعج بالعنف والفوضى والاهتياج. وكما قال فاينمان مرة في دعابة له: " يا لها من مضيعة للوقت! أجسامٌ تُخلَق، فيُفني بعضُها بعضَها الآخر، ويتكرر الخلق فالفناء، وتكرّ السبّحة[2]". وهكذا إذن ولأن عمليات الاقتراض وردّ الدين يُفني بعضُها بعضَها الآخر، فإن منطقة فارغة من المكان ستبدو لنا هادئة لا حركة فيها، إلاّ إذا تفحصناها بدقة مجهرية أو بما هو أدق منها. فمبدأ الارتياب هو الذي يخفي قدراً كبيراً من النشاط المجهري[3]. وهذا النشاط أو الاهتياج المسعور، كما سنرى بعد قليل، هو **العقبة** التي تحول دون اندماج النسبية العامة وميكانيك الكم.

نظرية الحقل الكمومي

جهد الفيزيائيون النظريون، دون كلل، خلال عقدي الثلاثينات والأربعينات من القرن العشرين، بإشراف بول ديراك وولفغانغ باولي وجوليان شفينغر وفريمان دايسون وسين إيتيرو توموناغا وفاينمان، وسواهم، لوضع صياغة رياضيّاتية قادرة على التعامل مع الأوضاع المجهرية الصعبة المراس التي وصفناها؛ ووجدوا أن معادلة الموجة الكمومية لشرودينغر، التي مرّ ذكرها في الفصل الرابع، تصف الفيزياء المجهرية بصورة تقريبية فقط. يصحّ هذا التقريب على نحو ممتاز إذا لم نذهب بعيداً في سبرنا أعماق الهيجان المجهري (سواء بصورة تجريبية أو نظرية)، في حين يبطل دوره بالتأكيد إذا ما فعلنا ذلك.

كانت الفكرة الأساسية التي تجاهلها شرودينغر في صياغته مبادئ ميكانيك الكم هي النسبية الخاصة. وهو حقيقة **حاول** في البداية إدخالها في صياغته، لكن المعادلة الكمومية التي خلص إليها عندئذ كانت تتنبأ بأمور لا تنسجم والقياسات التجريبية في حالة الهيدروجين، لذلك تبنّى منهجاً مغايراً يعتمد مبدأً سائداً منذ القدم وهو مبدأ "فرّقْ تسدْ"، فعمد إلى "تفريق" مفاهيمنا عن الكون الفيزيائي بتبنيه استراتيجية عمادها خطوات قصيرة متعددة متتالية تتضمن الاكتشافات الحديثة بدلاً من محاولة إدخال كل مفاهيمنا عن هذا الكون في عملية واحدة. لذلك بحث بداية عن إطار رياضياتي يتضمن مثنوية الموجة والجسيم المكتشَفة تجريبياً، ووجد هذا الإطار، ولم يُدخل فيه النسبية الخاصة في تلك المرحلة المبكرة من فهمنا العالَم المجهري[4]. لكن سرعان ما أدرك الفيزيائيون أهمية هذه النسبية ودورها الأساسي في أي إطار سليم لميكانيك الكم؛ فالهيجان المجهري المسعور يتطلب قبول أن تبدو الطاقة بأشكال مختلفة، كما تدل على ذلك المعادلة الشهيرة $E= mc^2$، وهي فكرة تجاهلتها مقاربة شرودينغر إذ تجاهلت النسبية الخاصة ومطواعية المادة والطاقة والحركة.

ركّز الفيزيائيون، في محاولاتهم الأولية لدمج النسبية الخاصة بالمفاهيم الكمومية، على القوة الكهرطيسية وتفاعلاتها مع المادة، فوضعوا **نظرية الإلكتروديناميك الكمومي**

(التحريك الكهربائي الكمومي)، وهي مثالٌ عمّا أصبح يُعرف لاحقاً بنظرية **حقل كمومي نسبوية**، أو اختصاراً **بنظرية حقل كمومي**. وهي نظرية " كمومية" لأنها تحمل في ثناياها، ومنذ بدايتها، جميع قضايا الاحتمال والارتياب؛ وهي نظرية "حقل" لأنها تدمج المبادئ الكمومية بالمفهوم التقليدي لحقل القوة –وهو ما يمثّل هنا الحقل الكهرطيسي لماكسويل؛ وهي أخيراً "نسبوية" لأنها تتضمن مفهوم النسبية الخاصة، منذ بدايتها أيضاً. (وإذا ما رغبتَ باستعارة صورة مرئية لحقل كمومي، أمكنك تقريباً الاستشهاد بصورة حقل تقليدي، أي بصورة محيط من خطوط قوة غير مرئية تخترق المكان؛ وعليك أن تشذّب هذه الصورة من خلال أمرين إثنين: أولهما أن تتصور الحقل الكمومي مكوّناً من مكوّنات جسيمية- كالفوتونات بالنسبة للحقل الكهرطيسي- وثانيهما أن تتخيل الطاقة، باعتبار أن طاقة الحقل تظهر من خلال حركة جسيماته وكتلها، متحركةً تنتقل جيئة وذهاباً ودون توقف من حقل كمومي إلى حقل كمومي آخر من خلال اهتزازهما المستمر عبر الزمان والمكان).

تُعتبر نظرية الإلكترودينامك الكمومي النظريةَ الأكثر دقةً التي وُضعت حتى الآن لتفسير بعض الظواهر الطبيعية. ويلقى هذا الرأي الكثير من الدعم والتأييد. تتجلى دقة هذه النظرية، أكثر ما تتجلى، في أعمال تيكيرو كينوشيتا، المختص بفيزياء الجسيمات في جامعة كورنيل، والذي استخدمها، طوال السنين الثلاثين الأخيرة، بمثابرة لا تعرف الكلل، لحساب بعض الخصائص الدقيقة للإلكترونات. وقد اقتضت حساباته آلاف الصفحات ولزم لإتمامها استخدام أقوى الحواسيب في العالم، وبدا نهايةً أن الأمر يستحق كل هذا العناء، فقد أدت الحسابات النظرية إلى وضع تنبؤات عن خصائص الإلكترونات تم التأكد تجريبياً من صحتها وبدقة من مرتبة 10^{-9}، وهو ما يُعدّ توافقاً مذهلاً وعلى نحو مطلق بين نتائج حسابات نظرية مجرّدة وما يجري فعلاً فيما حولنا. وقد رسّخ الفيزيائيون من خلال الإلكترودينامك الكمومي دور الفوتونات، كأصغر حبّات ضوئية، وأماطوا اللثام عن تفاعلاتها مع جسيمات مشحونة كهربائياً، كالإلكترونات، وذلك في إطار رياضياتي تنبؤاتي كامل ومقنع.

وقد ألهم نجاح الإلكتروديناميك الكمومي فيزيائيين آخرين خلال عقدي الستينات والسبعينات من القرن العشرين، للبحث عن مقاربة مماثلة لتطوير فهم ميكانيكي كمومي لقوة الثقالة ولكل من القوتين الضعيفة والشديدة، ونجحت مقاربتهم في حالة القوتين الضعيفة والشديدة إذ تمكنوا، وعلى نحو مماثل لما جرى في حالة الإلكتروديناميك الكمومي، من وضع نظريات حقل كمومية للقوة الضعيفة وللقوة الشديدة سمّيت على التوالي **نظرية القوة الكهرضعيفة الكمومية ونظرية الكروموديناميك الكمومي** –أو التحريك اللوني الكمومي–. وهذه التسمية الأخيرة أكثر نبضاً بالحياة وتلوناً من تسمية " التحريك الشديد الكمومي"، الأكثر منطقية؛ إلاّ أنها تسمية يجب ألاّ نحمّلها معاني عميقة، في حين تحمل تسمية نظرية القوة الكهرضعيفة، في ذاتها، مَعْلَماً مهماً في فهمنا قوى الطبيعة.

وقد بيّنت أعمال شِلدون غلاشو ومحمد عبد السلام وستيفن واينبرغ، التي نالوا عليها جائزة نوبل، أن للقوة الضعيفة وللقوة الكهرطيسية طبيعة **واحدة**؛ إذا ما وُصفتا بدلالة حقل كمومي، رغم اختلافهما الظاهري كما نراهما حولنا. فحقول القوة الضعيفة قصيرة المدى وتتناقص حتى التلاشي عند المسافات التي تتجاوز الأبعاد ما دون الذرية، في حين أن حقول القوة الكهرطيسية طويلة المدى كما نراها في الضوء المرئي وفي إشارات الراديو والتلفزيون والأشعة السينية. وقد بيّن هؤلاء العلماء أن حقلي هاتين القوتين كانا أصلاً متداخلين الواحد مع الآخر وكانت لهما بالتالي خصائص متطابقة لا يمكن تمييز بعضها عن بعض وذلك في درجات الحرارة والطاقات المرتفعة جداً التي كانت سائدةً في جزء من الثانية تلا لحظة الانفجار الأعظم. تُدعى هذه الحقول عندئذ بحقول **القوة الكهرضعيفة**. ومع انخفاض درجة الحرارة بدءاً من لحظة الانفجار الأعظم، **تبلورت** كل واحدة من هاتين القوتين من الشكل المشترك الذي كان لهما في درجات الحرارة المرتفعة، وأخذتا شكلين متمايزين بطريقة تُعرف **بكسر التناظر** (سنعرضها لاحقاً)، وهما لذلك تبدوان لنا متمايزتين في الكون البارد الذي نحيا فيه.

وهكذا طوّر الفيزيائيون في سبعينات القرن العشرين وصفاً ميكانيكياً كمومياً ناجحاً ومحسوساً لثلاثةٍ من أنواع القوى الأربعة (الشديدة والضعيفة والكهرطيسية)، وبيّنوا أن

لاثنتين منها (وهما القوتان الضعيفة والكهرطيسية) أصلاً مشتركاً (هو القوة الكهرضعيفة)، وأخضعوا خلال العقدين الأخيرين من ذلك القرن هذا الوصف الميكانيكي الكمومي لهذه القوى الثلاث غير الثقالية –من خلال تفاعلاتها فيما بينها ومع الجسيمات المادية المذكورة في الفصل الأول– إلى اختبارات وتمحيصات تجريبية كثيرة ومتنوعة. وقد جابهت النظرية الموضوعة كل هذه التحدّيات بنجاح وبرباطة جأش. وبعد أن قاس الفيزيائيون التجريبيون قيم حوالي تسعة عشر وسيطاً (هي كتل الجسيمات المبيّنة في الجدول 1.1، وشحناتها المبيّنة في جدول الملاحظة الختامية رقم1 المتعلقة بالفصل الأول، وقيم شدّات القوى غير الثقالية الثلاث المبيّنة في الجدول 2.1، وكذلك بعض القيم الأخرى التي لا حاجة للتعرض لها الآن)، وقام الفيزيائيون النظريون بإدخال هذه القيم في نظريات الحقول الكمومية للجسيمات المادية وللقوى الشديدة والضعيفة والكهرطيسية، ظهر توافق مدهش ما بين التنبؤات النظرية حول الكون المجهري والنتائج التجريبية. يصحّ هذا القول حتى الطاقات القادرة على سحق المادة وتهشيمها إلى كسيرات لا تتعدى أبعادها جزءاً من مليار مليار جزء من المتر، وهي حدود الأبعاد الموافقة لتقانات أيامنا هذه. لذلك يدعو الفيزيائيون نظرية القوى غير الثقالية الثلاث، والعائلات الثلاث للجسيمات المادية، بالنظرية المعيارية، أو غالباً **بالنموذج المعياري** لفيزياء الجسيمات.

الجسيمات الرُسُلْ

ينبئ النموذج المعياري أنه كما أن للحقل الكهرطيسي مكوّناً أصغرياً هو الفوتون، فإن لكل من حقلي القوة الضعيفة والقوة الشديدة مكوّناً أصغرياً أيضاً، كما ذكرنا بإيجاز في الفصل الأول، هما **الغليّون** للقوة الشديدة، و**بوزونات المعيار الضعيف**، أو بصورة أكثر تحديداً البوزونات W والبوزونات Z للقوة الضعيفة؛ كما يعتبر هذا النموذج أن هذه الرزم الأصغرية هي وحدات أساسية لا بنية داخلية لها، فهي أولية وعنصرية كما جسيمات عائلات المادة الثلاث.

تبيّن الفوتونات والغليّونات وبوزونات المعيار الضعيف الآلية المجهرية التي تنتقل بها القوى التي تمثلها؛ فإذا ما تنافر جسيمان يحملان شحنتين كهربائيتين متماثلتين،

عزونا ذلك بصورة مؤقتة إلى أن كلاً منهما محاط بحقل كهربائي أو بغمامة من عطر كهربائي، بحيث تنشأ القوة التي يحس بها كل منهما من التنافر بين حقليهما الكهربائيين. يختلف هذا التفسير عمّا يقدمه الوصف المجهري لآلية هذا التنافر، حيث يتكون الحقل الكهربائي من حشد من الفوتونات يتراشق بها الجسيمان إذ يطلقانها فيما بينهما جيئة وذهاباً، فيتأثران بها كما يتأثر متزلجان على الجليد يتراشقان بوابل من كرات البولنغ على نحو يؤثر على حركتيهما معاً. فتأثر جسيم مشحون كهربائياً بجسيم مماثل آخر يتم عبر تبادلهما هذه الرزمات الضوئية الأصغرية.

إلا أن هناك نقصاً واضحاً فيما يعرضه مثال المتزلّجَين على الجليد وهو أن تراشقهما بكرات البولنغ، أو تبادل هذه الكرات فيما بينهما، هو تنافري دوماً يسبّب تباعد واحدهما عن الآخر. أما في حالة جسيمين يحملان شحنتين كهربائيتين متباينتين، فإن القوة الكهرطيسية الناجمة عن تبادل الفوتونات فيما بينهما هي قوة تجاذبية. لذلك يبدو الأمر كما لو أن الفوتون لا ينقل القوة بحدّ ذاتها، بل ينقل **رسالة** عن كيفية استجابة مستلم هذه القوة. تحمل هذه الرسالة في حالة الجسيمات المتماثلة الشحنة عبارة " تحرّك بعيداً"، في حين تحمل في حالة الجسيمات المتباينة الشحنة عبارة " تعالَ واقترب"؛ لذلك يوصف الفوتون أحياناً بأنه **الجسيم الرسول** للقوة الكهرطيسية. وعلى مثل هذا النحو، يمثل الغليّون الجسيم الرسول للقوة النووية الشديدة، وتمثل بوزونات المعيار الضعيف الجسيم الرسول للقوة النووية الضعيفة. تنشأ القوة الشديدة التي تحتجز الكواركات داخل البروتونات والنترونات من تبادل الكواركات الفردية للغليّونات التي تؤمن "الصمغ" الذي يبقي هذه الجسيمات دون الذرية ملتصقةً بعضها ببعضها الآخر؛ وتنشأ القوة الضعيفة المسؤولة عن بعض أنواع التحولات الجسيمية التي تجري في عمليات التحلّل الإشعاعي من تبادل بوزونات المعيار الضعيف.

التناظر المعياري

ربما لاحظت أن الكائن الغريب في مناقشتنا النظرية الكمومية لقوى الطبيعة هو قوة الثقالة؛ وقد يدفع نجاح المقاربة التي اعتمدها الفيزيائيون لوصف القوى الثلاث الأخرى إلى البحث عن نظرية حقل كمومي لوصف هذه القوة، وهي نظرية تُدعى الرزمة الأصغر لحقل الثقالة فيها **بالغرافيتون** والذي يمثل جسيمَها الرسول. يبدو هذا الاقتراح للوهلة الأولى مناسباً تماماً لأن نظرية الحقل الكمومي للقوى الثلاث غير الثقالية تبيّن وجود تماثل مثير بينها وبين مظهرٍ لقوة الثقالة وجدناه في الفصل الثالث.

نذكّر بما سبق ورأيناه من أن قوة الثقالة سمحت باعتبار كل المراقبين متساوين فيما بينهم، أياً كانت حالتهم الحركية، وحتى منهم أولئك الذين يُظن عادةً أنهم خاضعون لتسارع ما، إذ بوسعهم الادّعاء بخلاف ذلك والقول بأن مردّ القوة التي يشعرون بها إنما هو وجودهم مغمورين في حقل ثقالي. فالثقالة، من هذا المنطلق، توجب التناظر، وذلك من خلال تأكيدها على تمتع سائر نقاط المراقبة المحتملة وسائر مراجع المقارنة الممكنة بصلاحيات متكافئة. هنا يكمن التشابه ما بين قوة الثقالة والقوى غير الثقالية الثلاث الأخرى التي تقتضي بدورها أشكالاً مختلفة من التناظر، وإن كانت هذه الأشكال أكثر تجريداً بكثير من تناظر الثقالة.

ولأخذ فكرة أولية عن مبادئ التناظر الدقيقة هذه، لنعتبر المثال التالي: تتميز الكواركات بألوانها، ويمكن لكل كوارك أن يظهر بواحد من ثلاثة " ألوان" (ندعوها بالأحمر والأخضر والأزرق مع أن هذه الألقاب لا علاقة لها بالألوان بمعناها المرئي الاعتيادي)؛ ووفقاً لنظرية الكروموديناميك الكمومي، وهي النظرية الكمومية للقوة الشديدة، تحدّد " شحنة" هذه الألوان للكوارك مدى استجابته للقوة الشديدة مثلما تحدّد شحنته الكهربائية كيفية استجابته للقوة الكهرطيسية. وتبيّن المعطيات التجريبية قيام تناظر بين الكواركات، بحيث تكون التفاعلات القائمة بين أي كواركين بلون واحد (أحمر مع أحمر وأخضر مع أخضر وأزرق مع أزرق) متطابقة كلها؛ كما تكون التفاعلات بين أي كواركين بلونين متباينين (أحمر مع أخضر وأحمر مع أزرق وأخضر مع أزرق) متطابقة كلها أيضاً؛ كما تبيّن هذه المعطيات أمراً آخر أشد لفتاً للانتباه، إذ لو تغيرت ألوان الكوارك الثلاثة هذه (أي تغيّرت شحنات القوة الشديدة) –وباستخدام لغتنا اللونية الوهمية،

لو تحول الأحمر إلى أصفر والأخضر إلى نيلي والأزرق إلى بنفسجي-، وتغيّرت تفاصيل هذا التحوّل من لحظة لأخرى ومن مكان لآخر، فإن التفاعلات بين الكواركات لا تتغيّر، وتبقى هي ذاتها دوماً. وهذا القول كقولنا بتناظر الكرة الدوراني، إذ تبدو بالمظهر ذاته لو أدرناها يدوياً بأي اتجاه أو لو نظرنا إليها من أي جانب. وهكذا نخلص إلى القول بأن الكون يتمتع **بتناظر القوة الشديدة**، حيث لا تتغير الفيزياء بتغيّر شحنات هذه القوة الثلاث. ويقول الفيزيائيون أيضاً، ولأسباب تاريخية، إن تناظر القوة الشديدة هو مثال **لتناظر معياري**[5].

وهنا تتجلى الفكرة الرئيسية، إذ كما اقتضى التناظر بين كل نقاط المراقبة المحتملة في النسبية العامة وجود قوة ثقالية، فكذلك بيّنت الأبحاث النظرية التي اعتمدت أعمال هرمان وايل في عقد العشرينيات، وأعمال تشن-نينغ يانغ وروبرت ميلز في عقد الخمسينيات من القرن العشرين أن التناظرات المعيارية تقتضي أيضاً وجود أنواع أخرى من القوى؛ إذ كما يتحكم نظام مراقبة حسّاس بالشروط البيئية، محافظاً على بقاء درجة الحرارة والضغط والرطوبة في منطقة ما، من خلال تأمينِ تعويضٍ كامل لأي تبدلات تطرأ على قيم هذه العوامل، فكذلك تحافظ أنواع معينة من حقول القوة، وفقاً لأعمال يانغ وميلز، على بقاء التفاعلات الفيزيائية بين الجسيمات على حالها تماماً ودون أي تغيير، من خلال تأمينِ تعويضٍ كامل عن التغيرات والتبدلات التي تطرأ على شحنات القوة. وليست هذه القوة، في حالة التناظر المعياري المرتبط بتغيّر الشحنات اللونية للكواركات سوى القوة الشديدة ذاتها، و**ستتغيّر** الفيزياء بغياب هذه القوة الشديدة عند إجراء أي تعديل أو تحويل على تلك الشحنات اللونية. يعني ذلك أن لقوة الثقالة وللقوة الشديدة تراثاً متماثلاً إلى حد ما يتجلى في ضرورة كل منهما من أجل تمتع الكون بتناظرات خاصة معينة، رغم التباين الكبير في خصائص هاتين القوتين (فقوة الثقالة أضعف بكثير من القوة الشديدة إلا أن تأثيرها يمتد لمسافات شاسعة). يمكن أن نتبين بتقديمِ مماثل لحالة القوتين الضعيفة والكهرطيسية أن وجودهما مرتبط أيضاً بوجود أنواع أخرى من التناظرات المعيارية، وهي ما يُعرف بالتناظرات المعيارية الضعيفة والكهرطيسية. هكذا ترتبط مباشرةً أنواع القوى الأربعة بمبادئ تناظر.

قد تبدو هذه الصفة المشتركة بين أنواع القوى الأربعة مشجعة ومؤملة لتحقيق الاقتراح الذي عرضناه في مطلع هذا القسم حول وجوب البحث عن نظرية حقل كمومي لقوة الثقالة، بغية دمج ميكانيك الكم بالنسبية العامة، وعلى النحو الذي توصل فيه الفيزيائيون إلى وضع نظريات حقول كمومية لوصف القوى الثلاث الأخرى. وقد حدا ذلك بمجموعة من الفيزيائيين المتميزين، وعلى مر السنين، للسير بقوة ونشاط في هذا الدرب، إلاّ أن سيرهم كان محفوفاً بالمخاطر والصعاب ولم يفلح أي منهم حتى الآن بتحقيق هذه الفكرة. وسنعرض في الفقرة القادمة سبب ذلك.

النسبية العامة في مواجهة ميكانيك الكم

إن مجال النسبية العامة هو المكان الفسيح ذو الأبعاد الكبيرة والمقاييس الفلكية، وحيث يعني غياب المادة استواء هذا المكان كما بيّنا في الشكل3.3. لكن سعينا لدمج النسبية العامة بميكانيك الكم يقتضي تبديل هذا الفهم على نحو جذري وتفحّص الخصائص **المجهرية** للمكان، وهو ما نبيّنه في الشكل 1.5 حيث يتم تفحّص النسيج المكاني في مناطق تصغر تدريجياً من خلال أخذ صور مكبّرة لها. لا نلمح في الصور المأخوذة في مستويات التكبير الثلاثة الأولى أي شيء خاص إذ تبقى فيها بنية هذا النسيج محافظة على شكلها الأساسي؛ ونتوقع، من وجهة نظر الفيزياء التقليدية، استمرار هذه الصورة الهادئة المستوية، مع تصوير مناطق أصغر فأصغر وبمستويات تكبير أعلى فأعلى. إلا أن ميكانيك الكم يقول بخلاف ذلك تماماً، لأن **كل شيء** وفقاً له يخضع لتراوحات كمومية هي في جوهر وأساس مبدأ الارتياب، بما في ذلك حقل الثقالة. تنعدم قيمة هذا الحقل في المكان الفارغ، تبعاً لمفاهيم الفيزياء التقليدية، في حين تنعدم القيمة المتوسطة لهذا الحقل في مفهوم ميكانيك الكم. أما قيمته الحقيقية (اللحظية) فتتغير تغيراً كبيراً جداً بسبب التراوحات الكمومية. ويخبرنا مبدأ الارتياب أن تأرجح قيم الحقل الثقالي يزداد اتساعاً إذا ما وجهنا اهتمامنا نحو مناطق مكانية أصغر فأصغر؛ إذ يبيّن ميكانيك الكم بألاّ شيء حولنا يرغب في أن يؤسَر وتحتجَز حريته في المكان الذي هو فيه، لذلك فهو يقاوم ذلك بتحركه بصورة مسعورة في هذا المكان، وهو ما يعني أن تضييق مجال اهتمامنا في المكان سيؤدي إلى تأرجحات أكبر فأكبر.

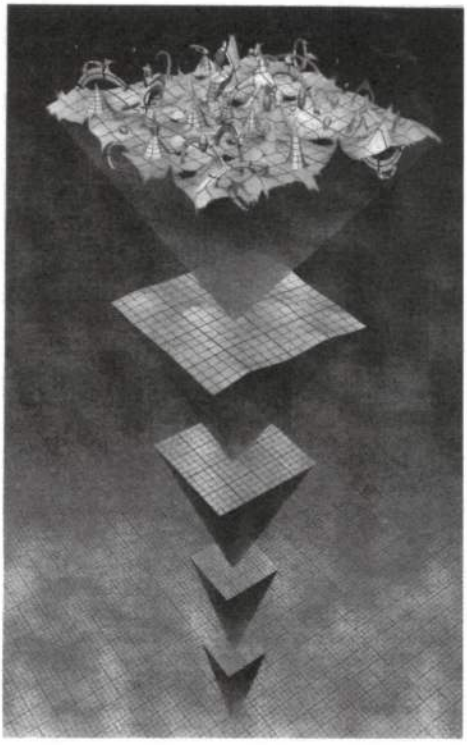
ولما كانت الحقول الثقالية تعبّر عن ذاتها بتقوّس المكان حولها، فإنه يُستدل على تبدلاتها أو تأرجحاتها الكمومية بتشوّه المكان المحيط بها تشويهاً عنيفاً ومتزايداً، تبدو ملامح غير واضحة له عند مستوى التكبير الرابع على الشكل1.5. فإذا ما تجاوزنا هذا المستوى وعمدنا إلى سبر أبعاد ومسافات أصغر فأصغر، كما عند مستوى التكبير الخامس، أخذت التأرجحات الميكانيكية الكمومية العشوائية للحقل الثقالي شكل التواءات ونتوءات حادة جداً في المكان وعلى نحو يتعذر تمثيله تمثيلاً هندسياً كبنيةٍ ملساء مستوية أو منحنية قليلاً مثل الغشاء المطاطي الذي تحدثنا عنه في الفصل الثالث، إذ تأخذ شكلاً رغوياً هائجاً ومنفتلاً كما يبدو في الجزء الأعلى من الشكل 1.5. وقد أطلق جوهن ويلر اسم **الزبد الكمومي** لوصف هذا الهيجان المسعور الذي يكشف عنه التفحص المجهري الخارق للمكان (والزمان) حيث نرى عالَماً كونياً لم نعتد عليه تفقد فيه المفاهيم المألوفة عن اليسار واليمين والأعلى والأسفل والأمام والوراء (وحتى "قبل" و"بعد") معانيها ودلالاتها. وفي مثل هذه المقاييس والأبعاد الصغيرة جداً يبرز التعارض الأساسي بين النسبية العامة وميكانيك الكم، **وينهار مفهوم الهندسة المكانية الملساء، وهو أساس النسبية العامة، بالتأرجحات المسعورة التي تميّز العالم الكمومي عند المقاييس والأبعاد الصغيرة جداً**. وهكذ وعندما نصل إلى المقاييس المجهرية الخارقة (أي إلى أبعاد دون مجهرية) يبرز التعارض المباشر بين السمة الأساسية لميكانيك الكم – وهي مبدأ الارتياب– والسمة الأساسية للنسبية العامة –وهي النموذج الهندسي الأملس للمكان (وللزمكان).

يعبّر هذا التعارض عن ذاته بصورة عملية شديدة الوضوح من خلال الحسابات الناتجة عن دمج معادلات النسبية العامة بمعادلات ميكانيك الكم والتي تعطي دوماً قيماً لا نهائية تعبّر عن سخف الإجابة ولا منطقيتها، وكأن الطبيعة تريد بها أن تخبرنا عن خطأ ارتكبناه، كما كان معلم المدرسة ينبهنا إلى أخطائنا بربتِه على يدنا[6]. فمعادلات النسبية العامة لا تستطيع التعامل مع الهيجان القلق للزبد الكمومي.

وعند العودة إلى عالمنا المألوف بأبعاده ومقاييسه، باتّباع مراحل الشكل 1.5 بعكس ترتيبها أي من الأعلى للأسفل، فإن التأرجحات العشوائية العنيفة المرافقة للأبعاد

الصغيرة يلغي بعضُها بعضاً- كما في حال المكرَه على الاستدانة الذي لا يُظهِر حسابه المصرفي، عند أخذ قيمته المتوسطة، أي دليل على إكراهه على الاستدانة- ويعود مفهوم الهندسة الملساء للنسيج الكوني صحيحاً من جديد. والحال هنا شبيه بما تلاحظه إذا ما تطلعت إلى صورة نقطية، أي صورة رُسمت نقطة فنقطة. فإذا ما نظرت إليها عن بعد تداخلت نقاطها بعضها ببعض وأعطت الانطباع بصورة ملساء تتغير تبايناتها الضوئية تغيراً لطيفاً ما بين منطقة وأخرى؛ أما إذا تفحصتها عن قرب فإنك ستراها تختلف كثيراً عما رأيته عن بعد، إذ ستراها مجموعة من النقاط المتمايزة المنفصلة تماماً واحدتها عن الأخرى. وهكذا فإن الطبيعة المتقطعة للصورة لا تُدرَك إلاّ عند تفحصها بأصغر مقاييسها وأبعادها، لأنها تبدو ملساء عن بعد. وبشكل مشابه فإن نسيج الزمكان يبدو أملس، إلاّ عند تفحصه بدقة مجهرية فائقة. وبذلك فإن النسبية العامة تصحّ في المسافات (المكانية والزمانية) الكبيرة كفايةً، كما في المواضع الفلكية، وتبطل صلاحيتها عندما تصبح تلك المسافات صغيرة جداً؛ أي أن مفهوم الهندسة الملساء المنحنية بلطف يصحّ في حالة المقاييس الكبيرة، وينهار في حالة المقاييس الصغيرة بسبب التراوحات الكمومية التي ترافقه.

تسمح المبادئ الأساسية للنسبية العامة ولميكانيك الكم بحساب الأبعاد التقريبية للمسافات والمقاييس التي تبدو دونها المظاهر المقلقة التي رأيناها على الشكل1.5. وتقترن ضآلة قيمة ثابت بلانك -الذي يتحكم بقوة الآثار الكمومية- مع الضعف الذاتي لقوة الثقالة، لإعطاء ما يُعرف **بطول بلانك**، وهو مقدار صغير إلى حدّ يفوق التصوّر إذ يعادل جزءاً من مليون مليار مليار مليار جزء من السنتيمتر (10^{-33} سم)[7]، بحيث يمثل مستوى التقريب الخامس على ذلك الشكل رسماً تخطيطياً لمنطقة من الكون بأبعاد مجهرية خارقة ودون طول بلانك. ولتصور هذه الأبعاد تخيّلْ أننا كبّرنا ذرة ما فجعلناها بحجم الكون المعروف. إن طول بلانك لن يتعدى عندها علو شجرة متوسطة.



الشكل1.5: *يمكن سبر الخصائص المجهرية الخارقة لمنطقة مكانية من خلال أخذ صور مكبّرة لها. تتعارض محاولات دمج النسبية العامة بميكانيك الكم مع هيجان الزبد الكمومي الذي يظهر في مستوى التكبير الأعلى.*

وهكذا فإن عدم الانسجام بين النسبية العامة وميكانيك الكم لا يتجلّى إلاّ في عوالم وأوضاع خاصة واستثنائية جداً في الكون؛ ونتساءل هل يستحق ذلك كل هذه المعاناة؟ لا تتفق آراء الفيزيائيين في جوابهم عن هذا التساؤل، إذ منهم من يرى هذا التعارض ويقبل بوجوده ولكنه لا يهتم به بل يواصل أبحاثه مستخدماً ما تتطلبه من مفاهيم من ميكانيك الكم أو من النسبية العامة لحل المسائل التي تتعدى أبعادها طول بلانك؛ ومنهم من يقلقهم هذا الأمر إذ يرون فيه تعارضاً أساسياً بين الدعامتين الرئيسيتين اللّتين تقوم عليهما فيزياء اليوم، بقطع النظر عن المقاييس المجهرية الخارقة (أي الأبعاد دون المجهرية)

التي يجب سبرها لإظهار عدم الانسجام بين النظريتين والذي يرون فيه دلالةً على عيب أساسي في فهمنا الكون الفيزيائي؛ وهم في رأيهم يعتمدون وجهة نظر لا يمكن البرهان عليها، إلاّ أننا نحس في أعماقنا بصحتها، وهي أن الكون، إذا ما فهمناه جيداً في أعمق مستوياته وأكثرها أساسية، يمكن أن يوصف في إطار نظرية سليمة ومنطقية ترتبط أجزاؤها فيما بينها على نحو منسجم ومتناغم. ومن المؤكد أن معظم الفيزيائيين -وبقطع النظر عن مدى أهمية عدم الانسجام هذا بالنسبة لأبحاثهم- يرون من الصعب القبول بأن فهمنا النظري الأعمق للكون يقوم في أساسه على ترقيع رياضيّاتي غير منسجم لإطارين تفسيريين قويين، لكن متعارضين فيما بينهما.

وقد قام الفيزيائيون بعدة محاولات لتغيير واحدة من هاتين الدعامتين الأساسيتين - ميكانيك الكم والنسبية العامة- على نحو يجنبهما هذا التعارض؛ لكن محاولاتهم، على جرأتها وإبداعها، باءت كلها بالفشل تلو الفشل.

واستمر ذلك حتى اكتشاف نظرية الأوتار الفائقة[8].

البـــاب الثالث

السيمفونية الكونية

الفصل السادس

لاشيء سوى الموسيقا:
أساسيات نظرية الأوتار الفائقة

زوّدتنا الموسيقا على الدوام بطيف واسع من التشبيهات التي يمكن استعارتها للإجابة عن أسئلة محيرة ذات صلة بمواضيع كونية. وقد سعى الإنسان عبر العصور، منذ "موسيقى الكرات" الفيثاغورية القديمة وحتى "إيقاعات الطبيعة المتناغمة"، لمعرفة اللحن الذي تعزفه الطبيعة في حركة الأجرام السماوية في أفلاكها أو من خلال وفرة الجسيمات دون الذرية وحركاتها الهائجة. وبدا التشابه جلياً وصارخاً مع اكتشاف نظرية الأوتار الفائقة التي ترى الطبيعة المجهرية من خلال نموذج أو طراز موشّى بخيوط بالغة الصغر تشكل أنماطُ اهتزازاتها الألحانَ الموسيقية لأوركسترا تطوّر الكون. ووفقاً لنظرية الأوتار الفائقة هذه فإن رياح التغيير تعصف في عالمنا.

وبمقابل هذه النظرية فإن النموذج المعياري يرى المكوّنات الأولية للكون كمكوّنات نقطية لا بنية داخلية لها. ومع ترسّخ المقاربة التي يقدّمها هذا النموذج (الذي تم التأكد من سائر تنبؤاته عن العالَم المجهري حتى أبعاد تبلغ حداً من الصغر يُقدّر بجزء من مليار مليار جزء من المتر، وهو ما يمثّل حدَّ الدقة التي بلغتها تقانات يومنا) فليس بوسعه أن يكون هو النظرية النهائية الموحّدة التي يُسعى إليها، وذلك لعدم تضمّنه قوة الثقالة. كما أن المحاولات التي جرت لتضمين هذه القوة في الإطار الميكانيكي الكمومي لذلك النموذج باءت كلها بالفشل بسبب التغيّرات والتراوحات (التموّجات) الكبيرة في نسيج بنية المكان التي تظهر عند مسافات فائقة الصغر ومن مرتبة أصغر من طول بلانك. دفع عدم وجود حل لهذا التعارض إلى محاولة البحث عن فهم أعمق للطبيعة. وقد تمكن مايكل غرين في سنة 1984 حيث كان في كلية الملكة ماري، وجوهن شفارتز في معهد كاليفورنيا

التكنولوجي، من وضع اللبنة الأولى في بنيان برهان مقنع بأن **نظرية الأوتار الفائقة** (أو نظرية الأوتار اختصاراً) يمكن أن تزودنا بهذا الفهم الأعمق.

تقدّم نظرية الأوتار تغييراً جذرياً وعميقاً في نظرتنا إلى مكوّنات الكون الفائقة الصغر؛ وقد أتاحت للفيزيائيين التحقق تدريجياً من أن هذا التغيير يسمح بتعديل نظرية النسبية العامة لأنشتاين في الاتجاه الصحيح وعلى نحو يحقق انسجامها التام وقوانين ميكانيك الكم. فالمكوّنات الأولية للكون، في هذه النظرية، **ليست** جسيمات نقطية بل هي خيوط دقيقة جداً ذات بعد واحد تشبه إلى حد كبير شرائط من المطاط لا متناهية في رقتها تهتز جيئةً وذهاباً. لكن، لا تدع هذا التشبيه يخدعك. إن هذه الشرائط (الأوتار)، وبخلاف قطعة من شريط عادي رفيع يتكون من جزيئات وذرات، هي في قلب المادة ذاتها؛ **فهي**، في هذه النظرية، المكوّنات الفائقة الصغر التي تتكون منها الجسيمات التي تشكّل الذرات ذاتها، وهي أوتار صغيرة جداً يقارب طولُها الوسطي طولَ بلانك، بحيث **تبدو** لنا نقطية عند تفحّصها بأكثر الأجهزة دقة واستطاعة.

