«إلى الأبد» زمن طويل

اللانهاية ليست مجرد رقم كبير جداً، وهذا هو المهم حولها. إنها تختلف نوعياً عن شيء ما لا يوصف بأكثر من أنه ضخم بشكل هائل، إلى حد لا يمكن تصوره. إذا كان الكون سيواصل توسعه دائماً بحيث لا تكون له نهاية، فمعنى هذا أنه سوف يؤبِّد، ولكي يؤبِّد، يجب أن يكون له عمر زمني لانهائي. فإذا صح ذلك، فإن أية عملية فيزيائية، مهما كانت بطيئة أو غير محتملة، سوف تحدث في وقت ما، تماماً كما قد يتمكن في النهاية قرد، يعبث دائماً بآلة كاتبة، من طبع أعمال وليم شكسبير.

تؤمِّن ظاهرة إصدار موجات الجذب، التي ناقشتها في الفصل الخامس، مثالاً جيداً. تضيع الطاقة على شكل إشعاع جذبي يسبب تبدلات واضحة فقط في حالة العمليات الفلكية الأكثر عنفاً. فإصدار حوالي ميلّي واط بسبب دوران الأرض حول الشمس، يمارس تأثيراً متناهياً في الصغر على حركة الأرض. ولكن تفريغ ولو ميلّي واط واحد، على مدى ترليونات فوق ترليونات من السنين، سيدفع الأرض إلى التحرك حلزونياً نحو الشمس. ومن المحتمل طبعاً أن تغمرها الشمس قبل هذا بزمن طويل، ولكن النقطة الأساسية هي أن العمليات المهملة بمقاييس التوقيت البشرية قد تسيطر أخيراً، مع مثابرتها، وبالتالي تعمل على تحديد المصير النهائي للأنظمة الفيزيائية.

دعونا نتخيل حالة الكون بعد مضي وقت طويل جدا، جداً في المستقبل - في ترليون - ترليون سنة، مثلاً. النجوم احترقت منذ زمن طويل؛ الكون مظلم. ولكنه ليس فارغاً. فوسط الاتساع الأسود للفضاء تتربص ثقوب سوداء تدور حول نفسها، ونجوم نيوترونية تائهة، وأقزام سود-بضع أجسام كوكبية أيضاً. في هذه الحقبة، تكون كثافة هذه الأجسام منخفضة جداً: توسَّع الكون إلى عشرة آلاف ترليون حجمه اليوم.

الدقائق الثلاث الأخيرة

ستمثل الجاذبية معركة غريبة. يحاول الكون المتوسع أن يجذب كل جسم بعيداً عن جيرانه، ولكن التجاذبات الثاقلية المتبادلة تقاوم هذا وتحاول تقريب الأجسام من بعضها بعضاً. وبالنتيجة، تبقى بعض مجموعات من الأجسام - على سبيل المثال، عناقيد المجرات، أو ما يُظَن أنها مجرات بعد آماد من التنكس البنيوي - مقيدة ثقالياً، ولكن هذه المجموعات تنجرف دائماً بعيداً عن المجموعات المجاورة لها. وتعتمد الحصيلة النهائية للعبة شد الحبل هذه على مدى السرعة التي تتباطأ بها سرعة التوسع. فكلما كانت كثافة المادة في الكون أدنى، كان «تشجيع» هذه المجموعات من الأجسام أكبر على التحرر من جيرانها والانتقال بعيداً بحرية واستقلال.

العمليات البطيئة، إنما العنيدة، للجاذبية تمارس سيادتها داخل نظام مقيد ثقالياً. فإرسال الموجات الجذبية، على الرغم من ضعفه، يستنزف، بشكل ماكر، طاقة النظام، مما يسبب موتاً حلزونياً بطيئاً. وبصورة تدريجية جداً، تقترب نجوم ميتة ببطء إلى نجوم أخرى ميتة أو ثقوب سوداء، وتلتحم في احتفال تهتكي ممتد لالتهام النوع لنوعه. وتستغرق الموجات الجذبية ترليون ترليون سنة لكي تفسد تماماً مدار الشمس، تلك الجمرة القزمية السوداء الخامدة التي تنزلق بصمت نحو وسط المجرة، حيث ينتظرها هناك ثقب عملاق أسود لكي يلتهمها.

ولكن، ليس من المؤكد أبداً أن الشمس الخامدة ستواجه موتها النهائي بهذه الطريقة، لأنها، مع انسياقها ببطء نحو الداخل، سوف تواجه من حين لآخر نجوماً أخرى. فيمر أحياناً قرب منظومة ثنائية - نجمان يدور أحدهما حول الآخر في عناق تجاذبي وثيق. وعندئذٍ يتم إعداد المسرح لظاهرة غريبة تعرف بـ«النقَّيْفَة». فحركة جسمين في مدار حول بعضهما بعضاً يكشف عن بساطة كلاسيكية. وكانت هذه مشكلة -في زي كوكب يدور حول الشمس - شغلت بال كبلر ونيوتن وأدت إلى ولادة العلم الحديث. في وضع مثالي، وتجاهل إشعاع الجاذبية، تكون حركة الكوكب منتظمة ودورية. ومهما انتظر المرء، فإن الكوكب سيواصل دورانه بالطريقة نفسها. ولكن الوضع يختلف، إلى حد مثير، عند وجود جسم ثالث - نجم وكوكبين، مثلاً، أو ثلاثة نجوم. عندئذٍ، لن تكون الحركة بسيطة ودورية. فنموذج القوى المتبادلة بين الأجسام الثلاثة يتغير دائماً بطريقة معقدة. ونتيجة لذلك، فإن طاقة المنظومة لاتُقتَسَم

بالتساوي بين الشركاء، حتى لو كانت أجساماً متماثلة. وبدلاً من ذلك، وفي رقصة معقدة، يحصل جسم واحد، ثم آخر، على نصيب الأسد من الطاقة. ويمكن أن يكون سلوك المجموعة عشوائياً خلال فترات طويلة من الزمن: في الواقع، إن مشكلة الأجسام الثلاثة لدينميات الجاذبية تعتبر مثالاً جيداً لما يعرف بالنظام الشواشي. وقد يصدف أن «يعتصب» جسمان، فينقلان مقداراً كبيراً من الطاقة المتاحة إلى جسم ثالث يُطرَد من المنظومة تماماً، كقذيفة «نقَّيْفَة». ومن هنا أتت عبارة «نقَّيْفَة الجاذبية».

