مقدمة قصيرة جدًّا

كاثرين بلاندل

الثقوب السوداء

ترجمة أحمد سمير درويش

الثقوب السوداء

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
كاثرين بلاندل

ترجمة
أحمد سمير درويش

مراجعة
هاني فتحي سليمان

هنـــداوي

الثقوب السوداء

Black Holes

كاثرين بلاندل

Katherine Blundell

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شيبت ستريت، ويندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٨ ٢٨٧٧ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

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

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

إلى تيم ولويز ساندرز، مع خالص حبي.

شكر وتقدير

أُعبِّر عن شكري الحار لفيليب ألكوك، وراسل ألكوك، وستيفن بالبس، وروجر بلاندفورد، وستيفن بلاندل، وستيفن جستام، وتوم لانكستر، ولاثا مينون، وجون ميلر، وبول تود على تعليقاتهم المفيدة الكثيرة على مُسوَّدات هذا الكتاب، وستيفن بلاندل على إعداد المخططات البيانية، وستيفن لي على المساعدة التي قدَّمها فيما يخصُّ الأرصاد البصرية.

كيه إم بي
أكسفورد
أبريل ٢٠١٥

الفصل الأول

ما الثقب الأسود؟

الثقب الأسود مكانٌ في الفضاء تكون فيه قوة الجاذبية شديدة جدًّا لدرجة أن لا شيء، ولا حتى الضوء، يستطيع التحرُّك 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 بالمئات، ويُقدَّر عدد الثقوب السوداء التي يتوقَّعون وجودها بالملايين. صحيحٌ أنَّ هذه الثقوب غير مرئية، لكنَّها تتفاعل مع الوسط المحيط بها تفاعُلًا يُمكن أن يكون ملحوظًا جدًّا، وبذلك يُمكن أن تؤثر فيه. وتعتمد ماهية طبيعة هذا التفاعُل بالضبط على درجة القُرب بالنسبة إلى الثقب الأسود؛ صحيح أنَّ ما يكون قريبًا منه للغاية يقع في قبضته لا محالة، ولكن عند مسافاتٍ أبعد، ستنشأ بعض الظواهر المثيرة والمذهلة.

وتجدُر الإشارة إلى أنَّ أول مرة ذُكر فيها مصطلح «الثقب الأسود» منشورًا، كانت في مقالة بقلم آن إوينج في عام ١٩٦٤ أوردَت فيها تقريرًا عن ندوة عُقِدت في تكساس في عام ١٩٦٣، مع أنها لم تذكر قَطُّ مَن الذي صاغ المصطلح. وفي عام ١٩٦٧، احتاج الفيزيائي الأمريكي جون ويلر إلى اختصار لعبارة «نجم منهار تمامًا بفعلِ الجاذبية» وبدأ ينشر المصطلح ويُعمِّمه، مع أنَّ مفهوم النجم المنهار ابتكره مواطناه الأمريكيان روبرت أوبنهايمر وهارتلاند سنايدر قبل ذلك بكثيرٍ وتحديدًا في عام ١٩٣٩. بل إنَّ الأسس الرياضية للتصوُّر العصري عن الثقوب السوداء بدأت قبل ذلك بكثير، تحديدًا في عام ١٩١٥، حين حلَّ الفيزيائي الألماني كارل شفارتزشيلد بعض المعادلات المهمَّة التي وضعها أينشتاين (والمعروفة باسم معادلات المجال في نظريته العامة للنسبية) مُطبِّقًا إيَّاها على كتلةٍ معزولة في الفضاء لا تدور.

وبعد ذلك بعَقدَين في المملكة المتحدة، قبل وقتٍ قصير من عملِ أوبنهايمر وسنايدر، كان السير آرثر إدينجتون قد أجرى بعض الحسابات الرياضية ذات الصِّلة في سياق بحثٍ استقصائي أجراه الفيزيائي الهندي سوبرامنيان شاندراسيخار عن مصير النجوم حين تَفنى. وقد أعلن إدينجتون نفسُه، أمام الجمعية الفلكية الملكية في عام ١٩٣٥، أنَّ النتائج الفيزيائية لحساباته، أي انهيار النجوم الضخمة عندما تستنفد كل وقودها لتُكوِّن ثقوبًا سوداء، «مُضحِكة ومُنافية للمنطق». ومع أنَّ الفكرة تبدو مضحكة وغير منطقية، فمن المؤكد أنَّ الثقوب السوداء جزء من الواقع المادي في كل أنحاء المجرة وعَبر الكون. وقد أحرز ديفيد فينكلشتاين في عام ١٩٥٨ مزيدًا من التقدُّم في هذا الشأن في الولايات المتحدة؛ إذ برهن على وجود سطحٍ أحادي الجانب يُحيط بثقب أسود، وهذا السطح سيكون مهمًّا 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. ولاستِهلال الطريق نحوَ فهم الكيفية التي قد ينشأ بها هذا السلوك، نحتاج أولًا إلى فهم سمةٍ عميقة من سمات العالم المادي؛ وهي وجود سرعةٍ قُصوى لا يُمكن أن يتجاوزها أي جُسَيم أو أي جسم.

ما مدى سرعة الأشياء السريعة؟

ينصُّ أحد قوانين الغاب على أنك إذا أردتَ الهروبَ من حيوانٍ مفترس، فعليك الركض بسرعة. فإذا لم يكن لدَيك مكر خارق أو تمويهٌ استثنائي، فلن تنجوَ إلا إذا كنتَ سريعًا. والسرعة القصوى التي تستطيع الثدييات أن تهرب بها من الأخطار تعتمِد على علاقاتٍ كيميائية حيوية مُعقدة بين الكتلة والقوة العضلية والأيض. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ السرعة القصوى التي يُمكن أن يتحرك بها أسرع شيءٍ في الكون هي تلك التي تظهر عند جُسيمات عديمة الكتلة تمامًا، مثل جسيمات الضوء (المعروفة بالفوتونات). ويبلُغ المقدار الدقيق لهذه السرعة القصوى ٢٩٩٧٩٢٤٥٨ 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 بسرعةِ الضوء، فسيُمكنني السفر من منزلي في المملكة المتحدة إلى أستراليا في جزءٍ مقداره واحد على ١٤ من الثانية، أي في لمح البصر تقريبًا. إذ يستغرق الضوء القادم من أقرب نجم إلينا، الشمس، ثماني دقائق فقط ليصِل إلينا. أمَّا إذا كان الفوتون قادمًا إلينا من أبعد كوكبٍ عنَّا، أي نبتون، فسيستغرق بضع ساعاتٍ فقط. وهكذا نقول إنَّ الشمس على بُعد ثماني دقائق ضوئية من الأرض، وإنَّ نبتون على بُعد بضع ساعات ضوئية منا.

ويترتب على هذا نتيجة مُثيرة للاهتمام مفادها أنه إذا لم تُشرق الشمس أو تَحوَّل لون نبتون إلى الأرجواني فجأة، فلن يتمكن أيُّ شخصٍ على الأرض من معرفة هذه المعلومة المهمة قبل ثماني دقائق أو بضع ساعات على الترتيب.

ولنتأمَّل الآن مدى السرعة التي يُمكن أن يتحرك بها الضوء وصولًا إلى الأرض من نقاط أبعد بكثير جدًّا في الفضاء. إذ يبلُغ عَرض مجرة درب التبانة، التي تقع فيها مجموعتنا الشمسية، 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 المجرِّي هو أقرب عنقودٍ مجرِّي إلى العنقود المجرِّي المحلي (الذي تُعَد مجرة درب التبانة جزءًا مهمًّا منه) ويبعد عنَّا مئات الملايين من السنين الضوئية. ومن ثَمَّ، فإذا كان يُوجَد راصدٌ على كوكب يدور حول نجمٍ في مجرةٍ واقعة ضِمن عنقود فورنكس ينظر إلى الأرض الآن، وكان مزودًا بالأدوات والمعدات المناسبة، فإنه قد يرى ديناصورات تمشي مُتثاقِلة على كوكب الأرض. غير أنَّ ما يجعل حركة الضوء تبدو بطيئة وتستغرق وقتًا طويلًا هو اتِّساع الكون الشاسع المذهل ليس إلَّا. ويُصبح لدورِ سرعة الضوء بصفتها حدًّا أقصى إجباريًّا تأثيرٌ شائق عندما نبدأ التفكير في كيفية إطلاق الصواريخ إلى الفضاء.

سرعة الهروب

إذا كنا نرغب في إطلاق صاروخ إلى الفضاء ولكن كانت سرعة إطلاقه أبطأ من اللازم، فلن يكون لدى الصاروخ قدرٌ كافٍ من طاقة الحركة ليُفلِت من مجال جاذبية الأرض. ولكن إذا كان الصاروخ لدَيه سرعة كافية بالكاد للهروب من جاذبية الأرض، فإننا نقول إنه وصل إلى سرعة الهروب الخاصة به. وتجدُر الإشارة إلى أنَّ سرعة هروب صاروخ من جسمٍ ضخم، ككوكب مثلًا، تزداد كلَّما كانت كتلة الكوكب أكبر وكلَّما كان الصاروخ أقرب إلى مركز كتلة الكوكب. إذ تُصاغ معادلة سرعة الهروب في الشكل $v_{esc} = \sqrt{2GM/R}$ حيث يرمز M إلى كتلة الكوكب وR إلى المسافة الفاصلة بين الصاروخ ومركز كتلة الكوكب، وG إلى أحد ثوابت الطبيعة الذي يُعرف باسم ثابت الجاذبية لنيوتن. ودائمًا ما يُحاول تأثير قوى الجاذبية جذب الصاروخ ناحية مركز الكوكب أو النجم المعني، صوب نقطة تُعرف باسم مركز الكتلة. غير أنَّ قيمة سرعة الهروب غير مُعتمِدة إطلاقًا على كتلة الصاروخ. وبذلك فإنَّ سرعة هروب صاروخ منطلق من قاعدة «كيب كانافيرال»، الواقعة على بُعد حوالي ٦٤٠٠كم من مركز كتلة كوكب الأرض، لا تتغير قيمتُها، التي تزيد قليلًا على ١١كم/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 استطَعْنا تقليص كتلة كوكب الأرض بالكامل بحيث تشغل حجمًا أصغر بكثير. ولنقُل إنَّ نصف قطرها أصبح ربع قيمتِه الحالية. إذا أُطلِق صاروخ من على بُعد ٦٤٠٠كم من مركز الكتلة، فستظلُّ قيمة سرعة الهروب الخاصة به كما هي. ولكن إذا نُقِل موضعه إلى سطح الأرض المتقلِّصة الجديد ليُصبح بذلك على بُعد ١٦٠٠ كيلومتر من مركزها، فستُصبح سرعة الهروب ضعف قيمتها الأصلية.

لنفترض الآن أنَّ كارثةً قد وقعت وجعلت كتلة الأرض كلها تتقلَّص إلى نقطةٍ واحدة ليس لها أي مساحةٍ مكانية إطلاقًا. نُسمِّي هذا الشيء نقطة التفرُّد. إذ أصبح الآن «كتلةً نقطية»، أي جسمًا ضخمًا يشغل حيزًا صفريًّا من الفراغ. على بُعد مسافةٍ قصيرة جدًّا، مقدارها متر واحد فقط، من نقطة التفرُّد هذه، ستكون سرعة الهروب أكبر بكثيرٍ مما كانت عليه عند ١٦٠٠ كيلومتر (وفي الواقع ستكون نحو ١٠٪ من سرعة الضوء). وبالاقتراب أكثرَ فأكثر من نقطة التفرُّد، إلى أن تُصبح المسافة الفاصلة أقلَّ من سنتيمترٍ واحد، ستُصبح سرعة الهروب مساويةً لسرعة الضوء. عند هذه المسافة، لن يكون الضوء نفسه سريعًا كفايةً للهروب من قوة الشدِّ هذه الناتجة عن الجاذبية. هذه هي الفكرة الأساسية لفهم آلية الثقوب السوداء.

يَجدُر هنا توضيح استخدام كلمة «نقطة التفرُّد». فنحن لا نعتقد أنَّ استمرار الانهيار بفعلِ قوى الجاذبية سيئول في النهاية إلى نقطةٍ بالمعنى الهندسي للكلمة، لكنَّ نظريتنا الكلاسيكية الخاصة بالجاذبية هي التي تنهار، وبذلك ندخل نظامًا كميًّا. ومن الآن فصاعدًا، سنستخدِم مصطلح نقطة التفرُّد للإشارة إلى هذه الحالة الفائقة الكثافة.

أُفق الحدث

تخيل الآن أنك رائد فضاءٍ تقود مركبةً فضائية، وأنك تقترِب من نقطة التفرُّد هذه. ما دُمتَ بعيدًا عنها، تستطيع أن تعكس اتجاه مركبتك وتتراجَع مُبتعدًا عنها. ولكن كلما اقتربتَ منها، صار من الأصعب أن تتراجع بالشكل اللائق. وفي النهاية تصل إلى مسافةٍ قريبة منه يستحيل عندها الهروب، بغض النظر عن مدى قوة المحركات الموجودة على متن مركبتك. وهذا لأنك وصلتَ إلى أفق الحدث، وهو سطح كروي له تعريفٌ رياضي، ويُعرَّف بأنَّه الحد الذي تُصبِح سرعة الهروب داخله أكبر من سرعة الضوء. وفي حالة التصوُّر الافتراضي الذي

تخيَّلنا فيه أنَّ الأرض قد انهارت وتقلَّصت إلى نقطةٍ واحدة، فإن هذا السطح سيكون كرةً يبلغ نصف قطرها سنتيمترًا واحدًا فقط وتتضمن نقطة التفرُّد عند مركزها؛ وبذلك ربما يكون من السهل جدًّا على مركباتنا الفضائية أن تتجنَّبه. غير أنَّ أفق الحدث يُصبح أكبر بكثيرٍ عندما يتكوَّن الثقب الأسود من نجمٍ منهار وليس من كوكبٍ منهار. ويتَّسِم أفق الحدث بأنَّ له تأثيرًا فيزيائيًّا مهمًّا؛ فإذا كنتَ على هذا السطح أو داخل حدوده، فإنَّ قوانين الفيزياء ببساطة لن تسمح لك بالهروب منه لأنَّ فعل ذلك سيستلزِم كسْر حدِّ السرعة القصوى الكوني. أي إن أفق الحدث مستوًى إلزاميٌّ من مستويات ترسيم الحدود: خارجَه يكون لك الحرية في تحديد مصيرك؛ أمَّا إذا أصبحتَ بداخله، فسيبقى مُستقبلك عالقًا داخلَه إلى الأبد.

سُمِّي نصف قطر هذا السطح الكروي تكريمًا لكارل شفارتزشيلد، الذي ذُكِر سلفًا. فعندما كان شفارتزشيلد جنديًّا في الحرب العالمية الأولى، قدَّم أول الحلول الدقيقة لمعادلات المجال الشهيرة التي وضعَها لأينشتاين والتي تُمثِّل أساس النسبية العامة. وتُكتَب الصيغة الرياضية لنصف قطر شفارتزشيلد بالشكل $R_s = 2GM/c^2$ حيث يرمز M إلى كتلة الثقب الأسود، ويرمز G إلى ثابت الجاذبية لنيوتن، وG إلى سرعة الضوء. وباستخدام هذه الصيغة، يُصبح نصف قطر شفارتزشيلد الخاص بالأرض أقلَّ بقليلٍ من سنتيمتر واحد. وبالمثل، فإن نصف قطر شفارتزشيلد الخاص بالشمس يصير ثلاثة كيلومترات؛ ما يعني أنه إذا أمكن سحق كتلة شمسِنا كلها لتُصبح نقطة تفرُّد واحدة، فستكون سرعة الهروب عندئذٍ مساويةً لسرعة الضوء على بُعد ثلاثة كيلومترات فقط من هذه النقطة. وأيُّ ثقبٍ أسود كتلته أكبر مليار مرة من كتلة الشمس (أي تساوي ٩١٠ كُتَلٍ شمسية) سيكون نصف قطر شفارتزشيلد الخاص به أكبر مليار مرة (فنصف قطر شفارتزشيلد الخاص بكتلةٍ نقطية لا تدور يتناسَب تناسبًا طرديًّا مع كتلتها). وكما أستعرضُ في الفصل السادس، يُعتَقَد أنَّ مثل هذه الثقوب السوداء الضخمة موجودة في مراكز العديد من المجرات.