ومع ذلك فإن مجرد استبدال شرائط من خيوط وأوتار بجسيمات نقطية، كمكوّنات أساسية لكل ما في عالَمنا، يستدعي نتائج بالغة الأهمية، أولاها وأبرزها قدرة نظرية الأوتار، على ما يبدو، على حلّ التعارض القائم بين ميكانيك الكم والنسبية العامة: فطبيعة الوتر الممتد في المكان هي، كما سنرى، العنصر الجديد والحاسم الذي يسمح بإقامة إطار واحد يضم كلتا النظريتين؛ أما النتيجة الثانية فهي أن هذه النظرية تُعدّ بحق نظرية موحّدة لأنها تُرجع جميع أشكال المادة والقوى إلى مقوّم أساسي واحد هو أوتار مهتزة. وأخيراً، وعدا هذه التغييرات القاطعة للنظر، فإن نظرية الأوتار، وكما سنرى بعمق أكبر في الفصول القادمة، تغيّر مرة أخرى وعلى نحو جذري فهمنا لبنية الزمكان[1].

موجز تاريخ نظرية الأوتار

في سنة 1968 كان فيزيائي نظري شاب يدعى غابرييل فينيزيانو يسعى لفهم الخصائص المتنوعة الملاحَظة تجريبياً للقوة النووية الشديدة. عمل فينيزيانو، وكان آنئذ باحثاً في مخابر المسرّع الأوروبي (سيرن) في جنيف في سويسرا، على هذا الموضوع

عدداً من السنين حتى تكشّفت له ذات يوم رؤى أخاذة، ملأته دهشة، وهي وجود صيغة رياضياتية خاصة تُعرف باسم تابع بيتا لأولر -كان قد وضعها قبل ذلك بحوالي مائتي سنة الرياضياتي السويسري المشهور أولر لغايات رياضياتية بحتة- يبدو أنها تصف، جملةً واحدةً، خصائصَ متعددة للجسيمات المتأثرة فيما بينها عبر القوى الشديدة. وضعت ملاحظة فينيزيانو هذه إطاراً أو غلافاً رياضياتياً فعّالاً للعديد من خصائص القوة الشديدة، وأدت إلى قيام موجة طاغية من أعمال البحث الهادفة إلى استخدام تابع أولر وتعميماته المتنوعة لوصف الكم الهائل من المعطيات التجريبية التي كانت تتحصل من مراكز متعددة في كل أرجاء العالَم يتمّ فيها تحطيم الذرات. ومع ذلك فقد كان هناك شعور ما بأن ملاحظة فينيزيانو لم تكن مكتملة: لقد أفلح تابع أولر في وصف المعطيات التجريبية، لكنه لم يقدّم أي سبب لها، فكان مثله مثل الصيغ التي يحفظها طلاب المدارس عن ظهر قلب دون أن يدركوا معناها أو دون أن يكونوا قادرين على تقديم أي تفسير لها. وكان لا بدّ لذلك من البحث عن تفسير يبرّر سبب نجاح هذه الصيغة، وبدا أن ذلك قد تحقق في سنة 1970 عندما بيّنت أعمال يوشيرو نامبو من جامعة شيكاغو وهولغر نيلسن من معهد نيلز بوهر ثم ليونارد سَسكايند من جامعة ستانفورد، ماهية الحقيقة الفيزيائية الكامنة وراء صيغة أولر، والتي ظلت مجهولة حتى ذلك الحين، إذ بيّنوا أن نمذجة الجسيمات الأولية على شكل أوتار صغيرة مهتزة أحادية البعد، تتيح وصفَ تآثراتها النووية بدقة، باستخدام تابع أولر؛ كما بيّنوا أن قِطع الأوتار هذه ستبدو، إن كانت صغيرة إلى حدّ كاف، على شكل جسيمات نقطية ممّا ينسجم والملاحظات التجريبية.

لم يمضِ وقت طويل على وضع نظرية الأوتار بشكلها الحدسي البسيط والمُرضي هذا، حتى تبيّن فشل الوصف الذي أعطته للقوة الشديدة؛ فقد بيّنت تجارب الطاقات العالية القادرة على إجراء سبر أكثر عمقاً للعالَم دون الذري، والتي أجريت في مطلع السبعينيات، أن النموذج الوتري يعطي العديد من التنبؤات المتعارضة مع بعض الملاحظات التجريبية؛ كما أن النجاح الباهر الذي حققته نظرية الحقل الكمومي للكروموديناميك الكمومي (أو التحريك اللوني الكمومي)، القائمة على مفهوم الجسيمات النقطية، في وصف القوة الشديدة، كل ذلك أدّى إلى صرف النظر عن نظرية الأوتار.

ساد الاعتقاد بين معظم الفيزيائيين المهتمين بدراسة فيزياء الجسيمات الأولية أن نظرية الأوتار قد صارت إلى سلة المهملات؛ إلا أن بعض هؤلاء ظلّ على قناعته بها. فقد شعر شفارتز مثلاً بأنه " لا بدّ أن يكون لجمال البنيان الرياضياتي لهذه النظرية ولبعض خصائصه الرائعة دلالات على أمور عميقة"[2]. كانت إحدى المعضلات التي جابهها الفيزيائيون مع نظرية الأوتار، ما بدا من وفرة ما حوته من حقائق محيّرة؛ فهي قد حوت تشكيلات لاهتزازات وترية ذات خصائص شبيهة بخصائص الغليّونات، وهو ما دعم ادّعاءها الأولي بأنها نظرية القوة الشديدة؛ إلا أنها حوت أيضاً جسيمات رسل **إضافية** لم تبدُ لها أي صلة بالخصائص التجريبية الملاحَظة لهذه القوة. لكن شفارتز وجويل شيرك، من مدرسة النورمال العليا في باريس، ما لبثا أن حقّقا في سنة 1974 قفزةً جريئةً حوّلا بها هذه النقيصة الظاهرية إلى مزية إضافية. فقد لاحظا، بعد دراستهما الأنماط المحيّرة للاهتزازات الوترية لجسيمات الرسل الإضافية هذه، توافقَ هذه الأنماط والخصائص العائدة للغرافيتون، الجسيم الافتراضي الرسول لقوة الثقالة؛ ورغم أن أحداً لم يرَ حتى الآن هذه " الرزمة الأصغرية" لقوة الثقالة، فقد استطاع الفيزيائيون أن يحدّدوا بملء الثقة بعض الخصائص الأساسية التي يجب أن تكون لها، وهي ما بيّن شفارتز وشيرك إمكانية تحقيقها تماماً ببعض الأنماط الاهتزازية، ممّا دفعهما إلى القول بأن فشل نظرية الأوتار في محاولتها الأولى، كان مردّه التضييق غير الملائم الذي فرضه الفيزيائيون عليها إذ قيّدوا نطاقها بالقوة الشديدة. وأعلن هذان الباحثان أن نظرية الأوتار **ليست** نظرية القوة الشديدة فحسب، بل هي نظرية كمومية **تشمل الثقالة أيضاً**[3].

لم يتقبل مجتمع الفيزيائيين هذا الاقتراح بحماس كبير، بل " تمّ تجاهل العمل[4]"، على حدّ قول شفارتز، " بشكل عام وفي مختلف أنحاء العالَم". كان الفشل في الماضي حليف كل المحاولات التي بُذلت لتوحيد الثقالة وميكانيك الكم؛ لذلك، ومع ما بدا من فشل نظرية الأوتار في وصف القوة الشديدة، فقد اعتقد الكثيرون أن من الخطل استخدامها لإدراك هدفٍ أكبر من ذلك. وجاءت الدراسات اللاحقة في أواخر سبعينيات وأوائل ثمانينيات القرن العشرين، التي أظهرت ما تعانيه كل من نظرية الأوتار وميكانيك الكم من

تعارضات ذاتية دقيقة لتعصف بآمال هذه النظرية. وبدا وكأن قوة الثقالة لا تزال تقاوم كل محاولة تُبذل لإدخالها في إطار الوصف المجهري للكون.

هكذا كان الحال حتى سنة 1984 عندما بيّن غرين وشفارتز إمكانية إزالة التعارض الكمومي الدقيق في نظرية الأوتار وذلك في ورقة عملٍ تُعدّ معلَماً أو نقطة تحوّل توّجت جهود بحوث علمية مكثفة امتدت لأكثر من عشر سنين، وتجاهلها معظم الفيزيائيين، بل ورفضها بعضهم دون تحفّظ. فوق ذلك، بيّن هذان الباحثان أن هذه النظرية هي من الشمول بحيث تتسع لكلّ أنواع القوى الأربعة ولكلّ أشكال المادة أيضاً. وما إن انتشر هذا الخبر بين الفيزيائيين في كل أرجاء العالَم حتى تخلّى المئات منهم، من بين العاملين على فيزياء الجسيمات الأولية، عن مشاريع بحوثهم الخاصة واندفعوا نحو ما بدا ساحةَ المعركة النظرية الأخيرة لمسيرةٍ بدأها الإنسان منذ القدم ساعياً فيها إلى إدراك فهم عميق لكيفية عمل الكون.

كنتُ في شهر تشرين الأول (أكتوبر) من ذلك العام (1984) قد بدأت مرحلة الدراسات العليا في جامعة أوكسفورد. وبالرغم من تحمّسي لدراسة النظريات المعيارية ونظريات الحقول الكمومية والنسبية العامة وأمثالها، فقد كان هناك شعور بين طلاب الدراسات العليا المتقدّمين بألاّ مستقبل لفيزياء الجسيمات أو بضيق مجال هذا المستقبل، إن وُجد. كان النموذج المعياري قد فرض سيطرته إذ بيّن نجاحه المبهر في التنبّؤ بالنتائج التجريبية أن التحقق منه غدا أمرَ زمنٍ وتفاصيل؛ أما الذهاب إلى ما هو وراء حدوده بغية تضمينه الثقالة وربما بغية **تفسير** قيم معطيات الدخل التجريبية التي يقوم عليها، أي الأرقام التسعة عشر التي تجمل كتل الجسيمات الأولية وشحنات قواها المختلفة والشدات النسبية لهذه القوى –وهي أرقام حددتها التجربة ولم يعطَ لها أي تبرير نظري، فغايةٌ مثبّطةٌ للهمم، تراجع أمامها جميع الفيزيائيين عدا أكثرهم شجاعة. ولم تمضِ ستة أشهر حتى انقلب المزاج رأساً على عقب، وألقى نجاح غرين وشفارتز بأفيائه حتى على طلاب السنة الأولى من الدراسات العليا، وحلّ محلّ شعور الطلاب السابق بالضجر والملل، إحساسٌ مشحون بأنهم في غمار لحظة تاريخية في مسيرة الفيزياء. وأمضى بعضنا

الليالي عاملاً بدأب على تعلّم المجالات الرحبة للفيزياء النظرية وللرياضيات البحتة اللازمة لفهم واستيعاب نظرية الأوتار.

عُرفت الفترة الزمنية ما بين 1984 و1986 بفترة " ثورة الأوتار الفائقة الأولى"، وقَدّم فيها فيزيائيون من سائر أرجاء العالَم أكثر من ألف ورقة بحث عن نظرية الأوتار، اتضح منها، وعلى نحو لا يرقى إليه الشك، أن العديد من خصائص النموذج المعياري – وهي خصائص تمّ اكتشافها بعد لأي إثر بحوث علمية امتدت على مدى عقود من الزمن– **تبرز بصورة طبيعية** وبسيطة من ثنايا البنيان الكبير لنظرية الأوتار. وكما قال مايكل غرين: "عندما تتعرف على نظرية الأوتار وترى أن معظم ما تحقق من تطورات أساسية في الفيزياء خلال المئة سنة الأخيرة يمكن أن ينجم، وبشكل أنيق، عن نقطة انطلاق بسيطة (هي اعتبار المكوّنات الأساسية للكون أوتاراً مهتزة وليس جسيمات نقطية)، فإنك ستدرك أن هذه النظرية المقنعة على نحو يكاد لا يُصدّق يجب أن يكون لها موقع خاص بها"[5]. وقدمت هذه النظرية، كما سنرى لاحقاً، للعديد من تلك الخصائص تفسيرات أكثر عمقاً ومدعاة للتقبّل مما أعطته لها نظرية النموذج المعياري. أدى كل ذلك إلى تولّد قناعة لدى الكثيرين من الفيزيائيين بأن نظرية الأوتار هي في سبيلها للوفاء بوعدها بأن تكون النظرية النهائية الموحّدة.

ومع كل هذه النجاحات فقد ظلت عقبات وصعوبات تتوالى أمام الفيزيائيين العاملين على هذه النظرية؛ لكن هؤلاء، كسواهم من العاملين في مجالات الفيزياء النظرية الأخرى، ما كانوا يقرّون بعجزهم أمام هذه العقبات وما كان يرافقها من معادلات يصعب فهمها أو تحليلها، بل كانوا يعمدون إلى وضع حلول تقريبية لها. إلاّ أن الأمر مع فيزياء الأوتار كان أصعب وأشقّ، ذلك أن **وضع المعادلات بذاته** كان أمراً غير متاح ولم يكن يتيسّر لأولئك الفيزيائيين إلاّ وضع نسخ تقريبية لها؛ وهكذا كان فيزيائيو الأوتار مقيَّدين بوضع حلول تقريبية لمعادلات تقريبية. غير أنهم ما لبثوا بعد بضع سنين من التقدم الذي تحقق خلال ثورة الأوتار الأولى أن أدركوا أن التقريبات المستعمَلة لم تعد تصلح للإجابة عن أسئلة أساسية كانت تُعرض أمامهم ممّا شكّل عائقاً أمام أي تطوير لاحق؛ ولعدم توفر أي مقترحات محددة لتجاوز ما كانوا يعتمدونه من تقريبات، فقد شعر العديد منهم

بالإحباط وبدأوا رحلة العودة إلى محاور بحوثهم التي تخلّوا عنها. وكانت فترة نهاية الثمانينيات وبداية التسعينيات فترةً عصيبةً على من ظلّ يعمل منهم على نظرية الأوتار. وكانت حالهم مثل حال من كان أمام كنز محفوظ في صندوق محكم الإغلاق لا يراه إلاّ من خلال فتحة صغيرة فيه، تقرّبه إليه وتبعده عنه. كانت أمام ناظريهم نظرية جميلة تقدّم تفسيرات أنيقة، إلا أنه لم يكن لهم من سبيل للوصول إليها والكشف عن إمكاناتها وطاقاتها رغم قناعتهم بأن فترات الاكتشافات الأساسية في تاريخ العلوم غالباً ما تتقاطع مع فترات ضحلة لا يتحقق فيها شيء ذو بال؛ وبدا لهم واضحاً مدى الحاجة إلى طرق جديدة وإمكانات قوية للذهاب إلى أبعد ممّا كانت توصلهم إليه تقريباتهم السابقة.

لكن شعلة ثورة الأوتار الفائقة الثانية ما لبثت أن أُوقِدت. كان ذلك في مؤتمر الأوتار المنعقد في جامعة كاليفورنيا الجنوبية في سنة 1995، وفي محاضرة مدهشة قدّمها إدوارد ويتن أمام حشد من صفوة الفيزيائيين في سائر أرجاء العالَم، وعرض فيها مخطط عملٍ يرى فيه الوسيلة للتغلب على العقبات التي تعترض سبيل تطوير نظرية الأوتار؛ وقد انكبّ هؤلاء منذئذ وحتى تاريخ كتابة هذه السطور على العمل بحماس لا يفتر لتطوير طرق جديدة تتيح لهم التغلّب على تلك الصعاب؛ وسيكون نجاحهم في ذلك معياراً لنجاعة التقانات التي سيعملون عليها. وربّما سيلوح الضوء أخيراً من نهاية النفق، على بعدها.

سنحاول في هذا الفصل وفي الفصول اللاحقة عرض رؤيتنا لنظرية الأوتار عند ثورتها الأولى وما تلاها من أعمال حتى ثورتها الثانية، وسندل من حين لآخر على بعض الرؤى المبصّرة التي حملتها الثورة الثانية التي سنتحدث عن تطوراتها الأحدث في الفصلين الثاني عشر والثالث عشر.

ذرة اليونانيين، مرة أخرى؟

تدّعي نظرية الأوتار، كما ذكرنا في مقدمة هذا الفصل وبيّنا في الشكل 1.1، أنّ لو قدرنا على تفحّص جسيمات النموذج المعياري الافتراضية ذات الطبيعة النقطية، بدقة

كبيرة تفوق قدراتنا الحالية، إذن لرأينا كل جسيم منها وقد تكوّن من حلقة (أوعروة) منفردة صغيرة لوتر مهتز.

يقارب طول الحلقة الوترية النموذجية، ولأسباب سنعرضها لاحقاً، طول بلانك، وهو أصغر من نواة الذرة بحوالي مئة مليار مليار (10^{20}) مرة تقريباً؛ لذلك لا عجب إن عجزت إمكانياتنا المتاحة عن تفحّص الطبيعة الوترية المجهرية للمادة. فهذه الأوتار صغيرة جداً حتى في مقاييس أبعاد الجسيمات دون الذرية؛ ويحتاج الكشف المباشر لتبيّن تلك الطبيعة والتأكد من أن الوتر ليس جسيماً نقطياً إلى مسرّع يؤمّن اصطدام بعض أجزاء المادة ببعضها الآخر بطاقات تفوق بمليون مليار مرة تقريباً طاقة أقوى المسرّعات الحالية.

سنتحدّث بإيجاز عن المقتضيات المذهلة التي تنجم عن استبدال الأوتار بالجسيمات النقطية. لكننا سنطرح أولاً سؤالاً بالغ الأهمية، وهو: ممّ تتكوّن الأوتار؟

لهذا السؤال إجابتان ممكنتان ترى أولاهما أن الأوتار هي حقاً مكوّنات أساسية أولية، أي أنها "ذرات" بالمعنى الذي أعطاه اليونانيون القدامى لهذه الكلمة، فهي **غير قابلة للانقسام أو التجزئة**؛ ولأنها المكوّنات المطلقة الأساسية الأصغر لأي شيء ولكل شيء، فهي نهاية السطر في تدرّج الطبقات المتعددة لبنى العالَم المجهري، أي أنها اللعبة الأخيرة من لعب **الماتريوشكا** الروسية. وترى وجهة النظر هذه، رغم وجود امتداد مكاني للأوتار، ألاّ معنى لسؤالنا عن تركيبها؛ إذ لو تكوّنت من أشياء أصغر منها، لما كانت مكوّنات أولية أساسية ولحلّ محلّها في هذا الاعتبار الشيء الذي تكوّنت منه، فكان هو المكوّن الأساسي للكون. والحال هنا شبيه بحال اللغة، فكما تتكون المقاطع من جمل والجمل من كلمات والكلمات من حروف، وحيث الحرف هو نهاية المطاف، وهو المكوّن الأساسي للّغة المكتوبة ولا بنية أساسية دونه، لذلك لا معنى لسؤالنا: ممّ يتكون الحرف؟ إنه نهاية السطر. وكذلك الوتر، فهو الوتر، ولا شيء أساسي أو أولي دونه، بحيث لا يمكن القول بأنه يتكوّن من أي شيء آخر.

أما الإجابة الثانية الممكنة عن ذلك السؤال فتقوم على حقيقة بسيطة مؤداها أننا لا نعرف حتى الآن إن كانت نظرية الأوتار هي النظرية الصحيحة أو النظرية النهائية

للكون. فإن لم تكن كذلك فلا أهمية لسؤالنا عن مكوّنات الأوتار. ورغم أن هذه الإجابة ممكنة من حيث المبدأ إلاّ أن الأبحاث العلمية المجراة منذ أواسط الثمانينيات تشير كلها إلى أن احتمالية هذه الإمكانية ضئيلة جداً. ولكنّ التاريخ علّمنا أنه كلما ازداد فهمنا للكون عمقاً، وجدنا مكوّنات مجهرية أدنى فأدنى، تشكّل مستويات المادة الأكثر دقةً. لذلك، إن لم تكن نظرية الأوتار قد أفلحت في أن تكون النظرية النهائية، فإن أوتارها قد تشكّل قشرةً داخلية دنيا أخرى (وليست الأخيرة) في البصلة الكونية، يمكن رؤيتها عند طول بلانك، وهو ما يعني أن الأوتار تتكون من بنى أدنى منها. وقد أثار نظريو الأوتار هذه الإمكانية ومازالوا يتابعونها حتى يومنا هذا، وتبدو فيما يقومون به من دراسات نظرية إشارات خفيّة مثيرة للاهتمام تدلّ على مثل هذه الإمكانية دون وجود أي دليل قاطع على ذلك؛ وسيحمل إلينا الزمن وما تجرى فيه من أبحاث مكثفة عن ذلك، الجواب. لذلك سنقصر مناقشتنا هنا، مع بعض الرؤى في الفصلين الثاني عشر والخامس عشر، على اعتبار الأوتار المكوّنات الأساسية الأصغر للكون.

توحيد القوى عبر نظرية الأوتار

يبدو في النموذج المعياري، إلى جانب عدم قدرته على شمول واستيعاب قوة الثقالة، جانب ضعف آخر يتجلّى في غياب أي تفسير لتفاصيل بنيته. إذ لا يبدو سبب اختيار الطبيعة القوى والجسيمات التي ورد ذكرها في الفصول السابقة والتي تبدو في الجدولين 1.1 و2.1. كما لا يبدو أي تفسير للقيم العددية الخاصة المعطاة لتلك الوسائط التسعة عشر التي تصف كمّياً تلك التفاصيل والمكوّنات، وكأن هذه القيم والتفاصيل عشوائية. فهل الأمر كذلك؟ وهل أن الخصائص الفيزيائية التفصيلية للكون قد " اختيرت" بمحض الصدفة، أم أن هناك فهماً أعمق يكمن وراء هذه المكوّنات التي تبدو، ظاهرياً فقط، وكأنها عشوائية؟

يعجز النموذج المعياري عن تقديم تفسير لذلك، فهو يعتبر قائمة الجسيمات وخصائصها معطيات **دخل** محدّدة تجريبياً. وكما لا يقدر أداء سوق الأسهم على تحديد ما في جعبتك المالية دون معرفة معطيات الدخل العائدة لاستثماراتك الأولية، فكذلك لا يقدر

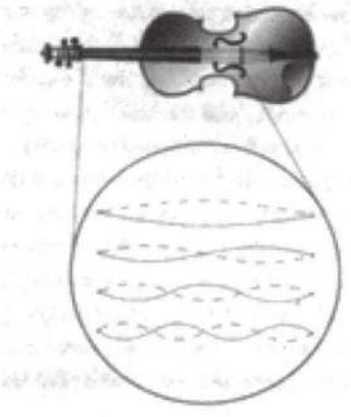
النموذج المعياري على وضع أي تنبؤ دون معرفة معطيات الدخل العائدة لخصائص الجسيمات الأساسية[6]. لذلك يستخدم الفيزيائيون النظريون هذا النموذج لوضع تنبؤات قابلة للاختبار، مثل التنبؤ بما سيحصل عند تصادم جزيئات معيّنة في داخل مسرّع، بعد أن يكون الفيزيائيون التجريبيون قد أجروا قياساتهم البالغة الدقة والحساسية لتلك الخصائص. وليست قدرة النموذج المعياري على تفسير خصائص الجسيمات المذكورة في الجدولين 1.1 و2.1 أفضل من قدرة مؤشر جونز اليوم على تقدير قيمة استثماراتك الأولية في سوق الأسهم قبل عشر سنوات. هذا ولو دلت التجارب على وجود محتوىً جسيمي آخر في العالَم المجهري، غير ما نعرفه، كأن تتأثر الجسيمات بقوى مختلفة على نحو ما، إذن لأمكن بسهولة نسبية تضمين هذه المتغيّرات في النموذج المعياري من خلال تزويده بوسائط دخل مغايرة. إن بنية هذا النموذج، من هذا المنظار، مرنة جداً وقادرة على تفسير خصائص الجسيمات الأولية من خلال مقدرتها على التكيّف والتلاؤم مع طيف واسع من الإمكانات.

أما نظرية الأوتار فغير ذلك تماماً. إنها بنيةٌ نظريةٌ فريدة جامدة لا تتطلب أي معطيات دخل عدا رقماً واحداً فقط، سنعرضه لاحقاً، يحدّد مقياس صوّة الإسناد* لعمليات القياس بحيث تقع كل خصائص العالَم المجهري في إطار تفسير هذه النظرية. ولفهم ذلك، لننظر أولاً إلى أوتار اعتيادية مألوفة مثل أوتار الكمان التي يُحدث كل واحد منها تنوّعاً كبيراً (لا متناهياً في الحقيقة) من الأنماط الاهتزازية المختلفة المعروفة **بالرنينات**، كتلك التي على الشكل 1.6، وهي الأنماط الموجية التي تتوزع بذراها وأغوارها بصورة متساوية يتسع لها تماماً المجال ما بين طرفي الوتر المثبتين. تتحسّس آذاننا هذه الأنماط الاهتزازية الرنينية المتباينة كعلامات موسيقية مختلفة. وللأوتار، في نظرية الأوتار، خصائص مشابهة إذ يُحدث الوتر أنماطاً اهتزازية رنينية تتوزع بذراها وأغوارها بصورة متساوية يتسع لها تماماً الامتداد المكاني للوتر. تبدو على الشكل 2.6 بعض هذه الأوضاع. وهنا تكمن الفكرة الأساسية، إذ كما تُحدث الأنماط الاهتزازية المتباينة لوتر الكمان علاماتٍ موسيقية مختلفة، **فإن الأنماط الاهتزازية المختلفة لوتر أساسي في**

---

*وهي نقطة علام يكون مستواها فوق أو تحت مستوى معرّف معلوم هو مستوى الإسناد. المترجم

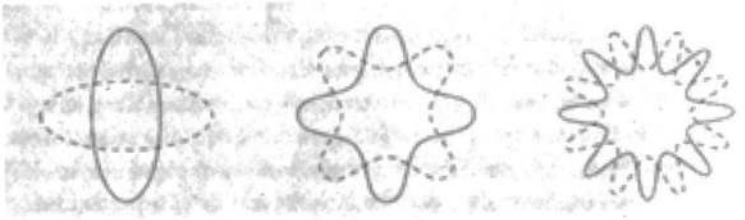
نظرية الأوتار، تولّد كتلاً وشحنات قوى مختلفة. ولأهمية هذه النقطة، نكررها ثانية بقولنا: إن خصائص " جسيم أولي" –أي كتلته وشحنات قواه المختلفة– تتحدد، وفقاً لنظرية الأوتار، من خلال نمط الاهتزاز الرنيني الدقيق الذي يؤديه وتره الداخلي.



الشكل 1.6: *يمكن لأوتار الكمان الاهتزاز وفقاً لأنماط رنينية تتوزع بذراها وأغوارها بصورة متساوية يتسع لها تماماً المجال بين طرفي الوتر المثبتين.*

يسهل جداً فهم هذا الارتباط في حالة كتل الجسيمات. لنرَ ذلك. تعتمد طاقة النمط الاهتزازي لوتر ما على سعة موجته، وهي أكبر مسافة بين ذروتها وغورها، وعلى طولها الموجي، وهو المسافة ما بين ذروة وتاليتها، فتزداد بازدياد السعة وبتناقص الطول الموجي، وهو ما نتوقعه بالحدس، فطاقة نمط اهتزازي شديد الهيجان أكبر من طاقة نمط اهتزازي أقل هيجاناً، كما يبدو على الشكل3.6. وهذا الأمر مألوف وشبيه بما تُحدثه أوتار الكمان، وحيث يكون اهتزاز الوتر، إذا ما نُقر بشدة، أكبر من اهتزازه إذا ما نُقر بلطف. ولما كانت النسبية الخاصة تعلِمنا أن طاقة جسيم ما وكتلته ليستا سوى وجهين لقطعة نقد واحدة، فإذا ما كبر أحدهما كبر الآخر والعكس بالعكس، فإن تحديد **كتلة** جسيم أولي يغدو ممكناً، في نظرية الأوتار، من معرفة **طاقة** نمط اهتزاز وتره الداخلي:

فالجسيمات الثقيلة تحوي أوتاراً داخلية تهتز بشدة أكبر من شدة اهتزاز الأوتار الداخلية للجسيمات الأخف.

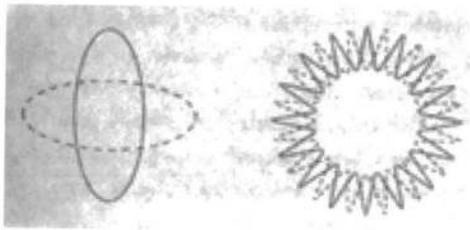


الشكل2.6: *يمكن لأوتار نظرية الأوتار الاهتزاز وفقاً لأنماط رنينية، مماثلة لأنماط أوتار الكمان الرنينية، حيث تتوزع بذراها وأغوارها بصورة متساوية يتسع لها تماماً امتداد الوتر المكاني.*

ولما كانت كتلة الجسيم تحدّد خصائصه الثقالية، فإن هناك ارتباطاً مباشراً بين نمط اهتزاز الوتر واستجابة الجسيم الموافق له لقوة الثقالة؛ كما وجد الفيزيائيون، وإن كان دليلهم في ذلك أكثر تجريداً، أن هناك ارتباطاً مماثلاً بين مظاهر تفصيلية أخرى لنمط اهتزاز الوتر وخصائصه المرتبطة بأنواع أخرى من القوى. فالشحنة الكهربائية والشحنة الضعيفة والشحنة الشديدة التي يحملها وتر ما تتحدد، على سبيل المثال، بالطريقة الدقيقة التي يهتز بها. ينطبق هذا القول أيضاً على الجسيمات الرسل؛ فجسيماتٌ مثل الفوتونات وبوزونات المعيار الضعيف والغليّونات ليست إلاّ أنماطاً رنينية أخرى لاهتزازات وترية. ومن الأهمية بمكان أن نذكر هنا أن أحد الأنماط الاهتزازية الوترية يتوافق تماماً وخصائص الغرافيتون، ممّا يؤكد أن الثقالة جزء لا يتجزأ من نظرية الأوتار[7].

هكذا تُرجع نظرية الأوتار الخصائصَ الملاحَظة للجسيمات الأولية إلى نمط الاهتزاز الرنيني الخاص الذي تؤديه أوتارها الداخلية. وتختلف وجهة النظر هذه بصورة جذرية عن تلك التي تبنّاها الفيزيائيون قبل اكتشاف نظرية الأوتار وحيث كانت الاختلافات بين الجسيمات الأساسية تفسَّر بالقول "إن كل صنف منها مقتطع من بنية نسيجية مختلفة عن بنية الصنف الآخر". ورغم اعتبارنا أن كل جسيم أساسي هو جسيم أولي، فقد كنا نرى أن نوع "الحشوة" التي تحتويها هذه الجسيمات مختلف من واحد لآخر. فحشوة الإلكترون

مثلاً ذات شحنة كهربائية سالبة، في حين ليس في حشوة النترينو أي شحنة كهربائية. وجاءت نظرية الأوتار لتبدّل هذه الصورة على نحو جذري، بإعلانها أن مادة "الحشوة" هي **ذاتها** لسائر المواد ولجميع أشكال القوى. فكل جسيم أولي يتكون من وتر وحيد –أي أن كل جسيم هو **عبارة** عن وتر وحيد–. والأوتار كلها متماثلة تماماً. وترجع الاختلافات ما بين الجسيمات إلى تباين الأنماط الاهتزازية الرنينية المختلفة التي تؤديها أوتارها الموافقة. وما يبدو الآن جسيمات أولية مختلفة ليس سوى "علامات موسيقية" مختلفة يؤديها وتر أساسي. ما أشبه الكون بتكونه من عدد هائل من هذه الأوتار المهتزة بسيمفونية كونية متناغمة.



الشكل3.6: *تحمل الأنماط الاهتزازية الأكثر هياجاً طاقة أكبر من تلك الموافقة لأنماط اهتزازية أقل هياجاً.*

تبيّن هذه النظرة الشمولية كيف تقدّم نظرية الأوتار إطاراً توحيدياً رائعاً. فكل جسيم مادي وكل جسيم ناقل للقوى يتكون من وتر وحيد يحدّد نمطُه الاهتزازي " البصمةَ" المميزة للجسيم. ولما كانت الأحداث الفيزيائية في الكون توصف كلها، بمستوياتها الأساسية الأعمق، بدلالة قوى تؤثر ما بين المكوّنات المادية الأولية، فإن نظرية الأوتار تقدّم الدليل والمؤشّر الواعد بإمكانية وضع تصوّر واحد وموحّد وشامل للكون الفيزيائي، أي بنظرية كل شيء (ن. ك. ش.).

موسيقى نظرية الأوتار

رغم أن نظرية الأوتار وضعت جانباً مفهوم الجسيمات الأولية التي لا بنية داخلية لها، إلاّ أن لغة هذا المفهوم لم تستسلم بسهولة، خاصةً وأنه قادرٌ على تقديم وصف دقيق لما يجري في عالَم الفيزياء بأبعاده الصغيرة جداً. لذلك سنظل نتحدث في مجال الفيزياء النظرية عن " جسيمات أولية"، إلاّ أننا سنعني بها دوماً قطعاً صغيرةً من وتر مهتز. وقد رأينا في المقاطع السابقة أن كتل هذه الجسيمات وشحنات قواها هي نتاج الطريقة التي تهتز بها أوتارها الموافقة، مما يدفع إلى القول بأنْ لو قدرنا، وبدقة، على حلّ مسألة معرفة كلّ الأنماط الاهتزازية الرنينية المتاحة للأوتار الأساسية –أي العلامات الموسيقية التي يمكنها عزفها إذا صحّ التعبير– إذن لأمكننا تفسير كلّ الخصائص الملاحَظة للجسيمات الأولية. وهكذا تقدّم لنا نظرية الأوتار، ولأول مرة، إطاراً عملياً **لتفسير** كافة خصائص الجسيمات الملاحَظة في الطبيعة.

علينا إذن أن نحكم قبضتنا على أحد هذه الأوتار، وأن "ننقره" بكافة السبل المتاحة بغية تحديد أنماطه الاهتزازية الرنينية الممكنة؛ وسنجد، إن كانت النظرية صحيحة، أن هذه الأنماط تتوافق تماماً وخصائص الجسيمات المادية وجسيمات القوى المذكورة في الجدولين 1.1و 2.1 والملاحَظة تجريبياً. إلاّ أن صغر الوتر لا يتيح إجراء مثل هذه التجربة، لذلك كان علينا نقره **نظرياً** من خلال وضع نموذج رياضيّاتي له. وقد ظن كثير من أنصار نظرية الأوتار خلال منتصف ثمانينيات القرن العشرين، أنهم أصبحوا قاب قوسين أو أدنى من بلوغ هذه النتيجة في تفسير جميع الخصائص التفصيلية للكون على مستواه المجهري الأعمق، بل وذهب الحماس ببعضهم لأن يعلن أنه قد تمّ اكتشاف نظرية كلّ شيء (ن. ك. ش.). ويبدو أنهم تسرعوا في ذلك إذ ما لبثت الأبحاث التي جرت خلال العقد ونيّف من السنين التي تلت ذلك أن بيّنت أن الفرح ببلوغ تلك النتيجة كان سابقاً لأوانه. فلنظرية الأوتار سمات نظرية كل شيء، إلا أن هناك صعوبات لا تزال قائمة تحول دون التوصل إلى استنتاج نظري دقيق لِطَيفِ الاهتزازات الوترية بهذه النظرية بغية مقارنته بالنتائج التجريبية؛ وبذلك لا يمكننا القول في الوقت الحاضر إن كان

ممكناً تفسير الخصائص الأساسية للكون، التي تلخّصها معطيات الجدولين 1.1 و2.1، بنظرية الأوتار. فهذه النظرية ترسم، من خلال فرضيات معيّنة، سنتحدث عنها بالتفصيل في الفصل التاسع، صورةً لكون يتمتع بخصائص تتوافق، على نحو كيفي، مع خصائص الجسيمات والقوى المعروفة؛ إلاّ أن استخلاص معطيات تفصيلية رقمية (أي وضع صورة كمّية) لا يزال أبعد من إمكانياتنا الحالية. وهكذا فإن بنية نظرية الأوتار، وخلافاً للنموذج المعياري الذي يعتمد جسيمات نقطية، **قادرةٌ** على وضع تفسيرٍ لسبب امتلاك الجسيمات والقوى خصائصَها، إلاّ أننا لا نزال عاجزين حتى الآن عن وضع هذا التفسير. إن نظرية الأوتار غنية وذات إمكانات كبيرة؛ ورغم أننا لم نقدر حتى الآن على تحديد معظم خصائصها التفصيلية، فهي **تُتيح لنا** اكتساب أفكار خلاّقة عن ظواهر فيزيائية جديدة غنية تنجم عنها، وسنرى ذلك في الفصول القادمة.

وسنتحدث كذلك في هذه الفصول، وبالتفصيل، عن العوائق التي أشرنا إليها؛ إلاّ أن من المفيد أن نعرضها أولاً بإطارها العام. إن الأوتار تظهر في العالَم حولنا بتوتّرات مختلفة: فشريط الحذاء أقل توتّراً (رخو) من وتر الكمان؛ وتوتّر كليهما أقل بكثير من توتّر السلك المعدني في البيانو. إن الرقم الوحيد الذي تحتاجه نظرية الأوتار، كدخلٍ لوضعِ وصفٍ عام لها، هو التوتّر المطبق على حلقاتها؛ لكن، كيف يمكن تحديد هذا التوتّر؟ كان يمكن فعل ذلك لو أننا قدرنا على نقر وتر أساسي وعرفنا مدى صلابته وقساوته، كما في حالة الأوتار المألوفة لدينا. لكن الأوتار الأساسية بالغة الصغر ولا يمكن إخضاعها لمثل هذه المقاربة، وعلينا تحرّي طريقة أخرى غير مباشرة لذلك. وقد جاءت ملامح هذه الطريقة من خلال أعمال شيرك وشفارتز سنة 1974، عندما لاحظا وجود نمط اهتزازي خاص للوتر يتوافق وجسيم الغرافيتون. أظهرت حساباتهما أن شدة القوة التي تنتقل عبر هذا النمط الاهتزازي تتناسب عكساً وتوتّر الوتر. ولما كان الغرافيتون، كما هو مفترض، ناقلاً لقوة ضعيفة جداً هي قوة الثقالة، فقد استنتجا أن ذلك يقتضي خضوع وتره لتوتّر هائل من مرتبة ألف مليار مليار مليار مليار (10^{39}) طن، وهو ما يعرف **بتوتّر بلانك**. وهكذا فالأوتار الأساسية صلبة وقاسية إلى حدّ بعيد إذا ما قورنت بالأوتار الاعتيادية، وتترتّب على ذلك ثلاث نتائج أساسية.

