



مقدمة قصيرة جداً

كاثنين بلازدل

# الثقب السفداع

ترجمة أدمد سمير دايفيش



# الثقوب السوداء

مقدمة قصيرة جدًا

تأليف  
كاثيرين بلاندل

ترجمة  
أحمد سمير درويش

مراجعة  
هاني فتحي سليمان



الناشر مؤسسة هنداوي

الشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شيبيت ستيت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة

تلفون: +٤٤ (٠) ١٧٥٣ ٨٢٥٢٢

البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org

الموقع الإلكتروني: <https://www.hindawi.org>

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسؤولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبر الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

التقييم الدولي: ٨ ٢٨٧٧ ١ ٥٢٧٣ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠١٥.

صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٢.

جميع حقوق النشر الخاصة بتصميم هذا الكتاب وتصميم الغلاف محفوظة لمؤسسة هنداوي.

جميع حقوق النشر الخاصة بالترجمة العربية لنص هذا الكتاب محفوظة لمؤسسة هنداوي.

جميع حقوق النشر الخاصة بنص العمل الأصلي محفوظة لدار نشر جامعة أكسفورد.

Copyright © Katherine Blundell 2015. *Black Holes* was originally published in English in 2015. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

# المحتويات

٩	شكر وتقدير
١١	١- ما الثقب الأسود؟
٢٥	٢- التنقل عبر نسيج الزمكان
٣٧	٣- توصيف الثقوب السوداء
٤٧	٤- السقوط في ثقب أسود ...
٥٧	٥- إنترولبيا الثقوب السوداء وخصائصها الديناميكية الحرارية
٦٥	٦- كيف تزن ثقباً أسود؟
٧٣	٧- التهام المزيد والتضخم أكثر
٨٧	٨- الثقوب السوداء وتأثيراتها الثانوية
١٠٥	قراءات إضافية



إلى تيم ولويز ساندرز، مع خالص حبي.



## شكر وتقدير

أعُّبر عن شكري الحار لفيليپ ألكوك، وراسل ألكوك، وستيفن بالبس، وروجر بلاندفورد، وستيفن بلاندل، وستيفن جستام، وتوم لانكستر، ولاثا مينون، وجون ميلر، وبول تود على تعليقاتهم المفيدة الكثيرة على مُسودات هذا الكتاب، وستيفن بلاندل على إعداد المخططات البيانية، وستيفن لي على المساعدة التي قدمها فيما يخص الأرصاد البصرية.

كيه إم بي  
أكسفورد  
٢٠١٥ أبريل



## الفصل الأول

# ما الثقب الأسود؟

الثقب الأسود مكانٌ في الفضاء تكون فيه قوة الجاذبية شديدة جًداً لدرجة أن لا شيء، ولا حتى الضوء، يستطيع التحرك بسرعةٍ كافية للإفلات من باطنه. ومع أنَّ الثقوب السوداء كانت في البداية مجرد تصوراتٍ في المخيلات الخصبة لعلماء الفيزياء النظرية، يُقدَّر الآن عدد الثقوب السوداء التي تعرَّف عليها العلماء بالفعل في الكون بالمليين، ويُقدَّر عدد الثقوب السوداء التي يتوقَّعون وجودها بالمليين. صحيح أنَّ هذه الثقوب غير مرئية، لكنَّها تتفاعل مع الوسط المحيط بها تفاعلاً يمكن أن يكون ملحوظاً جًداً، وبذلك يمكن أن تؤثر فيه. وتعتمد ماهية طبيعة هذا التفاعل بالضبط على درجة القرب بالنسبة إلى الثقب الأسود؛ صحيح أنَّ ما يكون قريباً منه للغاية يقع في قبضته لا محالة، ولكن عند مسافاتٍ أبعد، ستنشأ بعض الظواهر المثيرة والمذهلة.

وتتجدر الإشارة إلى أنَّ أول مرة ذُكر فيها مصطلح «الثقب الأسود» منشوراً، كانت في مقالة بقلم آن إوينج في عام ١٩٦٤ أوردت فيها تقريراً عن ندوة عُقدت في تكساس في عام ١٩٦٣، مع أنها لم تذكر قطُّ من الذي صاغ المصطلح. وفي عام ١٩٦٧، احتاج الفيزيائي الأمريكي جون ويلز إلى اختصار لعبارة «نجم منهار تماماً بفعل الجاذبية» وبدأ ينشر المصطلح ويُعَمِّمه، مع أنَّ مفهوم النجم المنهار ابتكره مواطناه الأميركيان روبرت أوينهايمير وهارتلاند سنایدر قبل ذلك بكثيرٍ وتحديداً في عام ١٩٣٩. بل إنَّ الأساس الرياضية للتصرُّف العصري عن الثقوب السوداء بدأت قبل ذلك بكثير، تحديداً في عام ١٩١٥، حين حلَّ الفيزيائي الألماني كارل شفارتزشيلد بعض المعادلات المهمة التي وضعها أينشتاين (والمعروفة باسم معادلات المجال في نظريته العامة للنسبية) مُطبِّقاً إياها على كتلةٍ معزولةٍ في الفضاء لا تدور.

وبعد ذلك بعَدَّين في المملكة المتحدة، قبل وقِتٍ قصير من عمل أوبنهايمير وستايدر، كان السير آرثر إدينجتون قد أجرى بعض الحسابات الرياضية ذات الصلة في سياق بحث استقصائي أجراه الفيزيائي الهندي سوبرامانيا شاندراسيخار عن مصير النجوم حين تَفَنِي. وقد أعلن إدينجتون نفسه، أمام الجمعية الفلكية الملكية في عام ١٩٣٥، أنَّ النتائج الفيزيائية لحساباته، أي انهيار النجوم الضخمة عندما تستنفذ كل وقودها لتكوُّن ثقوبًا سوداء، «مضحكة ومنافية للمنطق». ومع أنَّ الفكرة تبدو مضحكة وغير منطقية، فمن المؤكَّد أنَّ الثقوب السوداء جزء من الواقع المادي في كل أنحاء المجرة وعبر الكون. وقد أحَرَّز ديفيد فينكلاشتاين في عام ١٩٥٨ مزيدًا من التقدُّم في هذا الشأن في الولايات المتحدة؛ إذ برهن على وجود سطح أحادي الجانب يُحيط بثقب أسود، وهذا السطح سيكون مهمًا جدًّا لما سندرُسُه في الفصول التالية. فوجود هذا السطح لا يسمح للضوء نفسه بالإفلات من قوة الجاذبية الهائلة داخل الثقب، وهو ما يجعل الثقب الأسود أسود. ولاستهلال الطريق نحو فهم الكيفية التي قد ينشأ بها هذا السلوك، نحتاج أولاً إلى فهم سمة عميقة من سمات العالم المادي؛ وهي وجود سرعةٍ قُصوى لا يمكن أن يتجاوزها أي جُسيم أو أي جسم.

### ما مدى سرعة الأشياء السريعة؟

ينصُّ أحد قوانين الغاب على أنك إذا أردت الهروب من حيوان مفترس، فعليك الركض بسرعة. فإذا لم يكن لديك مكر خارق أو تمويهٌ استثنائي، فلن تنجو إلا إذا كنت سريعاً. والسرعة القصوى التي تستطيع الثدييات أن تهرب بها من الأخطار تعتمد على علاقات كيميائية حيوية مُعقدة بين الكتلة والقوة العضلية والأيض. وتتجذر الإشارة هنا إلى أنَّ السرعة القصوى التي يمكن أن يتحرك بها أسرع شيءٍ في الكون هي تلك التي تظهر عند جُسيمات عديمة الكتلة تماماً، مثل جسيمات الضوء (المعروفبة بالفوتوныات). ويبلغ المقدار الدقيق لهذه السرعة القصوى ٢٩٩٧٩٤٥٨ مترًا في الثانية، أي ما يعادل ١٨٦٢٨٢ ميلًا في الثانية، أي أسرع من سرعة الصوت في الهواء نحو مليون مرة. ولو افترضنا أنني أستطيع السفر بسرعة الضوء، فسيُمكّنني السفر من متزلي في المملكة المتحدة إلى أستراليا في جزء مقداره واحد على ١٤ من الثانية، أي في لمح البصر تقريبًا. إذ يستغرق الضوء القادم من أقرب نجم إلينا، الشمس، ثمانين دقائق فقط ليصل إلينا. أمّا إذا كان الفوتوныون قادمًا إلينا من بعد كوكبٍ عَنَّا، أي نبتون، فسيستغرق بضع ساعاتٍ فقط. وهكذا نقول إنَّ الشمس على بُعد ثمانين دقائق ضوئية من الأرض، وإنَّ نبتون على بُعد بضع ساعات ضوئية منها.

ويترتب على هذا نتيجة مُثيرة للاهتمام مفادها أنه إذا لم تُشرق الشمس أو تَحُول لون نبتون إلى الأرجواني فجأة، فلن يمكن أي شخص على الأرض من معرفة هذه المعلومة المهمة قبل ثمانية دقائق أو بضع ساعات على الترتيب.

ولنتأمل الآن مدى السرعة التي يمكن أن يتحرك بها الضوء وصولاً إلى الأرض من نقاط أبعد بكثير جدًا في الفضاء. إذ يبلغ عرض مجرة درب التبانة، التي تقع فيها مجموعتنا الشمسيّة، بضع مئات الآلاف من السنين الضوئية. أي إنَّ انتقال الضوء من أحد جانبي المجرة إلى جانبها الآخر يستغرق بضع مئات الآلاف من السنين. تجدر الإشارة هنا إلى أنَّ عنقود فورنكس المجري هو أقرب عنقود مجرّي إلى العنقود المجري المحلي (الذى تُعد مجرة درب التبانة جزءاً منه) ويبعُد عناً مئات الملايين من السنين الضوئية. ومن ثم، فإذا كان يوجد راصدٌ على كوكب يدور حول نجمٍ في مجرةٍ واقعةٍ ضمن عنقود فورنكس ينظر إلى الأرض الآن، وكان مزوداً بالأدوات والمعدات المناسبة، فإنه قد يرى ديناصورات تمشي مُتناقلة على كوكب الأرض. غير أنَّ ما يجعل حركة الضوء تتبدّل بطبيعة وتستغرق وقتاً طويلاً هو اتساع الكون الشاسع المذهل ليس إلا. ويُصبح لدور سرعة الضوء بصفتها حدًا أقصى إجبارياً تأثيراً شائقاً عندما نبدأ التفكير في كيفية إطلاق الصواريخ إلى الفضاء.

## سرعة الهروب

إذا كانا نرغب في إطلاق صاروخ إلى الفضاء ولكن كانت سرعة إطلاقه أبطأ من اللازم، فلن يكون لدى الصاروخ قدرٌ كافٍ من طاقة الحركة ليُفلت من مجال جاذبية الأرض. ولكن إذا كان الصاروخ لديه سرعة كافية بالكاد للهروب من جاذبية الأرض، فإننا نقول إنه وصل إلى سرعة الهروب الخاصة به. وتتجدر الإشارة إلى أنَّ سرعة هروب صاروخ من جسمٍ ضخم، كوكب مثلاً، تزداد كلما كانت كتلة الكوكب أكبر وكلما كان الصاروخ أقرب إلى مركز كتلة الكوكب. إذ تصاغ معادلة سرعة الهروب في الشكل  $v_{\text{esc}} = \sqrt{2GM/R}$  حيث يرمز  $M$  إلى كتلة الكوكب و  $R$  إلى المسافة الفاصلة بين الصاروخ ومركز كتلة الكوكب، و  $G$  إلى أحد ثوابت الطبيعة الذي يُعرف باسم ثابت الجاذبية لنيوتون. ودائماً ما يُحاول تأثير قوى الجاذبية جذب الصاروخ نحوه مركز الكوكب أو النجم المعنى، صوب نقطة تُعرف باسم مركز الكتلة. غير أنَّ قيمة سرعة الهروب غير مُعتمدة إطلاقاً على كتلة الصاروخ. وبذلك فإنَّ سرعة هروب صاروخ منطلق من قاعدة «كيب كانافيرال»، الواقعة على بعد حوالي ٦٤٠٠ كم من مركز كتلة كوكب الأرض، لا تتغير قيمتها، التي تزيد قليلاً على ١١ كم / ثانية

أو تعادل ٣٤ ضعف سرعة الصوت (وبذلك يُمكن كتابتها على أنها تساوي ماخ ٣٤)، بغض النظر عما إذا كانت حمولته الداخلية بضع ريشات أو عدة آلات بيانو كبيرة. الآن، لنفترض أننا استطعنا تقليل كتلة كوكب الأرض بالكامل بحيث تشغّل حجمًا أصغر بكثير. ولنُقل إنَّ نصف قطرها أصبح رباعيَّة قيمتها الحالية. إذا أطلق صاروخ من على بعد ٦٤٠٠ كم من مركز الكتلة، فستظل قيمة سرعة الهروب الخاصة به كما هي. ولكن إذا نُقل موضعه إلى سطح الأرض المتقلصة الجديد ليُصبح بذلك على بعد ١٦٠٠ كيلومتر من مركزها، فستُصبح سرعة الهروب ضعف قيمتها الأصلية.

لنفترض الآن أنَّ كارثةً قد وقعت وجعلت كتلة الأرض كلها تتلاصص إلى نقطةٍ واحدة ليس لها أي مساحةٍ مكانيةٍ إطلاقاً. تُسمى هذا الشيء نقطة التفرد. إذ أصبح الآن «كتلة نقطية»، أي جسمًا ضخمًا يشغل حيزًا صفرائيًّا من الفراغ. على بعد مسافةٍ قصيرة جدًا، مقدارها متراً واحد فقط، من نقطة التفرد هذه، ستكون سرعة الهروب أكبر بكثيرٍ مما كانت عليه عند ١٦٠٠ كيلومتر (وفي الواقع ستكون نحو ١٠٪ من سرعة الضوء). وبالاقتراب أكثر فأكثر من نقطة التفرد، إلى أن تُصبح المسافة الفاصلة أقلَّ من سنتيمترٍ واحد، ستُصبح سرعة الهروب متساويةً لسرعة الضوء. عند هذه المسافة، لن يكون الضوء نفسه سريعاً كفايةً للهروب من قوة الشدَّ هذه الناتجة عن الجاذبية. هذه هي الفكرة الأساسية لفهم آلية الثقوب السوداء.

يُجدر هنا توضيح استخدام كلمة «نقطة التفرد». فنحن لا نعتقد أنَّ استمرار الانهيار بفعل قوى الجاذبية سيؤول في النهاية إلى نقطةٍ بالمعنى الهندسي للكلمة، لكنَّ نظريتنا الكلاسيكية الخاصة بالجاذبية هي التي تنهي، وبذلك تدخل نظامًا كمياً. ومن الآن فصاعداً، سنستخدم مصطلح نقطة التفرد للإشارة إلى هذه الحالة الفائقة الكثافة.

## أفق الحدث

تخيل الآن أنك رائد فضاءٍ تقود مركبةً فضائية، وأنك تقترب من نقطة التفرد هذه. ما دمت بعيداً عنها، تستطيع أن تعكس اتجاه مركبتك وتتراجع مبتعداً عنها. ولكن كلما اقتربت منها، صار من الأصعب أن تراجع بالشكل اللائق. وفي النهاية تصل إلى مسافةٍ قريبة منه يستحيل عندها الهروب، بغض النظر عن مدى قوة المحركات الموجودة على متن مركبتك. وهذا لأنك وصلت إلى أفق الحدث، وهو سطح كروي له تعريفٌ رياضي، ويُعرَّف بأنه الحد الذي تُصبح سرعة الهروب داخله أكبر من سرعة الضوء. وفي حالة التصور الافتراضي الذي

تخيلنا فيه أنَّ الأرض قد انهارت وتقلَّصت إلى نقطةٍ واحدة، فإنَّ هذا السطح سيكون كُرةً يبلغ نصف قطرها سنتيمترًا واحدًا فقط وتتضمن نقطة التفرد عند مركزها؛ وبذلك ربما يكون من السهل جدًّا على مركباتنا الفضائية أن تتجنَّبها. غير أنَّ أفق الحدث يُصبح أكبر بكثيرٍ عندما يتكون الثقب الأسود من نجمٍ منهاه وليس من كوكبٍ منهاه. ويتسِّم أفق الحدث بأنَّ له تأثيرًا فيزيائياً مهمًا؛ فإذا كنتَ على هذا السطح أو داخل حدوده، فإنَّ قوانين الفيزياء ببساطة لن تسمح لك بالهروب منه لأنَّ فعل ذلك سيستلزم كسرَ حد السرعة القصوى الكوني. أي إنَّ أفق الحدث مستوىً إلزاميًّا من مستويات ترسيم الحدود: خارجه يكون لك الحرية في تحديد مصيرك؛ أمَّا إذا أصبحت بداخله، فسيبيقي مُستقبلك عالقاً داخله إلى الأبد.

سُمِّي نصف قطر هذا السطح الكروي تكريماً لكارل شفارتزشيلد، الذي ذُكر سلفاً. فعندما كان شفارتزشيلد جنديًّا في الحرب العالمية الأولى، قدمَ أول الحلول الدقيقة لمعادلات المجال الشهيرة التي وضعها لأينشتاين والتي تمثل أساس النسبية العامة. وتكتب الصيغة الرياضية لنصف قطر شفارتزشيلد بالشكل  $R_s = 2GM/c^2$  حيث يرمز  $M$  إلى كتلة الثقب الأسود، ويرمز  $G$  إلى ثابت الجاذبية لنيوتون، و $c$  إلى سرعة الضوء. وباستخدام هذه الصيغة، يُصبح نصف قطر شفارتزشيلد الخاص بالأرض أقلَّ بقليلٍ من سنتيمتر واحد. وبالتالي، فإنَّ نصف قطر شفارتزشيلد الخاص بالشمس يصيغ ثلثة كيلومترات؛ ما يعني أنه إذا أمكن سحق كتلة شمسنا كلها لتصبح نقطة تفرد واحدة، فستكون سرعة الهروب عندئذٍ مساويةً لسرعة الضوء على بُعد ثلاثة كيلومترات فقط من هذه النقطة. وأيُّ ثقبٌ أسود كتلته أكبر مليار مرة من كتلة الشمس (أي تساوي  $9 \times 10^{30}$  كيلوغرام) سيكون نصف قطر شفارتزشيلد الخاص به أكبر مiliار مرة (فنصف قطر شفارتزشيلد الخاص بكلةٍ نقطية لا تدور يتنااسب طرديًّا مع كتلتها). وكما أستعرض في الفصل السادس، يُعتقد أنَّ مثل هذه الثقوب السوداء الضخمة موجودة في مراكز العديد من المجرات.

يمكن أن يكون من المنطقي تأمل هذا الوصف لأفق الحدث في إطار فيزياء نيوتن. بل إنَّ بعض العلماء القدامى تخيلوا كياناتٍ فيزيائيةٍ شبيهةٍ بالثقوب السوداء قبل قرونٍ من أنْ يُغيِّر أينشتاين وآخرون فهمنا للمكان والزمان تغييرًا عميقًا. وأبرز المفكرين الذين تخيلوا «نجومًا سوداء» شبيهةً بالثقوب السوداء كانوا جون ميشيل وبيير-سيمون لابلاس، اللذين بدأ أحدهما قديمًا في القرن الثامن عشر، وسأشرح الآن ما فعلاه.

إحدى الميزات اللافتة في علم الفلك كثرة الأشياء التي يمكن أن تكتشفها عن الكون حتى وأنَّت عالقة هنا على كوكب الأرض. فعلى سبيل المثال، لم يُزُر الشمس أَيُّ إنسانٍ قط،

ولكن اكتُشِفَ وجود الهيليوم في الشمس في أواخر القرن التاسع عشر بتحليل طيف ضوء الشمس. وهذا لافتٌ جدًا، لا سيما أنَّه شَكَلَ أساس اكتشاف عنصر الهيليوم نفسه؛ إذ عُثر عليه في الشمس قبل وقتٍ طويلاً من اكتشافه على كوكب الأرض. وحتى قبل ذلك، في القرن الثامن عشر، بدأت تُصاغ بعض الأفكار الكامنة وراء مفهوم الثقوب السوداء، وبالأخصّ فكرة ما يُسمَّى بالنجم المظلم. وتتجذر الإشارة هنا إلى أنَّ أول شخصٍ وثبَ هذه الوثبة التخييلية الأولى كان مُتأثراً جدًا بعصره الذي عاش فيه بكلِّ تأكيد.

## جون ميشيل

كان العصر الجورجي، في إنجلترا، يَتَسَمُّ بسلامٍ نسبيٍّ. كانت الحرب الأهلية الإنجليزية قد وضعت أوزارها منذ زمنٍ بعيدٍ، وأصبحت إنجلترا أرضاً يسودها هدوءٌ محليٌّ نسبيٌّ (كان صعود فرنسا النابليونية ما يزال غيَّباً في المستقبل البعيد آنذاك). تلقَّى القس المجل جون ميشيل (شكل ١-١)، مثل والده من قبيله، تعليماً جامعياً والتحق بكنيسة إنجلترا. وبينما كان يشغل منصب مسؤول أبرشية في كنيسة ثورنهيل، غرب يوركشاير، استطاع مواصلة أبحاثه العلمية، ومتابعة اهتماماته في الجيولوجيا والمغناطيسيّة والجاذبية والضوء وعلم الفلك. وعلى غرار العلماء الآخرين العاملين في إنجلترا آنذاك، مثل عالم الفلك ويليام هيرشل والفيزيائي هنري كافنديش (الذِّي كان صديقاً شخصياً له)، استطاع ميشيل أن يستفيد من زخم الفكر النيوتنى الجديد. فقد كان السير إسحاق نيوتن قد أحدث ثورةً في الكيفية التي كان يُنظر بها إلى الكون، وصاغ قانون الجاذبية الخاص به الذي فَسَّر وجود مدارات الكواكب في المجموعة الشمسيّة على أنها ناتجةٌ من القوة نفسها التي تسبَّبت في سقوط تفاحته الشهيرة من الشجرة.

أتاحت أفكار نيوتن دراسة الكون باستخدام الرياضيات، واستطاع هذا الجيل الجديد من العلماء نشر هذه النظرة الجديدة إلى العالم في مجالاتٍ مختلفة. كان ميشيل مُهتماً على وجه الخصوص باستخدام التفكير النيوتنى لتقدير المسافة إلى النجوم القريبة باستخدام قياسات الضوء الذي ينبعُ منها. وتفقَّد ذهنه عن مُخططات مختلفة لفعل ذلك، بربط سطوع النجم بلونه؛ وكذلك درَس النجوم الثنائية (أزواج من النجوم مُرتبطة ببعضها بفعل قوة الجاذبية) وكيف يمكن أن تُقدَّم حركاتها المدارية معلوماتٍ مُفيدةٍ متعددة باستمرار. وعَكَّف ميشيل أيضًا على دراسة كيفية ميل النجوم إلى التجمع مكوَّنةً عناقيد في مناطقٍ مُعينةٍ من السماء، واختبر ذلك مقابل توزيع عشوائي واستنتج تكون العناقيد بفعل



شكل ١-١: جون ميشيل، الشخصية الموسوعية.

الجاذبية. لم تكن أي فكرة من هذه الأفكار عمليةً آنذاك؛ فالنجوم الثنائية المعروفة كانت قليلة (مع أنَّ هيرشل كان يؤلِّف بعض القوائم الباهرة التي تضمُّ كثيراً من النجوم المزدوجة والأجسام الجديدة)، واتضح أنَّ العلاقة بين سطوط النجم ولوئنه لم تكن كما حسبها ميشيل تماماً. غير أنَّ ميشيل كان يبذل قُصارى جهده لكي يُقدِّم للكون الأوسع ما قدَّمه نيوتن للمجموعة الشمسية؛ وهو أنْ يتيح تحليل الأرصاد تحليلاً علميًّا وعقلانيًّا ومتجدداً باستمرار لتقديم معلوماتٍ جديدة عن خصائص الأجرام السماوية وكتلها ومسافاتها. ومن بين الرؤى الكاشفة التي تتفق عنها ذهن ميشيل، انبثقت الفكرة القائلة بأنَّ جسيمات الضوء، على حدِّ تعبير ميشيل، «تُجذب بالكيفية نفسها التي تُجذب بها كل الأجسام الأخرى التي نعرفها؛ أي بواسطة قوى متناسبة طردياً مع عزم قصورها الذاتي

[يقصد كتلتها]، ويستحيل أن يوجد أي شّكٌ عقلاني في ذلك، لأنَّ الجاذبية، على حدِّ علمنا، أو على حدِّ ما لدينا من أي أسباب تجعلنا نصدق ذلك، قانون كوني من قوانين الطبيعة». وعلَّ ذلك بقوله إنَّ مثل هذه الجسيمات المنبعثة من نجمٍ كبير ستتباطأ بفعل قوى الجاذبية لدى النجم. وهكذا سيكون ضوء النجم الذي يصل إلى كوكب الأرض أبطأ. ويدُرك أنَّ نيوتن أوضح أنَّ الضوء يتباطأ في الزجاج، وقد فسَّر هذا مبدأ الانكسار. وإذا كان ضوء النجوم يبطئ بالطريقة نفسها بالفعل، أكَّد ميشيل أنه قد يكون من الممكن اكتشاف هذا التباطؤ بتفحُّص ضوء النجوم من خلال منشورٍ زجاجيٍّ. لم تُجرَ هذه التجربة على يد ميشيل، وإنما أجريت على يد الفلكي الملكي المُجلَّ الدكتور نيفيل ماسكلين، الذي بحث عن وجود تضاؤل في قابلية ضوء النجوم للانكسار. أرسل كافنديش خطاباً إلى ميشيل ليُخبره بأنَّ الأمر لم ينجح وأنَّ «احتمالية العثور على أي نجوم يتضاءل ضوءها تضاؤلاً ملحوظاً ضعيفة جدًا». صُدم ميشيل وتضليل، لكنَّ مثل هذه التكهنات الفلكية تطلَّبت قدراً كبيراً من تخمين أشياء يستحيل تقديرها: فهل تأثر الضوء النجمي بجاذبية النجم الذي ينبع منه؟ لم يكن ميشيل مُتيقناً. لكنه كان جريئاً بما يكفي ليتبَّأّ تنبُّواً مُثِيراً للاهتمام.

إذا كان النجم ضخماً بما يكفي، وكانت الجاذبية تؤثِّر في الضوء النجمي حقاً، فقد تكون قوة الجاذبية كافية لحبس جُسيمات الضوء تماماً ومنعها من مغادرة النجم. وبذلك سيكون مثل هذا الجسم نجماً مُظلماً. هكذا كان القس غير المعروف وهو يكتب في مسكنه في يوركشاير هو أول شخصٍ تصور ثقباً أسود. غير أنَّ مخطط ميشيل الرامي إلى قياس المسافات التي تقفلنا عن النجوم ظلَّ خائباً تماماً. وفوق ذلك، كانت صحته سيئة بعض الشيء وهذا منعه من استخدام تلسكوبه. لهذا أرسل إليه كافنديش خطاباً مُواساة، قائلاً: «إذا كانت صحتك لا تسمح لك بمواصلة استخدام [التلسكوب]، فامل أن تسمح لك على الأقل بأداء مهمَّة وزن العالم الأسهل والأقل مشقة». وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ هذا المثال الاستثنائي لنكتة من كافنديش (الذي ذاعت عنه شهرة سيئة بأنه كتون ومُتحفَّظ) يشير إلى فكرة أخرى تصوَّرها ميشيل. إذ يعني «وزن العالم» تجربة تُجذب فيها كُرتان رصاصيتان كبيرتان عند طرفي قضيب الميزان اللتوائي بواسطة كُرتين رصاصيتين ساكنتين. وهذا يسمح لمن يُجري التجربة بقياس قوة الجاذبية، وبالتالي استنتاج وزن الأرض. لم يفعل أحد هذا من قبل. كانت فكرة ميشيل رائعة، لكنه فارق الحياة قبل أن يستكمل هذا المشروع. بل كان كافنديش هو من أجرى تجربة ميشيل، وصارت تُعرَّف الآن باسم تجربة كافنديش. غير أنَّ انتساب الفضل إلى كافنديش في شيءٍ لم يكن هو صاحبه

بهذه الطريقة قد عُوض وزيادة فيما بعد لأنَّ العديد من الاكتشافات الفارقة التي اكتشفها كافنديش بنفسه وتجاهل نشرها نُسبت لاحقاً إلى باحثين لاحقين (من بينها قانون «أوم» وقانون «كولوم»).

## بيير-سيمون لا بلاس

على الجانب الآخر من بحر المانش، لم يكن بيير-سيمون لا بلاس مستمتعًا بفترة السُّلم المثالى الهايائة التي أرسَتها حقبة التنوير الإنجليزى السُّلمية. نجا لا بلاس من الثورة الفرنسية، مع أنَّ مسيرته المهنية ازدهرت بينما كان يؤثر بنفوذه في معهد فرنسا ومدرسة البوليتكنيك اللذين كانا حديثي التأسيس آنذاك. حتى إنه شغل منصب وزير الداخلية فترةً في عهد نابليون، لكنه لم يبقَ سوى مدةٍ قصيرةٍ في هذا المنصب الذي نُدِم نابليون على تعينه فيه. إذ أدرك نابليون أنَّ لا بلاس كان عالم رياضيات ممتازاً، لكنه سيءَ جدًا في المناصب الإدارية. وقد كتب نابليون عن لا بلاس فيما بعد أنه «كان يبحث عن التفاصيل الدقيقة في كلِّ شيءٍ، ولم يكن يتصورُ سوى المشكلات، وأخيراً نقلَ عقلية «الكميات المتناهية الصغر» إلى مجال الإدارة». كان نابليون لديه آخرون من يُجيدون شغل المناصب الإدارية يستطيعون الاستعانة بهم، لكن العالم لم يكن فيه سوى قلة من علماء الرياضيات المؤتمرين ذوي البصيرة الثاقبة مثل لا بلاس. إذ قدَّم إسهامات محورية في الهندسة وموضوع الاحتمالات والرياضيات والميكانيكا السماوية والفلك والفيزياء. وعمل على موضوعات مختلفة مثل الخاصية الشعرية، والمذنبات، والاستلال الاستقرائي، واستقرار المجموعة الشمسية، وسرعة الصوت، والمعادلات التفاضلية، والتوازنات الكروية. وكانت إحدى الأفكار التي فكر فيها النجم المظلمة.

في عام 1796، نشر لا بلاس كتابه «شرح نظام الكون». ويستعرض هذا الكتاب، الموجه إلى جمهورٍ مُثقَّفٍ مُتعلم، المبادئ الفيزيائية التي يقوم عليها علم الفلك، وقانون الجاذبية وحركة الكواكب في المجموعة الشمسية، وقوانين الحركة والميكانيكا. وتُطبق هذه الأفكار على ظواهر مختلفة، من بينها المد والجزر وتحرُّك نقطتي التقاء خط الاستواء السماوي بمستوى مدار الأرض على طول مستوى مدار الأرض بسبب تغير اتجاه محور دوران الأرض، ويحتوي الكتاب أيضًا على تكهُّنات لا بلاس بخصوص أصل المجموعة الشمسية. ويتضمن فقرةً معينة ذات صلة خاصة بموضوعنا. إذ حَسَب لا بلاس الحجم الذي يجب أن يكون عليه جسمٌ شبيه بالأرض لكي تكون سرعة هروبِه متساويةً لسرعة الضوء. وأظهر، في

توضيح صائب تماماً، أنَّ قوة الجاذبية على سطح نجم ذي كثافة مُشابهة لكتافة الأرض، لكن قطره يساوي قطر الشمس نحو ٢٥٠ مرة، ستكون شديدة جدًا لدرجة أنَّ الضوء نفسه لن يستطيع الهروب. وفسَّر أنَّ هذا هو السبب الذي يجعل أكبر الأجسام في الكون غير مرئية. فهل يُمكن أنها ما زالت مختبئة غير مرئية في سماء الليل المعتمة في الوقت الذي تخيلنا فيه أنَّ الأشياء الوحيدة «الموجودة هناك» هي الأجسام المضيئة الساطعة التي نستطيع رؤيتها؟ طلب عالم الفلك المجري فرانتس زافير فون زاك من لابلاس أن يُقدم حسابات التي قادته إلى هذا الاستنتاج، ولبَّى لابلاس هذا الطلب، بتدوين حساباته (باللغة الألمانية) وأرسلها إلى إحدى الدوريات التي كان فون زاك مسؤولاً عن تحريرها.

غير أنَّ لابلاس كان قد بدأ يعي نظرية طبيعة الضوء الموجية آنذاك. وكانت أفكار كلٌّ من ميشيل ولابلاس قائمةً جزئياً على نظرية طبيعة الضوء الجسيمية. فإنَّ كان الضوء مكوناً من جسيمات باللغة الصغر، فحينئذ سيبدو منطقياً أنَّ هذه الجسيمات تتأثر بمجال جاذبية، وتظل مربوطة إلى الأبد بسطح نجم ذي حجم كافٍ. لكنَّ بدايات القرن التاسع عشر شهدت عدة تجارب بدا أنها تُعزز مصداقية نظرية طبيعة الضوء الموجية. ولو كان الضوء موجة وليس جسيمات، فعندئذ يكون من الأصعب أن نرى أنَّه من المفترض أن يتآثر بالجاذبية. وهذا حُدِّف تنبؤ لابلاس بالنجوم المظلمة في هدوء من الطبعات اللاحقة من كتاب «شرح نظام الكون». ففي النهاية، كان ميشيل ولابلاس عاكفين على تخمين النظرية واستكشافها، ولم يكونا مدفوعين باحتياجٍ إلى شرح أرصادٍ مُعينة، ولذا نُسِيت هذه الفكرة فترةً من الزمن. بذلك كانت الأجسام التي تخيلها ميشيل ولابلاس «نجوماً سوداء»، وهي أجسام هائلة في الكون تستطيع بحكم كتلتها أن تحافظ على بقاء أنظمةٍ من الكواكب في مدارٍ حولها، لكنها في الوقت نفسه، بحكم كتلتها الهائلة نفسها أيضاً، لا يُمكن أن تُرصد عبر إشعاع الضوء. فالضوء النجمي المتباعد من أسطح نجوم ميشيل ولابلاس سيكون أبطأ من أن يتغلب على قوة جاذبية السطح الشديدة. الشيء الذي لم يستطع ميشيل ولابلاس تخمينه هو أنَّ مثل هذه الكتل المتراكمة الهائلة ستكون غير مستقرة إلى الحد الذي يجعلها تنهاك. وفوق ذلك، ستتقب نسيج الزمكان أثناء انهياراتها، وستتشقّص نقطةً من نقاط التفرد. وبذلك فإنَّ «الثقوب السوداء» ليست «نجوماً مظلمة»، ومن أجل أن نُعزز هذه الحجة ونببدأ في التعرُّف على الاكتشاف الفلكي للثقوب السوداء، سنحتاج أولاً إلى فهم طبيعة الزمكان.