يُمكن أن يكون من المنطقي تأمُّل هذا الوصفِ لأفق الحدث في إطار فيزياء نيوتن. بل إنَّ بعض العلماء القُدامى تخيلوا كياناتٍ فيزيائيةً شبيهة بالثقوب السوداء قبل قرونٍ من أن يُغير أينشتاين وآخرون فَهمنا للمكان والزمان تغييرًا عميقًا. وأبرز المفكِّرين الذين تخيلوا «نجومًا سوداء» شبيهةً بالثقوب السوداء كانوا جون ميشيل وبيير-سيمون لابلاس، اللذَين بدآ أبحاثهما قديمًا في القرن الثامن عشر، وسأشرح الآن ما فعلاه.

إحدى الميزات اللافتة في علم الفلك كثرة الأشياء التي يُمكن أن تكتشِفها عن الكون حتى وأنت عالق هنا على كوكب الأرض. فعلى سبيل المثال، لم يزُر الشمسَ أيُّ إنسانٍ قط،

ولكن اكتُشِف وجود الهيليوم في الشمس في أواخر القرن التاسع عشر بتحليل طيف ضوء الشمس. وهذا لافتٌ جدًّا، لا سيما أنَّه شكَّل أساسَ اكتشاف عنصر الهيليوم نفسه؛ إذ عُثر عليه في الشمس قبل وقتٍ طويل من اكتشافه على كوكب الأرض. وحتى قبل ذلك، في القرن الثامن عشر، بدأت تُصاغ بعض الأفكار الكامنة وراء مفهوم الثقوب السوداء، وبالأخصِّ فكرة ما يُسمَّى بالنجم المظلم. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ أول شخصٍ وثب هذه الوثبة التخيُّلية الأولى كان مُتأثرًا جدًّا بعصره الذي عاش فيه بكل تأكيد.

جون ميشيل

كان العصر الجورجي، في إنجلترا، يتَّسِم بسلامٍ نِسبي. كانت الحرب الأهلية الإنجليزية قد وضعت أوزارها منذ زمنٍ بعيد، وأصبحت إنجلترا أرضًا يسودها هدوءٌ محلي نِسبي (كان صعود فرنسا النابليونية ما يزال غيبًا في المستقبل البعيد آنذاك). تلقَّى القس المبجل جون ميشيل (شكل ١-١)، مثل والده من قبله، تعليمًا جامعيًّا والتحق بكنيسة إنجلترا. وبينما كان يشغل منصب مسئول أبرشية في كنيسة ثورنهيل، غرب يوركشاير، استطاع مواصلة أبحاثه العلمية، ومتابعة اهتماماته في الجيولوجيا والمغناطيسية والجاذبية والضوء وعلم الفلك. وعلى غرار العلماء الآخرين العامِلين في إنجلترا آنذاك، مثل عالم الفلك ويليام هيرشل والفيزيائي هنري كافنديش (الذي كان صديقًا شخصيًّا له)، استطاع ميشيل أن يستفيد من زخَم الفِكر النيوتني الجديد. فقد كان السير إسحاق نيوتن قد أحدَث ثورةً في الكيفية التي كان يُنظَر بها إلى الكون، وصاغ قانون الجاذبية الخاص به الذي فسَّر وجود مدارات الكواكب في المجموعة الشمسية على أنها ناتجة من القوة نفسها التي تسبَّبَت في سقوط تفاحته الشهيرة من الشجرة.

أتاحت أفكار نيوتن دراسة الكون باستخدام الرياضيات، واستطاع هذا الجيل الجديد من العلماء نشْر هذه النظرة الجديدة إلى العالم في مجالاتٍ مختلفة. كان ميشيل مُهتمًّا على وجه الخصوص باستخدام التفكير النيوتني لتقدير المسافة إلى النجوم القريبة باستخدام قياسات الضوء الذي ينبعث منها. وتَفتَّق ذهنُه عن مُخطَّطات مختلفة لفعل ذلك، بربط سطوع النجم بلَونه؛ وكذلك دَرَس النجوم الثنائية (أزواج من النجوم مُرتبطة ببعضها بفعلِ قوة الجاذبية) وكيف يمكن أن تُقدِّم حركاتها المدارية معلوماتٍ مُفيدة مُتجددة باستمرار. وعكَف ميشيل أيضًا على دراسة كيفية مَيل النجوم إلى التجمُّع مكوِّنةً عناقيد في مناطقَ مُعينة من السماء، واختبر ذلك مقابل توزيع عشوائي واستنتج تكوُّن العناقيد بفعلِ

شكل ١-١: جون ميشيل، الشخصية الموسوعية.

الجاذبية. لم تكن أي فكرةٍ من هذه الأفكار عمليةً آنذاك؛ فالنجوم الثنائية المعروفة كانت قليلة (مع أنَّ هيرشل كان يؤلِّف بعض القوائم الباهرة التي تضمُّ كثيرًا من النجوم المزدوجة والأجسام الجديدة)، واتضح أنَّ العَلاقة بين سطوع النجم ولونِه لم تكن كما حسبها ميشيل تمامًا. غير أنَّ ميشيل كان يبذل قُصارى جهده لكي يُقدِّم للكون الأوسع ما قدَّمه نيوتن للمجموعة الشمسية؛ وهو أن يُتيح تحليل الأرصاد تحليلًا علميًّا وعقلانيًّا ومتجددًا باستمرار لتقديم معلوماتٍ جديدة عن خصائص الأجرام السماوية وكتلها ومسافاتها.

ومن بين الرؤى الكاشفة التي تَفتَّق عنها ذهن ميشيل، انبثقت الفكرة القائلة بأنَّ جسيمات الضوء، على حدِّ تعبير ميشيل، «تُجذَب بالكيفية نفسها التي تُجذَب بها كل الأجسام الأخرى التي نعرفها؛ أي بواسطة قوى متناسِبة طرديًّا مع عزم قصورها الذاتي

[يقصد كتلتها]، ويستحيل أن يُوجَد أي شكٍّ عقلاني في ذلك، لأنَّ الجاذبية، على حدِّ عِلمنا، أو على حدِّ ما لدَينا من أي أسباب تجعلنا نُصدِّق ذلك، قانون كوني من قوانين الطبيعة». وعلَّل ذلك بقوله إنَّ مثل هذه الجسيمات المنبعِثة من نجمٍ كبير ستتباطأ بفعلِ قوى الجاذبية لدى النجم. وهكذا سيكون ضوء النجم الذي يصِل إلى كوكب الأرض أبطأ. ويُذكَر أنَّ نيوتن أوضح أنَّ الضوء يتباطأ في الزجاج، وقد فسَّر هذا مبدأ الانكسار. وإذا كان ضوء النجوم يبطؤ بالطريقة نفسِها بالفعل، أكَّد ميشيل أنه قد يكون من الممكن اكتشاف هذا التباطؤ بتفحُّص ضوء النجوم من خلال منشورٍ زجاجي. لم تُجرَ هذه التجربة على يد ميشيل، وإنما أُجرِيَت على يد الفلكي الملكي المُبجَّل الدكتور نيفيل ماسكلين، الذي بحث عن وجود تضاؤل في قابلية ضوء النجوم للانكسار. أرسل كافنديش خطابًا إلى ميشيل ليُخبره بأنَّ الأمر لم ينجح وأنَّ «احتمالية العثور على أي نجوم يتضاءل ضوءُها تضاؤلًا ملحوظًا ضعيفة جدًّا». صُدِم ميشيل وتضايق، لكن مثل هذه التكهُّنات الفلكية تطلَّبَت قدرًا كبيرًا من تخمين أشياء يستحيل تقديرها: فهل تأثر الضوء النجمي بجاذبية النجم الذي ينبعث منه؟ لم يكن ميشيل مُتيقنًا. لكنه كان جريئًا بما يكفي ليتنبَّأ تنبُّؤًا مُثيرًا للاهتمام.

إذا كان النجم ضخمًا بما يكفي، وكانت الجاذبية تؤثر في الضوء النجمي حقًّا، فقد تكون قوة الجاذبية كافيةً لحبس جُسيمات الضوء تمامًا ومنعِها من مغادرة النجم. وبذلك سيكون مثل هذا الجسم نجمًا مُظلمًا. هكذا كان القس غير المعروف وهو يكتب في مسكنه في يوركشاير هو أول شخصٍ تصوَّر ثُقبًا أسود. غير أنَّ مخطط ميشيل الرامي إلى قياس المسافات التي تفصلنا عن النجوم ظلَّ خائبًا تمامًا. وفوق ذلك، كانت صحَّتُه سيئة بعض الشيء وهذا منعه من استخدام تلسكوبه. لذا أرسل إليه كافنديش خطاب مُواساة، قائلًا: «إذا كانت صِحتك لا تسمح لك بمواصلة استخدام [التلسكوب]، فآمُل أن تسمح لك على الأقل بأداء مُهمَّة وزن العالم الأسهل والأقل مشقَّة.» وتجدُر الإشارةُ هنا إلى أنَّ هذا المثال الاستثنائي لنكتةٍ من كافنديش (الذي ذاعت عنه شهرة سيئة بأنه كتوم ومُتحفِّظ) يشير إلى فكرةٍ أخرى تصوَّرَها ميشيل. إذ يعني «وزن العالم» تجربة تُجذَب فيها كُرتان رَصاصيَّتان كبيرتان عند طرفَي قضيب الميزان الالتوائي بواسطة كُرتَين رصاصيتَين ساكنتَين. وهذا يسمح لمن يُجري التجربة بقياس قوة الجاذبية، وبالتبعية 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 تُعرَف الآن باسم تجربة كافنديش. غير أنَّ انتساب الفضل إلى كافنديش في شيءٍ لم يكن هو صاحبه

بهذه الطريقة قد عُوِّض وزيادة فيما بعد لأنَّ العديد من الاكتشافات الفارقة التي اكتشفها كافنديش بنفسه وتجاهل نشرَها نُسِبت لاحقًا إلى باحِثين لاحِقين (من بينها قانون «أوم» وقانون «كولوم»).

بيير-سيمون لابلاس

على الجانب الآخر من بحر المانش، لم يكن بيير-سيمون لابلاس مُستمتعًا بفترة السِّلم المثالي الهادئة التي أرسَتْها حقبة التنوير الإنجليزي السِّلمية. نجا لابلاس من الثورة الفرنسية، مع أنَّ مسيرته المهنية ازدهرت بينما كان يؤثر بنفوذه في معهد فرنسا ومدرسة البوليتكنيك اللذَين كانا حديثَي التأسيس آنذاك. حتى إنه شغَل منصبَ وزير الداخلية فترةً في عهد نابليون، لكنه لم يبقَ سوى مدةٍ قصيرة في هذا المنصب الذي ندِم نابليون على تعيينه فيه. إذ أدرك نابليون أن لابلاس كان عالم رياضيات ممتازًا، لكنه سيئٌ جدًّا في المناصب الإدارية. وقد كتب نابليون عن لابلاس فيما بعد أنه «كان يبحث عن التفاصيل الدقيقة في كلِّ شيء، ولم يكن يتصوَّر سوى المشكلات، وأخيرًا نَقَل عقلية «الكميات المتناهية الصغر» إلى مجال الإدارة». كان نابليون لدَيه آخرون ممن يُجيدون شَغل المناصب الإدارية يستطيع الاستعانة بهم، لكن العالَم لم يكن فيه سوى قِلة من علماء الرياضيات الْمُثمِرين ذوي البصيرة الثاقبة مثل لابلاس. إذ قدَّم إسهامات محورية في الهندسة وموضوع الاحتمالات والرياضيات والميكانيكا السماوية والفلك والفيزياء. وعمل على موضوعاتٍ مختلفة مثل الخاصية الشعرية، والمذنبات، والاستدلال الاستقرائي، واستقرار المجموعة الشمسية، وسرعة الصوت، والمعادلات التفاضلية، والتوافقات الكروية. وكانت إحدى الأفكار التي فكر فيها النجوم المظلمة.

في عام ١٧٩٦، نشر لابلاس كتابه «شرح نظام الكون». ويستعرض هذا الكتاب، الموجَّه إلى جمهورٍ مُثقَّف 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 نقطتَي التقاء خط الاستواء السماوي بمستوى مدار الأرض على طول مستوى مدار الأرض بسبب تغيُّر اتجاه محور دوران الأرض، ويحتوي الكتاب أيضًا على تكهُّنات لابلاس بخصوص أصل المجموعة الشمسية. ويتضمن فقرةً معينة ذات صِلة خاصة بموضوعنا. إذ حَسَب لابلاس الحجمَ الذي يجب أن يكون عليه جسمٌ شبيه بالأرض لكي تكون سرعة هروبه مساويةً لسرعة الضوء. وأظهر، في

توضيحٍ صائب تمامًا، أنَّ قوة الجاذبية على سطح نجم ذي كثافة مُشابهة لكثافة الأرض، لكن قطره يساوي قطر الشمس نحو ٢٥٠ مرة، ستكون شديدةً جدًّا لدرجة أنَّ الضوء نفسَه لن يستطيع الهروب. وفسَّر أنَّ هذا هو السبب الذي يجعل أكبر الأجسام في الكون غير مرئية. فهل يُمكن أنها ما زالت مُختبئة غير مرئية في سماء الليل المعتِمة في الوقت الذي تخيَّلنا فيه أنَّ الأشياء الوحيدة «الموجودة هناك» هي الأجسام المضيئة الساطعة التي نستطيع رؤيتها؟ طلب عالم الفلك المجَري فرانتس زافير فون زاك من لابلاس أن يُقدِّم الحسابات التي قادته إلى هذا الاستنتاج، ولبَّى لابلاس هذا الطلب، بتدوين حساباته (باللغة الألمانية) وأرسلها إلى إحدى الدوريات التي كان فون زاك مسئولًا عن تحريرها.

غير أنَّ لابلاس كان قد بدأ يعي نظرية طبيعة الضوء الموجية آنذاك. وكانت أفكار كلٍّ من ميشيل ولابلاس قائمةً جزئيًّا على نظرية طبيعة الضوء الجسيمية. فإنْ كان الضوء مكونًا من جسيمات بالِغة الصغر، فحينئذٍ سيبدو منطقيًّا أنَّ هذه الجسيمات تتأثر بمجال جاذبية، وتظلُّ مربوطةً إلى الأبد بسطحِ نجمٍ ذي حجمٍ كافٍ. لكنَّ بدايات القرن التاسع عشر شهدت عدة تجارب بدا أنها تُعزِّز مصداقية نظرية طبيعة الضوء الموجية. ولو كان الضوء موجةً وليس جسيمات، فعندئذٍ يكون من الأصعب أن نرى أنَّه من المفترَض أن يتأثر بالجاذبية. وهكذا حُذِف تنبُّؤ لابلاس بالنجوم المظلِمة في هدوءٍ من الطبعات اللاحقة من كتاب «شرح نظام الكون». ففي النهاية، كان ميشيل ولابلاس عاكفَين على تخمين النظرية واستكشافها، ولم يكونا مدفوعَين باحتياجٍ إلى شرح أرصادٍ مُعيَّنة، ولذا نُسِيَت هذه الفكرة فترةً من الزمن. بذلك كانت الأجسام التي تَخيَّلها ميشيل ولابلاس «نجومًا سوداء»، وهي أجسام هائلة في الكون تستطيع بحُكم كُتلتها أن تحافظ على بقاء أنظمةٍ من الكواكب في مداراتٍ حولها، لكنها في الوقت نفسه، بحُكم كتلتها الهائلة نفسها أيضًا، لا يُمكن أن تُرصَد عبْر إشعاع الضوء. فالضوء النجمي المنبعث من أسطح نجوم ميشيل ولابلاس سيكون أبطأ من أن يتغلَّب على قوة جاذبية السطح الشديدة. الشيء الذي لم يستطع ميشيل ولابلاس تخمينه هو أنَّ مثل هذه الكتل المتراكِمة الهائلة ستكون غير مُستقرة إلى الحد الذي يجعلها تنهار. وفوق ذلك، ستثقب نسيج الزمكان أثناء انهيارها، وستُنشِئ نقطةً من نقاط التفرُّد. وبذلك فإنَّ «الثقوب السوداء» ليست «نجومًا مظلمة»، ومن أجل أن نُعزز هذه الحجَّة ونبدأ في التعرُّف على الاكتشاف الفلكي للثقوب السوداء، سنحتاج أولًا إلى فَهم طبيعة الزمكان.