ثلاث نتائج لقساوة الأوتار

تبدو النتيجة الأولى لقساوة الأوتار بصغر أبعادها، وتبدو الثانية بكبر طاقاتها، في حين تبدو الثالثة بأعدادها.

نرى، بالنسبة لأولى هذه النتائج، أن للأوتار المألوفة كوتر الكمان أو وتر البيانو طولاً ثابتاً هو المسافة بين نهايتيها، في حين ليس هناك مثل هذا التحديد الثابت لمقدار قياس الوتر الأساسي، وحيث تسبّب القيمةُ الكبيرة للتوتّر الذي يخضع له تقلّصَ أبعاد حلقاته إلى مقاييس صغيرة جداً. وتبيّن الحسابات التفصيلية أن خضوع الأوتار لتوتّر بلانك يجعل طول الوتر الأساسي النموذجي من مرتبة طول بلانك أي حوالي 10^{-33} سم كما ذكرنا سابقاً [8].

ونرى بالنسبة للنتيجة الثانية لقساوة الأوتار أن الطاقةَ النموذجية لحلقة مهتزة كبيرةٌ جداً بسبب كبر التوتّر الذي تخضع له. ولفهم ذلك علينا أن نلاحظ أن هزّ الوتر يغدو أصعب كلما كبر التوتّر المطبَّق عليه. فنقر وتر الكمان أيسر من نقر وتر البيانو. لذلك فإن طاقتي وترين يخضعان لتوتّرين متباينين ويهتزان بنمط اهتزازي واحد، ليستا متساويتين فيما بينهما، فطاقة الوتر ذي التوتّر الأعلى، الذي يتطلّب مزيداً من الطاقة لتحريكه، أكبر من طاقة الوتر ذي التوتّر الأدنى. يذكّرنا ذلك بأن طاقة الوتر المهتز تتحدّد بأمرين اثنين، أولهما طريقة اهتزازه الدقيقة، وحيث تزداد طاقة النمط الاهتزازي بازدياد هيجانه، وثانيهما قيمة توتّره وحيث توافق التوتّرَ الأعلى طاقةٌ أكبر. قد يدفعنا ذلك إلى الاعتقاد بإمكانية خفض طاقة الوتر بالقدر الذي نريد، من خلال إخضاعه لأنماط اهتزازية لطيفة، أي لأنماط اهتزازية ذات سعات صغيرة بقدر ما نريد، وبأعداد أقل فأقل من الذرى والأغوار. إلاّ أن ميكانيك الكم سرعان ما يعيدنا إلى جادة الصواب. فهو كان قد أعلمنا، كما ذكرنا في الفصل الرابع في غير هذا السياق، أن الاهتزازات والاضطرابات الموجية كلها تتكون من أعداد صحيحة من وحدات منفصلة. وبمثل ما كانت كمية النقود التي كان يحملها رجل في المخزن الذي تحدثنا عنه سابقاً تتكوّن من عدد **صحيح** من وحدات الفئة النقدية التي خُصِّص بها، فإن الطاقة التي يحملها نمط

اهتزازي لوتر أساسي تتكوّن من عدد صحيح مضاعف من وحدةٍ طاقية أصغرية يحدّد فئتَها توتّرُ الوتر (وتتناسب كذلك مع عدد الذرى والأغوار في نمط الاهتزاز الملاحَظ)، في حين تحدّد سعةُ الاهتزاز قيمةَ العدد الصحيح المضاعف لهذه الوحدة.

إن النقطة الجوهرية في مناقشتنا هي التالية: لما كان توتّر الوتر يحدّد فئة وحدته الطاقية، وكان هذا التوتّر مرتفعاً جداً، فإن قيمة وحدة الطاقة الأساسية الأصغر كبيرة جداً في مقاييس فيزياء الجسيمات الأولية، وهي من مضاعفات ما يُعرف **بطاقة بلانك**. ولأخذ فكرة عن مقدار هذه الطاقة نذكر أنها تعادل، وتبعاً لمعادلة أنشتاين الشهيرة $E=mc^2$، كتلةً من مرتبة عشرة مليار مليار (10^{19}) كتلة البروتون. تُعرف هذه الكتلة الهائلة بمعيار فيزياء الجسيمات الأولية **بكتلة بلانك**، وهي تعادل تقريباً كتلةَ ذرة غبار أو كتلة مجموعة من حوالي مليون بكتيريا عادية. ويكون المكافئ الكتلي لحلقة مهتزة في نظرية الأوتار من مضاعفات كتلة بلانك. لذلك يعبّر فيزيائيو نظرية الأوتار غالباً عن هذا الوضع بالقول إن مقياس الطاقة " النموذجي" أو " الطبيعي" فيها (وبالتالي مقياس الكتلة) هو مقياس بلانك. يطرح هذا الأمر سؤالاً أساسياً يتعلق فيما نسعى إليه عن الوصول إلى فهم خصائص الجسيمات الموصوفة في الجدولين 1.1 و2.1، إذ لو كان مستوى الطاقة "الطبيعي" في نظرية الأوتار من مرتبة بضعة آلاف مليار مليار مرة كتلة البروتون، فكيف سنرى فيه الجسيمات الأخف بكثير منه – مثل الإلكترونات والكواركات والفوتونات وأمثالها– مما يصنع عالَمنا؟

ومرة أخرى يحمل إلينا ميكانيك الكم الجواب على ذلك من خلال مبدأ الارتياب القائل بألاّ شيء في الكون ساكن على نحو مطلق، بل أن كل شيء فيه يعاني من ارتعاشات كمومية، إذ لو لم يفعل ذلك لأمكن تحديد موقعه وسرعته بدقة تامة بخلاف ما ينص عليه مبدأ هايزنبرغ. يصح هذا القول أيضاً على حلقات نظرية الأوتار، فمهما بدا الوتر هادئاً فإنه يعاني من مثل هذه الارتعاشات الكمومية؛ إلاّ أن الأمر الهام هنا هو ما بيّنته الأبحاث المجراة في السبعينيات من القرن العشرين عن وجود **إبطالات أو حذوفات** ما بين هذه الارتعاشات الكمومية واهتزازات الوتر التي تحدثنا عنها أعلاه والموضّحة في الشكلين 2.6 و3.6. فطاقة ارتعاش الوتر الكمومية **سالبة**، وهو ما يُعدّ من غرائب

ميكانيك الكم، مما **يقلّل** من مقدار المحتوى الطاقي الكلي لوتر مهتز بمقدار يساوي تقريباً طاقة بلانك؛ فالمستويات الطاقية الأدنى لأنماط الوتر الاهتزازية، المساوية تقريباً طاقةَ بلانك (حيث حدّ التضاعف هو الواحد) يتمّ إبطالها أو حذفها بكاملها تقريباً مما يعطي اهتزازات ذات طاقة خالصة منخفضة ومكافئة بالتالي كتلاً قريبة من كتل جسيمات المادة والقوى المذكورة في الجدولين 1.1و 2.1. وهذه الأنماط الاهتزازية ذات الطاقات **الأدنى** هي ما سيكون صلةَ الوصل بين الوصف النظري للأوتار وعالَم الجسيمات الفيزيائية الممكن بلوغه تجريبياً. نشير كمثالٍ على ذلك إلى ما وجده شيرك وشفارتز عن إبطالٍ **كلّي** تماماً لطاقة النمط الاهتزازي ذي الخصائص المماثلة لجسيم الغرافيتون الرسول، مما يجعله جسيماً عديم الكتلة موافقاً لقوة الثقالة. وهذا ما نتوقعه تماماً، إذ تنتقل هذه القوة بسرعة الضوء وهو ما لا تقدر عليه إلاّ الجسيمات التي لا كتلة لها. لكن التوافيق الاهتزازية ذات الطاقة الأدنى تمثل الاستثناء وليس القاعدة؛ فاهتزاز وتر أساسي نموذجي يوافق جسيماً كتلته أكبر من كتلة البروتون بمقدار كبير قد يبلغ مليار مليار مرة.

يعني ذلك أن الجسيمات الأساسية الخفيفة نسبياً، المبيّنة في الجدولين 1.1 و2.1، يجب أن تتشكل على نحو ما في سديم خفيف يعلو محيطاً هادراً يعجّ بأوتار هائجة. وحتى جسيم الكوارك الذروي الثقيل الذي تزيد كتلته بحوالي 189 مرة على كتلة البروتون، فإنه لا يمكن أن ينشأ من وتر مهتز إلاّ إذا أُبطلت طاقة بلانك الهائلة العائدة له بطاقة ارتعاشات الارتياب الكمومي إلى أقل من جزء واحد من مائة مليار مليار جزء من قيمتها. والأمر هنا شبيه بما يجري في لعبة معرفة **السعر الصحيح** لسلعة ما، حيث يعطيك نبيل عشرة مليار مليار دولار، ويتحدّاك أن تشتري بها حاجيات (أي أن تبطل قيمتها بتعبير آخر) بحيث لا يتبقى معك في نهاية المطاف إلاّ 189 دولار تماماً. إن صرف مثل هذا المبلغ الكبير وعلى نحو بالغ الدقة ودون معرفة الأسعار الحقيقية الإفرادية للمواد المشتراة، يستعصي على أكثر خبراء التسوّق في العالَم ذكاءً وفطنة. وقد أظهرت الحسابات التقريبية لنظرية الأوتار، وحيث الطاقة هي النقود، وعلى نحو لا يرقى إليه الشك **إمكانية** حدوث إبطالات الطاقة. إلاّ أن التحقق الدقيق من ذلك لا يزال بعيداً عن إمكاناتنا المتاحة الآن ولأسباب ستتضح لنا بصورة أفضل في الفصول القادمة.

إلاّ أن بوسعنا، برغم ذلك وكما سبق وذكرنا، أن نستخلص من نظرية الأوتار نتائج وخصائص أقل حساسيةً وتأثراً بهذه التفاصيل الدقيقة وأن نفهمها بثقة.

يقودنا ذلك إلى النتيجة الثالثة المترتبة على قساوة الأوتار وشدة توتّرها وهي عددها. فالأوتار تبدي عدداً لا متناهياً في الكبر من الأنماط الاهتزازية المختلفة. وقد بيّنا في الشكل 2.6 بدايات تتالٍ لا نهاية له منها يتميّز بأعداد متزايدة من ذرى الأمواج وأغوارها. ونتساءل: ألا يعني ذلك وجوب وجود تتالٍ موافق لا نهاية له من جسيمات أولية، يتعارض مع الوضع التجريبي المبيّن في الجدولين 1.1و2.1 ؟.

ونجيب على ذلك بالإيجاب. إذ لو صحت نظرية الأوتار إذن لكان لكل واحد من أنماط اهتزازات الوتر الرنينية اللامتناهية في عددها جسيم أولي موافق؛ وستكون هذه الجسيمات، بسبب شدة توتّر الوتر الهائلة، ثقيلة جداً باستثناء العدد القليل منها الموافق أنماطاً اهتزازيةً أُبطلت طاقاتها تقريباً بارتعاشات الوتر الكمومية. ونعني بكلمة "ثقيل" هنا كتلةً أكبر من كتلة بلانك بمرّات عدة. ولما كانت مسرّعات الجسيمات الأقوى المتاحة حالياً تؤمن طاقة مكافئة لكتلة تزيد بحوالي ألف مرة على كتلة البروتون، اي أنها أقل بحوالي مليون مليار مرة من طاقة بلانك، فإننا نرى أننا لا نزال بعيدين جداً عن إمكانية البحث في مختبراتنا عن هذه الجسيمات الجديدة الثقيلة التي تتنبّأ بها نظرية الأوتار.

ومع ذلك فهناك مقاربات أخرى أقل مباشرة يمكننا بها البحث عن هذه الجسيمات الثقيلة. نذكر على سبيل المثال أن الطاقة المتوفرة عند ولادة الكون كانت هائلةً جداً، بحيث تكفي لتَشكُّل وفرةٍ من هذه الجسيمات التي لا نتوقع أن تكون قد بقيت إلى يومنا هذا؛ فهي، لثقلها الفائق، شديدة القلق وغير مستقرة، تتحلّل إلى شلاّل من جسيمات أدنى فأدنى، حتى ينتهي بها المطاف إلى الجسيمات التي نألفها والخفيفة نسبياً. لكن! ألا يمكن أن تكون قد تخلّفت عن ذلك – وكتذكار للحظة الانفجار الأعظم– حالة اهتزازية وترية توافق جسيماً ثقيلاً جداً. إن العثور على مثل هذه الحالة، وكما سنرى في الفصل التاسع، سيُعدّ، في أدنى الاعتبارات، اكتشافاً هائلاً مميّزاً.

الثقالة وميكانيك الكم في نظرية الأوتار

يُعدّ الإطارُ الموحّد الذي تقدّمه نظرية الأوتار أمراً مقنعاً بحدّ ذاته؛ إلاّ أن الجاذبية الحقيقية لهذه النظرية تتجلى في مقدرتها على تلطيف حالة العداء القائمة ما بين قوة الثقالة من جهة وميكانيك الكم من جهة أخرى. ونذكّر بأن العقبة الأساسية أمام دمج النسبية العامة بميكانيك الكم تبدّت عند مواجهة حجر رحى النظرية الأولى –وهو القول بأن المكان والزمان يشكّلان بنية هندسية منحنية ملساء– بالخاصية الأساسية للنظرية الثانية القائلة بأن كل شيء في الكون، بما في ذلك نسيج بنية المكان والزمان، يخضع لتراوحات ولتماوج كمومي يزداد حدّة كلما صغرت المقاييس والأبعاد التي نسبرها فيها، حتى إذا ما غدت هذه الأبعاد دون مقياس بلانك، اشتدّ عنف هذا التماوج الكمومي إلى حدّ يطيح معه بمفهوم النسبية العامة عن مكان هندسي منحن أملس، ويطيح بالتالي بنظرية النسبية العامة ذاتها.

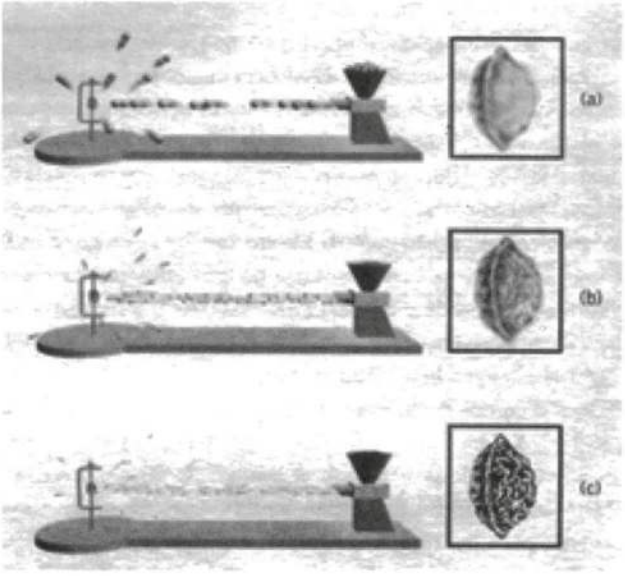
أما نظرية الأوتار فتخفّف، بغية حلّ هذا التعارض، من حدّة هذا التماوج الكمومي من خلال " مسحها" بنية المكان، في أبعادها الأدنى، وتسويتها وتشذيبها. وتعرض لكيفية عملها إجابتين، واحدة تقريبية وثانية أكثر دقة. وسنناقش فيما يلي كلاً من هاتين الإجابتين.

الجواب التقريبي

نذكر من بين الطرق التي يمكن بها التعرّف على بنية جسم ما، طريقة بسيطة وغير مذمّقة تقوم على قذف هذا الجسم بجسيمات أخرى وملاحظة كيفية ارتدادها عنه وانحراف مسارها. فنحن نرى الأشياء التي ننظر إليها من خلال ما تلتقطه أعيننا ويحلّله دماغنا من معلومات تحملها إليه الفوتونات المرتدّة عنها. وعلى هذا المبدأ تقوم أيضاً مسرّعات الجسيمات التي تُطلَق فيها جسيمات مادية، مثل الإلكترونات والبروتونات، بعضها على بعض أو على أهداف أخرى، وتقوم حسّاسات متطورة بتحليل ما يتناثر من شظايا من هذه الأجسام بغية تحديد بنيتها.

تحدّد **أبعادُ الجسيم السابر** المستخدَم، أي الجسيم القذيفة، بصورة عامة، الحدّ الأدنى للأبعاد التي يمكن تحسّسها وتمييزها. ولإدراك دلالة هذه العبارة الهامة، سنعود إلى سليم

وخالد اللذين قرّرا تعلّم الرسم، فالتحقا بدورة دراسية لذلك. ومع تقدّم الفصل الدراسي يشعر خالد بالغيرة بسبب ما يبديه سليم من مهارة فنية متزايدة في تعلّمه، فيدعوه إلى تحدّ غريب، إذ يقترح عليه أن يأخذ كلّ منهما نواة حبّة درّاق يضعها في ملزمة ثم يرسمها "بأدق تفاصيلها". والغريب في هذا التحدي ما يقتضيه من عدم النظر إلى النواة، بل التعرّف عليها، على حجمها وشكلها وسائر معالمها، من خلال قذفها بجسيمات (غير الفوتونات!) وملاحظة كيفية ارتدادها عنها، كما هو مبيّن على الشكل4.6. يعمد خالد، ودون علم من سليم، إلى ملء " مدفعه" (مدفع سليم) بكرات من الرخام، الصورة (a) من هذا الشكل، في حين يعبّئ مدفعه الخاص بكريّات بلاستيكية أصغر حجماً بكثير لا يتعدّى قطرها الخمسة ملّيمترات، الصورة (b). ويقف كل منهما وراء مدفعه، فيوجهه نحو هدفه، وتبدأ المنافسة.



الشكل 4.6: *توضع نواة حبّة درّاق بين حدّي ملزمة، وترسم بعد التعرّف على شكلها من خلال ملاحظة كيفية انحراف وحدات "الجسيم السابر" الذي تُقذف به. ويلاحظ أن الرسم يغدو أدق، وأن صورته تغدو أوضح مبيّنة ما على سطح النواة من تجعّدات وتغضّنات، كلما صغرت أبعاد الجسيم السابر، من كرات من الرخام (a) إلى كريات بلاستيكية بقطر 5 ملم (b)، إلى كريّات بقطر 0.5 ملم (c).*

كانت الصورة (a) أفضل ما توصّل سليم إلى رسمه، حيث كان كل ما خلص إليه من ملاحظة مسارات كرات الرخام المرتدة عن النواة إلى أن الأخيرة صغيرة وذات سطح قاس، لأن كرات الرخام المستخدَمة قذائفَ في مدفعه كانت كبيرة لدرجة لا تتيح التعرّف على البنية المتجعّدة الدقيقة لنواة حبّة الدرّاق. وإذ يتطلّع إلى ما رسمه خالد، الصورة (b)، تتملكه الدهشة إذ يراه أكثر دقة وإتقاناً ممّا رسمه هو؛ فيلقي نظرة خاطفة على مدفع خالد وقذائفه، ويدرك إثرها الخدعة التي لجأ إليها هذا الأخير باستخدامه جسيمات سبر صغيرة أكثر تأثراً بالزخرفات والتزيينات التي على سطح النواة، ممّا مكّنه من رسم صورة أكثر دقة لها وذلك بعد دراسته مسارات انحراف الجسيمات السابرة عنها. لا يقرّ سليم بهزيمته، فيعود إلى مدفعه ويملؤه بقذائف من جسيمات أصغر يبلغ قطر واحدتها نصف ملّيمتر، ممّا يتيح لها الوصول إلى أكثر التجعّدات دقة على سطح نواة حبّة الدرّاق قبل ارتدادها عنها. وبملاحظة كيفية انحراف هذه القذائف بعد ارتدادها، تمكن سليم من رسم الصورة الفائزة (c).

تعلّمنا هذه المنافسة ما بين خالد وسليم درساً بالغ الأهمية، حيث لا يمكن لجسيمات السبر، حتى تكون قادرة على تحسّس معالم وقسمات الجسم المراد فحصه، أن تكون أكبر بكثير من أبعاد هذه المعالم، وإلاّ لعجزت عن تمييز تفاصيلها.

تصحّ أفكار هذه المناقشة إذا ما أردنا سبر غور نواة حبّة الدرّاق على نحو أعمق بغية تحديد بنيتها الذرية وما دونها، إذ لن تكون الكريّات البلاستيكية التي يبلغ قطرها 0.5 ملم ذات أدنى فائدة في هذا المجال ولن تقدّم لنا أي معلومات مفيدة عن هذه البنية لأنها(أي الكريّات) كبيرة جداً وغير قادرة بالتالي على تحسّس بنية سطح النواة بأبعاده الذرية وتمييزها. ولهذا السبب أيضاً تَستخدم مسرّعاتُ الجسيمات البروتوناتِ والإلكترونات جسيماتِ سبر لأن صغر أبعادها يجعلها مناسبة جداً لذلك. فإذا ما بلغنا الأبعاد دون الذرية، حيث تحلّ المفاهيم الكمومية محلّ المفاهيم التقليدية، كان المعيار المناسب لتقدير حساسية جسيم ما وقدرته على السبر هو طوله الموجي الكمومي، الذي يعيّن مدى الارتياب في تحديد موضعه. تعكس هذه الحقيقة ما عرضناه في الفصل الرابع عن مبدأ الارتياب لهايزنبرغ، حيث كان مقدار الخطأ الناجم عن استخدام جسيم نقطي

كجسيم سبر، يساوي تقريباً طوله الموجي الكمومي (وكنّا آنئذ قد ركّزنا اهتمامنا على استخدام الفوتون كجسيم سبر، إلاّ أن ما نعرضه يصحّ كذلك على حالة الجسيمات الأخرى)؛ أو نقول، باستخدام تعبير أقل دقة على نحو ما، إن حساسية جسيم نقطي على السبر تخفّ بسبب ارتعاشاته الكمومية كما تخفّ دقة مبضع الجرّاح بارتعاش حركة يديه. لكن، وكما لاحظنا في ذلك الفصل أيضاً من أن الطول الموجي الكمومي لجسيم ما يتناسب عكساً وزخمه (أو اندفاعه)، أي وطاقته على نحو ما، فإن زيادة هذه الطاقة تسمح بتصغير الطول الموجي الكمومي لجسيم نقطي بقدر ما نشاء، وبالتالي بتناقص ارتعاشاته الكمومية شيئاً فشيئاً وعلى نحو يمكّن من استخدامه لسبر بنى فيزيائية أكثر فأكثر دقة. وينبئنا الحدس البسيط أن الجسيمات العالية الطاقة ذات قدرة كبيرة على الاختراق، وبالتالي ذات قدرة أكبر على سبر معالم وسمات أكثر فأكثر دقة.

في هذا السياق يصبح التمايز بين الجسيمات النقطية وخيوط الوتر جلياً وواضحاً؛ فالامتداد المكاني للوتر، المتأصل في طبيعته، يحول بينه وبين سبر بنية أي شيء أصغر بكثير من مقدار قياسه الذاتي، أي سبر بنى يقل قياسها عن طول بلانك، كما كان حال الكريات البلاستيكية المستخدَمة في سبر معالم سطح نواة حبّة الدرّاق. ويبدو هذا التمايز بصورة أدق من خلال أعمال ديفيد غروس في جامعة برنستون سنة 1988 وتلميذه بول مِنْده، التي بيّنا فيها أن التزايد المستمر لطاقة الوتر **لا** يعني بالضرورة تزايداً مستمراً في مقدرته على سبر بنى أكثر فأكثر دقة، وذلك إذا ما أخذنا بالاعتبار مقتضيات ميكانيك الكم، وهو ما يناقض ما رأيناه في حالة الجسيم النقطي. إن تزايد طاقة الوتر تجعله بداية قادراً على سبر بنىً ذات أبعاد أصغر فأصغر، كما في حالة الجسيم النقطي؛ أما إذا تجاوز هذا التزايدُ القيمةَ اللازمة لسبر بنى بمقاييس من مرتبة طول بلانك، فإن الطاقة الإضافية لن تساهم في تحسين مقدرة الوتر على السبر، بل تعمل على **زيادة** أبعاده، وبالتالي على **إنقاص** مقدرته على سبر الأبعاد الصغيرة. إن مقدار قياس الوتر النموذجي هو من مرتبة طول بلانك، أما لو قدرنا على تزويده بمقادير هائلة من الطاقة –وهي مقادير تفوق مقدرتنا على التصوّر والتخيّل، وقد تكون تحقّقت في لحظة الانفجار الأعظم– فقد ينمو ويكبر حتى يصبح ذا قياس **عياني**، ويغدو عندها مسباراً غير دقيق أو غير ملائم لسبر الكون المجهري. هكذا يبدو الأمر وكأن للوتر، وبخلاف الجسيم النقطي،

مصدرين **اثنين** للتماوج هما الارتعاش الكمومي، كما في حالة الجسيم النقطي، وامتداده المكاني المتأصل فيه. إن زيادة طاقة الوتر تخفف من تماوجه الذي يسببه المصدر الأول ولكنها، في النهاية، تزيد في تماوجه الذي يسببه المصدر الثاني. وخلاصة القول إن طبيعة الوتر بامتداده المكاني تحول دون استخدامه لسبر ظواهر فيزيائية ذات مقاييس تقل عن طول بلانك، أيّاً ما كان الجهد المبذول لتحقيق ذلك.

لكن التعارض بين النسبية العامة وميكانيك الكم ينجم برمّته عن الخصائص التي يملكها النسيج المكاني عندما تقل أبعاده عن طول بلانك. **ولو كانت مكوّنات الكون الأساسية غير قادرة على سبر أبعاد تقل عن طول بلانك، فإن أيّاً منها، أو أي شيء مصنوع منها، لا يمكن أن يتأثر بالتموّجات الكمومية المأساوية المفترض حدوثها عند هذه الأبعاد الصغيرة.** وهذا يشبه ما يحدث عندما نمرر أناملنا على سطح من الغرانيت المصقول، حيث تعجز عن الإحساس ببنيته المجهرية بأبعادها الحبيبية المتقطعة وذات الملمس الخشن، بل تشعر به سطحاً ناعماً أملس، وكأن أناملنا بمرورها عليه قد سوّته وشذّبته وخفّفت من إحساسنا بما في بنيته من تماوج. وبمثل ذلك يعجز الوتر بامتداده المكاني عن سبر سطوح صغيرة جداً تقل أبعادها عن طول بلانك، لأن هناك حدوداً لمقدرته على ذلك. وكما لا تتحسّس أناملُنا البنيةَ المجهرية الخشنة لسطح الغرانيت المصقول عند إمرارها عليه، فكذلك يفعل الوتر: فهو يخفّف ويشذّب تماوجَ الارتعاشات المجهرية لحقل الثقالة على نحو يكفي للقضاء على التعارض الظاهر، أو عدم الانسجام القائم ما بين النسبية العامة وميكانيك الكم. وبشكل خاص، تمكّن نظرية الأوتار من التخلّص من القيم اللانهائية الضارة (التي تحدّثنا عنها في الفصل السابق) والناجمة عن مقاربة اعتمدت الجسيمات النقطية لوضع نظرية كمومية للثقالة.

إلاّ أن هناك فرقاً أساسياً بين ما عرضناه من تماثل بين بنية سطح الغرانيت وما يشغل بالنا عن بنية النسيج المكاني، وهو أن **هناك** دوماً وسائل لإظهار البنية المجهرية الخشنة لذلك السطح، تتيح إجراء عمليات سبر أكثر فأكثر دقة مما تقدر عليه أناملنا. فالمجهر الإلكتروني قادر، وبدقة، على تمييز معالم سطوح لا تتعدى أبعادها جزءاً من مليون جزء من السنتيمتر الواحد، مما يرينا العيوب البنيوية لهذا السطح؛ أما في نظرية الأوتار فلا سبيل لإظهار ما في النسيج المكاني من " عيوب" تقل أبعادها عن طول

بلانك. ففي كونٍ تحكمه قوانين نظرية الأوتار، فإن ما اصطلحنا عليه من إمكانية اختراق الطبيعة في مستوياتها الأدنى فالأدنى، ودون أن يكون هناك حدّ لهذا التدني، هو مفهوم غير صحيح. إن **هناك** دوماً حداً لذلك، وهو يتجلى حتى قبل أن نبلغ مرحلة الزبد الكمومي الذي لاحظناه على الشكل 1.5، بحيث يمكننا القول، وهو ما ستوضحه الفصول القادمة بدقة أكبر، **بعدم وجود** التماوج الكمومي العاصف المفترض في المسافات التي تقل عن طول بلانك. يقول الفلاسفة الوضعيون بوجود شيء ما إذا أمكن – من حيث المبدأ– سبره وقياسه. ولما كان الوتر المفترض يمثل أصغر شيء أساسي وعنصري في الكون، وهو على ذلك كبير إلى الحد الذي لا يتأثر معه بذلك التماوج العاصف الذي يلحق بالنسيج المكاني في الأبعاد التي تقلّ عن طول بلانك، فإن هذا التماوج **منيع** وعصيّ على القياس، وبالتالي **فلا وجود له** في نظرية الأوتار.

أهي خفة يد أم حيلة شعوذة؟

قد تدفع المناقشة السابقة إلى الإحساس بعدم الرضى؛ فهي، بدلاً من أن تُبرز دور نظرية الأوتار في التلطيف من حدة التماوج الكمومي الذي يلحق بالنسيج المكاني في أبعاده التي تقل عن طول بلانك، تبدو وكأنها استخدمت مقدار قياس الوتر غير المعدوم للالتفاف حول الموضوع برمّته. ونتساءل إن كنا توصلنا حقاً إلى إيجاد حلّ لشيء ما؟ نجيب على ذلك بالإيجاب، وتؤكّد ذلك الملاحظتان التاليتان.

أما أولاهما فتتعلق بأن ما اقتضته مناقشتنا السابقة من أن التماوج الكمومي المفترض وغير المؤكّد الذي يلحق بالنسيج المكاني في أبعاده التي تقل عن طول بلانك، إنما هو نتاج صياغتنا النسبية العامة وميكانيك الكم في إطار جسيمي–نقطي، أو بتعبير آخر، إن مشكلة التعارض الأساسية في الفيزياء النظرية المعاصرة هي من صنعنا نحن؛ فقد كنا مكرهين، بافتراضنا السابق أن كل جسيمات المادة وجسيمات القوى هي بنى نقطية لا امتداد مكاني لها، على اعتبار خصائص الكون بمقاييس اعتباطية صغيرة جداً. وقد جابهتنا، مع صغر هذه المقاييس، مشاكل بدت وكأنها عصيّة على الحل. أما نظرية الأوتار فتُرجع هذه المشاكل والصعوبات إلى عدم فهمنا القواعد الحقيقية للعبة. ذلك أن

هذه القواعد تنبئ بوجود حدّ ما لمدى سبرنا الكون، أو بتعبير آخر، أن هناط حداً لمدى إمكانية تطبيق مفهومنا التقليدي للمسافات على بنية الكون المجهرية الفائقة الصغر. ويبدو وكأن التماوج المكاني العنيف المفترض قد برز في نظرياتنا بسبب غفلتنا عن هذه الحدود، وهي غفلة قادتنا من خلال مقاربة جسيمية نقطية إلى تجاوز فاضح لحدود الحقيقة الفيزيائية.

ونتساءل أمام السهولة الظاهرة التي يبديها هذا الحل في التغلب على التعارض ما بين النسبية العامة وميكانيك الكم، عن سبب تأخر تقديم مثل هذا الاقتراح القائل بأن إضفاء الصفة النقطية على مكوّنات الطبيعة الأولية هو، على الأرجح، تصور مثالي، لأن لهذه المكوّنات الأولية امتداداً مكانياً في عالَمنا الحقيقي. يقودنا هذا التساؤل إلى النقطة الثانية أو الملاحظة الثانية، حيث سبق لبعض من كبار العلماء العاملين في مجال الفيزياء النظرية، من أمثال باولي وهايزنبرغ وديراك وفاينمان **أن اقترح** أن مكوّنات الطبيعة الأساسية قد لا تكون نقطية في حقيقتها، بل هي " قطيرات" أو " شذرات" متماوجة. إلاّ أنهم وسواهم وجدوا أن من الصعوبة بمكان صياغة نظرية لا تكون مكوّناتها الأساسية جسيمات نقطية، وتظل مع ذلك منسجمة مع مبادئ الفيزياء الأساسية مثل مبدأ انحفاظ الاحتمالية الميكانيكية الكمومية (بحيث لا تختفي الأجسام الفيزيائية فجأة دون أن تترك وراءها أثراً ما في الكون)، ومثل استحالة نقل أي معلومة بأسرع من سرعة الضوء. لقد بيّنت أبحاثهم، ومن خلال جوانب مختلفة لها، أن التخلي عن نموذج الجسيمات النقطية يؤدي إلى نقض أحد هذين المبدأين أو كليهما؛ وهكذا بدا، ولأمد طويل، استحالة صياغة نظرية كمومية ذات دلالة إن لم تكن قائمة على نموذج جسيمات أساسية نقطية. أما السمة المميزة حقاً لنظرية الأوتار فتكمن في ما أظهرته أبحاث دقيقة وصعبة امتدت على مدى عشرين عاماً، من أنها، رغم بعض مظاهرها غير المألوفة، **تلبّي** كافة المتطلبات الأساسية التي تقتضيها أية نظرية فيزيائية ذات دلالة ومعنى. وهي عدا ذلك، ومن خلال نمطها الاهتزازي الغرافيتوني، نظرية كمومية تتضمن قوة الثقالة فيما تتضمنه.

الجواب الأكثر دقة

يُظهر الجوابُ التقريبي السابق السببَ الرئيسي في نجاح نظرية الأوتار حيث أخفقت نظريات نموذج الجسيمات النقطية. لذلك فإن بوسع القارئ الانتقال مباشرة إلى الفصل التالي دون أن يفقد السياق المنطقي لتتالي العرض. لكننا، ولدقة الإيضاح، سنعرض ما وضعه بين أيدينا تطويرُ الأفكار الأساسية للنسبية الخاصة الذي عرضناه في الفصل الثاني من هذا الكتاب ممّا يلزمنا ويفيدنا في تقديم وصف أكثر دقة لكيفية قيام نظرية الأوتار بتهدئة الارتعاشات الكمومية العنيفة.

وسنعتمد، في تقديم الجواب الأكثر دقة، الفكرةَ الأساسية ذاتها التي قام عليها الجواب التقريبي، لكننا سنعبّر عنها بصورة مباشرة بدلالة الأوتار، وذلك من خلال إجراء مقارنة تفصيلية بعض الشيء ما بين مسبار الجسيم النقطي والمسبار الوتري؛ وسنرى كيف يسمح الامتداد المكاني للوتر بتشذيب ما كان مسبار الجسيم النقطي سيزوّدنا به من معلومات، وكيف نتخلص بالتالي ممّا يرافق المسافات الفائقة القصر من سلوك يُعدّ مسؤولاً عن المعضلة الأساسية التي تجابه الفيزياء المعاصرة. سنعتبر أولاً كيفية تأثر الجسيمات النقطية فيما بينها، حال وجودها؛ ثم كيفية استخدامها جسيمات سبر فيزيائية. إن التأثر الأهم هو ما يقع بين جسيمين نقطيين يتحركان في سياق تصادمي يتقاطع فيه مساراهما كما يبدو في الشكل5.6. فإن كان هذان الجسيمان كُرَتَي بلياردو اصطدما وانحرف كلّ واحد منهما عن مساره واتخذ له مساراً جديداً. وتبيّن نظرية الحقل الكمومي الجسيمية-النقطية أن الأمر ذاته يحدث تقريباً عند تصادم جسيمين أوليين، إذ يتباعد واحدهما عن الآخر ويتابع كل منهما مساره الجديد. إلاّ أن تفاصيل تبعثرهما وانحرافهما مختلفة بعض الشيء عمّا يحدث في حالة كُرَتَي البلياردو.



الشكل 5.6: *يصطدم جسيمان واحدهما بالآخر ويتغير مساراهما.*

لنتصور، بغية تبسيط التمثيل، أن الإلكترون هو أحد الجسيمين المتصادمين، وأن الآخر هو جسيمه المضاد، أي البوزيترون. يمكن لكلّ من أشكال المادة ومادتها المضادة أن يفني واحدهما الآخر، عند تصادمهما، في ومضةٍ من طاقة محضة مولّدَين فوتوناً[9]. ولتمييز مسار هذا الفوتون عن مسارَي الإلكترون والبوزيترون فقد رسمناه على نحو متعرّج على الشكل 6.6. يتحرك هذا الفوتون مسافة قصيرة يحرّر بعدها طاقته التي اكتسبها عند اندماج الإلكترون بالبوزيترون، مولّداً زوجاً جديداً منهما، ويتخذ كل منهما لنفسه مساراً جديداً كما يبدو على أقصى يمين الشكل 6.6. وهكذا، في النهاية، إذا ما انطلق جسيمان واحدهما باتجاه الآخر، فإنهما يتآثران، بسبب القوة الكهرطيسية القائمة بينهما، ويتخذان بعدها مسارين مختلفين عن مساريهما الأصليين، ويمثّل ذلك تتالٍ لسلسلة من الأحداث تحمل في ثناياها بعض التشابه مع ما ذكرناه عن تصادم كُرَتَي البلياردو.