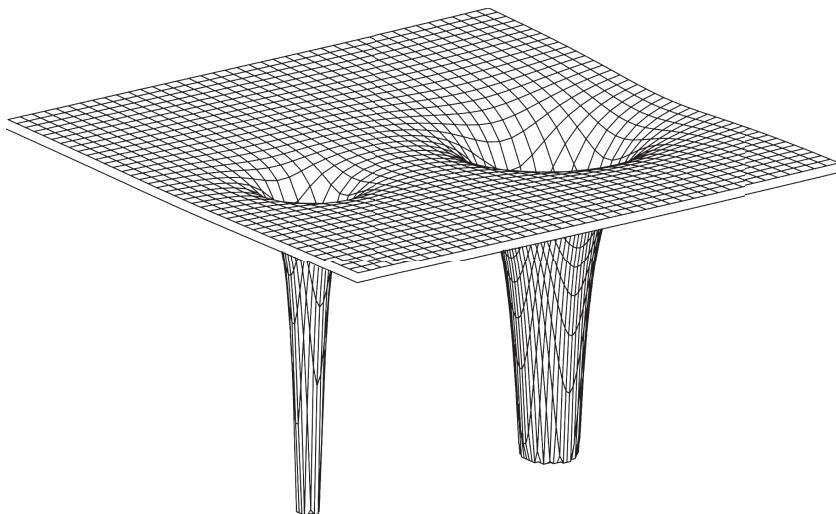
## الزمكان

تجعلنا تجربتنا الحياتية اليومية نشعر بالارتياح إزاء الفكرة القائلة بأنَّ الكون المحسوس يمكن وصفه بإحداثيَّة زمنية واحدة وثلاث إحداثيات مكانية (النُّقل مثلاً  $x$  ولا  $z$  على طول ثلاثة محاور مُتعامدة تمامًا مُتبادلًا، وهي بِنْية ابتكرها رينيه ديكارت ومعرفة باسم الإحداثيات الديكارتية). ففي عام ١٩٠٥، نشر أينشتاين ورقته البحثية الثورية عن النسبية الخاصة ونسبة الحركة والثبات. وفي عام ١٩٠٧، أظهر هيرمان مينكوفסקי كيف يمكن فهم هذه النتائج فَهُمَا أعمقَ من خلال تخيل نسيج زمانٍ ومكانٍ رباعي الأبعاد تُكافئ نقاطه، التي صارت مُحددة الآن بالإحداثيات ( $t$  و  $x$  و  $y$  و  $z$ ) الرباعية الأربع، «أحداثاً». والحدث شيء يحدث في وقتٍ معينٍ ( $t$ ) وفي مكانٍ معينٍ ( $x$ ،  $y$ ،  $z$ ). وهذه الإحداثيات الرباعية الأربع التي تُوجَد فيما يُعرف باسم «نسيج زمانٍ ومكانٍ مينكوف斯基» تُحدِّد بالضبط مكان وقوع الحدث ووقته. ويمكن صياغة نظرية النسبية الخاصة التي وضعها أينشتاين بمصطلحات قائمة على نسيج الزمكان الذي افترضه مينكوف斯基، وتُقدِّم وصفًا ملائمًا للعمليات الفيزيائية في أطْرِ مرجعية مختلفة تتحرك بالنسبة إلى بعضها. و«الإطار المرجعي» ببساطة هو المنظور الذي ينظر منه راصدٌ معينٌ. وقد وصف أينشتاين هذه النظرية بأنها «خاصة» لأنها تتناول حالةً مُعینَة فقط، وهي الأطْرِ المرجعية غير المسارعة (تُسمَى بالأطْرِ المرجعية القصورية). وبذلك لا يمكن تطبيق النظرية الخاصة إلا على الأطْرِ المرجعية التي تتحرك حركةً موحَّدة دون تسارُع. فإذا أقيمت حجراً، فإنه يتَّجه نحو الأرض مُتسارعاً. ومن ثمَّ، يكون الإطار المرجعي المرتبط بالحجر إطاراً مرجعياً مُتسارعاً، ولا يمكن التعامل معه بنظرية أينشتاين الخاصة. فحيثما تُوجَد جاذبية، يُوجَد تسارُع.

وهذا العيب دفع أينشتاين إلى صياغة نظرية النسبية العامة، التي نشرها بعد عقد من نظريته الخاصة. إذ اكتشف أنه في حين أنَّ الفضاء الديكارتي ونسيج الزمكان الذي افترضه مينكوفסקי إطاران جامدان حيث تحيا الأجسام وتتحرك وتُوجَد، فإنَّ نسيج الزمكان كيانٌ أكثر استجابةً للمؤثرات في الواقع؛ إذ يُمكن أن ينحنِي ويُشَوَّه في ظروفٍ مغایرة بسبب وجود الكتلة. فحالما تُوجَد الكتلة في موقفٍ ماديٍ، فإنَّ السلوك التالي المرتبط ارتباطاً غير قابل للفصل يصف الواقع، وقد لَحَّصَه جون ويلر بدقةٍ بارعة قائلاً:

- تؤثر الكتلة على نسيج الزمكان، وتتحكم في كيفية انحنائه
- يؤثر نسيج الزمكان على الكتلة، ويتحكم في كيفية تحركها

يُقاس مقدار هذا التأثير بمعادلات المجال التي وضعها أينشتاين ضمن نظرية النسبيّة العامة، التي تربط انحناء نسيج الزمكان بمجال الجاذبية.



شكل ٢-١: التشوه، أي الانحناء، في نسيج الزمكان بسبب وجود الكتل.

يتحدّث الفيزيائيون عن وجود منطقة تتسم بانخفاض طاقة الوضع القائمة على موضع الجسم في مجال الجاذبية (أو ما يُعرف باسم بئر طاقة الوضع في مجال الجاذبية) حول جسم ضخم. ويعرض الرسم المبسط الموضح في شكل ٢-١ صورةً موجزةً عن كيفية تشوه نسيج الزمكان بجوار ثقبين أسودين، حيث يمكن اعتبار أنَّ كل منطقةً تنحني بطريقَةٍ مُرتبطة ارتباطاً مباشرًا بكتلتها، وبذلك فهي مُرتبطة بقوة الجاذبية نفسها. وربما يُمكن اعتبار أنَّ نقطة التفرد في نسيج الزمكان هي المنطقة التي يُصبح فيها ذلك الانحناء في النسيج كبيراً جدًا، والتي تتجاوز عندها نظرية الجاذبية التقليدية وتدخل النظام الكمي. ويعمل أفق الحدث المحيط بنقطة التفرد كغشاءً أحادي الجانب؛ إذ يمكن للجسيمات والفوتوتونات أن تدخل الثقب الأسود من الخارج ولكن لا يمكن أن يهرب أي شيءٍ من داخل أفق الثقب الأسود إلى الكون الخارجي. وفي الواقع، فالكتلة ليست الخاصية

## ما الثقب الأسود؟

الوحيدة التي قد تكون موجودةً لدى الثقب الأسود ويُقاس بها. فإذا كان الثقب الأسود يدور، أي لديه بعض الزخم الزاوي، فسيظهر سلوكٌ أشدُّ تطرفاً بكثير. وقبل أن نشرع مباشرةً في استعراض ذلك، سنسلك منعطفاً بسيطاً لنعرف المزيد عن كيفية تمثيل نسيج الزمكان نفسه بمخططاتٍ بيانية.



## الفصل الثاني

# التنقل عبر نسيج الزمكان

تُعدُّ الرياضيات هي اللغة المثالية بامتياز لوصف كيفية انتظام نظرية النسبية على الكون المادي وكل نسيج الزمكان، وهذا الوصف يتضمن السلوك الغريب الذي يحدث بالقرب من الثقوب السوداء. غير أنَّ الوصف الرياضي، وإن كان فعَّالاً ودقيقًا، يمكن أن يكون لغةً غريبةً وبغيضة بعض الشيء لمن يفتقرُون إلى التدريب التخصصي المناسب. والكلمات الوصفية، مهما كانت بلغة، تفتقر إلى فاعلية المعادلة الرياضية ودقَّتها الصارمة، ويمكن أن تكون غير دقيقة ومُقيَّدة. ولكن نظرًا لأنَّ الصور تساوي ١٠٠٠ كلمة (كما يُقال)، لا يمكن أن تكون مجرد حلٌّ وسطيٌّ مُفيد، لكنها طريقة مفيدة جدًا لتصور ما يجري. وللهذا السبب، يجدر بذل القليل من الجهد لفهم نوعٍ معينٍ من الصور، يُسمَّى مخطط نسيج الزمكان. فهذا سيساعد في فهم طبيعة نسيج الزمكان حول الثقوب السوداء.

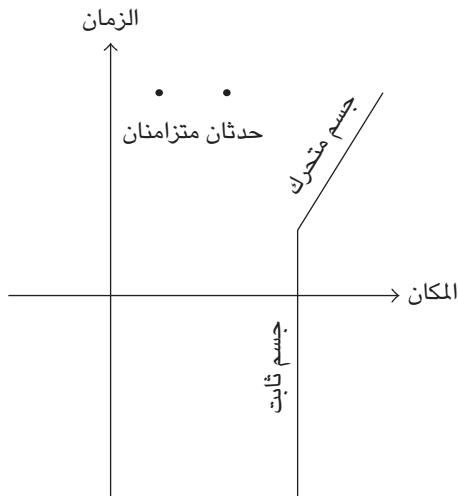
## مخططات الزمكان البيانية

يُوضَّح الرسم البُسيط الوارد في شكل ١-٢ مخططاً بيانيًّا بسيطًا لنسيج الزمكان. ووفقاً للعرف المُتبَع، فالمحور «المحاكي للزمان» هو المحور الرأسي على الصفحة، والمحور «المحاكي للمكان» يُرسم عموديًّا عليه. وصحيح أننا نحتاج في الحقيقة إلى أربعة محاور لوصف نسيج الزمكان بسبب وجود ثلاثة محاور محاكية للمكان (عادةً ما يُرمَّز إليها بالأحرف  $x$  و  $y$  و  $z$ ) ومحور واحد مُحاكي للزمان. لكنَّ رسم محورين فقط سيكون كافياً لغرضنا (وبالطبع من المستحيل رسم أربعة محاور متعامدة على بعضها!). تُسمَّى نقطة التقائه المحورَين بنقطة الأصل، ويُمكن اعتبارها النقطة المعتبرة عن «مكان وزمان» الراصد الذي أنشأ هذا المخطط المعيَّر عن نسيج الزمكان. يقع أي حدث فوريٍّ يُعتبر مثالياً،

تضغطٌ على مصراع كاميراً مثلاً، في لحظةٍ مُعينةٍ من الزمان وفي موضعٍ مُعينٍ من المكان. ويعتبر هذا الحدث الفوري ببنقطةٍ على مخطط المكان، على أن تكون ملائمةً للزمن والموضع المكاني المعنَّيين. تُوجَد في شكل ١-٢ نقطتان مُنفصلتان مكانيًا (أي لا تحدُثان عند نفس النقطة على محور المكان) لكنهما مُتزامنتان (أي لهما الإحداثية نفسها على محور الزمان). ويمكنك أن تخيل أن هاتين النقطتين تكافئان ضغطتين مُتزامنَتين على مصراعي كاميرتيْن ضغطهما مُصوِّران يقف كلُّ منها بعيدًا عن الآخر لتصوير المشهد نفسه. إذا كانت النقاط تمثل أحداثاً، فما الذي تمثله الخطوط في مخطط نسيج المكان؟ ببساطة يُظهر الخط مسار جسم ما عبر نسيج المكان. في بينما نعيش حياتنا، نتنقل عبر نسيج المكان، والمسار الذي نخُلفه وراءنا (الذي يُشبه ما يُخلفه الحذون وراءه من أثرٍ مُتلائِي من مادة لعبية لزجة) يكون خطًا في نسيج المكان، وبالصلة المتأصلة يُسمى هذا المسار خط العالم. وبذلك إذا بقيت في المنزل طوال اليوم، يكون خط العالم المُعبر عنك مساراً رأسياً عبر نسيج المكان (وستكون إحداثية المكان الخاصة بك ٢٢ شارع أكاسياً مثلاً). وهكذا فأنت تتحرك قدماً في الزمان، لكنك ثابت في المكان. أمّا إذا خضت رحلةً طويلة، فسيكون خطُ العالم المُعبر عنك مائلاً لأنَّ موضعك المكاني يتغير مع مرور الوقت، لأنك تتحرك في المكان أيضًا.

انظر مثلاً إلى خط العالم الموضَّح في شكل ١-٢، الخط الذي يَظُهر رأسياً في البداية ثم يُصبح مائلاً عند الاتجاه نحو الأعلى. يكفي هذا خط العالم الخاص بكيان آخر يبقى ثابتاً طوال المدة الزمنية التي يُشير إليها الجزء الرأسى من الخط. ومن الأمثلة التي ربما يُعبر عنها هذا الخط كاميرا خاصة بأحد المصوِّرين كانت متروكةً على أحد الكراسي (فكان خط العالم المُعبر عنها رأسياً لأنَّ موضعها لا يتغير)، ثم سرقها لصٌ وهرب بها بعيداً بسرعة (عندما يتغيَّر الموضع المكاني باستمرار). فحيثما يُصبح هذا الخط مائلاً، يُعبر عن تغيير الموضع المكاني مع مرور الزمن. ويُعبر ميل هذا الخط عن معدل تغيير المسافة مع مرور الزمن، وهذا عادةً ما يُطلق عليه السرعة. وفي هذه الحالة، فهو يُعبر عن السرعة التي يهرب بها اللص بالكاميرا المسروقة. وبذلك فكما كان اللص أسرع في هرويه بالكاميرا المسروقة، أو بعبارة أخرى كلما كانت المسافة التي يقطعها في زمنٍ مُعينٍ أطول، كان هذا الجزء من الخط أقل توجُّهاً نحو الاتجاه الرأسى وأكبر ميلاً. بالطبع يُوجَد حد أقصى صارم للسرعة التي يمكن أن يهرب بها اللص بخيمه المسروقة، وهذا الحد، كما نوقش في الفصل الأول، هو سرعة الضوء. ومن ثم، فإنَّ مسار شعاع من الضوء سيُمثل بخط

التنقل عبر نسيج الزمكان

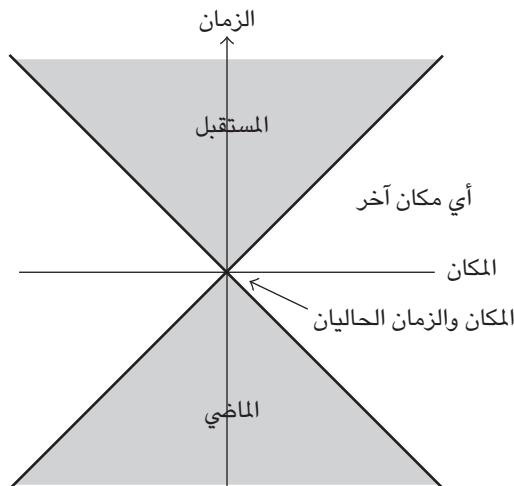


شكل ١-٢: مخطط بياني بسيط يُعبر عن نسيج الزمكان.

مائل بأقصى ميلٍ ممكن (عادةً ما يُمثل في مخططات الزمكان بخطٍ مائل على محور الزمان بزاوية مقدارها ٤٥ درجة باستخدام وحداتٍ مُبتكرة ببراعة). ولأنَّ ما من شيءٍ يستطيع أن يتجاوز تلك السرعة، فلا يمكن لأيٍ من خطوط العالم أن يصنع مع محور الزمن زاوية أكبر من هذه.

تجدر الإشارة هنا إلى أن خطوط العالم التي تمثل على مخطط الزمكان بهذه الزاوية ذات الميل الأقصى، والتي تكفي هذه السرعة القصوى، أي سرعة الضوء، تُنشئ مفهوماً مهماً يُسمى المخروط الضوئي. فكرة هذا المفهوم بسيطة جدًا، ومقادها أنَّ المرء لا يستطيع التأثير على الكون في المستقبل إلا بصلةٍ سببيةٍ سابقةٍ وأنَّ التسلسل السببى لا يمكن أن ينتقل بسرعة تتجاوز سرعة الضوء. لذا فإنَّ «مجال تأثيرك» الآن محصور في نطاق محدود من نسيج الزمكان، أي ذلك الجزء الذي يقع ضمن زاوية مقدارها ٤٥ درجة مع محور الزمان الموجب كما هو موضح في شكل ٢-٢. وفوق ذلك، لا يمكن أن يكون المرء قد تأثر إلا بسلسلةٍ سببيةٍ من الأحداث لا يمكن أن تكون قد تجاوزت سرعة الضوء. لذا فالأحداث التي تقع ضمن زاوية مقدارها ٤٥ درجة مع محور الزمان السالب (أو الماضي) هي فقط التي يمكن أن تؤثر عليك الآن. إذا رسمنا الآن مخططاً بيانيًّا

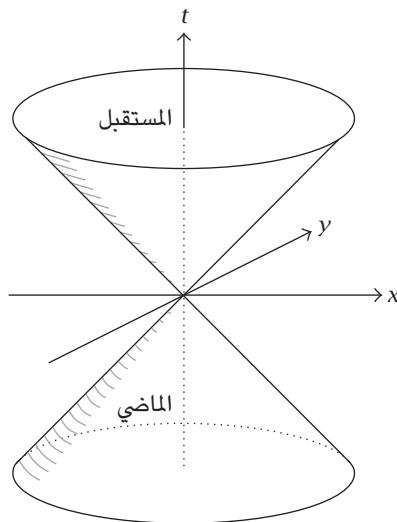
لنسيج الزمكان باستخدام محورين مُحاكيَّين للمكان ومحور واحد مُحاكيٍ للزمان، فإن المثلثات الواردة في شكل ٢-٢ تُصبح مخاريط، وهذا ما نعنيه بالمخاريط الضوئية، كما هو موضح في شكل ٣-٢. يُحدِّد المخروط الضوئي في شكل ٣-٢ مناطق الفضاء التي تقع ضمن نطاقها الأحداث التي يمكن لراصِدٍ ما (يعتبر موجوداً عند نقطة الأصل المُعْبَرَة عن «المكان والزمان الحاليين») من حيث المبدأ أن يكون له صِلةٌ سببيةٌ بها (أو كانت له صلة سببيةٌ بها في الماضي)، دون الحاجة إلى كسر الحد الأقصى للسرعة الكونية، والتحرُّك أسرع من سرعة الضوء. تُعرف المنطقة المركزية حول محور الزمان الموجب (المستقبل) باسم المخروط الضوئي الخاص بالمستقبل، بينما يُعرف المخروط المركَّز حول محور الزمان السالب (أي الماضي) باسم المخروط الضوئي الخاص بالماضي.



شكل ٢-٢: مخطط بياني بسيط يُعبر عن مخروط الضوء.

وبذلك يُعد اغتيال يوليوس قيصر في عام ٤ قبل الميلاد جزءاً من ماضيك، بسبب وجود صِلةٌ سببيةٌ يمكن تصوُّرها بينك وبين هذا الحدث. (إذا توجَّب عليك دراسته في المدرسة، فذلك يُثبت وجود صِلةٌ سببيةٌ!) ولأنَّ الضوء المنبعث من مجرة أندروميدا يمكن أن يصل إلى تلسكوب على الأرض، فهو أيضاً جزء من ماضيك. غير أنَّ وصول الضوء إلينا

## التنقل عبر نسيج الزمكان



شكل ٣-٢: مُخطط بياني لنسيج الزمكان يُبيّن المخروط الضوئي الخاص براصِدٍ مُعين.

يستغرق ستة ملايين سنة، لذا فإنَّ مجرة أندروميدا قبل ستة ملايين سنة هي التي تُعد جزءاً من ماضيك وتقع على مخروطك الضوئي. أمّا مجرة أندروميدا الحالية، أو حتى مجرة أندروميدا في عام ٤٤ قبل الميلاد، فتقع خارج مخروطك الضوئي. فالأحداث التي تحدُث على أندروميدا، إما الآن أو التي وقعت حتّى في عام ٤٤ قبل الميلاد، لا يمكن أن تؤثّر فيك الآن لأنَّ أي صِلةٍ سببيةٍ كان سيتوسّبُ أن تنتقال بسرعةٍ تتجاوز سرعة الضوء. سُمِّيت محاور مخطوطات الزمكان الثلاثة التي رأيناها في هذا الفصل حتّى الآن بمحور الزمان ومحور المكان. ولكن في الواقع، عادةً ما لا يُدرج المحتفون المتخصصون أسماء المحاور، أو حتّى المحاور نفسها، في المخطوطات البيانية المُعبَّرة عن الزمان والمكان. وهذا لا يعني ببساطةٍ أنَّ تحرك الزمان طولياً وتحريك المكان عرضياً أمرٌ روتيني جدًا إلى الحد الذي يجعل علماء الفيزياء الفلكية المحترفين لا يُبالون بذلك (مع أنَّ هذه ليست ظاهرةً مجهولة)، لكنَّ السبب أنَّ المواقع الدقيقة في نسيج الزمكان لا يمكن أن تكون محلًّا اتفاقٍ بين كل الراصديين. ففي عالم النسبية الخاصة، ينهر مفهوم التزامن. ومجرد أنَّ حدَثين مُتزامنَين بالنسبة إلى راصِدٍ مُعين لا يعني مطلقاً أنهما متزامنان بالنسبة إلى راصِدين آخرين.

وبذلك، عندما يرى راصدُ المصورين اللذين يضغطان على مصراعي كاميرتيهما «في آن واحد»، فلن يكون ذلك هو ما يراه راصد آخر يسافر في مركبةٍ فضائية تتحرك بسرعة كبيرةٍ بالنسبة إلى الكاميرتين. بل سيستنتج هذا الراسد أنَّ إحدى الضغطتين تحدث قبل الأخرى بوقتٍ طويلاً. وحينئذ، فالنقطتان اللتان رسمتهما في شكل ١-٢ على الارتفاع الرئيسي نفسه (لأنني زعمتُ أنَّ الحدثين وقعا في الوقت ذاته) ستظهران في موضعين رأسئيين مختلفين على مخطط الزمكان الخاص بالراسد الذي يتحرك بسرعة. وتُصر النظرية النسبية التي وضعها أينشتاين على أنَّ مخططها صحيح تماماً مثل مخططها. ومن ثمَّ، فإذا كانت النقاط في مخطط الزمكان تعتمد على الموضع الذي ينظر منه الراسد، أي إطاره المرجعي، فما سبب رسمها إذن؟

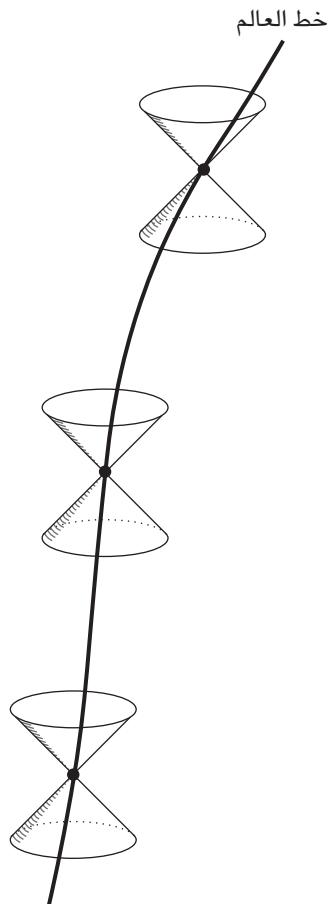
لفهم ذلك، من المفيد التركيز على خط العالم الخاص بجُسمٍ متحرك، ولذا سنرسم الآن مخططاً بيانيًّا جديداً يُعبر عن نسيج الزمكان يتحرك فيه جُسمٍ عبر هذا النسيج، آخذاً معه مخروطه الضوئي (هذه الحيلة معروفةٌ بالعمل ضمن الإطار المُساير). لاحظ أنَّ مسار الجُسم (أي خط العالم الخاص به) في شكل ٤-٢ يبقى دائماً ضمن المخروط الضوئي لأنَّه لا يستطيع تجاوز سرعة الضوء.

لا تنطبق نظرية النسبية الخاصة التي وضعها أينشتاين، وهي مُترفرعة من نظريته العامة، إلَّا على مجموعةٍ محدودةٍ من المواقف المادية. لذا تنشأ حاجةً إلى إطار مفاهيمي مختلفٍ يتجاوز النسبية الخاصة في سياق الزمكان الذي يتَوَسَّع، ولعلَّ أبرز مثالٍ عليه هو الكون المتَوَسَّع. وفي هذا السياق، تتجلَّ الصَّلة السببية في أنَّك لا تستطيع التحرك بسرعةٍ تتجاوز سرعة الضوء بالنسبة إلى حِيزِك المحلي الصغير من الفضاء.

## كيف تعرف الأجسام وجهتها؟

مع أنَّ الفوتونات ليس لها كتلة، اتضحت أنها ما زالت متأثرة بالجاذبية. ومن الأفضل إلَّا نعتبر ذلك ناجماً عن قوَّةٍ ما، بل بالأحرى عن انحناء نسيج الزمكان. صحيح أنَّنا عادة ما نظن أنَّ الفوتون يتحرك في خطٍ مُستقيم، وهذا ما نستمدُّ منه فكرة «شعاع الضوء». ولكن عند تحركه عبر نسيجٍ مُنحِنٍ من الزمكان، سيتبع مساراً يُعرف بأنه خط جيوديسي. ومع أنَّ دلالة الكلمة «جيوديسي» تُوحِي بأنَّها مرتبطة بكوكب الأرض فقط، فإنَّ الخط الجيوديسي (الذي اشتُقَّ اسمه من علم الجيوديسيا، أي قياس خواص الأرض على سطح كوكبنا) مفهومٌ مهمٌ في وصف طبيعة نسيج الزمكان عبر الكون كله. إذا لم يكن الفضاء

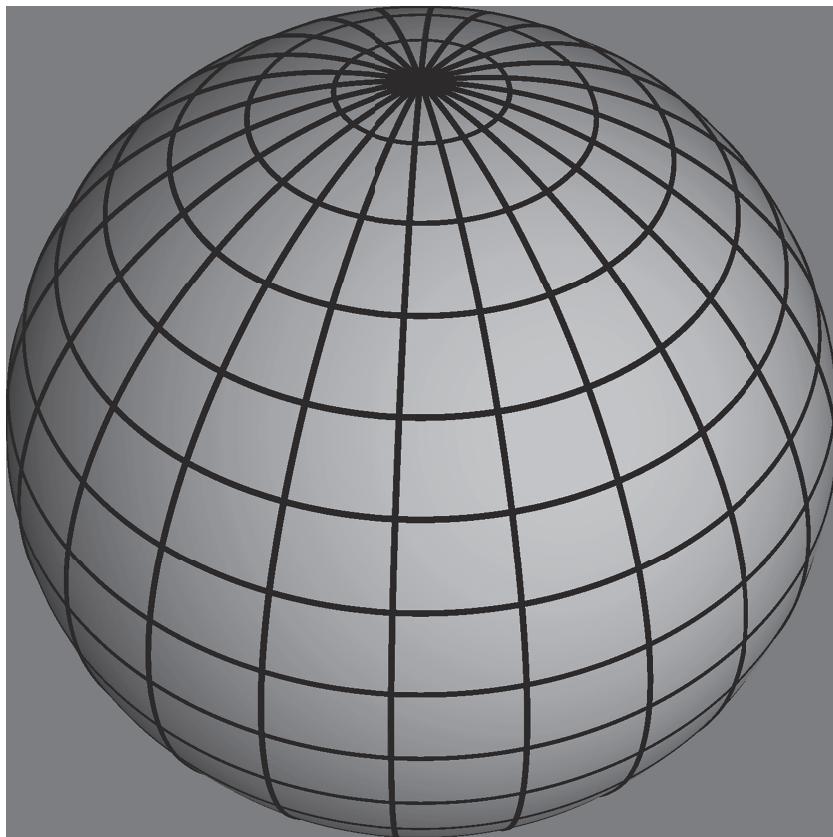
## التنقل عبر نسيج الزمكان



شكل ٤-٢: مخطط بياني يوضح نسيج الزمكان لجُسم يتحرك على طول خط العالم الخاص به، الذي ينحصر دائمًا ضمن مخروطه الضوئي المستقبلي.

منحنيناً (أي كان مُتسقًا تمامًا مع الشكل الهندسي اليومي الذي ربما تعلَّمناه في المدرسة من إقليدس أو أحد العلماء الذين جاءوا من بعده)، فحينئذ سيكون الخط الجبوديسي هو «المسار المستقيم» الذي سيقطعه شعاع ضوئي. لكنَّ أقصر مسافةٍ بين نقطتين، التي تمثل المسار الذي «يريد» شعاع ضوئي أن يسلكه، معروفة بمصطلح «الخط الجبوديسي الصُّفري». أمَّا في الفضاء المنحنِي، فأقصر مسافةٍ بين نقطتين ليست ما نعتبرها مستقيمة،

لكنَّ «الخطوط الجيوديسية خطوطٌ مُستقيمة في فضاءاتٍ مُحننية». يمكن كذلك وصف الخط المستقيم بأنه المسار الذي تسلكه بمواصلة التحرُّك في الاتجاه نفسه. وإذا أردت مثلاً على أنَّ الهندسة على الأسطح المحننية مختلفة بشدة، فانظر إلى خطوط الطول على كرة. فأيُّ خطَّين متقاربين من خطوط الطول (متوازيَّين عند خط الاستواء) سيلتقيان في نقطةٍ عند القطب، كما هو موضَّح في شكل ٥-٢. ولكن في الفضاء المسطح، لن تلتقيَ الخطوط المتوازية إلا عند اللانهاية (وفقاً لِمسلَمةِ إقليدس الأخيرة).



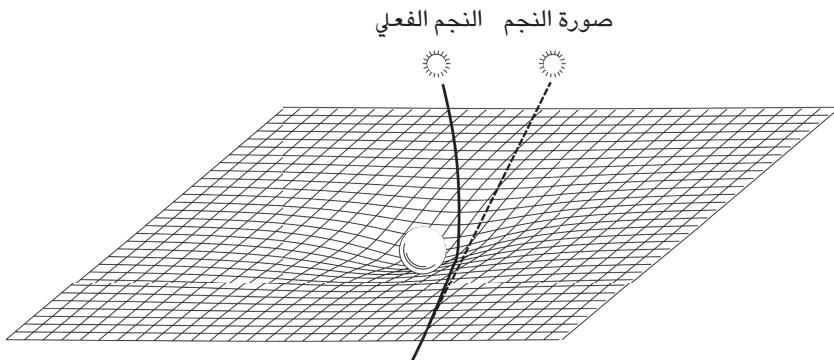
شكل ٥-٢: تكون خطوط الطول على كرةً ما متوازيَّة عند خط الاستواء، وتلتقي في نقطة عند القطبين.

وفي الواقع، حيثما يكون نسيج الزمكان مُحننًا، ول يكن بسبب وجود كتلةً مثلًا، يتجلّى ذلك الانحناء في المسار الذي سيسلكه شعاع ضوئي أو «جُسيم اختبار» (أداة ذهنية استخدمها الفيزيائيون) يستطيع التحرك بحرية دون تأثيرٍ من أي قوة خارجية، بين حدثين. وينبغي اعتبار الحدثين نقطتين في نسيج الزمكان الرباعي الأبعاد، على أن يُرمز إلى كلتيهما بالصيغة ( $t, x, y, z$ ).<sup>6</sup>

تُخبرنا قاعدة تسمى الدالة المترية بالكيفية التي تقيس بها الساعات والمساطر الفواصل بين الأحداث في نسيج الزمكان، وتُتيح الأساس الذي يمكن الاستناد عليه في حل المسائل في الهندسة. ومن أبسط أمثلة الدالة المترية نظرية فيثاغورس، التي توضح كيفية حساب المسافة بين نقطتين تقعان في المستوى. وتوضّح لنا حلول معادلات المجال التي وضعها أينشتاين كيف نحسب قيمة الدالة المترية لنسيج الزمكان عندما يكون توزيع المادة معروفاً. ونستخدم هذا لإنشاء خطوط مُعبرة عن خطوط الكون الحقيقي الجيوديسية. فعلى سبيل المثال، كان أحد أول الأدلة الرصدية على النسبية العامة هو انحناء الضوء النجمي بفعل الشمس، الذي قيس في أثناء كسوف شمسي ( فهو وقت مناسب لفحص الموضع الظاهر للنجوم القريبة من فرض الشمس لأنَّ الضوء المنبعث من القرص يكون محظوظاً بالقمر حينئذ، وهي فرصة اغتنمها السير آرثر إدينجتون في عام ١٩١٩). وكثة الشمس تُسبِّب انحناء نسيج الزمكان. وبذلك فإن أقصر مسار (أي الخط الجيوديسي) من نجمٍ بعيد إلى تلسكوب على الأرض ليس خطًا مستقيماً، بل منحنٍ بفعل مجال جاذبية الشمس، كما هو موضّح في شكل ٦-٢.

وصحٍ أنَّ انحناء الضوء النجمي يُظهر أنَّ الفضاء منحنٍ، لكن النظرية العامة لأينشتاين تُخبرنا بأنَّ نسيج الزمكان هو الذي يتسم بالانحناء في الواقع. لذا قد نتوقع أن هذه الكتلة لها بعض التأثيرات الغريبة على الزمان أيضًا. وفي الحقيقة، حتى مجال جاذبية كوكب الأرض كافٍ لجعل الساعات الموجودة على سطح كوكب الأرض تدق بوتيرة أبطأ قليلاً من التي تدق بها في الفضاء السحيق، ومع أنَّ ذلك التأثير ضئيل (إذ يبلغ نحو جزء واحد في المليار)، فهو قابل للقياس. غير أنَّ تأثيرات الجاذبية بالقرب من أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود أقوى بكثير. وبذلك فإنَّ الزمن يمضي بشكلٍ مختلف بالقرب من الثقب الأسود، حتى الثقب غير الدوار الذي يُعد أبسط حالات الثقوب السوداء، مقارنةً بالكيفية التي يمضي بها على بعد مسافة كبيرة من الثقب الأسود. هذا تأثير حقيقي ولا يعتمد على كيفية قياس الوقت (سواء بساعة ذرية، أو بساعة رقمية مثلًا). إذ ينجم

مباشرة عن انحناء نسيج الزمكان الناتج من الكتلة، والذي يُوجّه المخاريط الضوئية نحو الكتلة. يُبيّن شكل ٧-٢ التأثير العام.

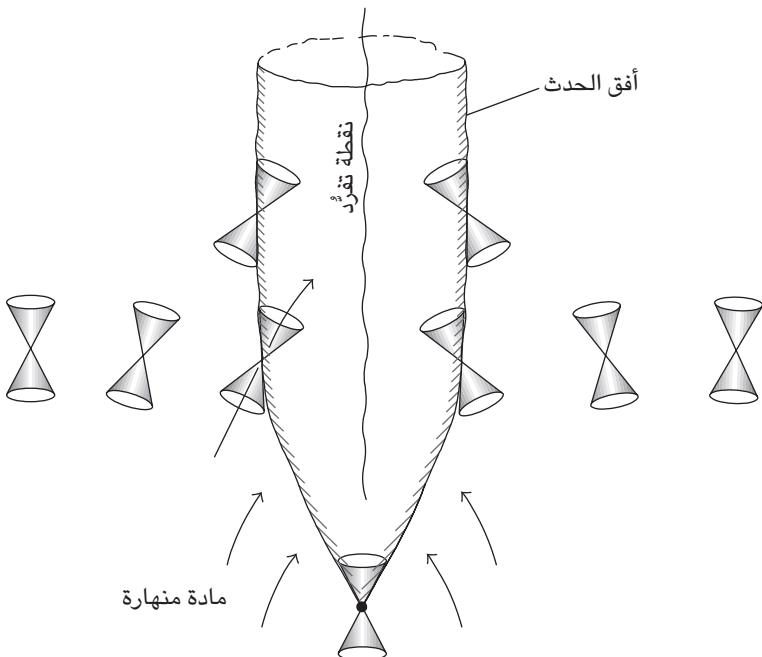


شكل ٦-٢: كتلة كالشمس تُسبِّب تشوهاً، أو انحناء في نسيج الزمكان.

تؤثر الثقوب السوداء تأثيراً عميقاً في اتجاهات المخاريط الضوئية. فعندما يقترب جُسَيْم من الثقب الأسود، يميل مخروطه الضوئي المستقبلي أكثر فأكثر نحو الثقب الأسود، بحيث يتحوّل الثقب الأسود تدريجيًّا إلى جزءٍ من مستقبله المحتوم. وعندما يمرُّ الجُسَيْم عبر أفق الحدث، تنتهي مساراته المستقبلية المحتملة كلها داخل الثقب الأسود. وفي نطاق أفق الحدث فقط، يكون ميل المخروط الضوئي كبيراً لدرجة أنَّ أحد جوانبه يُصبح موازيًا لأفق الحدث، ويقع المستقبل كله ضمن نطاق أفق الحدث؛ فالهروب من الثقب الأسود غير ممكن. ويوضح شكل ٧-٢ أيضًا هذه النقطة بالمثال: فهو أساساً تمثيل لبعض «مخططات الزمكان المحلية»، لأن تجميع المخاريط الضوئية يُتيح لك فهم الظروف المحلية التي يمرُّ بها جُسَيْم اختبار موجود في موقع مختلفة. في هذا الشكل، يتقدَّم الزمن مع الاتجاه إلى أعلى الصفحة، ولذا فهذا المخطط البياني يُعطي كذلك فكرةً عن كيفية تكون الثقب الأسود ونموه بفعل المادة المنهارة الساقطة نحوه.