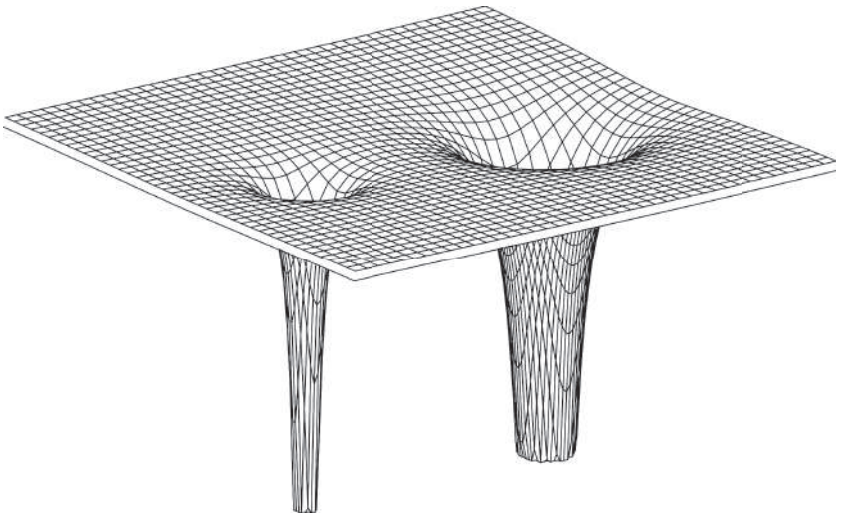
الزمكان

تجعلنا تجربتنا الحياتية اليومية نشعُر بالارتياح إزاءَ الفكرة القائلة بأنَّ الكون المحسوس يمكن وصفه بإحداثيةٍ زمنية واحدة وثلاث إحداثياتٍ مكانية (لنقُل مثلًا x وy وz على طول ثلاثة محاور مُتعامِدة تعامدًا مُتبادلًا، وهي بِنْية ابتكرها رينيه ديكارت ومعروفة باسم الإحداثيات الديكارتية). ففي عام ١٩٠٥، نشر أينشتاين ورقته البحثية الثورية عن النسبية الخاصة ونسبية الحركة والثبات. وفي عام ١٩٠٧، أظهر هيرمان مينكوفسكي كيف يمكن فَهم هذه النتائج فَهمًا أعمقَ من خلال تخيُّل نسيجٍ لزمانٍ ومكان رُباعي الأبعاد تُكافئ نقاطه، التي صارت مُحددة الآن بالإحداثيات (t وx وy وz) الرباعية الأبعاد، «أحداثًا». والحدث شيء يحدث في وقتٍ معيَّن (t) وفي مكانٍ معيَّن (x، y، z). وهذه الإحداثيات الرباعية الأبعاد التي تُوجَد فيما يُعرف باسم «نسيج زمان ومكان مينكوفسكي» تُحدِّد بالضبط مكان وقوع الحدث ووقته. ويمكن صياغة نظرية النسبية الخاصة التي وضعَها أينشتاين بمصطلحات قائمة على نسيج الزمكان الذي افترضه مينكوفسكي، وتُقدِّم وصفًا مُلائمًا للعمليات الفيزيائية في أُطُرٍ مرجعية مختلفة تتحرك بالنسبة إلى بعضها. و«الإطار المرجعي» ببساطة هو المنظور الذي ينظُر منه راصدٌ مُعيَّن. وقد وصف أينشتاين هذه النظرية بأنها «خاصة» لأنها تتناول حالةً مُعيَّنة فقط، وهي الأُطُر المرجعية غير المتسارِعة (تُسمَّى بالأطر المرجعية القصورية). وبذلك لا يمكن تطبيق النظرية الخاصة إلا على الأطر المرجعية التي تتحرك حركةً موحَّدة دون تسارُع. فإذا أُلقيتَ حجرًا، فإنه يتَّجِه نحو الأرض مُتسارعًا. ومن ثَمَّ، يكون الإطار المرجعي المرتبط بالحجر إطارًا مرجعيًّا مُتسارعًا، ولا يمكن التعامُل معه بنظرية أينشتاين الخاصة. فحيثما تُوجَد جاذبية، يُوجَد تسارُع.

وهذا العيب دفع أينشتاين إلى صياغة نظرية النسبية العامة، التي نشرها بعد عَقد من نظريته الخاصة. إذ اكتشف أنه في حين أنَّ الفضاء الديكارتي ونسيج الزمكان الذي افترضه مينكوفسكي إطاران جامدان حيث تحيا الأجسام وتتحرك وتُوجَد، فإن نسيج الزمكان كيانٌ أكثر استجابةً للمؤثرات في الواقع؛ إذ يُمكن أن ينحنيَ ويُشوَّه في ظروفٍ مغايرة بسبب وجود الكتلة. فحالما تُوجَد الكتلة في موقفٍ مادي، فإنَّ السلوك التالي المرتبِط ارتباطًا غير قابل للفصل يصف الواقع، وقد لخَّصه جون ويلر بدقةٍ بارعة قائلًا:

- 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 ضِمن نظرية النسبية العامة، التي تربط انحناء نسيج الزمكان بمجال الجاذبية.



شكل ١-٢: التشوُّه، أي الانحناء، في نسيج الزمكان بسبب وجود الكُتَل.

يتحدَّث الفيزيائيون عن وجود منطقة تتَّسِم بانخفاض طاقة الوضع القائمة على موضع الجسم في مجال الجاذبية (أو ما يُعرَف باسم بئر طاقة الوضع في مجال الجاذبية) حول جسمٍ ضخم. ويعرض الرسم المُبسَّط الموضح في شكل ١-٢ صورةً مُوجزة عن كيفية تشوُّه نسيج الزمكان بجوار ثُقبَين أسودَين، حيث يُمكن اعتبار أنَّ كل منطقةٍ تنحني بطريقةٍ مُرتبطة ارتباطًا مباشرًا بكُتلتها، وبذلك فهي مُرتبطة بقوة الجاذبية نفسها. وربما يُمكن اعتبار أنَّ نقطة التفرُّد في نسيج الزمكان هي المنطقة التي يُصبح فيها ذلك الانحناء في النسيج كبيرًا جدًّا، والتي نتجاوز عندها نظرية الجاذبية التقليدية وندخل النظام الكمِّي. ويعمل أفق الحدث المحيط بنقطة التفرُّد كغشاءٍ أحادي الجانب؛ إذ يمكن للجسيمات والفوتونات أن تدخُل الثقب الأسود من الخارج ولكن لا يمكن أن يهرب أي شيءٍ من داخل أفق الثقب الأسود إلى الكون الخارجي. وفي الواقع، فالكتلة ليست الخاصية

الوحيدة التي قد تكون موجودةً لدى الثقب الأسود ويُقاس بها. فإذا كان الثقب الأسود يدور، أي لدَيه بعض الزخم الزاوي، فسيظهر سلوكٌ أشدُّ تطرفًا بكثير. وقبل أن نشرع مباشرةً في استعراض ذلك، سنسلُك منعطفًا بسيطًا لنعرِف المزيد عن كيفية تمثيل نسيج الزمكان نفسه بمخطَّطاتٍ بيانية.

الفصل الثاني

التنقُّل عبر نسيج الزمكان

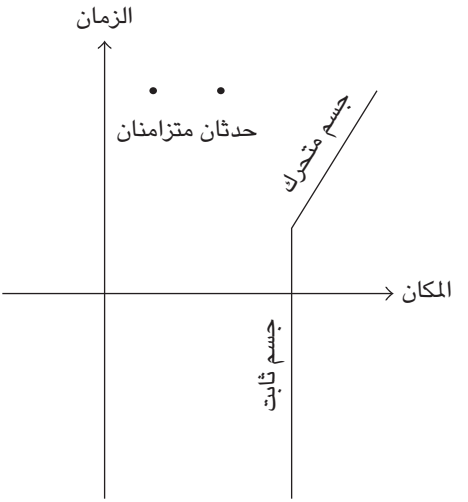
تُعَدُّ الرياضيات هي اللغة المثالية بامتيازٍ لوصفِ كيفية انطباق نظرية النسبية على الكون المادي وكل نسيج الزمكان، وهذا الوصف يتضمَّن السلوك الغريب الذي يحدُث بالقُرب من الثقوب السوداء. غير أنَّ الوصف الرياضي، وإن كان فعَّالًا ودقيقًا، يمكن أن يكون لغةً غريبةً وبغيضة بعض الشيء لمن يفتقِرون إلى التدريب التخصُّصي المناسِب. والكلمات الوصفية، مهما كانت بليغة، تفتقِر 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 حلٍّ وسطي مُفيد، لكنها طريقة مفيدة جدًّا لتصور ما يجري. ولهذا السبب، يجدُر بذل القليل من الجهد لفَهم نوعٍ مُعيَّن من الصور، يُسمَّى مخطط نسيج الزمكان. فهذا سيُساعد في فَهم طبيعة نسيج الزمكان حول الثقوب السوداء.

مخططات الزمكان البيانية

يُوضِّح الرسم المُبسط الوارد في شكل ٢-١ مخططًا بيانيًّا بسيطًا لنسيج الزمكان. ووفقًا للعُرف المُتبع، فالمحور «المحاكي للزمان» هو المحور الرأسي على الصفحة، والمحور «المحاكي للمكان» يُرسَم عموديًّا عليه. وصحيح أنَّنا نحتاج في الحقيقة إلى أربعة محاور لوصف نسيج الزمكان بسبب وجود ثلاثة محاور محاكية للمكان (عادةً ما يُرمَز إليها بالأحرف x وy وz) ومحور واحد مُحاكٍ للزمان. لكنَّ رسم محورَين فقط سيكون كافيًا لغرَضِنا (وبالطبع من المستحيل رسم أربعة محاور متعامِدة على بعضها!). تُسمَّى نقطة التقاء المحورَين بنقطة الأصل، ويُمكن اعتبارها النقطة المعبِّرة عن «مكان وزمان» الراصد الذي أنشأ هذا المخطط المعبِّر عن نسيج الزمكان. يقع أي حدث فوري يُعتبَر مثاليًّا،

كضغطةٍ على مصراع كاميرا مثلًا، في لحظةٍ مُعينة من الزمان وفي مَوضعٍ مُعين من المكان. ويُمثَّل هذا الحدث الفوري بنقطةٍ على مخطط الزمكان، على أن تكون ملائمةً للزمن والموضع المكاني المعنِيَّين. تُوجَد في شكل ٢-١ نقطتان مُنفصِلتان مكانيًّا (أي لا تحدُثان عند نفس النقطة على محور المكان) لكنهما مُتزامِنتان (أي لهما الإحداثية نفسها على محور الزمان). ويُمكنك أن تتخيَّل أنَّ هاتَين النقطتَين تكافئان ضغطتَين مُتزامنتَين على مصراعَي كاميرتَين ضغطَهما مُصوِّران يقِف كلٌّ منهما بعيدًا عن الآخر لتصوير المشهد نفسه. إذا كانت النقاط تُمثِّل أحداثًا، فما الذي تُمثله الخطوط في مخطط نسيج الزمكان؟ ببساطة يُظهِر الخط مسار جسمٍ ما عبر نسيج الزمكان. فبينما نعيش حياتنا، نتنقِل عبر نسيج الزمكان، والمسار الذي نُخلِّفه وراءنا (الذي يُشبِه ما يُخلِّفه الحلزون وراءه من أثرٍ مُتلألئ من مادة لعابية لزجة) يكون خطًّا في نسيج الزمكان، وبالمصطلحات المتخَصِّصة يُسمَّى هذا المسار خطَّ العالم. وبذلك إذا بقِيتَ في المنزل طَوال اليوم، يكون خط العالم المُعبِّر عنك مسارًا رأسيًّا عبر نسيج الزمكان (وستكون إحداثية المكان الخاصة بك «٢٢ شارع أكاسيا» مثلًا). وهكذا فأنت تتحرك قُدُمًا في الزمان، لكنك ثابت في المكان. أمَّا إذا خُضتَ رحلةً طويلة، فسيكون خطُّ العالَم المُعبر عنك مائلًا لأنَّ موضعك المكاني يتغير مع مرور الوقت، لأنك تتحرك في الزمكان أيضًا.

انظر مثلًا إلى خط العالم الموضَّح في شكل ٢-١، الخط الذي يَظهَر رأسيًّا في البداية ثم يُصبح مائلًا عند الاتجاه نحو الأعلى. يكافئ هذا خط العالم الخاص بكيانٍ آخر يبقى ثابتًا طَوال المدة الزمنية التي يُشير إليها الجزء الرأسي من الخط. ومن الأمثلة التي ربما يُعبِّر عنها هذا الخط كاميرا خاصة بأحد المصوِّرين كانت متروكةً على أحد الكراسي (فكان خط العالم المُعبِّر عنها رأسيًّا لأنَّ موضعها لا يتغير)، ثم سرقها لصٌّ وهَرب بها بعيدًا بسرعة (عندما يتغيَّر الموضع المكاني باستمرار). فحيثما يُصبِح هذا الخط مائلًا، يُعبر عن تغيُّر الموضع المكاني مع مرور الزمن. ويُعبر مَيل هذا الخط عن معدل تغيُّر المسافة مع مرور الزمن، وهذا عادةً ما يُطلَق عليه السرعة. وفي هذه الحالة، فهو يُعبر عن السرعة التي يهرب بها اللص بالكاميرا المسروقة. وبذلك فكلَّما كان اللصُّ أسرع في هروبه بالكاميرا المسروقة، أو بعبارة أخرى كلما كانت المسافة التي يقطعها في زمن مُعيَّن أطول، كان هذا الجزء من الخط أقل توجُّهًا نحو الاتجاه الرأسي وأكبر ميلًا. بالطبع يُوجَد حد أقصى صارم للسرعة التي يُمكن أن يهرب بها اللص بغنيمته المسروقة، وهذا الحد، كما نوقِش في الفصل الأول، هو سرعة الضوء. ومن ثَم، فإنَّ مسار شعاع من الضوء سيُمثَّل بخط

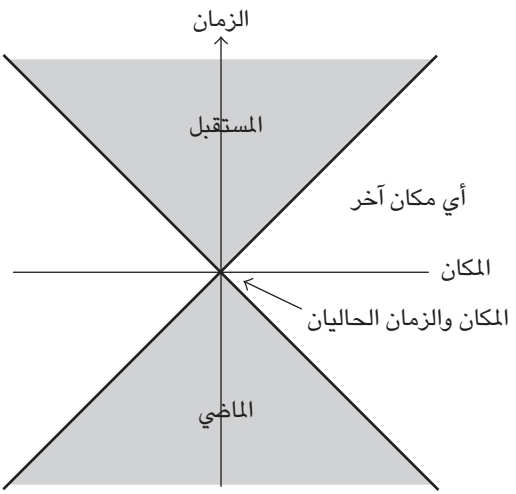


شكل ٢-١: مخطط بياني بسيط يُعبر عن نسيج الزمكان.

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

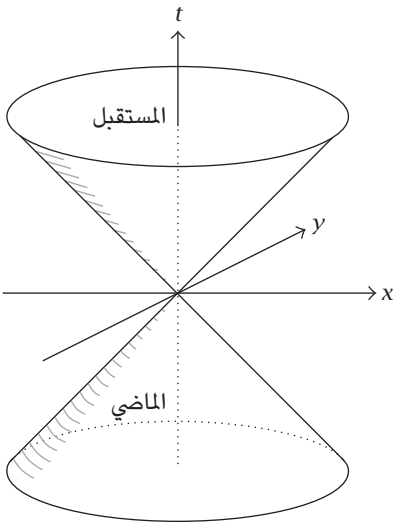
تجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ خطوط العالم التي تُمثَّل على مخطط الزمكان بهذه الزاوية ذات الميل الأقصى، والتي تُكافئ هذه السرعة القصوى، أي سرعة الضوء، تُنشئ مفهومًا مُهمًّا يُسمَّى المخروط الضوئي. وفكرة هذا المفهوم بسيطة جدًّا، ومفادُها أنَّ المرء لا يستطيع التأثير على الكون في المستقبل إلَّا بِصلةٍ سببية سابقة وأنَّ التسلسُل السببي 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 ضِمن زاوية مقدارها ٤٥ درجة مع محور الزمان الموجب كما هو موضح في شكل ٢-٢. وفوق ذلك، لا يُمكن أن يكون المرء قد تأثَّر إلَّا بسلسلةٍ سببية من الأحداث لا يمكن أن تكون قد تجاوزت سرعة الضوء. لذا فالأحداث التي تقع ضِمن زاوية مقدارها ٤٥ درجة مع محور الزمان السالب (أو الماضي) هي فقط التي يمكن أن تؤثر عليك الآن. إذا رسَمْنا الآن مخططًا بيانيًّا

لنسيج الزمكان باستخدام محورَين مُحاكيَيْن للمكان ومحورٍ واحد مُحاكٍ للزمان، فإن المثلثات الواردة في شكل ٢-٢ تُصبح مخاريط، وهذا ما نَعنيه بالمخاريط الضوئية، كما هو موضح في شكل ٢-٣. يُحدِّد المخروط الضوئي في شكل ٢-٣ مناطق الفضاء التي تقع ضِمن نطاقها الأحداث التي يُمكن لراصدٍ ما (يُعتبَر موجودًا عند نقطة الأصل المُعبِّرة عن «المكان والزمان الحاليين») من حيث المبدأ أن يكون له صِلةٌ سببية بها (أو كانت له صِلة سببية بها في الماضي)، دون الحاجة إلى كسر الحد الأقصى للسرعة الكونية، والتحرُّك أسرع من سرعة الضوء. تُعرف المنطقة المتركزة حول محور الزمان الموجب (المستقبَل) باسم المخروط الضوئي الخاص بالمستقبل، بينما يُعرف المخروط المتركز حول محور الزمان السالب (أي الماضي) باسم المخروط الضوئي الخاص بالماضي.