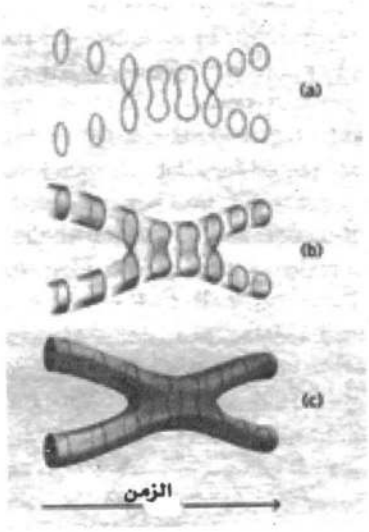


الشكل 6.6: *يمكن لجسيم وجسيمه المضاد، ووفقاً لنظرية الحقل الكمومي، أن يفني واحدهما الآخر بصورة مؤقتة مولّدَين فوتوناً لا يلبث أن يتخلّى عن طاقته ليعيد تشكيل زوج جديد من الجسيم وجسيمه المضاد، يسلكان مسارين مختلفين عن المسارين الأصليين.*

سوف نوجّه اهتمامنا إلى تفاصيل هذا التآثر –وبخاصة إلى النقطة التي يتفانى فيها الإلكترون والبوزيترون الابتدائيين مولّدَين فوتوناً. والنقطة الأهم هنا، كما سنرى لاحقاً، هي أن زمان ومكان هذا الإفناء محدّدان بدقة ودون أي لبس، كما يبدو في الشكل 6.6.

ونتساءل: كيف سيتغير هذا الوصف إذا ما وجدنا بعد تفحّص دقيق للجسيمات المتصادمة، التي نظنها جسيمات نقطية لا أبعاد لها، أنها ليست كذلك، بل هي في الحقيقة أوتار ذات بعد واحد. إن آلية التآثر تبقى ذاتها، إلاّ أن الأجسام المتصادمة غدت عرىً مهتزة كما يبدو على الشكل 7.6. وإذا ما توافقت اهتزازات هذه العرى وأنماطاً رنينية مناسبة، فإنها ستتوافق وإلكتروناً وبوزيترونا يتحركان في سياق تصادمي، كما هو مبيّن

على الشكل 6.6، ولن تظهر طبيعتهما الوترية إلاّ إذا قدرنا على تفحّصهما بأدنى سلالم المقاييس، والأصغر بما لا يُقدَّر ممّا تستطيع تقاناتنا المتاحة بلوغه؛ وستتصادم هاتان العروتان، كما في حالة الجسيمات النقطية، وتتفانيان مطلقتين ومضة من طاقة، أي فوتوناً، هو بدوره عروة وترية ذات نمط اهتزازي خاص. وهكذا يتآثر الوتران الواردان ويندمجان مولّدَين وتراً ثالثاً، كما يبدو على الشكل 7.6. والحال هنا شبيه بما عرضناه في حالة الجسيم النقطي، حيث ينتقل الوتر الثالث قليلاً من موقع تشكّله، ثم لا يلبث أن يحرّر ما اكتسبه من طاقة عند اندماج الوترين الأصليين، وذلك بتفككه وتوليد وترين جديدين يتخذان لهما مسارين جديدين. والحال هنا أيضاً شبيه تماماً بالتآثر الذي لاحظناه في حالة الجسيمات النقطية على الشكل 6.6، وذلك من أي منظور اعتمدناه، عدا أشد المناظير دقة ومجهرية.



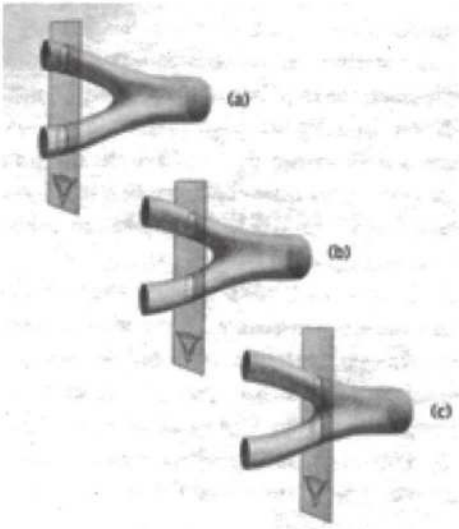
الشكل 7.6: *(a) – يمكن لوترين يسيران في سياق تصادمي أن يندمجا مولّدَين وتراً ثالثاً لا يلبث أن يولّد بدوره وترين جديدين يسلكان مسارين جديدين مختلفين عن المسارين الأوليين. (b)– تبدو الحالة ذاتها التي في (a)، مع التأكيد على حركة الأوتار. (c)– "صورة مستمرة لفترة زمنية" لوترين متآثرين يمسحان في حركتهما "صفحةعالَمٍ وترية" خاصة.*

ومع ذلك فإن هناك تبايناً أساسياً بين الوصفين. فما أكّدنا عليه من أن التآثر بين جسيمين نقطيين يحدث في نقطة محدّدة تماماً في الزمان والمكان، يتفق عليها سائر المراقبين أو الرصّاد، **لا يبقى** صحيحاً في حالة الأوتار. وسنبيّن ذلك من خلال الوصف الذي يعطيه كلّ من جورج وجين، المراقبَين المتحرّكَين واحدهما بالنسبة للآخر اللذين شاهدناهما في الفصل الثاني، للتآثر بين الوترين، وحيث لا يتفقان فيما بينهما على تحديد مكان وزمان التقاء الوترين للمرة الأولى.

تخيّل لذلك أنك ترى التآثر بين الوترين من خلال آلة تصوير يبقى مغلاقها مفتوحاً ممّا يتيح تسجيل العملية بكاملها على قطعة واحدة من فيلم التصوير[10]. تبدو نتيجة ذلك، وهي ما يُعرف باسم **صفحة عالَمٍ وترية** على الصورة (c) من الشكل 7.6. فإذا ما شرّحنا هذه الصفحة إلى شرائح متوازية -كما نشرّح رغيف الخبز- أمكننا استرجاع عملية التآثر بين الوترين لحظة بلحظة كما تبدو على الشكل 8.6، حيث نرى على الصورة (a) من هذا الشكل أن جورج قد ركّز اهتمامه على الوترين الواردين وأُرفق بناظره سطحٌ مستوٍ يمثّل شريحةً تُبدي، من منظوره، **كلّ ما يقع في المكان من أحداث في اللحظة الزمنية ذاتها**. وقد حذفنا من هذا المخطط بعداً مكانياً كما سبق وفعلنا غالباً في فصول سابقة بغية إيضاح الصورة، لأن هناك في الحقيقة مصفوفة ثلاثية الأبعاد من الأحداث تقع في اللحظة ذاتها من منظور أي مراقب. تعطي الصورتان (b) و(c) من الشكل 8.6 زوجاً من اللقطات في لحظات زمنية متعاقبة،أي "شرائح" متعاقبة من صفحة العالَم، مبيّنةً رؤية جورج للوترين إذ يقتربان واحدهما من الآخر. ومن الأهمية بمكان الإشارة إلى اللحظة الزمنية التي يرى فيها جورج الوترين وهما يلتقيان للمرة الأولى ويندمج واحدهما بالآخر مولّدَين وتراً ثالثاً، وذلك كما في الصورة (c) من الشكل المذكور.

لنرَ الآن كيف ترى جين، من منظورها، هذا التقارب. تقتضي الحركة النسبية لجورج وجين، كما بيّنا ذلك في الفصل الثاني، عدم توافقهما على ماهية الأحداث المتواقتة أي التي تقع في اللحظة الزمنية ذاتها، إذ ترى جين هذه الأحداث في مستو آخر كما يبدو على الشكل 9.6، حيث تتشطر صفحة العالَم الوترية التي في الصورة (c) من الشكل 7.6، إلى "شرائح" في مستويات تميل بزوايا متباينة بغية إظهار تطوّر عملية التآثر لحظة بلحظة، من منظور جين. نرى على الصورتين (b) و(c) زوجاً من اللقطات

في لحظتين زمنيتين متعاقبتين، بما في ذلك اللحظة التي ترى فيها جين الوترين الواردين يلتقيان للمرة الأولى مولّدَين وتراً ثالثاً.

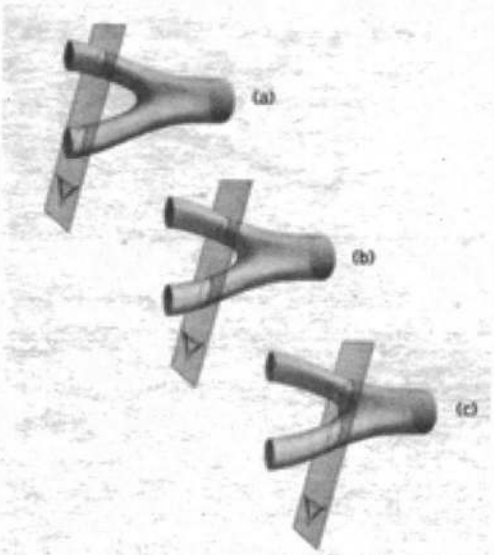


الشكل 8.6: *الوتران الواردان، كما يراهما جورج، في ثلاث لحظات متعاقبة؛ وهما يبدوان في الصورتين (a) و(b) يقتربان واحدهما من الآخر، في حين يبدوان في الصورة (c) وقد لاقى واحدهما الآخر لأول مرة.*

وبمقارنة الصورتين (c) من الشكلين 8.6 و9.6، كما يبدو في الشكل 10.6، نرى أن جورج وجين لا يتفقان على تحديد زمان ومكان التقاء الوترين الأصليين للمرة الأولى أي موقع تآثرهما. فالوتر، بامتداده المكاني، **يضمن عدم وجود لحظة زمنية وموقع مكاني، لا لبس في تحديدهما يتآثر فيهما الوتران للمرة الأولى**، وأن هذا الموقع وتلك اللحظة مرتبطان بوضع المراقب أو الراصد.

ولو أجرينا المناقشة ذاتها على حالة التآثر ما بين جسيمين نقطيين كما في الشكل 11.6 لخلصنا إلى النتيجة ذاتها التي سبق وذكرناها عن **وجود** نقطة في المكان ولحظة في الزمـــان محدّدتين تماماً يتآثر فيهما الجسيمان النقطيان. فالجسيمات النقطية تحشر كل تآثراتها في نقـطـــــة محـــدّدة؛ وإذا ما كـــانت الـــقـــوة الفاعلة في هذا التآثر قوة ثقالية – أي إذا ما كان الجسيم الرسول في هذا التآثر هو الغرافيتون بدل الفوتون– فإن

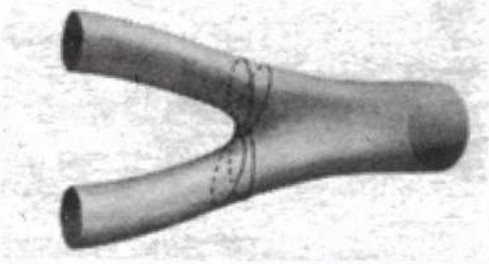
هذا الحشر الكامل لفعل القوة في نقطة واحدة يقود إلى نتائج مأساوية، كالأجوبة ذات القيم اللانهائية التي سبق وأشرنا إليها. أما الأوتار، فبخلاف ذلك؛ إنها "تمسح" أو "تشذّب" موقع التآثر. ولمّا كان المراقبون المختلفون يدركون أن التآثر يحدث في مواقع مختلفة ومتباينة على طول الجزء الأيسر من سطح الشكل 10.6، فإن ذلك يعني حقيقةً أن منطقة التآثر تمتد ما بين كل هذه المواقع،وتتبعثر بالتالي فيما بينها القوةُ التي كانت محشورةً في نقطة التآثر الواحدة. وهكذا يؤدي هذا التشذيب والتوزيع في حالة قوة الثقالة إلى تمديد وتخفيف خصائصها دون المجهرية إلى الحدّ الذي تعطي معه الحسابات المجراة إجابات محدّدة وواضحة وبقيم منتهية ومحدّدة، بدل الإجابات السابقة ذات القيم اللانهائية وغير المحدّدة.



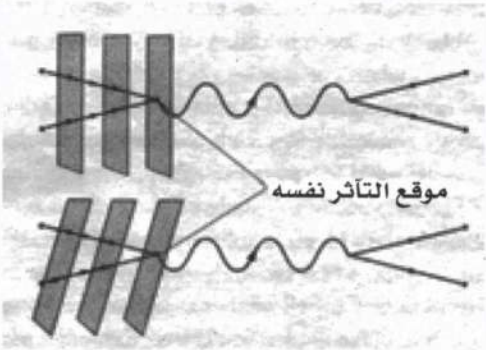
الشكل 9.6: *الوتران الواردان، كما تراهما جبين، في ثلاث لحظات متعاقبة؛ وهما يبدوان في الصورتين (a) و(b) يقتربان واحدهما من الآخر، في حين يبدوان في الصورة (c) وقد لاقى واحدهما الآخر لأول مرة.*

هذا هو جوهر الجواب الأدق لما تقوم به عملية المسح والتشذيب والذي بيّنا تفسيره التقريبي في الفقرة السابقة. ينجم عن هذا المسح صقلُ الارتعاشات الكمومية المكانية دون

المجهرية، وحيث تقلّ الأبعاد عن طول بلانك، فتتداخل بعضها مع بعض وتغدو صورتها ضبابية وغير واضحة المعالم.



الشكل 10.6: *لا يتفق جورج وجين على تحديد موقع تآثر الوترين.*



الشكل 11.6: *يتفق المراقبان اللذان يتحرك واحدهما بالنسبة للآخر على تحديد موقع ولحظة تآثر جسيمين نقطيين فيما بينهما.*

وكما يبدو العالَم ضبابياً ومشوشاً عندما يُنظر إليه بعدسات ضعيفة جداً أو قوية جداً، فإن التفاصيل الدقيقة لما هو دون طول بلانك، التي يمكن سبرها بمسبار جسيمي نقطي، يمسح بعضها بعضاً في نظرية الأوتار فيزول ضـــررها. إلاّ أنه بخلاف حالة الضبابية وسوء الرؤيا التي تسبّبها عدسات غير مناسبة، والتي يمكن تجنّبها بتصحيح العدسات، فإن نظرية الأوتار، إن كانت هي حقاً النظرية التي تصف الكون بأبعاده الأدنى، لا تملك عدسات تصحيح لتبئير التموجات والتراوحات المفترضة عند الأبعاد التي تقل عن طول بلانك، لذلك فإن التعارض القائم ما بين النسبية العامة وميكانيك الكم، الذي يغدو واضحاً فقط فيما دون سلّم بلانك من أبعاد، لا يعود موجوداً في كونٍ فيه حدٌّ أدنى للمسافات التي

يمكن الوصول إليها أو حتى القول بوجودها. هكذا هو الكون الذي تصفه نظرية الأوتار والذي تتوحّد فيه بصورة متناغمة القوانين الخاصة بالأشياء الكبيرة وتلك الخاصة بالأشياء الصغيرة، على نحو تغيب عنه الكارثة الافتراضية التي تنشأ في المقاييس ما دون المجهرية.

ما بعد الأوتار

ترجع خصوصية الأوتار لسببين، أولهما إمكانية وصفها بصورة متماسكة في إطار ميكانيك الكم، رغم امتدادها المكاني، وثانيهما وجود نمط، بين الأنماط الاهتزازية الرنينية، له خصائص الغرافيتون، ممّا يؤكّد أن قوة الثقالة تُعدّ مكوّناً أصيلاً في بناء نظرية الأوتار. تُظهر هذه النظرية أن المفهوم الاصطلاحي للجسيمات النقطية التي لا أبعاد لها هو تصوّر رياضيّاتي مثالي لا يتحقق في عالَمنا الواقعي؛ ونتساءل إن كان الأمر كذلك في حالة الخيط الوتري ذي البعد الواحد وذي السماكة اللامتناهية في صغرها، وهل هو أيضاً تصور رياضيّاتي مثالي؟ ألا يمكن أن يكون للأوتار بعض السماكة –كسطح الإطار الداخلي ثنائي البعد لعجلة دراجة، أو كالكعكة الدائرية الرقيقة الثلاثية البعد–؟. حاول هايزنبرغ وديراك وآخرون صياغة نظرية كمومية لشذرات ثلاثية الأبعاد، إلاّ أنهم واجهوا صعوبات بدت وكأنه لا يمكن تذليلها. كذلك حاول باحثون آخرون اتّبعوا سياق التفكير الطبيعي هذا في محاكماتهم، وكان الإحراج والفشل حليفَيهم.

لكن بصيصاً من أمل ما لبث أن لاح، على نحو غير متوقّع، عندما أدرك فيزيائيو نظرية الأوتار، في منتصف التسعينات من القرن العشرين، ومن خلال محاكمات ماكرة وغير مباشرة، أن لمثل هذه الأشياء الأساسية ذات الأبعاد الكثيرة دوراً أساسياً وحاسماً في جوهر نظرية الأوتار، وأيقنوا، تدريجياً، أن هذه النظرية **ليست** نظرية تتضمن أوتاراً فقط، حيث بيّن ويتن وآخرون سنة 1995، وخلال أعمالهم الحاسمة والأساسية في مرحلة الثورة الثانية لنظرية الأوتار، أن هذه الأخيرة تتضمن مكوّنات متنوّعة وذات أبعاد مختلفة، ثنائية الأبعاد شبيهة باسطوانة بلاستيكية أو ثلاثية الأبعاد شبيهة بقطيرات، أو حتى أشـياء أخرى أكثر غرابة. وسنتحدّث عن هذه الإنجازات الحديثة في الفصلين 12 و13، إلاّ أننا سنكتفي هنا بتتبّع المسار التاريخي للنظرية وسنستكشف الخصائص الجديدة المذهلة لكونٍ قوامه أوتار ذات بعد واحد بدلاً من الجسيمات النقطية التي لا أبعاد لها.

الفصل السابع

"الفائق" في الأوتار الفائقة

عندما تأكد نجاح بعثة إدنغتون في سنة 1919، في قياس ما تنبأ به أنشتاين عن انحراف ضوء النجوم بسبب انجذابه نحو الشمس، بعث إليه الفيزيائي الهولندي هندريك لورنتز برقيةً يزفّ فيها بشرى هذا النجاح؛ وعندما ذاع أمر هذه البرقية وما جاء فيها من تأكيدٍ على صحة النسبية، بادر طالبٌ يسأل أنشتاين عمّا كان سيظنه لو لم يتأكد لبعثة إدنغتون وجود ذلك الانحراف المتوقع لضوء النجوم. أجابه أنشتاين بما معناه أن النظرية **صحيحة** حتى لو لم يتأكد وجود ذلك الانحراف[1]. من غير ريب، لو فشلت تلك التجارب في تأكيد تنبؤات أنشتاين لكان ذلك دليلاً قوياً على عدم صحة نظريته، ولما غدت النسبية العامة ركناً أساسياً في الفيزياء المعاصرة. ولكن ما عناه أنشتاين بقوله هو أن النسبية العامة تصف الثقالة بأناقة ضمنية عميقة وبأفكار بسيطة، على فعاليتها، يحيث يصعب تصور إمكانية عدم تبنّي الطبيعة لها. فالنسبية العامة، في رأي أنشتاين، أجمل بكثير من أن تكون على خطأ.

لكن الاعتبارات الجمالية ليست الحكم الصالح لإقرار صحة نظرية ما أو عدم صحتها، لأن الحكم على النظريات يتم، في نهاية المطاف، من خلال أدائها عند مواجهة الحقائق والمعطيات التجريبية الجامدة والباردة. ومن الأهمية بمكان أن نؤكد هنا على أهمية تحديد معنى ودلالة هذا القول؛ فحالة النظرية، في مرحلة تكوينها وقبل اكتمالها، غالباً ما تحول بينها وبين تقييم وتفسير النتائج التجريبية التفصيلية، وعلى الفيزيائيين في هذه المرحلة، ومن خلال محاكمات عقلية، تحديد مسار أبحاثهم حول هذه النظرية المكتملة جزئياً فقط؛ يتم تحديد بعض هذه المسارات أو التوجّهات من خلال منطقية انسجامها أو تماسكها الداخلي، إذ لا يعقل أن تكون النظرية مجافيةً للعقل والمنطق، في حين يتم تحديد بعضها الآخر من خلال مقارنة مقتضياتها التجريبية الكيفيّة مع مقتضياتِ مساراتٍ وبنىً نظرية أخرى، لأننا لن نهتم بنظرية ما إن لم تكن قادرةً على وصف وتفسير أمورٍ نراها حولنا. إلاّ أن هناك حالات تتأثر فيها قرارات الفيزيائيين النظريين

باعتبارات جمالية تدفعهم نحو نظريات أنيقة وجذابة بمثل جمال العالَم حولنا؛ ومن المؤكد أن ليس هناك ما يضمن أن توصل هذه الاستراتيجية إلى الحقيقة، فقد تكون بنية الكون في أعماقها أقل أناقةً وجمالاً ممّا صورته لنا نتائج تجاربنا، أو قد نجد أن معايير الجمال التي اعتمدناها بحاجة إلى إعادة نظر أساسية عند تطبيقها على أوضاع أو مفاهيم غير مألوفة لدينا؛ ومع ذلك يتبنى الفيزيائيون هذه المعايير والاعتبارات الجمالية فيما يتّخذونه من قرارات وتوجّهات خاصةً بشأن نظريات المرحلة الحاضرة حيث تصف عوالمَ كونية يصعب سبرها تجريبياً (فالإنسان على ما يبدو، وفيما يتعلق بتصديق أمور لا دليل لديه على صحتها، أميل إلى تصديق ما يراه جذاباً منها)، وذلك لتجنّب المسارات الوعرة والطرق المسدودة التي تعترض مسيرة أبحاثهم، والتي كان يمكن أن يسيروا فيها لولا تبنّيهم تلك المعايير. وقد كانت هذه المقاربة مرشداً وموجّهاً فعّالاً وخلاّقاً.

وللتناظر في الاعتبارات الجمالية دور أساسي في الفيزياء كما في الفن؛ إلاّ أن للتناظر في الفيزياء، وعلى خلاف ما في الفن، معنى دقيقاً ومحدّداً جداً. وقد تمكن الفيزيائيون خلال العقود الأخيرة، وعبر تتبّعهم الدؤوب لمفهوم التناظر الدقيق حتى الوصول به إلى كامل نتائجه الرياضياتية، من وضع نظريات تجمع ما بين الجسيمات المادية والجسيمات الرسل على نحو أوثق بكثير ممّا كان يُظن ممكناً. تتمتع هذه النظريات التي توحّد المكوّنات المادية، عدا توحيدها قوى الطبيعة، بأعظم تناظر ممكن، لذلك دُعيت **بالنظريات الفائقة التناظر**. وتُعدّ نظرية الأوتار الفائقة، كما سنرى، منطلق هذا البناء التناظري الفائق وأوجه ومنتهاه.

طبيعة القانون الفيزيائي

تخيّل عالَماً تتغيّر فيه قوانين الفيزياء ما بين سنة وأخرى، أو أسبوع وآخر، أو حتى ما بين لحظة وأخرى، كما تتغيّر أذواق الموضة وصرعاتها. لن تشعر بالملل في مثل هذا العالَم في أية لحظة، إن لم تعطّل هذه التغيّرات مسيرة حياتك الأساسية، لأنك ستعيش في حالة انبهار دائم وستكون أفعالك البسيطة كلها مغامرات لا تتوقع نتائجها لأن التغيّرات العشوائية لتلك القوانين تحول بينك وبين توقّع أية نتائج مستقبلية تستفيد من خبرة الماضي وتجاربه.

يُعدّ مثل هذا العالَم كابوساً مرعباً للفيزيائيين الذين يعتمدون على نحو حاسم، كسواهم، على استقرار العالَم وثباته، حيث أن القوانين التي تصحّ اليوم كانت صحيحةً في الماضي وستصحّ كذلك في المستقبل (وإن كنا لم نبلغ درجة كافية من الذكاء لاكتشافها كلها). ونتساءل عمّا تعنيه كلمة " القانون" إذا كان سيتغيّر فجأة؟ لا نريد أن يُفهَم من قولنا هذا أن الكون ساكن جامد، فهو بكل تأكيد يتغير ما بين لحظة وأخرى وعبر طرق لا حصر لعددها، غير أن القوانين التي تحكم هذه التغيّرات ثابتة لا تتبدّل. ونتساءل إن كنا متأكّدين من صحة ذلك حقاً؟ والجواب على ذلك بالنفي. إلاّ أن نجاحنا في وصف مظاهر عديدة للكون عبر تاريخه من برهة قصيرة بعد الانفجار الأعظم وحتى يومنا هذا، يؤكّد أن لو كانت هذه القوانين تتغيّر فإن تغيّرها يكون بطيئاً جداً. لذلك فإن الفرضية الأبسط التي تنسجم مع كل ما نعرفه، تقول بثبات القوانين الفيزيائية.

تخيّل الآن عالَماً آخر تحكمه قوانين محدودة المدى، كما الثقافات المحلّية، أي قوانين تتغيّر من مكان لآخر وعلى نحو لا يمكن توقّعه، مقاومةً كلّ محاولة خارجية تُبذل لضبطها. سترى نفسك عند الانتقال من مكان ما في هذا العالَم إلى مكان آخر فيه أمام عدد من التجارب التي لا يمكن التنبّؤ بنتائجها (وذلك مثل مغامرات جوليفر*). أما الفيزيائي فيرى في ذلك كابوساً آخر، إذ يصعب عليه العيش مدركاً أن القوانين السائدة في بلدٍ ما – أو حتى في ولاية ما– قد لا تصحّ في بلد آخر،ولن يكون عندها للتجارب المجراة في مكان ما من العالَم أي تأثير على القوانين الفيزيائية السائدة في مكان آخر. وعلى الفيزيائيين عندها إعادة تجاربهم مرات ومرات وفي أماكن مختلفة لسبر قوانين الطبيعة المحلية القائمة في كلّ من هذه الأمكنة. إلا أن ما نعرفه يدل، لحسن الحظ، على خلاف ذلك. فقوانين الفيزياء واحدة في كل مكان، والتجارب التي تـــجرى في أي مـــن بقاع العالَم تخضع للتفسيرات الفيزيائية ذاتها. وبالإضافة لذلك فإن مقدرتنا على تفسير عدد كبير من المشاهدات الفلكية الملاحَظة في أرجاء الكون الشاسعة، باستخدام

---

*أشهر ما كتبه الإيرلندي جوناثان سويفت في القرن الثامن عشر، وهي رواية نقدية مؤلفة من أربعة كتب يصف كلٌ منها رحلةً للبطل جوليفر إلى عالَم غريب يقطنه مثلاً أقزامٌ أو عمالقةٌ أو أجناس غير اعتيادية. المترجم

المجموعة ذاتها من القوانين الفيزيائية، تدفعنا إلى الاعتقاد بأن هذه القوانين ذاتها **تصلح** في كل مكان. ولما كنا لم نبلغ الطرف الآخر من الكون فإننا لا نستطيع أن نستبعد نهائياً إمكانية سيادة فيزياء أخرى مختلفة تماماً فيه. لكن كلّ شيء يشير إلى خلاف ذلك.

مرةً أخرى، لا يعني هذا أن الكون يبدو ذاته – أو أن له الخصائص التفصيلية ذاتها– في مواقع مختلفة فيه. فعندما يقفز رائد فضاء على سطح القمر مستخدماً عصا البوغو النابضية*، فإنه يقدر على فعل أشياء كثيرة يتعذّر عليه القيام بمثلها على سطح الأرض؛ يرجع ذلك إلى صغر كتلة القمر بالنسبة لكتلة الأرض، فهو أخفّ منها، ولا يعني أبداً أن قانون الثقالة يختلف فيما بينهما: فقانون نيوتن، أو بالأحرى قانون أنشتاين في الثقالة، واحد على سطح الأرض وسطح القمر، ويرجع التباين فيما يجريه رائد الفضاء من تجارب عليهما إلى تغيّر في تفاصيل البيئة المحيطية وليس إلى تغيّر القانون الفيزيائي ذاته. يصف الفيزيائيون هاتين الخاصتين للقوانين الفيزيائية، وهما عدم تبعيتها للزمان والمكان تُستخدم فيهما، بخاصتي **تناظرٍ** للطبيعة؛ وهم يعنون بذلك أن الطبيعة تتعاطى مع كل لحظة من الزمان ومع كل موقع في المكان بصورة متطابقة – أي متناظرة– مؤكدة بذلك على صلاحية القوانين الفيزيائية ذاتها في كل من هذه المواقع وتلك اللحظات. ومثل هذه التناظرات مرضية جداً لأنها تؤكّد على أهمية النظام والانسجام في عمل الطبيعة، مثلها في ذلك مثل حال الفنون والموسيقا. وتُعدّ أناقة الظواهر المتعددة والمعقّدة والغنية التي تصدرعن مجموعة بسيطة من القوانين العالَمية والشاملة بعضاً مما يعنيه الفيزيائيون عندما يصفونها " بالجمال".

وقد سبق أن تعرفنا على تناظرات أخرى للطبيعة أثناء مناقشتنا نظريتي النسبية العامة والخاصة. فمبدأ النسبية، وهو عماد النسبية الخاصة، ينبئ بأن القوانين الفيزيائية كلها هي ذاتها بالنسبة لمراقبين مختلفين يتحركون فيما بينهم بحركة نسبية بسرعة ثابتة أياً كانت هذه الحركة. وهذا شكل من أشكال التناظر، لأن الطبيعة تتعامل مع جميع هؤلاء المراقبين على نحو متساوٍ –أو متناظر– معطيةً لكل واحد منهم الحق في اعتبار نفسه

---

*عصا طويلة يُثبّت نابضٌ في أسفلها وتوضع قاعدتان لوضع القدمين في أعلاها، فيمكن استعمالها عبر القفز للتنقل والحركة. المترجم

ساكناً في حين يتحرك الآخرون، دون أن يعني ذلك أن تتكون لديهم كلهم الملاحظات ذاتها، فهم **سيختلفون** في ذلك إلى حدّ كبير، كما رأينا سابقاً، وستكون حالهم مثل حال رائد الفضاء الذي يقفز على سطحي الأرض والقمر مستخدماً عصا البوغو النابضية، حيث أن ما يبدو من تباين فيما يجريه من تجارب مردّه تباين البيئة المحيطة به وليس تغيّراً في القانون الفيزيائي ذاته. فالتباين بين ما سيلاحظه هؤلاء المراقبون المختلفون، مردّه تباين البيئة المحيطة بهم بسبب حركتهم النسبية فيما بينهم، لأن **القوانين** ذاتها تتحكم بما يلاحظونه كلهم.

وسّع أنشتاين هذا التناظر عندما بيّن، من خلال مبدأ التكافؤ في النسبية العامة، أن القوانين الفيزيائية تبقى ذاتها أيضاً بالنسبة لهؤلاء المراقبين حتى وإن كانت حركتهم النسبية فيما بينهم متسارعة ومعقّدة. ونذكّر بأنه فعل ذلك وقال بأن لكلّ واحد منهم الحق في اعتبار نفسه ساكناً في حين يتحرك الآخـــرون، عـــندما ردّ القوة المؤثّرة إلى حقل ثقالي؛ ومع إقحام الثقالة فـــي الإطار النظري للمعالجة يتساوى كل المراقبين فيما بينهم. وعدا هذه الجاذبية الجمالية الذاتية في معالجة كلّ أشكال الحركة على نحو متساوٍ، فقد لعبت مبادئ التناظر دوراً أساسياً في النتائج المذهلة الخاصة بالثقالة التي توصّل إليها أنشتاين.

ونتساءل إن كانت هناك مبادئ تناظر أخرى خاصة بالمكان والزمان والحركة يجب على القوانين الفيزيائية مراعاتها؟ قد يدفعنا التفكير بذلك إلى النظر بإمكانية وجود تناظر آخر يتجلّى في عدم تأثر هذه القوانين **بزاوية** المراقبة أو باتجاهها؛ فلو أُجريت تجربة ما بجهاز ما، ثم أُدير هذا الجهاز باتجاه آخر وأُعيدت التجربة به، فإن القانون الفيزيائي ذاته سوف يُطبَّق على نتائجها. يُعرف هذا التناظر بالتناظر الدوراني، وهو يعني أن قوانين الفيزياء تبقى ذاتها أيضاً في **سائر الاتجاهات**. ولا تقلّ أهمية هذا المبدأ عن أهمية المبادئ السابقة.

ونتساءل من جديد إن كنا قد أغفلنا أي تناظرات أخرى ممكنة. قد يرى البعض إمكانية إدخال تناظرات المعيار العائدة للقوى غير الثقالية التي تحدّثنا عنها في الفصل الخامس، فهي تناظرات طبيعية بالتأكيد، إلاّ أنها من نوع مغاير وأكثر تجريداً ممّا ذكرناه

هنا وهو ما ينحصر في الزمان والمكان والحركة. ومع الاهتمام فقط بالتناظرات الخاصة في هذه المجالات فإننا لا نرى حقاً سوى ما ذكرناه من تناظرات. كما برهن الفيزيائيان سيدني كولمان وجيفري ماندولا عام 1967 على عدم إمكانية إدخال أية تناظرات أخرى خاصة بالزمان والمكان والحركة في أية نظرية يمكن أن تصاغ في عالَمنا. إلاّ أنه تبيّن لاحقاً، ومن خلال تفحّص دقيق وعميق لهذه المقولة من خلال إشراقات من الأفكار الخلاّقة تجلّت أمام ناظري بعض الفيزيائيين، وجود ثغرة فيها. ذلك أن كولمان وماندولا أغفلا تناظرات تعود لما يُعرف **بالسبين**.

السبين (التدويم)

يدور الإلكترون في الذرة حول نواتها كما تدور الكواكب حول الشمس. إلاّ أن للكواكب حركة أخرى تتجلّى في دورانها حول نفسها، في حين لا يملك الإلكترون – وهو جسيم نقطي– مثل هذه الحركة. ذلك أنه إذا ما دار جسم حول نفسه (أي حول محور يمر فيه) فإن نقاطه الواقعة على هذا المحور تبقى ثابتة لا تتحرك. فإذا كان الجسم جسيماً نقطياً انتفى وجود نقاط فيه تقع خارج محور مزعوم فيه يدور حوله، وانتفى بالتالي مفهوم جسيم نقطي يدور حول ذاته. وقد تهاوت هذه المحاكمة منذ عدد من السنين أمام مفاجأة أخرى من عجائب ميكانيك الكم.

كان قد تبيّن للفيزيائيَّين الهولنديَّين جورج أوهلنبك وصاموئيل غودسميت، في سنة 1925، أنه يمكن تفسير عدد كبير من النتائج المحيّرة المتعلّقة بخصائص الأشعة الضوئية التي تصدرها الذرات أو تمتصها، إذا ما افترضنا أن للإلكترون خصائص **مغنطيسية** ذاتية. وكان الفرنسي أندريه–ماري أمبير قد بيّن قبل ذلك بحوالي مائة سنة أن المغنطيسية تتولّد من حركة شحنة كهربائية، فتبنّى أوهلنبك وغودسميت هذه الفكرة ووجدا أن هناك نوعاً واحداً فقط من حركة الإلكترون يمكن أن يولّد الخصائص المغنطيسية التي تدلّ عليها المعطيات التجريبية، وهي حركة **دورانية تدويمية** أو حركة **لفّ ذاتي** وهي ما يُعرف **بالسبين**. لذلك فقد أعلنا، وخلافاً لأي توقّع تقليدي أن حركة

الإلكترون حول النواة تشبه حركة الأرض حول الشمس: فهو يدور حولها ويدور حول نفسه في الوقت ذاته.

ونتساءل إن كان هذان الباحثان قد عنيا بقولهما هذا المعنى الحرفي لكلمة التدويم أو اللف الذاتي؟ ونجيب على ذلك بالإيجاب والسلب. ذلك أن أعمالهما بيّنت وجود مفهوم كمومي لتدويم الإلكترون يشبه على نحو ما حركة اللف الذاتي المألوفة لدينا، إلاّ أنه ذو طبيعة كمومية في جوهره؛ وما هذه النتيجة إلاّ واحدة من خصائص العالَم المجهري التي تشبه بعض الأنماط التقليدية لكنها تحمل في طيّاتها معاني كمومية. تخيّل متزلّجاً على الجليد يدور حول نفسه. فهو إن ما ضمّ ذراعيه إلى جسمه تحرّك بسرعة، وإن ما أبعدهما تباطأت حركته. وستتوقف هذه الحركة عاجلاً أم آجلاً تبعاً لمقدار الزخم الذي كان بدايةً لحركة دورانه الذاتي. أما تدويم الإلكترون الذي تحدّث عنه أوهلنبك وغودسميت فعلى خلاف ذلك، إذ أثبتت أعمالهما، كما أكّدت ذلك دراسات لاحقة، أن كل إلكترون في الكون هو دوماً وأبداً **يدور حول نفسه بمعدّل ثابت لا يتبدّل**. فتدويم الإلكترون، أو سبينه، ليس حالة حركة عابرة مثل حركة ما نألف من أجسام تدور حول نفسها، بل هو صفة **ذاتية** له، مثلها في ذلك مثل كتلته وشحنته الكهربائية، وبدونها ما كان إلكتروناً.