ونجوم ميشيل ولابلاس المظلمة التي نقشت في الفصل الأول والتي استطاعت الحفاظ على أنظمة من الكواكب في مداراً حولها على غرار مجموعتنا الشمسيّة، نعرف

## التنقل عبر نسيج الزمكان



شكل ٧-٢: مُخطط نسيج الزمكان المحيط بثقب أسود يُبيّن كيف أنَّ المخاريط الضوئية المستقبلية الخاصة بـأجسامٍ على أفق الحدث تقع داخل نطاقِ أفق الحدث.

فقط أنَّ الثقب الأسود قريبٌ بسُبُّبِ ما لديه من قوةٍ شدًّا قائلةٌ على الجاذبية. وربما قد يجعلك هذا تظن أنَّ الخاصية الوحيدة التي تميّز الثقب الأسود هي كتلته. ولكن في الواقع، تتأثر خصائص الثقب الأسود تأثيرًا شديداً بما إذا كان يدور أم لا، وسأشرح كيفية حدوث ذلك في الفصل الثالث.



### الفصل الثالث

## توصيف الثقوب السوداء

قدّمنا في الفصل الأول مفهوم وجود نقطةٍ مُتفردةٍ من الكتلة تتكون في أثناء الانهيار بفعل الجاذبية ومحاطة بمنطقةٍ من مناطقِ أفق الحدث. ويُسمى النوع الذي لا يدور من هذه الأجسام ثقب شفارتزشيلد السوداء، وهذا المصطلح يُشير بالأخص إلى ثقب سوداء لا تدور؛ أي، بالمصطلحات المختصة، ليس لديها زخم زاوي. ببساطة، السمة الوحيدة التي تُميز أحد ثقوب شفارتزشيلد السوداء عن الآخر (خلاف الموقع) هي مقدار كتلته. سنتعلم في الفصل السابع كيف تنمو الثقوب السوداء، ولكن الآن سيكفي أن نعرف أنَّ الانهيار تحت تأثير الجاذبية هو المكوّن الرئيسي. إذا وجد أي دوران على الإطلاق في المادة قبل الانهيار، مهما كان بسيطًا، فعندئِذ سيزداد معدل الدوران مع حدوث الانهيار (إلا إذا وجد تأثيرٌ مُعينٌ يمنع حدوث ذلك). ينشأ ذلك بسبب قانون فيزيائي بارزٍ يُعرف بقانون حفظ الزخم الزاوي. ويتبين هذا القانون بالمثال في راقصة متزلجة تدور على ساقٍ واحدة؛ فعندما تجذب ذراعيها نحو جسدها، تدور بوتيرةٍ أسرع. وبالطريقة نفسها، إذا كان النجم الذي أسفر عن نشوء الثقب الأسود يدور ببطء، فعندئِذ سيكون الثقب الأسود الذي سيُكونه في النهاية يلفُ بسرعةٍ كبيرة، ويُسمى «ثقب كير الأسود». وفي الواقع، فإنَّ معظم النجوم تدور، لأنها هي نفسها مكونة من انهيار سُحب غازية ضخمة بطيئة الدوران بفعل الجاذبية. (إذا كانت هذه السحابة الغازية تتسم بقدرٍ ضئيل جدًّا من محصلة الدوران الصافي، سيكون لدى السحابة المنهارة زخم زاوي غير صفرى، وبينما تشغله المادة حجمًا يزداد صغًراً، فإنَّ الدوران النهائي للجسم المنهار سيكون سريعاً بعض الشيء على الأرجح.) وهكذا نرى أنَّ الدوران، الذي تشيع تسميتُه باللُّفُّ المغزلي أو الزخم الزاوي، من المرجح أن يكون سمةً سائنة في معظم الثقوب السوداء التي تكونت للتَّوْ من انهيار المادة، إن لم يكن سمةً منتشرة في كل هذه الثقوب. نعتقد الآن أنَّ اللُّفُّ والدوران شيءٌ حتميٌ في

الثقوب السوداء الفيزيائية الفلكية الحقيقة بقدر ما هو حتمي في مجال السياسة الحالي (وإن كان، في تلك الحالة الثانية، ينشأ بسبب شيء آخر غير حفظ الزخم الزاوي!).

ذكرنا الآن أن مُعَالِماً مُحَدِّداً فِيزيائياً ثانِياً، أي اللف المغزلي أو الزخم الزاوي، يُمثِّل سمة خاصة تُميِّز كل ثقب أسود عن الآخر مثلاً مثل الكتلة. وبذلك فمن المهم أن نضع في حسباننا خاصيَّتين من خواص الثقوب السوداء ونحو درس سلوكها: الكتلة والزخم الزاوي. وتُوجَد، من الناحية النظرية، سمة مميزة ثالثة لدى الثقوب السوداء ربما تكون مرتبطة بسلوكها؛ وهي الشحنة الكهربائية. وهذه أيضًا كمية محفوظة في الفيزياء، والقوى الموجدة بين الشحنات الكهربائية، المعروفة بالقوى الكهرومغناطيسية، تُشَبِّه قوة الجاذبية من عدة جوانب. أحد التشابهات الرئيسية أنَّ كليهما (على نطاقاتٍ كبيرة) تُعتبران أمثلة لقوانين التربيع العكسي، التي تعني أنَّ قوة الجاذبية التي يتعرض لها جسمان لهما كتلة مُعينة تقلُّ إلى رُبع قيمتها الأصلية عندما تُضَاعِف المسافة الفاصلة بينهما. وأحد الاختلافات الرئيسية أنَّ قوى الجاذبية دائمًا ما تكون تجاذبية، في حين أنَّ قوى الشحنات الكهرومغناطيسية لا تكون تجاذبية إلَّا في بعض الأحيان فقط (عندما تكون شحنة أحد الجسمين مُعاكسَة لشحنة الجسم الآخر؛ أي يكون أحدهما موجباً والآخر سالباً). بينما تكون تنافرية في أحيان أخرى (عندما يكون لدى الجسمين كليهما شحنة تحمل العلامة نفسها؛ أي يكون كلاهما موجباً أو يكون كلاهما سالباً، فإنَّهما يتناهيان). وبذلك فإذا كان جسمان يحملان نوع الشحنة نفسها، فعندئذ سيميل التناهُر الكهرومغناطيسي إلى منعهما من الالتحام معًا، حتى وإن كانت الجاذبية تميل إلى جذب كليهما نحو الآخر. لذا فيبينما يمكن نظريًا أن تكون الشحنة خاصية ثالثة للثقوب السوداء قد يتطلَّع المرء إلى قياسها، فإنَّ شحنة الثقب الأسود سرعان ما تُصبِّح متعادلةً في الواقع بفعل المادة المحيطة به. لذا من الوجهة أن نستخِدم افتراضًا عمليًّا مفاده أنَّ السمات ذات الصلة التي تُميِّز كل ثقب أسود عن الآخر سمتان فقط: الكتلة والزخم الزاوي. هذا كل ما هنا لك!

الآن، ربما تتساءل عما إذا كان يمكن تمييز الثقوب السوداء بتركيبتها. إذ ربما يكون أحدهما قد تكون من سحابة من غاز الهيدروجين، والآخر من سحابة من غاز الهيليوم. فلماذا لا يكون مصدر المادة المنهارة المتساقطة التي أدَّت إلى نشوء الثقب الأسود ظاهراً في الخصائص القابلة لقياسه لدى الثقب الأسود الذي تكون لاحقاً؟ هذا لأنَّ المعلومات لا يمكن أن تخرج من أفق الحدث! فالضوء هو الوسيلة التي يمكن من خلالها نقل المعلومات، لكنَّا رأينا بالفعل في الفصل الأول أنه لا يستطيع الهروب من داخل أفق

الحدث المحيط بالثقب الأسود. ومن ثمَّ، فالتركيب الكيميائي للمادة التي سقطت داخل الثقب الأسود لا يمكن أن يكون له أي تأثير على خصائص الثقب الأسود حسبما تحدُّد من الخارج. لن يكون من الصحيح اعتبار الجاذبية شيئاً يحتاج إلى «الخروج من» الثقب الأسود. فالوجود المستمر لجأٍ من الجاذبية خارج الثقب الأسود شيء يُرسَى أولاً في تكوين الثقب الأسود بينما يتَّسِّرُ نسيجه الزمكان. ولا يوجد تأثير من داخل الثقب الأسود يمكن أن يغير المجال الخارجي بعد تكونِ أفق الحدث.

## الثقوب السوداء ليس لها شعر

عندما يُطلَبُ منا وصف شخص آخر، فإحدى السمات المميزة التي نذكُرُها كثيراً في أوصافنا لون شعره (وليُكُنْ مثلاً أشقر ذو حمرة خفيفة، أو رمادي فضي أو بني كالشوكولاتة). وأحياناً ما تحمل طبيعة شعر البشر أماراتٍ تشير إلى أعمارهم أو جنسياتهم. وقد تُتَّبِّع معلوماتٌ متعلقة بخصائص جسدية أخرى مثل «مؤشر كتلة الجسم» معلوماتٌ عن نظامهم الغذائي. غير أنَّ الثقوب السوداء، على عكس البشر، كيانات ليس لها أي خصائص مميزة على الإطلاق عدا كتلتها وزخمها الزاوي (مع إهمال الشحنة للأسباب المذكورة أعلاه). يتَّجسَّد هذا بدقة في عبارة «الثقوب السوداء ليس لها شعر» القصيرة التي صاغها جون ويلر لتأكيد أنَّ الثقوب السوداء ليس لها سمة تحمل أي دليلٍ على طبيعة النجم الذي ولدت منه. لا شكله ولا تكتُلات سطحه الناتئة، ولا مظاهر سطحه، ولا نشاطه المغناطيسي، ولا تركيبه الكيميائي. لا شيء. وقد أظهرت الحسابات التي أجراها الفيزيائي البيلاروسي ياكوف زيلدوفيتش، وعلماء آخرون، أنَّه إذا انهار نجم غير كروي ذو سطح به تكتُلات ناتئة ليُكُونْ ثقباً أسود، سيستقرُّ أفق الحدث المحيط به في النهاية مُكَوِّناً شكلَ اتزانٍ أملس لا يحمل تكتُلات بارزة أو نتوءات من أي نوع. لذا فالثقب الأسود لا يمُرُّ أبداً بيومِ الشعر السيئ! كل ما يُمْكِن أن تعرفه عنه كتلته وزخمه الزاوي.

## الزخم الزاوي يُغيِّر الواقع

لعلَّ أبرز سمة للثقوب السوداء الدوَّارة أنَّ مجال الجاذبية يجذب الأجسام حول محور دوران الثقب الأسود، وليس نحو مركزه فحسب. ويُسمَّى هذا التأثير «تباطؤ الإطار المرجعي». فعند إسقاط جُسيم على أحد ثقوب كير السوداء في اتجاه نصف القطر نحو

المركز، سيكتسب مكونات حركة غير مُتجهة في اتجاه نصف قطره (أي دورانية) أثناء سقوطه سقوطاً حراً في مجال جاذبية الثقب الأسود.

وهذا يعني أنَّ محور اللُّف المغزلي لأي جُسيم اختبار يحمل زخماً زاوياً (كجیروسکوب صغير مثلاً) سيتغَير إذا كان يسقط سقوطاً حراً نحو جسم ضخم دوَار، كأحد ثقوب كير السوداء. ويكون إطاره المرجعي المحلي تباططاً بفعل تعرُضه لقوة سحبٍ بسبب دوران الجسم الضخم المركزي. وهذه الظاهرة، التي اكتُشفَت عام ۱۹۱۸ والتي تُسمى تأثير «لينز-ثیرینج»، لا تحدث في الواقع حول الثقوب السوداء فقط، بل تحدث بدرجةٍ ما حول أي جسم دوَار. فإذا وضعت جیروسکوبَا دقيقاً جداً في مدارٍ حول كوكب الأرض، فسيتغَير اتجاه محور دورانِه بسبب تباطؤ الإطار المرجعي.

إنَّ معادلات المجال التي وضعها أينشتاين هي التي تصف رياضيات الثقب الأسود، وقد حلَّ كارل شفارتزشيلد، كما ذُكر أيضاً في الفصل الأول، هذه المعادلات مُطبقاً إياها على حالة الثقب الأسود الثابت (غير الدوَار)، مُحققاً بذلك إنجازاً باهراً بالنظر إلى أنه فعل ذلك في عام ۱۹۱۵، وهو العام نفسه الذي طرح فيه أينشتاين نظرية النسبية العامة. وبعد ذلك بكثير، تناول النیوزیلندي روی کیر حالة الثقب الأسود الدوَار. وعقب ذلك بسنواتٍ قليلة، تعمق الأسترالي براندون کارتير تعمقاً أشدَّ بكثير في استكشاف الحل الذي وضعه کير. إذ درَس کارتير نتائج دالَّة کير المترية دراسةً شاملةً عميقة. وأثبتت أنَّ الثقب الأسود الدوَار يُسبب دوامةً دوارةً شديدةً في نسيج الزمكان تُحيط به، وتتشاءم بسبب تباطؤ الإطار المرجعي. ولتحقيق هذه الدوَمات، يمكن أن نضرب مثلاً لها بالزوبعة؛ فالقرب من مركز الزوبعة، يلفُ الهواء بسرعة حاملاً معه أي شيء في مساره، سواءً أكان تبنِّاً في حقل من التبن أو رملًا في صحراء. وكلما ابتعدنا عن مركز الزوبعة، يدور الهواء (وبالتبعية التبن أو الرمال) بوتيرة أبطأ. ينطبق هذا أيضاً على نسيج الزمكان المحيط بالثقب الأسود الدوَار؛ فبعيداً عن أفق الحدث، تكون السرعة التي يدور بها نسيج الزمكان نفسه بطيئة، ولكن عند الأفق، يدور نسيج الزمكان نفسه بالسرعة نفسها التي يدور بها الأفق.

أي إنَّ أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود الدوَار (ثقب کير) يكاد يُطابق الثقب الأسود غير الدوَار (ثقب شفارتزشيلد)، باستثناء أنَّ ازدياد سرعة دوران الثقب الأسود يجعل بئر طاقة الوضع الناجمة عن قوى الجاذبية أعمق؛ أي إنَّ ثقب کير الأسود يُكون بئراً أعمق من طاقة الوضع الناجمة عن الجاذبية من تلك التي يُكُونُها ثقب أسود من ثقوب شفارتزشيلد له الكتلة نفسها، ولذا فإنَّ ثقب کير الأسود يُمكن أن يكون مصدر

طاقةً أقوى من الثقب الأسود غير الدوار، وسنعود إلى هذه النقطة في الفصل السابع. وإلى أن نصل إليها، فمن المفيد تلخيص هذا السلوك بالقول إنَّ أفق الحدث المحيط بثقب شفارتزشيلد الأسود يعتمد على الكتلة فقط، لكنَّ أفق الحدث المحيط بثقب كير الأسود يعتمد على الكتلة والزخم الزاوي كلِّيًما.

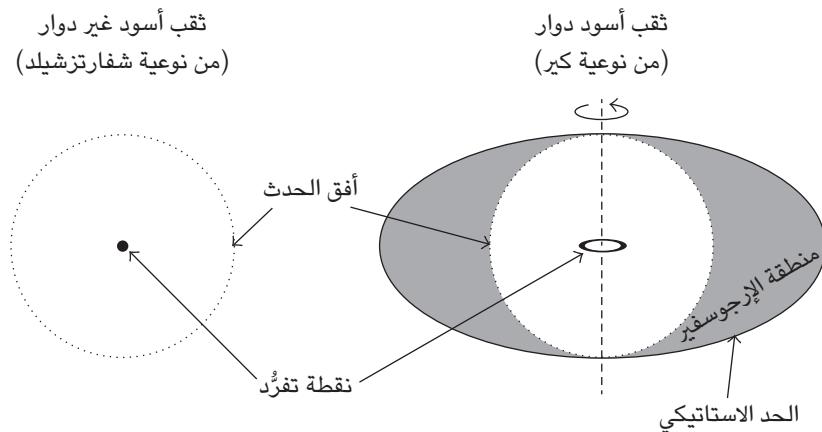
ويبقى السؤال عَمَّا إذا كان يمكن أن يُوجَد، ولو نظرياً حتى، أي نقاط تفرد في نسيج الزمكان ليست مُحاطة بأيٍّ من مناطق أفق الحدث ومَخْفَيَة بين طيَّاتها، أو ما يُسمَى «نقاط التفرد العارية»، دون إجابة حتى الآن. بِحُكْمِ الطبيعة، فكلُّ حالات الثقوب السوداء التي تمثل حلولاً لمعادلات المجال التي وضعها أينشتاين مُحاطة بمناطق من آفاق الحدث، وكما هو مُوضَّح في الفصل الأول، لا ضوء — وبالتباعية لا معلومات — يمكن أن يهرب من آفاق الحدث. إذ يعتقد أنَّ كل نقاط تفرد الثقب السوداء مُحاطة بنطاق آفاق الحدث، ولذا فهي ليست «عارية»؛ ولذلك يستحيل الوصول إلى معلوماتٍ مباشرة عن نقطة التفرد من بقية الكون الواقع خارجها. صاغ عالم الرياضيات البريطاني روجر بنروز الفرضية المُسماة فرضية الرقابة الكونية، وهي تنصُّ على أنَّ كلَّ نقاط التفرد في نسيج الزمكان مُكوَّنة من ظروفٍ أولية مُعتادة، ومَخْفَيَة بين طيَّات آفاق الحدث، وأنَّ الفضاء ليس فيه نقاط تفرد عارية.

### متى يكون مقدار الزخم الزاوي أكبر مما ينبغي؟

يُوجَد حدًّا أقصى لمقدار الزخم الزاوي الذي يمكن أن يصل إليه الثقب الأسود. ويعتمد هذا الحد على كتلة الثقب الأسود، إذ يستطيع الثقب الأسود الأضخم أن يدور أسرع من ثقب أسود أقل ضخامة. ويُعرَف الثقب الأسود الذي يدور بسرعةٍ قريبة من هذا الحد الأقصى باسم ثقب كير الأسود المتطرف. ومن الممكن إظهار أنَّ المرء إذا حاول زيادة الزخم الزاوي لثقب أسود، ليصنع ثقباًأسود متطرفاً من نوعية ثقوب كير، بإطلاق مادة سريعة الدوران داخله (أي زيادة سرعة دورانه لأنَّه تُقلِّبه بملعقة)، فإنَّ قوى الطرد المركزي عندئذٍ تمنع المادة حتى من دخول أفق الحدث.

وعلى مسافةٍ أبعد بعض الشيء من أفق الحدث المحيط بثقب أسود دَوَّار، يقع سطح رياضيٍّ مُهم آخر يُعرَف باسم الحد الاستاتيكي. ويعني تباطؤ الأُطر المرجعية القصورية عدم وجود راصِدين ثابِتين داخل هذا السطح إذا كانت قيمة الزخم الزاوي للجسم الضخم غير صفرية؛ فكلُّ إطارٍ مرجعيٍ يمكن تحقيقه مادياً داخل الحد الاستاتيكي يدور حتماً.

و داخل نطاق هذا السطح، يدور الفضاء بسرعة كبيرة جدًا لدرجة أنَّ الضوء نفسه يُضطر إلى الدوران مع الثقب الأسود؛ أي إنه من المستحيل أن يظل ساكناً. هذا وتُعرف المنطقة الواقعة بين الحد الاستاتيكي وأفق الحدث باسم الإرجوسفير، لكنها، كما يتضح في شكل ١-٣، ليست كروية، وهذا مُحِيرٌ بعض الشيء لأنَّ اسمها يُوحِي بعكس ذلك. إذ تكون منطقة الإرجوسفير أكبر بكثيرٍ من أفق الحدث مع الاتجاه نحو خط الاستواء، لكن نصف قطرها يقترب من نصف قطر أفق الحدث كلما اتجهنا نحو القطبين إلى أنْ يُصبح مُساوياً له عندهما. وبذلك يكون شكل الإرجوسفير الناتج شبه كروي مُفلطحاً، على غرار شكل إحدى ثمرات يقطين جاراديل (من دون الساق). غير أنَّ المقطعين الأولين من كلمة «إرجوسفير» مُشتقان من اسم «إرجون» اليوناني الذي يعني «الشغل» أو «الطاقة» (كما في الكلمة «إرجونوميكس» التي تعني دراسة الناس في بيئات العمل)، وقد اشتُقَت منه أيضًا وحدة قياس الطاقة القديمة، الإرج. ومن المثير للاهتمام أن تُضيف أنَّه يوجد فعل يوناني يُنطَق «إرجو»، ويعني الإحاطة بالشيء وإبقاءه بعيداً، وهذا الوصف مناسب لطبيعة منطقة الإرجوسفير. وربما كان هذا حاضراً في ذهن روجر بنروز الذي صاغ اسم هذه المنطقة المحيطة بثقب أسود دوار ديميتريوس كريستودولو الذي أيدَ صحته. وتكمُن أهمية الإرجوسفير في أنها المنطقة التي يمكن فيها استخراج الطاقة من الثقب الأسود.



شكل ١-٣: السطحان المختلفان المحيطان بثقب أسود (ثابت) من نوعية شفارتزشيلد وبثقب أسود (دوار) من نوعية كير (في تمثيل إحداثيات بوير-لينديكويست الشائعة الاستخدام).

ولأن الجزء الواقع داخل فضاء منطقة الإرجوسفير يدور، فإن جزيئات المادة الموجودة داخل هذا الفضاء أيضًا تُجرف إلى حركة دورانية. لذا تخزن طاقة دورانية كبيرة في هذا الدوران الذي يُدْوِرُه الفضاء، وهذه نقطة مهمة جدًا سنعود إليها في الفصل الثامن.

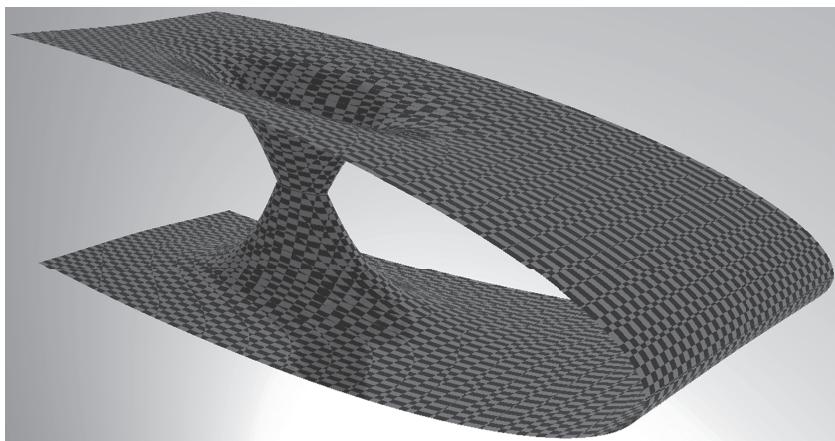
## الثقوب البيضاء والثقوب الدودية

تَتَسَمّ معادلات أينشتاين المتعلقة بنظرية النسبية العامة بأنها غنية جدًا وتتيح حلولاً مختلفة كثيرة تصف نسخاً بديلة من نسيج الزمكان المنحني. وهذا يوفر لدارسي الكون مصدرًا لا ينضب تقريباً من الأكوان المُحتملة ليصيغوها ويتأملوها. صحيح أنّ نوعية الكون الذي نعيش فيه بالفعل لا يمكن تحديدها إلا بالرصد (إن أمكن ذلك أصلًا!). لكن هذا لا يمنع علماء الفيزياء الرياضية من النظر في معادلات أينشتاين من كل وجهٍ للعثور على كل أنواع الحلول الشائقة.

وأحد الأجسام المثيرة للاهتمام التي يمكن أن يتخيّلها علماء الفيزياء الرياضية هو ما يُسمّى بالثقب الأبيض. يتصرف الثقب الأبيض كالثقب الأسود تماماً، ولكن مع عكس اتجاه الزمن (تخيل فيما يُعرض بتسلسلٍ عكسي من الأمام إلى الخلف). فبدلاً من أن يمتص المادة، يقذفها خارجاً. وبدلًا من أن يشكّل أفق الحدث المحيط به منطقة لا يمكن الهروب منها أبداً، يحرس منطقة لا يمكن لأي شيء دخولها. فحالما تخرج المادة من ثقب أبيض، لا يمكنها العودة إلى هناك؛ ويكون مستقبلها كله خارجه. وكما سترى في الفصل السادس، يتشكّل الثقب الأسود من نجمٍ منهار ولا بدّ أن يتخرّ في النهاية وفق قوانين ميكانيكا الكم إلى إشعاع هوكينج (انظر الفصل الخامس). أمّا الثقب الأبيض، فلا يمكن أن ينتُج إلا من الإشعاع الذي يتجمّع تلقائياً، لسببٍ ما، ليكون ثقباً أسود. ليس من السهل فهم الكيفية التي يمكن أن يحدث بها هذا في الواقع، وفوق ذلك، أثبتت دوجلاس إيردلي أنَّ الثقوب البيضاء غير مستقرة بطبعتها.

وعندما كان أينشتاين وتلميذه ناثان روزن يُجربان طرفاً مختلفة لحل معادلات أينشتاين في ثلاثينيات القرن العشرين، وجدا حلًّا مثيراً للاهتمام. إذ توصلوا إلى أنه إذا أمكن أن تكون منطقة من نسيج الزمكان منحنية بشدة، فربما يمكن أن تُصبح مطويةً بما يكفي للتوصيل بين جزأين من نسيج الزمكان، كانا مُفصّلين سلفاً بمسافة كبيرة، بواسطة جسر صغير، أو ثقب دودي، كما هو موضح في شكل ٢-٣. ودائماً ما كانت المسافات الهائلة الفاصلة بين النجوم وال مجرات غير مواتية لرغبة أولئك الكتاب الذين

يريدون تقديم عروض درامية بشرية على مسرح كوني، غير أنَّ الثقوب الدودية (المعروفة أيضاً باسم جسور أينشتاين-روزن) أثارت للحُكَّام آلية الحبكة المثالية التي يستطيعون بها نقل أبطال رواياتهم الآخيار والأشرار إلى هناك. يُعد هذا الابتكار الرياضي بمثابة نعمة بأتمِّ معنى الكلمة لكتاب روايات الخيال العلمي، لأنَّه يُتيح وسيلةً جاهزة لقطع مسافاتٍ هائلة عبر الفضاء، وبذلك يدعم نجاح العديد من آليات الحبكة التي قد تبدو مُختلقة تماماً وغير قابلة إطلاقاً للتصديق. ولكن تجدر الإشارة مجدداً إلى أننا لا نملك أدلة رصدية على وجود الثقوب الدودية فيكونا بالفعل. وفوق ذلك، تُوجَّد أدلة نظرية كثيرة بعض الشيء على أنَّ الثقب الدودي، فور تكوُّنه، لن يبقى مُستقرًّا فتره طويلة. إذ يبدو أنَّ إبقاء الثقب الدودي مفتوحاً يستلزم كميةً كبيرة من مادة ذات طاقة سالبة، في حين أنَّ كل المادة العاديَّة لها طاقة موجبة (هذا مرتبط بحقيقة أنَّ قوى الجاذبية عادة ما تكون تجاذُّبية على الدوام). ومن ثمَّ، فممرور مادة عاديَّة عبر ثقب دودي ربما يكون كافياً لإنهاء استقراره وتدميره، ما يجعله يتحوَّل إلى نقطة تفرد في ثقب أسود.



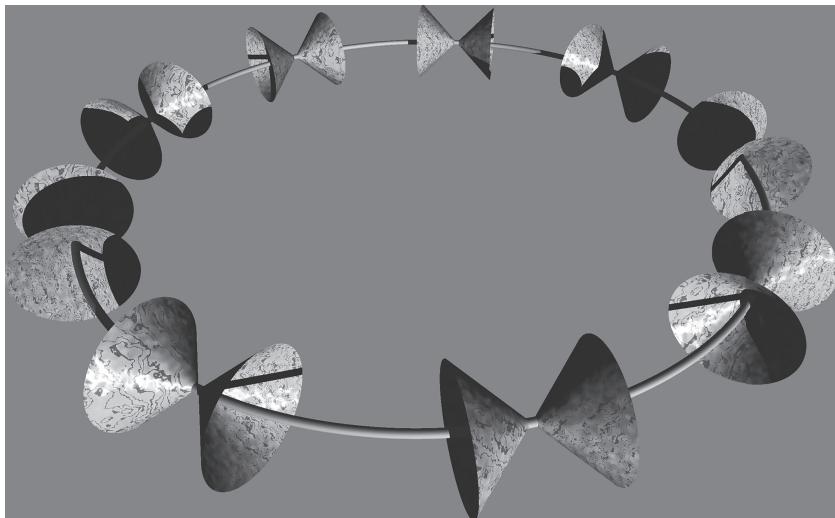
شكل ٢-٣: ثقب دودي يصل بين منطقتَين في نسيج الزمكان كان من المفترض أن تكونا مُنفصلَتَين لولاه.

إذا كانت الثقوب الدودية موجودة بالفعل، وأمكن الحفاظ على بقائِها أيَّ فتره زمنية معقوله، فستكون لها بعض الخصائص الغريبة والمدهشة. فهي لن تُتيح وسيلةً لأخذ

طريقٌ مختصرٌ هائلٌ عبر مساحة شاسعة من الفضاء فحسب، بل ستسمح أيضًا للمسافر بالعودة في الزمن إلى الوراء. إذُ يمكن للمرء حينئذٍ إنشاء مُنحنيات مُغلقة مُحاكية للزمن؛ أي حلقات في نسيج الزمكان تُشكّل فيها المخاريط الضوئية دائرةً مغلقةً (انظر شكل ٣-٣) بحيث يستطيع شخصٌ مسافر على طول منحنٍ مُغلقٍ مُحاكٍ للزمن أن يُكرّر التجارب نفسها التي عاشها مرارًا وتكرارًا ببساطة، كما يظهر في فيلم «يوم مُكرّر» (جراوند هووج داي).

وفي الحقيقة، تُوجَد عدّة حلولٌ لمعادلات أينشتاين، بالإضافة إلى حلول الثقوب الدودية، لها هذه الخاصية المُقلقة المنافية للحسّ المنطقي. ففي عام ١٩٤٩، وجد عالم الرياضيات كيرت جودل حلاً يصف كونًا دوارًا، وهذا الحل يتضمّن النوع نفسه بالضبط من المنحنيات المغلقة المُحاكية للزمن التي تمرُّ عبر الأحداث مرارًا وتكرارًا في حلقةٍ لا تنتهي من «يوم مُكرّر». (من الواضح أنَّ «حرية الإرادة» ليست جزءًا من معادلات المجال!) صحيح أنَّ الجزء الذي يُعتقد أنَّ له أهمية مادية حقيقية في العالم الفعلي من حلٍ «كير» هو ذلك الذي يصف نسيج الزمكان خارج أفق الحدث. ولكن لم يتضح ما إذا كان الجزء المتعلق بما يوجد داخل أفق الحدث من حلٍ «كير»، وإن كان سليماً من الناحية الرياضية، له أي أهمية مادية. ففي هذا الجزء من حلٍ كير، لا تكون حالة التفرد مجرد نقطة (متلماً تكون في الثقب الأسود غير الدوار)، بل تأخذ شكل حلقةٍ سريعة الدوران (لكنَّ صحة ذلك من الناحية المادية قائمة أساساً على مجرد تخمينات). وتكون هذه المترفة الشبيهة بالحلقة محاطة بمنحنيات مُغلقة مُحاكية للزمن. وعلى هذا المنحني، يكون مستقبلك جزءاً من ماضيك أيضًا، ويُصبح ممكناً لك من الناحية النظرية أن تقتل جدك أو جدتك قبل أن يلدا والديك! وبذلك يبدو أنَّ وجود منحنيات مغلقة مُحاكية للزمن يخلق إمكانية حدوث جميع أنواع المفارقات المتعلقة بالسفر عبر الزمن. وأحد الحلول الممكنة لهذا هو الاعتراف بأننا ليس لدينا نظرية تربط ميكانيكا الكم (التي تصف الأشياء الصغيرة جدًا) بنظرية النسبية العامة (التي تصف الأشياء الضخمة جدًا)، أي ليس لدينا نظرية عن الجاذبية الكمية. فنحن لا نعرف فيزياء الأجسام التي تتسم بكتلة هائلة لكن حجمها صغير جدًا. ويرى معظم الفيزيائيين أننا بحاجةٍ إلى هذا لنفهم سلوك نسيج الزمكان بالقرب من نقاط التفرد تمامًا. ومن ثم، قد يكون السبب في أنَّ هذه الحلول الغريبة لمعادلات أينشتاين لا تتحقّق بالفعل في الكون هو أنَّها محظورة أصلًا بحكم طبيعتها الميكانيكية الكمية الأساسية. إذ ربما تسفر التأثيرات الكمية، على سبيل المثال، عن إنهاء استقرار الثقوب

الدودية. ويعتقد ستيفن هوكينج أن هذا ما يحدث بالفعل، وسمى هذا المبدأ «فرضية حماية التسلسل الزمني». وقال ساخراً إنَّ هذا هو المبدأ الأساسي الذي يُبقي الكون آمناً للمؤرّخين.



شكل ٣-٣: منحنٌ مغلقٌ محاكي للزمن حيث يُصبح مستقبلك هو ماضيك.

يُوجَدُ الكثيَرُ من السُّمات والظواهر المتعلقة بالأجزاء الداخلية من الثقوب السوداء الدوارة يكاد يتجاوز فهمنا للفيزياء الأساسية، ولذا يصير جزءٌ كبيرٌ من وصفنا لها قائماً على مجرد تكهناً. وعلى النقيض من ذلك، فدوران الثقوب السوداء وتأثيرها في مُحيطها لهما أهمية عملية هائلة لفهم ما نستطيع رؤيته بتلسكوباتنا. ولذا فخطوتنا التالية هي التفكير بمزيدٍ من التفصيل فيما يحدُث للمادة عندما تسقط في ثقب أسود.