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

وبذلك يُعَد اغتيال يوليوس قيصر في عام ٤٤ قبل الميلاد جزءًا من ماضيك، بسبب وجود صلةٍ سببية يُمكن تصوُّرها بينك وبين هذا الحدث. (إذا توجَّب عليك دراسته في المدرسة، فذلك يُثبت وجود صلةٍ سببية!) ولأنَّ الضوء المنبعِث من مجرة أندروميدا يمكن أن يصِل إلى تلسكوب على الأرض، فهو أيضًا جزء من ماضيك. غير أنَّ وصول الضوء إلينا



شكل ٢-٣: مُخطط بياني لنسيج الزمكان يُبيِّن المخروط الضوئي الخاص براصدٍ مُعين.

يستغرِق ستة ملايين سنة، لذا فإنَّ مجرة أندروميدا قبل ستة ملايين سنة هي التي تُعَد جزءًا من ماضيك وتقع على مخروطك الضوئي. أمَّا 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 حتى في عام ٤٤ قبل الميلاد، لا يمكن أن تؤثر فيك الآن لأنَّ أي صِلةٍ سببية كان سيتوجَّب أن تنتقِل بسرعةٍ تتجاوز سرعة الضوء.

سُمِّيت محاور مخططات الزمكان الثلاثة التي رأيناها في هذا الفصل حتى الآن بمحور الزمان ومحور المكان. ولكن في الواقع، عادةً ما لا يُدرِج المحترفون المتخصِّصون أسماء المحاور، أو حتى المحاور نفسها، في المخططات البيانية المُعبِّرة عن الزمان والمكان. وهذا لا يعني ببساطةٍ أنَّ تحرُّك الزمان طوليًّا وتحرُّك المكان عرضيًّا أمر روتيني جدًّا إلى الحد الذي يجعل علماء الفيزياء الفلكية المحترفين لا يُبالون بذلك (مع أنَّ هذه ليست ظاهرةً مجهولة)، لكنَّ السبب أنَّ المواضع الدقيقة في نسيج الزمكان لا يمكن أن تكون محلَّ اتفاقٍ بين كل الراصدين. ففي عالم النسبية الخاصة، ينهار مفهوم التزامُن. ومجرد أنَّ حدثَين مُتزامنَين بالنسبة إلى راصدٍ مُعين لا يعني مُطلقًا أنهما متزامنان بالنسبة إلى راصدِين آخرِين.

وبذلك، عندما يرى راصدٌ المصورَين اللذَين يضغطان على مصراعَي كاميرتَيهما «في آنٍ واحد»، فلن يكون ذلك هو ما يراه راصدٌ آخر يسافر في مركبةٍ فضائية تتحرك بسرعة كبيرة بالنسبة إلى الكاميرتَين. بل سيستنتِج هذا الراصد أنَّ إحدى الضغطتَين تحدُث قبل الأخرى بوقتٍ طويل. وحينئذٍ، فالنقطتان اللتان رسمتُهما في شكل ٢-١ على الارتفاع الرأسي نفسه (لأنني زعمتُ أنَّ الحدثَين وقعا في الوقت ذاته) ستظهران في موضعَين رأسيَّين مختلفَين على مخطط الزمكان الخاص بالراصد الذي يتحرك بسرعة. وتُصِر النظرية النسبية التي وضعها أينشتاين على أنَّ مخططها صحيح تمامًا مثل مُخططي. ومن ثَمَّ، فإذا كانت النقاط في مخطط الزمكان تعتمد على الموضع الذي ينظر منه الراصد، أي إطاره المرجعي، فما سبب رسمِها إذن؟

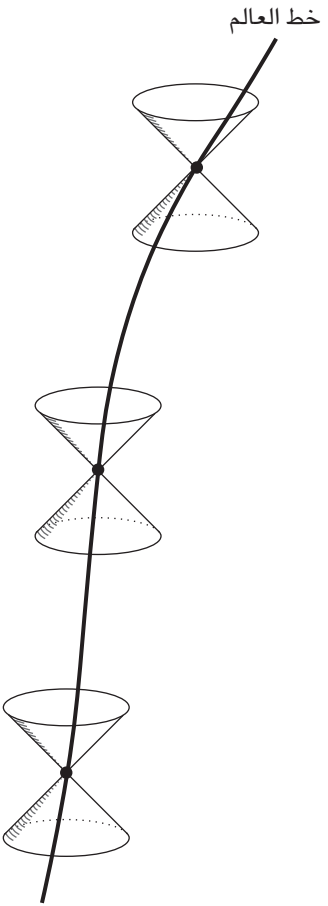
لفهم ذلك، من المفيد التركيز على خط العالم الخاص بجُسَيم متحرك، ولذا سنرسم الآن مخططًا بيانيًّا جديدًا يُعبر عن نسيج الزمكان يتحرك فيه جُسَيم عبْر هذا النسيج، آخِذًا معه مخروطه الضوئي (هذه الحيلة معروفةٌ بالعمل ضِمن الإطار المُسايِر). لاحظ أنَّ مسار الجُسَيم (أي خط العالم الخاص به) في شكل ٢-٤ يبقى دائمًا ضِمن المخروط الضوئي لأنه لا يستطيع تجاوز سرعة الضوء.

لا تنطبق نظرية النسبية الخاصة التي وضعها أينشتاين، وهي مُتفرعة من نظريته العامة، إلَّا على مجموعةٍ محدودة من المواقف المادية. لذا تنشأ حاجةٌ إلى إطار مفاهيمي مختلف يتجاوز النسبية الخاصة في سياق الزمكان الذي يتوسَّع، ولعل أبرز مثالٍ عليه هو الكون المتوسِّع. وفي هذا السياق، تتجلَّى الصِّلة السببية في أنَّك لا تستطيع التحرك بسرعةٍ تتجاوز سرعة الضوء بالنسبة إلى حيِّزك المحلي الصغير من الفضاء.

كيف تعرف الأجسام وِجهتَها؟

مع أنَّ الفوتونات ليس لها كتلة، اتضح أنها ما زالت مُتأثرة بالجاذبية. ومن الأفضل ألَّا نعتبِر ذلك ناجمًا عن قوةٍ ما، بل بالأحرى عن انحناء نسيج الزمكان. صحيح أنَّنا عادة ما نظن أنَّ الفوتون يتحرك في خط مُستقيم، وهذا ما نستمدُّ منه فكرة «شعاع الضوء». ولكن عند تحركه عَبر نسيجٍ مُنحنٍ من الزمكان، سيتبع مسارًا يُعرف بأنه خط جيوديسي.

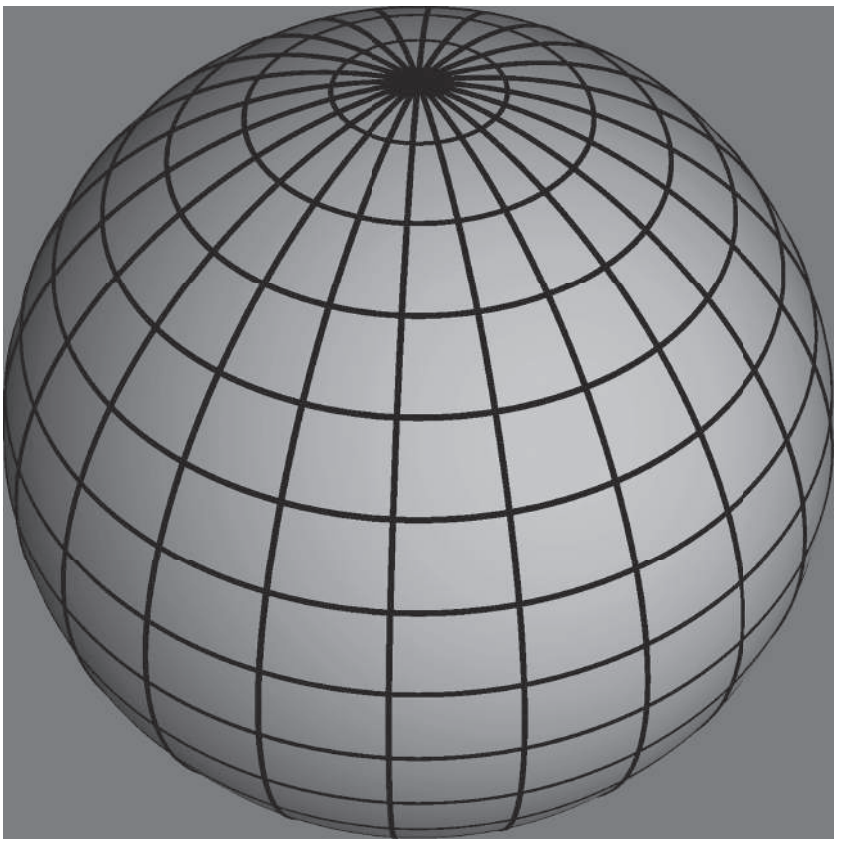
ومع أنَّ دلالة كلمة «جيوديسي» تُوحي بأنها مرتبطة بكوكب الأرض فقط، فإنَّ الخط الجيوديسي (الذي اشتُقَّ اسمه من عِلم الجيوديسيا، أي قياس خواص الأرض على سطح كوكبنا) مفهوم مُهم في وصف طبيعة نسيج الزمكان عبر الكون كله. إذا لم يكن الفضاء



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

مُنحنيًا (أي كان مُتَّسقًا تمامًا مع الشكل الهندسي اليومي الذي ربما تعلَّمناه في المدرسة من إقليدس أو أحد العلماء الذين جاءوا من بعده)، فحينئذٍ سيكون الخط الجيوديسي هو «المسار المستقيم» الذي سيقطعه شعاع ضوئي. لكنَّ أقصر مسافةٍ بين نقطتَين، التي تُمثل المسار الذي «يريد» شعاع ضوئي أن يسلكه، معروفة بمصطلح «الخط الجيوديسي الصِّفري». أمَّا في الفضاء المنحني، فأقصر مسافةٍ بين نقطتَين ليست ما نعتبِرها مستقيمة،

لكنَّ «الخطوط الجيوديسية خطوط مُستقيمة في فضاءاتٍ مُنحنية.» يمكن كذلك وصف الخط المستقيم بأنه المسار الذي تسلكه بمواصلة التحرُّك في الاتجاه نفسه. وإذا أردتَ مثالًا على أنَّ الهندسة على الأسطح المنحنية مختلفة بشدة، فانظر إلى خطوط الطول على كرة. فأيُّ خطَّين متجاورَين من خطوط الطول (متوازِيَين عند خط الاستواء) سيلتقِيان في نقطةٍ عند القطب، كما هو موضَّح في شكل ٢-٥. ولكن في الفضاء المسطح، لن تلتقيَ الخطوط المتوازية إلا عند اللانهاية (وفقًا لمُسلَّمة إقليدس الأخيرة).



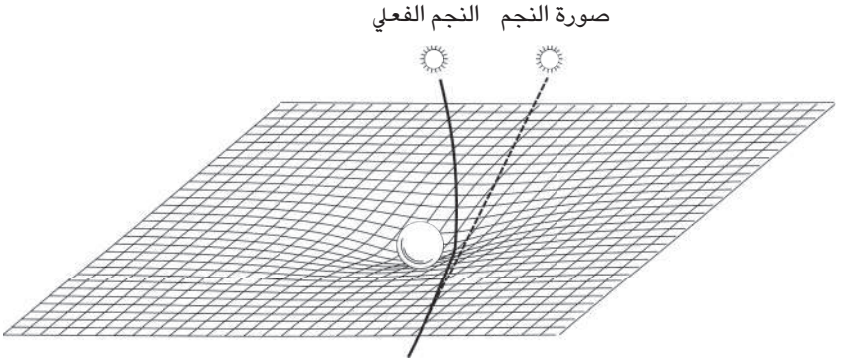
شكل ٢-٥: تكون خطوط الطول على كرةٍ ما متوازيةً عند خط الاستواء، وتلتقي في نقطة عند القطبَين.

وفي الواقع، حيثما يكون نسيج الزمكان مُنحنيًا، وليكُن بسبب وجود كتلةٍ مثلًا، يتجلى ذلك الانحناء في المسار الذي سيسلكه شعاع ضوئي أو «جُسَيم اختبار» (أداة ذهنية استخدمَها الفيزيائيون) يستطيع التحرك بِحُرية دون تأثيرٍ من أي قوةٍ خارجية، بين حدثَين. وينبغي اعتبار الحدثَين نقطتَين في نسيج الزمكان الرباعي الأبعاد، على أن يُرمَز إلى كلتَيهما بالصيغة $(t، x، y، z)$.

تُخبرنا قاعدةٌ تُسمَّى الدالة المِترية 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 نقطتَين تقعان في المستوى. وتُوضِّح لنا حلول معادلات المجال التي وضعَها أينشتاين كيف نحسب قِيَم الدالة المترية لنسيج الزمكان عندما يكون توزيع المادة معروفًا. ونستخدِم هذا لإنشاء خطوطٍ مُعبرة عن خطوط الكون الحقيقي الجيوديسية. فعلى سبيل المثال، كان أحد أول الأدلة الرصدية على النسبية العامة هو انحناء الضوء النجمي بفعلِ الشمس، الذي قيس في أثناء كسوف شمسي (فهو وقت مناسب لفحص المواضع الظاهرة للنجوم القريبة من قرص الشمس لأنَّ الضوء المنبعث من القرص يكون محجوبًا بالقمر حينئذٍ، وهي فرصة اغتنمَها السير آرثر إدينجتون في عام ١٩١٩). وكتلة الشمس تُسبِّب انحناء نسيج الزمكان. وبذلك فإن أقصر مسار (أي الخط الجيوديسي) من نجمٍ بعيد إلى تلسكوب على الأرض ليس خطًّا مستقيمًا، بل منحنٍ بفعلِ مجال جاذبية الشمس، كما هو مُوضَّح في شكل ٢-٦.

وصحيح أنَّ انحناء الضوء النجمي يُظهِر أنَّ الفضاء منحنٍ، لكن النظرية العامة لأينشتاين تُخبرنا بأنَّ نسيج الزمكان هو الذي يتَّسم بالانحناء في الواقع. لذا قد نتوقَّع أن هذه الكتلة لها بعض التأثيرات الغريبة على الزمان أيضًا. وفي الحقيقة، فحتى مجال جاذبية كوكب الأرض كافٍ ليجعل الساعات الموجودة على سطح كوكب الأرض تدقُّ بوتيرةٍ أبطأ قليلًا من التي تدق بها في الفضاء السحيق، ومع أنَّ ذلك التأثير ضئيل (إذ يبلُغ نحو جزءٍ واحد في المليار)، فهو قابل للقياس. غير أنَّ تأثيرات الجاذبية بالقُرب من أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود أقوى بكثير. وبذلك فإنَّ الزمن يمضي بشكلٍ مختلف بالقُرب من الثقب الأسود، حتى الثقب غير الدوَّار الذي يُعَد أبسط حالات الثقوب السوداء، مقارنةً بالكيفية التي يمضي بها على بُعد مسافةٍ كبيرة من الثقب الأسود. هذا تأثير حقيقي ولا يعتمِد على كيفية قياس الوقت (سواء بساعةٍ ذرية، أو بساعة رقمية مثلًا). إذ ينجم

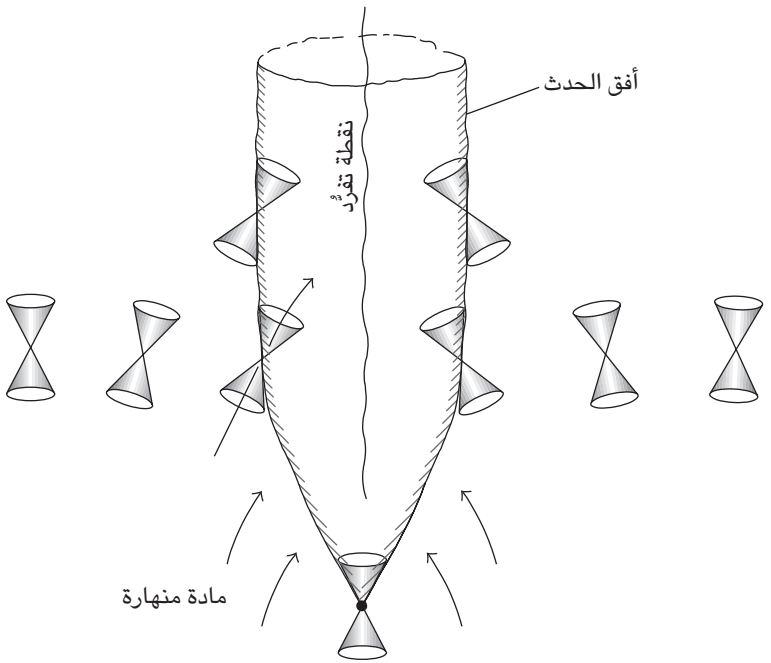
مباشرة عن انحناء نسيج الزمكان الناتج من الكتلة، والذي يُوجِّه المخاريط الضوئية نحو الكتلة. يُبين شكل ٢-٧ التأثير العام.