يمكن لآلية «النقيفة» أن تطرد نجوماً من عناقيد النجوم، أو حتى من المجرة بالذات. وفي المستقبل البعيد، سوف تُقذَف الأكثرية العظمى من النجوم، والكواكب الخامدة، والثقوب السوداء إلى الفراغ بين المجرات بهذه الطريقة - ربما لمواجهة مجرة أخرى تتفكك، إن لم يكن للتجوال إلى الأبد في الفراغ الهائل المتوسع. ولكن العملية بطيئة: سيستغرق اكتمال هذا الحل زمناً أكبر من العمر الحالي للكون بحوالي بليون مرة. وعلى العكس، فإن النسبة القليلة الباقية من الأجسام سوف تهاجر إلى أواسط المجرات وتندمج لتشكيل ثقوب سوداء عملاقة.

بيَّنتُ في الفصل الخامس أن لدى الفلكيين دليلاً وجيهاً على وجود ثقوب سوداء هائلة في مراكز المجرات، تلتهم بشراهة الغازات الدائرة وتطلق، نتيجة لذلك، كميات ضخمة من الطاقة. هذا الهوس بالتغذية ينتظر معظم المجرات في الوقت المناسب، ويتواصل حتى تكون المادة التي تحيط بالثقب الأسود قد امتُصَّت أو قُذِفَت، ربما لتتراجع أخيراً من جديد أو لتنضم إلى الغازات التي تتناقص تدريجياً بين المجرات. وعندئذٍ، سيبقى الثقب الأسود المنتفخ ساكناً، فقط مع نجم نيوتروني متشرد بين حين وآخر أو ثقب أسود صغير يغوص فيه. ولكن هذا لن يكون نهاية تاريخ الثقب الأسود. ففي عام 1974، اكتشف ستيفن هوكينغ أن الثقوب السوداء ليست سوداء تماماً بعد كل شيء. بل ترسل، بدلاً من ذلك، وميضاً ضعيفاً من الإشعاع الحراري.

يمكن فهم ظاهرة هوكينغ على نحو ملائم فقط بمساعدة النظرية الكمية للمجالات، وهو فرع صعب من الفيزياء كنت ألمحت إليه في سياق نظرية تضخم الكون. لنتذكر أن هناك مبدأ مركزياً في نظرية الكم هو مبدأ الريبة عند هايزنبرغ؛ ووفقاً لهذا المبدأ، فإن الجسيمات الكمية لا تمتلك قيماً محددة بوضوح لكل صفاتها. فعلى

سبيل المثال، لا يمكن أن يملك فوتون أو إلكترون قيمة محددة لطاقته في لحظة معينة من الزمن. وفي الواقع، يمكن لجسيم دون ذري أن «يستلف» طاقة طالما أنه يعيد ما استلفه بسرعة.

كما ذكرت في الفصل الثالث، فإن التباس الطاقة يؤدي إلى بعض النتائج الغريبة، كالوجود العابر في المكان الفارغ ظاهرياً للجسيمات القصيرة العمر، أو الافتراضية. يقود هذا إلى مفهوم غريب لـ «الفراغ الكمي» - فراغ، بعيداً عن كونه فارغاً وخاملاً، يعج بنشاط جسيمات افتراضية لا تهدأ. ومع أن هذا النشاط لا يُلاحَظ عادة، إلا أنه يمكن أن يسبب نتائج فيزيائية. فتظهر واحدة من تلك النتائج عندما يتشوش نشاط فراغي بوجود مجال تجاذبي.

هناك حالة قصوى تتعلق بالجسيمات الافتراضية التي تبدو قريبة من أفق الحوادث لثقب أسود. نحن نذكر أن الجسيمات الافتراضية تعيش على الطاقة المستلفة لفترة قصيرة جداً، يتوجب بعدها «إعادة» السلفة واختفاء هذه الجسيمات. وإذا تلقّت الجسيمات الافتراضية، لأي سبب، تعزيزاً بالطاقة كبيراً بما يكفي من مصدر خارجي أثناء الزمن القصير المخصص، فإن السلفة يمكن أن تُسدَّد نيابة عنها. وعندئذٍ، تصبح هذه الجسيمات في حل من واجب الاختفاء من أجل تسديدها. ونتيجة لهذا الإحسان، فإن الجسيمات الافتراضية تترقى إلى جسيمات حقيقية، حيث يصبح بمقدورها أن تتمتع بوجود دائم تقريباً.