## الفصل الرابع

# السقوط في ثقب أسود ...

### ما الحد الأقصى للقرب؟

قبل أن يتتسنّى لنا التفكير بالتفصيل فيما سيحدث إذا قادك حظك العثِر، أنت أو أحد مُتعلقاتك، إلى الواقع داخل ثقبٍ أسود، من المهم أن نفهم تأثير الموضع الذي ينظر منه الراصد، أو الإطار المرجعي. هذا يعني أنَّ الراصدين المختلفين يرَيان أشياء مختلفةً تماماً. فالملاهيَة الدقيقة للموضع الذي تنظر منه إلى جسمٍ يسقط في ثقبٍ أسود تعتمد على مقدار بُعدك عن هذا الجسم (وما إذا كنت أنت ذلك الجسم أصلاً). تخيلْ جُسيماً من الضوء، أي فوتوناً، يقع خارج أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود؛ نظراً إلى أنه يقع خارج الأفق، فإنه يستطيع الهروب نظرياً. أمَّا داخل أفق الحدث، فيكون الوضع مختلفاً، إذ لا يستطيع الفوتون الهروب من مجال جاذبية الثقب الأسود. ولكن حتى خارج أفق الحدث، فالفوتون الذي يتحرَّك بعيداً عن الثقب الأسود لن يهُرب منه سالِماً تماماً. إذ يتعرض الفوتون لفقدان جزءٍ من طاقته بسبب الشغل الذي يتعرَّضُ عليه أن يبذل لمقاومة الجاذبية. وهذا مثالٌ لبئر طاقة الوضع الناجمة عن قوى الجاذبية؛ فمثلاً أنك تحتاج إلى طاقةٍ لتسحب نفسك إلى الأعلى خارج بئر عميقة، يحتاج الفوتون إلى بذل طاقةٍ ليسحب نفسه بعيداً عن المنطقة القريبة من جسمٍ ضخم. وقد قيس مقدار هذا التأثير حتى لدى فوتونات تتحرَّك في مجال جاذبية الأرض. إذ تتناسب طاقة الفوتون عكسيًّا مع طول الموجي؛ أي إنَّ الفوتون العالي الطاقة له طول موجي قصير في حين أنَّ الفوتون المنخفض الطاقة له طول موجي طويل. ويفقد الفوتون طاقةً بينما يُحاول التراجع مُبتعداً عن الثقب الأسود، لذا يزيد طوله الموجي. وهذا يُغيِّر لون الضوء، إذ يبتعد عن اللون الأزرق (ذي الطول الموجي القصير) متوجهاً نحو اللون الأحمر (ذي الطول الموجي الطويل) الذي يُمثل نهاية

الطيف (يُسمَّى هذا التأثير بالانزياح نحو الأحمر). وهذا النوع من الانزياح نحو الأحمر، المعروف بالانزياح نحو الأحمر بفعل الجاذبية، ينشأ حيث يكون نسيج الزمكان نفسه ممطوطاً، أو مُنحنياً، بفعلِ تأثير جسم ذي كتلةٍ هائلة كالثقب الأسود مثلاً. يُشار إلى أنَّ جون ميشيل، مع أنه كان يحمل أفكاراً مُبتكرةً مهمَّة عن النجوم المظلمة، فقد أخطأ حين ظنَّ أنَّ سرعة الضوء تقلُّ وهو يحاول الخروج من بئر طاقة الوضع. إذ صرنا نعرف الآن أنَّ طول الضوء الموجي (وترده بالتبَعية) يتأثر بوجود نجمٍ ضخم.

### ماذا يحدث للزمن بالقرب من ثقب أسود؟

وصفت في الفصلين الأول والثاني كيف يتَشَوَّه نسيجُ الزمكان بوجود كتلةٍ ما (أي جسم يُنْتَج مجال جاذبيَّة خاصاً به) وهذا يعني أنَّ التأثير لا يقتصر على فضاء المكان القريب من الثقب الأسود، بل يتأثر الزمان القريب منه أيضاً.

تخيل أنك تُريد البقاء على بُعد مسافةٍ آمنة من أحد ثقوب شفارتزشيلد السوداء لكنك تُريد معرفة المزيد عن سلوك الزمان بالقرب منه. ولذا اتخذت الترتيبات الازمة لتركيز ٢٦ راصداً ثابتاً بالقرب من أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود، على أن يكونوا خارجه بما يضمن سلامتهم بالتأكيد. يُسمَّى هؤلاء الراصدون بالحرروف من الألف إلى الياء، ويرتَبُون ضمن طابور، على أن يكون الراسد «أ» هو الأقرب إلى أفق الحدث ويكون الراسد «ي» هو الأقرب إليك، وأنت تقف بعيداً على بُعد مسافةٍ آمنة. يحمل كل راصدٍ من الألف إلى الياء ساعةً دقيقة لقياس توقيته المحلي، في موقعه المحدد. وتخيل أنك، في إطار الاتفاق لإقناع هؤلاء الراصدين المُسمَّين بالحرروف من الألف إلى الياء بالمشاركة في هذه التجربة، كنت قد عرضت على كلٌّ منهم حافزاً وأهديته ساعة إضافية غير عادية ذات ضبط مُعَدَّ، بحيث يكون الوقت الذي تقيسه مساوياً للوقت الظاهر على ساعتك وأنك موجود على بُعد مسافتكم الآمنة. سيجد المشارك «ي»، الأقرب إليك، أنَّ الساعتين اللتين بحوزته تقرآن وقتَين مختلفَين قليلاً لأنَّ ساعته الخاصة، التي تقيس التوقيت المحلي (أي ما نُسمِّيه «الزمن الخاص» بالمصطلحات المتخصصة)، ستمضي بوتيرةٍ أبطأً قليلاً من الساعة الهدية التي يُطابق وقتُها الوقت الذي تقيسه وأنت على بُعد مسافتكم الأكبر أمّا والأبعد بعض الشيء. وعند تجميع نتائج المشاركين من المشارك «أ» إلى المشارك «ي»، والمقارنة بينها، تُظهر تأثيراً لافتاً؛ فكلَّما كان الراسد أقرب إلى ثقب أسود، فإنَّ الساعة التي تقيس الوقت «تمضي بوتيرةٍ أبطأً» مقارنةً بالزمن البعيد حسبما يظهر على ساعات

المشاركين المُهداة المضبوطة خصيصي. ويُعرف هذا التأثير، الذي وُصف في نظرية النسبية العامة لأينشتاين، باسم تمدد الزمن. سيكون التأثير أكبر وأكبر لدى الراصدين الأقرب إلى بداية الترتيب الأبجدي، أي الأقرب إلى الثقب الأسود. وكلما زاد القُرب من الثقب الأسود، فإنَّ الساعة المحلية (أيًا كان نوعها؛ سواء ذرية أو بيكيميائية) ستمضي بوتيرة أبطأ مقارنة بالساعة التي يستخدمها راصد بعيد.

لنفترض أنك كنت تُسخِّر تجاربك لأداء مهام متعددة، وذلك باستخدام مجموعة مختلفة من ٢٦ راصدًا على بُعد المسافات نفسها من ثقب أسود مختلف. يُرتب الراصدون بنفس طريقة ترتيب الراصدين الذين يحملون الأسماء نفسها بالقرب من الثقب الأسود الأول. ولكن في الحالـة الثانية، تبلغ كتلة الثقب الأسود ضعف كتلة الثقب الأسود في تجربتك الأولى. ويجب تغيير ضبط الساعات غير العادية التي أعددتها سلفًا لتكون هدايا لهذه المجموعة الثانية من الراصدين تغييرًا جذرًيا كما غير في تجربتك الأصلية، لكنَّ المعدل الذي يجب أن يُعادل وفقًا له ضبط كل ساعة غير عادية يُساوي بالضبط ضعف معدل التعديل المطلوب للساعة المقابلة في المجموعة الأولى من الساعات المُهداة عند المسافة نفسها بالضبط من مركز الثقب الأسود الأول الذي تبلغ كتلته نصف كتلة الثاني. وهذا تكون تأثيرات تمدد الزمن هذه أكبر كلما كانت كتلة الثقب الأسود أكبر، بل وتُصبح أشدَّ كما اقتربت من أفق الحدث.

يُشار إلى أن هذا التمدد الزمني ليس ناتجًا عن وجود مسافة إضافية يقطعها الضوء (أي إشارة قياس الوقت) من ساعة أقرب إلى الثقب الأسود، وبالطبعية أبعد عنك، باعتبار أنَّ الراصد الذي تقف على بُعد مسافة آمنة؛ إذ لا يقتصر الأمر على مجرد وجود إزاحة زمنية بالنسبة إلى راصد موجود على مسافة أبعد من الثقب الأسود. فكلما اقتربت ساعة من ثقب أسود، كان المعدل الذي يُقاس به تدفق الزمن على تلك الساعة أبطأ، بغض النظر عن ماهية الوسائل الموثوقة التي تستخدِّمها لقياس هذا التدفق الزمني. إذ إنَّ الزمن نفسه يُمطَّ (أو يتمدد، في الواقع).

فما النتيجة المنطقية لتمدد الزمن بالقرب من الثقب الأسود؟ هذا يجعل التأثيرات التي تحدث في الإطار المرجعي الخاص براصد قريب جدًّا من الثقب الأسود والتي يمكن قياسها مختلفًة تماماً عن التأثيرات التي تحدث في الإطار المرجعي لراصد بعيد جدًّا، فهما عالمان مُنفصلان في الحقيقة.

لُتَكْرِرُ الْآنَ فِيمَا سِيَحْدُثُ إِذَا كَانَ الرَّاصِدُ «أُ», فِي تِجْرِيبَتِكَ الْأُولَى، مَهْمَلًا بَعْضَ الشَّيْءِ وَأَسْقَطَ سَاعَتَهُ الْأُولَى (السَّاعَةُ الَّتِي يُسْتَطِعُ أَنْ يَقِيسَ بِهَا الزَّمْنُ الْخَاصُّ فِي مَوْقِعِهِ) بِحِيثَ تَسْقَطُ نَحْوَ الثَّقَبِ الْأَسْوَدِ. وَبِالرَّغْمِ مِنْ هَذِهِ الْكَارِثَةِ، بَقِيَتِ السَّاعَةُ الْهَدِيَّةُ، الَّتِي أَغْرَيَتِهِ بِهَا لِيُشَارِكَ فِي التِّجْرِيبَةِ، آمِنَةً لِأَنَّهُ ظَلَّ مَمْسَكًا بِهَا بِإِحْكَامٍ. وَلِتَفَرِّضُ أَنَّكَ أَنْتَ وَالرَّاصِدُ «أُ» تَرَيَانِ سَاعَتَهُ الْأُولَى تَتَحَرَّكُ نَحْوَ الثَّقَبِ. وَالسَّاعَةُ تَجِدُ نَفْسَهَا تَتَحَرَّكُ إِلَى دَاخْلِ الثَّقَبِ الْأَسْوَدِ بِسُرْعَةٍ مُتَزاَدِّةٍ. سُتُّلَاحِظُ أَنْتَ وَالرَّاصِدُ «أُ» تَدْرِيجِيًّا أَنَّ الْوَقْتَ الَّذِي تَقْرَأُهُ عَلَى السَّاعَةِ السَّاقِطَةِ يُصْبِحُ أَشَدَّ اخْتِلَافًا مِنْ ذِي قَبْلٍ عَنِ الْوَقْتِ الظَّاهِرِ عَلَى سَاعَةِ الرَّاصِدِ «أُ» الْآخِرِيِّ (أَيِّ السَّاعَةِ الَّتِي ضُبِطَتْ لِتَمْضِي بِوَتِيرَةٍ أَسْرَعِ مِنِ السَّاعَةِ الْمُحْلِيَّةِ لِيُتَسْنَى لَهَا قِرَاءَةُ نَفْسِ الْوَقْتِ الَّذِي يُكَافِئُ وَقْتَكَ). وَبَعْدِ مَرُورِ بَعْضِ الْوَقْتِ، سَتَبْدأُ أَنْتَ وَالرَّاصِدُ «أُ» فِي مَلَاحَظَةِ أَنَّ الزَّمْنَ عَلَى السَّاعَةِ السَّاقِطَةِ يَتَوَقَّفُ. فَالْفُوْتُونَاتِ الْمُنَبَّعَةِ عَنْ أَفْقِ الْحَدِيثِ نَحْوَ رَاصِدٍ بَعِيدٍ يَبْدُو أَنَّهَا تَبْقَى هُنَاكَ إِلَى أَجْلِ غَيْرِ مُحَدَّدٍ. وَمِنْ ثُمَّ، فَأَيُّ رَاصِدٍ خَارِجٌ لَنْ يَعْرِفَ مَا يَحْدُثُ لِأَيِّ شَيْءٍ يَسْقُطُ دَاخْلَ الثَّقَبِ الْأَسْوَدِ بَعْدَمَا يَتَجاوزُ حَدًّا مُعِينًا وَيُصْبِحُ ضِمْنَنِ نَطَاقِ نَصْفِ الْقَطْرِ الْحَرَجِ لِأَفْقِ الْحَدِيثِ. وَلَذَا يَمْكُنُ اعْتِبَارُ أَفْقِ الْحَدِيثِ فَجْوَةً فِي نَسِيجِ الزَّمْكَانِ. لَنْ يَخْرُجَ أَيُّ ضَوْءٍ مِنْ أَفْقِ الْحَدِيثِ، كَمَا رَأَيْنَا فِي الْفَصْلِ الْأُولَى. وَلِهَذَا السَّبَبِ فَهُوَ أَسْوَدُ. وَلَكِنْ فِي الإِطَارِ الْمُرْجِعِيِّ لِلسَّاعَةِ السَّاقِطَةِ الَّتِي تَهُوِي إِلَى الأَسْفَلِ خَلَالِ أَفْقِ الْحَدِيثِ، لَا تَكُونُ الْحَيَاةُ ثَابِتَةً عَلَى حَالِهَا إِلَطْلَاقًا. فَمِنْ مَوْضِعِ النَّظَرِ الَّذِي تُوجَدُ عِنْدَهُ السَّاعَةِ، سَتَنْتَقِلُ إِلَى نَقْطَةِ الْفَرْدُ في جَزْءٍ مِنْ ۱۰۰ آلَافِ مِنِ الثَّانِيَّةِ فَقَدْ، بِافتِرَاضِ أَنَّ كَتْلَةَ الثَّقَبِ الْأَسْوَدِ كَانَتْ تَسَاوِي كَتْلَةَ شَمْسَنَا ۱۰ مَرَاتٍ. وَإِذَا كَانَ حَظُّ السَّاعَةِ سِيَّئًا وَقَادَهَا إِلَى السَّقْوَطِ دَاخِلَ ثَقْبِ أَسْوَدِ فَائِقِ الضَّخَامَةِ ذِي كَتْلَةِ تَسَاوِي كَتْلَةَ شَمْسَنَا مِلِيَّارَ مَرَةً (كَالَّذِي سَنُصَادِفُهُ عِنْدَمَا نَدْرُسُ أَشْبَاهَ النَّجُومِ فِي الْفَصْلِ الثَّامِنِ)، فَإِنَّ زَمْنَ رَحْلَتِهَا الَّتِي تَخُوضُهَا دَاخِلِيًّا بَيْنِ أَفْقِ الْحَدِيثِ الْأَكْبَرِ بِكَثِيرٍ وَنَقْطَةِ التَّفَرُّدِ سَيَكُونُ بَضَعَ سَاعَاتٍ بِتَمْهُلٍ أَكْبَرِ.

## قوى المد والجزر بالقرب من ثقب أسود

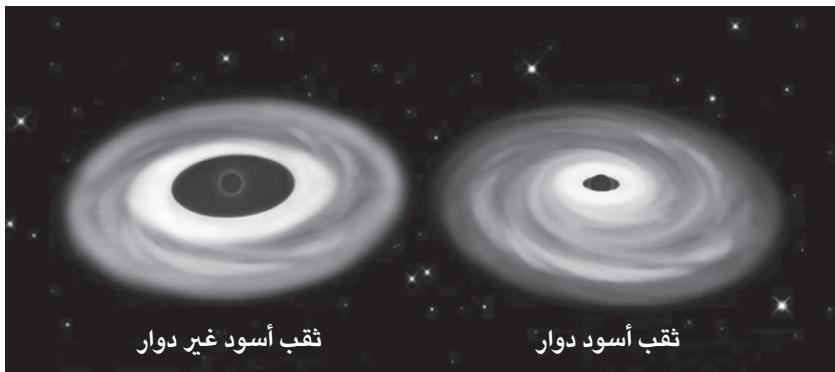
لِتَفَرِّضُ أَنَّ الرَّاصِدُ «أُ» يَسْأَلُ بَيْنَهُ وَبَيْنِ نَفْسِهِ فِي لَحْظَةٍ ضَعِيفٍ عَنِ إِمْكَانِيَّةِ الْقَفْزِ دُونَ تَرْدُدٍ بِقَدْمَيْهِ نَحْوَ الثَّقَبِ الْأَسْوَدِ عَلَى أَمْلِ استِعْدَادِ السَّاعَةِ الَّتِي أَسْقَطَهَا. مَاذَا سِيَحْدُثُ؟ سَيَبْتَيْنَ أَنَّ مِثْلَ هَذِهِ الْقَفْرَةِ سَتَكُونُ خَطَّأً جَسِيمًا، لِأَنَّ نَجَاتَهُ سَتَكُونُ مُسْتَحِيلَةً. فَالْفَارَقُ بَيْنِ قُوَّةِ الْجَاذِبَيَّةِ الَّتِي تَؤَثِّرُ فِي قَدْمَيْهِ وَالْقُوَّةِ الَّتِي تَؤَثِّرُ فِي رَأْسِهِ سَيُصْبِحُ هَائِلًا. وَهَذِهِ سَمَّةٌ مِنْ سَمَّاتِ أَيِّ مَجَالٍ قُوَّى يَخْضُعُ لِقَانُونِ التَّرْبِيعِ الْعُكْسِيِّ، مِثْلِ مَجَالِ الْجَاذِبَيَّةِ الْمُتَوَلِّةِ

من جسمٍ ضخمٍ. وصحيح أنَّ كوكب الأرض بعيد بعض الشيء عن القمر، ولكن حتى الفروق البسيطة في قوة الجاذبية التي تتعرَّض لها الأرض عند جانبيِّن متقابلين بسبب القمر، والمعروفة باسم المد والجزر، تُعدُّ من الأسباب الرئيسية في حدوث المد والجزر نحو مرتَّين في اليوم. وبوجهٍ عام، تُسمَّى هذه القوى الناتجة من وجود اختلافاتٍ في الجاذبية إضافية مثل قوة الجاذبية الناتجة من زاوية القمر النسبية والأشكال التفصيلية للكُلَّ القارية. ولكن حتى لو كان سطح الأرض كُلُّه مُغطًّى بالمحيطات دون اليائسة، لظلَّ المد والجزر موجودًا، ولتغْيير سعة نطاق تفاوت مستوى سطح البحر بنحو ٢٠ سم مرتَّين يوميًّا، وذلك ببساطةٍ نتيجة اختلاف قوة الجاذبية التي تتعرَّض لها نقاط مختلفة على الكوكب على بُعد مسافاتٍ مختلفة من الشمس.

دعنا الآن نفكِّر في المسافة الأقصى بيني وبين مركز الأرض. فبينما أكتب هذا الفصل قاعداً، يقع رأسي في مستوى أعلى بأكثَر من متَّرٍ كامل من مستوى قدميِّي المركَّزين على أرضية غرفة مكتبي. وبذلك فإنَّ قدميَّي أقرب إلى مركز الأرض من رأسي. ولأنَّ قوة الجاذبية تتبع سلوًّاكاً خاصًّا لقانون التربع العسكري ويكون كتلة الأرض كلها موجودة في مركز الأرض، ولأنَّ قدميَّي تقع على بُعد مسافةٍ أقصر من هذا المركز، فإنَّهما تشعران بأنَّهما مشدودتان نحو مركز الأرض بقوَّة، أو جذب، أشدَّ من القوة التي يشعر بها رأسي. لكنَّ الفارق الفعلي ضئيل بعض الشيء؛ فلأنَّ فرق الارتفاع يبلغ متَّراً واحداً، يكون الفرق في قوة الجاذبية ثلاثة أجزاء في ١٠ ملايين. وهذا فرق طفيف جدًّا لأنَّني بعيد عن مركز الأرض بنحو ٦٤٠٠ كيلومتر. أمَّا عندما يكون الجسم الجاذب أقرب إلى أن يكون كتلة نقطية، كالثقب الأسود، فإنَّ الاختلاف في قوة الجاذبية عند نقطتين مفصَّلتين بمترٍ واحد فقط في الاتجاه نحو الثقب الأسود سيكون أشدَّ بكثيرٍ جدًّا. شديد جدًّا لدرجة أنَّ قدميِّي الراسد «أ»، عندما يكون قريباً من نقطة التفرد، ستتعرَّضان لشدٍّ يمْطُّهما بعيداً عن ركبتيه وبقية جسده إلى حدٍ يتجاوز قدرة أوتاره وعضلاته على أن تبقى مُلتَحمة، وسيتعرَّضان لإطالةٍ تجعله أشبه بإحدى شعيرات المعكرونة. من الأفضل ألا تتفقز.

## نسيج الزمكان الحركي

يُحدث دوران الثقب الأسود فرقاً مهماً فيما يتعلق بمدى قرب المادة التي تدور حوله، وهذا مرتبط بكمية الطاقة التي يمكن استخلاصُها منه. وبناءً على أبحاث روبي كير وحله



شكل ١-٤: يستطيع الغاز أن يدور في مدارٍ أقرب إلى ثقب أسود دوار من قُربه إلى ثقب أسود غير دوار.

لمعادلات المجال التي وضعها أينشتاين، نعلم أن أصغر مدارٍ يمكن أن يدور فيه جُسيم حول ثقب أسود دون السقوط داخله يعتمد على مدى سرعة دوران الثقب. فكَلما كان الثقب الأسود يدور بوتيرة أسرع، تستطيع المادة أن تكون أقرب إليه دون أن يتلاعها، كما هو مُوضَح في شكل ١-٤. فإذا أُسقطت شيئاً إلى الأسفل مباشرة نحو ثقب أسود دوار، فإنه سيبدأ الدوران في مدارٍ حول الثقب بالرغم من عدم وجود شيءٍ خارج الثقب سوى منطقةٍ فارغة من نسيج الزمكان. صحيح أنَّ التغلُّب على هذا التباطؤ للإطار المرجعي ممكُنٌ خارج منطقة الإرجوسفير باستخدام الصواريخ، لكن ذلك مُستحيل داخلها. ففي داخل منطقة الإرجوسفير الخاصة بثقب أسود دوار، خارج أفق الحدث المحيط به مباشرة، لا شيء يمكن أن يبقى ساكناً. إنَّ الثقب الدوار يسحب نسيج الزمكان، ومحتوياته بالتبعية، معه بالفعل أثناء دورانه. ومن السمات الأخرى لتباطؤ الإطار المرجعي بهذه الطريقة أنَّ الضوء نفسه، حتى لو كان ينتقل عكس الاتجاه الذي يدور فيه الثقب الأسود، سُيُحمل في الاتجاه المعاكس حول الثقب.

### الدوران حول ثقب أسود

من المثير للاهتمام أن نفكِّر في تسلسل الأحداث المحتمل إذا تحوَّلت شمسنا تلقائياً إلى ثقب أسود الآن. أول ما يمكن أن تعرفه أنت أو أنا سيكون بعد ثمان دقائق؛ فضوء

الشمس الريبيعي الجميل الذي أكتبُ مُستعيناً به سيدوّقَ فجأة. ومع أنَّ شدة إضاءة النجم المفرد الذي نسميه شمسنا ضئيلة جدًا مقارنة بشدة إضاءة أشباه النجوم وأشباه النجوم الميكروية التي سنناقشه في الفصل الثامن، فإنه قريب من الأرض بما يكفي ليُمدَّ كوكبنا بنحو كيلومترات لكل متر مُربع من الطاقة في المتوسط. ومن اللافت أنَّ ذلك كان كافياً حتى الآن للحفاظ على استدامة كل أشكال الحياة على الكوكب، إذ يُمكّن النباتات من النمو، ثم تأكلُها الحيوانات التي تأكلُها حيوانات أخرى بعدها. دائمًا ما كانت الشمس هي المحرِّك الرئيس وراء كل ذلك. ولكن إذا توقف الاندماج في الشمس وآل مصيرها (على عكس كل التوقعات) إلى الانهيار مكونةً ثقباً أسود، فعندئذٍ ستُصبح معتمةً جدًا وسنموت كلنا في النهاية. (هذه رؤيةٌ مستقبليةٌ كثيبةٌ بعض الشيء، لكنَّ القارئ على أن يصبر عليها حتى الفصل السابع، حيث نتعلم أنَّ الشمس ليست من نوعية النجوم التي يُمكن أن تكونَ ثقباً أسود؛ لأنَّ وزنها أخف من اللازم لهذا). ولكن على المستوى الديناميكي، لا شيءٌ سيتغير إطلاقاً فيما يتعلق بكوكب الأرض والمجموعة الشمسية بكواكبها والكواكب القزمة والكويكبات كلُّها. فكل الأجسام الضخمة المستقرة في مدارات حول الشمس ستظل في المدارات نفسها بدرجةٍ كبيرةٍ جدًا. فاستناداً إلى طبيعة الجاذبية، ستظل قوى الجذب الناشئة عن الجاذبية خارج الشمس كما هي دون تغيير، سواءً أبقَيت مساحة نطاقها كما هي الآن، أم انهارت إلى نقطة تفردٍ ضمن أفق حدٍ يبلغ نطاقه ثلاثة كيلومترات. وكذلك فإنَّ انهيار جسم كروي من كل جوانبه بال معدل نفسه، بسبب تأثير الجاذبية، إلى ثقب أسود لن يغير إطلاقاً في الزخم الزاوي للأجسام التي تدور حوله في مدارات، ولذا فالأنماط والتنبؤات المستقبلية القائمة على البروج الفلكية وظواهر المد والجزر في المجموعة الشمسية ستبقى على حالها دون أي تغيير إذا غاب ضوء الشمس.

ولكن من المُحتمل أن تنشأ مدارات جديدة، وستكون أقرب بكثير إلى الشمس المتحولة إلى ثقبٍ أسود ممَّا كان ممكناً في السابق عندما كانت البلازما الشمسية حائلًا يمنع اقترابها. ورغم ذلك، لا يُمكن أن تكون هذه المدارات قريبةً جدًا من أفق الحدث. فتفاصيلٌ تُشوّهُ نسيج الزمكان بفعل نقطة تفردٍ ذات كتلة تعني أنه من المستحيل أن يدور شيءٌ في مدارٍ خارج أفق الحدث نفسه مباشرةً. إذ إنَّ محاولة إنشاء مدار دائري هناك تستلزم تدخلًا تصحيحيًّا باستخدام الصواريخ من أجل الحفاظ على المدار. وفي الحقيقة، تُظهر الرياضيات أنَّ أقرب مسافةٍ يمكن أنْ تُصبح موجودين عندها، نحن أو أي جُسيم ذي كتلة،

في مدار دائري مستقر بالقرب من ثقب أسود ثابت ستساوي نصف قطر شفارتزشيلد ثلاثة مرات. هنا قد تلقيت تحذيرًا.

وفي الواقع، من الممكن أن تُوجَد مدارات دائيرية غير مستقرة حتى مسافةٍ تصل إلى نصف هذه المسافة من ثقب أسود (غير دوار) من نوعية ثقوب شفارتزشيلد. وتُحدّد هذه المسافة سطحًا كرويًّا يُسمى أحياناً كرة فوتونية. ولكن حتى إذا كان الجسم الدائري فوتوناً، تكون هذه المدارات غير مستقرة، وسرعان ما سينزلق الفوتون الذي يدور فيها نحو الثقب الأسود، ولا يعود أبداً، أو ينجرف بعيداً في الفضاء أصلاً.

ولكن إذا كان الثقب الأسود من نوعية ثقوب «كير»، أي له زخم زاوي، يختلف وضع المدارات القريبة من الثقب الأسود. وعلى وجه التحديد، ستُوجَد عندئذ كرتان فوتونيتان، وليس واحدة كما يُوجَد حول ثقوب شفارتزشيلد الثابتة. الكرة الخارجية للفوتونات التي تدور عكس اتجاه دوران الثقب الأسود (تلك التي نقول إنها في مدارات عكسية). فيما تُوجَد داخلها الكرة الفوتونية الثانية للفوتونات التي تدور حول الثقب الأسود في نفس اتجاه دورانه (في مدارات مباشرة؛ أي مُتجهة من الشرق إلى الغرب). وفي حالة الثقب الأسود الذي يدور ببطء شديد إلى حدّ أنه لا يختلف كثيراً عن ثقب شفارتزشيلد الثابت، تكون هاتان الكرتان الفوتونيتان شبه منطبقتين بعضهما على بعض في المكان نفسه. أمّا في حالة الثقوب السوداء ذات الزخم الزاوي المتزايد، فيكون هذان السطحان مُتباعِدين بعضهما عن بعض بمسافة متزايدة.

وعند مسافةٍ أقرب من الثقوب السوداء الدوارة، يُوجَد سطحٌ مُهم آخر يُسمى الحد الاستاتيكي (نوقشت في الفصل الثالث). هذا هو السطح الذي لا يمكن عنده أن يبقى شيء ساكناً بالنسبة إلى راصدٍ بعيد؛ فمن المستحيل أن تظلّ ثابتاً عند هذا القُرب من ثقب أسود دوار، بغضّ النظر عن مدى قوة الصواريخ التي قد تكون مجهزاً بها. فعند هذا السطح، تُسحب كل أشعة الضوء، حتى التي تدور في مدارٍ عكسيٍّ، في اتجاه الدوران. صحيح أنَّ إمكانية الهروب من الثقب الأسود الدوار تظلّ قائمة عند هذا القُرب، إذا توفر دفعٌ كافٍ، ولكن لا يمكن لأي شيء أن يظلّ ثابتاً بلا دوران هنا. وعند مسافة أشدَّ قُرباً من الثقوب السوداء، يقع السطح المهم التالي، وهو أفق الحدث الذي صادفناه في الفصل الأول، أي الغشاء الأحادي الجانب الذي صادفناه أصلًا في سياق الحديث عن ثقوب شفارتزشيلد السوداء. وهكذا فالخروج من كل هذا مُستحيل ودخوله له مصير حتمي، تماماً كما ينطبق على الثقوب السوداء الساكنة.

عادة ما تكون المدارات حول ثقوب كير السوداء غير محصورة ضمن مستوى واحد. والمدارات الوحيدة المحصورة ضمن مستوى واحد هي تلك الموجودة في المستوى الذي يشمل خط الاستواء (أي مستوى التناظر المرأطي للثقب الأسود الدوار). أمّا المدارات الموجودة خارج هذا المستوى الاستوائي، فتتحرّك في ثلاثة أبعاد. وتكون هذه المدارات محصورةً ضمن حجمٍ معينٍ محدود بنصف قطر أقصى ونصف قطر أدنى وبزاوية قصوى بعيداً عن المستوى الاستوائي.

وهكذا فإنَّ تفاصيل الزخم الرازي للثقوب السوداء لها تأثير شديد في مدى القرب الذي قد تبلغه الجسيمات من الثقب الأسود، الذي يعتمد هو نفسه على اتجاه حركتها بالنسبة إلى الزخم الرازي. فإذا كان الثقب الأسود يدور بأقصى زخمٍ رازيٍ ممكناً، يكون نصف قطر الكرة الفوتونية الخاصة بأشعة الضوء التي تدور في نفس اتجاه دوران الثقب الأسود (أي الاتجاه المباشر) مُساوياً لنصف القيمة التي كان نصف قطر شفارتزشيلد سيُساويها لو كان الثقب الأسود ساكناً. أمّا أشعة الضوء التي تتحرك في مداراتٍ عكسية، فإنَّ نصف قطر كرتها الفوتونية يُساوي ضعف نصف قطر شفارتزشيلد. وأمّا الجسيمات التي لها كتلة وتتحرّك في مداراتٍ مباشرة الاتجاه، فيكون نصف قطر أقرب مدار دائري مُستقر إلى المركز يُمكن أن تتحرك فيه مُساوياً لنصف قطر شفارتزشيلد قيمة نصف قطر شفارتزشيلد أيضاً. وأمّا تلك التي تدور في مداراتٍ عكسية، فستكون مداراتها غير مُستقرة إذا وقعت على بُعد مسافة قريبة كهذه؛ إذ إنَّ نصف قطر أقرب مدار دائري مُستقر إلى المركز يُمكن أن تدور فيه مساواً لقيمة نصف قطر شفارتزشيلد أربع مرات ونصف. وبذلك فالثقب الأسود الدوار يُمكّن الجسيمات التي تدور في مدارات مباشرة الاتجاه من الدوران على مسافةٍ أقرب دون أن تصِل إلى نقطة اللاعودة عند أفق الحدث. وفي الفصل السابع، تُركز على أهمية مدى القرب الذي يُمكن أن تصِل إليه المادة في دورانها حول الثقب الأسود قبل أن تسقط داخله، ومقدار الطاقة الذي قد يُستفاد منها نتيجةً لذلك.



## الفصل الخامس

# إنتروربيا الثقوب السوداء وخصائصها الдинاميكية الحرارية

قل لي ماذا تأكل أقل لك من أنت

كثيراً ما يُقال إنَّ ما يأكله المرء يُعبر عن ماهيته. وبذلك فإذا كان نظامك الغذائي مقتضراً على المأكولات كثيرة السعرات وقليلة القيمة الغذائية والشوكولاتة، فسيكون مظهرك، فضلاً عن صحتك الجسدية والذهنية، مختلفاً بعض الشيء عمّا سيكون عليه إذا كنت تتبع نظاماً غذائياً صحيحاً يشتمل على السلطة والأطعمة الشائعة في منطقة البحر المتوسط. ولكن يبدو أنَّ الثقوب السوداء تقنع بأي طعام بسهولة. فسواء ألتهمت الثقب مساحة شاسعة من الغبار الواقع بين النجوم أو سنة ضوئية مُكعبة من البيض المقلي، فإن كتلتها ستزداد بالمثل في الحالتين دون توقف. وفي الحقيقة، بعد أن ينتهي الثقب الأسود من وجنته الفاخرة، يستحيل أن تعرف ما كان يأكله، ولن تعرف سوى الكمية التي تناولها (مع أنه تستطيع معرفة ما إذا كان الشيء الذي أكله له شحنة أو زخم زاوي). أي إنك لن تعرف سوى كمية طعامه، وليس نوعيته. إذ تذكر «نظيرية عدم وجود شعر» التي نوقشت في الفصل الثاني أنَّ الثقب الأسود لا يتميَّز إلا بعديٍ قليل جداً من المعايير المحددة (الكتلة والشحنة والزخم الزاوي)، ومن ثم لا يمكننا التحدُّث عمّا يتكون منه الثقب الأسود.

قد يبدو هذا الافتقار إلى معرفة طبيعة ما يمتلكه الثقب الأسود وكأنه ملحوظة تافهة، لكنها في الواقع عميقةٌ بعض الشيء. فالمعلومات المتعلقة بما يأكله الثقب الأسود فقدت أساساً. فأي مادة سقطت داخل الثقب الأسود قد تنزلت عن هويتها. إذ لا نستطيع إجراء أي قياساتٍ عن تلك المادة، أو تمييز أي تفاصيل عنها.

## الثقوب السوداء والمحركات

هذا الوضع مألف على نحوٍ مُخيفٍ لمن درسوا موضوع الديناميكا الحرارية الجميل. ففي هذا المجال، يشيع جدًا بين دارسيه فهم الكيفية التي يمكن بها أن تُفقد المعلومات أو تتبدّل من خلال عمليات فيزيائية. هذا ويُسمّى مجال الديناميكا الحرارية بتاريخٍ طويل شائق. إذ بدأت نظريته الحديثة إبان الثورة الصناعية عندما كان الناس يحاولون التوصل إلى كيفية تعزيز كفاءة المحركات البخارية. يمكن تعريف «الطاقة» بالقول إنّها كمية محفوظة دائمًا وقابلة للتحويل من صورةٍ إلى أخرى. ويُعرف هذا بقانون الديناميكا الحرارية الأول. ولكن بالرغم من إمكانية تحويل أنواع مختلفة من الطاقة من صورةٍ إلى أخرى، لا يمكن إجراء تحويلات مُعينة. فمع أننا نستطيع مثلاً أن نحول الشغل الميكانيكي بالكامل إلى حرارة (إذ تفعل ذلك كلما استخدمنا المكابح لتوقيف سيارتك تماماً)، لا نستطيع تحويل الحرارة بالكامل إلى شغلٍ ميكانيكي، وهذا بالضبط هو ما نتمنّى تحقيقه بالمحركات البخارية، لكننا لا نستطيع مع الأسف. ولذا فالمحركات البخارية في القطارات لا تستطيع إلا تحويل جزءٍ من الحرارة المنبعثة من الوقود إلى شغل ميكانيكي يُدير العجلات. ومن ثم، عُرف أخيرًا أنَّ الحرارة نوعٌ من أنواع الطاقة يتضمن حركةً عشوائيةً للذرّات، فيما يتضمن الشغل الميكانيكي حركةً مُنسقةً لمواد كبيرة بعض الشيء، مثل عجلة أو مكبس. ولذا فأحد العناصر البالغة الأهمية في طبيعة الحرارة هو العشوائية؛ فبسبب اهتزاز الذرّات في الأجسام الساخنة، لا نستطيع تتبع مسار حركة الذرّات المفردة. وببساطة لا يمكن تجريد هذه الحركة العشوائية من عشوائتها دون ثمنٍ إضافي. فالعشوائية، أو لنقلُ «الإنتروبيا» حسب تسميتها بالمصطلحات التخصصية، في أي نظام معزول لا تقلُّ أبداً بل يجب دائمًا أن تبقى كما هي أو تزداد في كل عمليةٍ فيزيائية. (هذا هو قانون الديناميكا الحرارية الثاني). ويمكن النظر إلى هذا من منظور القول إنَّ معلوماتنا عن العالم دائمًا ما تقلُّ لأننا لا نستطيع تتبع مسار حركة كل الذرّات في نظامٍ كبير. فبينما تنتقل الطاقة من نطاقات عينانية إلى نطاقات ميكروية، من مكبسٍ مُتحرّك بسيط إلى الحركة العشوائية لأعدادٍ هائلة من الذرّات، عندئذٍ تضيع متنَّ المعلومات. وتُتيح لنا الديناميكا الحرارية تحويل هذه الفكرة التي تبدو غامضةً إلى مقادير كمية تماماً. ويتبين هنا أنَّ فقدان المعلومات بهذه الطريقة مُشابه تمامًا لما كان نقوله عن سقوط المادة داخل ثقبٍ أسود.