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

تؤثر الثقوب السوداء تأثيرًا عميقًا في اتجاهات المخاريط الضوئية. فعندما يقترب جُسَيم من الثقب الأسود، يميل مخروطه الضوئي المستقبلي أكثر فأكثر نحو الثقب الأسود، بحيث يتحوَّل الثقب الأسود تدريجيًّا إلى جزءٍ من مُستقبله المحتوم. وعندما يمرُّ الجُسَيم عبر أُفق الحدث، تنتهي مساراته المستقبلية المحتملة كلها داخل الثقب الأسود. وفي نطاق أفق الحدث فقط، يكون ميل المخروط الضوئي كبيرًا لدرجة أنَّ أحد جوانبه يُصبح موازيًا لأُفق الحدث، ويقع المستقبل كله ضِمن نطاق أفق الحدث؛ فالهروب من الثقب الأسود غير ممكن. ويوضح شكل ٢-٧ أيضًا هذه النقطة بالمثال: فهو أساسًا تمثيلٌ لبعض «مخططات الزمكان المحلية»، لأن تجميع المخاريط الضوئية يُتيح لك فهم الظروف المحلية التي يمرُّ بها جُسَيم اختبار موجود في مواقع مختلفة. في هذا الشكل، يتقدَّم الزمن مع الاتجاه إلى أعلى الصفحة، ولذا فهذا المُخطط البياني يُعطي كذلك فكرةً عن كيفية تكوُّن الثقب الأسود ونموه بفعلِ المادة المنهارة الساقطة نحوه.

وكنجوم ميشيل ولابلاس المظلِمة التي نوقِشت في الفصل الأول والتي استطاعت الحفاظ على أنظمة من الكواكب في مداراتٍ حولها على غرار مجموعتنا الشمسية، نعرف



شكل ٢-٧: مُخطط نسيج الزمكان المحيط بثقب أسود يُبين كيف أنَّ المخاريط الضوئية المستقبلية الخاصة بأجسامٍ على أفق الحدث تقع داخل نطاق أفق الحدث.

فقط أنَّ الثقب الأسود قريب بسببٍ ما لدَيه من قوة شدٍّ قائمة على الجاذبية. وربما قد يجعلك هذا تظن أنَّ الخاصية الوحيدة التي تُميز الثقب الأسود هي كتلته. ولكن في الواقع، تتأثر خصائص الثقب الأسود تأثرًا شديدًا بما إذا كان يدور أم لا، وسأشرح كيفية حدوث ذلك في الفصل الثالث.

الفصل الثالث

توصيف الثقوب السوداء

قدَّمنا في الفصل الأول مفهوم وجود نقطةٍ مُتفردة من الكُتلة تتكوَّن في أثناء الانهيار بفعلِ الجاذبية ومُحاطة بمنطقةٍ من مناطق أفق الحدث. ويُسمَّى النوع الذي لا يدور من هذه الأجسام ثقوب شفارتزشيلد السوداء، وهذا المصطلح يُشير بالأخص إلى ثقوب سوداء لا تدور؛ أي، بالمصطلحات المتخصصة، ليس لديها زخم زاوي. ببساطة، السمة الوحيدة التي تُميز أحد ثقوب شفارتزشيلد السوداء عن الآخر (بخلاف الموقع) هي مقدار كتلته. سنتعلَّم في الفصل السابع كيف تنمو الثقوب السوداء، ولكن الآن سيكفي أن نعرف أنَّ الانهيار تحت تأثير الجاذبية هو المكوِّن الرئيسي. إذا وُجِد أي دوران على الإطلاق في المادة قبل الانهيار، مهما كان بسيطًا، فعندئذٍ سيزداد معدل الدوران مع حدوث الانهيار (إلَّا إذا وُجِد تأثير مُعين يمنع حدوث ذلك). ينشأ ذلك بسبب قانون فيزيائي بارز يُعرف بقانون حفظ الزخم الزاوي. ويتضح هذا القانون بالمثالِ في راقصة مُتزلِّجة تدور على ساقٍ واحدة؛ فعندما تجذب ذراعَيها نحو جسدها، تدور بوتيرةٍ أسرع. وبالطريقة نفسها، إذا كان النجم الذي أسفر عن نشوء الثقب الأسود يدور ببطء، فعندئذٍ سيكون الثقب الأسود الذي سيُكوِّنه في النهاية يلفُّ بسرعةٍ كبيرة، ويُسمَّى «ثقب كير الأسود». وفي الواقع، فإنَّ معظم النجوم تدور، لأنها هي نفسها مكوَّنة من انهيار سُحب غازية ضخمة بطيئة الدوران بفعلِ الجاذبية. (إذا كانت هذه السحابة الغازية تتَّسِم بقدرٍ ضئيل جدًّا من محصلة الدوران الصافي، سيكون لدى السحابة المنهارة زخم زاوي غير صفري، وبينما تشغل المادة حجمًا يزداد صغرًا، فإنَّ الدوران النهائي للجسم المنهار سيكون سريعًا بعض الشيء على الأرجح.) وهكذا نرى أنَّ الدوران، الذي تشيع تسميتُه باللفِّ المغزلي أو الزخم الزاوي، من المرجَّح أن يكون سمةً سائدة في معظم الثقوب السوداء التي تكوَّنَت للتوِّ من انهيار المادة، إن لم يكن سمةً منتشرة في كل هذه الثقوب. نعتقد الآن أنَّ اللفَّ والدوران شيء حتمي في

الثقوب السوداء الفيزيائية الفلكية الحقيقية بقدْر ما هو حتمي في مجال السياسة الحالي (وإن كان، في تلك الحالة الثانية، ينشأ بسبب شيءٍ آخر غير حفظِ الزخم الزاوي!).

ذكرنا الآن أنَّ مُعامِلًا مُحدِّدًا فيزيائيًّا ثانيًّا، أي اللف المغزلي أو الزخم الزاوي، يُمثل سمةً خاصة تُميز كل ثقبٍ أسود عن الآخر مثلها مثل الكتلة. وبذلك فمن المُهم أن نضع في حسباننا خاصيَّتَين من خواص الثقوب السوداء ونحن ندرس 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 الموجودة بين الشحنات الكهربائية، المعروفة بالقوى الكهروستاتيكية، تُشبه قوة الجاذبية من عدة جوانب. أحد التشابُهات الرئيسية أنَّ كلتَيهما (على نطاقاتٍ كبيرة) تُعتبران أمثلةً لقوانين التربيع العكسي، التي تعني أنَّ قوة الجاذبية التي يتعرض لها جسمان لهما كتلة مُعينة تقلُّ إلى رُبع قِيمتها الأصلية عندما تُضاعِف المسافة الفاصلة بينهما. وأحد الاختلافات الرئيسية أنَّ قوى الجاذبية دائمًا ما تكون تجاذُبية، في حين أنَّ قوى الشحنات الكهروستاتيكية لا تكون تجاذُبية إلَّا في بعض الأحيان فقط (عندما تكون شحنة أحد الجسمَين مُعاكسةً لشُحنة الجسم الآخر؛ أي يكون أحدهما موجبًا والآخر سالبًا). بينما تكون تنافُرية في أحيانٍ أخرى (عندما يكون لدى الجسمَين كليهما شحنة تحمل العلامة نفسها؛ أي يكون كلاهما موجبًا أو يكون كلاهما سالبًا، فإنهما يتنافران). وبذلك فإذا كان جسمان يحملان نوع الشحنة نفسها، فعندئذٍ سيميل التنافُر الكهروستاتيكي إلى منعهما من الالتحام معًا، حتى وإن كانت الجاذبية تميل إلى جذب كليهما نحو الآخر. لذا فبينما يُمكن نظريًّا أن تكون الشحنة خاصيةً ثالثة للثقوب السوداء قد يتطلَّع المرء إلى قياسها، فإنَّ شحنة الثقب الأسود سرعان ما تُصبح متعادلةً في الواقع بفعل المادة المحيطة به. لذا من الوجيه أن نستخدِم افتراضًا عمليًّا مفاده أنَّ السمات ذات الصِّلة التي تُميِّز كل ثقبٍ أسود عن الآخر سمتان فقط: الكتلة والزخم الزاوي. هذا كل ما هنالك!

الآن، ربما تتساءل عمَّا إذا كان يمكن تمييز الثقوب السوداء بتركيبها. إذ ربما يكون أحدُها قد تكوَّن من سحابةٍ من غاز الهيدروجين، والآخر من سحابةٍ من غاز الهيليوم. فلِماذا لا يكون مصدر المادة المنهارة المتساقِطة التي أدَّت إلى نشوء الثقب الأسود ظاهرًا في الخصائص القابلة للقياس لدى الثقب الأسود الذي تكوَّن لاحقًا؟ هذا لأنَّ المعلومات لا يمكن أن تخرج من أفق الحدث! فالضوء هو الوسيلة التي يمكن من خلالها نقل المعلومات، لكنَّنا رأينا بالفعل في الفصل الأول أنه لا يستطيع الهروب من داخل أفق

الحدث المحيط بالثقب الأسود. ومن ثَمَّ، فالتركيب الكيميائي للمادة التي سقطت داخل الثقب الأسود لا يمكن أن يكون له أي تأثير على خصائص الثقب الأسود حسبما تُحدَّد من الخارج. لن يكون من الصحيح اعتبار الجاذبية شيئًا يحتاج إلى «الخروج من» الثقب الأسود. فالوجود المستمر لمجالٍ من الجاذبية خارج الثقب الأسود شيء يُرسَى أولًا في تكوين الثقب الأسود بينما يتشوَّه نسيج الزمكان. ولا يُوجَد تأثير من داخل الثقب الأسود يمكن أن يغير المجال الخارجي بعد تكوُّن أفق الحدث.

الثقوب السوداء ليس لها شَعر

عندما يُطلَب منا وصف شخصٍ آخر، فإحدى السمات المميزة التي نذكُرها كثيرًا في أوصافنا لون شَعره (وليكُن مثلًا أشقر ذو حُمرة خفيفة، أو رمادي فضي أو بني كالشوكولاتة). وأحيانًا ما تحمل طبيعة شَعر البشر أماراتٍ تشير إلى أعمارهم أو جنسياتهم. وقد تُتيح معلوماتٌ متعلقة بخصائص جسدية أخرى مثل «مؤشر كتلة الجسم» معلوماتٍ 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). يتجسَّد هذا بدقَّة 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 وُلِدت منه. لا شكله ولا تكتُّلات 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 تكتُّلات ناتئة ليُكوِّن ثقبًا أسود، سيستقر أفق الحدث المحيط به في النهاية مُكوِّنًا شكلَ اتزانٍ أملس لا يحمل تكتُّلات بارزة أو نتوءات من أي نوع. لذا فالثقب الأسود لا يمرُّ أبدًا بيومِ الشعر السيئ! كل ما يُمكن 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 فحسْب. ويُسمَّى هذا التأثير «تباطؤ الإطار المرجعي». فعند إسقاط جُسيم على أحد ثقوب كير السوداء في اتجاه نصف القطر نحو

المركز، سيكتسِب مكونات حركة غير مُتجهة في اتجاه نصف قطره (أي دورانية) أثناء سقوطه سقوطًا حرًّا في مجال جاذبية الثقب الأسود.

وهذا يعني أنَّ محور اللفِّ المغزلي لأي جُسَيم اختبار يحمل زخمًا زاويًّا (كجيروسكوب صغير مثلًا) سيتغيَّر إذا كان يسقط سقوطًا حرًّا نحو جسمٍ ضخم دوَّار، كأحد ثقوب كير السوداء. ويكأنَّ إطاره المرجعي المحلي تباطأ بفعلِ تعرُّضه لقوة سحبٍ بسبب دوران الجسم الضخم المركزي. وهذه الظاهرة، التي اكتُشِفَت عام ١٩١٨ والتي تُسمَّى تأثير «لينز-ثيرينج»، لا تحدُث في الواقع حول الثقوب السوداء فقط، بل تحدُث بدرجةٍ ما حول أي جسمٍ دوَّار. فإذا وضعتَ جيروسكوبًا دقيقًا جدًّا في مدارٍ حول كوكب الأرض، فسيتغيَّر اتجاه محور دورانِهِ بسبب تباطؤ الإطار المرجعي.

إنَّ معادلات المجال التي وضعَها أينشتاين هي التي تصِف رياضيات الثقب الأسود، وقد حلَّ كارل شفارتزشيلد، كما ذُكر أيضًا في الفصل الأول، هذه المعادلات مُطبقًا إيَّاها على حالة الثقب الأسود الثابت (غير الدوَّار)، مُحقِّقًا بذلك إنجازًا باهرًا بالنظر إلى أنه فعل ذلك في عام ١٩١٥، وهو العام نفسه الذي طرح فيه أينشتاين نظرية النسبية العامة. وبعد ذلك بكثير، تناول النيوزيلندي روي كير حالة الثقب الأسود الدوَّار. وعقب ذلك بسنواتٍ قليلة، تعمَّق الأسترالي براندون كارتر تعمُّقًا أشدَّ بكثير في استكشاف الحل الذي وضعَه كير. إذ دَرَس كارتر نتائج دالَّةِ كير المترية دراسةً شاملة عميقة. وأثبت أنَّ الثقب الأسود الدوَّار يُسبب دوامةً دوَّارة شديدة في نسيج الزمكان تُحيط به، وتنشأ بسبب تباطؤ الإطار المرجعي. ولِتَخيُّل هذه الدوَّامات، يُمكن أن نضرب مثالًا لها بالزوبعة؛ فبالقُرب من مركز الزوبعة، يلفُّ الهواء بسرعة حاملًا معه أي شيء في مساره، سواء أكان تبنًا في حقل من التبن أو رمالًا في صحراء. وكلما ابتعَدْنا عن مركز الزوبعة، يدور الهواء (وبالتبعية التبن أو الرمال) بوتيرة أبطأ. ينطبق هذا أيضًا على نسيج الزمكان المحيط بالثقب الأسود الدوار؛ فبعيدًا 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 الدوَّار (ثقب كير) يكاد يُطابِق الثقب الأسود غير الدوار (ثقب شفارتزشيلد)، باستثناء أنَّ ازدياد سرعة دوران الثقب الأسود يجعل بئر طاقة الوضع الناجمة عن قوى الجاذبية أعمق؛ أي إنَّ ثقب كير الأسود يُكوِّن بئرًا أعمق من طاقة الوضع الناجمة عن الجاذبية من تلك التي يُكوِّنها ثقب أسود من ثقوب شفارتزشيلد له الكتلة نفسها، ولذا فإنَّ ثُقب كير الأسود يُمكن أن يكون مصدر

طاقةٍ 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، لكن أفق الحدث المحيط بثُقب كير الأسود يعتمد على الكتلة والزخم الزاوي كليهما.