ووفقاً لما يقوله هوكينغ، فإن هذا الإحسان بدفع الدين هو ما يحدث قرب ثقب أسود. في هذه الحالة، فإن «المحسن» الذي يمد بالطاقة المطلوبة هو المجال التثاقلي للثقب الأسود. ويجري عقد الصفقة كما يلي: تتكون الجسيمات الافتراضية عادة على شكل أزواج تتحرك في اتجاهات متعاكسة. فلنتصور زوجاً من جسيمات ظهرت حديثاً مباشرة خارج أفق الحوادث. هَبْ أن حركة الجسيمات ستلقي بأحدها عبر الأفق إلى الثقب. وسيلتقط هذا في طريقه قدراً كبيراً من الطاقة من الجاذبية القوية للثقب. اكتشف هوكينغ أن هذه المساعدة بالطاقة تكفي لـ«تسديد السلفة»، تماماً وترقّي كلا الجسيمين: الساقط وشريكه - ما زال يقيم خارج أفق الحوادث- إلى جسيمين حقيقيين. أما مصير الجسيم المهجور خارج الأفق فمسألة غير مؤكدة. فهو إما أن ينتهي أيضاً إلى

أن يمتصه الثقب الأسود أو أن يتطاير بسرعة كبيرة ويفلت تماماً من الثقب الأسود. وهكذا، يتنبأ هوكينغ بأنه يجب أن يكون هناك تدفق ثابت من هؤلاء الآبقين يجري بعيداً إلى الفضاء من جوار الثقب، مكوِّناً ما يعرف بإشعاع هوكينغ.

يجب أن تكون ظاهرة هوكينغ أقوى بالنسبة للثقوب السوداء المجهرية. بما أنه يمكن للإلكترون الافتراضي، مثلاً، أن ينتقل بسرعة 10^{-11} سم تقريباً ضمن ظروف طبيعية قبل استرداد السلفة، فإن الثقوب السوداء الأصغر من هذا فقط (حجوم نووية، تقريباً) ستكون قادرة بفعالية على تكوين جدول من الإلكترونات. إذا كان الثقب أكبر من هذا، فلن يكون الوقت كافياً لمعظم الإلكترونات الافتراضية لعبور الأفق قبل تسديد السلفة.

إن المسافة التي يمكن أن يجتازها جسيم افتراضي منوطة بأمد حياته، الذي يمليه بدوره - عن طريق مبدأ ريبة هايزنبرغ - حجم الطاقة المستلفة. فكلما كانت السلفة كبيرة، كانت حياة الجسيم أقصر. والمكوِّن الرئيسي لسلفة الطاقة هي طاقة كتلة الجسيم في حالة السكون. وفي حالة إلكترون ما، يجب أن تكون السلفة، على الأقل، مساوية لطاقة كتلة الإلكترون في حالة السكون. وفيما يتعلق بجسيم ذي كتلة أكبر في حالة السكون - بروتون، مثلاً- يجب أن تكون السلفة أكبر وبالتالي، لأجل أقصر، وهكذا تكون المسافة التي يجتازها أقل. ولذلك، فإن إنتاج بروتونات عن طريق ظاهرة هوكينغ يحتاج إلى ثقب أسود أصغر حتى من ثقب ذي أبعاد نووية. وعلى العكس، فإن الجسيمات ذات الكتلة الأدنى في حالة السكون من الإلكترونات - كالنيوترينوات، مثلاً، يكوِّنها ثقب أسود أكبر من أبعاد نووية. أما الفوتونات، التي كتلتها صفر في حالة السكون، فيكوِّنها ثقب أسود أياً كان حجمه. والثقب الأسود، حتى لو كانت له كتلة شمسية واحدة، فإنه يمتلك تدفق هوكينغ للفوتونات، وربما للنيوترونات أيضاً؛ ولكن شدة التدفق في هذه الحالات تكون ضعيفة جداً.

استخدام كلمة «ضعيف» هنا ليس من قبيل المبالغة. فقد اكتشف هوكينغ أن طيف الطاقة التي ينتجها ثقب أسود هو نفسه كذاك الذي يشع من جسم حار، وهكذا، فإن لغة درجة الحرارة هي الطريقة الوحيدة لشرح قوة ظاهرة هوكينغ. فبالنسبة لثقب ذي حجم نووي (قطر 10^{-13} سم)، تكون درجة الحرارة عالية جداً -

حوالي عشرة بلايين درجة. وعلى العكس، فإن درجة الحرارة لثقب أسود يزن كتلة شمسية واحدة، بقطر يتجاوز 1كم، تكون أقل من عُشْر المليون من درجة فوق الصفر المطلق. ولن يرسل الجسم الكامل أكثر من مليون - مليون - المليون من الواط في إشعاع هوكينغ.

واحد من شذوذات ظاهرة هوكينغ هو أن درجة حرارة الإشعاع ترتفع مع انخفاض كتلة الجسم الأسود. ومعنى هذا أن درجة الحرارة في الثقوب الصغيرة أعلى منها في الكبيرة. عندما يشع ثقب أسود، فإنه يفقد طاقة وبالتالي كتلة، ولهذا، فهو يتقلص. وبالنتيجة، يصبح أشد حرارة ويشع بقوة أكبر، ولذلك، تزداد سرعة تقلصه. العملية غير مستقرة أصلاً وأخيراً تولي الأدبار، وثقب أسود يُصدِر طاقة ويتقلص حجمه دائماً مع ازدياد السرعة.

تتنبأ ظاهرة هوكينغ بأن كافة الثقوب السوداء ستختفي ببساطة في النهاية في هبة إشعاع. وستكون اللحظات الأخيرة مثيرة، حيث تبدو كانفجار قنبلة نووية كبيرة، ومضة قصيرة من طاقة حرارية شديدة يعقبها - لا شيء. ذلك، على الأقل، ما تراه النظرية. ولكن بعض الفيزيائيين لا تسعدهم إمكانية انهيار جسم مادي لتشكيل ثقب أسود، يتلاشى بدوره مخلِّفاً إشعاعاً حرارياً لا غير. ويخشى هؤلاء من أن ينتهي جسمان مختلفان جداً إلى إنتاج إشعاع حراري متماثل، مع عدم توفر معلومات عن الجسم الأصلي الباقي على قيد الحياة. إن تأثيراً متلاشياً كهذا ينتهك كافة أنواع قوانين الحفظ المعتبرة. وهناك اقتراح بديل يرى أن اختفاء الثقوب السوداء يُخلِّف بقية صغيرة جداً تحتوي، بطريقة أو بأخرى، على كميات كبيرة من المعلومات. وأياً كانت الطريقة، فإن الجزء الأكبر من كتلة الثقب يشع على شكل حرارة أو ضوء.