صحيح أنَّ مجال الديناميكا الحرارية ابْتُكَر لوصفِ ما يتعلّق بالحركات البخارية، ولكنَّ أغلب الظن أنَّ مبادئه تتطابق على كل العمليات في الكون. وكان من أوائل من فكروا في علاقة ذلك بالثقوب السوداء روجر بنروز أستاذ الفيزياء في أكسفورد. إذ استنتج أنَّه ربما يكون من الممكن استخراج طاقة من الثقوب السوداء، لأنَّ لديها زخمًا زاويًّا، ومن ثمَّ استخدامها كأنها مُحرّكات. وتَفَنَّق ذهنه عن مُخطَّطٍ عبقيٍّ تقوم فكرته على إلقاء مادة نحو ثقبٍ أسود دُوَار بحيث يخرج بعضها من تلك الرمية بطاقةً أكبر من طاقتها الأصلية. وتُستخرج الطاقة من المنطقة الواقعَة خارج أفق الحدث مباشرةً (وبالتحديد منطقة «الإرجوسفير» التي نُوقشت في الفصل الثالث). وهكذا تؤدي العملية التي تصوّرها بنروز إلى إبطاء دوران الثقب الأسود. وصحيح أنَّ استخراج كمِيَّة هائلة من الطاقة من الثقب الأسود بهذه الطريقة ممكِّن من حيث المبدأ، لكنَّ هذه بالطبع مجرد تجربة فكريَّة، ولذا لا تبدو في الوقت الحالي حلاً عمليًّا لأزمة الطاقة التي يلوح في الأفق أنها ستُخْتِم على كوكب الأرض! وفي غضون بضع سنوات من هذا العمل الذي أجراه بنروز، حقق جيمس باردين، وبراندون كارتر، وستيفن هوكينج تقدُّماً فارقاً وصاغوا ما أطلقوا عليه القوانين الثلاثة لديناميكيات الثقوب السوداء، التي أرست الأسس التي استند إليها تفكير هوكينج اللاحق بخصوص الديناميكا الحرارية للثقوب السوداء، الذي تطلُّب إنشاء مفهوم درجة حرارة الثقب الأسود التي تحدُّد بكلته وزخمها الزاوي.

## الثقوب السوداء والإنتروبيا

كانت رؤية بنروز حافزاً مهمَاً وجعلت آخرين يُفكرون في الديناميكا الحرارية للثقوب السوداء. إذ أظهر، مع آرم فلوييد، أنَّ مساحة أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود تميل، في تلك العملية التي تخيلها، إلى أن تزداد. بدأ ستيفن هوكينج العمل على المخطط الذكي الذي تصوّره بنروز. وصحيح أنَّ المساحة تعتمد على الكتلة والزخم الزاوي (والشحنة) بطريقةٍ معقدَّة بعض الشيء، لكنَّ هوكينج استطاع إثبات أنَّ مساحة هذه المنطقة، في أي عملية فيزيائية، دائمًا ما تزداد أو تبقى كما هي. وإحدى تبعات هذه النتيجة المثيرة للاهتمام أنَّه في حالة اندماج ثقبَيْن أسودَيْن، تكون مساحة أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود الناتج من اندماجهما أكبر من مجموع مساحتَيِّ منطقتي أفق الحدث المحيطتين بالثقبَيِّن الأسودَيِّن الأصْلِيَّين. (يتماشى هذا مع تصوّراتنا البديهية لأنَّ نصف قطر أفق الحدث يتَناسب مع الكتلة، ولأنَّه من المعروف تماماً أنَّ مساحة السطح تعتمد على نصف القطر).

وهذه هي نفس نوعية السلوك الذي نراه لدى الإنتروببيا في الديناميكا الحرارية؛ ولذا بدأ البعض يتساءل عما إذا كان ثمة ارتباط ما بين إنتروببيا الثقب الأسود ومساحته. هل هذا أكثر من مجرد تشابهٍ مثير للاهتمام؟ انطلق أحد طلاب جون ويلر، وهو جيكيوب بيكنشتاين، قُدُّمًا في هذه الطريقة مباشرةً واقتراح وجود علاقة مباشرةً بينهما في أطروحته لرسالة الدكتوراه. إذ استعان بيكنشتاين بالأفكار المستمدَّة من نظرية المعلومات الخاصة بالديناميكا الحرارية ليؤكد أنَّ مساحةً أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود تتناسب مع الإنتروببيا الخاصة به. (تعني العلاقة التي اختارها أنك إذا أخذت مساحةً أفق الحدث وقسمتها على أحد الثوابت الفيزيائية الأساسية، وهو مساحةً بلانك، التي تبلغ حوالي  $10^{-70}$  متر مربع، مضروبًا في عامل عددي، فستحصل على قيمة إنتروببيا الثقب الأسود. وهكذا فاختيار الوحدات يجعل إنتروببيا الثقب الأسود هائلةً للغاية.)

لم يُصدقِ هوكينج نتائج بيكنشتاين في البداية، ولكن بعدما تفحَّصها بمزيدٍ من التعمق، لم يستطع تأكيد صحة هذا النهج فحسب، بل تمكنَ أيضًا من تعميق فهمه لكيفية سير آليات الديناميكا الحرارية للثقب الأسود. ربما يكون من المفيد فهم كيفية إجراء هذه التحليلات كي يتسلَّى للمرء إدراك قوتها والحدود التي تجعلها قاصرةً أيضًا. والطريقة المثالية للنجاح في سبر أغوار هذا المجال هي استخدام مزيجٍ من ميكانيكا الكم والنسبية العامة، يُسمَّى الجاذبية الكمية، لدراسة الأنظمة التي تتَّسِّم بأنها صغيرةً جدًّا، مثل نقاط التفرد في ثقبٍ أسود، لكنها في الوقت نفسه تشهد اضطلاعَ الجاذبية بتأثيرٍ كبير. ومع الأسف ليس لدينا نظرية جيدة عن الجاذبية الكمية حالياً. ولكن من الطرق المناسبة استخدام النسبية العامة لمنزلجة الكيفية التي ينحني بها نسيج الزمكان ثم استخدام ذلك مع ميكانيكا الكم لفهم سلوك الجُسيمات في نسيج الزمكان المنحنى. كان هذا هو النهج الذي اتبَعه هوكينج لمحاولة فهم الديناميكا الحرارية للثقوب السوداء.

## هل الفضاء الفارغ فارغٌ بحقِّ؟

يتَّسِّم مفهوم الفراغ (أي المنطقة التي «لا يوجد فيها أي شيء») بأنَّ له تاريخًا طويلاً ومُعقدًا للغاية. فمعظم الفلسفه اليونانيين القدماء أبغضوا تلك الفكرة، استنادًا إلى أسبابٍ تبدواليوم مُبهمةً جدًّا، ولكن تُوجَد قلة من الفلسفه المؤمنين بمذهب الذرية أدرجوا الفراغ في وصفهم للكون. ولذا ظلَّ الكثيرون حتى عصر النهضة العلمية يعتبرون أنَّ فكرة الفراغ قد عَفَّى عليها الزمن إلى حدٍ كبير. ولكن بعد اختراع مضخة الهواء في

عام ١٦٥٠، أمكن إثبات وجود الفراغ بالتجربة. ومع أنَّ كمية الهواء التي يمكن إخراجها بمضخةٍ من داخل وعاء في القرن السابع عشر لا تُنْتِج فراغاً تاماً كما ينبغي وفق المعايير الحديثة، فإنَّ فكرة العدم أصبحت أكثر قابلية للتصديق من ذي قبل بكثير. وحالما ثبت وجود الذرات بما لا يدع مجالاً للشك المنطقى في أوائل القرن العشرين، لم تُصبح فكرة وجود منطقة من الفضاء خالية من الذرات محل اتفاق فحسب، بل صارت أكيدةً أيضاً.

وفور إثبات وجود الذرات، ظهرت نظرية جديدة من نظريات الفيزياء؛ وهي ميكانيكا الكم. كانت إحدى النتائج المدهشة لهذه النظرية الجديدة وجود لحظاتٍ عابرة يبدو فيها أنَّ الطاقة لا يُشترط بالضرورة أن تبقى محفوظة. صحيح أنَّ قانون الديناميكا الحرارية الأول، ذاك المبدأ الفيزيائي العظيم الذي يبدو غير قابل للكسر، كان يُصر على أنه لا بدَّ من وجود مُحاسبة صارمة بين الرصيد الدائن والرصيد المدين من الطاقة في كل لحظة وكل مكان. إذ يقول المحاسب الكوني ببرهٍ صارمة عالية: «يجب أن تكون الطاقة الداخلية متساوية للطاقة الخارجية دائمًا». ولكن في الواقع، يبدو أن قواعد المحاسبة الكونية أكثر تساهلاً، ويبدو الحصول على قرضٍ ممكناً. فمن المقبول تماماً أن تفترض بعض الطاقة فترةً قصيرة ما دُمت ستردُّها سريعاً بعد ذلك. وتعتمد الكمية التي يمكنك اقتراضها على مدة القرض، بمقدار يصفه مبدأ عدم اليقين الذي وضعه هايزنبرج. فعلى سبيل المثال، من الممكن، حتى في الفراغ الذي يفترض أنه فارغ، اقتراض طاقةٍ كافية لتكون زوج من جُسيم وجسيم مضاد. إذ يمكن أن يظهر هذان الجسيمان في دنيا الوجود كومضةٍ خاطفة ثم يُفْنِي كُلُّ منهما الآخر بعد زمنٍ قصير للغاية، وبذلك يرُدُّان الطاقة المفترضة ضمن الحد الزمني المسموح به (مدة زمنية تصير أقصر كلما كان مقدار الطاقة المفترضة أكبر). وهكذا تحدث هذه العملية في كل مكان، طوال الوقت. بل ويمكن قياسها حتى! وبذلك صرنا نفهم الآن أنَّ الفراغ ليس فارغاً بالفعل، بل يُعد بمثابة حساء من تلك الأزواج المكونة مما يُسمى جسيمات افتراضية تظهر في الوجود وتختفي منه كومضاتٍ خاطفة. أي إنَّ الفراغ ليس عقيماً وخلالياً، بل يعُج بنشاطٍ كمّيًّا.

## تبُّخُر الثقوب السوداء وإشعاع هوكيينج

استخدم هوكيينج النظرية الحديثة التي تصف الفراغ، أي نظرية المجال الكمي، ليدرس سلوكه بالقرب من أفق الحدث المحيط بالثقوب السوداء. صحيح أنَّ تحليله كان

رياضياً، لكننا نستطيع تصويره بطريقة مُبسطة جدًا. الخلاصة أنَّ زوجاً من الجسيمات «الافتراضية»، أي يتكون من جُسيم وجُسيم مضاد له (يكون معاكساً له في الشحنة ومطابقاً له في الكتلة)، ناشتاً بالقرب من أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود قد يَئُول في النهاية إلى التفتُّت بانفصال كلا الجُسيمين عن الآخر. وإذا سقط أحد عنصري هذا الزوج، سواء الجُسيم أو الجُسيم المضاد، في أفق الحدث، فسيغوص في نقطة التفرُّد، ولن يُمكن أن يُسترد أبداً. لكن شريكه قد يبقى موجوداً خارج الثقب الأسود. وبذلك يكون هذا الجُسيم قد فقد شريكه الافتراضي، لكنه قد صار الآن جُسيماً حقيقياً، وأصبح من الممكن له أن يهرب. وإذا استطاع الجُسيم أن يهرب، بدلاً من أن يعاود السقوط نحو الثقب الأسود، يُشَكِّل جزءاً مما يُسمى إشعاع هوكينج. ويرى أي راصِدٍ بعيد أنَّ الثقب الأسود قد فقدَ بعضًا من كتلته بسبب ابعاث جُسيم. وما أدركَ سلفاً بالفعل أنَّ الثقوب السوداء، بأخذ نظرية المجال الكمي في الحسبان، ليست سوداء تماماً، بل تستطيع أن تبعث جُسيمات في الواقع. تنطبق هذه الحُجَّة كذلك على الفوتونات، لذا فإنَّ الثقب الأسود ينبعث منه ضوء ضعيف جدًا (المعروف أيضاً بالإشعاع الكهرومغناطيسي) إذا صحت حجة هوكينج.

عندما لا تكون درجة الحرارة صفرية، تبعث كل الأجسام إشعاعاً حرارياً في صورة فوتونات. أنت نفسك تفعل ذلك، وهذا هو السبب الذي يجعلك تظهر على شاشة أي كاميرا تُصوَّر بالأأشعة تحت الحمراء حتى في الظلام (ولهذا تستخدم الشرطة والجيش مثل هذه الكاميرات). وكلما كانت حرارة الجسم أشد، كان تَرْدُد الإشعاع أكبر. وهذا فإننا نبعث إشعاعاً يقع في نطاق الأشعة تحت الحمراء، في حين أنَّ المسعار الأحمر الساخن يكون ساخناً بما يكفي لإطلاق ضوء مرئي. ولأنَّ الثقب الأسود يبعث إشعاع هوكينج، فإنَّ له درجة حرارة (تُعرف باسم درجة حرارة هوكينج) كما رأينا سابقاً، مع أنها عادةً ما تكون مُنخفضةً إلى حدٍ لا يُصدق. فالثقب الأسود الذي تساوي كتلته كتلة الشمس ١٠٠ مرة تكون درجة حرارة إشعاعه أقل من جزءٍ من المليار من الدرجة فوق الصفر المطلق (الذي يقلُّ عن درجة تجمُّد الماء بمقدار ٢٧٣ درجة أصلًا)! هذا أحد أسباب عدم اكتشاف إشعاع هوكينج حتى الآن؛ أنه ضعيف إلى حدٍ لا يُصدق. ولكن يُعتقد أنه موجود.

لكنَّ إشعاع هوكينج له تأثير مُثير للاهتمام على تطور الثقوب السوداء؛ فهو مسئول في النهاية عن الموت النهائي الذي يُصيب الثقب الأسود. فكُّر هنا مجدداً في الجُسيمين الافتراضيين. يجب أن تكون طاقة الجسيم الحقيقي الذي يهرب من الثقب الأسود مُوجبة، ولكن نظراً لأنَّ زوج الجُسيمين الافتراضيين ظهر تلقائياً من الفراغ، فلا بدَّ أن يكون

الجُسَيْم الافتراضي المتصل داخل الثقب الأسود ذا طاقة سالبة لموازنة الطاقة الموجبة. ولأن الطاقة والكتلة مترابطتان، تتمثل مُحصلة التأثير النهائي لهذه العملية في أن الثقب الأسود تُضاف إليه كتلة سالبة، وبالتالي ستكون كتلته قد قلت بسبب إشعاع هوكينج.

لذا كان هوكينج قد اكتشف آلية يمكن أن يتبعُر بها الثقب الأسود. فالثقب الأسود سيبعث إشعاعاتٍ ويفقد كتلته ببطءٍ مع مرور الوقت. وتكون هذه العملية في البداية بطيئةً إلى حدٍ لا يُصدق. وقد اتضح أن «الجاذبية السطحية» للثقب الأسود تكون أقلَّ كلما كان الثقب أكبر. وهذا لأنَّ قوى الجذب الناتجة عن الجاذبية، وإن كانت الجاذبية السطحية تعتمد على الكتلة، التي تكون أكبر لدى الثقوب السوداء الكبيرة، تتبع قانون التربع العكسي، والثقوب السوداء الأكبر كتلة تكون أكبر حجمًا. وهكذا فالنتيجة النهائية أن الثقوب السوداء الكبيرة تتسم بجاذبية سطحية ضئيلة جدًا وهذا يكافئ درجة حرارة منخفضة جدًا. لذا فإنَّ ما يبعثه ثقب أسود كبير من إشعاع هوكينج يكون أقلَّ مما يبعثه ثقب أسود صغير.

ولكن بينما يتبعُر الثقب الأسود ويفقد كتلته شيئاً فشيئاً، ترتفع كمية إشعاع هوكينج مع زيادة الجاذبية السطحية، وبالتالي زيادة درجة الحرارة. بافتراض أن الثقب الأسود لا يتلقى أي طاقة أخرى، فإن هذا يجعل معدل فقدان الكتلة أسرع وأسرع حتى يتلاشى الثقب الأسود، في نهاية عمره، من الوجود فجأة. أي إنَّ حياة الثقب الأسود لا تنتهي بانفجار بل إنه يتلاشى بهدوء. ولا يمكن أن يحدث هذا التبعُر إلا لدى الثقوب السوداء التي تكون درجة حرارتها أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط بها. وفي الحقيقة الحالية من التاريخ الكوني، تبلغ درجة حرارة الكون، التي قيست استناداً إلى شكل طيف إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، ٢,٧ درجة فوق الصفر المطلق. وبذلك فالثقوب السوداء التي تبلغ كتلتها أكثر من ١٠٠ مليون كيلوجرام لن تتبعُر في الحقبة الحالية لأن درجات حرارتها أقل من درجة حرارة الوسط المحيط بها. غير أنَّ تلك الثقوب السوداء التي تساوي كتلتها جزءاً ضئيلاً من كتلة الشمس ستستطيع التبعُر عندما تصبح درجة حرارة الكون أكثر انخفاضاً بعدهما يشهد مزيداً من التمدد. ووصولاً إلى المرحلة الحالية من الزمن الكوني، فإنَّ كل الثقوب السوداء التي كانت كتلتها أقل من ١٪ من هذه القيمة الضئيلة ستكون قد تبعُرت بحلول الوقت الحاضر.

## مفارة معلومات الثقب الأسود

أحد الأسئلة التي تنشأ من كل هذا هو ماذا يحدث للمعلومات المخزنة في المادة التي تسقط في الثقب الأسود؟ تعتقد إحدى المدارس الفكرية أن هذه المعلومات تضيع إلى الأبد، حتى وإن تبخر الثقب الأسود لاحقاً. فيما يدعى رأي آخر أنَّ هذه المعلومات لا تضيع. وتنسق حُجة هذا الرأي الثاني إلى أنَّ المعلومات التي كانت كامنةً في المادة الأصلية التي سقطت في الثقب الأسود لا بدَّ أن تكون مُخزنةً بطريقه أو بأخرى في الإشعاع المنبعث من الثقب الأسود، لأنَّ الثقوب السوداء تتبخر. وبذلك فإذا تمكنت من تحليل كل إشعاع هوكينج المنبعث من ثقب أسود وفهمه تماماً، فستتمكن من إنشاء نموذج يحاكي تفاصيل كل المادة التي كانت قد سقطت داخل الثقب الأسود في البداية. يذكر أنَّ ستيفن هوكينج وكيب ثورن قد راهنا جون بريسكيل رهاناً شهرياً بخصوص هذه المسألة تحديداً. إذ كان ثورن وهوكينج يتبنيان الرأي الأول، بينما كان بريسكيل يتبنى الرأي الثاني. واتفقا على أن يكافئ الخاسر الفائز بمجموعةٍ يختارها الفائز. وفي عام ٢٠٠٤، اقتنع هوكينج بفكرة أنَّ المعلومات يُمكن أن تُشفَّر بالفعل في الإشعاع المنبعث من الثقوب السوداء اقتناعاً كافياً ليعلن أنه خسر الرهان، وأعطى بريسكيل موسوعة عن لعبة البيسبول (مسألة ما إذا كنتَ ترى تلك الموسوعة موسوعةً من المعلومات القيمة تعتمد على رأيك في لعبة البيسبول أصلًا)؛ غير أنَّ المسألة ما زالت محلَّ جدال.

فيالرغم من كل هذه التكهنات النظرية البارعة، يجدر تكرار القول إنَّ كل عمليات الرصد الفعلية لم تستطع حتى الآن رصد ولو حتى إشعاع هوكينج عادي من أي ثقب أسود. ويعُجُّ تاريخ الفيزياء ببقايا نظريات قديمة بارعة، ولكن تبيَّن أنها خاطئة في النهاية. فالكثير من التجارب والأرصاد الفعلية قد حقَّقت نتائج غير مُتوَقَّعة إلى حدٍ مُدهشٍ مراًواً وتكراراً. بل وظهرت أرصادٌ لظواهر مُذهلة لم يكن أحد على الإطلاق ليتنبأ بها على الأرجح وفق المبادئ الأولى عن الثقوب السوداء. ويتمثل أحد أسباب عدم رصد إشعاع هوكينج الخافت في أنَّ العديد من الثقوب السوداء التي نعرفها تقع في مراكز بعض من أكثر الأجسام سطوعاً في الكون، وهذه الثقوب السوداء ذات كتلةٍ أكبر بكثير، وبالتالي أشدَّ بكثير، من أن تتبخر عبر إشعاع هوكينج. تجدر الإشارة هنا إلى أنَّ هذه الأجسام ساطعة سطوعاً استثنائياً لسبِّ مختلف تماماً، وهو ما نستعرضه في الفصلين السادس والثامن.

## الفصل السادس

# كيف تزن ثقباً أسود؟

تشكل الشمس والكواكب التي تدور حولها، مع الكواكب القزمة (التي يُعد أشهر أمثلتها كوكب بلوتو)، والكويكبات والمذنبات مُجتمعة المجموعة الشمسية. وتدور المجموعة الشمسية نفسها داخل قرص مجرتنا حول مركز كتلتها عند مركز المجرة. وتبعد السرعة التي تتحرك بها مجموعتنا الشمسية حول مسارها الدائري عبر القرص المجري حوالي ٧٠٠ كم/ث، ويستغرق إتمام دائرة كاملة حول المركز المجري حوالي ٢٠٠ مليون سنة. وبالإضافة إلى هذه الحركة المدارية، تتحرك المجموعة الشمسية كلها في اتجاه عمودي على مستوى المجرة. وهذه النوعية من الحركة التي تُبديها المجموعة الشمسية معروفة تماماً للفيزيائيين بأنها حركة توافقية بسيطة تنشأ فيها القوة المُعيدة، التي تجذب مجموعتنا الشمسية لتعيدها نحو موضع اتزان مستوى المجرة، من قوى الشد الجذبي لدى النجوم والغازات التي يتكون منها القرص المجري. وفي الوقت الحالي، تُوجَد مجموعتنا الشمسية فوق نقطة الازن هذه بنحو ٤٥ سنة ضوئية. وفي غضون نحو ٢١ مليون سنة من الآن، ستكون المجموعة الشمسية عند أبعد نقطة يمكن أن تصل إليها في هذه الحركة، وهي تقع فوق المستوى المجري بنحو ٣٢٠ سنة ضوئية. وبعد ٤٣ مليون سنة، ستعود المجموعة الشمسية إلى المستوى المجري المتوسط. وحين تُصبح المجموعة الشمسية واقعة في مركز المستوى المجري، سيتعرض كوكب الأرض لأقصى كمية مُمكنة من الأشعة الكونية التي تتحرك بسرعة بالغة في مستوى المجرة، حيث تكون محصورةً على طول خطوطِ من المجال المغناطيسي، وتتحرك حولها في مسارٍ أشبه بمزدوج من مسار حلزوني وأخر مُستقيم. وقد طرحت تكهنات بأنَّ حركة الشمس عبر المستوى المجري يمكن أن تكون هي السبب في انقراض الديناصورات الجماعي. ولكن من الصعب تأكيد صحة هذه النوعية من التكهنات أو دحضها لأنَّ معرفة النطاقات الزمنية لهذه الحركة المدارية صعبة بعض

الشيء بالطبع على الراصدِين البشريِّين، الذين عادةً لا يعيشون عمراً يزيد كثيراً على قرنٍ واحد. وتُعد هذه مشكلة شائعة في علم الفلك الرصدي عندما ترغب في متابعة عملية مُعينة تتغير على مرّ نطاقاتٍ زمنية أطول بكثيرٍ من القرون القليلة التي نعكف طوالها على إجراء أرصادٍ فلكية بأدنى قدرٍ معقول من الدقة والشمول.

ولكن تُوجَد حركات مدارية في المجرة يمكن قياسُها بسهولةٍ أكبر بكثير، على الأقل لأنَّ النطاقات الزمنية المتعلقة بها تُناسب مُدد تركيز البشر وتلسكوباتهم. وممَّا له أهمية خاصة في سياق الثقوب السوداء الحركات المدارية للنجوم في أعماق المناطق داخل مجرة درب التبانة، التي تظهر في جُزءٍ من السماء مُعروف باسم «منطقة الرامي أٌ». وعندما ينظر المرء إلى داخل هذه المنطقة، التي تكون أوضح عند رؤيتها من نصف الكره الجنوبي، يكون بذلك ناظراً إلى مركز مجرتنا نفسه، الذي يبعد عنَّا ٢٧ ألف سنة ضوئية. وهذه منطقة مأهولة بكثافة شديدة من الفضاء، ما يُوقِّعنا في مشكلتين عندما نريد دراسة المركز المجري. الأولى تتمثل في وجود كثافةٍ عاليةٍ نسبياً من النجوم في هذا الجزء من الفضاء، وتكمِّن الثانية في وجود كميات هائلة من الغبار.

وبذلك تعني المشكلة الأولى أنك تحتاج إلى استخدام أسلوب قياس يُتيح تصويباً علياً الاستيانة، أي يمكن فيه فصل تفاصيل دقيقة عن بعضها بحيث تُبيَّن عدسة التليفوتو تفاصيل أدقَّ على كاميرا مُعينة من تلك التي تُبيَّنُها عدسة واسعة الزاوية. والاكتفاء باستخدام تلسكوبٍ أكبر لن يكون كافياً لذلك في كل الحالات، ولكن تُوجَد تقنيات متنوعة ابتكَرت لفضَّ الشَّابُك الناجم عن الاضطرابات الموجودة في الغلاف الجوي ونستطاع من خلالها حتَّماً أن نرى كل الأجرام السماوية، إلَّا إذا وضعنا التلسكوب على قمرٍ صناعيٍ فوق الغلاف الجوي. ومن التقنيات التي تُسمَّى بأهميةٍ خاصةٍ تقنية تُعرف باسم «البصريات المتكيفَة». إذ تُصحِّح هذه التقنية التباينات الناتجة من الغلاف الجوي، وذلك برصِّ تشوشٍ وضوحٍ نجم ساطع (يُسمَّى النجم الدليل) وتغييرٍ شكل مرآة التلسكوب الأولية لإلغاء هذا التشوش المتبادر. وعندما يكون الجزء السماوي محل الاهتمام حالياً من أي نجم ساطع، يمكن تسلیط حزمةٍ ليزرية قويةٍ مُكونةٍ من أشعَّةٍ متوازيةٍ بدقةٍ مُتناهية لإثارة ذرات في الغلاف الجوي، ومن ثُمَّ تستمد من ذلك تصحيحاً للاتباينات الناتجة من الغلاف الجوي.

أمَّا المسألة الثانية، أي وجود كمياتٍ هائلةٍ من الغبار ناحية مركز المجرة، فهي مشكلة لأنَّ رؤية الضوء المرئي خلال الغبار صعبةٌ بقدرٍ ما هو صعبٌ على ضوءٍ فوق

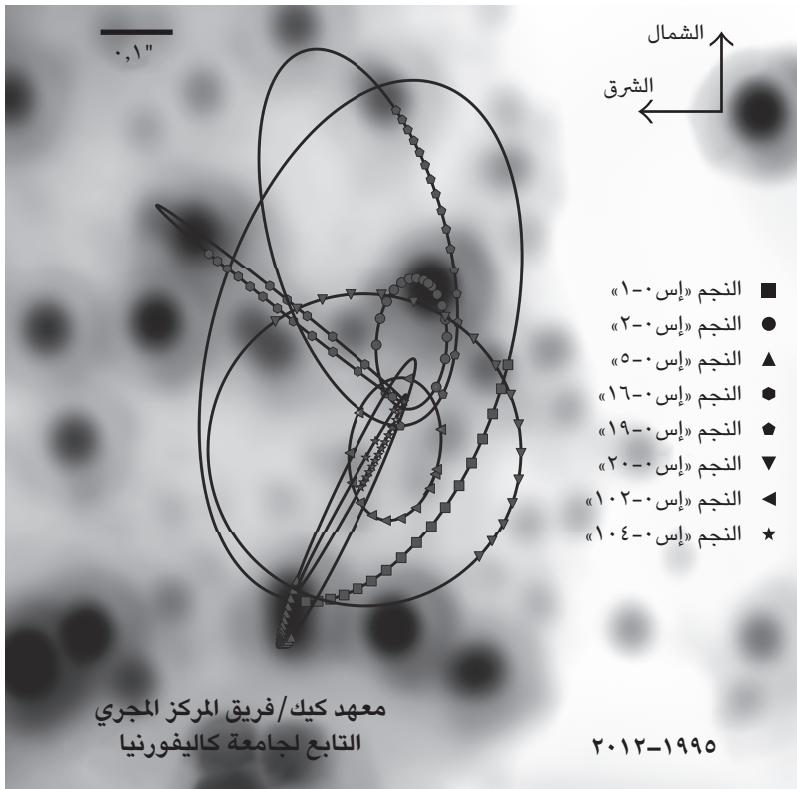
بنفسجي مُنبعث من الشمس أن يخترق عاتمة القُبعات الواقية من الشمس. وحل هذه المشكلة الرصد عند أطوالٍ موجية تقع في نطاق الأشعة تحت الحمراء، بدلاً من تلك التي تقع في نطاق الضوء المرئي.

### كيفية قياس كتلة الثقب الأسود عند المركز المجري

لاقت تقنية الاستعانة بعمليات الرصد القائمة على الأشعة تحت الحمراء تأييداً من فريقين بحثيين: أحدهما بقيادة أندريا جيز في كاليفورنيا، والآخر بقيادة راينهارد جينزل في ألمانيا. ويُقدم العمل الذي أَنجزه كُلُّ من الفريقين على حدة قياساً واضحًا جدًا لكتلة الثقوب السوداء عند مركز المجرة. يُبيّن شكل ١-٦ البيانات المأخوذة من أندريا جيز وفريقها. فعلى مِرْ السنوات القليلة الماضية، أَجروا أرصاداً مُتكررة داخل قلب المركز المجري نفسه بالضبط، وشاهدوا الكيفية التي تحركت بها النجوم منذ المرة الأخيرة التي رصدهوها فيها. ولأنَّ أنواع أطياف تلك النجوم معروفة، فكُلُّها معروفة. وهكذا مع مرور سنةٍ تلو الأخرى، واتضاح المسار المداري الذي تسلكه كل من هذه النجوم، تُمكّن المعادلات الديناميكية (المعروفة باسم قوانين كبلر، وهي القوانين نفسها التي تحكم حركة الكواكب حول شمسنا) جيز وفريقها من حلّها على حدة واستنتاج كتلة المنطقة «المظلمة» الواقعَة عند البؤرة المشتركة لكل تلك المدارات. وتلك الحلول المستقلة تُحدِّد كتلة هذه المنطقة المظلمة بدقةٍ جيدة بعض الشيء. ومن المعروف الآن أنها تساوي مقداراً أكبر بقليلٍ من كتلة الشمس أربعة ملايين مرة، ضمن حدود منطقة لا يزيد نصف قطرها على ستَّ سنوات ضوئية. ولأنَّ الجسم مُظلِّم لكنه يتَّسِم بكلِّ هائلة للغاية، فالاستنتاج الوحيد أنَّ مركز مجرتنا يُوجَد عنده ثقب أسود ضخم.

ولا يُوجَد سبب يجعلنا نعتقد أنَّ مجرتنا، درب التبانة، هي الوحيدة التي تحوي ثقباً أسود عند مراكزها. بل بالعكس، ثمة ظُنُون قويٌّ بأنَّ كلَّ المجرات على الأرجح تحوي ثقباً سوداء عند مراكزها، على الأقلِّ المجرات الأضخم. ويُكْمِن سبب ذلك في علاقةٍ تبدو أساسية، اكتشفها جون ماجوريان الذي كان يعمل آنذاك في جامعة دورهام، وزملاؤه، بين كتلة الثقب الأسود الواقع عند مركز المجرة وكتلة المجرة نفسها. بالطبع من الصعب قياس كتلة الثقوب السوداء وكتلة المجرة. والأسلوب الذي ينجح نجاحاً جميلاً في مركز مجرتنا لا يُمكِّن أن يُطبَّق على مجراتٍ خارجية لأنَّها ببساطة بعيدة للغاية.

## الثقوب السوداء



شكل ٦: شكل يُبيّن المواقع المتعاقبة للنجوم التي تدور حول الثقب الأسود المركزي في مجرّتنا درب التبانة.

هذا وتجاور كُتل الثقوب السوداء المركبة الواقعة في قلوب المجرات الإهليلجية قيًّاً تساوي كتلة شمسنا مليون مرة، بل وتصل إلى مقدارٍ يساوي كتلة شمسنا مليار مرة وتجاوره. ولذا غالباً ما تُسمى الثقوب السوداء فائقة الضخامة.

وبالرغم من الصعوبات في قياس كتل الثقوب السوداء وكُتل المجرات، وُجد في مجموعة واسعة من مجرات مختلفة أن كتلة الثقب الأسود المركزي تتناسب مع كتلة المجرة المضيفة. ويُظنُّ أنَّ هذا يشير إلى أنَّ الثقب الأسود المركزي والمجرة نفسها نمواً وتطوّراً معًا عبر الزمن الكوني.

## ثقوب سوداء عديدة في مختلف أنحاء القرص المجري

وإلى جانب الثقب الأسود الفائق الضخامة في قلب المجرة، يُظَن أنَّ ملايين من الثقوب السوداء موزعة في مختلف أنحاء مساحة المجرة، ويعتقد أنها تشكلت بطريقةٍ مختلفة تماماً عن الثقوب الواقعة في المراكز المجرية التي تنمو بالترافق التدريجي للمادة المنهارة المتساقطة فيها. إذ كانت تلك الثقوب السوداء ذات الكثافة النجمية نجوماً ضخمةً في الماضي، وكانت تتَّالق بسطوع شديد، في ظل سريان تفاعلات الاندماج داخلها دون توقيفٍ مُمددةً إياها بالطاقة، فكانت تُبقيها ساخنةً جدًا ومتأثرة بضغطٍ شديد، وتمنحها قدرةً مصيرية على مقاومة الانهيار تحت تأثير الجاذبية. وعندما يُستنفذ الوقود النووي تماماً، لا يبقى أي قدر من ضغط الإشعاع ليبقي النجم صامداً، ولا يتبقى شيء لموازنة قوة الجاذبية التي تُسحبه نحو الداخل. وإذا كان النجم ذا كتلةٍ مشابهة لكتلة شمسنا، فإن الانهيار تحت تأثير الجاذبية يُسفر في النهاية عن جسمٍ مضغوطٍ يُعرف بالقزم الأبيض. تجدر الإشارة إلى أنَّ كلمة «مضغوط» لها معنى خاص في الفيزياء الفلكية، وتُشير إلى أن المادة كثيفة بطريقةٍ تختلف تماماً عن المادة العاديَّة. وبمعايير المادة العاديَّة، فالنجوم القزمة البيضاء مضغوتة لأنَّ المادة منضغطة للغاية. هذه المادة مُؤينة، ما يعني أن الإلكترونات كلها منفصلة عن نويتها الأصلية، وإن كانت باردة (فعادة ما لا تُصبح المادة مُؤينة إلا عند درجة حرارة عالية). وينشأ الضغط الذي يقاوم الشد الجاذبي المستمر نحو الداخل من رفض الإلكترونات الانضغاط في منطقة محدودة للغاية (وهذه إحدى نتائج مبدأ عدم اليقين الذي وضعه هايزنبرج)؛ والمصطلح المتخصص المُعبِّر عن هذا التأثير هو «ضغط الطباق الإلكتروني». ولو كان النجم المنهار، عند استنفاد كل وقوده، أضخم، لكان الانهيار تحت تأثير الجاذبية أشد، وكانت الإلكترونات ونظائرها من البروتونات ستندمج معًا لتُشكِّل نيوترونات. وهذه يمكن أن تكون جسماً أشد اضغاطاً بكثير من القزم الأبيض؛ أي نجماً نيوترونياً.