وقد بيّن الفيزيائيون لاحقاً، رغم أن أعمالهم الأولى قد توجهت نحو الإلكترون، أن مفهوم التدويم–السبين ينطبق على حدّ سواء، وبسائر تفاصيله، على كلّ الجسيمات المادية التي تكوّن العائلات الثلاث المبيّنة في الجدول 1.1. **فلكلٍّ** من هذه الجسيمات (ولكل من جسيماتها المضادة) تدويم يساوي تدويم الإلكترون وهو " التدويم– $\frac{1}{2}$ " في لغة الفيزيائيين، حيث القيمة $\frac{1}{2}$ مقياس كمومي لسرعة دوران هذه الجسيمات حول نفسها[2]. كذلك بيّن الفيزيائيون أن للجسيمات الرسل التي تحمل القوى غير الثقالية –وهي الفوتونات وبوزونات المعيار الضعيف والغليّونات– تدويماً ذاتياً يساوي **مثلي** تدويم الجسيمات المادية، أي " التدويم–1".

كذلك بيّن الفيزيائيون بشأن الثقالة، وقبل نظرية الأوتار، أن على جسيم الغرافيتون الافتراضي، حتى يكون ناقلاً لقوة الثقالة، أن يكون ذا تدويم ذاتي يساوي مثلي تدويم الجسيمات الرسل التي تحمل القوى غير الثقالية، أي أن يكون له " التدويم-2".

يرتبط التدويم في نظرية الأوتار -مثل الكتلة وشحنات القوى- بنمط اهتزاز الوتر. وكحال الجسيمات النقطية، من الخطأ الظن بأن تدويم الوتر هو بسبب دورانه، بالمعنى الحرفي للكلمة، حول ذاته في المكان، إلاّ أن هذا الوصف يعطينا صورة تقريبية يمكن حفظها في أذهاننا. كما أن قيمة تدويم الغرافيتون التي توصّل إليها الفيزيائيون توضح سبب إعلان شيرك وشفارتز عام 1974 عن ضرورة التفكير بنظرية الأوتار كنظرية كمومية تتضمن قوة الثقالة، إذ أنهما توصّلا إلى ذلك بعد أن وجدا في الأوتار، **بالضرورة**، نمطاً اهتزازياً يتميّز **بكتلة معدومة و" بتدويم-2"**، وتمثّل هاتان الخاصتان الدمغة المميّزة للغرافيتون مما يدل على وجوده، وحيث يكون تكون الثقالة.

وبعد هذا العرض عن خلفية مفهوم التدويم، نعود إلى بيان الدور الذي يؤديه في إيضاح الثغرة فيما توصل إليه كولمان وماندولا عن التناظرات الممكنة في الطبيعة والتي تحدّثنا عنها في الفقرة السابقة.

التناظر الفائق والشركاء الفائقون*

يختلف مفهوم التدويم عن صورة الخذروف الذي يدور حول ذاته اختلافاً أساسياً في أمور عديدة تجد أصولها في ميكانيك الكم، رغم ما بينهما من تشابه ظاهري. وقد بيّن اكتشاف التدويم في سنة 1925 أن هناك حركة دورانية لا وجود لها في كون تتحكم فيه القوانين التقليدية فقط. يدفعنا ذلك إلى التساؤل عن إمكانية وجود تناظر آخر في القوانين الفيزيائية تقتضيه هذه الحركة الدورانية التدويمية، كما اقتضت الحركة الدورانية الاعتيادية وجود تناظر دوراني يقضي بتماثل قوانين الفيزياء أياً كان الاتجاه الذي تُرى منه. وقد أجاب الفيزيائيون بالإيجاب على ذلك في سنة 1971، وجاءت تفاصيل إجابتهم

---

*على الرغم من كون الشركاء جسيمات غير عاقلة فقد ارتأينا معاملتها لغوياً معاملة المذكر العاقل لحسن وقع ذلك على الأذن. المترجم

معقّدة إلى حدّ كبير، لذلك سنكتفي منها هنا بنتيجتها القائلة بأن التدويم يفرض **وجود تناظر واحد آخر في قوانين الفيزياء** ممكن رياضياتياً يُدعى **التناظر الفائق**[3].

لا يرتبط هذا التناظر بأي تبدّل بسيط وحدسي يطرأ على وضع المراقب لأن تغيرات المكان والزمان والتوجه الزاوي وسرعة الحركة تغطّي كل حالات وأوضاع المراقب المحتملة؛ لكن، وكما كان التدويم مثل " حركة دورانية بنكهة كمومية"، فإن التناظر الفائق يمكن أن يرتبط بتغيّر في وضع المراقب ضمن " الزمان والمكان بعد توسيع مفهومهما وإعطائه معنىً كمومياً". وهذه العبارات مهمة جداً وتهدف الأخيرة منها إلى إعطاء دلالة عن الموقع الذي يشغله التناظر الفائق في الإطار العريض لمبادئ التناظر[4]. ولأن فهم جوهر التناظر الفائق يبقى أمراً دقيقاً وحساساً فإننا سنركّز اهتمامنا الآن على أحد **مقتضياته** الأولية –فيما لو تضمنت القوانين الفيزيائية مبادئه– وهو أمر يمكن إدراكه.

أدرك الفيزيائيون منذ مطلع السبعينيات أن على الجسيمات – إن كان في كوننا تناظر فائق– أن تتواجد ضمن **أزواج** يختلف تدويما فردَيها بنصف واحدة. تدعى هذه الأزواج –سواء أكانت جسيمات نقطية (كما في النموذج المعياري)، أو عرى وترية صغيرة مهتزة– **بالشركاء الفائقين** (أو **بفائقي الشراكة**). ولما كان للجسيمات المادية " التدويم– $\frac{1}{2}$"، وللجسيمات الرسل "التدويم–1" فيبدو وكأن التناظر الفائق يوحّد ما بين الجسيمات المادية والجسيمات حاملة القوى، فهو بذلك مفهوم توحيدي مذهل. إلاّ أن المشاكل تكمن دوماً في التفاصيل.

فقد وجد الفيزيائيون بحلول منتصف السبعينيات وخلال محاولاتهم إدخال مفهوم التناظر الفائق في إطار النموذج المعياري أن **أيّاً** من الجسيمات المعروفة المبيّنة في الجدولين 1.1 و2.1 لا يمكن أن يكون شريكاً فائقاً لأي جسيم آخر منها؛ كما بيّنت تحليلاتهم النظرية التفصيلية أن لو تضمّن الكون مبادئ التناظر الفائق، إذن لكان لكل جسيم معروف شريكٌ فائقٌ لم يُكتشف بعد، يقُل تدويمه بمقدار نصف واحدة تدويم عن تدويم شريكه المعروف؛ أي أن هناك مثلاً شريكاً افتراضياً للإلكترون بتدويم–0. سُميّ هذا الجسيم الافتراضي **بالسلكترون**، (وهو اختصار لعبارة إلكترون فائق التناظر باللغة الإنكليزية). ويصحّ ذلك أيضاً على جسيمات مادية أخرى مثل **السنترينوهات** و**السكواركات**، التي تمثّل الشركاء الفائقين الافتراضيين للنترينوهات والكواركات؛ كما يصحّ على الجسيمات حاملة القوى إذ لها شركاء فائقون "بتدويم– $\frac{1}{2}$"، مثل **الفوتينوهات**

التي تمثّل الشركاء الفائقين للفوتونات، و**الغلوينوهات** وهي الشركاء الفائقون للغليّونات؛ كما توجد **الوينوهات** و**الزينوهات**، وهي الشركاء الفائقون للجسيمات W وZ على التوالي*.

وهكذا يبدو التناظر الفائق في نهاية المطاف وكأنه مفهوم غير عملي البتة لتطلّبه وجود عدد وافر من الجسيمات الإضافية، ممّا يضاعف عدد المكوّنات الأساسية المعروفة. ولما كان أي من هذه الجسيمات فائقة الشراكة لم يُكتشف بعد، فيحق لنا أن نشاطر العالِم رابي ملاحظتَه التي أوردناها في الفصل الأول عن اكتشاف الميون، وأن نذهب بها خطوةً إلى الأمام ونقول " بألاّ أحد أمر بوجود التناظر الفائق"، ونرفض بالتالي هذا المبدأ أو الشكل من أشكال التناظر. إلاّ أن كثيراً من الفيزيائيين يعتقدون بأن رفض هذا المبدأ لعدم توفّر مقتضياته أمر سابقٌ لأوانه، ويستندون في ذلك على ثلاثة أسباب. لنناقش هذه الأسباب.

الحجج المقنعة بوجود التناظر الفائق: قبل نظرية الأوتار

يُرى أول هذه الأسباب من خلال منظور جمالي، إذ يصعب القول بأن الطبيعة تراعي بعض مبادئ التناظر الممكنة رياضياتياً دون بعضها الآخر؛ قد يمكن القول بأن الطبيعة لا تستخدم مفهوم التناظر بكل أبعاده، إلاّ أن ذلك سيكون مدعاة للأسف، فهو كما لو أن باخ عمد إلى وضع مقطوعة موسيقية منسجمة (متناظرة) من عدد من الألحان المتشابكة والمتناغمة، ثم قام بحذف أحد ألحانها الأساسية.

أما السبب الثاني فيتجلى في مقدرة نظرية النموذج المعياري (التي تستبعد قوة الثقالة) على حلّ عدد من القضايا الشائكة ذات الصلة بمفاهيم كمومية إن تمتعت بالتناظر الفائق. تبدو المشكلة الأساسية في هذه النظرية، بغياب هذا التناظر، في مساهمة كل واحد من مكوّناتها الجسيمية في إحداث ظاهرة الهيجان الكمومي المجهري. وقد وجد

---

*تتضمن تسمية الشركاء الفائقين بصورة عامة إضافة حرف السين إلى بداية اسم جسيمات المادة المعروفة، وإضافة حرف الواو إلى نهاية اسم الجسيمات حاملة القوى المعروفة. المترجم

الفيزيائيون، في خضمّ هذا الهيجان، أن بعض العمليات التي تتضمن تآثرات جسيمية تظل متماسكة **فقط** إذا ما أمكن ضبط قيم بعض الوسطاء العددية في النموذج المعياري بدقة من مرتبة جزء واحد من مليون مليار جزء، وذلك بغية إبطال أكثر المفاعيل الكمومية أذىً وضرراً. تكافئ هذه الدقة عملية ضبط زاوية إطلاق رصاصة من بندقية قوية جداً بحيث تصيب هدفاً يقع على سطح القمر، بهامش خطأ لا يتجاوز سماكة الأميبيا وحيدة الخلية. ورغم إمكانية إجراء عملية ضبط بمثل هذه الدقة في النموذج المعياري، فإن الشك يساور الكثير من الفيزيائيين حول وثوقية نظرية هشّة البناء كهذه تكون عرضة للتهاوي إذا ما تغيّرت قيمة أحد الأرقام والتي تقوم عليها بمقدار ضئيل يقع في المرتبة الخامسة عشرة بعد الفاصلة[5].

يتبدّل هذا الوضع على نحو جذري إذا ما تضمّنت نظرية النموذج المعياري مبدأ التناظر الفائق حيث تميل **البوزونات** (وهي جسيمات تبلغ قيمة تدويمها عدداً صحيحاً، وسُمّيت كذلك تخليداً لذكرى الفيزيائي الهندي ساتييندرا بوز) و**الفرميونات** (وهي جسيمات تبلغ قيمة تدويمها نصف عدد صحيح فردي، وسمّيت كذلك تخليداً لذكرى الفيزيائي الإيطلي إنريكو فرمي) إلى توليد ارتعاشات كمومية يلغي بعضها بعضاً: فإن كانت ارتعاشات البوزون موجبة كانت ارتعاشات الفرميون سالبة والعكس بالعكس. ولما كان التناظر الفائق يقضي بوجود البوزونات والفرميونات في أزواج منها، فإن هذه الإلغاءات البالغة الأهمية تحدث منذ البداية ملطّفةً من آثار الهيجان الكمومي. وهكذا يتحرر **النموذج المعياري ذو التناظر الفائق**، أي النموذج المعياري وقد حُملت إليه جميع الجسيمات فائقة الشراكة، من اعتماده على ذلك الضبط الرقمي الهش وغير المريح الذي في النموذج المعياري الاعتيادي. ويعتقد كثير من الفيزيائين أن هذه النتيجة تضفي على التناظر الفائق جاذبية كبيرة رغم أن أمرها تقني بحت.

أما السبب الثالث، أو القطعة الثالثة من الإثبات الظرفي على وجود التناظر الفائق فيتأتى مما يُعرف **بالتوحيد الكبير**. ذلك أن إحدى السمات المميّزة لقوى الطبيعة الأربع تتجلى في التباينات الكبيرة الكائنة ما بين شداتها الذاتية. فشدة القوة الكهرطيسية أقل من واحد بالمائة من شدة القوة الشديدة، والقوة الضعيفة أوهى من الكهرطيسية بحوالي ألف مرة. أما قوة الثقالة فأقل بحوالي مائة مليون مليار مليار مليار (10^{-35}) مرة من شدة القوة الضعيفة. عمل غلاشو وعبد السلام ووَينبرغ على توحيد القوتين الكهرطيسية

والضعيفة، كما بيّنّا في الفصل الخامس، ونالوا على أعمالهم جائزة نوبل في الفيزياء. وقد تابع غلاشو وزميله هوارد جورجاي من جامعة هارفارد السير في هذا الطريق، فاقترحا في سنة 1974 إمكانيةَ وجود صلة مشابهة ما بين هاتين القوتين والقوة الشديدة. ويختلف عملهما هذا الخاص "بتوحيد كبير" لثلاث من قوى الطبيعة الأربع عن توحيد القوتين الكهرطيسية والضعيفة بأمر واحد أساسي. ففي حين تبلورت هاتان القوتان الأخيرتان (أي تمايزتا فبدتا مختلفتين بينما كانتا متّحدتين قبلاً) عندما انخفضت درجة حرارة الكون إلى حوالي مليون مليار درجة فوق الصفر المطلق (10^{15})، فقد بيّن جورجاي وغلاشو أن التوحد مع القوة الشديدة يبدو فقط في درجات حرارة أعلى من ذلك بحوالي عشرة ترليونات مرة، أي حوالي عشرة مليار مليار مليار (10^{28}) درجة فوق الصفر المطلق، وهو ما يكافئ، من وجهة نظر طاقية، كتلةً أكبر من كتلة البروتون بحوالي مليون مليار مرة، أي أقل من كتلة بلانك بأربع مراتب من الكبر. وهكذا سار جورجاي وغلاشو بالفيزياء النظرية نحو عالَم من الطاقة تفوق طاقته بعدة مراتبَ طاقةَ ما جرؤ أيّ ممّن سبقهم على السير فيه.

كما أن أعمالاً لاحقةً، قام بها سنة 1974 في هارفرد كل من جورجاي وهيلين كوين ووَينبرغ، جاءت لتؤكّد فكرة التوحد الكامن أو المحتمل للقوى غير الثقالية في إطار عملية التوحد الكبير، وحتى أنها أظهرتها على نحو أكثر وضوحاً. وسنعرض بإيجاز هذه الأعمال بسبب دورها الهام في عملية توحيد القوى وفي تقييم صلة التناظر الفائق بعالَمنا الذي نعيش فيه.

من سمات الفيزياء التقليدية أن شدة التجاذب الكهربائي ما بين جسيمين يحملان شحنتين كهربائيتين متعاكستين، وكذلك شدة التجاذب الثقالي ما بين جسيمين ماديين، تزداد مع تناقص المسافة الفاصلة بينهما. وقد تُفاجأ إذ ترى في الفيزياء الكمومية أيضاً مثل هذا التأثير على شدة القوة، ونتساءل لم كان لميكانيك الكم أن يلعب مثل هذا الدور؟ ومرة أخرى يأتينا الجواب من خلال التراوحات الكمومية. فعندما نتفحص حقل القوة الكهربائية لإلكترون ما مثلاً فإننا نراه من خلال سديم يعجّ بهيجان قوامه عمليات خلق وإفناء مؤقتة لأزواج من الجسيمات ومضاداتها تحدث حوله. وقد تبيّن للفيزيائيين منذ بعض الوقت أن هذا السديم الهائج من تراوحات مجهرية كمومية يحجب الشدة الكاملة

لحقل قوة الإلكترون كما يحجب الضباب الخفيف ضوء المنارة بصورة جزئية. وكلما اقتربنا من الإلكترون ازداد توغلنا أكثر فأكثر في هذا السديم الحاجب وأصبحنا بالتالي أقل عرضة للتأثر به ممّا يعني أن شدة الحقل الكهربائي للإلكترون **ستزداد** إذا ما اقتربنا منه.

يميّز الفيزيائيون بين هذا التزايد الكمومي للشدة مع الاقتراب من الإلكترون، وتزايدها في الفيزياء التقليدية بقولهم إن الشدة **الذاتية** للقوة الكهرطيسية تزداد مع قصر سلم المسافة. فشدة الحقل الكهرطيسي تزداد ليس فقط بسبب الاقتراب من الإلكترون بل وأيضاً بسبب زيادة القسم المرئي من حقله الكهربائي الذاتي. وما ذكرناه عن الإلكترون يصح أيضاً على كل الجسيمات المشحونة كهربائياً ونوجزه بقولنا إن التأثيرات الكمومية تقود إلى زيادة شدة القوة الكهرطيسية عندما نتفحصها بسلم مسافة أقصر.

أما القوى الأخرى التي في النموذج المعياري فقد درسها في سنة 1973 كل من غروس وفرانك ويلجيك في برنستون، وديفيد بوليتزر في هارفارد على نحو مستقل عنهما، وخلصوا إلى نتيجة مفاجئة مفادها أن قيمة الهيجان الكمومي الذي تحدثه عملية الخلق والإفناء الجسيمية **تضخّم** شدّتي القوتين الشديدة والضعيفة*. يعني ذلك أن تفحّص حقلي هاتين القوتين، من خلال تزايد التوغل في سديمهما الهائج، وعبر مسافات أقصر يخفف من تأثير تضخمهما. وهكذا **تضعف** شدتا هاتين القوتين عند سبرهما على مسافات أقصر.

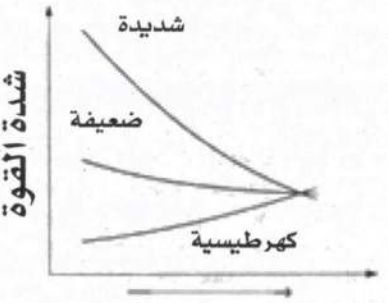
تبنّى جورجاي وكوين ووَينبرغ هذا الإنجاز ومضوا به إلى نهاية مذهلة إذ بيّنوا أن شدّات القوى غير الثقالية الثلاث تتقاد **لتتوحد معاً** عند أخذ تأثيرات الهيجان الكمومي بالاعتبار. ولما كانت شدات هذه القوى متباينة فيما بينها في المقاييس التي يمكننا بلوغها بتقاناتنا المتاحة، فقد أرجعوا مردّ هذا التباين إلى اختلاف التأثير الذي يلحقه سديم الفعالية الكمومية المجهرية بكل واحدة من هذه القوى. وبيّنت حساباتهم أن لو تمّ اختراق هذا السديم وتفحّص هذه القوى من خلال تأثيرها عند مسافات من مرتبة جزء من مائة مليار

---

*حاز هؤلاء العلماء الثلاثة على جائزة نوبل عام 2004 عن عملهم المذكور هنا. المترجم

مليار مليار (10^{-29}) جزء من السنتمتر (أي ما هو أكبر بعشرة آلاف مرة فقط من طول بلانك)، فإن شدات هذه القوى غير الثقالية الثلاث تبدو متساويةً فيما بينها.

ومع أن الطاقة الهائلة اللازمة لتحسّس مسافات صغيرة جداً كهذه بعيدة المنال في عالَم تجاربنا المألوفة، فإنها كانت موجودة في بداية الكون الحار والمضطرب، عندما لم يكن عمره يتعدّى جزءاً من ألف تريليون تريليون تريليون (10^{-39}) جزء من الثانية، وكانت درجة حرارته من مرتبة (10^{28}) كالفن كما سبق وذكرنا. وبمثل ما تنصهر معاً مكوّناتٌ متباينة من معدن وخشب وحجر وفلز وسواها لتكوّنَ بلازما منتظمة ومتجانسة، إذا ما سُخِّنت لدرجات حرارة بالغة الارتفاع، فقد اقترحت الأعمال النظرية المذكورة أعلاه أن القوى الشديدة والضعيفة والكهرطيسية تندمج معاً في قوة واحدة كبيرة عند درجات الحرارة العالية هذه. ويبدو ذلك على الشكل 1.7 [6].

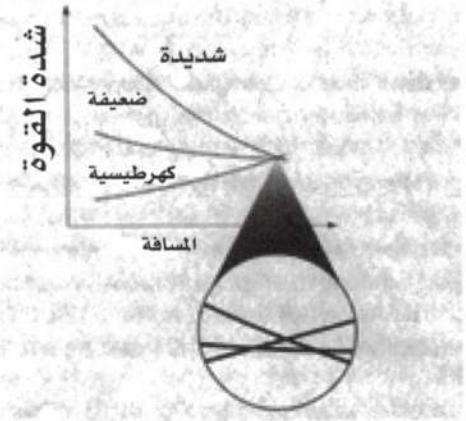


الشكل 1.7: *شدات القوى غير الثقالية الثلاث ممثَّلة بدلالة مسافة تأثيرها، أو بدلالة طاقاتها المُتضمَّنة (يشير اتجاه المحور الأفقي إلى تناقص المسافة أو، بشكل مكافئ، إلى تزايد الطاقة).*

ورغم أننا لا نملك التقانات اللازمة لسبر مسافات صغيرة كهذه أو لتحقيق درجات حرارة هائلة الارتفاع كالتي ذكرناها، فقد تمكن الفيزيائيون التجريبيون، ومنذ عام 1974 ، من تحسين عمليات قياس شدات القوى الثلاث ضمن الشروط المتاحة لنا؛ تعدّ نتائج قياساتهم، التي تمثلها نقاط بدايات منحنيات شدات هذه القوى على الشكل 1.7، معطيات الدخل المستخدَمة لإجراء التقدير الاستقرائي أو الاستيفاء الكمومي من قبل جورجاي وكوين ووَينبرغ. وفي سنة 1991 أعاد أوغو أمالدي في مخابر السيرن ووِيم دوبور

وهرمان فورشتيناو من جامعة كارلسروه في ألمانيا إجراء هذا الاستيفاء مستفيدين من التحسينات التي لحقت بطرق إجراء القياسات التجريبية، وبيّنوا أمرين بالغَي الأهمية، أولهما أن شدات القوى غير الثقالية الثلاث **تقترب كثيراً فيما بينها حتى لتتوحّد تقريباً، ولكن ليس تماماً** عند سلالم مسافات صغيرة جداً (توافقها طاقات عالية ودرجات حرارة مرتفعة)، كما هو مبيّن على الشكل 2.7، وثانيهما **زوال** هذا التباين الضئيل جداً (ولكن الذي لا يمكن إغفاله) إذا ما أدخلنا التناظر الفائق بالاعتبار، لأن الجسيمات الجديدة الفائقة الشراكة التي يقتضيها هذا التناظر تساهم بدورها في خلق ارتعاشات كمومية إضافية تعمل على تقريب شدات القوى بعضها من بعض.

يصعب على كثير من الفيزيائيين الاعتقاد بأن الطبيعة تختار قواها على نحو تتساوى فيه شداتها بصورة **تقريبية** فقط على المستوى المجهري، إذ سيبدو الأمر وكأنك ترتّب قطع لعبة أحجية الصور المقطّعة (البازل) وقد لحق تشويه طفيف بالقطعة الأخيرة منها، بحيث يتعذّر عليها شغل موقعها بدقّة. ويأتي التناظر الفائق ليعيد صقل هذه القطعة فيزيل تشويهها ويسهل وضعها في مكانها المناسب.



الشكل 2.7: *تظهر القياسات التجريبية الدقيقة لشدات القوى الثلاث، أن هذه القوى تلتقي على نحو تقريبي، بغياب التناظر الفائق.*

يتجلى مظهر آخر لهذا الإدراك في الإجابة عن سبب عدم اكتشاف أي من الجسيمات الفائقة الشراكة، إذ أظهرت الحسابات التي بيّنت تقارب شدات القوى الثلاث، كما أظهرت

اعتبارات أخرى قام بدراستها عدد من الفيزيائيين، أن هذه الجسيمات الفائقة الشراكة أثقل بكثير من الجسيمات المعروفة؛وهي قد تكون أثقل من البروتون بألف مرة تقريباً إن لم يكن بأكثر، إذ يتعذّر تقييم ذلك على نحو دقيق ومحدّد. وبما أن أقوى المسرّعات المعروفة وأكثرها تطوراً لا تستطيع تحقيق الطاقات المكافئة لمثل هذه الكتل، فقد يكون ذلك سبب عدم تمكننا من اكتشاف هذه الجسيمات الشريكة حتى الآن. وسنعود في الفصل التاسع إلى مناقشة الوضع التجريبي القائم وإمكانات تطويره في المستقبل القريب، فقد نتمكن من معرفة إن كان التناظر الفائق هو حقاً من خصائص عالَمنا.

وأخيراً فمن المؤكد أن ما عرضناه من حجج تدعم وجود التناظر الفائق –أو لا تستبعد وجوده على الأقل– لا يخلو من هنات أو من نقاط ضعف. فالتناظر الفائق قد ارتقى بنظرياتنا إلى أعلى أشكالها التناظرية. لكن، من قال إن كوننا مهتم ببلوغ هذا الشكل التناظري الأسمى الممكن رياضياتياً؟ كما يمكن الرد على تلك النقطة التقنية الهامة القائلة بأن التناظر الفائق قد حرّرنا من مهمة دقيقة وخاصة تتجلّى بضبط القيم العددية للوسطاء على نحو يجنّبنا مشاكل كمومية دقيقة، وذلك بالقول إن النظرية الحقيقية قد تسير فعلاً على الحدّ الدقيق الفاصل بين التماسك الذاتي والتدمير الذاتي. أما القول بأن التناظر الفائق يعدّل الشدّات الذاتية للقوى غير الثقالية عند مقاييس المسافات القصيرة جداً وعلى نحو يتيح لها الاندماج فيما بينها في قوة كبيرة موحّدة، فيُردّ عليه بالسؤال عمّن قال إن الطبيعة تتطلب تساوي شدّات هذه القوى على المستوى المجهري؛ كما يمكننا أخيراً تفسير عدم اكتشاف أي من الجسيمات الفائقة الشراكة بالقول بعدم وجودها أصلاً في عالَمنا بسبب عدم وجود التناظر الفائق فيه.

لا يملك أحد المقدرة على دحض كل هذه الآراء؛ لكن الحجج الداعمة للقول بوجود التناظر الفائق تزداد قوة إذا ما نظرنا إلى دوره في نظرية الأوتار.

التناظر الفائق في نظرية الأوتار

تضمّنت نظرية الأوتار الأصلية التي برزت من خلال أعمال فينيزيانو في أواخر الستينيات، كلَّ أشكال التناظرات التي تحدّثنا عنها في بداية هذا الفصل، لكنها لم تتضمن

التناظر الفائق (الذي لم يكن قد اكتُشف في حينه). دُعيت هذه النظرية باسم **نظرية الأوتار البوزونية**، حيث تشير صفة **البوزونية** إلى أن كافة أنماط الوتر البوزوني الاهتزازية ذات تدويمات قيمها أعداد صحيحة، دون أن يكون فيها أي نمط فرميوني ذي تدويم بقيمة تختلف عن العدد الصحيح بمقدار نصف واحدة. أدى ذلك إلى قيام مشكلتين.

تبدو أولاهما في أن على نظرية الأوتار، إذا ما أريدَ منها وصف كلّ أنواع القوى والمادة، أن تتضمّن على نحوٍ ما أنماطاً اهتزازية فرميونية، لأن للجسيمات المادية المعروفة تدويماً من النوع "$\frac{1}{2}$". أما المشكلة الثانية، وهي أكثر مدعاة للقلق، فتتعلّق بوجود نمط اهتزازي في نظرية الأوتار البوزونية، يُعرف **بالتاكيون**، ذي كتلة **سالبة** (أو بالأحرى ذي مربع كتلة سالب). وقد درس الفيزيائيون، وقبل نظرية الأوتار، إمكانية وجود مثل هذه الجسيمات في عالَمنا، إلى جانب الجسيمات المألوفة ذات الكتلة الموجبة، وخلصت جهودهم إلى القول بصعوبة، إن لم يكن باستحالة، وجود نظرية منطقية ذات معنى تبيّن إمكانية ذلك. كما بذل الفيزيائيون جهوداً مماثلة في إطار نظرية الأوتار لإدراك المراد من هذه التنبّؤات الغريبة عن أنماط الاهتزاز التاكيونية، وكانت أيضاً بلا طائل. وقد أظهر كل ذلك أن نظرية الأوتار، على كونها نظرية ممتعة ومثيرة للاهتمام، إلاّ أنها تفتقد شيئاً أساسياً في كيانها.

وفي سنة 1971 تصدى بيير راموند من جامعة فلوريدا لتحدّي إعادة النظر بنظرية الأوتار البوزونية بغية تضمينها أنماطاً فرميونية اهتزازية، فتولّدت من خلال أعماله والأعمال اللاحقة لشفارتز وأندريه نوفو صورة جديدة لهذه النظرية. وقد عرت الدهشة الجميع لما لاحظوه من أن الأنماط البوزونية والأنماط الفرميونية تأتي أزواجاً في هذه النظرية الجديدة: فلكل نمط بوزوني نمط فرميوني والعكس بالعكس. ومع حلول عام 1977 أضاءت الإشراقات الملهمة لفردينانذو غليوتزي من جامعة تورينو وشيرك وديفيد أوليف من الإمبريال كوليج، هذا التزاوج وسمحت بإيضاحه: فنظرية الأوتار الجديدة تتمتع بالتناظر الفائق؛ وما تزاوج الأنماط البوزونية والفرميونية سوى انعكاس لهذه السمة التناظرية العالية. هكذا وُلدت نظرية الأوتار ذات التناظر الفائق – أو نظرية الأوتار الفائقة–. وكان لأعمال غليوتزي وشيرك وأوليف نتيجة حاسمة أخرى، فقد بيّنوا أن

نظرية الأوتار الفائقة لا تأبه بالاهتزازات التاكيونية المزعجة التي في نظرية الأوتار البوزونية. وهكذا بدأت قطع الأحجية الوترية تأخذ مواقعها الصحيحة في صورتها المتكاملة.

إلاّ أن الأثر الرئيسي الأول لأعمال راموند ونوفو وشفارتز كان خارج إطار نظرية الأوتار. فقد تبيّن للفيزيائيَّين جوليوس ويس وبرونو زومينو في سنة 1973، إمكانية تطبيق التناظر الفائق – أي التناظر الجديد المنبثق عن إعادة صياغة نظرية الأوتار– حتى على نظريات قائمة على مفهوم الجسيمات النقطية. وسرعان ما خطوا خطوات بالغة الأهمية في اتجاه تضمين هذا التناظر الجديد في إطار نظرية الحقل الكمومي الجسيمية النقطية. ولما كانت نظرية الحقل الكمومي محط أنظار مجتمع فيزيائيي الجسيمات في ذلك الحين –في حين كانت نظرية الأوتار تبتعد شيئاً فشيئاً عن اهتماماتهم– فقد كانت إشراقات ويس وزومينو سبب قيام عدد كبير من الأبحاث حول ما بدأ يُعرف **بنظرية الحقل الكمومي الفائق التناظر**. وما النموذج المعياري الفائق التناظر الذي تحدّثنا عنه في الفقرة السابقة إلاّ واحداً من الإنجازات النظرية التي توّجت هذه المساعي. وهكذا فإن هذه النظرية الجسيمية النقطية تدين أيضاً، عبر تطوّرات وتحوّلات غير متوقّعة، بالكثير لنظرية الأوتار.

ومع انطلاق نظرية الأوتار الفائقة في منتصف الثمانينيات، عاد التناظر الفائق إلى بيئته التي اكتُشف فيها وحيث تذهب دعوى وجوده إلى ما هو أبعد بكثير ممّا عرضناه في الفقرة السابقة. فنظرية الأوتار هي السبيل الوحيد المعروف لدمج النسبية العامة بميكانيك الكم؛ ولكن نسختها الفائقة التناظر وحدها هي التي تتحاشى أمر التاكيونات المقلقة، وتتضمن أنماطاً اهتزازية فرميونية تتسع لسائر أنواع الجسيمات المادية التي تشكّل العالَم حولنا. وهكذا يسير التناظر الفائق جنباً إلى جنب مع اقتراح نظرية الأوتار بأنها نظرية كمومية للثقالة وكذلك مع ادّعائها الكبير بتوحيد كلّ أنواع القوى والمادة. ويتوقّع الفيزيائيون أن يكون التناظر الفائق صحيحاً إن كانت نظرية الأوتار صحيحة.

ومع ذلك فقد ظل في نظرية الأوتار، وحتى منتصف التسعينيات، مظهر يدعو للقلق.

الارتباك الفائق الناجم عن الوفرة

قد يذكر البعض قصة السيدة أميليا إيرهارت* ولغز اختفائها. تصوّر لو جاءك أحد يخبرك أنه استطاع حلّ ذلك اللغز. ربما ارتبت في بداية الأمر؛ لكنك وأنت تراه يعرض لك الحجج المقنعة على دعواه ويدعمها بالوثائق، فقد تستمع إليه، وربما قد تقتنع بما يقول. لكن ماذا لو عاد إليك ثانية يقدّم تفسيراً آخر لحلّ ذلك اللغز. ستستمع إليه بنفاد صبر وستتفاجأ عندما ترى أن ما يعرضه هو أيضاً مقنع ومنطقي وموثّق كسابقه. وما إن ينتهي حتى يعرض عليك تفسيراً ثالثاً ورابعاً وخامساً مقنعة كلها وموثّقة كلها ومختلفة كلها واحدها عن الآخر. من المؤكّد أنك ستجد نفسك في نهاية المطاف كما كنت في بدايته، على غير دراية بالمصير الحقيقي الذي انتهت إليه أميليا إيرهارت. إن كثرة التفسيرات، في مسرح تفسير الأحداث، لا تعني معرفة أكبر بل أقل.

ورغم ما أثارته نظرية الأوتار من حماس، فقد بدت مع مطلع عام 1985 مثلَ خبيرنا الذي يدّعي معرفةَ مصير إيرهارت، إذ رأى الفيزيائيون أن التناظر الفائق، الذي غدا عنصراً أساسياً في بناء هذه النظرية، يمكن أن يُدخَل فيها بخمس صور مختلفة، وليس بصورة واحدة، تحقّق كل واحدة منها تزاوجاً بين الأنماط الاهتزازية البوزونية والفرميونية. إلاّ أن تفاصيل هذا التزاوج تختلف ما بين نظرية وأخرى كما تختلف أيضاً سمات متعدّدة أخرى. ورغم أنه ليس لتسمية نظرية الأوتار الفائقة التناظر هذه أية أهمية، فقد دُعيت صورها الخمس باسم **نظرية النوع (I)**، **ونظرية النوع (IIA)**، **ونظرية النوع (IIB)**، **ونظرية النوع المتغاير O(32)** (وتُلفظ بالإنكليزية أو- ثيرتي تو)، **ونظرية النوع المتغاير $E_8 \times E_8$** (وتُلفظ بالإنكليزية إي- إيت تايمز إي- إيت). تصحّ هذه الصور كلها لعرض سمات نظرية الأوتار التي تحدّثنا عنها حتى الآن، إلاّ أنها تختلف فيما بينها بتفاصيلها الدقيقة. كان وجود خمس صور أو نسخ مختلفة لما يُفترض به أن يكون نظرية كل شيء – وربما النظرية النهائية الموحّدة- أمراً محرجاً

---

*هي أول امرأة تطير وحيدة فوق المحيط الأطلسي. وقد اختفت في ظروف غامضة، لم يُكشف عنها، أثناء محاولتها الطيران حول العالَم في سنة 1937. المترجم

لنظريي الأوتار، مثلما كانت التفسيرات الخمسة التي عُرضت لحلّ لغز اختفاء أميليا إيرهارت. ولما كان هناك تفسير واحد صحيح لما حدث لها (سواء إن اُكتشف ذات يوم أم لم يُكتشف)، فإن هناك تفسيراً واحداً فقط لفهم آلية عمل الكون بأدقّ تفاصيلها.

قد يكون الحل، مع وجود الصور الخمس المختلفة لهذه النظرية، استبعاد أربعٍ منها من خلال التجربة وإبقاء واحدة صحيحة ومناسبة. لكن ذلك لا يمنع من التساؤل عن سبب وجود الصور أو النظريات الأربع الأخرى بدايةً، والتساؤل كذلك مع ويتن بعباراته الظريفة الساخرة: "إن كانت واحدة فقط من هذه النظريات الخمس تصف عالَمنا، فمن يعيش في العوالم الأخرى التي تصفها النظريات الأربع الأخرى؟"[7]. يكمن حلم الفيزيائيين في أن البحث عن الجواب النهائي سوف يقود إلى استنتاج واحد مطلق لا يمكن تجنّبه. سيكون الأمر مثالياً إذا ما أخذت النظرية النهائية (سواء أكانت نظريةَ الأوتار أو سواها) شكلَها الذي لا سبيل إلاّ إليه،إذ ليست هناك، بكل بساطة،إمكانية سواه.

ويعتقد الكثيرون أن لو توصّلنا إلى نظرية منطقية واحدة تتضمّن المقوّمات الأساسية لنظريتي النسبية وميكانيك الكم، فإننا نكون قد وصلنا إلى فهم سبب تمتّع الكون بما له من خصائص. وسيكون ذلك فردوس النظرية الموحّدة[8].