عملية هوكينغ بطيئة إلى حد لا يمكن إدراكه. فجسم أسود ذو كتلة شمسية واحدة يستغرق 10^{66} سنة حتى يختفي، بينما يستغرق ثقب فائق الجسامة زمناً أكبر، حوالي 10^{93} سنة. والعملية لن تخرج إلى حيز التنفيذ أيضاً قبل أن تهبط درجة الحرارة الخلفية للكون إلى أدنى من درجة حراة الثقب الأسود، وإلا كسبت الحرارة المتدفقة إلى الثقب من الكون المحيط إلى صفها الحرارة المتدفقة خارجة من الثقب عن طريق ظاهرة هوكينغ. والآن، تكون حرارة الإشعاع الحراري الخلفي المتخلف من الانفجار الكبير

7- «إلى الأبد» زمن طويل جداً

بحدود ثلاث درجات فوق الصفر المطلق، ويستغرق 10^{22} سنة قبل أن يبرد إلى المستوى الذي يكون عنده ضياع صاف للحرارة من الثقوب السوداء ذات الكتل الشمسية. وعملية هوكينغ ليست شيئاً يمكن لأحد أن يجلس حوله ويراقبه.

ولكن «إلى الأبد» زمن طويل، ومع التسليم بفكرة «إلى الأبد»، فإن كافة الثقوب السوداء - حتى الفائقة الجسامة منها - ربما ستختفي في النهاية، ويقدح موتها ومضات خاطفة من الضوء في الظلمة الحالكة للّيل الكوني السرمدي، إنها نقش عابر على ضريح الوجود الزائل لبليون من الشموس المشتعلة.

فما الذي يبقى؟

ما كل مادة تسقط في الثقوب السوداء. وعلينا أن نضع في حسابنا النجوم النيوترونية والأقزام السود والكواكب المتشردة التي تهيم وحيدة إلى الأحياز بين المجرّيَّة الواسعة، ناهيك عن كميات هزيلة من غاز وغبار لم تجتمع مع بعضها بعضاً لتشكل نجوماً، ونجيمات، ومذنبات، ونيازك، وقطع شاذة ضخمة من صخر سبب الفوضى في منظومات النجوم. فهل تعيش هذه الأجسام إلى الأبد؟

تواجهنا هنا صعوبات نظرية. علينا أن نعرف ما إذا كانت مادة عادية - مادتك ومادتي وكوكب الأرض - مستقرة بصورة مطلقة. نجد الدليل النهائي للمستقبل في ميكانيكا الكم. ومع أن العمليات الكمية ترافق، بصورة طبيعية، منظومات ذرية ودون ذرية، فإن قوانين فيزياء الكم تنطبق على كل شيء، بما في ذلك الأجسام العيانية. التأثيرات الكمية في الأجسام الكبيرة ضئيلة جداً، ولكنها، على المدى الطويل، تصبح قادرة على إحداث تغييرات رئيسية.

العلامتان المميزتان لفيزياء الكم هما الريبة والاحتمال. ففي حقل الكم لا شيء مؤكد، باستثناء فائدة المراهنة. هذا يعني أنه إذا كانت عملية ما ممكنة بأية حال، فإنها سوف تحدث في النهاية إذا توفر لها الزمن الكافي، ولكنها قد تكون غير محتملة. يمكن أن نلاحظ هذه القاعدة في العمل في حالة النشاط الإشعاعي. فنواة اليورانيوم-238 مستقرة تماماً تقريباً. ولكن هناك فرصة ضئيلة جداً لأن تطلق جسيم ألفا وتتحول إلى ثوريوم. ولتوخي الدقة، هناك بعض من احتمال ضئيل جداً في وحدة الزمن في أن نواة يورانيوم معلومة سوف تتفكك. وتستغرق عملية التفكك هذه ما يقرب

من أربعة بلايين ونصف البليون سنة، ولكن، بما أن قوانين الفيزياء تحتاج إلى احتمال ثابت في وحدة الزمن، فإن أية نواة من اليورانيوم سوف تتفكك في النهاية بالتأكيد.

يحدث الانحلال الألِفي الفعال شعاعياً بسبب وجود شيء من الريبة في موضع البروتونات والنيوترونات التي تكوِّن نواة ذرة اليورانيوم، ولهذا، يكون هناك دائماً احتمال ضئيل جداً في أن تتوضع مجموعة من هذه الجسيمات، بصورة موقتة، خارج النواة، حيث تُدفَع بسرعة من هناك بعيداً. وبالمثل، هناك ريبة ضئيلة أيضاً، ولكنها ليست صفراً، في الموضع الدقيق لذرة ما في مادة صلبة. فعلى سبيل المثال، تقيم ذرة من كربون في حجر ماسي في موضع محدد تماماً في الشبكة البلّورية، وستكون هذه الإقامة مستقرة للغاية في درجة الحرارة القريبة من الصفر التي يُتَوَقع أن يكون عليها الكون في المستقبل البعيد، ولكن ليس بصورة تامة. فهناك دائماً ظل من الريبة في موضع الذرة، يتضمن احتمالاً ضئيلاً بأن الذرة قد تقفز تلقائياً من مكانها في الشبكة وتظهر في مكان آخر. وبسبب هذه العمليات المهاجرة، لا شيء موثوق فعلاً - حتى ولا مادة صلبة كحجر الماس. وبدلاً من ذلك، فإن المادة الصلبة ظاهرياً تشبه سائلاً لزجاً للغاية، وخلال آماد هائلة يمكن أن تسيل، بسبب التأثيرات الكمية الميكانيكية. ويخمِّن الفيزيائي النظري فريمان دايسون أنه بعد حوالي 10^{65} سنة، سوف يتضاءل إلى خرزة كروية، ليس فقط كل حجر ماسي مقطوع بعناية، بل ستتشوه أيضاً كل كتلة ضخمة من صخر إلى كرة ملساء.