ولكن، إذا كنا مهتممين بالثقوب السوداء، فعلينا إذن أن ننتقل إلى النجوم التي لديها كتلة أكبر بكثيرٍ من كتلة تلك النجوم التي تواصل الانهيار لتنتج نجوماً قزمة بيضاء أو حتى نجوماً نيوترونية. فالنجم الذي لديه كتلة أكبر من تلك سيكون مضيناً جدًا بينما يبقى وقوده موجوداً ويُمْكِن الحفاظ على استدامة الاندماج النووي فيه. وفور استنفاد كل الوقود، يتنتهي أمر النجم وستنطفئ الأضواء. يتَّسِم النجم الآن بكتلة كبيرة كافية لتجعل قوة الجاذبية قادرة على أن تطغى حتى على ضغط الطباق النووي القوي،

وبذلك يكون الانهيار قوياً جدًا لدرجة أنه حتى هذا الضغط لا يستطيع أن يوازن تأثير الجاذبية، ويؤدي الانهيار حتماً إلى ثقب أسود. غالباً ما يكون انهيار النجم الضخم مصحوباً بانفجار بقايا مستعر أعظم مذهلة، تاركاً الثقب الأسود ليكون الجزء المتبقى الوحيد في الموقع الأصلي للنجم السلف الأصلي. وتشهد مثل هذه الانفجارات تخليل عناصر كثيرة، خاصة تلك الأثقل من الحديد.

تجدر الإشارة هنا إلى أن أول ثقب أسود تعرّفه الباحثون بدقة لا تحتمل الخطأ بناءً على تحديد كثافة النجمين في نظام نجمي ثنائي يُسمى «في ٤٠ سيج». إذ استطاع خوري كاساريس وفييل تشارلز وزملاؤهما رصد مدارات النجمين بدقّيق شديد واستنتجو من تحليلاتهم أنَّ هذا الزوج الثنائي يحوي جسمًا مضغوطةً ذا كتلة أكبر ست مراتٍ من كتلة شمسنا، وبذلك فهو ثقب أسود. (اكتُشف لاحقاً أنَّ كتلته تساوي كتلة الشمس ١٢ مرّة).

ومن الممكن إجراء تقديراتٍ معقولة لأعداد النجوم في المجرات وكلّتها. ثم يمكننا بعد ذلك تقدير عدد الثقوب السوداء ذات «الكتلة النجمية» في مجرتنا، بالتفكير في عدد النجوم الضخمة التي ربما قد تكونت في وقتٍ مبكر من تاريخها، بما يكفي لتكون قد تطورت تطوراً كافياً يجعل كل وقودها النووي قد استُنفِدَ بحلول الوقت الحالي عن طريق الاندماج. وحتى وإن كانت نسبة صغيرة جدًا من النجوم في مجرتنا تكون ثقباً سوداء، فإنَّ وجود أكثر من ١١٠ أجسام في مجرة درب التبانة يعطينا الكثير من الثقوب السوداء.

ولكن كيف يمكن قياس كتل هذه الثقوب السوداء المنتشرة في المجرات؟ في الواقع، تتشابه ديناميكيات أسلوب تحديد بعض كُلِّ الثقوب السوداء المتبقية من النجوم تشابهًا كبيراً مع ديناميكيات الأسلوب المستخدم لقياس كتلة الثقب الأسود الواقع في مركز مجرتنا. وذلك لأنَّ جزءاً كبيراً جدًا من النجوم في مجرتنا، وبالتالي في المجرات الأخرى أيضاً على الأرجح، يوجد في أزواج شكلَّت أنظمةً نجمية ثنائية. ومن السهل تخمين الكيفية المحتملة لحدوث ذلك؛ فقوى الجاذبية تجاذبُ العديد من المدارات التي يدور فيها جسمان مُستقرّة، ولذا حالما يتلاقى نجمان ويرتبطان معاً بفعل قوى الجاذبية، يبقىان هكذا على الأرجح. وإذا استطعنا قياس الوقت الذي يستغرقه كلا النجمين لإتمام دورة كاملة حول الآخر في النظام النجمي الثنائي، وهو وقت يُعرف باسم الفترة المدارية، وإذا عرفنا المسافة بينهما، نقترب من معرفة كتلتيهما. إذا كان الجسم المضغوط يدور في مدار حول نجم

## كيف تزن ثقباً أسود؟

عادي (أي يستمدُّ وقوده من الاندماج) ذي طيف معروف النوع، وكتلة معروفة بالتبعية، يمكن عندئذٍ اشتقاق كتلة النجم المضغوط مباشرةً. أما إذا كان جسمٌ مضغوط كالثقب الأسود مفرداً وليس في نظام ثنائي، فتكون المعلومات الديناميكية غير مُتاحة، وهذا يعني عدم وجود وسيلة لاستنتاج كتلته أو تحديد أنه ثقب أسود أصلًا. تجدر الإشارة إلى أنَّ كتلة أصغر ثقبٍ أسود نستطيع قياسها تساوي بضع كتلٍ شمسية فقط، لكنَّ الثقوب السوداء الأثقل ذات الكُتل النجمية يمكن أن تكون أكبر ١٠٠ مرة من كتلة شمسنا.

يُعد قياس كتلة الثقوب السوداء سهلاً، في ظل التكنولوجيا الحديثة المتوفرة، لكنه ما زال يتطلَّب قدرًا كبيرًا من الصبر والمثابرة. ولأنَّ السمات الفيزيائية الأساسية التي تميِّز الثقب السوداء سمتان فقط في الأساس، ولأنَّ الكتلة واحدة منهم، فإنَّا بهذه الدراسات قد قطعنا نصف الطريق نحو تمييز الثقوب السوداء! غير أنَّ قياس الزخم الزاوي للثقوب السوداء أصعب، وأستعرضُ في الفصل السابع الجهود الخارقة الالزمة لمحاولة تحقيق ذلك.



## الفصل السادس

# التهام المزدوج والتضخم أكثر

### ما مقدار سرعة الالتهام؟

الفكرة الشائعة عن الثقب الأسود بأنه «يمتص كل شيء» من الوسط المحيط به، ليست صحيحة إلّا بالقرب من أفق الحدث، وحتى في تلك الحالة، لا يحدُث ذلك إلّا إذا كان الزخم الزاوي للمادة المنهارة المتساقطة نحوه ليس كبيراً جدًا. أمّا بعيداً عن الثقب الأسود، فيكون مجال الجاذبية الخارجي مُطابقاً لمجال الجاذبية الخارجي لأي جسمٍ كروي آخر له الكتلة نفسها. ولذا، يمكن لجسيم ما أن يدور حول ثقبٍ أسود وفقاً لдинاميكيات نيوتن، تماماً كما سيدور حول أي نجم آخر. فما الذي يمكن أن يحلّ لغز هذا النمط من الدوران المستمر في دوائر (أو قطوعٍ ناقصة في الواقع) ويمهد الطريق لسلوكِ أغرب؟ الإجابة أنَّ الثقب الأسود دائمًا ما يدور حوله أكثر من جسيم واحد. إذ تُعد ظواهر الفيزيائية الفلكية التي نرصدها ثريّة لأنَّ الثقوب السوداء يدور حولها قدرٌ كبيرٌ من المادة ولأنَّ هذه المادة يمكن أن تتفاعل مع نفسها. وفوق ذلك، فقانون الجاذبية ليس القانون الفيزيائي الوحيد الذي يجب الخضوع له، بل يجب الخضوع أيضاً لقانون حفظ الزخم الزاوي. ويؤدي تطبيق هذه القوانين على الكميات الكبيرة من المادة التي قد تنجدب نحو الثقب الأسود إلى ظهور ظواهر لافتة قابلة للرصد، وتتجسد بعضُ أبرز أمثلة هذه الظواهر في حالة أجسامٍ غريبة تُسمى أشباه النجوم. تُعرف أشباه النجوم بأنَّها أجسام موجودة في مراكز المجرات تتضمنَ ثقباً أسود فائق الضخامة عند مركزها بالضبط، وبسبب تأثير هذا الثقب على المادة القريبة منه، يمكن أن يجعلها أشدَّ سطوعاً من كل الضوء المنبعث من جميع النجوم في إحدى تلك المجرات، عبر أجزاء المجال الكهرومغناطيسي كلها. سنتعرّف على أشباه النجوم، وأمثلة أخرى لـ«المجرات النشطة»، في الفصل الثامن، مع نظائر

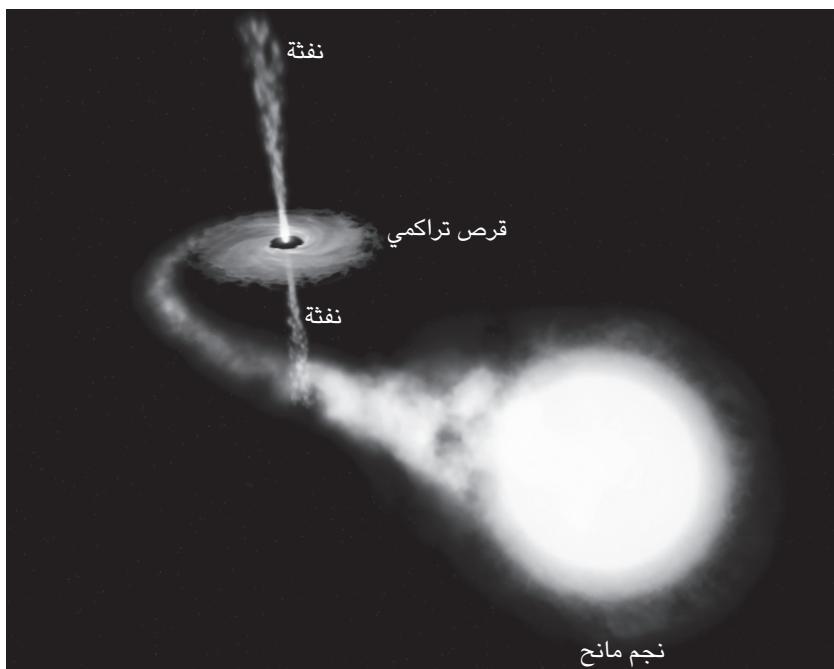
مُصَغَّرة لها تُسَمَّى أشباه النجوم الميكروية، وتكون كتلة ثقوبها السوداء أقل بقيمة أسيّة من كتلة الثقوب الموجودة داخل أشباه النجوم. أمّا الآن، فدعونا نعود إلى التفكير في المادة الموجودة حول الثقب الأسود.

كما ذُكر سلفاً، لا يمكن رصد ثقب أسود مُعزل مباشرة، لأنَّه ببساطة لن يبعث ضوءاً؛ بل كل ما يُمكن هو اكتشاف ثقب أسود عن طريق تفاعله مع مواد أخرى. فأي مادة تسقط نحو الثقب الأسود تكتسب طاقة حركة، وبسبب الحركة المضطربة، أي دورانها في مدار حلزوني عكس اتجاه دوران مادة ساقطة أخرى تسلك سلوكاً مشابهاً، تُصبح ساخنة. ويُؤثِّرُ هذا التسخين الذرَّات، مؤدياً بذلك إلى انبعاث إشعاع كهرومغناطيسي. ومن ثمَّ، فتفاugal الثقب الأسود مع المادة القريبة منه هو الذي يؤدي إلى انبعاث إشعاعٍ من المنطقة المجاورة للثقب الأسود، وليس إشعاعاً مباشرًا من الثقب الأسود نفسه.

الثقوب السوداء ليست كيانات مُعزلة وغير متفاعلة في الفضاء. بل إنَّ مجالات الجاذبية الموجودة لديها تجذب نحوها كل المواد، سواءً أكانت غازات أم نجوماً قريبة. ولأنَّ الشد الجذبي يزداد بقوةٍ مع زيادة الاقرُب، تفتَّت النجوم تماماً إذا كان حظها عثراً بما يكفي ل يجعلها تقترب من ثقبٍ أسود؛ ويُصوَّر شكل ١-٧ مثلاً على ذلك. وثمة جزءٌ مُعين من المادة الجنوبيَّة سيبتليعه الثقب الأسود تماماً أو سيراكِمه. لا يقتصر ما يحدث على أنَّ المادة تهرع بوتيرةٍ مُتسارعةٍ إلى داخل الثقب الأسود، متراكمة بسرعةٍ بالغة عبر أفق الحدث. بل ينشأ شيئاً أشبه بطقوس تَوْدُّ مُعقدة بينما تقترب المادة الجنوبيَّة بتتأثِّر الجاذبية من الثقب الأسود. ففي كثيرٍ جدًا من الأحيان، وُجد أنَّ المادة المتراكمة تتَّسم بشكِّل هندسي مُعين يُميِّزها: شكل قرص. وإذا كان مجال الجاذبية يتَّسم بتماثيل كرويَّة، فلن يؤدي الثقب الأسود أي دورٍ في تحديد المستوى الذي سيترافق فيه الغاز ليُشكِّل قرصاً تراكميًّا، بل سيتحدد مستوى القرص وفق طبيعة الغاز المتتدفق بعيداً عن الثقب الأسود. ولكن إذا كان الثقب الأسود ذا زخم زاوي، فسيستقر الغاز المتراكם في نهاية المطاف ضمن المستوى العمودي على محور دورانه، بغضِّ النظر عن الكيفية التي يتتدفق بها على بعد أنصاف قطرات أطول. وإذا كانت المادة الجنوبيَّة تدور على الإطلاق، فيجب التفكير في ذلك من منظور الالتزام بقانون حفظ الزخم الزاوي الذي عُرض سلفاً في الفصل الثالث عند استعراض مسألة دوران المادة التي تنهار في النهاية لتكون ثقباً أسود دواراً. فالدوران يعني أنَّ المادة وهي تفقد طاقتها ستتبع مدارات (دائريَّة إلى حدٍ

## التهام المزيد والتضخم أكثر

كبير لكنها في الواقع) حلزونية مُتجهة نحو الداخل. وبالقرب من الثقب الأسود، يؤدي تأثير لينز-ثيرينج، الذي عُرض في الفصل السادس، إلى أنَّ القرص التراكمي ربما يُصبح مُحاذاًًا للمستوى الاستوائي للثقب الأسود الدوار عند أنصاف الأقطار القصيرة. (وفي هذا السياق، يُعرف هذا التأثير باسم تأثير باردين-بيترسون.)



شكل ١-٧: تصوُّر فني عن قرص تراكمي (تبعث منه نفثة كما هو موضح- طالع الفصل الثامن) ونجم مانح يُفتن بفعل قوى المد والجزر الناشئة عن الجاذبية من الثقب الأسود الواقع عند مركز القرص التراكمي.

وإذا كان الغاز يكوِّن جزءاً كبيراً من المادة المنهارة المتساقطة، فيمكن عندهُ أن تصطدم ذرات الغاز بجسيمات الغاز الأخرى في مداراتها الخاصة، وتؤدي هذه الاصطدامات إلى إثارة الإلكترونات في تلك الذرَّات ورفعها إلى مستويات طاقة أعلى. وعندما تعود هذه الإلكترونات إلى مستويات الطاقة المنخفضة، تُطلق فوتونات ذات طاقة مساوية

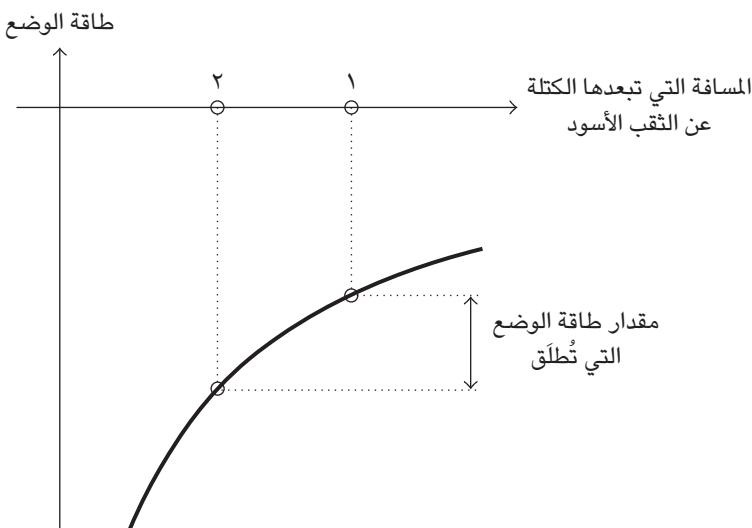
بالضبط للفرق بين مستوى الطاقة الأعلى الذي كان الإلكترون يشغله ومستوى الطاقة الأدنى الذي انخفض إليه. ويعني إطلاق الفوتونات أنَّ ثمة طاقة إشعاعية تترك سحابة الغاز المنهارة، وبذلك تفقد السحابة قدرًا من الطاقة. وبينما تتضمن هذه العمليات خروج طاقة، فإنها لا تتضمن خروج أي قدرٍ من الزخم الزاوي. ولأنَّ الزخم الزاوي يبقى في النظام، تُواصِل المادة المتراكمة الدوران في أي مستوى يحافظ على اتجاه مُمحَّلة الزخم الزاوي الأصلي. ومن ثم، دائمًا ما ستُكُون المادة الجنوبيَّة فرصًا تراكميًّا؛ وهو بمثابة حالة تظلُّ فيها المواد التي تدور حول الثقب الأسود مُعلَّقةً فترة طويلة بعض الشيء. واعتمادًا على مدى القُرب الذي يمكن أن تبلغه المادة التي تدور حول الثقب الأسود منه، يمكن أن تُصبح المادة ساخنةً جدًّا لدرجة أنَّ الإشعاع المنبعث من القرص التراكمي يكون مكوًّناً في الواقع من فوتونات الأشعة السينية، وهذا يُكافئ درجات حرارة عالية تصل إلى ١٠ ملايين درجة (سواءً كانت وحدة القياس المستخدمة الكلفن أم الدرجات المئوية، فهذا ليس مهمًّا عندما تكون درجات الحرارة مرتفعة للغاية هكذا).

يُظهر تحليل بسيط لبعض المعادلات المعروفة من فيزياء نيوتن أنَّ إطلاق طاقة الوضع القائمة على الجاذبية عند سقوط كمية مُعينة من الكتلة الساقطة يعتمد على نسبة كُتلتها مضروبة في نسبة كتلة الثقب الأسود الذي تدور حوله في مدار حلزوني، ومدى القُرب الذي يمكن أن تبلغه الكتلة الساقطة من الثقب الأسود. في حالة جسم جاذب ذي كتلة مُعينة كالثقب الأسود، كلما اقتربت منه الكتلة الساقطة، زادت طاقة وضع الجاذبية التي تُطلقها، كما يتضح في المخطط المُبسط في شكل ٢-٧. ويساوي مقدار الطاقة المتاح لـ  $E$  لكتلة المادة في صورة إشعاعات، الفرق بين الطاقة التي كانت موجودة لدى الكتلة الساقطة عندما كانت بعيدة قبل أن تُسرَّع (تحسب باستخدام معادلة أينشتاين الشهيرة  $E = mc^2$ ، حيث يرمز  $E$  إلى الطاقة، و  $m$  إلى الكتلة، و  $c$  إلى سرعة الضوء) والطاقة الموجودة لديها عند أقرب مدار دائري مُستقر إلى الثقب الأسود.

ومع أنَّ الاندماج تُعلَق عليه آمال كبيرة في أن يكون مصدرًا مُستقبلًياً لإمداد كوكب الأرض بالطاقة، فإنه لا يُنتج سوى ٧٪ من الطاقة المتاحة وفق معادلة « $E = mc^2$ ». وفي المقابل، يمكن إطلاق قدرٌ أكبر بكثير من كتلة السكون المتاحة في صورة طاقةٍ من المادة المتراكمة، عبر الإشعاع الكهرومغناطيسي أو أي نوعٍ آخر من الإشعاع. وكما أوضح في الفصل الرابع، يعتمد مدى القُرب الذي يمكن أن تبلغه المادة المتراكمة في اقترابها من الثقب الأسود على مدى سرعة دوران الثقب الأسود. فإذا كان الثقب الأسود يدور بسرعة، فيمكن أن يدور

## التهام المزيد والتضخم أكثر

القرص التراكمي على بعد مسافة أقصر بكثير من الثقب الأسود في مدارات أصغر بكثير. وفي الواقع، يُمثل تراكم الكتلة على ثقب أسود دوار الطريقة الأكثر فاعلية من بين الطرق المعروفة أنها تستخدم الكتلة للحصول على طاقة. ويُعتقد أن هذه العملية هي الآلية التي تستمد بها أشباه النجوم وقوتها. فأشباه النجوم تعد بمثابة مواقع أقوى إطلاق للطاقة المستدامة في الكون، وستناقش بمزيد من التفصيل في الفصل الثامن.



شكل ٢-٧: مخطط بياني يوضح كيف تقل طاقة وضع كتلة معينة (جسيم اختبار) مع انخفاض المسافة التي تبعدها عن ثقب أسود.

ذكرت بالفعل أنَّ الكتلة والطاقة بينهما تكافؤ، وفي حالة ثقب أسود من نوعية شفارتزشيلد (أي غير دوار)، يمكن نظرياً إطلاق كمية من الطاقة تُكافئ ٦٪ من كتلته الأصلية، وأنَّ الحلول التي توصل إليها روي كير لمعادلات المجال التي وضعها أينشتاين تُظهر أنَّ طول نصف القطر من آخر مدار دائري مُستقر إلى الثقب الأسود الدوار يكون أقصر بكثير مما لو كان المدار موجوداً حول ثقب أسود غير دوار له الكتلة نفسها. ومن حيث المبدأ، يمكن استخلاص قدر أكبر بكثير من طاقة الدوران من ثقوب «كير» السوداء،

ولكن فقط إذا كانت المادة الساقطة تدور في نفس اتجاه دوران الثقب الأسود نفسه. أمّا إذا كانت المادة تدور عكس اتجاه دوران الثقب الأسود، أي في مدارٍ عكسي، فيمكن إطلاق حوالي ٤٪ من طاقة السكون في صورة إشعاع كهرومغناطيسي. ولكن إذا كانت المادة الساقطة باتجاه ثقب أسود يدور بأقصى زخم زاوي تدور حوله في نفس اتجاه دورانه، فيمكن من حيث المبدأ إطلاق نسبة لافتاً تبلغ ٤٢٪ من طاقة السكون في صورة إشعاع، إذا كان من الممكن أن تفقد المادة قدرًا كافيًّا من الزخم ل يجعلها قادرةً على الدوران حول الثقب الأسود في أقرب مدارٍ دائري مباشرٍ مستقرٍ إلى مركزه.

### ما مقدار سرعة الالتهام؟

يساوي معدل تراكم الثقب الأسود في مركز مجرتنا، في منطقة الrami أُ، التي تعرَّضنا لاكتشافها في الفصل السادس، جزءاً واحداً من ١٠٠ مليون جزء من كتلة الشمس سنويًّا. ولا يبدو هذا الرقم كبيراً جدًّا إلى أن تدرك أنَّ هذا يكافئ التهام كتلةٍ مقدارها ٣٠٠ كتلةٍ أرضية سنويًّا. ولتفسير مستويات شدة الإضاءة الهائلة التي عادةً ما تتسم بها أشباه النجوم، يلزم أن تكون معدلات سقوط المادة متساويةٍ لكتلةٍ شمسينا بضعة أضعاف في السنة الواحدة. وأمّا لتفصير شدة الإضاءة التي عادةً ما تتسم بها أشباه النجوم الميكروية الأصغر حجمًا، التي سنستعرضها هي أيضًا في الفصل الثامن، ربما يلزم أن تكون معدلات سقوط المادة جزءاً واحداً من مليون جزءٍ من هذه القيمة.

ومن السياقات الأخرى التي قد يحدُث فيها استخراج للطاقة على غرار هذه العملية دفقاتٌ أشعة جاما. وهي ومضات مفاجئة من حِزمٍ مُكثفة من أشعة جاما تبدو مرتبطةً بانفجاراتٍ عنيفة في المجرات البعيدة. وقد رُصدت لأول مرة باستخدام أقمارٍ صناعية تابعة للولايات المتحدة في أواخر ستينيات القرن الماضي، وكان يُحسب في البداية أنَّ الإشارات المستقبلة صادرة من أسلحة نووية سوفيتية.

ونظرًا لأنَّ المادة التي تدور في مدارٍ حلزونيٍّ متوجهة إلى داخل الثقب الأسود موجودة في كل مكانٍ عبر القرص التراكمي، يجد الفيزيائيون أنه من المفيد إجراء حساباتٍ بسيطةٍ وتوضيحية مفيدة لفهم مقادير بعض الكميات الفيزيائية المهمة جيدًا؛ فعند اعتبار أنَّ المادة المترافق تأخذ شكلاً كُرويًّا وليس شكل قرص، تظهر بعض الحدود المثيرة للاهتمام. ويكونُ مثل توضيحي جدًّا على ذلك في عالم النجوم، التي تُعد أكثر شبهاً بكثيرٍ بكراتٍ من البلازما مقارنةً بالأقراص التراكمية. وقد أشار السير آرثر إدينجتون إلى أنَّ الإشعاع

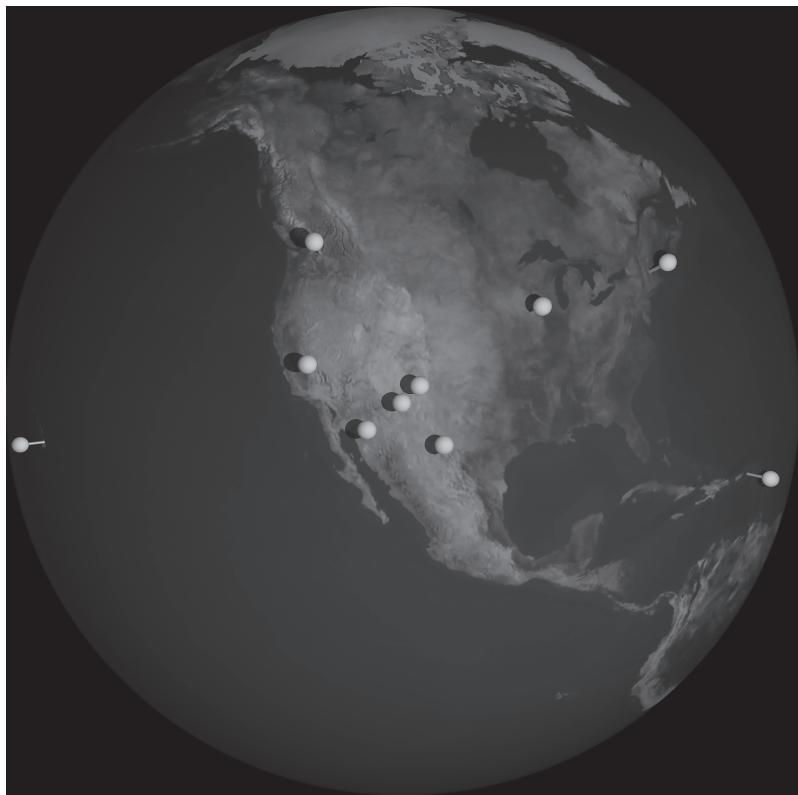
المتبعة من تصادم الإلكترونات المثارة بأيونات أخرى في الغاز الساخن لدى نجم ما سيؤثر بضغط إشعاعي على أي مادة يعتريضها لاحقاً. ويمكن للفوتونات أن «تشتت» الإلكترونات الموجودة في البلازما المؤينة الساخنة داخل النجم (وهذا يعني ببساطة أن «تعطيلها طاقة وزخماً»). ويُوصل هذا الضغط، الذي يؤثر من الداخل إلى الخارج، عبر قوى كهروستاتيكية (وهي قوى مُناظرة لقوى الجاذبية لكن الفرق أنها تحمل شحنات كهربائية) إلى الأيونات الموجبة الشحنة مثل أنوبي الهيدروجين (المعروف كذلك باسم البروتونات) وأنوبي الهيليوم والعناصر الأخرى الموجودة.

في حالة النجوم، تتجه مُحصلة الإشعاع النهائية نحو الخارج في اتجاه أنصاف الأقطار، وهذا الضغط الإشعاعي الناتج المتجه نحو الخارج يؤثر عكس اتجاه تأثير قوة الجاذبية التي تسحب المادة إلى الداخل نحو المركز. وفي حالة شكل النجوم شبه الكروي، يوجد حدّ أقصى لقدر الضغط الإشعاعي المتجه نحو الخارج، وعندما يتجاوز الضغط هذا الحد، يفوق قوة الجاذبية المتجهة نحو الداخل، ويُفجر النجم نفسه ببساطة. يُعرف هذا الضغط الإشعاعي الأقصى باسم حدّ إدينجتون. ومن المؤكد حتماً أنَّ الضغط الإشعاعي الأعلى ينتج من مستوى أعلى من شدة إضاءة الإشعاع، ويمكن تقدير شدة إضاءة جسم معين من سطوعه إذا عرفنا المسافة إلى الجسم. ولذا يمكن استنتاج مقدار الضغط الإشعاعي داخل جسم ما باستخدام بعض الافتراضات البسيطة، بما فيها اعتبار القرص التراكمي شبه كروي. يمكن استخدام هذه الطريقة البسيطة أحياناً للتوصُّل إلى تقدير دلالي لكتلة الثقب الأسود: استناداً إلى شدة الإضاءة المرصودة للإشعاع المتبعة من البلازما المحيطة، فإذا اعتبر أنها واقِلة إلى الحد الأقصى المتمثل في «شدة إضاءة إدينجتون» (الذي ستؤدي شدة الإضاءة عند تجاوزه إلى ضغط إشعاعي عالٍ بما يكفي ليفوق قوة الجاذبية الناتجة من الكتلة في الداخل وبذلك سيفجر الجسم نفسه)، عندئذٍ يمكن تقدير الكتلة. ويمكن التفكير في «شدة إضاءة إدينجتون» من منظور وجود معدّل أقصى يمكن أن تترافق به المادة، في حالة وضع افتراضاتٍ مناسبة عن مدى كفاءة عملية التراكم. يعطي ذلك كمية تُسمى «مُعدل إدينجتون»، وهذا الحد يُعد قيمةً قصوى (في حالة الكفاءة المفترضة). وتُوجَد حالات يُكسر فيها هذا الحد الأقصى المعين، أهمها رفض افتراض أنَّ الجسم يَتَسَمُّ بـ«تماثل كروي» (فهذا الافتراض مناسب في حالة النجوم، ولكن من الواضح أنَّه لا ينطبق على شكل القرص الهندسي الذي تتخذه الأقراص التراكمية التي تحتاج إلى أخذها في الحسبان لفهم كيفية نمو الثقوب السوداء).

## كيفية قياس سرعة الدوران داخل قرص تراكمي

بفضل التقدُّم الذي أحرزَ في التكنولوجيا المتعلقة بـمجال الفلك، أصبح من الممكن قياس السرعة التي تدور بها المادة حول ثقب أسود، على الأقل في حالة الأمثلة القريبة نسبياً من كوكب الأرض. ويتمثل أحد أكبر التحدُّيات في صعوبة الحصول على معلوماتٍ على مقاييس زاوي دقِيق بدرجَةٍ كافية. فمقدار الاستبانة المكانية المطلوبة يجب أن يكون أدق ١٠٠ مرة على الأقل، إن لم يكن ١٠٠٠ مرة، من الاستبانة التي عادةً ما تتحقّق باستخدام التلسكوبات البصرية. ومن حيث المبدأ، تتمثَّل طريقة تحقيق استبانة أدق باستخدام التلسكوب في إجراء الأرصاد عند أطوالٍ موجيةٍ أقصر وإنشاء تلسكوبٍ أكبر، لا سيما لتقليل النسبة بين الطول الموجي الذي يُجرى الرصد عنده وقطر التلسكوب المستخدم. ولكن مع الأسف، فالحل الثاني سرعان ما يُصبح باهظاً إلى حدٍ بشغٍ بسرعةٍ كبيرة، فيما ينطوي الحل الأول أطوال الرصد الموجية المرئية المعتادة إلى نطاق الأشعة فوق البنفسجية، التي يبدو لها غلاف الأرض الجوي مُعتماً بعض الشيء. وتتمثَّل طريقة تحقيق نسبةٍ أصغر بين الطول الموجي وقطر التلسكوب، على عكس ما قد يتبارى إلى الذهن بالبداهة، في إجراء الأرصاد عند الأطوال الموجية الراديوية (وهي أطوالٍ موجيةٍ أطول بكثيرٍ سواءً من الطول الموجي للضوء المرئي أو الطول الموجي للأشعة فوق البنفسجية) التي عادةً ما يبدو الغلاف الجوي والغلاف الأيوني شفافين لها، وافتراض أنَّ قطر التلسكوب يكاد يُساوي قطر الأرض.

ويتضمن هذا النهج بعض مسائل تقنية تستدعي مناقشتها قليلاً؛ إذ اتضح أنه من الممكن، بفضل بعض النظريات والمعادلات الرياضية المفيدة جدًا التي ابتكرها عالم الرياضيات الفرنسي جان باتيست جوزيف فورييه، استعادة جزءٍ كبير من الإشارة التي سترصدُها فتحة تلسكوب كاملة، حتى وإن لم تكن مساحة التجميع الفعلية موجودة إلا في أجزاءٍ فرعيةٍ مُتناشرةٍ من الفتحة الكاملة التي كانت ستُصبح الخيار المفضل الأمثل. فإذا كانت الإشارات الصادرة من الهوائيات المنفصلة (التي يُشبه كل منها تلسكوبًا مفرداً — انظر شكل ٣-٧ الذي يوضح «مصفوفة الخط الأساسي الطويل جدًا») مترابطةً معًا، من الممكن إعادة إنشاء صورٍ لمناطق صغيرةٍ من السماء تحتوي على تفاصيل دقيقة بقدر دقة التفاصيل التي كان سيمُكِّن الحصول عليها لو كان من الممكن إنشاء تلسكوب كامل بحجم الأرض. وعلى سبيل إعطاء فكرة عن مدى دقة هذه الاستبانة ليس إلا، تخيل أنني

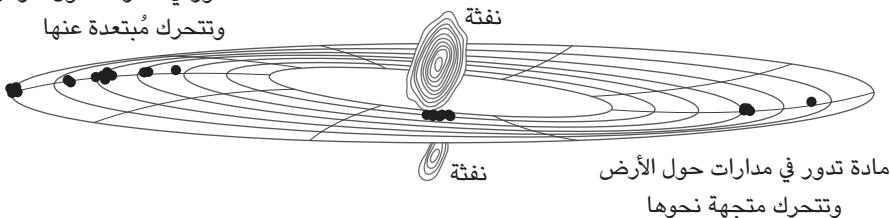


شكل ٣-٧: تصوُّر فني عن مصفوفة الخط الأساسي الطويل جدًا من الهوائيات التي تُعطي، مُجتمعةً، صورًا ذات استبانةٍ مساوية للاستبانة التي كانت ستحقّق باستخدام تلسكوبٍ له فتحة ذات قطر يُساوي جزءاً كبيراً من قطر الأرض.