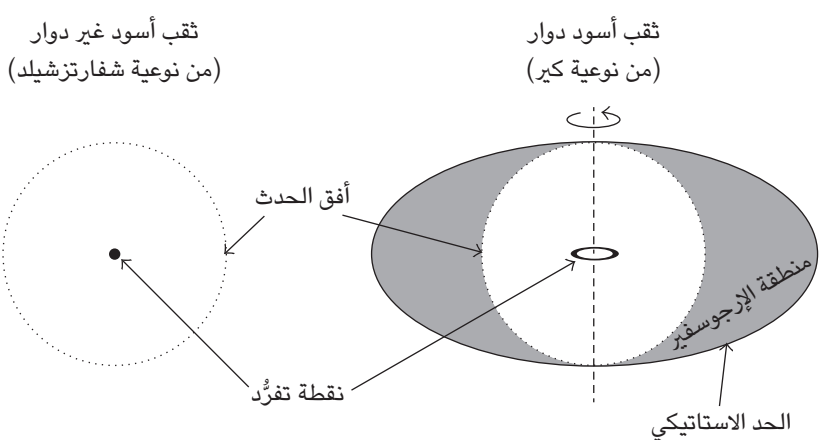
ويبقى السؤال عمَّا إذا كان يُمكن أن يُوجَد، ولو نظريًّا حتى، أيُّ نقاط تفرُّد في نسيج الزمكان ليست مُحاطة بأيٍّ من مناطق أفق الحدث ومَخفيَّة بين طيَّاتها، أو ما يُسمَّى «نقاط التفرد العارية»، دون إجابة حتى الآن. بحُكم الطبيعة، فكلُّ حالات الثقوب السوداء التي تُمثِّل حلولًا لمعادلات المجال التي وضعَها أينشتاين مُحاطةٌ بمناطق من آفاق الحدث، وكما هو مُوضَّح في الفصل الأول، لا ضوء — وبالتبعية لا معلومات — يُمكن أن يهرب من آفاق الحدث. إذ يُعتقَد أنَّ كل نقاط تفرُّد الثقوب السوداء مُحاطة بنطاق آفاق الحدث، ولذا فهي ليست «عارية»؛ ولذلك يستحيل الوصول إلى معلوماتٍ مباشرة عن نقطة التفرُّد من بقية الكون الواقع خارجها. صاغ عالِم الرياضيات البريطاني روجر بنروز الفرضية المُسمَّاة فرضية الرقابة الكونية، وهي تنصُّ على أنَّ كلَّ نقاط التفرُّد في نسيج الزمكان مُكوَّنة من ظروفٍ أولية مُعتادة، ومَخفية بين طيَّات آفاق الحدث، وأن الفضاء ليس فيه نقاط تفرُّد عارية.

متي يكون مقدار الزخم الزاوي أكبر ممَّا ينبغي؟

يُوجَد حدٌّ أقصى لمقدار الزخم الزاوي الذي يُمكن أن يصِل إليه الثقب الأسود. ويعتمِد 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 ثُقب كير الأسود المتطرف. ومن الممكن إظهار أنَّ المرء إذا حاول زيادة الزخم الزاوي لثقبٍ أسود، ليصنع ثقبًا أسود متطرفًا من نوعية ثقوب كير، بإطلاق مادة سريعة الدوران داخله (أي زيادة سرعة دورانه كأنك تُقلِّبه بملعقة)، فإن قوى الطرد المركزي عندئذٍ تمنع المادة حتى من دخول أُفق الحدث.

وعلى مسافةٍ أبعد بعض الشيء من أفق الحدث المحيط بثقبٍ أسود دوَّار، يقع سطح رياضي 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 مرجعي يُمكن تحقيقه ماديًّا داخل الحد الاستاتيكي يدورُ حتمًا.

وداخل نطاق هذا السطح، يدور الفضاء بسرعة كبيرة جدًّا لدرجة أنَّ الضوء نفسه يُضطر إلى الدوران مع الثقب الأسود؛ أي إنه من المستحيل أن يظل ساكنًا. هذا وتُعرَف المنطقة الواقعة بين الحد الاستاتيكي وأفق الحدث باسم الإرجوسفير، لكنها، كما يتضح في شكل ٣-١، ليست كروية، وهذا مُحيِّر بعض الشيء لأنَّ اسمها يُوحي بعكس ذلك. إذ تكون منطقة الإرجوسفير أكبر بكثيرٍ من أفق الحدث مع الاتجاه نحو خط الاستواء، لكن نصف قُطرها يقترِب من نصف قُطر أفق الحدث كلما اتجهنا نحو القطبَين إلى أن يُصبِح مُساويًا له عندهما. وبذلك يكون شكل الإرجوسفير الناتج شِبه كروي مُفلطحًا، على غرار شكل إحدى ثمرات يقطين جاراديل (من دون الساق). غير أنَّ المقطعَين الأولَين من كلمة «إرجوسفير» مُشتقَّان من اسم «إرجون» اليوناني الذي يعني «الشغل» أو «الطاقة» (كما في كلمة «إرجونوميكس» التي تعني دراسة الناس في بيئات العمل)، وقد اشتُقت منه أيضًا وحدة قياس الطاقة القديمة، الإرج. ومن المثير للاهتمام أن نُضيف أنَّه يُوجَد فعل يوناني يُنطَق «إرجو»، ويعني الإحاطة بالشيء وإبقاءه بعيدًا، وهذا الوصف مناسب لطبيعة منطقة الإرجوسفير. وربما كان هذا حاضرًا في ذهن روجر بنروز الذي صاغ اسم هذه المنطقة المحيطة بثقب أسود دوَّار وديميتريوس كريستودولو الذي أيَّد صحته. وتكمُن أهمية الإرجوسفير في أنها المنطقة التي يمكن فيها استخراج الطاقة من الثقب الأسود.



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

ولأن الجزء الواقع داخل فضاء منطقة الإرجوسفير يدور، فإن جزيئات المادة الموجودة داخل هذا الفضاء أيضًا تُجرَف إلى حركة دورانية. لذا تُخزَّن طاقة دورانية كبيرة في هذا الدوران الذي يُدوِّره الفضاء، وهذه نقطة مُهمة جدًّا سنعود إليها في الفصل الثامن.

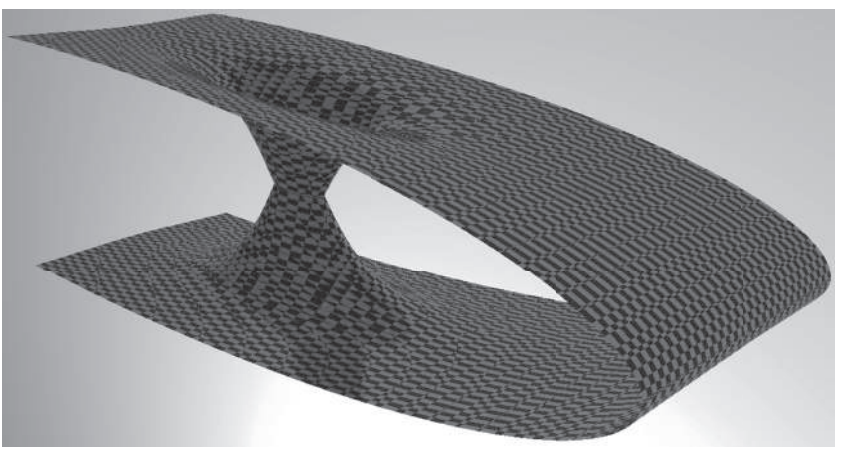
الثقوب البيضاء والثقوب الدودية

تتَّسِم معادلات أينشتاين المتعلقة بنظرية النسبية العامة بأنها غنية جدًّا وتُتيح حلولًا مختلفة كثيرة تصِف نُسَخًا بديلة من نسيج الزمكان المنحني. وهذا يوفِّر لدارسي الكون مصدرًا لا ينضب تقريبًا من الأكوان المُحتمَلة ليَصِفوها ويتأمَّلوها. صحيح أنَّ نوعية الكون الذي نعيش فيه بالفعل لا يُمكن تحديدها إلَّا 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 يتخيَّلها علماء الفيزياء الرياضية هو ما يُسمَّى بالثقب الأبيض. يتصرف الثقب الأبيض كالثقب الأسود تمامًا، ولكن مع عكس اتجاه الزمن (تخيَّل فيلمًا يُعرَض بتسلسُلٍ عكسي من الأمام إلى الخلف). فبدلًا من أن يمتص المادة، يقذفها خارجًا. وبدلًا من أن يُشكِّل أفق الحدث المُحيط به منطقة لا يمكن الهروب منها أبدًا، يَحرسُ منطقة لا يمكن لأي شيء دخولها. فحالما تخرج المادة من ثقبٍ أبيض، لا يمكنها العودة إلى هناك؛ ويكون مُستقبلها كله خارِجَه. وكما سنرى في الفصل السادس، يتشكَّل الثقب الأسود من نجمٍ منهار ولا بدَّ أن يتبخَّر في النهاية وفق قوانين ميكانيكا الكم إلى إشعاع هوكينج (انظر الفصل الخامس). أمَّا الثقب الأبيض، فلا يُمكن أن يَنتُج إلَّا من الإشعاع الذي يتجمَّع تلقائيًّا، لسببٍ ما، ليكوِّن ثقبًا أسود. ليس من السهل فَهْم الكيفية التي يمكن أن يحدث بها هذا في الواقع، وفوق ذلك، أثبت دوجلاس إيردلي أنَّ الثقوب البيضاء غير مُستقرة بطبيعتِها.

وعندما كان أينشتاين وتلميذه ناثان روزن يُجرِّبان طُرقًا مختلفة لحل معادلات أينشتاين في ثلاثينيَّات القرن العشرين، وجدا حلًّا مُثيرًا للاهتمام. إذ توصَّلا إلى أنه إذا أمكَن أن تكون منطقة من نسيج الزمكان منحنيةً بشدة، فربما يُمكن أن تُصبِح مطويةً بما يكفي للتوصيل بين جزأين من نسيج الزمكان، كانا مُنفصِلَين سلفًا بمسافةٍ كبيرة، بواسطة جسر صغير، أو ثُقب دودي، كما هو موضح في شكل ٣-٢. ودائمًا ما كانت المسافات الهائلة الفاصلة بين النجوم والمجرات غير مواتية لرغبة أولئك الكُتاب الذين

يريدون تقديم عروض درامية بشرية على مسرحٍ كوني، غير أنَّ الثقوب الدودية (المعروفة أيضًا باسم جسور أينشتاين-روزن) أتاحت للكُتاب آلية الحبكة المثالية التي يستطيعون بها نقل أبطال رواياتهم الأخيار والأشرار إلى هناك. يُعَد هذا الابتكار الرياضياتي بمثابة نعمة بأتمِّ معنى الكلمة لكُتاب روايات الخيال العلمي، لأنه يُتيح وسيلةً جاهزة لقطعِ مسافاتٍ هائلة عَبر الفضاء، وبذلك يدعم نجاح العديد من آليات الحبكة التي قد تبدو مُختلَقة تمامًا وغير قابلة إطلاقًا للتصديق. ولكن تجدُر الإشارة مجدَّدًا إلى أننا لا نملك أدلة رصدية على وجود الثقوب الدودية في كوننا بالفعل. وفوق ذلك، تُوجَد أدلة نظرية كثيرة بعض الشيء على أنَّ الثقب الدودي، فور تكوُّنه، لن يبقى مُستقرًّا فترةً طويلة. إذ يبدو أنَّ إبقاء الثقب الدودي مفتوحًا يستلزِم كميةً كبيرة من مادةٍ ذات طاقة سالبة، في حين أنَّ كل المادة العادية لها طاقة موجبة (هذا مرتبط بحقيقة أنَّ قوى الجاذبية عادة ما تكون تجاذُبية على الدوام). ومن ثَمَّ، فمرور مادة عادية عبر ثقبٍ دودي ربما يكون كافيًا لإنهاء استقراره وتدميره، ما يجعله يتحول إلى نقطة تفرُّد في ثقب أسود.



شكل ٣-٢: ثقب دودي يصِل بين منطقتَين في نسيج الزمكان كان من المفترَض أن تكونا مُنفصلتَين لولاه.

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

طريقٍ مختصَر هائل عبر مساحة شاسعة من الفضاء فحسب، بل ستسمح أيضًا للمسافر بالعودة في الزمن إلى الوراء. إذ يُمكن للمرء حينئذٍ إنشاء مُنحنَيات مُغلقة مُحاكية للزمن؛ أي حلقات في نسيج الزمكان تُشكِّل فيها المخاريط الضوئية دائرةً مغلقة (انظر شكل ٣-٣) بحيث يستطيع شخصٌ مسافر على طول منحنًى مُغلَق مُحاكٍ للزمن أن يُكرِّر التجارب نفسها التي عاشها مرارًا وتَكرارًا ببساطة، كما يظهر في فيلم «يوم مُكرَّر» (جراوندهوج داي).

وفي الحقيقة، تُوجَد عدة حلول لمعادلات أينشتاين، بالإضافة إلى حلول الثقوب الدودية، لها هذه الخاصية المُقلِقة المنافية للحسِّ المنطقي. ففي عام ١٩٤٩، وجد عالم الرياضيات كيرت جودل حلًّا يصف كونًا دوَّارًا، وهذا الحل يتضمَّن النوعَ نفسَه بالضبط من المنحنيات المغلقة المحاكية للزمن التي تمرُّ عَبر الأحداث مرارًا وتَكرارًا في حلقةٍ لا تنتهي من «يوم مُكرر». (من الواضح أنَّ «حُرية الإرادة» ليست جزءًا من معادلات المجال!) صحيح أنَّ الجزء الذي يُعتقَد أنَّ له أهمية مادية حقيقية في العالم الفعلي من حلِّ «كير» هو ذلك الذي يصف نسيج الزمكان خارج أفق الحدث. ولكن لم يتَّضِح ما إذا كان الجزء المتعلق بما يوجَد داخل أفق الحدث من حل «كير»، وإن كان سليمًا من الناحية الرياضية، له أي أهمية مادية. ففي هذا الجزء من حلِّ كير، لا تكون حالة التفرُّد مجرد نقطة (مثلما تكون في الثقب الأسود غير الدوار)، بل تأخُذ شكل حلقةٍ سريعة الدوران (لكنَّ صحة ذلك من الناحية المادية قائمة أساسًا على مجرد تخمينات). وتكون هذه المتفردة الشبيهة بالحلقة محاطة بمنحنيات مُغلقة محاكية للزمن. وعلى هذا المنحنى، يكون مُستقبلك جزءًا من ماضيك أيضًا، ويُصبح ممكنًا لك من الناحية النظرية أن تقتُل جدك أو جدتك قبل أن يلِدا والدَيك! 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 لدَينا نظرية تربط ميكانيكا الكم (التي تصف الأشياء الصغيرة جدًّا) بنظرية النسبية العامة (التي تصف الأشياء الضخمة جدًّا)، أي ليس لدينا نظرية عن الجاذبية الكمية. فنحن لا نعرف فيزياء الأجسام التي تتَّسِم بكتلة هائلة لكن حجمها صغير جدًّا. ويرى معظم الفيزيائيين أننا بحاجةٍ إلى هذا لنفهم سلوك نسيج الزمكان بالقُرب من نقاط التفرُّد فهمًا تامًّا. ومن ثَمَّ، قد يكون السبب في أنَّ هذه الحلول الغريبة لمعادلات أينشتاين لا تتحقَّق بالفعل في الكون هو أنَّها محظورة أصلًا بحُكم 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، وسَمَّى هذا المبدأ «فرضية حماية التسلسُل الزمني». وقال ساخرًا إنَّ هذا هو المبدأ الأساسي الذي يُبقي الكون آمنًا للمؤرِّخين.

شكل ٣-٣: منحنًى مُغلق مُحاكٍ للزمن حيث يُصبح مُستقبلك هو ماضيك.

يُوجَد الكثير من السِّمات والظواهر المتعلقة بالأجزاء الداخلية من الثقوب السوداء الدوارة يكاد يتجاوز فَهمنا للفيزياء الأساسية، ولذا يصير جزءٌ كبيرٌ من وصفِنا لها قائمًا على مجرد تكهنات. وعلى النقيض من ذلك، فدوران الثقوب السوداء وتأثيرها في مُحيطها لهما أهمية عملية هائلة لفَهم ما نستطيع رؤيته بتلسكوباتنا. ولذا فخطوتنا التالية هي التفكير بمزيدٍ من التفصيل فيما يحدُث للمادة عندما تسقط في ثقب أسود.

الفصل الرابع

السقوط في ثقبٍ أسود ...