يمكن أن تؤدي ريبة الموضع أيضاً إلى تحول نووي. فعلى سبيل المثال، تعالوا ندرس ذرتين متجاورتين من الكربون في بلّورة ماسية. نادراً جداً ما تسبب إعادة تعيين الموضع العفوية لإحدى الذرتين ظهور نواتها، في أية لحظة، مباشرة بعد نواة جارتها. وعندئذٍ، يمكن لقوى الجذب النووية أن تسبب اندماج النواتين لتشكيل نواة مغنزيوم. فالاندماج النووي، إذاً، لا يحتاج إلى درجات حرارة عالية جداً: الاندماج على البارد ممكن، ولكنه يستغرق مدة هائلة من الزمن. وقدر دايسون أن اندماجاً كهذا يحدث بعد 10^{1500} سنة (أي، 1 متبوعاً بألف وخمسمئة صفر!)، وستتحول المادة كلها بهذه الطريقة إلى الشكل النووي الأكثر استقراراً، الذي هو الحديد العنصري.

ولكن المادة النووية لن تعيش، بأية طريقة، هذا الأمد الطويل بسبب عمليات

7 - «إلى الأبد» زمن طويل جداً

التحول الأكثر سرعة والتي تبقى، مع ذلك، بطيئة إلى حد لا يُصدَّق. ويَفترِض دايسون في تقديره أن البروتونات (والنيوترونات المرتبطة في نوى) مستقرة بشكل مطلق. وبمعنى آخر، إذا لم يسقط بروتون ما في ثقب أسود وبقي، بخلاف ذلك، ساكناً، فإنه سيبقى إلى الأبد. ولكن هل يمكن التأكد من صحة هذا القول؟ عندما كنت طالباً، ما كان أحد يشك في صحته. كانت البروتونات هي الباقية إلى الأبد. كانوا يفترضون أنها جسيمات مستقرة تماماً. ولكن، كان هناك دائماً شك مزعج حول هذا. وتتصل المشكلة بوجود جسيم يدعى بوزيترون[*] Positron، الذي يماثل الإلكترون باستثناء أنه، كالبروتون، إيجابي الشحنة. البوزيترونات أخف بكثير من البروتونات، وهكذا، إذا تساوت كل الظروف الأخرى، تفضل البروتونات أن تتحول إلى بوزيترونات: إنه لمبدأ فيزيائي عميق القائل إن المنظومات الفيزيائية تسعى إلى الحالة الأدنى لطاقتها، والكتلة الصغيرة تعني طاقة أدنى. واليوم، لا يمكن لأحد أن يقول لماذا لا تمضي البروتونات ببساطة وتفعل ذلك، ولهذا، يفترض فيزيائيون ببساطة أن هناك قانوناً في الطبيعة يمنعها. حتى الآن، لم يكن هذا الموضوع مفهوماً بصورة جيدة أبداً، ولكن، ظهرت في أواخر السبعينيات صورة أكثر وضوحاً تتعلق بالطريقة التي فيها تحث قوى نووية جسيمات لكي تتحول إلى بعضها بعضاً وفقاً للآلية الكمية. أفردت أحدث النظريات مكاناً طبيعياً للقانون الذي يمنع تفكك البروتونات، ولكن معظم هذه النظريات تتنبأ أيضاً بأن القانون ليس فعالاً 100%. يمكن أن يكون هناك احتمال ضئيل جداً بأن يتحول بروتون معلوم حقاً إلى بوزيترون. ونبوءة تقول إن الكتلة المتبقية تظهر جزئياً على شكل جسيم متعادل كهربائياً، مثل البيون Pion المعروف، وجزئياً على شكل طاقة حركة (منتجات التفكك التي تتكون تتحرك بسرعة عالية).

في أبسط النماذج النظرية، نجد أن تفكك البروتون يحتاج إلى زمن نسبي مقداره 10^{28} سنة، وهو أمد أطول من العمر الحالي للكون ببليون بليون مرة. ولذلك يمكن لأحدنا أن يتصور أن موضوع تفكك البروتونات سوف يبقى من قبيل الفضول الأكاديمي الصرف. مع ذلك، يجب أن نتذكر أن العملية عملية ميكانيكية - كمية،

[*] إلكترون موجب. - المترجم.

وبالتالي، فهي احتمالية متأصلة في الطبيعة: 10^{28} سنة عمر نسبي متوقع، وليس عمراً فعلياً لكل بروتون. ومع افتراض وجود ما يكفي من البروتونات، فالفرصة طيبة لأن يتفكك أحدها تحت بصرنا بالذات. وفي الواقع، لو أُعطينا 10^{28} بروتوناً، لتوقعنا أن واحداً تقريباً يتفكك كل سنة، و10^{28} بروتوناً نجدها في 10 كغ فقط من المادة.