وقد سارت الأبحاث الحديثة بنظرية الأوتار، كما سنرى في الفصل 12، خطوةً عملاقة في هذا الاتجاه المثالي الموحّد عبر ما أظهرته من أن النظريات الخمس المختلفة ليست في الحقيقة سوى صوراً أو مظاهرَ مختلفة تصف **نظرية واحدةً شاملة**، أي أن لنظرية الأوتار الفائقة **أصلاً** واحداً.

وهكذا تأخذ الأشياء مواقعها المناسبة؛ لكن التوحيد من خلال نظرية الأوتار، وكما سنرى في الفصل المقبل، يقتضي ابتعاداً هاماً آخر عن معارفنا التقليدية.

الفصل الثامن

أبعاد أكثر ممّا تراه العين

تمكن أنشتاين في القرن الماضي، من خلال نظريتي النسبية الخاصة والعامة من إيجاد حلّ لاثنين من أكثر التناقضات العلمية الرئيسية؛ ورغم أن المسائل الأولية التي وجهته في عمله وحثّته عليه لم تكن تتوقع ما توصّل إليه، فإن كلّاً من هاتين النظريتين قلبت مفهومنا للزمان والمكان رأساً على عقب. أما نظرية الأوتار فقادرة، على ما يبدو، على إيجاد حلّ للتناقض العلمي الرئيسي الثالث الذي ميّز ذلك القرن، وعلى نحو كان أنشتاين ذاته سيراه لافتاً للنظر، ذلك أنها اقتضت إخضاع مفهومنا للمكان والزمان إلى مراجعة جذرية أخرى، هزّت بها أسس الفيزياء الحديثة ودفعتها للتخلي عن مفاهيم أساسية كان يُظن أنها غير قابلة للنقاش، وهي عدد أبعاد عالَمنا.

وهم ما هو مألوف

تتفاعل التجربة مع الأفكار النظرية فترشّدها، وقد تذهب أبعد من ذلك فتحدّد الإطار الذي نحلّل من خلاله ما نلاحظه ونفسره. إن طفلاً متوحشاً ينشأ في أحضان قطيع من الذئاب يرى العالَم ويفسّر ظواهره من منظور يختلف جذرياً عن منظورنا؛ وإذا ما قصرنا ملاحظتنا على بعض ما نراه في حياتنا اليومية، لقلنا إن المقارنة بين سلوك أناس نشؤوا في أجواء ثقافية متباينة تؤكّد على أهمية دور التجربة في تشكيل قناعاتنا وتحديد وجهات نظرنا.

مع ذلك، هناك شؤون نتعرض لها **جميعنا** ونحسّ بها وغالباً ما تكون آراؤنا حولها وتوقعاتنا لما ينجم عنها أصعب ما يمكن تحديده وأشق ما يمكن اختباره؛ ونقدّم على ذلك مثالاً ذا دلالة، على بساطته. لو نحّيت جانباً قراءة ما بين يديك وقمت منتصباً لأمكنك التحرك في ثلاثة اتجاهات مستقلة أي عبر أبعاد مكانية ثلاثة متمايزة؛ إن أي مسار

تسلكه، وأياً ما كانت درجة تعقيده، يرجع في النهاية إلى تركيب حركاتك عبر ما يُعرف " بالبعد اليساري – اليميني"، و" البعد الخلفي– الأمامي"، و" البعد العلوي – السفلي". إن كل خطوة تخطوها تتضمن ثلاثة خيارات منفصلة تحدّد كيفية تحركك عبر هذه الأبعاد الثلاثة.

ومثل ذلك ما رأيناه عند مناقشة النسبية الخاصة من أن أي موقع في الكون يتحدّد تماماً من خلال ثلاث معطيات تحدّده بدلالة الأبعاد المكانية الثلاثة. وبذلك يتم تحديد عنوان ما في مدينة من معرفة اسم الشارع الذي هو فيه (أي موقعه في " البعد اليساري – اليميني")، والشارع المتقاطع معه (وهو موقعه في " البعد الأمامي – الخلفي")، ورقم الطابق (وهو موقعه في " البعد العلوي – السفلي")؛ كما دفعتنا أعمال أنشتاين، وفي منظور أكثر حداثة، إلى التفكير بالزمان كبعد رابع (وهو " البعد الماضي – المستقبلي")، مما يضع أمامنا أربعة أبعاد (ثلاثة مكانية وواحد زماني)، وهو ما يعني أن الحوادث في الكون تتحدّد من معرفة مكان وزمان حدوثها.

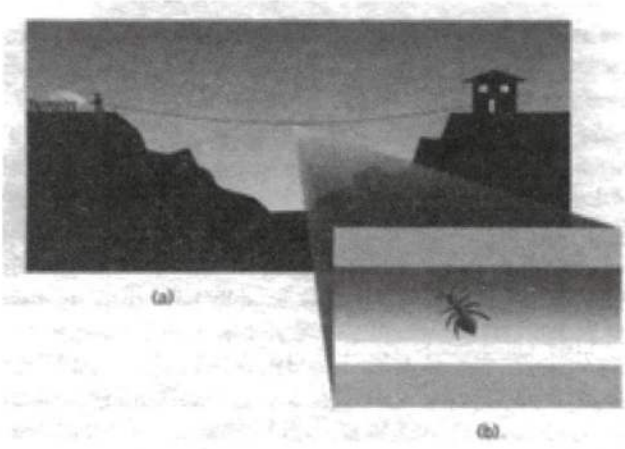
تبدو هذه النتيجة أساسية ومنطقية وبديهية لدرجة لا تحتاج معها إلى برهان أو دليل على صحتها. ومع ذلك فقد تصدّى لها في سنة 1919 رياضياتي بولندي " مغمور" هو تيودور كالوزا من جامعة كونيغسبرغ فتحدّى ما هو بديهي بقوله، إن الكون قد يحوي **أكثر** من ثلاثة أبعاد مكانية. قد تكون بعض مثل هذه الآراء، السخيفة في ظاهرها، سخيفة أيضاً في مضمونها، إلا أن بعضها الآخر قد يهز أركان الفيزياء، كما كان من أمر اقتراح كالوزا الذي أحدث ثورة في صياغتنا قوانين الفيزياء، رغم أن تقبّله تطلّب بعض الوقت. ولا نزال نشعر حتى اليوم بالهزات الارتدادية لهذا الإلهام الذي أضاء بصيرة كالوزا ذات يوم.

فكرة كالوزا وصقل كلاين لها

قد يبدو قول كالوزا بأن عالَمنا قد يحوي أكثر من ثلاثة أبعاد مكانية من تلك الأقوال السخيفة أو الغريبة والغامضة، مع أنه في الحقيقة قول واضح ومقبول بصفة عامة.

ولكي ندرك ذلك، دعنا أولاً نُبعد عن ناظرينا مؤقتاً صورة الكون بمجمله، وننظر فيه إلى أشياء مألوفة لنا مثل خرطوم سقاية طويل ورفيع يُستخدم في ري الحدائق.

تخيّل مثل هذا الخرطوم بطول يبلغ بضع مئات الأقدام، وقد عُلّق فوق واد وأنت تنظر إليه من على بعد ربع ميل مثلاً كما في الشكل 1.8 (a). سوف ترى الخرطوم من هذا البعد كخيط يمتد أفقياً، إذ سوف يصعب عليك أن ترى ثخانته ما لم تكن تملك قوة إبصار خارقة؛ وسترى من موقعك البعيد عنه هذا أن لو أُجبرتْ نملةٌ على العيش فوق سطحه، ما كان أمامها سوى بعد **واحد** فقط تسير عليه، هو " البعد اليساري – اليميني"، الذي يمثّل جهة امتداد الخرطوم، وأن تحديد موقعها عليه في لحظة ما لا يحتاج إلاّ إلى تحديد مقدار **واحد** وهو المسافة بين هذا الموقع وأحد طرفي الخرطوم. فقطعة خرطوم السقاية الطويل تبدو لنا عن بعد ربع ميل شيئاً ذا بعد واحد فقط.



الشكل 1.8: *(a) يبدو خرطوم السقاية، عندما ننظر إليه عن بعد، شيئاً ذا بعد واحد فقط؛ (b) في حين يبدو، عند تكبير صورته، ذا بعد ثان له شكل دائرة تلتف حول الخرطوم.*

لكن للخرطوم **ثخانة** يصعب تمييزها عن بعد ربع ميل، إلاّ أن استخدام منظار مكبّر يقرّب صورته إليك ويضخّمها، يريك محيطه كما في الصورة (b) من الشكل 1.8. وسترى عليها أن بوسع النملة التي تعيش على سطح الخرطوم أن تتحرك في اتجاهين مستقلين **اثنين**، يمتد أولهما على طول الخرطوم في البعد " اليميني – اليساري"، ويمتد

الثاني حول محيطه الدائري في البعد "باتجاه عقارب الساعة وعكسه". وهكذا فإن تحديد موقع النملة في لحظة معطاة يحتاج إلى معلومتين **اثنتين** هما موقعها على طول الخرطوم، وموقعها على طول محيطه الدائري، ممّا يعني أن لسطح الخرطوم بعدين اثنين[1].

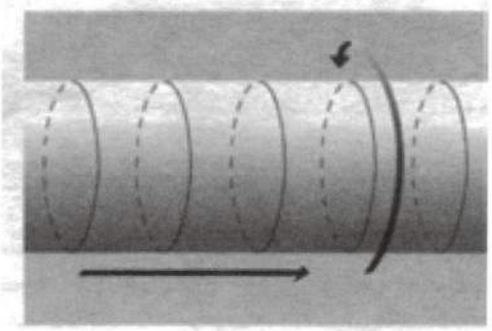
وهناك تباينٌ واضحٌ بين هذين البعدين. فأولهما، وهو الذي بمحاذاة طول الخرطوم، طويل، ممتدّ ظاهر للعيان، في حين أن الثاني وهو الذي في الاتجاه الدائري حول محيط الخرطوم، قصير "ملتفّ" لا يُرى إلاّ عن قرب.

يؤكّد هذا المثال سمة أساسية وهامة للأبعاد المكانية، وهي وجودها في فئتين متمايزتين: فهي إما كبيرة ممتدة تُرى مباشرة بوضوح، أو صغيرة ملتفة تصعب رؤيتها. وإذا لم نكن بحاجة لإظهار البعد الصغير الملتف في المثال الذي أوردناه إلاّ لمنظار مكبّر، فإن إظهاره في خرطوم دقيق جداً، لا تتعدّى ثخانتُه ثخانةَ الشعرة أو الأنبوب الشعري، أصعب من ذلك بكثير ويحتاج إلى أكثر من منظار مكبّر.

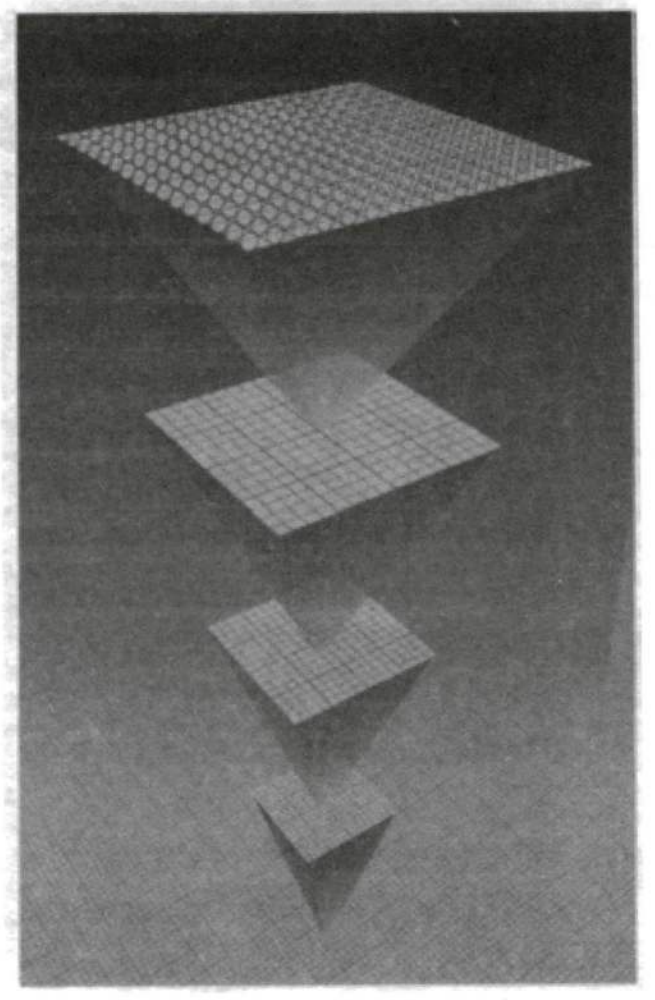
قدّم كالوزا في ورقة بعث بها إلى أنشتاين في سنة 1919 اقتراحاً مثيراً مؤدّاه أن بنية النسيج المكاني للكون قد تحوي أكثر من الأبعاد المكانية الثلاثة التي نعرفها؛ وكان دافعه إلى ذلك إدراكه، كما سنرى، أن هذا الاقتراح يقدّم إطاراً مفاهيمياً واحداً تتوحّد فيه نسبية أنشتاين العامة ونظرية ماكسويل في الكهرطيسية. ونتساءل فوراً: كيف يتأتى لهذا الاقتراح أن يتفق وما **نراه** ونلمسه حولنا عن وجود ثلاثة أبعاد مكانية فقط؟

تكمن الإجابة عن هذا التساؤل، وكانت متضمّنة في أعمال كالوزا وتمّ لاحقاً صقلها وتقديمها من قبل عالِم الرياضيات السويدي أوسكار كلاين في سنة 1926، **في إمكانية امتلاك بنية النسيج المكاني للكون كلتا فئتي الأبعاد المكانية الممتدة والملتفة**؛ ففيه أبعاد كبيرة ممتدة مرئية، هي الأبعاد الثلاثة المعروفة لنا، وهو في ذلك كخرطوم السقاية ذي البعد الأفقي؛ ولكن فيه كذلك أبعاداً إضافية صغيرة ملتفة على نحو ملتزّ في حيّز صغير تتعذر معه رؤيتها حتى بأكبر تجهيزاتنا دقة وكفاءة، وهي في ذلك مثل بعد الخرطوم القصير الدائري الملتف حول نفسه.

ولتقديم صورة أكثر وضوحاً عن هذا الاقتراح القاطع للنظر، نعود ثانية إلى خرطوم السقاية ونرسم على محيطه دوائر سوداء رفيعة قريبة بعضها من بعض وموزّعة بانتظام على طوله. سيبدو لنا الخرطوم، إذا ما نظرنا إليه عن بعد كخيط رفيع ذي بعد واحد؛ أما إذا نظرنا إليه من خلال منظار مكبّر يضخّم صورته، فإن الدوائر السوداء المرسومة على محيطه تسهّل رؤية بعده الملتف، كما يبدو على الشكل 2.8 الذي يُظهر سطح الخرطوم ببعديه: الطويل الممتد والقصير الملتف. اقترح كالوزا وكلاين صورة مماثلة لعالَمنا: ففيه ثلاثة أبعاد كبيرة ممتدة وبعد رابع صغير دائري ملتف، أي أنه عالَم ذو أربعة أبعاد مكانية. ولتعذّر إظهار هذه الأبعاد المكانية الأربعة، فإننا سنعتمد، للتبسيط، رسماً توضيحياً ببعدين كبيرين وبعد صغير دائري، كما يبدو على الشكل 3.8، حيث عمدنا إلى تكبير بنية النسيج المكاني بالطريقة ذاتها التي اعتمدناها مع سطح خرطوم السقاية.



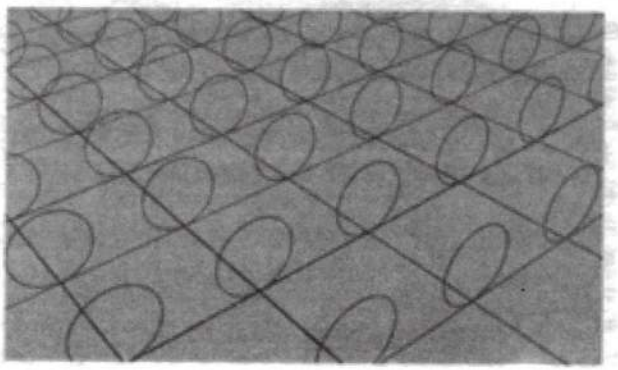
الشكل 2.8: *سطح خرطوم السقاية ببعديه: الطويل الممتد(في الاتجاه الأفقي)، وقد دُلّ عليه بسهم مستقيم، والقصير الملتف (في الاتجاه الدائري)، وقد دُلّ عليه بسهم دائري.*



الشكل 3.8: *يمثّل كلٌّ من المستويات المتتالية، كما في الشكل 1.5، تجسيماً وتكبيراً لبنية النسيج المكاني في المستوى الأدنى. وكما نرى في مستوى التكبير الرابع، فإن عالَمنا قد يملك أبعاداً إضافية طالما ظلت ملتفة على ذاتها في حيّز صغير كفاية بحيث تعذّر كشفها المباشر لغاية يومنا هذا.*

تُظهر الصورة الأدنى على هذا الشكل بنية النسيج المكاني كما نراها وبمقاييس مألوفة لدينا، كالأمتار، تتمثّل بخطوط الشبكة الكبرى. وقد عمدنا في الصور التالية إلى

تكبير صورة هذه البنية بتوجيه انتباهنا إلى مناطق أصغر فأصغر فيها ومن ثم تكبيرها لتسهيل رؤيتها. لا نرى في البداية، أي تبدّل يُذكر على بنية هذا النسيج كما تُظهر الصور الثلاث الأولى التي تمثّل سويات التكبير الثلاث الأولى، إذ تحافظ بنية هذا النسيج على شكلها الأساسي الذي كان لها في البداية. وإذا ما تابعنا تفحّص هذه البنية بتكبيرها أكثر فأكثر، وتفحّصها بالتالي بمقاييس أدنى فأدنى حتى الوصول إلى مستوى التكبير الرابع على الشكل 3.8 والذي يوافق الفحصَ المجهري الأقصى في هذا الشكل، بدا لنا بعد دائري جديد ملتف على ذاته، شبيه بالحلقات الدائرية لخيط الزغب لقطعة من السجاد حيكت بشكل ملتزّ. وقد قال كالوزا وكلاين بوجود هذا البعد الإضافي في **كلّ** نقطة من الأبعاد الممتدة، كما يوجد الطوق الدائري لخرطوم السقاية في كل نقطة منه وعلى طول امتداده الأفقي الظاهر (وقد رسمنا للإراءة عيّنة توضيحية فقط من البعد الدائري موزّعة بانتظام على طول الأبعاد الممتدة). تبدو على الشكل 4.8 صورة مكبّرة لتصوّر كالوزا–كلاين للبنية المجهرية للنسيج المكاني.



الشكل 4.8: *تمثّل خطوط الشبكة الأبعادَ الكبيرة الممتدة التي نعرفها، في حين تمثّل الدوائر البعدَ الجديد الصغير الملتفّ على ذاته. وهذه الدوائر هي في كلّ نقطة من هذه الأبعاد الكبيرة، كما حلقات الزغب في كل نقطة من قطعة السجاد، إلاّ أننا لم نرسم منها سوى الدوائر المنتشرة عند تقاطع خطوط الشبكة.*

يبدو التشابه واضحاً ما بين بنية النسيج المكاني وبنية خرطوم السقاية، رغم ما بينهما من تباينات أساسية. ففي الكون ثلاثة أبعاد مكانية كبيرة ممتدة (أظهرنا اثنين منها فقط)، في حين أن للخرطوم بعداً واحداً ممتداً فقط. كما أننا، وهو الأهم، نصف بنية النسيج المكاني **للكون** ذاته،وليس فقط لجسم **فيه** هو خرطوم السقاية. إلاّ أن الفكرة الأساسية تظل ذاتها: فلو كان البعد الإضافي الملتف المستدير للكون صغيراً جداً كمحيط خرطوم السقاية، لصعب كشفه بالمقارنة مع سهولة كشف أبعاده الكبيرة. في الحقيقة، لو كان حجمه صغيراً بشكل كافٍ لاستحال كشفه حتى على أضخم أجهزتنا المكبّرة. كما أن هناك نقطة ذات أهمية بالغة، وهي أن البعد الدائري **ليس** مجرّد حلقة دائرية ضمن الأبعاد الممتدة المألوفة، كما قد يوحي بذلك الشكل التوضيحي، بل هو بعد **جديد** قائم بذاته في كل نقطة من هذه الأبعاد. فهو في كل نقطة، كما الأبعاد العلوية- السفلية واليسارية - اليمينية والأمامية - الخلفية، أي أنه بعد جديد قائم بذاته تستطيع نملة مجهرية التحرّك فيه. لذلك فإن معرفة موقع هذه النملة تحتاج إلى تحديده بدلالة الأبعاد المكانية الثلاثة (التي تمثّلها خطوط الشبكة) **وكذلك** بدلالة البعد الدائري الجديد، أي أننا نحتاج إلى **أربع** معلومات مكانية إضافة إلى معلومة الزمن. هناك إذن خمس معلومات زمكانية أي معلومة أكثر ممّا كان يُظنّ.

وهكذا يقودنا تفكير كالوزا وكلاين، وعلى نحو غير متوقع، إلى عدم استبعاد وجود أبعاد إضافية صغيرة ملتفة غير الأبعاد المكانية الثلاثة المعروفة، شريطة أن تكون الأبعاد الإضافية صغيرة جداً، أي أن بوسع الكون أن يحوي أبعاداً أكثر مما تراه العين.

لكن، ما هو المقصود بكلمة " صغيرة" أو " صغيرة جداً"؟ قد نقدر بما نملك من وسائط تمييز بنى يبلغ بعدها مقدار جزء واحد من مليار مليار جزء من المتر. فإنْ شغل البعد الإضافي الملتف على ذاته بعداً أقل من ذلك عُدَّ صغيراً جداً وتعذّر كشفه. وقد عمد كلاين في سنة 1926 إلى دمج اقتراح كالوزا الأولي ببعض الأفكار التي حملها معه ميكانيك الكم البازغ آنذاك. وبيّنت حساباته أن البعد الدائري الإضافي هو من مرتبة طول بلانك، وبذلك فهو أصغر بكثير ممّا يمكن تقصّيه تجريبياً؛ وقد أطلق الفيزيائيون منذئذ اسم **نظرية كالوزا- كلاين**[2] على إمكانية وجود أبعاد مكانية إضافية صغيرة جداً.

الحركة جيئة وذهاباً على خرطوم السقاية

يهدف المثال المحسوس الذي قدمناه عن خرطوم السقاية، وكذلك التوضيح المبيّن على الشكل 3.8، إلى إعطاء فكرة عن كيفية امتلاك عالَمنا أبعاداً مكانية إضافية. إلاّ أن تصوّر عالَم بأكثر من ثلاثة أبعاد مكانية، أمر يصعب حتى على الباحثين في هذا المجال؛ لذلك يُعمل الفيزيائيون مخيّلاتهم حول هذه الأبعاد من خلال تأملهم فيما ستكون عليه الحياة في عالَم تخيّلي بأبعاد أقل، مقتفين بذلك خطى الكاتب إدوِن أبوت في قصته الرائعة **الأرض المستوية**[3] التي كتبها سنة 1884، والتي ندرك فيها شيئاً فشيئاً امتلاكَ العالَم لأبعاد أكثر ممّا نعرف. دعنا نتخيّل بدايةً عالَماً ببعدين له مثل شكل خرطوم السقاية. سوف يتطلّب منا ذلك أن نتخلى عن نظرتنا " كمراقب خارجي" يرى في هذا الأنبوب شيئاً ما ضمن العالَم الذي نعرفه، وأن ندخل في عالَم جديد هو عالَم هذا الخرطوم الطويل جداً (يمكننا تخيّله على أنه لا متناه في الطول)، والذي يشكّل سطحه **كلّ** الامتداد المكاني للكون. تخيّل أنك نملة صغيرة تمضي حياتها على هذا السطح.

دعنا نعرض الأمر أولاً على نحو أكثر غرابةً بقليل. تخيّل أن البعد الدائري لعالَم خرطوم السقاية صغيرٌ جداً – حتى أنك لا تحس بوجوده أنت أو أي من المقيمين على سطح الخرطوم– بل ترون وعلى نحو لا يرقى إليه الشك أن لعالَمكم بعداً مكانياً **واحداً** (ولو وُجدت فيكم نملةٌ فكّرتْ كأنشتاين لقلتم إن لعالَمكم بعداً مكانياً واحداً وبعداً زمانياً واحداً أيضاً). وفي الحقيقة فإن سمة هذا العالَم هذه بديهية لدرجة دعت المقيمين على سطحه إلى إطلاق اسم **الأرض الخطية** على عالَمهم، مؤكّدين بذلك أنه ذو بعد مكاني واحد.

إن الحياة على هذه الأرض شديدة الاختلاف عن الحياة التي نعرفها. فهذه الأرض لن تتسع لجسمك الذي تعرفه؛ وأياً كان سعيك لتغيير شكله فإن هناك حقيقة لا خلاص لك منها، وهي أن لجسمك طولاً وعرضاً وارتفاعاً، أي أن لك امتداداً ثلاثي الأبعاد، وليس في الأرض الخطية متسع لذلك. تذكر أيضاً إن كنت لا تزال ترى هذه الأرض الخطية على أنها شيء طويلٌ شبيهٌ بالخيط وموجودٌ في الكون أن عليك أن تقلع عن ذلك، وأن ترى فيها **الكون** برمّته وكلّ ما فيه، وعلى الامتداد المكاني لهذه الأرض أن يتسع لك

كأحد قاطنيها. حاول أن تتصور ذلك. لن تستطيع أن تحشر جسمك فيها حتى ولو كان لك جسم نملة، إذ عليك أن تضغط جسم النملة هذا ليصبح على شكل جسم دودة، ثم عليك ضغطه من جديد حتى تنعدم ثخانته تماماً، أي أن عليك، حتى تتمكن من العيش على الأرض الخطية، أن تصبح كائناً له **طول** فقط.

تصوّر الآن أن لك عيناً في كلّ من طرفَي جسمك الخطي. ستتسمّر عيناك هاتان في محجريهما بخلاف أعيننا التي تدور في محاجرها. **وليس** ذلك بسبب قصور تشريحي في جسمك الجديد، بل هو، وببساطة، نتيجة مباشرة لكون الأرض الخطية ذات بعد واحد، إذ ليس فيها اتجاه آخر تستطيع عيناك التطلّع نحوه. فالاتجاه نحو الأمام هو نطاق ومدى الأرض الخطية.

يمكننا الذهاب إلى ما هو أبعد من ذلك وتصوّر نمط الحياة على هذه الأرض؛ إلاّ أننا سنتحقّق سريعاً من ألاّ شيء فيها سوى ما ذكرنا. تخيّلْ كيف ستبدو لك جارتك القائمة عند أحد طرفيك. سترى إحدى عينيها فقط، ولن ترى فيها أي تعبير كالذي تحمله العين التي تعرفها، بل ستراها نقطة منفردة، إذ لا حياة في أعين سكان الأرض الخطية ولا تعبير يصدر عنها، فليس للعواطف هناك مكان، وستبقى إلى الأبد تواجه الصورة النقطية لتلك العين. وإذا أردت تجاوز جارتك واستكشاف ما وراءها فإنك ستشعر بخيبة أمل، **ذلك أنك لن تستطيع ذلك**، فهي تسدّ عليك الطريق، ولا مكان على تلك الأرض يسمح لك بالالتفاف حولها، وسيظل ترتيب سكان تلك الأرض كلّهم على طول امتدادها الخطي ثابتاً لا يتغيّر. يا لها من معاناة!.

إلاّ أن أحد أولئك السكان، وهو كالوزا ك.لاين*، قام بعد مرور بضعة آلاف من السنين على عيد الغطّاس الديني في الأرض الخطية** بزرع بذور الأمل في نفوس

---

* لاحظ الجناس اللفظي: فـ ك.لاين هي اسم كلاين، وقد شُطرت الكلمة إلى قسمين: ك. ولاين؛ ويعني القسم الثاني بالإنكليزية الخطّ. المترجم

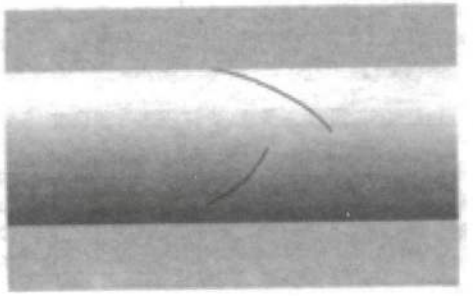
** لاحظ المقارنة التاريخية حيث يربط المؤلف بين تقديم كالوزا وكلاين لاقتراحهما بعد مضي حوالي الألفي سنة على ميلاد السيد المسيح وبين ظهور كالوزا ك.لاين بعد انقضاء فترة زمنية مماثلة على عيد ديني في الأرض الخطية. المترجم.

مواطنيه، تخفيفاً لمعاناتهم، فقد تراءى له من إلهام أضاء بصيرته، أو من رغبة في التخلص من التحديق في عين جارته النقطية، أن الأرض الخطية قد لاتكون كذلك. ويتساءل: ماذا لو أنها كانت في الحقيقة ببعدين، نحيا على أحدهما دون أن نتمكن من اكتشاف الثاني ذي الشكل الدائري لضآلة امتداده في المكان؟ ويتابع تساؤله محاولاً تصوّر شكل الحياة في هذا الكون الجديد بعد أن اتسع مدى بعده المكاني الملتف الثاني، وهو أمر ممكن من حيث المبدأ كما بيّن عملٌ حديث لزميله الخطي لاينْ شتاين. ويصف كالوزا ك.لاين عالَماً يُدهش أقرانه ويبعث الأمل في نفوسهم بنهاية عصر الاستعباد المكاني، بعد أن غدا بوسع كلّ منهم التحرك من موقعه متجاوزاً جاره الذي أمامه، عبر تنقله في البعد المكاني الثاني. وما الحياة التي يصفها كالوزا ك.لاين سوى حياة على خرطوم سقاية " مغلّظ".

في الحقيقة، لو قُدّر للبعد الدائري أن يكبر "مضخّماً" الأرض الخطية لتصبح مشابهة لعالَم خرطوم السقاية فإن حياتك ستتغيّر بطرق عميقة وعديدة. على سبيل المثال، لنأخذ حالة الجسم. إن الجزء الداخلي من جسمك في عالَم الأرض الخطية هو ما يقع بين عينيك، فهما وسيلتك للاتصال بذلك العالَم، أي أنهما تقومان بدور الجلد الذي يشكّل الحدّ الفاصل بين الجسم البشري العادي والعالَم الخارجي، فإذا ما أراد طبيبٌ في الأرض الخطية الوصول إلى داخل جسمك كان عليه أن يفقأ إحدى عينيك.

لكن، إذا كان للأرض الخطية، وكما اقترح كالوزا ك.لاين بعدٌ آخر سرّي ملتفّ على ذاته أخذ بالتوسّع حتى أضحت هذه الأرض مثل الخرطوم، غدا بوسعك، ككائن خطي، أن تنظر إلى أحد أقرانك من زاوية مائلة فترى مباشرة ما في داخله كما يبدو على الشكل 5.8، وغدا بوسع الطبيب الخطي بالتالي أن يصل مباشرة إلى داخل جسمك المكشوف، من خلال هذا البعد الثاني، وهو أمر يدعو إلى الدهشة. لذلك كان على الكائنات الخطية في عالَم الخرطوم هذا أن تتطوّر فيكون لها جلد يقيها ويشكّل الحدّ الفاصل بينها وبين العالَم الخارجي، وأن تتطوّر أيضاً مع الزمن لتغدو كائنات مسطّحة ذات طول وعرض كما يبدو على الشكل 6.8. ولو قُدّر للبعد الدائري الملتف أن يتمدّد على نحو كبير جداً، إذن لأصبح الكون الثنائي البعد

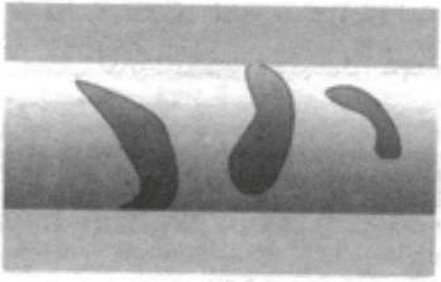
الذي له شـــــكل الخـــــرطـــــوم كأرض أبوت المستوية – وهي عالَم تخيّلي ذو بعدين نشر أبوت في أرجائه إرثاً ثقافياً وأقام نظاماً طبقياً قوامه الشكل الهندسي للمكان. وهكذا وإذ يصعب تصوّر **أي شيء** ذي بال يمكن أن يحدث على الأرض الخـــطـــيـــة – لعـــــدم توافر المكان لحصوله – فإن الحياة في عالَم خرطوم السقاية تغدو مفعمة بالإمكانات؛ فالتحول من بعد مكاني ملاحَظ واحد إلى بعدين مكانيين ملاحَظين هو تطوّر مثير فعلاً.



الشكل 5.8: *يستطيع الكائن الخطي أن يرى الجزء الداخلي من جسم كائن آخر عندما يصبح للأرض الخطية بعدان مكانيان كبيران نسبياً وقابلان للملاحظة، مثل خرطوم السقاية.*

وماذا بعد؟ لماذا نتوقف هنا عند عالَم ذي بعدين، فقد يكون فيه بعد ثالث صغير ملتف لا ندركه. لنعد إلى الشكل 4.8 **ذي البعدين** المكانيين الممتدين الظاهرين فقط، ولنتصور بعده الدائري الصغير وقد تمدّد. سيجد الكائن الحي ذو البعدين نفسه في عالَم جديد كل الجدة لا تتقيد الحركة فيه باتجاهي اليمين واليسار والأمام والوراء – بموازاة البعدين المكانيين الممتدين الملاحَظين– بل تمتد أيضاً في الاتجاه الثالث العلوي والسفلي على طول الدائرة. ولو تمدّد هذا البعد كفايةً لغدا العالَم الموصوف **كعالَمنا** بأبعاده الثلاثة. ونحن لا نعرف إن كان أي من الأبعاد المكانية الثلاثة في عالَمنا يمتد للخارج دوماً وأبداً، أو أنه يلتف على ذاته على شكل دائرة كبيرة تقع خارج حدود أقوى المقاريب الفلكية قدرة على الكشف. ولو امتدّ البعد الدائري الملتف الظاهر على الشكل 4.8 لما

يعادل مليارات من السنين الضوئية طولاً لأمكن لذلك الشكل أن يمثّل عالَمنا الذي نعيش فيه.



الشكل 6.8: *كائنات مسطّحة ذات بعدين تعيش في عالَم خرطوم السقاية.*

ومرة أخرى، وماذا بعد؟ لماذا نتوقف هنا؟ دعنا نرافق كالوزا وكلاين في تصورهما أن عالَمنا، بأبعاده المكانية الثلاثة، قد يحوي بعداً رابعاً ملتفاً. ولو صحّ ذلك أو صحّ وجود أبعاد ملتفة أخرى (وهو ما سنناقشه لاحقاً)، وإذا ما قُدّر لهذه الأبعاد الملتفة أن تطول وتمتد حتى تصبح مرئية للعيان، فإن حياة جديدة مختلفة كل الاختلاف عن تلك التي نحياها ستتكشف أمامنا، كما تكشّفت حياة جديدة أمام قاطني العالَم الخطي والعالَم السطحي.

ومع ذلك، ولو لم يُقدَّر لتلك الأبعاد الصغيرة الملتفة أن تكبر وتمتد، فإن وجودها بذاته يقتضي مضامين عميقة.

التوحيد من خلال الأبعاد العليا

على الرغم من أن اقتراح كالوزا في سنة 1919 بإمكانية وجود أكثر من ثلاثة أبعاد مكانية في كوننا كان أمراً قاطعاً للنظر بحدّ ذاته، إلاّ أن أمراً آخر جعله يفرض نفسه بقوة. كان أنشتاين قد صاغ نظريته في النسبية العامة منطلقاً من وجود ثلاثة أبعاد مكانية وبعد زماني واحد؛ وكان يمكن تعميم هذه الصياغة، وعلى نحو مباشر، لكتابة معادلات جديدة تتوافق وكوناً يحوي أبعاداً مكانية إضافية، وهو ما قام به كالوزا متبنّياً الفرضية

"المتواضعة" بوجود بعد مكاني إضافي واحد، واستنتج تلك المعادلات الجديدة على نحو جلي. وجد كالوزا في صياغته الجديدة أن المعادلات الخاصة بالأبعاد المكانية الثلاثة المعروفة تتطابق في جوهرها مع معادلات أنشتاين. غير أن اعتماده بعداً مكانياً رابعاً أتاح له صياغة معادلات إضافية جديدة، لاحظ بعد دراستها شيئاً مذهلاً ومفاجئاً، إذ لم تكن تلك المعادلات الإضافية إلاّ تلك التي كان ماكسويل قد وضعها في ثمانينيات القرن التاسع عشر لوصف القوى الكهرطيسية!. وهكذا، وباعتماد بعد مكاني رابع، استطاع كالوزا توحيد نظرية أنشتاين عن الثقالة ونظرية ماكسويل عن الضوء.

كان يُظن قبل كالوزا أن الثقالة والكهرطيسية تمثلان قوتين لا رابط بينهما إذ لم يكن هناك ما يشير لذلك، إلاّ أن كالوزا، بافتراضه الجريء وجود بعد رابع، رأى أن هناك ارتباطاً عميقاً ما بين هاتين القوتين. وتقوم نظريته على ارتباط كلّ منهما بتجعّدات بنية النسيج المكاني وتموّجاتها. فقوة الثقالة تنتقل عبر هذه التجعّدات في الأبعاد المكانية الثلاثة المألوفة لهذه البنية، في حين تنتقل القوة الكهرطيسية عبر تجعّداتٍ تتعلّق بالبعد الجديد الرابع الملتف حول نفسه.