كنتُ أقف فوق مبني «إمبائر ستيت» في نيويورك، وأنك كنتَ تقف في سان فرانسيسكو. بهذا المستوى من الاستبانة، سيمكن توضيح تفاصيل قرية جدًا من بعضها بمسافاتٍ فاصلة تساوي حجم ظفر إصبعي الصغير. (أحاول تجاهل حقيقة أنَّ الأرض كرة، ولذا لا يوجد خط رؤية مباشر بين سان فرانسيسكو ومبني إمبائر ستيت، لكنكم تفهمون الفكرة). هذا يعني أنَّ استخدام أدوات مثل «مصفوفة الخط الأساسي الطويل جدًا» يتيح رؤية سماءٍ مُفردةٍ تَبَعُّدُ عن بعضها أقلَّ من شهرٍ ضوئيٍّ في مجراتٍ أخرى.

مادة تدور في مدارات حول الأرض

وتتحرك مُبتعدة عنها



شكل ٤-٧: قاست مصفوفة الخط الأساسي الطويل جدًا توزيع مادة تدور في مدارات داخل القرص التراكمي لمجرة «إن جي سي ٤٢٥٨» (المعروف كذلك باسم مجرة «مسييه ١٠٦») حول ثقبها الأسود المركزي الذي يُساوي كتلته سبعين مليون مرة.

تشغل الاستيانة العالية عبر صورة ما بالمعنى المكاني، والاستيانة العالية بالمعنى الطيفي (معنى أنَّ المرء يستطيع تمييز الأطوال الموجية لسماتٍ مُعينة في طيفٍ ما بدقةٍ شديدة) مزيجاً قوياً جدًا. فقد استخدم فريق بقيادة جيم موران من جامعة هارفارد «مصفوفة الخط الأساسي الطويل جدًا»، مستفيدين من تأثير دوبлер، في إجراء عمليات رصدٍ للقرص التراكمي المحيط بالثقب الأسود المركزي لدى مجرةٍ قريبةٍ تُسمى مجرة «إن جي سي ٤٢٥٨». قاسوا التباين في الطول الموجي لإشارةٍ طيفيةٍ مُعينة («ميفر مائي») عبر القرص التراكمي الدوار، واستخدموه هذا الانزياح نحو الأحمر ونحو الأزرق، أثناء اقتراب المادة التي تبعث إشعاع الميفر من كوكب الأرض وابتعادها عنها، لاكتشاف التباين في السرعة التي تدور بها المادة حول الثقب الأسود عند مسافةٍ مُعينة. وتؤكد هذه البيانات الجميلة للغاية أنَّ المادة تدور حول الثقب الأسود بالكيفية التي كانت قوانين كبلر ستصفت بها تماماً، وهذه المدارات موضحة في شكل ٤-٧.

## مادة دوَّامية الحركة

في أقرب مدارٍ مُستقر إلى مركز ثقبٍ أسود ذي كتلةٍ تعدل كتلة سبعين مليون مرة، يكون الزخم الزاوي أصغر بأكثر من ١٠ آلاف مرة من الزخم الزاوي لمادة تدور في مداراتٍ في مجرةٍ عادية. ومن الواضح أنَّ تراكمَ المادة بفعل الثقب الأسود يتطلب تبديد معظم هذا الزخم الزاوي، وهذا يتحقق بعملياتٍ تحدث داخل القرص التراكمي. يمكن

اعتبار أنَّ المدارات الموجودة في القرص التراكمي أقرب إلى أن تكون دائيرية، مع أنها في الواقع تتَّخذ مساراً حلوبياً نحو الداخل بشكلٍ تدريجي ودقيق جدًا يصعب ملاحظته. وتتنصل قوانين كبلر على أنَّ المادة التي تدور عند أنصاف قطر أقصر ستتحرَّك بوتيرة أسرع من المادة التي تدور في مداراتٍ أكبر بقليل. وهذا الاختلاف في سرعة الدوران يسمح للثقب الأسود بامتصاص البلازما التي يتكونُ منها القرص التراكمي؛ والتي تُعد بمثابة حرقٍ ينشأ من احتكاك المدارات الداخلية السريعة الدوران بالمادة المجاورة الموجودة في مداراتٍ ذات أنصاف قطر أطول قليلاً. وسيؤدي هذا الاختلاف في السرعة إلى أنَّ المادة الموجودة في المدارات الأكبر قليلاً ستُسحب بوتيرة أسرع قليلاً، بفعل تأثيرات الاضطراب اللزج، ولذا ستُصبح المادة الموجودة في المدارات الداخلية أبطأ قليلاً بالتبعية. ومن ثم، نظرًا لأنَّ الحركة المدارية ازدادت في المدارات الأبعد، فإنَّ الزخم الزاوي انتقل إلى المادة الخارجية من المادة الداخلية، رافعًا درجة الحرارة في أثناء ذلك.

بوجهٍ عام، يُعتبر الزخم الزاوي كمية محفوظة، ويمكن أن تفقد المادة الأقرب إلى الثقب الأسود زخماً زاويًا بانتظام، ما يزيد من احتمالية أن يبتلعها الثقب الأسود. لاحظوا أنه إذا كانت كتلة مُستديرة لزجة من المادة المدارية لها زخم زاوي كبير للغاية، فستبقى بعيداً عن مركز الكتلة التي تدور حولها؛ حيث ستكون السرعة التي تتحرك بها أكبر من أن تسمح لها بأي اقتراب. فما نوع تأثيرات الزوجة التي قد تكون مرتبطةً بالبلازما داخل الأقراص التراكمية؟ يمكن أن تكون الزوجة بين الذرات صغيرةً في هذه الحالة؛ فالبلازما الغازية التي يتكونُ منها القرص التراكمي مختلفة تماماً عن لزوجة العسل الأسود. وفي الواقع، قد تكون المجالات المغناطيسية مهمةً جدًا في نقل الزخم الزاوي من حركة التدفق التراكمي نحو الداخل. فمن أين تأتي المجالات المغناطيسية إذن؟ تكون البلازما في القرص التراكمي شديدة السخونة، وبذلك تتأينَ الذرات جزئياً لتحول إلى إلكترونات ونيوكليونات موجبة الشحنة. ولذا تُوجَد تدفُقات لجسيمات مشحونة، وتُنْتج الشحنات المترددة مجالات مغناطيسية، كما هو موضح في معادلات جيمس كليرك ماكسويل. وحالما تنشأ ولو مجالات مغناطيسية ضعيفة للغاية، يمكن مطهُها وتضخيمها بفعل الاختلاف في سرعة الدوران، وتعديلها بفعل اضطراب البلازما، حتى تصل إلى المستويات التي يمكن عندها أن تعطي الزوجة المطلوبة. وهذا هو أساس ما يعرف بعدم الاستقرار الدوراني المغناطيسي. كان أول من أدرك أهمية هذه الآلية في هذا السياق ستيف بالبس وجون هولي في أوائل التسعينيات من القرن العشرين عندما كانوا يعملان في جامعة فيرجينيا.

وبفعل الاضطراب اللزج ووسائل أخرى على الأرجح، يمكن أن تفقد البلازما الزخم الزاوي في النهاية وتدور في مدار عند أنصاف أقطار أقصر وتكون أقرب إلى الثقب الأسود. وحالما تصل البلازما الغازية إلى أقرب مدارٍ مُستقر من الثقب الأسود، لن تُوجَد حاجة إلى مزيدٍ من الاحتكاك لكي تنزلق إلى داخل الثقب الأسود، وبعد ذلك لن تُرِي مجدداً أبداً، لكنها ستكون قد زوَّدت مقدار كتلة الثقب الأسود ودورانه.

### ما خصائص الأقراص التراكمية وما مدى سخونتها؟

رأينا أنَّ تأثيرات الزوجة والحركة المضطربة تؤدي دوراً مهماً في تبديد الزخم الزاوي من المادة التي تدور في المدارات بحيث يمكن أن تدور على مسافةٍ أقرب من الثقب الأسود وتُبلع داخله. غير أنَّ إحدى نتائج تأثير الزوجة أنَّ الحركة المدارية الحلوذنية للكتلة تحول إلى حركةٍ عشوائية، وبذلك تسخن المادة. وكلما زادت الحركة الحرارية العشوائية للمادة، زادت طاقتها الحرارية وزادت درجة حرارتها. وكما ذُكر في الفصل الخامس، حيثما تُوجَد حرارة، سيُوجَد إشعاع كهرومغناطيسي حراري. وهكذا فكل جسمٍ يُصدر إشعاعاً حرارياً، إلا إذا كانت درجة حرارته عند الصفر المطلق.

وهذا الارتفاع في درجة الحرارة هو الذي يُسبِّب الإشعاع الشديد الإضاءة الذي نرصد انباته من الأقراص التراكمية. وإذا كان القرص التراكمي واحداً من الأقراص التراكمية التي تُحيط بالثقوب السوداء الفائقية الضخامة الموجودة عند مراكز أشباه النجوم، فعادةً ما يبلغ حجمه مليار كيلومتر، ويكون الجزء الأكبر من الإشعاع المنبعث من تلك الأقراص التراكمية واقعاً في نطاق الأشعة المرئية والأشعة فوق البنفسجية من الطيف. أمَّا إذا كان القرص واحداً من تلك الأقراص التراكمية التي تُحيط بالثقوب السوداء الأقل ضخامةً بكثير داخل ما يُسمَّى أشباه النجوم الميكروية (التي سُتُّعرض في الفصل الثامن)، فإنَّ حجمه عادةً ما يكون أصغر مليون مرة، ويكون معظم إشعاعه مكوناً من الأشعة السينية. وكلما كانت كتلة الثقب الأسود أكبر، كان أقرب مدار دائريٍّ مُستقر منه أكبر قُطْراً، وبالتالي سيكون القرص التراكمي المحيط أبرد.

فإذا كانت كتلة أحد الثقوب السوداء الفائقية الضخامة تساوي كتلة شمسنا ١٠٠ مرة، فستكون درجة الحرارة القصوى في القرص التراكمي المحيط به نحو مليون كلفن، أمَّا إذا كان الثقب الأسود ذا كتلةً نجمية عادية، فيُمكِّن أن تصل درجة الحرارة القصوى في القرص التراكمي المحيط به إلى مقدار أعلى ١٠٠ مرة من ذلك.

## كيف يمكن قياس سرعة دوران الثقب الأسود؟

نظرًا لأنَّ رؤية الثقوب السوداء مُباشرة غير مُمكنة في الواقع، فلا يمكن كذلك رؤيتها تدور. ولكن تُوجَد طريقةتان رئيسيتان لقياس سرعة دوران الثقوب السوداء. فكما نوقشت في الفصل الرابع، عندما تكون سرعة دوران الثقب الأسود كبيرةً جدًّا، فمن الممكن أن تدور المادة في مدارٍ مستقر حول الثقب الأسود أقرب إلى بكثيرٍ مما كان سيكون ممكناً لو لم يكن الثقب الأسود يدور. وقد اتضح أنَّ حرارة المادة في هذه المدارات الضيقية جداً تزداد بفعلِ تأثيراتٍ قوية ناجمة عن الحركة المضطربة واللزوجة في أثناء دورانها في مسار حلزوني نحو الداخل، ويمكن أن تؤدي هذه الحرارة الهائلة إلى انبعاث أشعةٍ سينية، اعتماداً على مدى القُرب الذي وصلت إليه المادة من الثقب الأسود أثناء دورانها قبل أن يبتلعها. هذا وتتنبأ النسبة العامة بأنَّ شكل الخطوط الطيفية (الناشئة من الانزياح نحو الأحمر تحت تأثير الجاذبية) يتآثر بالمسافة بين المادة الاباعية للإشعاع والثقب الأسود بطريقَة لها أثر مميز. وينشأ هذا الآثر من بعض ذرَّات الحديد المتألقة داخل هذه المادة، وقد ابتكر أندرو فابيان من جامعة كامبريدج طريقة استخراج المعلومات من ضوء الأشعة السينية.

ويُعد تفسير هذه القياسات صعباً، بسبب العديد من العوامل المختلفة، مثل ميل القرص بالنسبة إلى الأرض، وبالطبع طبيعة الرياح والماء المتدافع إلى الخارج من سطح القرص التراكمي، بالقُرب من الحافة الداخلية (على طول خط الرؤية الواصل بيننا وبينها) التي تحمل خصائصها مفتاح قفل صندوق المعلومات المتعلقة بالثقب الأسود التي يتعدَّى الوصول إليها بطريقَة أخرى. وتتضمن الطرق الأخرى لقياس الزخم الزاوي للثقوب السوداء ذات الكتلة النجمية قياس نطاقٍ كبير من طيف الأشعة السينية والأخذ في الحسبان درجات الحرارة المختلفة للمناطق الداخلية الأقرب في القرص التراكمي (التي تكون أخْسَن) والمناطق الخارجية الأبعد (التي تصير أبداً تدريجيًّا). ومن الممكن تقدير ميل القرص من شكل طيف الأشعة السينية ومن أعلى درجة حرارة (بافتراض أنك تعرف كتلة الثقب الأسود، وبُعده عن الأرض) لاستنتاج المسافة بين الثقب الأسود والمادة التي تدور في أقرب مدارٍ إليه. وقد ابتكرت كريستين دون من جامعة دورهام طرقاً مشابهةً من أجل قياس الزخم الزاوي للثقوب السوداء الفائقة الضخامة في مراكز أشباه النجوم. وتتجذر الإشارة إلى أنَّ مدى القُرب الذي يمكن أن تصل إليه المادة من الثقب الأسود أثناء

دورانها حوله (قبل أن يبتليها) يوضح مدى السرعة التي يدور بها الثقب الأسود نفسه حتماً.

### الثقوب السوداء تُبعِّثُ الكثير من الفُتات عند الاتهام

يتضح أنَّ مجرد جزء صغير (يُقدَّر بنحو ١٠٪، مع أنه يمكن أن يكون أكبر بكثيرٍ جدًّا) من المادة التي تتجذب نحو الثقب الأسود يصل إلى أفق الحدث ويبتلع بالفعل. ويتناول الفصل الثامن ما يحدث للجزء المتبقّي الذي لا يُبتلي بالفعل داخل أفق الحدث من المادة الساقطة نحو الثقب الأسود. فمن مختلف أجزاء القرص التراكمي نفسه، يمكن أن تنبعث المادة كريح؛ أمّا من داخل أقرب نطاقٍ حول مركز القرص التراكمي، فتتدفق نفاثات سريعة جدًّا من البلازمَا نحو الخارج بسرعاتٍ قريبة جدًّا من سرعة الضوء. وكما يُوضَّح الفصل الثامن، فإنَّ ما لا يلتَهمه الثقب الأسود يُطرَد من المدارات الموجودة حوله ويبُصَق بشكلٍ مُذهل نوعاً ما.

## الفصل الثامن

# الثقوب السوداء وتأثيراتها الثانوية

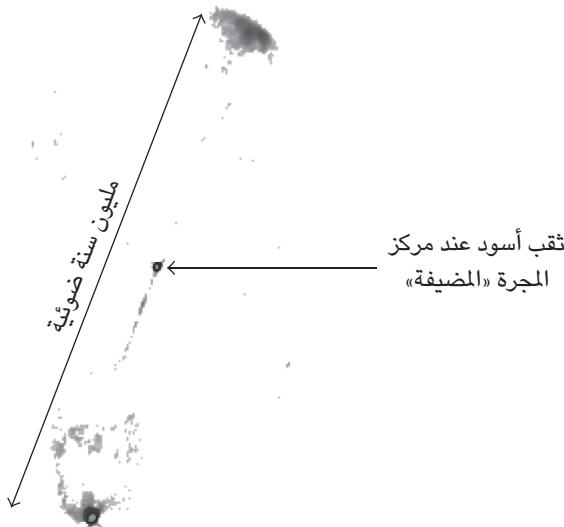
### الثقوب السوداء لا تمتلك فقط

لو كانت أعيننا تستطيع رصد ما يوجد في السماء عند أطوالٍ موجية تقع في النطاق الراديوي أو نطاق الأشعة السينية، لكان سنرى أنَّ بالوناتِ ضخمة أو فصوصاً من البلازما تمتدُ عبر بعض المجرات. وتحتوي هذه البلازما على جزيئات مشحونة تتحرك بسرعاتٍ قريبة من سرعة الضوء، وتُصدر إشعاعاً قوياً له أطوالٍ موجية مُتنوعة عبر نطاقٍ واسع. وتنشأ فصوص البلازما التي تظهر في بعض هذه المجرات (التي تُعد أمثلة لما يُعرف باسم «المجرات النشطة») بفعل نفاثاتٍ تتحرك بسرعاتٍ عالية إلى حدٍ يجعلها قريبةً من سرعة الضوء، وتتدفق خارجاً من الوسط المحيط بالثقب الأسود مباشرةً، خارج منطقة أفق الحدث الموجدة حوله. وقد أوضح روجر بنزور بأسلوبٍ عام كيف يمكن، من حيث المبدأ، استخراج طاقة دوران ثقب أسود من منطقة الإرجوسفير المحيطة به. وقد بينَ روجر بلاندفورد ورومان زنايك كيف يمكن تحويل الطاقة المخزنة في ثقب أسود دوار إلى مجالات كهربائية ومتناطحيسية في الواقع؛ وبذلك تُتيح القدرة على إنتاج هذه النفاثات النسبوية من البلازما، أي التي تقترب سرعتها من سرعة الضوء. وكذلك تُوجَّد تفسيرات أخرى للأالية التي تُطلق النفاثات بها من الثقوب السوداء القريبة. غير أنَّ معرفة التفسير الصحيح من بين هذه التفسيرات ما زالت قيد الدراسة في أبحاثٍ حالية دعوية ومثيرة. وأيًّا كانت الآلية أو الآليات التي يُكَشَّف عنها، فإنَّ هذه النفاثات عبارة عن تدفقات من أشعة متوازية شديدة مقدوفة من المنطقة المحيطة بالثقب الأسود، ولكن خارج أفق الحدث بالطبع. وفي الحقيقة، فالمناطق الواقعية بين المجرات ليست فضاءً فارغاً. بل تمتلئ بغازٍ مُتناشر ومحفَّ جدًا يُسمَّى الوسط الكائن بين المجرات. عندما تصطدم النفاثات

بالوسط الكائن بين المجرات، تتشكل موجات صدمية تتسرّع داخلها الجسيمات تسارعاً مذهلاً، وتتصاعد البلازمـا النشطة المفعمة بالطاقة، التي نشأت في نفثة بالقرب من الثقب الأسود، إلى الأعلى وتتدفق خارج المنطقة المحيطة بموضع حدوث الصدمة مباشرة. ومع تمدد البلازمـا، فإنـها تنقل كميات هائلة من الطاقة إلى الوسط الكائن بين المجرات. تُوجـد أمثلة عديدة على بعض من نفثـات البلازمـا هذه تمتـد عبر مسافـات تساوي ملايين السنين الضوئـية. وبذلك فإنـ الثقوب السوداء لها تأثير كوني هائل يتجاوز مناطق أفق الحـدث المحيطة بها بـسنـين ضـوئـية عـديـدة. وسـأـصـفـ فيـ هـذـاـ الفـصـلـ تـأـثـيرـ الثـقـوبـ السـودـاءـ فيـ الوـسـطـ الـمـحـيـطـ بـهـ وـتـفـاعـلـاتـهـ معـهـ.

كما نوقـشـ فيـ الفـصـلـ السـادـسـ، يـوجـدـ عندـ مرـكـزـ مـعـظـمـ المـجـرـاتـ (ـعـلـىـ الـأـرجـحـ)ـ ثـقـبـ أسـوـدـ تـتـراـكـمـ عـلـيـهـ المـادـةـ؛ـ ماـ يـؤـدـيـ إـلـىـ انـبعـاثـ إـشـعـاعـ كـهـرـوـمـغـناـطـيـسيـ.ـ تـعـرـفـ هـذـهـ المـجـرـاتـ بـالـمـجـرـاتـ الـنـشـطـةـ.ـ وـفـيـ بـعـضـهـاـ،ـ تـكـوـنـ عـلـىـ التـراـكـمـ فـعـالـةـ لـلـغـاـيـةـ وـيـكـوـنـ انـبعـاثـ إـشـعـاعـ النـاتـجـ شـدـيدـ إـلـيـاءـ.ـ وـتـسـمـيـ هـذـهـ المـجـرـاتـ أـشـبـاهـ النـجـومـ (ـوـهـوـ مـصـطـلـحـ مشـتقـ منـ تـعـرـيفـهـاـ الـأـصـلـيـ الـذـيـ تـعـرـفـ فـيـهـ بـأـنـهـ «ـمـصـادـرـ إـشـعـاعـ رـادـيوـيـ شـبـهـ نـجـمـيـةـ»ـ،ـ وـهـيـ نـقـاطـ بـعـيـدةـ جـداـ يـنـبعـثـ مـنـهـ إـشـعـاعـ رـادـيوـيـ شـدـيدـ إـلـيـاءـ).ـ نـفـهـ الـآنـ أـنـ أـشـبـاهـ النـجـومـ تـشـهـدـ بـعـيـدةـ جـداـ يـنـبعـثـ مـنـهـ إـشـعـاعـ رـادـيوـيـ شـدـيدـ إـلـيـاءـ).ـ نـفـهـ الـآنـ أـنـ أـشـبـاهـ النـجـومـ أـقـوـيـ إـلـاقـ للـطاـقةـ الـمـسـتـادـامـةـ بـيـنـ كـلـ إـلـاقـاتـ الـطاـقةـ الـمـعـروـفـةـ فـيـ الـكـوـنـ.ـ فـأـشـبـاهـ النـجـومـ تـشـعـ طـاـقةـ عـبـرـ الطـيـفـ الـكـهـرـوـمـغـناـطـيـسيـ كـلـهـ،ـ مـنـ الـمـوـجـاتـ الرـادـيوـيـةـ ذـاتـ الطـوـلـ الـمـوـجيـ الطـوـيلـ،ـ مـرـوـرـاـ بـالـأـطـوـالـ الـمـوـجـيـةـ لـلـضـوءـ الـبـصـريـ (ـالـرـئـيـ)،ـ وـصـوـلـاـ إـلـىـ الـأـشـعـةـ السـيـنـيـةـ وـمـاـ بـعـدـهـاـ.ـ وـيمـكـنـ أـنـ تـكـوـنـ الـفـصـوصـ الـبـاعـثـةـ إـلـىـ إـشـعـاعـ الرـادـيوـيـ،ـ الـمـذـكـورـةـ أـعـلـاهـ،ـ مـُثـيـرـةـ وـلـافـتـةـ جـداـ لـأـنـهـ تـمـتـدـ عـبـرـ مـسـافـاتـ تـزـيدـ عـلـىـ مـئـاتـ الـأـلـافـ مـنـ الـسـنـينـ الـضـوـئـيةـ (ـانـظـرـ شـكـلـ ١ـ٨ـ).ـ وـتـنـشـأـ الـطاـقةـ الـتـيـ تـشـعـ عـنـ الـأـطـوـالـ الـمـوـجـيـةـ الرـادـيوـيـةـ مـنـ تـلـكـ الـفـصـوصـ الـكـبـيـرـةـ؛ـ وـهـيـ خـرـانـاتـ مـنـ الـبـلـازـمـاـ الـمـغـنـطـيـسـيـ الـفـائـقـةـ السـخـونـةـ الـتـيـ تـسـتـمـدـ طـاقـتهاـ مـنـ نـفـثـاتـ تـنـقـلـ الـطاـقةـ عـبـرـ مـسـافـاتـ هـائـلـةـ فـيـ الـفـضـاءـ.ـ وـتـعـرـضـ إـلـكـتـرـوـنـاتـ الـعـالـيـةـ الـطاـقةـ (ـوـالـمـقـصـودـ هـنـاـ بـالـعـالـيـةـ الـطاـقةـ أـنـهـ تـحـرـكـ بـسـرـعـةـ قـرـيبـةـ جـداـ مـنـ سـرـعـةـ الـضـوءـ)ـ لـقـوـيـ تـؤـثـرـ عـبـرـ اـتـجـاهـ حـرـكـتـهـاـ مـنـ الـمـجـالـاتـ الـمـغـنـاطـيـسـيـةـ الـمـحـيـطـةـ الـتـيـ تـنـتـشـرـ خـلـالـ فـصـوصـ الـبـلـازـمـاـ الـتـيـ تـتـحـرـكـ دـاخـلـهـاـ تـلـكـ إـلـكـتـرـوـنـاتـ).

وـهـذـاـ التـسـرـيـعـ يـجـعـلـهـ تـصـدرـ إـشـعـاعـاـ مـنـ الـفـوـتوـنـاتـ يـعـرـفـ باـسـمـ إـشـعـاعـ السـنـكـرـوـتـرـوـنـيـ (ـوـهـوـ قدـ يـكـوـنـ رـادـيوـيـاـ،ـ أـوـ قدـ يـكـوـنـ مـُنـتـمـيـاـ،ـ فـيـ حـالـاتـ نـادـرـةـ تـتـسـمـ بـطاـقـةـ عـالـيـةـ،ـ إـلـىـ نـطـاقـ ذـيـ أـطـوـالـ مـوـجـيـةـ أـقـصـىـ بـكـثـيرـ،ـ وـصـوـلـاـ إـلـىـ الـأـشـعـةـ السـيـنـيـةـ)ـ.



شكل ١-٨: هذه صورة مبثوثة بالراديوية لأحد أشباه النجوم العملاقة الذي يمتدُ عبر نطاق مقداره مليون سنة ضوئية.

ولإعطاء فكرة عن حجم الطاقة التي تُنْتَجُها أشباه النجوم، تأملوا القيم التالية. تُنْتَج مصايبح الصمام الثنائي الباعث للضوء (إل إي دي) التي أعمِّلُ على ضوئها طاقةً مقدارها ١٠ وات. وتُنْضَاء تلك المصايبح بكميات مُسْتَدَدَّةٍ من محطة توليد الكهرباء المحلية التي تُوجَد في منطقتي وتنتج بضعة مليارات وات (يساوي المليار وات  $10^{10}$  وات أو جيجاوات). وتنتج الشمس نحو  $4 \times 10^{26}$  وات، أي أكثر مما تُنْتَجُه محطة الكهرباء هذه بمائة مليون مليار مرة. أمّا مجرتنا، درب التبانة، فتحوي أكثر من ١٠٠ مليار نجم، ويقترب مقدار الطاقة التي تُنْتَجُها من  $10^{37}$  وات. لكن الطاقة التي يُنْتَجُها أحد أشباه النجوم يمكن أن تتجاوز حتى الطاقة التي تُنْتَجُها المجرة بأكثر من ١٠٠ مرة. تذكروا أنَّ ما يُطلق هذه الطاقة ليس مجرة مُكونة من ١٠٠ مليار نجم، بل العمليات الجارية حول ثقب أسود واحد. ويمكن أن يُلْحِق إشعاعً كهذا أضرارًا جسيمة بصحة الكائنات الحية هنا على كوكب الأرض؛ لذا من حُسن حظنا عدم وجود أشباه نجوم قوية كهذه بالقرب من مجرتنا!

يُعتقد أنَّ النافتات الموجودة في أشباه النجوم تستمرُّ مiliar سنة أو أقل، وتستند هذه الفكرة إلى بعض تقديرات سُرعة نمو نافتات هذه الأجسام، وإلى قياسات الحجم التي نمت

حتى وصلت إليه. وبذلك فإنَّ علاقَةً بسيطةً بين المسافة والزمن والسرعة تُقدِّم خيطاً إرشادياً إلى معرفة المد المحمولة لاستمرارية نشاط النافتات في أشباه النجوم المرصودة عبر الكون.

ومع تمدد هذه الفصوص الباعثة للإشعاع الراديوي، تضعف مجالاتها المغناطيسية كما تضعف الطاقات «الداخلية» للإلكترونات المفردة في تلك الفصوص. ويعمل هذان التأثيران على تقليل شدَّة الإشعاع مع مرور الزمن وزيادة مسافة الْبُعد عن الثقب الأسود؛ ويعتمِد مقدار الانفاسِ الكبير في هذه الشدة على عدد الإلكترونات ذات الطاقة العالية الموجوَّدة مقارنةً بعدد الإلكترونات الموجودة ذات الطاقة الأقل. ومن خواص الإشعاع السنكروتروني أنه كلما كانت شدة المجال المغناطيسي أضعف، وجَب أن تكون الإلكترونات أعلى طاقةً لتُنتِج الإشعاع عند الطول الموجي الذي يُضيّق التلسكوب الراديوي لاستقبال الإشعاع عنده. وهذا يُضاعف مقدار تضاؤل شدة الإشعاع السنكروتروني مع تمدد فصوص البلازما إلى الفضاء الخارجي. ولا يقتصر تأثير تمدد البلازما على أنَّ الإلكترونات تفقد الطاقة، ولكن نظراً لأنَّ قوة المجال المغناطيسي تضعف، فإنَّ الإلكترونات ذات الطاقة المتزايدة فقط هي التي تكون مرتبطةً بما يرصده التلسكوب، وفي كثير جداً من الأحيان، يكون عدد ما يُوجَد من تلك الإلكترونات أقل بكثيرٍ من عدد الإلكترونات ذات الطاقة المنخفضة على أي حال. ويمكن أن ينطفئ ضوء الفصوص الباعثة للإشعاع الراديوي في أشباه النجوم بسرعةٍ كبيرة.

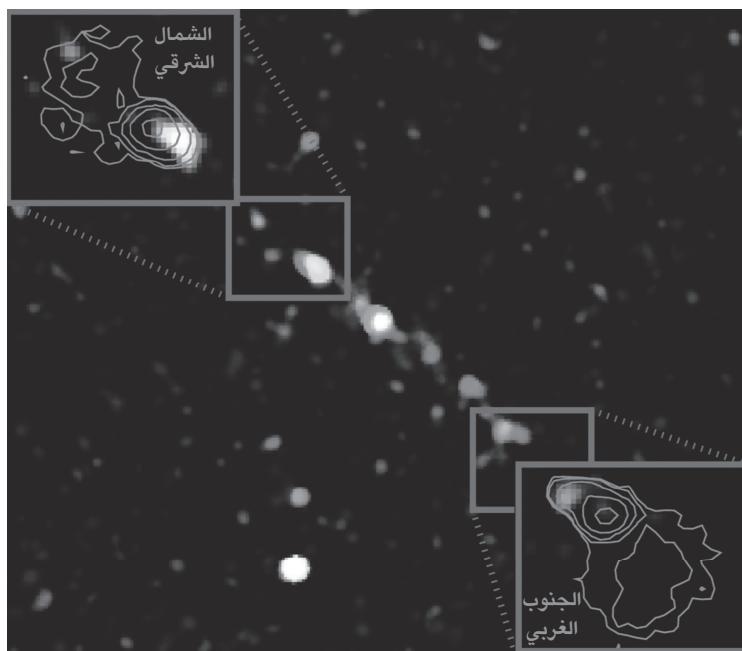
ولا يعني هذا أنَّ العرض قد انتهى، لكنَّ المشهد انتقل إلى نطاقٍ مختلف من الأطوال الموجية. وهكذا يحدُث شيءٌ لافتٌ بعض الشيء؛ إذ تُضيء الفصوص بالأشعة السينية. ويحدُث هذا من خلال عملية تشتُّتٌ تُعرَف باسم تشتت كومبتون العكسي. ففي وجود مجال مغناطيسي كبير بما يكفي، يمكن أن تُصدر الإلكترونات إشعاعاً سنكروترونياً، وبذلك تفقد طاقة. وكذلك تُوجَد آلية أخرى لفقدان الطاقة مرتبطة بهذا الموضوع الذي نُناقشه، وهي تحدُث من خلال تفاعل هذه الإلكترونات مع الفوتونات التي تُشكِّل إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، أي الإشعاع المتبقّي من الانفجار العظيم، والذي يغمر الكون حالياً بوهجٍ باردٍ من الموجات الميكروية. فمن الممكن أن يتصادم مثل هذا الإلكترون مع فوتون من إشعاع الخلفية الكونية الميكروي بحيث تُصبح طاقة الفوتون أكبر بكثيرٍ مما كانت عليه قبل الاصطدام وتُصبح طاقة الإلكترون أقل بكثيرٍ مما كانت عليه قبل الاصطدام (تذكروا أنَّ الطاقة كمية محفوظة عموماً). ومن الظواهر التي تحمل أهمية

خاصة أنه عندما تنخفض طاقات الإلكترونات السريعة الحركة إلى مقدار يساوي طاقة الإلكترون في وضع السكون ١٠٠٠ مرة فقط (بعدما كانت في السابق أعلى من ذلك بنحو ١٠٠ أو ١٠٠٠ مرة)، تكون طاقاتها مكافئة تماماً للقدر الذي يجعلها تشتت فوتونات إشعاع الخلية الكونية الميكروي وترتقي بها إلى فوتوناتٍ في نطاق الأشعة السينية. تجدر الإشارة هنا إلى أنَّ تفاصيل أحد الإلكترونات العالية الطاقة مع فوتون منخفض الطاقة لإنتاج فوتون عالي الطاقة يتشاربُ بعض الشيء مع ما يحدث في لعبة السنوكر حين تصطدم الكرة البيضاء (تخيل أنَّ هذه الإلكترون) بإحدى الكرات الحمراء، وتكتسب الكرة الحمراء قدرًا كبيرًا من الطاقة على حساب انخفاض طاقة الكرة البيضاء (من أجل أن يكون هذا المثال التوضيحي مناسباً، يرجى التغاضي عن حقيقة أنَّ هذه الكرة لا تتحرك بسرعة الضوء!). وفي حين أنَّ المطاف ينتهي بالكرة الحمراء (حسبما يأمل اللاعب) داخل أحد جيوب طاولة السنوكر، فإنَّ الفوتون (الذي كان طوله الموجي الأصلي يبلغ نحو ميليمتر واحد) يكتسب قدرًا من الطاقة يساوي طاقته قبل الاصطدام نحو مليون مرّة؛ ولذا يُصبح طوله الموجي أقصر مليون مرّة.

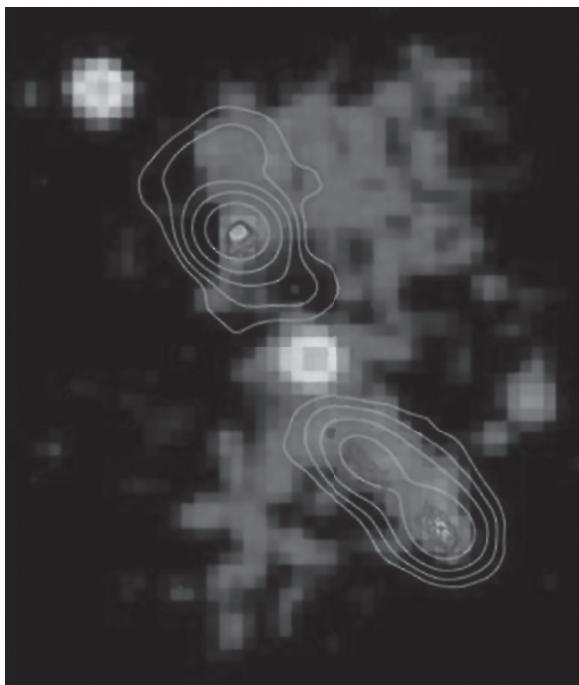
يتسم قمر تشاندرا الصناعي، الذي أطلقته وكالة ناسا في عام ١٩٩٩، بأنه حساس للأطوال الموجية الموجودة في نطاق الأشعة السينية، ويستطيع في الواقع اكتشاف أزواجٍ من فصوصٍ على شكل أثقال التمارين (الدببل) من إشعاعاتٍ في نطاق الأشعة السينية تماماً كما يستطيع التلسكوب الراديوي اكتشاف هذه البنى المزدوجة عند أطوال موجية تُقدّر بالستينيات. تَظُهر بعض البنى المزدوجة التي رُصدت عند أطوالٍ موجية في النطاق الراديوي على هيئة مخططات كنторية في شكليٍ ٢٠ و ٢١، بينما تَظُهر فيما تلك البنى المزدوجة في نطاق الأشعة السينية على هيئة تدرُّج رمادي.