ولكن عمراً بأمد كهذا للبروتون كان قد استُبعِد بالتجربة قبل شيوع النظرية. مع ذلك، هناك نسخ مختلفة للنظرية تعطي أعماراً أطول: 10^{30} أو 10^{32} سنة، أو حتى أطول (تتنبأ بعض النظريات بعمر 10^{80} سنة). وتقع القيم الأدنى على حافة إمكانية الاختبار التجريبي. وزمن التفكك 10^{32} سنة، مثلاً، يعني أن أحدنا قد يفقد بروتوناً واحداً أو اثنين من جسمه خلال حياته. ولكن كيف يمكن اكتشاف هذه الحوادث النادرة؟

كانت التقنية المختارة تقضي بجمع آلاف الأطنان من المادة ومراقبتها على مدى عدة أشهر بأجهزة كشف حساسة مُوَلَّفة بحيث تقدحها منتجات حادثة من حوادث تفكك أحد البروتونات. ومن سوء الحظ أن يكون البحث عن تفكك البروتون كالبحث عن إبرة في كومة من القش، لأن حوادث التفكك يحجبها عدد كبير جداً من حوادث مماثلة تسببها منتجات الإشعاع الكوني. فالأرض تُقذَف باستمرار بجسيمات عالية الطاقة من الفضاء، الذي ينتج خلفية موجودة دائماً من الحطام دون الذري. ولتخفيف هذا التداخل، يجب إجراء التجارب في أمكنة عميقة تحت الأرض.

أُجريَت هذه التجربة على عمق يتجاوز نصف ميل تحت الأرض، في منجم للملح قرب كليفلاند، في أوهايو. كان الجهاز يتألف من عشرة آلاف طن من ماء فائق النقاء في خزان مكعب تحيط به أجهزة كاشفة. وكان قد تم اختيار مياه شفافة لمساعدة الأجهزة الكاشفة على كشف أكبر عدد من البروتونات فوراً. وإليكم الفكرة: إذا تفكك البروتون بالطريقة التي تتوقعها النظريات الحديثة، عندئذٍ يُنتِج، كما شرحت، بيوناً Pion متعادلاً كهربائياً إضافة إلى بوزيترون واحد. وبدوره، يتفكك البيون بسرعة، عادة إلى فوتونيْن نشيطين جداً، أو أشعة غاما. وأخيراً، تواجه هذه الأشعة نُوىً في الماء وتكوِّن كل منها زوجاً مؤلفاً من إلكترون وبوزيترون، وهو أيضاً نشيط جداً. وفي الواقع، ستكون هذه الإلكترونات والبوزيترونات الثانوية نشيطة جداً حتى أنها تنتقل بسرعة قريبة من سرعة الضوء، حتى في الماء.

7 - «إلى الأبد» زمن طويل جداً

ينتقل الضوء بسرعة 300,000 كم/ثا في الخواء، وهذه هي السرعة النهائية التي يمكن أن ينتقل بها أي جسيم. ولكن الماء يمارس تأثيراً يخفف، إلى حد ما، سرعة الضوء إلى ما يقرب 230,000 كم/ثا. ولذلك، فإن الجسيم دون الذري العالي السرعة الذي يتحرك في الماء بسرعة تقارب 300,000 كم/ثا ينتقل، في الواقع، بسرعة أكبر من سرعة الضوء في الماء. عندما تطير طائرة بسرعة تتجاوز سرعة الصوت، فإنها تُحدِث دوياً صوتياً(*). وبالمثل، إن جسيماً مشحوناً ينتقل عبر وسط ما بسرعة أكبر من سرعة الضوء في ذلك الوسط يُحدِث موجة صدمة كهرطيسية مميزة - تعرف باسم إشعاع سرينكوف، باسم مكتشفه الروسي. ولهذا، عمل القائمون على تجربة أوهايو على نصب أجهزة كاشفة حساسة للضوء بحثاً عن ومضات سيرِنكوف. ولتمييز حوادث تفكك البروتونات من النيوترينوات الكونية والحطام الآخر دون الذري الزائف، راح القائمون على التجربة يبحثون عن بصمة مميزة - زوج متزامن ظَهراً لظهر من نبضات ضوء سيرنكوف، التي يصدرها زوج الإلكترون بوزيترون الذي يتحرك بصورة معاكسة.

ومن سوء الحظ أنه بعد عدة سنوات من العمل فشلت تجربة أوهايو في إيجاد دليل مقنع على تفكك البروتون - مع أنها، كما لاحظنا في الفصل الرابع، التقطت النيوترينوات من المستعر الأعظم 1987 A. (وكما هي حال العلم غالباً، فإن البحث عن شيء يؤدي إلى اكتشاف شيء آخر غير متوقع). وفي الوقت الذي وضعت فيه هذا الكتاب، تمخضت تجارب أخرى عن نتائج عقيمة، مع أنها استخدمت طرقاً مختلفة. ومعنى هذا أن البروتونات لا تتفكك. ومن ناحية أخرى، قد يعني أنها تتفكك ولكن أمد حياتها يتجاوز 10^{32} سنة. وقياس سرعة أدنى من هذه السرعة للتفكك هو فوق الإمكانية التجريبية الحالية، وربما يبقى تفكك البروتونات مجهولاً في المستقبل المنظور.

حفز البحث بخصوص تفكك البروتونات مؤلَّفٌ نظري حول مختلف النظريات الكبرى الموحدة، التي وضعت هدفاً لها توحيد القوة النووية القوية (القوة التي تربط البروتونات والنيوترونات مع بعضها بعضاً في النوى) مع القوة النووية الضعيفة (المسؤولة عن نشاط بيتا الإشعاعي) والقوة الكهرطيسية. يحدث تفكك البروتونات نتيجة لتمازج

(*) هو ما يُطلَق عليه «اختراق حاجز الصوت». - المترجم.