بعث كالوزا بورقته إلى أنشتاين، فأثارت اهتمامه في البداية، وكتب إلى كالوزا في 21 نيسان 1919 يقول إنه لم يخطر على باله قطّ أن توحيد القوتين يمكن أن يتحقق عبر فضاء أسطواني خماسي الأبعاد (أربعة أبعاد مكانية وبعد زماني)، ويستطرد مضيفاً: "إني وللوهلة الأولى أستسيغ فكرتك تماماً"[4]. ولم يمض أسبوع على ذلك حتى يميل أنشتاين إلى التحفّظ فيكتب إليه قائلاً بنبرة تنزع إلى الشك: " لقد أعدتُ قراءة ورقتك ووجدتها جديرة بالاهتمام، ورغم أني لم أجد فيها ما يستحيل قبوله إلاّ أنني لم أقتنع بشكل كاف بما قدّمتَ من حجج"[5]. ويعود أنشتاين من جديد بعد ذلك بسنتين فيكتب إلى كالوزا في 14 تشرين الأول من عام 1921، وكان قد أُتيح له الوقت الكافي للتأمل في مقاربة كالوزا واستيعابها: "أعيدُ النظر بتحفّظي السابق الذي أبديته منذ سنتين وحال في حينه دون نشر أفكارك عن توحيد الثقالة والكهرباء. وإذا ما رغبتَ فإنني سأعرضها أمام الأكاديمية"[6]. وهكذا حاز كالوزا رضى أستاذه وقبوله وإن بعد حين.

ورغم جمال فكرة كالوزا ودراساته التفصيلية اللاحقة لها وإسهامات كلاين فيها، فقد كانت تتعارض على نحو جدي وبعض المعطيات التجريبية. فقد أظهرت المحاولات التي جرت لدراسة الإلكترون في إطار هذه الفكرة، علاقات بين كتلته وشحنته بعيدة كل البعد عن قيمتيهما المحدّدتين تجريبياً. ولم يبد أن هناك أملاً في تجاوز هذا التعارض، لذلك انصرف عن أفكار كالوزا كثير من الفيزيائيين الذين انجذبوا إليها بداية. غير أن أنشتاين وآخرين ظلوا يبحثون من حين لآخر عن إمكانية وجود أبعاد إضافية ملتفة حول نفسها. وما لبثت تلك الأفكار أن نُحّيت جانباً بعيداً عن اهتمامات الفيزيائيين النظريين لتشغل مكاناً هامشياً فيها.

كانت فكرة كالوزا في الحقيقة سابقةً لعصرها. ذلك أن عشرينيات القرن العشرين شكلت حقبةً مزدهرةً للفيزيائيين النظريين والتجريبيين، على حد سواء، المهتمّين بفهم القوانين الأساسية للعالَم المجهري؛ فكانت أبحاث النظريين منهم لتطوير بنية ميكانيك الكم ونظرية الحقل الكمومي تشغل كل أوقاتهم وتملأ عليهم حياتهم العلمية، في حين عمل التجريبيون على سبر أغوار الخصائص الدقيقة للذرة وتوصّلوا إلى اكتشاف كثير من المكوّنات المادية الأولية. وسارت النظرية والتجربة جنباً إلى جنب، توجّه الأولى الثانيةَ وتصقل الثانيةُ الأولى، في رحلةٍ أوصلتهما خلال نصف قرن إلى وضع النموذج المعياري. لذلك لم يكن عجباً أن شغلت التخمينات الخاصة بالأبعاد الإضافية موقعاً في مقعد خلفي في تلك الحقبة الخصيبة. لقد شغل الفيزيائيين اكتشافُهم طرقاً وأدوات كمومية قوية، قادتهم إلى تنبّؤات يمكن التحقق منها تجريبياً، وأبعدهم عن الاهتمام بتخمينات، لا يمكن التأكد منها، وهي أن كوننا قد يختلف في أبعاده ومقاييسه الصغيرة جداً والمستعصية على السبر عن صورته التي نعرفها.

لكن العجلة لا بدّ أن تدور، ولا بدّ للزخم أن يهدأ. ففي أواخر الستينيات وأوائل السبعينيات كانت البنية النظرية للنموذج المعياري قد أخذت موقعها الصحيح الملائم؛ كما تمّ التحقّق تجريبياً، في أواخر السبعينيات وأوائل الثمانينيات، من الكثير من توقّعات هذا النموذج وبقي منها القليل الذي بات موضوعُ التحقّق منه أمرَ وقت فقط في رأي معظم

فيزيائيي الجسيمات. ورغم بقاء بعض التفاصيل الدقيقة دون حلّ فقد رأى الكثيرون أنه قد أجيب على الأسئلة الرئيسية المتعلّقة بالقوة الكهرطيسية وبالقوتين الشديدة والضعيفة.

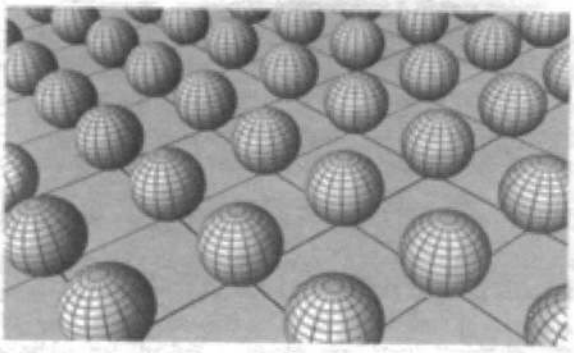
وحان أوان العودة إلى النظر في المعضلة الرئيسية الأهم المتمثلة بالتعارض القائم ما بين النسبية العامة وميكانيك الكم. وشجع الفيزيائيين نجاحُهم في صياغة نظرية كمومية تجمع ما بين القوى الثلاث المذكورة لمحاولة جذب القوة الرابعة إليها. فسلكوا الكثير من السبل وتبنّوا العديد من الأفكار إلاّ أنها لم تحقّق لهم ما أرادوا ورغبوا؛ وأصبحوا، لذلك، أكثر تفتحاً واستعداداً لتقبّل مقاربات أكثر جذرية، فأحيوا نظرية كالوزا- كلاين بعد أن كانوا قد هالوا عليها التراب منذ أواخر عشرينيات القرن العشرين.

نظرية كالوزا-كلاين الحديثة

تبدّل فهمنا للفيزياء بصورة محسوسة وازداد عمقاً، وعلى نحو كبير، خلال العقود الستة التي انقضت منذ قدّم كالوزا اقتراحه الأولي؛ فقد تمّت صياغة ميكانيك الكم، وتمّ التحقّق منه تجريبياً، واكتُشفت القوتان الشديدة والضعيفة، اللتان لم تكونا معروفتين في العشرينيات، وتمّ فهمهما إلى حدّ كبير. وقد عزا بعض الفيزيائيين فشل اقتراح كالوزا في حينه إلى عدم أخذه بالاعتبار هذه القوى (لجهله بها)، وبالتالي إلى معالجته **المحافظة** جداً لتحديث مفهوم المكان. فوجود قوى أكثر يعني الحاجة إلى أبعاد إضافية أكثر، إذ تبيّن أن البعد الدائري الجديد المقترَح لم يكن كافياً، رغم ما أظهره إدخالُه من صلات تجمع ما بين النسبية العامة والكهرطيسية.

ومع حلول منتصف السبعينيات، تركّزت الجهود وتكثّفت الأبحاث حول نظريات عمادها أبعاد أكثر يلتف بعضها على ذاته في اتجاهات مكانية متعددة. ويبدو على الشكل 7.8 بعدان إضافيان اثنان ملتفان مشكّلَين سطح كرة. تنبثق هذه الأبعاد من كلّ **نقطة** من الأبعاد الكبيرة المألوفة، كما في حالة البعد الدائري الواحد (ولم نُظهر على الشكل سوى عيّنة توضيحية من هـــذه الأبعاد عند نقاط تقاطع الأبعاد المألوفة للشبكة). كما يُظهر الشكل 8.8 صورة أخرى حيث يأخذ البعدان الإضافيان فيها شكل كعكة مجوّفة (أو

طارة). ويمكن تخيّل إمكانات أخرى أكثر تعقيداً تشمل أبعاداً مكانية إضافية ملتفة بأعداد أكبر (ثلاثة أو أربعة أو خمسة أو أي عدد) مشكّلةً طيفاً من الأشكال الغريبة يتعذّر رسمه. يستلزم وجود هذه الأبعاد " العليا" صغرَ امتدادها المكاني، فهو أصغر من أصغر الأبعاد التي يمكننا سبرها، إذ لم يتوفّر حتى الآن أي دليل تجريبي على وجودها.

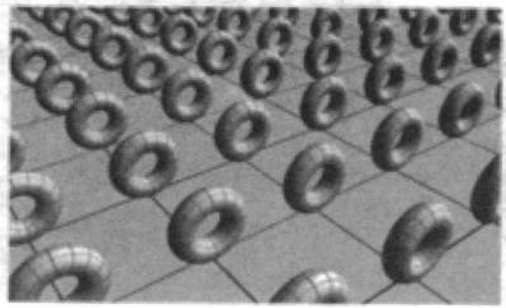


الشكل 7.8: *بعدان إضافيان دائريان ملتفان على شكل كرة.*

كانت أهم الاقتراحات الواعدة للنظريات ذات الأبعاد العليا، تلك التي تضمّنت التناظر الفائق. ويأمل الفيزيائيون أن يساعد الإلغاء الجزئي لأشد التراوحات الكمومية والناجم عن التزاوج بين الجسيمات وشركائها الفائقين في تخفيف حالة العداء القائمة ما بين الثقالة وميكانيك الكم. وقد أطلق الفيزيائيون تسمية **الثقالة الفائقة ذات الأبعاد العليا** على النظريات التي تتضمن الثقالة والأبعاد الإضافية والتناظر الفائق.

وكما كان الحال مع محاولة كالوزا الأصلية، فقد بدت واعدةً في بداية الأمر نسخٌ متعددة من نظرية الثقالة الفائقة ذات الأبعاد العليا؛ وذكّرت المعادلات الجديدة الناجمة عن الأبعاد الإضافية بتلك المستخدَمة في وصف القوة الكهرطيسية والقوتين الشديدة والضعيفة. إلاّ أن التمعّن فيها أظهر أن العقبات القديمة لا تزال في مواقعها. لقد خفّف التناظر الفائق من حدة التراوحات الكمومية الضارة المرتبطة بالمسافات القصيرة، لكن ليس إلى الحد الذي يمكن معه صياغة نظرية مقبولة؛ وخلص الفيزيائيون إلى القول

بصعوبة وضع نظرية وحيدة ذات دلالة، وبأبعاد عليا، تجمع ما بين كلّ خصائص القوى والمادة[7].



الشكل 8.8: *بعدان إضافيان دائريان ملتفان على شكل كعكة مجوفة.*

غير أنه سرعان ما بدا أن قطعاً أو أجزاء من نظرية موحّدة أخذت تتشكل شيئاً فشيئاً، وكان ينقصها العنصر أو الجزء الحاسم الذي يجمع شتاتها في إطار كمومي. وما لبث هذا الجزء، وهو نظرية الأوتار، أن أخذ موقعه الرئيسي على مسرح الأحداث في سنة 1984.

أبعاد أكثر ونظرية الأوتار

قد يكون ما تقدّم قد أقنعك **بإمكانية** وجود أبعاد مكانية إضافية ملتفة في عالَمنا، إذ لا شيء فيه يستبعد وجودها طالما كانت صغيرة لدرجة تعذّر معها كشفها. وقد تكون لا ترى في ذلك سوى بعض أنواع الخداع. إن عجزنا عن سبر مسافات أصغر من جزء من مليار مليار جزء من المتر لا يسمح بوجود أبعاد إضافية صغيرة فحسب بل يسمح بقيام إمكانات غريبة مثل وجود حضارة مجهرية لأناس فائقي الصغر بلون أخضر مثلاً. لا شكّ في أن أول الاحتمالين أكثر قبولاً من ثانيهما، إلاّ أن عدم إمكانية التحقّق من أيٍّ منهما في الوقت الحاضر يضعهما، كيفياً، على قدم المساواة.

هكذا كان الأمر حتى مجيء نظرية الأوتار التي حملت معها حلّ المعضلة الرئيسية في الفيزياء المعاصرة، المتمثلة بعدم التوافق ما بين النسبية العامة وميكانيك الكم، كما

حملت توحيد فهمنا لقوى الطبيعة كلها وللمكونات المادية الأساسية فيها. وقد تبيّن أن نظرية الأوتار **تقتضي** لذلك وجود أبعاد مكانية إضافية في الكون.

يتضح لنا سبب ذلك ممّا يلي: يتجلّى أحد إشراقات ميكانيك الكم في تأكيده على أن إمكانية التنبؤ بوقوع حدثٍ ما هي إمكانية احتمالية. وقد رأى أنشتاين في ذلك أمراً غير مستحَب، وقد ترى مثل رأيه، لكن ذلك لا يعني عدم صحة هذه السمة. فلنقبلْ بها. تتراوح قيم الاحتمال ما بين الصفر والواحد أو، إذا ما عُبّر عنها بنسب مئوية، ما بين الصفر بالمائة والمائة بالمائة. وقد وجد الفيزيائيون في إعطاء ميكانيك الكم قيماً لاحتمال وقوع حدث ما تقع **خارج** هذا المجال إشارة رئيسية لابتعاده عن جادة الصواب؛ وكما رأينا سابقاً، كان من أهم مظاهر الاستدلال على عدم التوافق ما بين النسبية العامة وميكانيك الكم، في الإطار الجسيمي- النقطي، إعطاء الحسابات قيماً لا متناهية في كبرها لقيمة الاحتمال؛ وذكرنا أن نظرية الأوتار تهتم بمعالجة مثل هذه القيم. إلاّ أن ما لم نذكره هو مسألة أخرى أكثر دقة، إذ أن بعض حسابات نظرية الأوتار، وفي بداية العهد بها، كانت تعطي للاحتمال **قيماً سالبة**، وهي أيضاً خارج مجاله المقبول. وهكذا بدا للوهلة الأولى أن أمواج ميكانيك الكم تتقاذف نظرية الأوتار.

عكف الفيزيائيون على محاولة تفسير هذه السمات غير المقبولة، ونجحوا في ذلك. يبدأ هذا التفسير من الملاحظة البسيطة التالية: لو أجبرنا وتراً على الاستلقاء على سطح ذي بعدين، كسطح طاولة مثلاً أو سطح خرطوم سقاية، لتقلّص عدد الاتجاهات المستقلة التي يمكنه الاهتزاز فيها إلى **إثنين**: اتجاه أمامي-خلفي، واتجاه يميني-يساري، ولأمكن تحليل أي نمط اهتزازي يقوم به على هذا السطح إلى مركبتين وفق هذين الاتجاهين. أي أن اهتزاز وتر على سطح الأرض المستوية لأبوت، أو على سطح خرطوم السقاية، أو على سطح أيّ كونٍ ذي بعدين، إنما يجري في اتجاهين مستقلين فقط. لكن لو سُمح للوتر أن يتحرّر من أسر هذا السطح، فإن عدد الاتجاهات المستقلة التي يمكنه الاهتزاز فيها سيزداد إلى ثلاثة، وذلك لقدرته على الاهتزاز في الاتجاه العلوي - السفلي، أي أن الوتر يهتز في كون ذي ثلاثة أبعاد مكانية في ثلاثة اتجاهات مستقلة؛ وسوف يهتز في

اتجاهات مستقلة أكثر إن كان في عالَم ذي أبعاد مكانية أكثر، ولو صعب ذلك على التصور.

نودّ هنا التأكيد على هذه الحقيقة. فقد وجد الفيزيائيون أن حساباتهم المقلقة تتحسّس لدرجة كبيرة بعدد اتجاهات اهتزاز الوتر، وأن قيم الاحتمال السالبة تنشأ من **تزاوج غير ملائم** بين مقتضيات النظرية وبين ما يبدو أن الحقيقة تفرضه: لقد بيّنت الحسابات أنه لو قُدّر للوتر أن يهتزّ في **تسعة** اتجاهات مستقلة، فإن قيم الاحتمال السالبة تحذف بعضها بعضاً. حسناً، يبدو، للوهلة الأولى، وكأن الأمر لا يعنينا لأننا نعيش في عالَم بثلاثة أبعاد مكانية وليس بتسعة. لذلك فإن نظرية الأوتار لا تزال في ورطتها إذا ما رغبت في وصف عالَمنا ذي الأبعاد المكانية الثلاثة.

ويبدو أن كالوزا وكلاين، بفكرتهما الرائدة التي سبقت زمانها بأكثر من نصف قرن، قد وجدا سبيل الخلاص من هذه الورطة. فالأوتار، لصغرها، تستطيع الاهتزاز في الأبعاد المكانية الكبيرة المألوفة، كما تستطيع ذلك أيضاً في أبعاد صغيرة ملتفة؛ وبذلك **نقدر** على تحقيق متطلبات الأبعاد المكانية التسعة لنظرية الأوتار في عالَمنا عبر افتراضنا، كما فعل كالوزا وكلاين، أن في كوننا –عدا الأبعاد المكانية الثلاثة المألوفة – ستة أبعاد مكانية أخرى ملتفة. وهكذا نجت نظرية الأوتار التي بدا لوهلةٍ ما أنها على وشك الإبعاد عن عالَم الحقيقة الفيزيائية. وهكذا تذهب هذه النظرية إلى أبعد ممّا ذهب إليه كلاين عن مجرّد افتراض وجود أبعاد إضافية، ذلك أنها **تقتضي** وجود هذه الأبعاد، إذ أن على كوننا أن يتضمّن تسعة أبعاد مكانية؛ إضافة إلى بعد الزمان، حتى يكون لنظرية الأوتار معنى فيزيائي. وهكذا وجد اقتراح كالوزا، الذي قدّمه سنة 1919، منبره القوي وميدانه الرحب.

بعض الأسئلة

يثير ما تقدّم بعض الأسئلة:

أولها، لماذا تتطلب نظرية الأوتار تسعة أبعاد مكانية حتى يكون لها معنى فيزيائي يجنّبها إعطاء قيم غير مقبولة للاحتمال؟ قد تكون الإجابة على هذا السؤال هي الأصعب

في هذه النظرية دون الاستعانة بمعادلاتها الرياضياتية التي تقدّم وحدها وبشكل مباشر الإجابة عليه، وذلك لتعذّر تقديم تفسير حدسي وغير حسابي له. وقد يصحّ على عدد الأبعاد الإضافية في نظرية الأوتار ما قاله الفيزيائي إرنست رذرفورد من أن عدم إمكانية إعطاء تفسير بسيط وغير تقني لنتيجة ما يعني عدم فهمنا لها جيداً. وما قصده بكلامه هو أن ذلك لا يعني عدم صحة النتيجة، بل يعني ببساطة أننا لم نفهم جوهرها ولم نعِ معناها ومقتضاها (دعنا نعدّ أنفسنا من الآن لأمر جوهري في ثورة الأوتار الفائقة الثانية التي سنقدّمها في الفصل 12، فنقول إن الحسابات التي أدّت إلى استنتاج وجود تسعة أبعاد مكانية وبعد زماني واحد كانت حسابات **تقريبية**، حيث بيّن ويتن في منتصف التسعينيات، معتمداً على حدسه، وعلى أعمال سابقة قام بها مايكل دَفْ من جامعة أ-م في تكساس؛ وكريس هيل وبول تاونسند من جامعة كامبردج، أن هذه الحسابات التقريبية قد **أغفلت** بعداً مكانياً. فنظرية الأوتار تقتضي وجودَ عشرة أبعاد مكانية وبعد زماني واحد، أي أنها تتطلب ما مجموعه **أحد عشر** بعداً. سندع جانباً هذه النتيجة حتى الفصل 12 لقلة تأثيرها على ما سنقدّمه قبل ذلك).

أما السؤال الثاني فهو لماذا تقول معادلات نظرية الأوتار (أو بالأصح معادلاتها التقريبية، كما سبق وذكرنا) بوجود أربعة أبعاد كبيرة ممتدة (ثلاثة أبعاد مكانية وبعد زماني واحد)، وتُبقي الأبعادَ المكانية الخمسة الأخرى صغيرة وملتفة؟ لماذا لا تكون الأبعاد **كلها** كبيرة ممتدة أو صغيرة ملتفة؟ ولماذا لا يكون لها بين هذا وذاك إمكانية أخرى غير ما ذُكر؟ لا أحد يملك الإجابة عن هذا السؤال في الوقت الحاضر؛ ولو كانت نظرية الأوتار صحيحة لأمكننا في نهاية الأمر تقديم الجواب، إلاّ أن فهمنا الحالي لها لم يبلغ المدى الذي يتيح لنا ذلك؛ لكن هذا لا يعني عدم وجود محاولات شجاعة للبحث عن التفسير المطلوب، نشير من بينها إلى أن بوسعنا، من منظور كوني، أن نتخيّل أن كلّ الأبعاد بدأت ملتفة على ذاتها بقوة، ثم انبسطت من بينها وامتدّت ثلاثة أبعاد مكانية وبعد زماني واحد، عند انفجار شبيه بالانفجار الأعظم، وكبرت إلى ما هي عليه الآن، في حين ظلت الأبعاد المكانية الأخرى على حالها. وقد وُضعت تفسيرات تقريبية عدة لذلك، كما سنرى في الفصل 14، إلاّ أنها لا تزال في مراحلها المبكّرة. لذلك سنفترض فيما

يلي أن الأبعاد المكانية، عدا ثلاثة منها، هي أبعاد صغيرة ملتفة، ممّا يتّفق وطبيعة عالَمنا الذي نعيش فيه، علماً بأن البرهان على استنتاج ذلك من النظرية نفسها هو من الأهداف الأساسية لبحوث حديثة تُجرى.

أما السؤال الثالث فهو هل يعني قولنا بالحاجة إلى أبعاد إضافية إمكانية وجود أبعاد **زمانية** إضافية إلى جانب الأبعاد المكانية الإضافية؟ تبدو بداهة غرابة هذه الإمكانية، ففي حين ندرك، بالسليقة، معنى وجود تعددية للأبعاد المكانية، لأننا نعيش في عالَم ذي ثلاثة أبعاد، فإننا لا ندرك أبداً معنى وجود تعددية في أبعاد الزمان، فهل يتّفق أحد هذه الأبعاد الزمانية مع إحساساتنا الحاضرة بالزمن، في حين **تختلف** الأخرى عن ذلك؟

وسيكون الأمر أكثر مدعاة للاستغراب والدهشة إذا ما تمعّنّا بفكرة وجود بعد زماني ملتف على ذاته، إذ لو سارت نملة على بعد مكاني ملتف على شكل دائرة، لوَجدت ذاتها في الموضع ذاته مرة تلو المرة، وكلما أتمّت دورة عليه. وقد لا يبدو مستغرَباً الرجوع إلى المكان ذاته، فنحن نعود مرات ومرات إلى موقع كنا فيه سابقاً، أما العودة إلى **لحظة زمنية سابقة** كنا فيها بعد انقضاء فترة زمنية، وهو ما يعنيه إتمام دورة على طول البعد الزماني الملتف على ذاته، فأمر غريب علينا. إن الزمن كما نعرفه هو بُعْدٌ يتمّ السير فيه في اتجاه واحد فقط تستحيل معه العودة إلى لحظة فيه بعد انقضائها. وقد يكون للأبعاد الزمانية الإضافية الملتفة خصائص مختلفة جداً عن خصائص البعد الزماني الطويل الذي نعيش فيه، والذي يمتدّ من لحظة خلق الكون وحتى يومنا هذا. لذلك فإن فهم هذه الأبعاد الزمانية الإضافية غير المعروفة يقتضي إعادة نظر جذرية في مفاهيمنا أعمق منها في حالة الأبعاد المكانية الإضافية. وقد بحث بعض الفيزيائيين النظريين في إمكانية دمج أبعاد زمانية إضافية في نظرية الأوتار إلاّ أنهم لم يصلوا في ذلك إلى نتيجة حاسمة. لذلك ستبقى مقاربتنا لهذه النظرية المقاربةَ " المألوفة" حيث تكون كلّ الأبعاد الملتفة أبعاداً مكانية، دون أن نستبعد تماماً الإمكانية الأخّاذة بوجود أبعاد زمانية جديدة قد تلعب دوراً في التطورات المستقبلية.

المقتضيات الفيزيائية للأبعاد الإضافية

أظهرت بحوث امتدّت سنوات طوالاً، ترجع في بدايتها إلى ورقة كالوزا الأولية، أن الأبعاد الإضافية التي يقترحها الفيزيائيون، رغم وجوب صغرها لدرجة يتعذّر معها "رؤيتها" مباشرة بكل ما هو متاح لنا من إمكانات ووسائل (طالما أننا لم نرها حتى الآن)، فإن لها تأثيرات **غير مباشرة** بالغة الأهمية على الفيزياء التي نعرفها. تبدو الصلة بين هذه الفيزياء والخصائص المجهرية للمكان واضحة على نحو خاص في نظرية الأوتار.

تذكّرْ، لفهم هذا الارتباط، أن كتل الجسيمات الأساسية وشحناتها تتحدّد في نظرية الأوتار بأنماط اهتزازات الوتر الرنينية الممكنة؛ وستدرك، إذا ما تخيّلت أحد هذه الأوتار الصغيرة في حركته واهتزازه، أن هذه الأنماط تتأثر بطبيعة المكان الذي هو فيه. يمكن رؤية مثال على ذلك في تحرك أمواج المحيط. فعلى سطحه الواسع تتحرك أمواجه دون أي عائق، وتتخذ كل واحدة لنفسها هذا الشكل أو ذاك المسار؛ وشبيه بهذا ما نراه في أنماط الوتر الاهتزازية عندما تتحرك في أبعاد مكانية كبيرة ممتدة، حيث بوسعه أن يهتز، في أي لحظة، في أيٍّ من هذه الأبعاد كما رأينا في الفصل 6. أمّا إذا عبرت إحدى أمواج المحيط مكاناً ضيقاً، فإن تفاصيل حركتها فيه ستتأثر بأمور عدّة مثل عمق المياه في ذلك المكان وطبيعة القنوات والعوائق الصخرية التي فيه، وذلك كما تتأثر الأصوات التي تصدر عن أنبوب أورغن أو بوق باهتزازات تيار الهواء في داخلها، التي تتحدّد بدورها بأبعاد الآلة وشكلها الداخلي الذي ينساب فيه الهواء. وللأبعاد المكانية الملتفة على ذاتها تأثير مشابه على أنماط اهتزازات الوتر الممكنة فيها. ولمّا كانت الأوتار الصغيرة تهتز في كافة أبعاد المكان، فإن لكيفية تلوّي هذه الأبعاد والتفافها حول ذاتها تأثيراً كبيراً على أنماط الاهتزازات الرنينية الممكنة للأوتار وتقييداً شديداً لها. تشكّل هذه الأنماط، التي تتحدّد إلى درجة كبيرة بالشكل الهندسي للأبعاد الإضافية، مصفوفةَ الخصائص المحتملة للجسيمات كما نراها في عالَمنا بأبعاده الكبيرة، وهو ما يعني **أن الشكل الهندسي للأبعاد الإضافية يحدّد الخصائص الفيزيائية الأساسية مثل كتل الجسيمات**

وشحناتها التي نلاحظها في التجارب المجراة في عالَمنا المألوف بأبعاده المكانية الكبيرة الثلاثة.

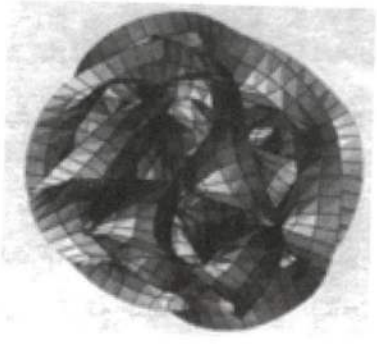
وهذه النتيجة ذات أهمية بالغة لذلك نعيد صياغتها ثانية. فالكون، تبعاً لنظرية الأوتار، يتكون من أوتار صغيرة جداً تُعدّ أنماطُ اهتزازها الأساسَ المجهري لكتل الجسيمات ولشحنات قواها؛ وتقتضي هذه النظرية وجودَ أبعاد مكانية إضافية ملتفة على ذاتها ليصغرَ حجمها كثيراً إلى المدى الذي يفسّر عدم رؤيتنا لها حتى الآن. أما الوتر الصغير فيتحسّس ويقدر على سبر هذا المكان الصغير الذي يلعب الشكل الهندسي لأبعاده الإضافية دوراً حاسماً في تحديد أنماط اهتزاز الوتر عند حركته فيه وانتقاله من موقع لآخر. ولمّا كانت هذه الأنماط تتبدّى لنا على شكل كتل جسيمات أساسية وشحنات قواها، فإن بوسعنا القول إن خصائص الكون الأساسية تتحدّد، إلى درجة كبيرة، بشكل الأبعاد الإضافية وبقياسها. وتُعدّ هذه النتيجة من أكثر إشراقات نظرية الأوتار أهمية وأثراً. ونظراً للدور الكبير الذي للأبعاد الإضافية على خصائص الكون الأساسية، فإن علينا الآن أن نمعن النظر ونطلق لتفكيرنا وخيالنا العنان لمحاولة فهم كيف تبدو هذه الأبعاد الملتفة.

كيف تبدو الأبعاد الملتفة على ذاتها؟

لا تستطيع الأبعاد المكانية الإضافية في نظرية الأوتار أن تتغضّن وتتجعّد على أية صورة لأن المعادلات التي تنبثق عنها تضع قيوداً شديدةً على شكلها الهندسي. وقد بيّن كلّ من فيليب كانديلاس من جامعة تكساس في أوستن وغاري هوروفيتز وأندرو شترومينغر من جامعة سانتا باربارا في كاليفورنيا وإدوارد ويتن، أن صنفاً معيّناً من الأشكال الهندسية ذات الستة أبعاد يمكن أن يلبّي متطلّبات تلك المعادلات. تُعرف هذه الأشكال **بفضاءات كالابي–ياو** أو **أشكال كالابي–ياو**، تكريماً لاثنين من علماء الرياضيات هما أوجينيو كالابي من جامعة بنسلفانيا وشينغ–تونغ ياو من جامعة هارفارد اللذان كان لأبحاثهما في هذا المجال، وقبل وضع نظرية الأوتار، دور بالغ الأهمية في

فهم هذه الفضاءات. تتصف الرياضيات التي تصف فضاءات كالابي–ياو بشدة التعقيد والدقة، ولكن يمكن أخذ فكرة عن شكلها من خلال تقديم صورة لها[8].

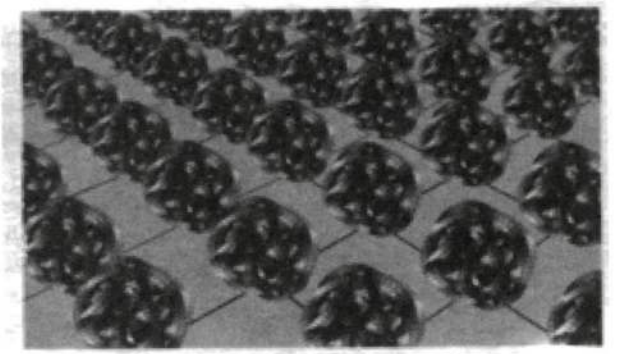
تبدو على الشكل 9.8 صورة لهذه الفضاءات[9]. وعليك وأنت تتطلع إليها أن تأخذ بالاعتبار القيود الضمنية المفروضة عليها والتي تحدّ من مقدرتها على البيان، لأنها تحاول إظهار شكلٍ بستة أبعاد على صحيفة ذات بعدين، ممّا يشوّه صورة الشكل إلى حدّ بعيد؛ إلاّ أنها تبيّن على نحو تقريبي شكل فضاء كالابي– ياو[10]. وليست هذه الصورة إلاّ واحدة من عشرات الآلاف من الصور لهذه الفضاءات التي تحقّق المتطلّبات الصارمة للأبعاد الإضافية الناجمة عن نظرية الأوتار. ورغم أن العضوية في ناد يبلغ عدد أعضائه بضعة عشرات الآلاف لا تُعدّ أمراً مميّزاً، إلاّ أن مقارنة هذا العدد بالعدد اللانهائي من الأشكال المقبولة رياضياتياً تُظهر أن فضاءات كالابي–ياو نادرةٌ حقاً.



الشكل 9.8: *صورة لفضاء كالابي–ياو*

وأخيراً تخيّلْ أن عليك أن تستبدل فضاء كالابي– ياو بكلّ واحدة من الكرات التي تبدو على الشكل 7.8 والتي مثّلتْ بعدين ملتفّين. يعني ذلك، تبعاً لنظرية الأوتار، أن هناك ستة أبعاد غير مسبوقة حتى الآن، في كل نقطة من الأبعاد الثلاثة الممتدة المألوفة، ملتفّة بإحكام لتشكّل واحداً من تلك الأشكال ذات المظهر المعقّد كما يبدو على الشكل 10.8. تشكّل هذه الأبعاد جزءاً متكاملاً من بنية النسيج المكاني: فهي في كلّ نقطة فيه. ولو حركتَ ذراعك لترسم بها قوساً كبيراً فإنك لا تحركها في فضاء الأبعاد

الثلاثة المألوفة فقط، بل تحركها أيضاً عبر هذه الأبعاد الصغيرة الملتفة، وسوف تطوف بها، لصغرها، عدداً كبيراً جداً من المرات بحيث تعود مراراً وتكراراً إلى نقطة بدايتك. يعني صغر هذه الأبعاد عدمَ اتّساعها لحركة شيء كبير مثل يدك؛ بل تَتمّ، خلال هذه الحركة، عملية أخذ الوسطي لها فلا تشعر برحلة ذراعك عبر أبعاد كالابي- ياو الملتفة هذه.



الشكل 10.8: *في الكون، تبعاً لنظرية الأوتار، أبعاد إضافية ملتفة على شكل فضاء كالابي-ياو.*

وهذه سمة مذهلة في نظرية الأوتار. ونتساءل الآن، وقد تكوّن لدينا فهم أفضل عمّا تبدو عليه هذه الأبعاد الإضافية، عن ماهية الخصائص الفيزيائية التي تنجم عن اهتزاز الأوتار فيها، وكيف يمكن مقارنة هذه الخصائص بنتائج تجاربنا. إنه سؤال نعطي للإجابة الصحيحة عنه مكافأة مقدارها 64000 دولار.

الفصل التاسع

المدفع الدخاني: بصمات تجريبية

لا شيء أكثر مدعاة لسعادة الفيزيائيين العاملين على نظرية الأوتار من اعتزازهم بأنهم قدّموا للعالَم لائحة من التنبؤات العلمية النظرية التي يمكن التحقق من صحتها تجريبياً، إذ لا معنى لأي نظرية تدّعي المقدرة على وصف عالَمنا إن لم تكن توقّعاتها قابلة للتحقق التجريبي. لذلك، ومهما بلغت قناعتنا بالصورة التي تقدمها نظرية الأوتار فإنها، ما لم تصف كوننا بدقة، لن تكون أكثر دلالة، أو أنسب، من لعبة التنين والزنزانة*.

ويحلو لإدوارد ويتن القول بأن نظرية الأوتار قد **تنبّأت** بأمر مثير، تمّ التأكد تجريبياً من صحته، وهو القول **بوجود الثقالة**[1]. يعني ويتن بقوله هذا أن نيوتن وأنشتاين قد طوّرا نظريتيهما عن الثقالة بعدما أكّدت لهما وجودَها ملاحظاتُهما للكون، ممّا اقتضى وضع تفسير صحيح ومنسجم لها؛ أما الحال مع نظرية الأوتار فبخلاف ذلك تماماً: إنها تقود الفيزيائي قسراً إلى القول بوجود الثقالة، حتى لو كان على جهل تام بالنسبية العامة، لأنها في نسيج نظرية الأوتار عبر نمطها الاهتزازي الموافق للغرافيتون العديم الكتلة وذي التدويم – 2. وكما قال ويتن فإن "كون الثقالة نتيجة اقتضتها نظرية الأوتار هو من أعظم الإلهامات النظرية عبر التاريخ[2]". ومع اعترافه "بمجيء هذا التنبّؤ متأخراً"، لأن الفيزيائيين توصلوا إلى اكتشاف الوصف النظري للثقالة قبل معرفتهم بنظرية الأوتار، فإنه يؤكّد أن ذلك ليس إلاّ حدثاً تاريخياً على أرضنا؛ ويعرض الأمر بصورة ظريفة فيقول إنه لو وُجدت حضارات أخرى متقدّمة في الكون لكان من الممكن أن تكون نظرية الأوتار قد اكتُشفت أولاً، ثم جاءت الثقالة كنتيجة مذهلة لها.

---

*وهي لعبة تسلية ابتكرها غاري غيغاكس عام 1973، يؤدي كل لاعب فيها دور شخصية ما في عالَم خيالي تتحرك فيه التنانين وسواها. وتتضمن اللعبة مغامرات كثيرة مثل اكتشاف زنزانات مخبّأة واقتحامها. المترجم

ولمّا كنّا مقيَّدين بالتسلسل التاريخي للظواهر العلمية كما جرى على كوكبنا، فإن كثيرين يرون في هذا "التنبّؤ اللاحق" بالثقالة إثباتاً تجريبياً غير مقنع على صحة نظرية الأوتار؛ ويقولون بأنهم سيكونون أكثر سعادةً إذا ما حقّقت لهم هذه النظرية واحداً من أمرين اثنين: إما "تنبّؤاً أصيلاً" بأمر يمكن التأكد منه تجريبياً، أو "تنبّؤاً لاحقاً" بخاصية معروفة في عالَمنا لم تجد تفسيراً لها حتى الآن (مثل كتلة الإلكترون، أو وجود ثلاث عائلات للجسيمات). وسنحاول في هذا الفصل التعرّف على ما وصلت إليه نظرية الأوتار في هذا المجال.