وفي الواقع إذا استطعنا مُراقبة دورة حياة أحد أشباه النجوم هذه خلال كل تلك المراحل التطورية (على غرار الطريقة التي قد يُراقب بها عالم الأحياء دورة تطور حياة الصندوق من طور بيض الضفادع إلى شراغيف إلى شراغيف بسيقان صغيرة، إلى ضفادع صغيرة بذيل قصيرة، إلى ضفادع أكبر، ثم إلى ضفادع ميّنة) فسنرصد تحوّلًا من تالق البنى المزدوجة بإشعاعٍ ذي أطوال موجية في النطاق الراديوي إلى أنها تُصبح مُهيمنة بدرجةٍ متزايدة في نطاق الأشعة السينية. أولاً، ستتلاشى البنى ذات الإشعاع الراديوي إلى أن تُصبح غير قابلة للاكتشاف، ثم تتلاشى البنى ذات الأشعة السينية إلى أن تُصبح غير قابلة للاكتشاف. وبالطبع إن كان ممكناً أن تبدأ النافتات من جديد، لو كان ممكناً أن يحصل

الثقب الأسود على مزيدٍ من الوقود مثلًا، فعندئِن ستزُود النافتات فصوصًا مزدوجة جديدة باعثة للإشعاع الراديوي بالوقود، ثم تزُود فصوصًا باعثة للأشعة السينية بالوقود مجددًا. وكما رأينا في الشكَّلَيْن ٢-٨ و٣-٨، في بعض أشباه النجوم، نستطيع أن نرى كلاً من البنى المزدوجة ذات الإشعاع الراديوي والبنى المزدوجة ذات الأشعة السينية في آنٍ واحد، ولكن في البعض الآخر، إمَّا أن نرى هذه أو تلك (شكل ٤-٨). وفي هاتَّين لافتَتَين، نرى أنَّ البنية المزدوجة ذات الأشعة السينية تتوافق مع تجسيِّد سابق لنشاط النافتات، ولكن مع نشاط راديوي جديد أيضًا، بزاوية مختلفة لأنَّ الاتجاه الذي تطلق بطوله النافتات المتعاكسة التوجيه قد تأرجَح؛ أي تغيير موضعه الزاوي، ويظهر مثال لهذه الظاهرة في شكل ٣-٨.



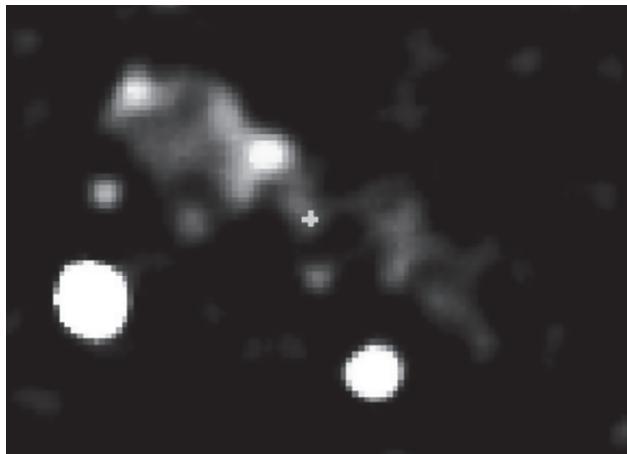
شكل ٢-٨: يمتد شِبه النجم (الكوازار) العملاق هذا على مسافةٍ مقدارها نصف مليون سنة ضوئية، ويتضمن بنية مزدوجة الفصوص عند كلٍّ من نطاق الأطوال الموجية الراديويَّة (الموضح في هيئة خطوط كنторية) ونطاق الأطوال الموجية للأشعة السينيَّة (الموضح في هيئة ترُجُّع رماديٍّ).



شكل ٣-٨: البنية المزدوجة الفصوص التي رُصدت في شبه النجم هذا عند أطوال موجية راديوية [خطوط الكنتور] توضح أنَّ اتجاه النشاط الأحدث مختلف تماماً عن ذلك الذي يظهر عند طاقات نطاق الأشعة السينية [الدرج الرمادي] (بقياً الاتبعاث الذي كشفه تشتت كومبتون العكسي لفوتونات إشعاع الخلفية الكونية الميكروي) ما يُشير إلى أنَّ الموضع الزاوي لمحور النفقه ربما يكون قد تغير كما يتغير الموضع الزاوي لمحاور النفقه في أشباه النجوم الميكروية.

يُعد ثبات محور النفقه في العديد من أشباه النجوم وال مجرات الراديوية مؤشراً على ثبات الزخم الزاوي للثقب الأسود الفائق الضخامة، فيعتبر هكذا بمثابة جيروسكوب. ولا يمكن معرفة السبب الذي يجعل الموضع الزاوي لبعض محاور النفقه هذه يتغير دون غيرها من المحاور الأخرى إلا عند اكتشاف العوامل التي تحكم الزخم الزاوي للنفقه عند نقطة الإطلاق بالقرب من الثقب الأسود. ولم يتضح بعد ما إذا كان هذا هو محور دوران الثقب الأسود نفسه، أم مُتجه الزخم الزاوي للجزء الداخلي من القرص التراكمي،

وما يُفَاقِمُ هَذَا الْغَمْوُضُ بِالْتَّأكِيدِ تَأثِيرِ لِينْز-ثِيرِينِجُ أو تَأثِيرِ بَارْدِين-بِيترِسُون، الَّذِينَ ذَكَرُتُهُمَا فِي الْفَصْلَيْنِ الثَّالِثُ وَالسَّابِعُ عَلَى التَّرْتِيبِ، وَيَتَّسِعُ وُجُودُ مَزِيدٍ مِنَ الْبَيَانَاتِ لِتَفْسِيرِ السُّلُوكِ الْمَرْصُودِ تَفْسِيرًا تَامًّا. وَلَكِنْ ثَمَةُ خِيوطٍ إِرْشَادِيَّةٍ مِنْ أَجْسَامٍ أَصْغَرٍ أَقْرَبُ إِلَى كَوْكَبِ الْأَرْضِ رَبِّمَا تُشَيرُ إِلَى أَنَّ تَغْيِيرَ الْمَوْضِعِ الزَّاوِيِّ لِحَافِرِ النَّفَاثَاتِ يَرْتَبِطُ ارْتِبَاطًا تَامًّا بِالْزَّخْمِ الزَّاوِيِّ لِلْقُرْصِ التَّرَاكِميِّ.



شَكْلٌ ٤-٤: هَذِه صُورَةٌ مُلتَقطَةٌ بِالأشْعَةِ السِّينِيَّةِ وَتُظَهِّرُ الْبَنِيةَ الْمَزْدُوجَةَ لِالْفَصَوْصِ الَّتِي تَمَتدُّ عَبْرِ هَذِهِ الْمَجْرَةِ وَالَّتِي لَا يَمْكُنُ اكتِشافُهَا إِلَّا عِنْدِ الْأَطْوَالِ الْمَوْجِيَّةِ الْوَاقِعَةِ فِي نَطَاقِ الْأَشْعَةِ السِّينِيَّةِ.

## أشبه النجوم الميكروية

تُعدُّ أَشْبَاهُ النَّجُومِ الَّتِي نَاقَشَنَاها حَتَّى الْآنَ كُلُّهَا عِبَارَةٌ عَنْ ثَقُوبٍ سُودَاءَ فَائِقَةِ الْخَاصَّةِ تَقْعِدُ فِي مَراَكِزِ الْمَجَرَاتِ النَّشِطَةِ. وَلَكِنْ اتَّضَحَ وُجُودُ فَتَّةٍ أُخْرَى مِنَ الْأَجْسَامِ تَسْلِكُ سُلُوكًا مُشَابِهًا جَدًّا وَلَكِنْ عَلَى نَطَاقٍ أَصْغَرٍ بِكَثِيرٍ. وَيَمْكُنُ رَصْدُ هَذِهِ الثَّقُوبِ السُّودَاءِ ذَاتِ الْكَتْلَةِ الْأَقْلَى عِنْدَ مَسَافَاتٍ أَقْرَبُ إِلَى كَوْكَبِ الْأَرْضِ، بَلْ وَتَقْعِدُ دَاخِلَّ مَجْرَتِنَا درَبَ التَّبَانَةِ، وَيُطَلَّقُ عَلَيْهَا «أشبه النجوم الميكروية». وَمَعَ أَنَّ الْاخْتِلَافَ فِي الْحَجمِ هَائلٌ، إِنَّ كَلَّا مِنْ أَشْبَاهِ النَّجُومِ الميكروية الْمُوْجَودَةِ فِي مَجَرَّتِنَا وَالْمُوْجَودَةِ خَارِجَهَا عِنْدَ مَرَاكِزِ الْمَجَرَاتِ الْأُخْرَى

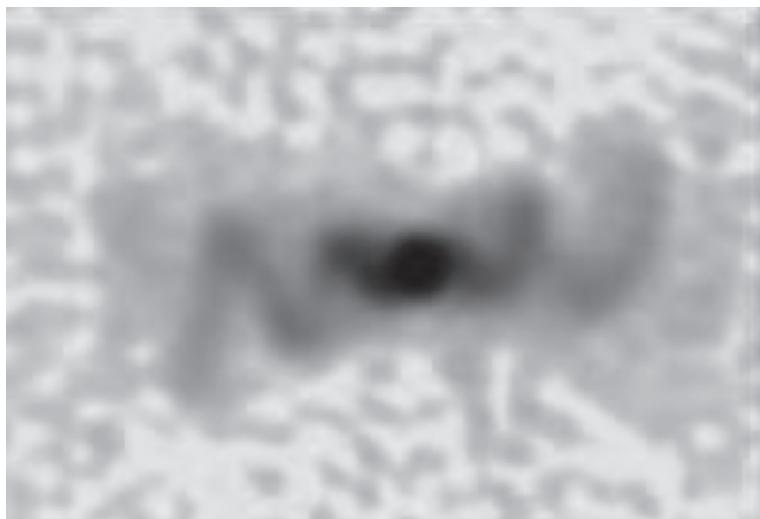
يُصدر نفاثاتٍ من البلازمَا ذات خصائص فيزيائية مُتشابهة. يعتقد أنَّ كلا النوعين يستمد الطاقة من سقوط المادة نحو ثقبٍ أسود تحت تأثير الجاذبية. وفي حالة أشباه النجوم العاديَّة، تكون كتلة الثقب الأسود مشابهةً لكتلة الشمس. أمَّا في حالة أشباه النجوم القوية الواقعة خارج المجرة، فيمكِن أن تكون كتلة ثقوبها السوداء أكبر من كتلة شمسنا بمائة مليون مرة. ويرى علماء الفيزياء الفلكية أنَّ إحدى الميزات المُهمَّة لأشباه النجوم المحلية الواقعة في مجرتنا تمثلُ في أنها أصغر كتلة ولذا تتَطَوَّر بسرعةٍ أكبر بكثيرٍ على نطاقاتٍ زمنية تُقدَّر بأيام بدلاً من ملايين السنين في حالة أشباه النجوم. لكنَّ النفاثات التي تتدفق خارجاً من على مقربةٍ من مركز النشاط كله تُطلق من خارج أفق الحدث، كما يحدث في حالة أشباه النجوم، ومن المرجح جدًا أنها تُطلق من أقرب حواف القرص التراكمي الداخليَّة إلى مركزه.

ثمة آليات مُعقدة تؤثر في هذه العمليات، ولا تُوجَد علامة بسيطة بين السرعة التي تُطلق بها النفاثة وكتلة الثقب الأسود الذي ترتبط به. ففي أثناء مراقبة النفاثات في شبه النجم الميكروي الذي يحيط بثقبٍ أسود ويُسمَّى «سيجنوس إكس-٣»، تَظَهُر حالاتٍ وُجد فيها أنَّ السرعات التي تتحرك بها نفاثات البلازمَا بعيداً عن الثقب الأسود تتباين. وقد قيس ذلك بقياساتٍ فلكية مُنتَداة الأزمنة تتضمنَ إجراء أرصادٍ عند أزمنة مُتنَاظرة، وهذه الأرصاد تُتيح تحديد مقدار سرعة انفاس نفاثة البلازمَا بعيداً عن مُحيط الثقب الأسود. وقد أظهرت هذه القياسات في إحدى المرات أنَّ سرعة النفاثة تساوي ٨١٪ من سرعة الضوء، في حين أنها وصلت بعد ذلك بأربع سنوات إلى ٦٧٪ من تلك السرعة. ولا يُوجَد ما يوحِي بأنَّ سرعة النفاثة تتناقص فقط مع مرور الوقت؛ لأنَّ تحرُّك النفاثة في شبه النجم الميكروي هذا بسرعاتٍ سريعة وسرعاتٍ أبطأً منذ اكتشافه قد شُهدَ في عددٍ من المرات. ويبدو أنَّ تباين سرعات النفاثة يُميِّز شبه نجمٍ ميكرويًّا آخر معروفاً جيداً في مجرتنا، يُسمَّى «إس إس ٤٣٣»، وسأصفه بمزيدٍ من التفصيل أدناه. ويبدو أنَّ سرعة النفاثة في شبه النجم الميكروي هذا تباين بدرجةٍ كبيرةٍ أيضاً، بل يمكن أن تساوي أي مقدار يتراوح بين ٢٠٪ و٣٠٪ من سرعة الضوء خلال أيام قليلة فقط.

## جمال التناظر

يُظهر شكل ٥-٨ صورة مُلتقطة بالأشعة الراديوية لشبه النجم «إس إس ٤٣٣»، الذي يقع في المجرة ويبعد عناً ١٨ ألف سنة ضوئية فقط. ويمثُل هذا النمط الافت الذي يمزج بين

نمطٌ مُتعرّجٌ وآخر لولبيٌ بنية نفاثات البلازمما كما تظهر لنا على مستوى السماء. تتحرك الشهُب المتفجرة المفردة من البلازمما التي تُكُون تلك النفاثات بسرعاتٍ هائلة تتراوح بين ٢٠٪ و ٣٠٪ من سرعة الضوء. وتتبادر محاور الاتجاهات التي تتحرك على طولها الشهُب المتفجرة مع مرور الزمن تباعًا دورياً باستمرايَّة ثابتة. وفي الواقع، فإنَّ الموضع الزاوي للمحور الذي تُطلق النفاثات على طوله يتغير بالطريقة نفسها التي يتغير بها الموضع الزاوي لمجادف قائد أحد قوارب الكاياك، في الإطار المرجعي لقارب الكاياك، باستثناء أنَّ ذلك يحدث على نطاقٍ زمنيٍ مُدته ستة أشهر بدلاً من عدة ثوانٍ. ويبدو أنَّ هذا السلوك نفسه يحدث في بعض أشباه النجوم على الأقل (انظر شكل ٣-٨)، وإن كان حدوثه في تلك الحالة يكون بحركةٍ بطيئة جدًا إلى حدٍ يُعِجزنا عنأخذ عيناتٍ زمنية مناسبة تُعبر عن مُدد التغيرات التي تحدث.



شكل ٥-٨: النفاثتان المنبعثتان من شبه النجم «إس إس ٤٣٣» كما تظهران عند أطوالٍ موجية راديوية.

ويعتمد المظاهر التفصيلي للنمط الذي يمزج بين نمطٍ مُتعرّجٌ وآخر لولبيٌ في السماء اعتماداً مباشراً على الحركات المادية للشهب المتفجرة، بالإضافة إلى الزمن الذي يُجرى عنده

الرصد. وتتمثل إحدى السمات اللافتة للنفاثات في تناقضها؛ فالحركات المادية للمكونات الموجودة في النفاثة الشرقية مساوية لتلك الموجودة في النفاثة الغربية ومُعاكسة لها؛ فعندما تكون سرعة أحد الشهب المتفجرة من البلازما ٢٨٪ من سرعة الضوء، تكون سرعة نظيره في النفاثة ذات الاتجاه المعاكس مساويةً لهذه القيمة أيضًا؛ وإذا كانت سرعة شهاب متفجر آخر من البلازما تساوي ٢٢٪ من سرعة الضوء، فستكون سرعة نظيره في النفاثة ذات الاتجاه المعاكس مساويةً لهذه القيمة أيضًا. وتتجذر الإشارة هنا إلى أنَّ ظهور إحدى النفاثتين ببنيةٍ مُتعرجة وظهور النفاثة الثانية بنمطٍ لولبي مختلف بعض الشيء يحدث نتيجةً أنَّ نفاثة البلازما دائمًا ما تتحرك بسرعاتٍ مقاربة لسرعة الضوء، وللارتفاعات النسبية المعروفة التي تحدث في مثل هذه الظروف. صحيح أنَّ الطاقة التي يُشعُّها شبه النجم الميكروي هذا متواضعة بعض الشيء مُقارنةً بالطاقة التي يُشعُّها أشباه النجوم الواقعة خارج المجرة، لكنها ما تزال هائلةً مُقارنة بطاقة الشمس التي تبدو ضئيلةً بعض الشيء؛ إذ يبلغ إجمالي شدة إضاءتها  $4 \times 2610$  وات فقط، وهذه القيمة أقل بمائة ألف مرة من شدة الإشعاع الذي يُصدره شبه النجم الميكروي الموضح في شكل ٥-٨.

## إطلاق النفاثات

يُمثل عنقود العذراء المجري عنقودًا مؤلِّفًا من أكثر بكثير من ألف مجرَّة تبعد أكثر من ٥٠ مليون سنة ضوئية عن مجرة درب التبانة. وتُوجَّد في قلبها مجرة عملاقة تُسمَّى «إم ٨٧» (اختصاراً لكلمة «مسييه ٨٧»)، وهي مُدرجة في القائمة التي أنشأها عالم الفلك الفرنسي تشارلز مسييه). ويُوجَّد في قلبها ثقب أسود فائق الضخامة ذو كتلةٍ تعادل كتلةً شمسينا ثلاثة مليارات مرة. وتنبعق من هذا الثقب نفاثةٌ مُستقيمة قوية، كما هو موضح في شكل ٦-٨.

يمكن رؤية هذه النفاثة بسهولة عند أطوالٍ موجية موجودة في نطاق الضوء المرئي، وأطوالٍ موجية في نطاق الموجات الراديوية وأطوالٍ موجية في نطاق الأشعة السينية. ويُظَّن أنَّ المادة المتساقطة تترافق بمعدلٍ كُلْيٍ يتراوح بين كتلتين شمسيتين وثلاث كتل شمسية سنويًا، على النواة الموجودة عند المركز بالضبط حيث يُوجَّد قرصٌ تراكميٌّ من النوع المذكور في الفصل السادس يؤثر في تلك العملية حسبما يعتقد. وتُعد السرعة التي تتحرك بها هذه النفاثة بعيدًا عن نقطة انطلاقها، التي تُوجَّد على الأرجح في أقرب منطقةٍ من مركز القرص التراكمي، قريبة جدًا من سرعة الضوء، ولذا توصف بأنها نفاثة نسبية. وقد



شكل ٦-٨: نفحة من البلازماء تتدفق خارجًا، بسرعاتٍ قريبة من سرعة الضوء، من الثقب الأسود الفائق الضخامة الموجود عند مركز مجرة «إم ٨٧».

كُشف عن سرعات النفاثات القريبة من سرعة الضوء من خلال المراقبة المتتالية باستخدام أداة مصغوفة الخط الأساسي الطويلة جدًا التي قدّمتها في الفصل السابع، وتلسكوب هابل الفضائي والأقمار الصناعية التابعة لمرصد تشاندرا للأشعة السينية؛ إذ يُوجَد كُلُّ من ذلك التلسكوب وهذا المرصد فوق الغلاف الجوي للأرض، ولذا يبلغان حساسية أعلى مما كانا سيبلغانها لو كانوا على سطح الأرض. وعلى بعد ٥٠ مليون سنة ضوئية من الأرض، فإنَّ الجسم الذي يتحرك بسرعة الضوء سيكون متربُّغاً عبر السماء بمعدل أربعة ميل ثوانٍ قوسية في السنة. وعندما يوضع في الحساب أنَّ الثانية القوسية تكافئ  $٣٦٠٠ / ١$  من الدرجة، فإنَّ جزءاً من أربعة آلاف منها قد تبدو زاوية بالغة الصغر يستحيل قياسها،

لكنَّ مثل هذه المسافات الدقيقة الفاصلة قابلة للاستيانة بسهولة باستخدام أداة مثل مصفوفة الخط الأساسي الطويلة جدًا. وتجدُ الإشارة هنا إلى أنَّ مصفوفة الخط الأساسي الطويلة جدًا قد تمكنت بالفعل من تصوير قاعدة هذه النفقـة حتى مسافةٍ تقع في نطاقٍ يبلغُ أقل من نصف قطر شفارتزشيلد ٣٠ مرة من ثقـها الأسود الفائق الضخامة.

يوضح شكل ٧-٨ مثلاً لفصوص وأعمدة ريشية الشكل من بلازما باعثة لإشعاع راديوي تُغذّيها النفاثـات النسبـية المنبعثـة من الثقب الأسود الفائق الضخامة في مجرة إمٌ.»

ولتسليط مزيدٍ من الضوء على مسألة أنَّ ثمة فصوصاً ممتدة مرتبطة بالنفاثـات النسبـية، يُظهر شكل ٨-٨ مثلاً يمتد ست درجات عبر السماء، وموضـح أنه يعطي فكرة عن الحجم بالنسبة إلى مصفوفة التلسكوبـات المستخدمة لإجراء الرصد. وكانت مصفوفة التلسكوبـات التي استخدمتها إيلان فين وزملاؤها هي مصفوفة التلسكوبـات المتقاربة في أستراليا.

صحيح أنَّ الآليـات التي تُسـير إطلاق النفاثـات النسبـية من المنطقة المحيطة بالثقب الأسود ما زالت أقربـ بكثيرـ إلى أن تكون مجرد تخمينـات من أن تكون حقيقةً مقبولة بما لا يدع مجالـاً للشك المنطقـي. ولكن يبدو أنَّ عـدة مـسارات بحـثـية مـُـسـتـقلـةـ، تـنـتـهـجـها فـرقـ مـسـتـقلـةـ تـامـاًـ تـسـقـرـ فيـ بلدـانـ مـخـتـلـفةـ فيـ أـنـحـاءـ الـعـالـمـ، تـشـيرـ ضـمـنـيـاًـ إلىـ أنـ أـغلـبـ الأـدـلـةـ تـرـجـحـ أنـ التـفـاصـيلـ الـأـسـاسـيـةـ النـاشـئـةـ صـحـيـحةـ. ولكنـ بـعـيدـاًـ عنـ الصـورـةـ العـامـةـ، فـالـآـلـيـاتـ وـكـيـفـيـةـ عـلـمـهـاـ المـفـصـلـةـ قـائـمـةـ عـلـىـ التـخـمـينـاتـ، لـكـنـهاـ تـخـتـبـرـ بـصـيرـ وـسـطـ عـدـمـ كـفـاـيـةـ الـفـوـتوـنـاتـ وـتـأـثـيرـاتـ التـحـيـزـ الـانـتـقـائـيـ. لـاـ تـنـتـمـيـ الإـثـبـاتـاتـ إـلـىـ الـعـلـمـ لـكـنـ الـأـدـلـةـ تـنـتـمـيـ إـلـيـهـ بـدـرـجـةـ كـبـيرـةـ. وـمـاـ يـعـوقـنـاـ مـسـأـلـةـ أـنـهـ حـتـىـ التـقـنـيـاتـ الـأـكـثـرـ تـقـدـمـاـ بـيـنـ تـقـيـاـتـ الـتـصـوـيـرـ الـمـسـتـخدـمـةـ حـالـيـاـ لـاـ تـسـتـطـعـ تـميـزـ أـصـغـرـ المـنـاطـقـ الـتـيـ يـطـلـقـ عـنـهـاـ عـمـعـظـمـ الطـاقـةـ، وـتـوـضـيـحـهـاـ باـسـتـيـانـةـ كـافـيـةـ، وـلـكـنـ هـذـهـ هـيـ الـحـالـةـ الـذـيـ يـمـكـنـ فـيهـاـ أـنـ تـجاـوزـ الـمـحاـكـاةـ الـعـدـديـةـ عـلـىـ الـحـوـاسـيـبـ الـقـوـيـةـ قـيـودـ الـتـكـنـوـلـوـجـيـاـ الـحـالـيـةـ. وـفـيـ الـوـاقـعـ، تـنـتـشـرـ لـلـتوـنـتـاجـ منـ عـمـلـيـاتـ لـمـحاـكـاةـ إـلـاـقـ الـنـفـاثـاتـ منـ الـأـقـراـصـ الـتـرـاكـمـيـةـ تـفـسـرـ تـأـثـيرـاتـ النـسـبـيـةـ الـعـامـةـ تـفـسـيـرـاـ تـامـاـ. وـتـسـمـحـ عـمـلـيـاتـ الـمـحاـكـاةـ هـذـهـ، مـعـ عـنـاصـرـ إـدـخـالـ وـمـسـلـمـاتـ مـعـروـفـةـ، بـتـطـوـرـ الـنـفـاثـاتـ وـالـأـقـراـصـ إـلـىـ نـطـاقـاتـ مـعـنـيـةـ مـنـ الـأـحـجـامـ يـمـكـنـ عـنـهـاـ مـقـارـنـةـ خـصـائـصـهاـ بـالـخـصـائـصـ الـوـارـدـةـ فـيـ أـحـدـ عـمـلـيـاتـ الرـصدـ.

## الثقوب السوداء



شكل ٧-٨: الفصوص الباعثة للإشعاع الراديوي التي تغذيها النفاثات النسبية المنبعثة من الثقب الأسود الفائق الضخامة الموجود عند مركز مجرة «إم ٨٧».

فما الذي نعرفه الآن عن كُتل الثقوب السوداء في الكون إذن؟ يبدو أنها تندرج تحت فئتين رئيسيتين. أولاهما تضم تلك التي لها كُتل مُقاربة لكتل النجوم. وتساوي كتلة هذه الثقوب السوداء ذات الكتلة النجمية مقداراً يتراوح بين ثلات كتل شمسية وثلاثين كتلة شمسية، وهي تتولّد من نجوم أحرقَ كل وقودها.



شكل ٨-٨: صورة مركبة تُظهر صورةً بصريةً للقمر ومصغوفة التلسكوبات المتقاربة في أستراليا، وصورة راديوية لمجرة «قططوس أ».

ثم تأتي فئة الثقوب السوداء الفائقة الضخامة التي تصِل كتلتها إلى نحو ١٠ مليارات كتلة شمسية. وكما ذُكر، تُوجَد هذه النوعية في مراكز المجرات، بما فيها مجرتنا، وتُسبِّب الظواهر غير العاديَّة في المجرات النشطة وأشباه النجوم.

تحدَّثنا عن سقوط الأشياء في ثقب أسود، ولكن ماذا يحدُث عند سقوط ثقب أسود في ثقب أسود؟ هذا ليس سؤالاً مجرداً، لأنَّه من المعروف أنَّ الكون يُمكِن أن يشهد وجود أنظمة ثنائية من ثقبين أسودين. ويُوجَد في مثل هذه الأنظمة ثقبان أسودان يدور كلُّ

منهما في مدارٍ حول الآخر. ويُعتقد، بسبب انبعاث الإشعاع القائم على موجات الجاذبية، أنَّ كلاً الثقبَين الأسودَين في تلك الأنظمة الثنائيَّة سيبداً في فقدان الطاقة والدوران في مدار حلزوني نحو الداخل إلى أن يسقط داخل الثقب الأسود الآخر. وفي المراحل الأخيرة من هذا الدوران في مسار حلزوني، تدفع النسبيَّة العامَّة إلى نقطة الانهيار، ويندمج الثقبان فجأة ليكُونا ثقباً أسوداً واحداً ذا أفقٍ حدِيثٍ مُشترك. وتُعد كمية الطاقة التي تُطلق في اندماج ثقبَيْن أسودَيْن فائقيَّ الضخامة في نظامٍ ثنائيٍ مُذهلة، ومن المحتَمل أن تكون أكبر من طاقة كل الضوء في كل النجوم في الكون المُرئي. يتحوَّل معظم هذه الطاقة إلى موجات جاذبية، أي تموجات في انحناء نسيج الزمكان، تنتقل عبر الكون بسرعة الضوء. وجارٌ البحث عن أدلة على هذه الموجات. الفكرة أنَّه عندما تمر إحدى موجات الجاذبية بجسمٍ ماديٍّ، كقضيبٍ طويل مثلاً، يزيد طوله وينقص بدرجةٍ طفيفةٍ بينما تتدفق عبره التموجات في انحناء نسيج الزمكان. وإذا أمكن قياس هذه التغييرات البالغة الصغر في الطول، باستخدام تقنيةٍ كقياس التداخل بالليزر، تُتاح بذلك طريقة لاكتشاف موجات جاذبية متولدة في مكان آخر من الكون. وتتَسَم كلُّ من الأجهزة الأرضية والفضائية المستخدمة في الكشف عن موجات الجاذبية – وهي أجهزةٌ أُنشئت أمثلة لها بالفعل ويعتمد إنشاء المزيد منها – بالقدرة على التقاط إشاراتٍ من اندماجات الثقوب السوداء. وفي الواقع، فإن اكتشاف موجات الجاذبية صعبٌ جدًا إلى حدٍ يُحتمَ وجود مصدرٍ قويٍ جدًا كي تسنح أي فرصة لنجاح مثل هذه التجارب، ويعُد اندماج الثقوب السوداء من أبرز المصادر المرشحة ليكون واحداً من هذه المصادر القوية. وحتى وقت تأليف هذا الكتاب، لم يُكتشَف أيٌّ من موجات الجاذبية اكتشافاً مباشراً بعد، لكنَّ التجارب مستمرة. صمدَت صحة أفضل نظرياتنا عن الجاذبية، المستمدَة من نظرية النسبيَّة العامَّة التي وضعها أينشتاين، أمام اختباراتٍ لا حصر لها منذ اكتشافها في عام ١٩١٥. فقد اتضح أنها تتفق مع التجارب اتفاقاً أفضل بكثيرٍ من نظرية نيوتن التي حلَّ محلها. ولكن إذا كان سُيمكِن على الإطلاق أن تُختبر نظرية النسبيَّة العامَّة حتى أقصى حدود صمودها، فلَمَّا أن تتوَقَّعوا بكل ثقةٍ أنَّ الثقوب السوداء ستثبت أنها أصعب اختبارٍ لصحة هذه النظرية التي تُعدُّ من أركان الفيزياء الحديثة. فالحالات التي تكون فيها الجاذبية عند أشدَّ مستوياتها في أصغر حيزٍ في الفضاء، بحيث يفترض أن تكون التأثيرات الكميَّة مهمَّة، هي بالضبط الحالات التي قد تنهار فيها النسبيَّة العامَّة. ولكن ربما تنهار النسبيَّة

العامة على نطاقاتٍ كبيرة في الكون أيضاً. فمن الموضوعات التي يكُثر النقاش بشأنها بالطبع مسألة كمال النسبية العامة لشرح التوسيع المتسارع للكون على أكبر النطاقات. إذ تدور نقاشاتٌ حول انحرافاتٍ محتملة عن النسبية العامة فيما يتعلق بالتوسيع المتسارع والطاقة المظلمة. وإذا كُشف عن موجات الجاذبية من اندماجات الثقوب السوداء، أو إذا عَمِّقت عمليات الرصد فَهَمَنَا للظواهر والعمليات الفيزيائية الأساسية التي تحدث في المنطقة المحيطة بهذه الأجسام الرائعة، فستكون هناك فرصة جيدة لأن نتمكن من معرفة إلى أيٍّ مدى تظل نظرية أينشتاين صحيحة، أو ما إذا كان يلزم الاستغناء عنها واللجوء إلى نظريةٍ جديدة بديلة.

### لماذا ندرس الثقوب السوداء؟

تستند دراسة الثقوب السوداء إلى عدة أسباب: أحدها أنها تُتيح استكشاف فضاءٍ من المقاييس الفيزيائية المحددة سيكون الوصول إليه بطريقةٍ أخرى مستحيلًا حتى وإن سُخِرت لذلك ميزانيات اتحاد دولي. إذ تمثل أنظمة الثقوب السوداء أشدّ البيئات التي يمكننا استكشافها تطرفاً، وبذلك فنحن نستكشف أشد الظواهر المتطرفة في الفيزياء. وتجمع تلك الثقوب السوداء بين النسبية العامة والفيزياء الكمية اللتين لم يتحقق توحيدهما معًا بعد، وما زال بمثابة حدٍ مُقيِّدٍ في الفيزياء لا يمكن تجاوزه. وثاني الأسباب أنَّ محاولة فهم ظواهر الثقوب السوداء تثير انبهاراً لدى العلماء والكثير من الأشخاص العاديِّين المتأمِّلين، وتُتيح طريقةٍ يمكن بها تحفيز الكثيرين بالعلم وتحمُّلهم على معرفة عظمة الكون الهائلة من حولنا. ويتمثل سبب ثالث، وربما يكون مفاجأةً، في التأثيرات الفرعية التي تلحق بكوكب الأرض. فكيف يمكن أن تُغيِّر الأبحاث التي تدرس الثقوب السوداء حياتنا يا تُرى؟ الإجابة أنها غيرتها بالفعل. فبينما أكتب هذه الجمل الأخيرة من هذا الكتاب الصغير على حاسوبِي محمول، يُنشئ في نفس الوقت نسخةً احتياطيةً من عملي على خادم الجامعة الخاص بي عبر بروتوكول ٨٠٢١١ الخاص بالاتصال اللاسلكي بالإنترنت. وهذه التكنولوجيا المعقدة الذكية انبثقت مباشرةً من بحثٍ عن أثرٍ مُعيَّن، عند أطوالٍ موجية راديوية، لثقوب سوداء متفجرة، وكان هذا البحث قد أجري بقيادة رون إيكرز لاختبار نموذج اقتربه مارتن ريس (الذي صار الآن عضواً في مجلس اللوردات وصاحب منصب الفلكي الملكي). وقد أدرك بعض المهندسين العباقة المتخصصين في الأنظمة الراديوية في أستراليا، بقيادة جون أوسوليفان، في أثناء ابتکار خوارزميات للكبح

التدخل سعياً إلى إنجاز المهمة الصعبة المتمثلة في اكتشاف الإشارات الدقيقة من الفضاء البعيد، لأنَّ تلك الخوارزميات يمكن تطبيقُها على تحويل الاتصالات هنا على كوكب الأرض. وهكذا فإنَّ الثقوب السوداء لديها القدرة على إعادة صياغة الفيزياء وتنشيط خيالنا بل وإحداث طفراتٍ ثورية في تقنياتنا. أي إنَّ الثقوب السوداء لها تأثيرات فرعية كثيرة — تتجاوز مناطق أفق الحدث المحيطة بها بمسافة بعيدة.

## قراءات إضافية

- M. Begelman and M. Rees, *Gravity's Fatal Attraction*, 2nd ed. (Cambridge University Press, 2010).
- J. Binney, *Astrophysics: A Very Short Introduction* (Oxford University Press, 2015).
- J. B. Hartle, *Gravity* (Addison Wesley, 2003).
- A. King, *Stars: A Very Short Introduction* (Oxford University Press, 2012).
- A. Liddle, *An Introduction to Modern Cosmology*, 3rd edn. (Wiley-Blackwell, 2015).
- F. Melia, *The Galactic Supermassive Black Hole* (Princeton University Press, 2007).
- D. Raine and E. Thomas, *Black Holes: An Introduction*, 2nd edn. (Imperial College Press, 2010).
- C. Scarf, *Gravity's Engines: How Bubble-Blowing Black Holes Rule Galaxies, Stars, and Life in the Cosmos* (Scientific American/Farrar, Straus and Giroux; Reprint edition, 2013).
- R. Stannard, *Relativity: A Very Short Introduction* (Oxford University Press, 2008).
- A. Steane, *The Wonderful World of Relativity: A Precise Guide for the General Reader* (Oxford University Press, 2011).
- K. Thorne, *Black Holes and Time Warps* (W. W. Norton, 1994).