دقيق بين هذه القوى. ولكن، حتى لو تبيَّن في النهاية خطأ هذه الفكرة للتوحيد الكبير، فإنه يبقى هناك احتمال أن البروتونات تتفكك بطريقة أخرى - طريقة تتضمن القوة الأساسية الرابعة في الطبيعة، أي الجاذبية.

لكي ندرك كيف يمكن للجاذبية أن تسبب تفكك البروتونات، من الضروري أن نضع في اعتبارنا حقيقة أن البروتون ليس جسيماً عنصرياً حقاً وشكلاً يشبه النقطة. ولكنه، في الواقع، جسم مركب مؤلف من ثلاثة جسيمات أصغر تسمى كواركات Quarks. وفي معظم الوقت، يكون قطر البروتون حوالي 10/1 ترليون سم، وهو متوسط المسافة بين الكواركات. ولكن الكواركات لا تبقى ساكنة، بل تبدل مواضعها باستمرار داخل البروتون، بسبب الريبة الميكانيكية الكمية. فبين حين وآخر، يدنو كواركان من بعضهما بعضاً إلى حد متقارب جداً. ولكن من النادر أن تتقارب الكواركات الثلاثة إلى درجة كبيرة. ومن المحتمل أن تتوصل الكواركات إلى تقارب وثيق فيما بينها إلى حد تتغلب فيه قوة الجاذبية بينها، المهملة تماماً في الحالة الطبيعية، على كل القوى الأخرى. فإذا حدث هذا، فإن الكواركات ستجتمع مع بعضها بعضاً لتشكل ثقباً أسود صغير جداً. وفي الواقع، ينهار البروتون تحت جاذبيته الخاصة عن طريق شق نفق ميكانيكي كمي. الثقب الصغير الناتج غير مزعزع إلى درجة كبيرة - لنتذكر ظاهرة هوكينغ - ويتلاشى فوراً تقريباً، مكوِّناً بوزيتروناً. وتقديرات مدى الحياة فيما يتعلق بتفكك البروتونات بهذه الطريقة ملتبسة جداً، وتتراوح من 10^{45} سنة إلى 10^{220} سنة، وهو رقم هائل!

إذا كانت البروتونات تتفكك بعد أمد هائل، فإن النتائج ستكون عميقة بالنسبة للمستقبل البعيد للكون. فالمادة كلها ستكون غير مستقرة، وستختفي في نهاية الأمر. والأجسام الصلبة، كالكواكب، التي تفادت السقوط إلى ثقب أسود لن تبقى إلى الأبد. وبدلاً من ذلك، سوف تتبخر بصورة تدريجية جداً. يدل العمر 10^{32} سنة لبروتون ما ضمناً على أن الأرض تفقد ترليون بروتون كل ثانية. وبهذا المعدل، سيكون كوكبنا قد تلاشى، بصورة مؤثرة، بعد 10^{33} سنة تقريباً، على فرض أن شيئاً آخر لن يدمره قبل ذلك.

ولا تستثنى النجوم النيوترونية من هذه العملية. فالنيوترونات أيضاً مركبة من ثلاثة كواركات ويمكن أن تتحول إلى جسيمات أخف بواسطة آليات تشبه تلك التي

تؤدي إلى موت البروتونات. (النيوترونات المعزولة غير مستقرة في أية حالة، وتتفكك في غضون خمس عشرة دقيقة). وعلى المنوال نفسه، تموت أيضاً النجوم القزمة البيضاء، والصخور، والغبار، والمذنبات، وسحابات الغاز الرقيقة، وكل الأثاث الآخر الفلكي في حينه. والأطنان الـ 10^{48} من المادة العادية التي نشاهدها حالياً منتشرة في كافة أنحاء الكون مقدر لها أن تختفي كلها إما إلى ثقوب سوداء أو من خلال تفكك نووي بطيء.

عندما تتفكك البروتونات والنيوترونات، فإنها، بدون ريب، تكوِّن منتجات تفكك، وبالتالي، لن يكون الكون بالضرورة خاوياً كلياً من المادة من أي نوع. فعلى سبيل المثال، وكما ذكرت سابقاً، يحتمل أن يتفكك البروتون إلى بوزيترون إضافة إلى بيون محايد. والبيون غير مستقر إلى حد بعيد وسرعان ما يتفكك إلى فوتونيْن، أو ربما إلى زوج مؤلف من إلكترون وبوزيترون. وأياً كانت الحالة، فإن الكون سيكتسب تدريجياً مزيداً ومزيداً من البوزيترونات نتيجة لتفكك البروتونات. يعتقد الفيزيائيون أن العدد الإجمالي للجسيمات المشحونة إيجابياً (حالياً، البروتونات بصورة رئيسية) في الكون هو ذاته كعدد الجسيمات المشحونة سلبياً (الإلكترونات بصورة رئيسية). يدل هذا ضمناً على أنه، حالما تتفكك كافة البروتونات، سيكون هناك مزيج مساو من الإلكترونات والبوزيترونات. والبوزيترون هو الجزيء المضاد المعروف للإلكترون، فإذا التقى بوزيترون مع إلكترون، فسيبيد أحدهما الآخر - عملية جرت دراستها بسهولة في المختبر - وتتحرر طاقة على شكل فوتونات.