ما الحد الأقصى للقُرب؟

قبل أن يتسنَّى لنا التفكير بالتفصيل فيما سيحدُث إذا قادك حظك العثِر، أنت أو أحد مُتعلقاتك، إلى الوقوع داخل ثقبٍ أسود، من المهم أن نفهم تأثير الموضع الذي ينظر منه الراصِد، أو الإطار المرجعي. هذا يعني أنَّ الراصدَين المختلفَين يَرَيان أشياء مختلفةً تمامًا. فالماهية الدقيقة للموضِع الذي تنظر منه إلى جسمٍ يسقط في ثقبٍ أسود تعتمد على مقدار بُعدك عن هذا الجسم (وما إذا كنتَ أنت ذلك الجسم أصلًا). تخيَّل جُسيمًا من الضوء، أي فوتونًا، يقع خارج أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود؛ نظرًا إلى أنه يقع خارج الأفق، فإنه يستطيع الهروب نظريًّا. أمَّا داخل أفق الحدث، فيكون الوضع مختلفًا، إذ لا يستطيع الفوتون الهروب من مجال جاذبية الثقب الأسود. ولكن حتى خارج أُفق الحدث، فالفوتون الذي يتحرَّك بعيدًا عن الثقب الأسود لن يهرُب منه سالِمًا تمامًا. إذ يتعرض الفوتون لفُقدان جزءٍ من طاقته بسبب الشغل الذي يتعيَّن عليه أن يبذُله لمقاومةِ الجاذبية. وهذا مثالٌ لبئر طاقة الوضع الناجمة عن قوى الجاذبية؛ فمِثلما أنَّك تحتاج إلى طاقةٍ لتسحب نفسك إلى الأعلى خارج بئرٍ عميقة، يحتاج الفوتون إلى بذل طاقةٍ ليسحب نفسه بعيدًا عن المنطقة القريبة من جسمٍ ضخم. وقد قِيس مقدار هذا التأثير حتى لدى فوتونات تتحرك في مجال جاذبية الأرض. إذ تتناسَب طاقة الفوتون عكسيًّا مع طوله الموجي؛ أي إنَّ الفوتون العالي الطاقة له طول موجي قصير في حين أنَّ الفوتون المنخفِض الطاقة له طول موجي طويل. ويفقد الفوتون طاقةً بينما يُحاول التراجُع مُبتعدًا عن الثقب الأسود، لذا يزيد طوله الموجي. وهذا يُغيِّر لون الضوء، إذ يبتعِد عن اللون الأزرق (ذي الطول الموجي القصير) متجهًا نحو اللون الأحمر (ذي الطول الموجي الطويل) الذي يُمثِّل نهاية

الطيف (يُسمَّى هذا التأثير بالانزياح نحو الأحمر). وهذا النوع من الانزياح نحو الأحمر، المعروف بالانزياح نحو الأحمر بفعلِ الجاذبية، ينشأ حيث يكون نسيج الزمكان نفسُه ممطوطًا، أو مُنحنيًا، بفعلِ تأثير جسمٍ ذي كتلةٍ هائلة كالثُّقب الأسود مثلًا. يُشار إلى أنَّ جون ميشيل، مع أنه كان يحمل أفكارًا مُبتكَرة مُهمة عن النجوم المظلِمة، فقد أخطأ حين ظنَّ أنَّ سرعة الضوء تقلُّ وهو يحاول الخروج من بئر طاقة الوضع. إذ صِرنا نعرف الآن أنَّ طول الضوء الموجي (وتردُّدَه بالتَّبعِية) يتأثر بوجود نجمٍ ضخم.

ماذا يحدث للزمن بالقُرب من ثقبٍ أسود؟

وصفتُ في الفصلَين الأول والثاني كيف يتشوَّه نسيجُ الزمكان بوجود كتلةٍ ما (أي جسم يُنتِج مجالَ جاذبيةٍ خاصًّا به) وهذا يعني أنَّ التأثير لا يقتصِر على فضاء المكان القريب من الثقب الأسود، بل يتأثر الزمان القريب منه أيضًا.

تخيل أنك تُريد البقاء على بُعد مسافةٍ آمنة من أحد ثقوب شفارتزشيلد السوداء لكنك تريد معرفة المزيد عن سلوك الزمان بالقُرب منه. ولذا اتخذتَ الترتيبات اللازمة لتركيز ٢٦ راصدًا ثابتًا بالقُرب من أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود، على أن يكونوا خارجه بما يضمن سلامتهم بالتأكيد. يُسمَّى هؤلاء الراصدون بالحروف من الألف إلى الياء، ويُرتَّبون ضِمن طابور، على أن يكون الراصد «أ» هو الأقرب إلى أفق الحدث ويكون الراصد «ي» هو الأقرب إليك، وأنت تقِف بعيدًا على بُعد مسافةٍ آمنة. يحمل كل راصدٍ من الألف إلى الياء ساعةً دقيقة لقياس توقيته المحلي، في مَوقعه المحدد. وتخيَّل أنك، في إطار الاتفاق لإقناع هؤلاء الراصِدين المُسمَّين بالحروف من الألف إلى الياء بالمشاركة في هذه التجربة، كنتَ قد عرضتَ على كلٍّ منهم حافزًا وأهديتَه ساعة إضافية غير عادية ذات ضبط مُعدَّل، بحيث يكون الوقت الذي تقيسه مساويًا للوقت الظاهر على ساعتك وأنت موجود على بُعد مسافتك الآمنة. سيجد المشارك «ي»، الأقرب إليك، أنَّ الساعتَين اللتَين بحوزته تقرآن وقتَين مختلفَين قليلًا لأنَّ ساعته الخاصة، التي تقيس التوقيت المحلي (أي ما نُسمِّيه «الزمن الخاص» بالمصطلحات المتخصِّصة)، ستمضي بوتيرةٍ أبطأ قليلًا من الساعة الهدية التي يُطابق وقتُها الوقتَ الذي تقيسه وأنت على بُعد مسافتك الأكثر أمنًا والأبعد بعض الشيء. وعند تجميع نتائج المشاركين من المشارك «أ» إلى المشارك «ي» والمقارنة بينها، تُظهِر تأثيرًا لافتًا؛ فكلَّما كان الراصد أقرب إلى ثقبٍ أسود، فإنَّ الساعة التي تقيس الوقت «تمضي بوتيرةٍ أبطأ» مُقارنةً بالزمن البعيد حسبما يظهر على ساعات

المشاركين المُهداة المضبوطة خصِّيصى. ويُعرف هذا التأثير، الذي وُصِف في نظرية النسبية العامة لأينشتاين، باسم تمدُّد 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 (أيًّا كان نوعها؛ سواء ذرية أو بيوكيميائية) ستمضي بوتيرةٍ أبطأ مقارنة بالساعة التي يستخدمها راصدٌ بعيد.

لنفترض أنك كنتَ تُسخِّر تجاربك لأداء مهامَّ متعدِّدة، وذلك باستخدام مجموعة مختلفة من ٢٦ راصدًا على بُعد المسافات نفسها من ثقبٍ أسود مختلف. يُرتَّب الراصدون بنفس طريقة ترتيب الراصدين الذين يحملون الأسماء نفسها بالقُرب من الثقب الأسود الأول. ولكن في الحالة الثانية، تبلغ كتلة الثقب الأسود ضعف كتلة الثقب الأسود في تجربتك الأولى. ويجب تغيير ضبط الساعات غير العادية التي أعددتَها سلفًا لتكون هدايا لهذه المجموعة الثانية من الراصِدين تغييرًا جذريًّا كما غُيِّر في تجربتك الأصلية، لكنَّ المعدل الذي يجب أن يُعدَّل وفقًا له ضَبطُ كل ساعةٍ غير عادية يُساوي بالضبط ضعف معدل التعديل المطلوب للساعة المقابِلة في المجموعة الأولى من الساعات المُهداة عند المسافة نفسها بالضبط من مركز الثقب الأسود الأول الذي تبلغ كتلته نصف كتلة الثاني. وهكذا تكون تأثيرات تمدُّد الزمن هذه أكبر كلما كانت كتلة الثقب الأسود أكبر، بل وتُصبح أشدَّ كلما اقتربت من أفق الحدث.

يُشار إلى أن هذا التمدُّد الزمني ليس ناتجًا عن وجود مسافةٍ إضافية يقطعها الضوء (أي إشارة قياس الوقت) من ساعةٍ أقرب إلى الثقب الأسود، وبالتبعية أبعد عنك، باعتبار أنَّك الراصد الذي تقِف على بُعد مسافةٍ آمنة؛ إذ لا يقتصِر الأمر على مجرد وجود إزاحةٍ زمنية بالنسبة إلى راصدٍ موجود على مسافةٍ أبعد من الثقب الأسود. فكلما اقتربت ساعة من ثقب أسود، كان المعدل الذي يُقاس به تدفق الزمن على تلك الساعة أبطأ، بغضِّ النظر عن ماهية الوسائل الموثوقة التي تَستخدِمها لقياس هذا التدفُّق الزمني. إذ إنَّ الزمن نفسه يُمَط (أو يتمدَّد، في الواقع).

فما النتيجة المنطقية لتمدُّد الزمن بالقُرب من الثقب الأسود؟ هذا يجعل التأثيرات التي تحدُث في الإطار المرجعي الخاص براصدٍ قريب جدًّا من الثقب الأسود والتي يمكن قياسها مختلفةً تمامًا عن التأثيرات التي تحدُث في الإطار الرجعي لراصدٍ بعيدٍ جدًّا، فهُما عالمان مُنفصِلان في الحقيقة.

لتُفكر الآن فيما سيحدُث إذا كان الراصد «أ»، في تجربتك الأولى، مهملًا بعض الشيء وأسقَط ساعته الأولى (الساعة التي يستطيع أن يقيس بها الزمن الخاص في موقعه) بحيث تسقط نحو الثقب الأسود. وبالرغم من هذه الكارثة، بقِيَت الساعة الهدية، التي أغريتَه بها ليشارك في التجربة، آمنة لأنه ظلَّ ممسكًا بها بإحكام. ولتفترِض أنك أنت والراصد «أ» ترَيان ساعته الأولى تتحرك نحو الثقب. والساعة تجد نفسها تتحرك إلى داخل الثقب الأسود بسرعةٍ متزايِدة. ستُلاحظ أنت والراصد «أ» تدريجيًّا أنَّ الوقت الذي تقرآنه على الساعة الساقطة يُصبح أشدَّ اختلافًا من ذي قبل عن الوقت الظاهر على ساعة الراصد «أ» الأخرى (أي الساعة التي ضُبِطَت لتمضي بوتيرةٍ أسرع من الساعة المحلية ليتسنَّى لها قراءة نفس الوقت الذي يُكافئ وقتك). وبعد مرور بعض الوقت، ستبدأ أنت والراصد «أ» في ملاحظة أنَّ الزمن على الساعة الساقطة يتوقف. فالفوتونات المنبعِثة عند أُفق الحدث نحو راصدٍ بعيد يبدو أنها تبقى هناك إلى أجل غير مُحدَّد. ومن ثَمَّ، فأيُّ راصدٍ خارجي لن يعرف ما يحدُث لأي شيءٍ يسقط داخل الثقب الأسود بعدما يتجاوز حدًّا مُعينًا ويُصبح ضِمن نطاق نصف القطر الحرج لأفق الحدث. ولذا يمكن اعتبار أفق الحدث فجوةً في نسيج الزمكان. لن يخرج أي ضوء من أفق الحدث، كما رأينا في الفصل الأول. ولهذا السبب فهو أسود. ولكن في الإطار المرجعي للساعة الساقطة التي تهوي إلى الأسفل خلال أفق الحدث، لا تكون الحياة ثابتةً على حالها إطلاقًا. فمِن مَوضِع النظر الذي تُوجَد عنده الساعة، ستنتقِل إلى نقطة التفرُّد في جزءٍ من ١٠ آلاف من الثانية فقط، بافتراض أنَّ كتلة الثقب الأسود كانت تساوي كتلة شمسنا ١٠ مرات. وإذا كان حظُّ الساعة سيئًا وقادها إلى السقوط داخل ثقبٍ أسود فائق الضخامة ذي كتلة تساوي كتلة شمسنا مليار مرة (كالذي سنُصادِفه عندما ندرس أشباه النجوم في الفصل الثامن)، فإن زمن رحلتها التي تخوضها داخليًّا بين أفق الحدث الأكبر بكثير ونقطة التفرُّد سيكون بضعَ ساعاتٍ بتمهُّل أكبر.

قوى المد والجزر بالقُرب من ثقبٍ أسود

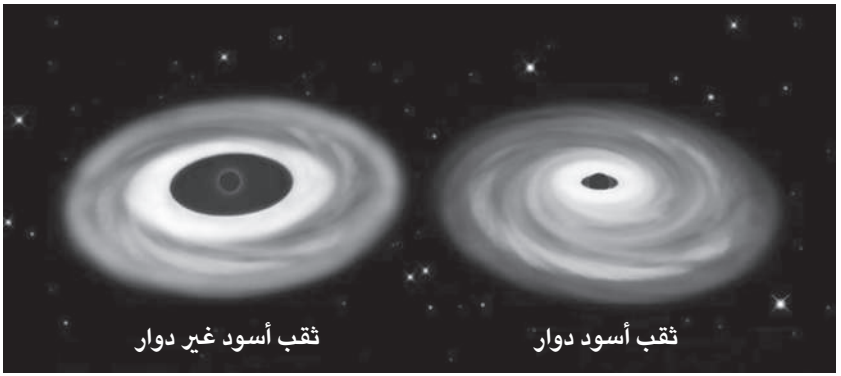
لتفترِض أنَّ الراصد «أ» يتساءل بينَه وبين نفسه في لحظة ضعفٍ عن إمكانية القفز دون تردُّد بقدمَيه نحو الثقب الأسود على أمل استعادة الساعة التي أسقطها. ماذا سيحدُث؟ سيتبيَّن أنَّ مثل هذه القفزة ستكون خطأً جسيمًا، لأنَّ نجاته ستكون مُستحيلة. فالفارق بين قوة الجاذبية التي تؤثر في قدمَيه والقوة التي تؤثر في رأسه سيُصبح هائلًا. وهذه سمة من سمات أي مجال قُوًى يخضع لقانون التربيع العكسي، مثل مجال الجاذبية المتولِّدة

من جسمٍ ضخم. وصحيح أنَّ كوكب الأرض بعيد بعض الشيء عن القمر، ولكن حتى الفروق البسيطة في قوة الجاذبية التي تتعرَّض لها الأرض عند جانبَين متقابلَين بسبب القمر، والمعروفة باسم المد والجزر، تُعَدُّ من الأسباب الرئيسية في حدوث المد والجزر نحو مرتَين في اليوم. وبوجهٍ عام، تُسمَّى هذه القوى الناتجة من وجود اختلافاتٍ في الجاذبية في أماكن مختلفة قوى المد والجزر. وصحيح أنَّ تفاصيل حدوث المد والجزر غنية بعوامل إضافية مثل قوة الجاذبية الناتجة من زاوية القمر النسبية والأشكال التفصيلية للكُتَل القارية. ولكن حتى لو كان سطح الأرض كلُّه مُغطًّى بالمحيطات دون اليابِسة، لَظلَّ المد والجذر موجودًا، ولتغيَّرت سعة نطاق تفاوت مستوى سطح البحر بنحو ٢٠سم مرتَين يوميًّا، وذلك ببساطةٍ نتيجة اختلاف قوة الجاذبية التي تتعرَّض لها نقاط مختلفة على الكوكب على بُعد مسافاتٍ مختلفة من الشمس.

دعنا الآن نفكر في المسافة الأقصر بيني وبين مركز الأرض. فبينما أكتب هذا الفصل قاعدًا، يقع رأسي في مستوًى أعلى بأكثر من مترٍ كامل من مستوى قدميَّ المرتكزتَين على أرضية غرفة مكتبي. وبذلك فإنَّ قدميَّ أقرب إلى مركز الأرض من رأسي. ولأن قوة الجاذبية تتبع سلوكًا خاضعًا لقانون التربيع العكسي ويكأنَّ كتلة الأرض كلها موجودة في مركز الأرض، ولأنَّ قدميَّ تقع على بُعد مسافةٍ أقصر من هذا المركز، فإنهما تشعران بأنهما مشدودتان نحو مركز الأرض بقوةٍ، أو جذب، أشدَّ من القوة التي يشعر بها رأسي. لكنَّ الفارق الفعلي ضئيل بعض الشيء؛ فلأنَّ فرق الارتفاع يبلُغ مترًا واحدًا، يكون الفرق في قوة الجاذبية ثلاثة أجزاء في ١٠ ملايين. وهذا فرق طفيف جدًّا لأنني 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 نقطتَين مفصولتَين بمترٍ واحد فقط في الاتجاه نحو الثقب الأسود سيكون أشدَّ بكثيرٍ جدًّا. شديد جدًّا لدرجة أنَّ قدمَي الراصد «أ»، عندما يكون قريبًا من نقطة التفرُّد، ستتعرَّضان لشدٍّ يمطهما بعيدًا عن ركبتَيه وبقية جسده إلى حدٍّ يتجاوز قدرة أوتاره وعضلاته على أن تبقى مُلتحِمة، وسيتعرَّض لإطالةٍ تجعله أشبَهَ بإحدى شعيرات المعكرونة. من الأفضل ألَّا تقفِز.