وقد يدعو إلى الدهشة أن نرى أن نظرية الأوتار، على امتلاكها الإمكانية لأن تكون **النظرية** الأكثر مقدرةً على التنبّؤ من بين كلّ النظريات التي درسها الفيزيائيون – فهي نظرية قادرة من حيث المبدأ على تفسير الخصائص الأكثر أساسية في الطبيعة– لم تتح للفيزيائيين حتى اليوم أن يروا فيها ما يتيح لهم تفسير العديد من المعطيات التجريبية بدقة كافية. وحالهم في هذا كحال طفل يتلقّى في عيد الميلاد الهدية التي يحلم بها، إلاّ أنه لا يستطيع التعامل معها لفقدان بعض الصفحات من تعليمات استعمالها؛ فبين أيديهم اليوم الكأس المقدّسة* للعلم الحديث التي طالما سعوا للحصول عليها، إلاّ أنهم غير قادرين على الاستفادة من كامل قدراتها التنبّئية قبل نجاحهم في استكمال **تدوين** تعليمات استعمالها. ومع ذلك، وكما سنرى في هذا الفصل، فإنه يمكن في العقد القادم وبقليل من الحظ التأكد تجريبياً من إحدى السمات الأساسية لنظرية الأوتار؛ أما إذا ازدادت جرعة الحظ فيمكن في أي لحظة التأكد على نحو غير مباشر من بصمات هذه النظرية.

النيران المتقاطعة

قد تتساءل عن مدى صحة نظرية الأوتار. لا أحد يمتلك الإجابة عن ذلك. ممّا لا شكّ فيه أن هذه النظرية هي وحدها المتاحة الآن أمام من يعتقد بوجوب توحيد قوانين الفيزياء، ما عاد منها إلى العالَم الكبير وما عاد منها إلى العالَم الصغير، أو أمام من يرى

---

*وهي الكأس التي شرب منها السيد المسيح في العشاء المقدّس الأخير، وفقاً لأسطورة من العصور الوسطى، والتي راح المسيحيون فيما بعد يجدّون في البحث عنها. المترجم

عدم الخلود إلى الراحة قبل وضع نظرية ذات تطبيقات شمولية؛ إلاّ أنك قد ترى في ذلك ما يعكس افتقار الفيزيائيين إلى الخيال أكثر ممّا يعبّر عن فكرة توحيد أساسية تحملها هذه النظرية. كما قد ترى لاحقاً أن تجمّع الفيزيائيين حولها يرجع إلى أن أهواء تاريخ العلوم سلّطت شعاعاً عشوائياً من الإلهام في هذا الاتجاه، فكان مثلهم في ذلك مثل من يبحث عن مفاتيحه الضائعة ليس حيث أضاعها بل تحت مصباح الشارع حيث الضوء. ولو كنتَ في عداد المحافظين إلى حدّ ما أو الذين يرغبون في القيام بدور محامي الشيطان لقلتَ بألاّ حاجة للفيزيائيين لإضاعة وقتهم في البحث عن نظرية تفترض وجود شيء جديد في الطبيعة أصغر بمائة مليون مليار مرة من أي شيء يمكن التحقق مباشرة من وجوده تجريبياً.

ولو عبّرت عن شكوكك هذه في ثمانينيات القرن العشرين، حين بدأت نظرية الأوتار تشدّ الأنظار إليها، لانضمّ إليك عدد من أشهر فيزيائيي عصرنا، ولكان من بينهم بالتأكيد كلٌّ من شيلدون غلاشو الحائز على جائزة نوبل، وزميله في هارفارد الفيزيائي بول غينسبارغ، اللذين استخفّا بها علناً، لافتقارها إلى إمكانية التحقق منها تجريبياً، حيث يقولان: *" إن نظرية الأوتار تسلك سبيل الانسجام الداخلي، حيث تكمن الحقيقة في مفاهيم الروعة والجمال والتوحيد، بدلاً من اتّباع المنهج التقليدي الذي يبحث عن الحقيقة في مواجهة النظرية بالتجربة. وهي تعتمد في وجودها على صدف عجيبة وعلى إلغاءات سحرية، كما على علاقات بين مجالات رياضياتية مستقل بعضها عن بعض (وقد يكون بعضها لم يُكتشف حتى الآن). فهل تُعدّ مثل هذه الخصائص أسباباً ومبرّرات تدعو إلى تقبّل حقيقة الأوتار الفائقة؟ وهل يمكن للمبادئ الرياضياتية أو للاعتبارات الجمالية أن تحلّ محلّ التجربة "*[3].

ويتابع غلاشو في موقع آخر فيقول:" *إن نظرية الأوتار الفائقة طموحة إلى المدى الذي يجعلها إما صحيحة بكلّيتها أو على خطأ بكلّيتها. وتكمن مشكلتها الوحيدة في أن الرياضيات التي تأتي بها جديدة كلّ الجدّة وصعبة كل الصعوبة، ولن يمكن التعامل معها قبل عقود من الزمن "*[4]. حتى أنه تساءل فيما إذا كان على أقسام الفيزياء في الكلّيات "أن تقوم بدفع رواتب الفيزيائيين العاملين على نظرية الأوتار فاسحةً المجال أمامهم لإفساد

عقول الطلاب السريعي التأثّر"، ومحذّراً من أن هذه النظرية تشوّه العلم وتقوّضه كما فعلتْ به علوم اللاهوت في العصور الوسطى[5].

وكان ريتشارد فاينمان قد عبّر كذلك قبل وفاته بقليل عن عدم قناعته بأن نظرية الأوتار هي العلاج **الوحيد** للمسائل التي تحول دون توحيد الثقالة وميكانيك الكم، والمتمثّلة على نحو خاص بالمقادير اللانهائية الضارة، حيث يقول: "*كان شعوري دوماً ولا يزال، وقد أكون في ذلك على خطأ، أن هناك أكثر من طريقة واحدة لسلخ جلد القطة؛ كذلك لا أعتقد بأن هناك طريقة واحدة فقط تسمح لنا بالتخلّص من تلك اللانهائيات. ولا أرى في مقدرة نظرية ما على التخلّص منها سبباً كافياً لتقبّلها والاعتقاد بتفرّدها* "[6].

كذلك جاء لاذعاً نقد هوارد جورجاي، زميل غلاشو في هارفارد، للنظرية في أواخر ثمانينيات القرن العشرين حيث يقول: "*لو سمحنا لصفّارات الإنذار أن تقودنا إلى مفهوم التوحيد "النهائي" عند مسافات صغيرة جداً يتعذّر على زملائنا التجريبيين عندها مدّ يد العون إلينا لوقعنا في مأزق لأننا سنتخلّى عندئذ عن النهج القديم والحاسم الذي يستبعد الأفكار التي لا تستند إلى الواقع، والذي يميّز الفيزياء عن فعاليات بشرية أخرى أقل أهمية منها* "[7].

وكما هو حال العديد من نقاط الاختلاف البالغة الأهمية، فإن مقابل كلّ رأي يقول برفض هذه النظرية، رأياً آخر يدافع عنها بحماس. فويتن، مثلاً، يصف شعوره عندما رأى كيف تجمع نظرية الأوتار الثقالة مع ميكانيك الكم بأنه "أكبر إثارة ذهنية" أحسّ بها في حياته[8]. أما كومرون فافا، وهو أحد العاملين اللامعين على هذه النظرية في هارفارد، فيقول: "*تعبّر نظرية الأوتار قطعاً عن أعمق فهم للكون استطعنا بلوغه* "[9]. ويرى فيها مَري غِل –مانْ، الحائز على جائزة نوبل في الفيزياء، " شيئاً عظيماً لا يُصدّق "؛ وهو يتوقّع أن تكون إحدى صورها، في يوم ما، نظرية الكون بأسره[10].

وهكذا يستمر الجدال تغذّيه الفيزياء من جهة والتيارات الفلسفية عن كيفية التعاطي معها من جهة أخرى. " فالتقليديون " يرون ضرورة اختبار الأفكار بالتجربة، إذ طالما نجح هذا النهج في القرون القليلة الماضية، في حين يرى آخرون أن بوسعنا الإجابة عن تساؤلات تتجاوز متطلّبات اختبارها تجريبياً إمكاناتنا التقانية المتاحة.

وقد خفّت خلال العقد الماضي الانتقادات الموجّهة إلى نظرية الأوتار، ويعزو غلاشو ذلك إلى أمرين، فيلاحظ أولاً " *أن نظريي الأوتار كانوا قد أعلنوا في منتصف الثمانينيات، وبحماس زائد، أنهم سيكونون قادرين قريباً على الإجابة عن كلّ الأسئلة المطروحة في الفيزياء؛ أما الآن، وقد غدوا أكثر حذراً في تحمسهم، فإن جلّ انتقادي لهم خلال الثمانينيات لم يعد قائماً* "[11].

ويقول ثانياً: " *لم نتمكن، نحن الفيزيائيين العاملين في خارج إطار نظرية الأوتار، من تحقيق أي تقدّم خلال العقد الماضي. لذلك فإن القول بأن نظرية الأوتار هي الوحيدة المتاحة لنا يبدو مقنعاً جداً. فهناك الكثير من المسائل التي لن يمكن حلها في إطار نظرية الحقل الكمومي التقليدية، وقد يمكن الإجابة عليها في إطار نظريات أخرى. والنظرية الوحيدة الأخرى التي أعرفها هي نظرية الأوتار* "[12].

ويتذكّر جورجاي فترة الثمانينيات بالطريقة ذاتها تقريباً، فيقول: " *لقد أفرط البعض في الترويج لنظرية الأوتار في فترات مبكّرة من تاريخها؛ وقد تبيّن لي في السنوات اللاحقة أن بعض أفكار هذه النظرية قد قاد نحو طرق تفكير جديدة وممتعة أفادتني كثيراً في عملي ذاته. وتغمرني الآن السعادة إذ أرى أناساً يمضون أوقاتهم في العمل على نظرية الأوتار، فقد غدا بوسعي أن أدرك أن شيئاً مفيداً سيخرج منها* "[13].

أما ديفيد غروس، وهو من ألمع العاملين في حقلي الفيزياء التقليدية ونظرية الأوتار، فيوجز، ببلاغة، الوضع على النحو التالي: " *اعتدنا فيما مضى عند تسلّقنا جبال الطبيعة، أن يكون التجريبيون في المقدّمة، في حين نقتفي، نحن النظريين الكسالى، آثارهم. وكانوا يلقون علينا بين الفينة والأخرى صخرة تجريبية تعترض مسارهم فتقع على رؤوسنا وترتد عنها ففهم حقيقة ما جرى، ونتابع السير في الطريق الذي شقّوه أمامنا. وعندما كنا ننضم إليهم كنا نبيّن لهم كيف بدا المشهد لنا وكيف وصلوا إلى موقعهم الذي هم فيه. تلك كانت الطريقة القديمة في تسلّق جبال الطبيعة. وإذ نتوق اليوم إلى تلك الأيام، فإن علينا، نحن النظريين، أن نستلم زمام القيادة في رحلة التسلق التي ستكون الآن أكثر غربة ممّا كانت* "[14].

ولا يرغب أولئك النظريون في تسلّق ذرى جبال الطبيعة بمفردهم، ويفضّلون لو شاركهم زملاؤهم التجريبيون في تحمّل مشاق تلك الرحلة ومشاعر إثارتها. وليس تفرّدهم

فيها إلاّ نتيجة عدم توافق تكنولوجي (أو بالأحرى عدم توافق في التوقيت) بين الطرفين. فهم قد تهيّؤوا لتلك الرحلة وأعدّوا لها، ولو على نحو جزئي، عدّتها النظرية من حبال وكلاّبات تعليق تتيح لهم بلوغ القمة، في حين لم يتهيّأ مثل ذلك لزملائهم التجريبيين. ولا يعني عدم التزامن هذا تباعداً أساسياً بين نظرية الأوتار والإجراءات التجريبية، إذ يأمل النظريون أن يلقوا، من موقعهم القريب من قمة الجبل ذات الطاقة العالية الضخمة، صخرة **نظرية** نحو سفحه حيث زملاؤهم التجريبيون؛ وهم يعدّون ذلك الهدف الأول لما يقومون به حالياً من أبحاث؛ ورغم أن أي صخرة لم تتزحزح حتى الآن من موقعها في القمة لتضرب رؤوس الرجال في السفح، فإن بعض الحصى الواعدة والمثيرة قد سقطت كما سنرى الآن.

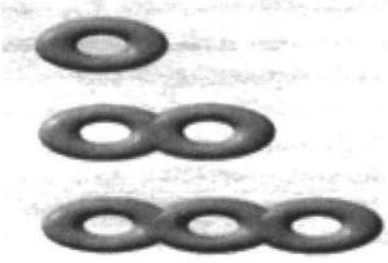
الطريق نحو التجربة

لن نتمكن أبداً من بلوغ مقاييس الأطوال الصغيرة التي تتيح لنا رؤية الوتر مباشرة، دون تحقيق خروق تكنولوجية هائلة؛ إن بوسع الفيزيائيين، بالمسرّعات المتاحة التي يبلغ محيطها بضعة أميال، أن يتفحّصوا ويسبروا أبعاداً تبلغ في صغرها جزءاً من مليار مليار جزء من المتر. أما تفحّص أبعاد فيما دون ذلك فيتطلّب طاقات أعلى وبالتالي آلات أكبر قادرة على تركيز تلك الطاقة على جسيم منفرد. ولما كان طول بلانك أصغر بسبع عشرة مرتبة كبر من الطول الذي يمكننا تفحّصه اليوم، فإن رؤية وتر منفرد، باستخدام تقاناتنا المتاحة، يتطلّب مسرّعاً بحجم **المجرة**. وقد أظهر شمويل نوسينوف من جامعة تل أبيب أن هذه التقدير التقريبي، القائم على مبدأ التناسب، متفائل جداً إذ أظهرت دراساته الدقيقة الحاجة إلى مسرّع بحجم **الكون** برمّته. (تُقدّر الطاقة اللازمة لتفحّص المادة حتى طول بلانك بحوالي ألف كيلو واط ساعي – أي ما يكفي لتشغيل جهاز تكييف عادي لحوالي مائة ساعة – فهي ليست كبيرة جداً بحدّ ذاتها. إلاّ أن التحدّي التكنولوجي، الذي يبدو التغلّب عليه غير ممكن، يتجلّى في توجيه هذه الطاقة على جسيم بمفرده، أي على وتر وحيد). وكان الكونغرس في الولايات المتحدة الأميركية قد أوقف مؤخراً التمويل اللازم لبناء الصادم الفائق ذي الناقلية الفائقة – وهو مسرّع يبلغ محيطه 54 ميلاً فقط – لذلك لا تحبس أنفاسك بانتظار التمويل اللازم لبناء مسرّع يسبر حتى طول بلانك. وهكذا

فإن اختبار نظرية الأوتار تجريبياً يقتضي اعتماد طريق غير مباشر لذلك من خلال تحديد مقتضياتها الفيزيائية التي يمكن ملاحظتها على مسافات أكبر بكثير من طول الوتر ذاته.[15]

وقد خطا كانديلاس وهوروفيتز وشترومينغر وويتن الخطوة الأولى لتحقيق هذا الهدف في ورقة بحث رائدة، إذ لم يكتفوا فقط ببيان ضرورة التفاف الأبعاد الإضافية في نظرية الأوتار على شكل فضاء كالابي- ياو، بل توصّلوا كذلك إلى بعض ما يُلقيه ذلك من تأثير على أنماط اهتزاز الوتر الممكنة؛ وتسلّط إحدى النتائج الرئيسية التي توصّلوا إليها الضوء على الحلول المدهشة وغير المتوقّعة التي تقدّمها النظرية لبعض القضايا الشائكة في فيزياء الجسيمات.

نذكّر أن الجسيمات الأساسية التي اكتشفها الفيزيائيون تقع في ثلاث عائلات متماثلة التنظيم تزداد فيها كتلتها من عائلة إلى التي تليها. وكان السؤال المحيّر الذي ظلّ بلا جواب قبل نظرية الأوتار هو لمَ هذه **العائلات**، ولمَ هي **ثلاث** فقط؟ وقد اقترح الفيزيائيون العاملون على هذه النظرية إجابةً عن ذلك من خلال فضاءات كالابي- ياو. تحوي هذه الفضاءات **ثقوباً** شبيهة بتلك التي في مركز اسطوانة الحاكي أو في مركز كعكة أو كعكة متعدّدة، كما في الشكل 1.9. ولهذه الثقوب أشكال مختلفة ومتنوعة في فضاءات كالابي- ياو ذات الأبعاد الأكثر – حيث يمكن للثقوب ذاتها أن تكون بأبعاد مختلفة (" ثقوب متعددة الأبعاد ")؛ وما يمثّله الشكل 1.9 ليس إلاّ الفكرة الأساسية لهذه الثقوب.



الشكل 1.9: *كعكة (أو طارة) مع أبناء عمومتها ذوي القبضات المتعددة.*

درس كانديلاس وهوروفيتز وشترومينغر وويتن عن قرب تأثير هذه الثقوب على أنماط اهتزاز الوتر الممكنة، ووجدوا أن لكلّ **ثقب** في فضاء كالابي- ياو **عائلة** من اهتزازات الوتر ذات الطاقة المنخفضة؛ ولما كانت الجسيمات الأولية المألوفة تتوافق وأنماط الاهتزاز ذات الطاقة الأدنى، فإن وجود ثقوب متعددة -كما في الكعكة المتعددة- يعني أن أنماط اهتزاز الوتر ستقع ضمن عائلات متعددة. فإذا ما كان في فضاء كالابي- ياو الملتف ثلاثة ثقوب، فإننا سنلقى ثلاث عائلات من الجسيمات الأولية[16]. هكذا ترى نظرية الأوتار أن التنظيم الملاحَظ تجريبياً للجسيمات ضمن العائلات ليس سمة لا يمكن تفسيرها أو ترتيباً عشوائياً أو إلهياً، بل هو دلالة على عدد الثقوب في الشكل الهندسي الذي فيه الأبعاد الإضافية. ومثل هذه النتيجة ما يجعل قلب الفيزيائي يخفق بشدة.

قد تظن أن عدد الثقوب في الأبعاد الملتفة التي بطول بلانك – التي تمثّل فيزياء قمة الجبل **بامتياز** – قد ألقت صخرةً قابلة للاختبار تجريبياً نحو السفح حيث الطاقات المتاحة، وأن الفيزيائيين التجريبيين، وقد تلقوا هذه الصخرة، يمكنهم التحقق منها وإثبات أن عدد عائلات الجسيمات الأساسية هو ثلاثة -وهم فعلاً قد توصّلوا إلى ذلك سابقاً- لكن عدد الثقوب في كل واحد من عشرات آلاف أشكال كالابي- ياو المعروفة متنوع ومختلف، فقد يكون في بعضها 3، وفي بعضها الآخر 4 أو 5 أو 25، حتى أن بعضها قد يحوي 480 ثقباً. **وهنا تكمن المشكلة فنحن لا نعرف اليوم كيف نستخلص من معادلات نظرية الأوتار أياً من أشكال كالابي- ياو يمثّل الأبعاد الملتفة الإضافية.** وإذا ما توصّلنا إلى معرفة المبدأ الذي يسمح بتحديد واحد من أشكال كالابي- ياو من بين العديد المتاح منها فإننا نكون قد ألقينا فعلاً صخرة من قمة الجبل إلى سفحه حيث التجريبيون. وإذا ما حوى هذا الشكل الخاص الذي حددته معادلات نظرية الأوتار ثلاثة ثقوب، فإنها تكون قد أتاحت لنا تحقيق تنبّؤ مذهل يسمح بتفسير سمة معروفة للكون تبقى غامضةً تماماً بغيابه. وتبقى معرفة المبدأ، الذي يسمح باختيار واحد من أشكال كالابي- ياو، المسألة التي لم تجد حلاً لها حتى اليوم. ومع ذلك – وهذه نقطة مهمة – فإن لنظرية الأوتار المقدرة على الإجابة عن هذه السؤال المحيّر في فيزياء الجسيمات، ممّا يعدّ بحدّ ذاته إنجازاً كبيراً.

يمثّل عدد عائلات الجسيمات الأساسية واحدةً من النتائج التجريبية الناجمة عن الشكل الهندسي للأبعاد الإضافية، علماً بأن لأشكال هذه الأبعاد، من خلال تأثيرها على أنماط اهتزاز الوتر الممكنة، نتائج أخرى تتضمن الخصائص التفصيلية لجسيمات المادة والقوى. ونشير كمثال على ذلك إلى ما بيّنه عمل لاحق لشترومينغر وويتن من أن كتل

الجسيمات في كلّ من هذه العائلات تتوقف على طريقة تقاطع وتراكب حدود الثقوب المختلفة المتعددة الأبعاد التي في أشكال كالابي- ياو. يصعب تصوّر ذلك، إلاّ أن الفكرة الأساسية هي أن الأوتار تهتز ضمن الأبعاد الإضافية الملتفة، وأن للترتيب الدقيق للثقوب المختلفة وللطريقة التي يطوّقها بها شكل كالابي- ياو تأثيراً مباشراً على أنماط الاهتزازات الرنينية الممكنة. ورغم صعوبة متابعة تفاصيل ذلك، وهي ليست ذات أهمية كبيرة، فإن الأمر المهم هو مقدرة نظرية الأوتار، كما في حالة تحديد عدد عائلات الجسيمات الأساسية، على تزويدنا بالإطار اللازم للإجابة عن تساؤلات لم تستطع النظريات السابقة الإجابة عنها، بل ولم تتطرق إلى معالجتها، مثل سبب امتلاك الإلكترون وغيره من الجسيمات للكتل التي لها. ومرة أخرى فإن إجراء مثل هذه الحسابات يتطلّب معرفة شكل فضاء كالابي- ياو الذي تعتمده الأبعاد الإضافية.

هكذا يبدو كيف يمكن لنظرية الأوتار أن تفسّر ذات يوم خصائص جسيمات المادة الأساسية المبيّنة في الجدول 1.1. ويعتقد العاملون على هذه النظرية أن وصفاً مماثلاً سوف يسمح ذات يوم أيضاً بتفسير خصائص الجسيمات الرسل للقوى الأساسية المبيّنة في الجدول 2.1، ممّا يعني أن بعضاً من المخزون الاهتزازي الضخم الذي تحدثه الأوتار، عندما تلتف وتهتز في الفراغ الذي تحدّده الأبعاد الممتدة والملتفة على ذاتها، يتكوّن من اهتزازات بتدويم 1 أو 2؛ وهذا البعض هو المرشّح ليكون الحالات الوترية الاهتزازية الحاملة للقوى. وهناك دوماً وأيّاً ما كان شكل فضاء كالابي- ياو نمط اهتزازي عديم الكتلة ذو تدويم مقداره 2 خاص بجسيم الغرافيتون؛ أمّا اللائحة التفصيلية لجسيمات الرسل ذات التدويم-1، أي عددها وشدّات القوى التي تحملها وتناظرات المعيار التي تخضع لها، فتعتمد على نحو حاسم على الشكل الهندسي الدقيق للأبعاد الملتفة. وهكذا ومرة أخرى تقدّم لنا نظرية الأوتار الإطار اللازم لتفسير خصائص الجسيمات الرسل، أي خصائص القوى الأساسية في عالَمنا. إلاّ أننا لن نتمكن من وضع أية تنبّؤات متقدّمة أو لاحقة (عدا ملاحظة ويتن الخاصة بالتنبّؤ اللاحق بالثقالة) إن لم نحدّد بدقة شكل كالابي- ياو الذي تلتف فيه الأبعاد الإضافية.

وإذ نتساءل عن سبب صعوبة تحديد شكل كالابي- ياو الصحيح، نرى أن معظم نظريي الأوتار يلقون اليوم اللوم في ذلك على عدم كفاية الأدوات الرياضياتية المستخدمة حالياً في تحليل نظرية الأوتار. فالإطار الرياضياتي لهذه النظرية، وكما سنرى في الفصل 12، معقد لدرجة لم تُتح للفيزيائيين سوى إجراء حسابات تقريبية عبر صيغة تُعرف **بنظرية الاضطراب**. تبدو كافة أشكال كالابي- ياو في هذا التقريب على قدم المساواة فيما بينها، إذ ليس في معادلات النظرية ما يميّز أيّاً منها عن سواه. ولمّا كانت النتائج الفيزيائية لنظرية الأوتار تعتمد بصورة محسوسة على الشكل الدقيق للأبعاد الملتفة، وبغياب أية إمكانية لاختيار واحد من هذه الأشكال من بين الكثير منها، فلا يمكن استخلاص أية نتائج محدّدة قابلة للاختبار التجريبي. وتتوجه الأبحاث اليوم إلى تطوير طرائق نظرية تتجاوز المقاربة التقريبية على أمل الوصول إلى تحديد شكل كالابي- ياو الموافق للأبعاد الإضافية، من بين فوائد أخرى. وسنعرض ما تحقّق من تقدّم في هذا المجال في الفصل 13.

إمكانات مستنزفة

وهكذا قد نتساءل: إذا ما قدرنا على معرفة شكل كالابي- ياو الذي تختاره نظرية الأوتار، فهل هناك شكل ما يقتضي خصائص فيزيائية تتوافق وما نلاحظه؟ أو بتعبير آخر، إذا ما قدرنا على تحديد الخصائص الفيزيائية الموافقة لكلّ واحد من أشكال كالابي- ياو، ثمّ جمعناها كلّها في سجلّ ضخم، فهل سنجد بينها ما يتوافق والواقع؟ وهذا السؤال هام جداً، ولكن تصعب الإجابة عليه كلّية لسببين رئيسيين.



الشكل 2.9: *يمكن تشويه شكل كعكة ذات عدة قبضات بطرق عدة، تبدو إحداها على الشكل، دون أن يتغيّر عدد ثقوبها.*

سنركّز اهتمامنا بداية على أشكال كالابي- ياو الموافقة لثلاث عائلات، ممّا يختصر لائحة الخيارات المقبولة إلى حدّ كبير مع بقاء عدد كبير منها. وكما نقدر على تشويه كعكة متعدّدة القبضات من أحد أشكالها إلى أشكال كثيرة أخرى – لا متناهية في عددها – دون أي تغيير في عدد ثقوبها، ويبدو على الشكل 2.9 أحد هذه التشويهات المُجرى على الصورة السفلى من الشكل 1.9، فإن بوسعنا كذلك إجراء تشويه أملس على واحد من أشـــكال كالابي- ياو ذي الثقوب الثلاثة، والحصول منه على عدد لا نهائي من الأشكال مع المحافظة على عدد ثقوبه (عندما ذكرنا سابقاً أن هناك عشرات الآلاف من أشكال كالابي- ياو؛ فإننا كنّا قد جمعنا كل تلك الأشكال التي تتحول من واحد لآخر بتشويه أملس يُجرى عليها، وعددنا كلّ مجموعة الأشكال الحاصلة فضاءً واحداً فقط من فضاءات كالابي- ياو). وتكمن المشكلة في أن الخصائص الفيزيائية التفصيلية لاهتزازات الوتر، أي كتلتها واستجابتها للقوى، **تتأثر** إلى حدّ كبير بتغيّرات الأشكال هذه. ولكن، ومرة أخرى، فإننا لا نملك طريقةً للاختيار ما بين إمكانية وأخرى. لذلك ومهما بلغ عدد طلاب الدراسات العليا والدكتوراة في الفيزياء الذين يوجّههم أساتذتهم للعمل في هذا المجال، فإن من غير الممكن معرفة الفيزياء الموافقة لعدد لا نهائي من الأشكال المختلفة.

قاد هذا الإدراك نظريي الأوتار إلى تفحّص الفيزياء الناجمة عن عيّنة من أشكال كالابي- ياو الممكنة؛ لكن ومع ذلك، لا يبدو أن الطريق ممهّد أمامهم، فالمعادلات التقريبية التي يستعملونها لا تتيح لهم إدراك حقيقة الفيزياء الناجمة عن أحد هذه الأشكال، فهي قد تقود على نحو صحيح تقريباً وعبر طريق طويل إلى فهم خصائص الاهتزازات الوترية التي يأملون أن تتوافق والجسيمات المعروفة. لكن الاستنتاجات الفيزيائيّ الدقيقة والقاطعة، مثل كتلة الإلكترون وشدة القوة الضعيفة، تتطلب معادلات أكثر دقة بكثير من المعادلات التقريبية التي يعملون عليها اليوم. ونذكّر بما أوردناه في الفصل السادس – في مثال لعبة **معرفة السعر الصحيح** – بأن مقياس الطاقة الطبيعي في نظرية الأوتار هو طاقة بلانك، وأن هذه النظرية أعطت أنماطاً اهتزازية بكتل قريبة من كتل جسيمات المادة والقوى المعروفة ولكن فقط بعد إجراء حذوفات أو إلغاءات دقيقة جداً، وأن هذه الحذوفات استلزمت حسابات دقيقة جداً لأن أي خطأ فيها، ولو كان صغيراً، يؤثّر على

دقتها. وقد حقق الفيزيائيون في منتصف تسعينيات القرن العشرين تقدّماً كبيراً في تجاوز المعادلات التقريبية، إلاّ أن الطريق ما زال طويلاً أمامهم.

أين نحن الآن إذن؟ إننا، مع وجود تلك العقبة الكأداء المتمثّلة بعدم توفر أي معيار أساسي يتيح لنا اختيار واحد من أشكال كالابي- ياو وتفضيله على ما عداه، ومع عدم توفر الأدوات الرياضياتية النظرية التي تتيح لنا الوصول الكامل، من هذا الاختيار، إلى نتائج يمكن التحقق منها، فإننا نتساءل إن كان **أحد** خيارات أشكال كالابي- ياو يوصلنا إلى عالَم يتفق، ولو على نحو تقريبي، وملاحظاتنا التجريبية. والجواب على ذلك إيجابي ومشجّع؛ إذ، على الرغم من أن معظم أشكال كالابي- ياو الكثيرة جداً تقود إلى نتائج مغايرة لما في عالَمنا (فهي تختلف عنها في عدد عائلات الجسيمات وفي عدد القوى الأساسية وأنواعها، إضافة إلى اختلافات هامة أخرى)، فإن بعض هذه الأشكال يقود إلى فيزياء **قريبة**، بصورة كيفية، ممّا تعطيه ملاحظاتنا التجريبية. يعني ذلك أن **بعض** فضاءات كالابي- ياو تعطي، عند اختيارها لتمثيل الأبعاد الملتفة التي تحتاجها نظرية الأوتار، اهتزازات وترية بخصائص مشابهة جداً لخصائص جسيمات النموذج المعياري. والأمر البالغ الأهمية هو نجاح نظرية الأوتار في إدخال الثقالة ضمن هذا الإطار الميكانيكي الكمومي.

والحال كما نراه الآن أفضل ما كان يُؤمل له، إذ لو توافق عدد كبير من فضاءات كالابي- ياو، على نحو تقريبي، مع ما هو ملاحَظ تجريبياً، لكانت الصلة بين فضاء واحد مختار منها وما هو ملاحَظ فيزيائياً أقل دلالة، ولأمكن لخيارات كثيرة من الفضاءات أن تتوافق وخصائص عالَمنا دون أي إمكانية لتفضيل واحد منها عن سواه من منظور تجريبي. ومن جهة أخرى، ولو لم يتوافق أي واحد من تلك الفضاءات والمقتضيات التجريبية، ولو بصورة تقريبية، إذن لكانت نظرية الأوتار – على جمال إطارها النظري – بعيدة عن عالَمنا. فوجود عدد محدود من أشكال كالابي- ياو المتوافقة والملاحظات التجريبية، آخذين بالاعتبار مقدرتنا الحالية التقريبية إلى حد ما على تحديد المقتضيات الفيزيائية التفصيلية، أمر مشجّع جداً.

وسيكون تفسير خصائص الجسيمات الأولية وجسيمات القوى من بين أعظم الإنجازات العلمية –إن لم يكن **أعظمها**– ومع ذلك فقد نتساءل إن كان بوسع نظرية الأوتار أن توحي للفيزيائيين التجريبيين بأية تنبّؤات **مبكرة**، بخلاف تلك **اللاحقة**، ليعملوا على التحقق منها، إمّا الآن أو في مستقبل قريب. ونجيب بالإيجاب فهناك بعضها.

الجسيمات الفائقة

دفعت العوائق النظرية التي تحول دون استخلاص تنبّؤات نظرية تفصيلية من نظرية الأوتار إلى البحث عن مظاهر **عامة** لعالَمها بدلاً من مظاهره التفصيلية المحدّدة. وتعني كلمة " عامة " هنا خصائص أساسية للنظرية لا تتأثر كثيراً بتفاصيلها التي تقع في الوقت الحاضر خارج مدى إدراكنا النظري، إن لم تكن مستقلة تماماً عنها. يمكننا مناقشة هذه الخصائص بثقة حتى من خلال فهم غير كامل للنظرية كلها. وسنركّز الآن على مثال واحد منها هو التناظر الفائق، كما سنعرض أمثلة أخرى في الفصول اللاحقة.

في نظرية الأوتار، كما سبق ورأينا، خاصية أساسية تبدو في شدة تناظرها؛ فهي تلحظ، عدا تضمّنها مبادئ التناظر الحدسية، أعظم توسعة رياضياتية لها تتجلى في ظاهرة التناظر الفائق. يعني ذلك، وكما رأينا في الفصل 7، أن أنماط الاهتزازات الوترية تأتي ضمن أزواج – هي أزواج الشراكة الفائقة– حيث يختلف الفرد فيها عن قرينه بنصف واحدة تدويم. فإن صحّت النظرية فإن بعض الاهتزازات الوترية ستتوافق والجسيمات الأولية المعروفة. **وتتنبّأ** النظرية، بسبب هذا التزاوج فائق التناظر، بأن لكلّ واحد من الجسيمات المعروفة شريكاً فائقاً. ومع قدرتنا على تحديد شحنات القوى التي يتوجّب على هذه الجسيمات الفائقة الشراكة حملها، فليس بوسعنا الآن التنبّؤ بكتلها. على أن التنبّؤ **بوجود** الشركاء الفائقين هو بذاته سمة عامة لنظرية الأوتار تظل صحيحة بقطع النظر عن جوانب النظرية الأخرى التي لم نعرفها حتى الآن.

لم يلاحَظ حتى الآن أي شريك فائق للجسيمات الأولية المعروفة؛ وقد يعني ذلك عدم وجود هؤلاء الشركاء، وبالتالي عدم صحة نظرية الأوتار. إلاّ أن العديد من فيزيائيي

الجسيمات يعتقدون أن هؤلاء الشركاء الفائقين ذوو كتل كبيرة، وهم بالتالي خارج إطار مقدرتنا التجريبية على الملاحظة. ويعمل فيزيائيو اليوم على بناء مسرّع عملاق في جنيف بسويسرا يُدعى الصادم الهادروني الكبير، ويعلّقون آمالاً كبيرة على مقدرته القوية على كشف الجسيمات الفائقة الشراكة. وسيكون هذا المسرّع جاهزاً للعمل قبل سنة 2010، وعندها يمكن التحقق تجريبياً من التناظر الفائق. وكما قال شفارتز: "يجب أن يتمّ اكتشاف التناظر الفائق قبل مرور فترة طويلة، وعندها سيكون الأمر بالغ الإثارة[17] ".

إلاّ أننا، مع ذلك، يجب أن نضع نصب أعيننا أمرين إثنين، أولهما أن العثور على جسيمات فائقة الشراكة لا يعني بمفرده صحة نظرية الأوتار. فالتناظر الفائق، رغم اكتشافه في إطار هذه النظرية، إلاّ أنه متضمَّن بنجاح أيضاً في نظريات الجسيمات النقطية، أي أنه ليس حكراً على نظرية الأوتار. وبالمقابل، وإذا لم يتمّ كشف هذه الجسيمات باستخدام الصادم الهادروني الكبير فإن ذلك لا يعني بمفرده عدم صحة النظرية، إذ قد تكون هذه الجسيمات ثقيلة إلى الحد الذي يتعذّر معه على هذه الآلة ملاحظتها.

ومع أخذ هذين الأمرين بالاعتبار، وإذا ما تمّ فعلاً التأكّد من وجود الجسيمات فائقة الشراكة فإن ذلك سيكون دليلاً ظرفياً قوياً ومثيراً على صحة نظرية الأوتار.

جسيمات ذوات شحنات كسرية

ومع سمة الشراكة الفائقة في نظرية الأوتار، فإن لها بصمة تجريبية مثيرة أخرى، وإن تكن أقل شمولية من البصمة الأولى، ترتبط بالشحنات الكهربائية التي تحملها الجسيمات الأولية. ذلك أن لهذه الجسيمات، في النموذج المعياري، تشكيلة محدودة جداً من هذه الشحنات التي تبلغ قيمها في الكواركات ومضاداتها $\frac{1}{3}$، $\frac{2}{3}$، $-\frac{1}{3}$، $-\frac{2}{3}$، في حين تبلغ في الجسيمات الأخرى 0، 1، −1؛ وتغطي التركيبات المختلفة لهذه الجسيمات كل أشكال المادة المعروفة في الكون. أما في نظرية الأوتار فقد تتوافق بعض أنماط الاهتزاز الرنينية وجسيمات تحمل شحنات كهربائية تختلف كثيراً عن ذلك، فقد تأخذ قيماً