وقد تم إجراء حسابات في محاولة لتحديد ما إذا كانت البوزيترونات والإلكترونات المتبقية في المستقبل البعيد للكون ستبيد بعضها بعضاً بصورة كاملة، أو ما إذا كانت ستبقى هناك دائماً بقية صغيرة. ولكن الإبادة لن تحدث بصورة مفاجئة. وما سيحدث هو التالي: في البداية، ينتظم إلكترون وبزيترون في نوع من ذرة مصغرة تدعى بوزيترونيوم Positronium، ويدور كلا الجسيمين حول مركز كتلة مشترك في رقصة موت، تربطهما جاذبية كهربائية مشتركة. وعندئذٍ، يتحرك الجسيمان معاً بصورة حلزونية ويتلاشيان. ويعتمد الزمن الذي تستغرقه هذه الحركة الحلزونية على المسافة الأولية بين الإلكترون والبوزيترون عندما تتشكل «ذرة» البوزيترونيوم. وتتفكك هذه الذرة في المختبر خلال جزء صغير جداً من الثانية، ولكن في الفضاء الخارجي، ومع

قليل من التشوش، يمكن أن ترتبط الإلكترونات والبوزيترونات في مدار ضخم. وتشير التقديرات إلى أن الإلكترونات والبوزيترونات تستغرق 10^{71} سنة لتشكيل البوزيترونيوم، ولكن أقطار مداراتها ، في معظم هذه الحالات، يمكن أن تكون ترليونات من السنوات الضوئية! وتتحرك الجسيمات ببطء كبير حتى أنها تستغرق مليون سنة لاجتياز سنتيمتر واحد. وتصبح الإلكترونات والبوزيترونات بطيئة جداً حتى أن زمن الحركة اللولبية يبلغ مدة مذهلة تقدر بـ 10^{116} سنة. ومع ذلك، إن المصير النهائي لذرات البوزيترونيوم هذه محتوم من اللحظة التي تتشكل فيها.

وما يدعو إلى الاستغراب هو أنه ليست كل الإلكترونات والبوزيترونات تتلاشى بالضرورة. فلطالما هي تبحث عن أرقامها المضادة، فإن كثافتها تتضاءل باطّراد، وذلك نتيجة للفناء وأيضاً بسبب استمرار توسع الكون. وبمرور الزمن، تتزايد شيئاً فشيئاً صعوبة تشكُّل البوزيترونيوم. وهكذا، ومع أن الثمالة الضئيلة من المادة الباقية تتناقص أكثر فأكثر، فإنها لن تختفي، في أي وقت، بصورة كاملة تماماً. وسنجد دائماً إلكتروناً أو بوزيتروناً شاذاً في مكان ما، حتى وإن كان كل من هذه الجزيئات يقيم في عزلة ضمن حجم ينمو دائماً في فضاء فارغ.

يمكننا الآن أن نرسم صورة لما يمكن أن يكون عليه الكون بعد أن تكون قد اكتملت كل هذه العمليات البطيئة إلى حد لا يصدق. أولاً، ستكون هناك مادة أفلتت من الانفجار الكبير، وهي الخلفية الكونية الموجودة دائماً. وتتألف من فوتونات ونيوترونات، وربما بعض الجسيمات الأخرى المستقرة تماماً ولا نعرف عنها شيئاً حتى الآن. وسوف تواصل طاقة هذه الجسيمات انحدارها طالما استمر الكون في توسعه، إلى أن تشكل خلفية مهملة. ستختفي المادة العادية للكون. وتتبخر كافة الثقوب السوداء. وتتحول معظم كتلتها إلى فوتونات، مع أن بعضها يبقى على شكل نيوترونات، وهناك جزء ضئيل جداً، ينبعث خلال القصفة الانفجارية النهائية للثقوب السوداء، سيكون على شكل إلكترونات، وبروتونات، ونيوترونات، وجسيمات أثقل. تتفكك بسرعة كافة الجسيمات الأثقل، وكذلك النيوترونات والبروتونات إنما ببطء أكبر، مخلفة بعض الإلكترونات التي تنضم إلى الإلكترونات الأخرى التي هي آخر ثمالة متبقية من المادة العادية التي نراها.

7- «إلى الأبد» زمن طويل جداً

وهكذا، سيكون العالم في المستقبل البعيد سحابة مخففة لا يمكن تصورها من الفوتونات، والنيوترونات، وعدد متضائل من الإلكترونات والبوزيترونات، كلها تتحرك ببطء متباعدة عن بعضها أكثر فأكثر. وعلى حد معرفتنا، فإنه لن تحدث أبداً عمليات فيزيائية أساسية إضافية. ولن تقع حادثة مهمة تعطل الجدب الكئيب للكون الذي يتابع شوطه مع أنه ما زال يواجه حياة سرمدية - ربما يكون الوصف أفضل لو قلنا موتاً أبدياً.

هذه الصورة الكئيبة لحالة، رتيبة، باردة، مظلمة شبيهة بالعدم هي الأقرب إلى ما توصلت إليه الكوزمولوجيا الحديثة من «موت حراري» في فيزياء القرن التاسع عشر. والزمن الذي يستغرقه الكون قبل أن ينحط إلى مثل هذه الحالة طويل جداً إلى حد يتحدى معه الخيال الإنساني. وهو، مع ذلك، مجرد جزء متناهي الصغر من الزمن اللامتناهي المتاح. «إلى الأبد» زمن طويل، كما قلنا.

ومع أن تفكك الكون يحتل أمداً ضخماً أكبر من المقاييس البشرية حتى أنه، في الواقع، لا يعني شيئاً بالنسبة لنا، فإن الناس ما زال يشغفهم السؤال، «ما الذي سوف يحدث لأحفادنا؟ وهل هم محكومون حتماً بكون سيتوقف من حولهم ببطء، ولكن بعناد؟». ومع التسليم بالحالة غير الواعدة التي يتنبأ بها العلم بخصوص المستقبل البعيد للكون، فإن أي شكل من الحياة لا بد أن يكون في نهاية الأمر محكوماً بالموت، كما يبدو. ولكن ذلك الموت ليس بسيطاً.