نسيج الزمكان الحركي

يُحدث دوران الثقب الأسود فرقًا مهمًّا فيما يتعلق بمدى قرب المادة التي تدور حوله، وهذا مرتبط بكمية الطاقة التي يمكن استخلاصُها منه. وبناءً على أبحاث روي كير وحلِّه



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

لمعادلات المجال التي وضعَها أينشتاين، نعلم أن أصغر مدارٍ يمكن أن يدور فيه جُسَيم حول ثقبٍ أسود دون السقوط داخله يعتمِد على مدى سرعة دوران الثقب. فكلَّما كان الثقب الأسود يدور بوتيرةٍ أسرع، تستطيع المادة أن تكون أقرب إليه دون أن يبتلِعها، كما هو مُوضَّح في شكل ٤-١. فإذا أسقطتَ شيئًا إلى الأسفل مباشرة نحو ثقبٍ أسود دوَّار، 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 ممكنٌ خارج منطقة الإرجوسفير باستخدام الصواريخ، لكن ذلك مُستحيل داخلَها. ففي داخل منطقة الإرجوسفير الخاصة بثقبٍ أسود دوَّار، خارج أفق الحدث المحيط به مباشرة، لا شيء يمكن أن يبقى ساكنًا. إذ إنَّ الثقب الدوار يسحَب نسيج الزمكان، ومحتوياته بالتبعية، معه بالفعل أثناء دورانه. ومن السمات الأخرى لتباطؤ الإطار المرجعي بهذه الطريقة أنَّ الضوء نفسه، حتى لو كان ينتقِل عكس الاتجاه الذي يدور فيه الثقب الأسود، سيُحمَل في الاتجاه المعاكس حول الثقب.

الدوران حول ثقبٍ أسود

من المُثير للاهتمام أن نفكر في تسلسُل الأحداث المُحتمل إذا تحوَّلَت شمسنا تلقائيًّا إلى ثقبٍ أسود الآن. أول ما يمكن أن تعرفه أنت أو أنا سيكون بعد ثماني دقائق؛ فضوء

الشمس الربيعي الجميل الذي أكتبُ مُستعينًا به سيتوقَّف فجأة. ومع أنَّ شدة إضاءة النجم المفرد الذي نُسمِّيه شمسنا ضئيلة جدًّا مقارنة بشدة إضاءة أشباه النجوم وأشباه النجوم الميكروية التي سنُناقِشها في الفصل الثامن، فإنه قريب من الأرض بما يكفي ليُمِدَّ كوكبنا بنحو كيلووات لكل مترٍ مُربَّع من الطاقة في المتوسط. ومن اللافت أنَّ ذلك كان كافيًا حتى الآن للحفاظ على استدامة كل أشكال الحياة على الكوكب، إذ يُمكِّن النباتات من النمو، ثم تأكُلها الحيوانات التي تأكلها حيوانات أخرى بعدئذٍ. دائمًا ما كانت الشمس هي المُحرِّك الرئيس وراء كل ذلك. ولكن إذا توقَّف الاندماج في الشمس وآل مصيرها (على عكس كل التوقُّعات) إلى الانهيار مكونةً ثقبًا أسود، فعندئذٍ ستُصبِح معتمةً جدًّا وسنموت كلنا في النهاية. (هذه رؤية مُستقبلية كئيبة بعض الشيء، لكني أحثُّ القارئ على أن يصبر عليها حتى الفصل السابع، حيث نتعلم أنَّ الشمس ليست من نوعية النجوم التي يُمكن أن تكوِّن ثقبًا أسود؛ لأن وزنها أخف من اللازم لهذا.) ولكن على المستوى الديناميكي، لا شيء سيتغير إطلاقًا فيما يتعلق بكوكب الأرض والمجموعة الشمسية بكواكبها والكواكب القزمة والكويكبات ككل. فكل الأجسام الضخمة المستقرة في مدارات حول الشمس ستظل في المدارات نفسها بدرجةٍ كبيرة جدًّا. فاستنادًا إلى طبيعة الجاذبية، ستظل قوى الجذب الناشئة عن الجاذبية خارج الشمس كما هي دون تغيير، سواءٌ أَبَقِيَت مساحة نطاقها كما هي الآن، أم انهارت إلى نقطة تفرُّد ضِمن أفق حدثٍ يبلغ نطاقه ثلاثة كيلومترات. وكذلك فإن انهيار جسم كروي من كل جوانبه بالمعدل نفسه، بسبب تأثير الجاذبية، إلى ثقب أسود لن يُغير إطلاقًا في الزخم الزاوي للأجسام التي تدور حوله في مدارات، ولذا فالأنماط والتنبُّؤات المستقبلية القائمة على البروج الفلكية وظواهر المد والجزر في المجموعة الشمسية ستبقى على حالها دون أي تغيير إذا غاب ضوء الشمس.

ولكن من المُحتمَل أن تنشأ مدارات جديدة، وستكون أقربَ بكثيرٍ إلى الشمس المتحوِّلة إلى ثقبٍ أسود ممَّا كان ممكنًا في السابق عندما كانت البلازما الشمسية حائلًا يمنع اقترابها. ورغم ذلك، لا يُمكن أن تكون هذه المدارات قريبةً جدًّا من أفق الحدث. فتفاصيلُ تُشوِّه نسيج الزمكان بفعلِ نقطة تفرُّدٍ ذات كتلة تَعني أنه من المستحيل أن يدور شيء في مدارٍ خارج أفق الحدث نفسه مباشرة. إذ إنَّ محاولة إنشاء مدار دائري هناك تستلزِم تدخُّلًا تصحيحيًّا باستخدام الصواريخ من أجل الحفاظ على المدار. وفي الحقيقة، تُظهِر الرياضيات أنَّ أقرب مسافة يُمكن أن نُصبح موجودين عندها، نحن أو أي جُسَيم ذي كتلة،

في مدار دائري مستقر بالقرب من ثقب أسود ثابت ستساوي نصف قطر شفارتزشيلد ثلاث مرات. ها قد تلقيتَ تحذيرًا.

وفي الواقع، من الممكن أن تُوجَد مدارات دائرية غير مُستقرة حتى مسافةٍ تصِل إلى نصف هذه المسافة من ثقبٍ أسود (غير دوَّار) من نوعية ثقوب شفارتزشيلد. وتُحدِّد هذه المسافة سطحًا كرويًّا يُسمَّى أحيانًا كرة فوتونية. ولكن حتى إذا كان الجسم الدائر فوتونًا، تكون هذه المدارات غير مُستقرة، وسرعان ما سينزلِق الفوتون الذي يدور فيها نحو الثقب الأسود، ولا يعود أبدًا، أو ينجرف بعيدًا في الفضاء أصلًا.

ولكن إذا كان الثقب الأسود من نوعية ثقوب «كير»، أي له زخَم زاوي، يختلف وضع المدارات القريبة من الثقب الأسود. وعلى وجه التحديد، ستُوجَد عندئذٍ كُرتان فوتونِيَّتان، وليست 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 مُتجِهة من الشرق إلى الغرب). وفي حالة الثقب الأسود الذي يدور ببطءٍ شديد إلى حدِّ أنه لا يختلف كثيرًا عن ثقب شفارتزشيلد الثابت، تكون هاتان الكرتان الفوتونيتان شبه منطبقتين بعضهما على بعض في المكان نفسه. أمَّا في حالة الثقوب السوداء ذات الزخم الزاوي المتزايد، فيكون هذان السطحان مُتباعِدين بعضهما عن بعض بمسافة متزايدة.

وعند مسافةٍ أقرب من الثقوب السوداء الدوَّارة، يُوجَد سطح مُهم آخر يُسمَّى الحد الاستاتيكي (نوقش في الفصل الثالث). هذا هو السطح الذي لا يمكن عنده أن يبقى شيء ساكنًا بالنسبة إلى راصدٍ بعيد؛ فمن المستحيل أن تظلَّ ثابتًا عند هذا القُرب من ثقبٍ أسود دوَّار، بغضِّ النظر عن مدى قوة الصواريخ التي قد تكون مجهزًا بها. فعند هذا السطح، تُسحَب كل أشعة الضوء، حتى التي تدور في مداراتٍ عكسية، في اتجاه الدوَران. صحيح أنَّ إمكانية الهروب من الثقب الأسود الدوار تظلُّ قائمة عند هذا القُرب، إذا توفَّر دفعٌ كافٍ، ولكن لا يمكن لأي شيءٍ أن يظلَّ ثابتًا بلا دوَران هنا. وعند مسافة أشدَّ قُربًا من الثقوب السوداء، يقع السطح المهم التالي، وهو أُفق 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، تمامًا كما ينطبق على الثقوب السوداء الساكنة.

عادة ما تكون المدارات حول ثقوب كير السوداء غير محصورة ضِمن مستوًى واحد. والمدارات الوحيدة المحصورة ضِمن مستوًى واحدٍ هي تلك الموجودة في المستوى الذي يشمل خط الاستواء (أي مستوى التناظُر المرآتي للثُّقب الأسود الدوار). أمَّا المدارات الموجودة خارج هذا المستوى الاستوائي، فتتحرَّك في ثلاثة أبعاد. وتكون هذه المدارات محصورةً ضِمن حجمٍ مُعيَّن محدود بنصف قُطر أقصى ونصف قطر أدنى وبزاوية قصوى بعيدًا عن المستوى الاستوائي.

وهكذا فإنَّ تفاصيل الزخم الزاوي للثقوب السوداء لها تأثير شديد في مدى القُرب الذي قد تبلُغه الجسيمات من الثقب الأسود، الذي يعتمِد هو نفسه على اتجاه حركتها بالنسبة إلى الزخم الزاوي. فإذا كان الثقب الأسود يدور بأقصى زخمٍ زاويٍّ ممكن، يكون نصف قُطر الكرة الفوتونية الخاصة بأشعة الضوء التي تدور في نفس اتجاه دوران الثقب الأسود (أي الاتجاه المباشر) مُساويًا لنصف القيمة التي كان نصف قُطر شفارتزشيلد سيُساويها لو كان الثقب الأسود ساكنًا. أمَّا أشعة الضوء التي تتحرك في مداراتٍ عكسية، فإنَّ نصف قطر كرتها الفوتونية يُساوي ضعف نصف قُطر شفارتزشيلد. وأمَّا الجسيمات التي لها كتلة وتتحرَّك في مداراتٍ مباشرة الاتجاه، فيكون نصف قُطر أقرب مدار دائري مُستقر إلى المركز يُمكن أن تتحرك فيه مُساويًا لنصف قِيمة نصف قطر شفارتزشيلد أيضًا. وأمَّا تلك التي تدور في مداراتٍ عكسية، فستكون مداراتها غير مُستقرَّة إذا وقعت على بُعد مسافة قريبة كهذه؛ إذ إنَّ نصف قُطر أقرب مدار دائري مُستقر إلى المركز يُمكن أن تدور فيه مساوٍ لقيمة نصف قُطر شفارتزشيلد أربع مرات ونصف. وبذلك فالثقب الأسود الدوار يُمكِّن الجسيمات التي تدور في مدارات مباشرة الاتجاه من الدوران على مسافةٍ أقرب دون أن تصِل إلى نقطة اللاعودة عند أُفق الحدث. وفي الفصل السابع، نُركز على أهمية مدى القُرب الذي يُمكن أن تصِل إليه المادة في دوَرانها حول الثقب الأسود قبل أن تسقُط داخله، ومقدار الطاقة الذي قد يُستفاد منها نتيجةً لذلك.

الفصل الخامس

إنتروبيا الثقوب السوداء وخصائصها الديناميكية الحرارية

قُل لي ماذا تأكُل أقُل لك من أنت

كثيرًا ما يُقال إنَّ ما يأكله المرء يُعبر عن ماهيته. وبذلك فإذا كان نظامُك الغذائي مُقتصرًا على المأكولات كثيرة السُّعرات وقليلة القِيمة الغذائية والشوكولاتة، فسيكون مظهرك، فضلًا عن صحتك الجسدية والذهنية، مختلفًا بعض الشيء عمَّا سيكون عليه إذا كنتَ تَتَّبع نظامًا غذائيًّا صحيًّا يشتمل على السلطة والأطعمة الشائعة في منطقة البحر المتوسط. ولكن يبدو أنَّ الثقوب السوداء تَقنع بأيِّ طعام بسهولة. فسواءٌ ألتهمَتِ الثقوب مساحةً شاسعة من الغبار الواقع بين النجوم أو سنة ضوئية مُكعبة من البَيض المقلي، فإن كُتلتها ستزداد بالمثل في الحالتَين دون توقف. وفي الحقيقة، بعد أن ينتهيَ الثقب الأسود من وجبته الفاخرة، يستحيل أن تعرف ما كان يأكُله، ولن تعرف سوى الكمية التي تناوَلَها (مع أنك تستطيع معرفة ما إذا كان الشيء الذي أكله له شحنة أو زخم زاوي). أي إنك لن تعرف سوى كمية طعامه، وليس نوعيته. إذ تذكُر «نظرية عدم وجود شَعر» التي نُوقِشت في الفصل الثاني أنَّ الثقب الأسود لا يتميَّز إلَّا بعددٍ قليل جدًّا من المعايير المُحدِّدة (الكتلة والشحنة والزخم الزاوي)، ومن ثم لا يمكننا التحدُّث عمَّا يتكوَّن منه الثقب الأسود.

قد يبدو هذا الافتقار إلى معرفة طبيعة ما يمتصُّه الثقب الأسود وكأنه ملحوظة تافِهة، لكنها في الواقع عميقةٌ بعض الشيء. فالمعلومات المتعلِّقة بما يأكُلُه الثقب الأسود فُقِدت أساسًا. فأي مادة سقطت داخل الثقب الأسود قد تنازلت عن هويتها. إذ لا نستطيع إجراء أي قياساتٍ عن تلك المادة، أو تمييز أي تفاصيل عنها.

الثقوب السوداء والمحركات

هذا الوضع مألوف على نحوٍ مُخيف لِمن درسوا موضوع الديناميكا الحرارية الجميل. ففي هذا المجال، يشيع جدًّا بين دارِسيه فهم الكيفية التي يُمكن بها أن تُفقد المعلومات أو تتبدَّد من خلال عمليات فيزيائية. هذا ويتَّسِم مجال الديناميكا الحرارية بتاريخٍ طويل شائق. إذ بدأت نظريته الحديثة إبان الثورة الصناعية عندما كان الناس يحاولون التوصُّل إلى كيفية تعزيز كفاءة المحركات البخارية. يُمكن تعريف «الطاقة» بالقول إنَّها 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 يُمكن إجراء تحويلات مُعينة. فمع أننا نستطيع مثلًا أن نحول الشغل الميكانيكي بالكامل إلى حرارة (إذ تفعل ذلك كلما استخدمتَ المكابح لتُوقِف سيارتك تمامًا)، لا نستطيع تحويل الحرارة بالكامل إلى شغلٍ ميكانيكي، وهذا بالضبط هو ما نتمنَّى تحقيقه بالمحركات البخارية، لكننا لا نستطيع مع الأسف. ولذا فالمحركات البخارية في القطارات لا تستطيع إلَّا تحويل جزءٍ من الحرارة المنبعثة من الموقِد إلى شغل ميكانيكي يُدير العجلات. ومن ثَمَّ، عُرف أخيرًا أنَّ الحرارة نوع من أنواع الطاقة يتضمَّن حركةً عشوائية للذرات، فيما يتضمن الشغل الميكانيكي حركة مُنسَّقة لمواد كبيرة بعض الشيء، مثل عجلة أو مكبس. ولذا فأحد العناصر البالغة الأهمية في طبيعة الحرارة هو العشوائية؛ فبسبب اهتزاز الذرات في الأجسام الساخنة، لا نستطيع تتبُّع مسار حركة الذرات المفردة. وببساطة لا يُمكن تجريد هذه الحركة العشوائية من عشوائيتها دون ثمنٍ إضافي. فالعشوائية، أو لِنقُل «الإنتروبيا» حسب تسمِيتها بالمصطلحات التخصُّصية، في أي نظام معزول لا تقلُّ أبدًا بل يجب دائمًا أن تبقى كما هي أو تزداد في كل عمليةٍ فيزيائية. (هذا هو قانون الديناميكا الحرارية الثاني). ويُمكن النظر إلى هذا من منظور القولِ إنَّ معلوماتنا عن العالم دائمًا ما تقلُّ لأننا لا نستطيع تتبُّع مسار حركة كل الذرات في نظامٍ كبير. فبينما تنتقِل الطاقة من نطاقات عيانية إلى نطاقات ميكروية، من مكبسٍ مُتحرك بسيط إلى الحركة العشوائية لأعدادٍ هائلة من الذرات، عندئذٍ تضيع منَّا المعلومات. وتُتيح لنا الديناميكا الحرارية تحويل هذه الفكرة التي تبدو غامضةً إلى مقادير كمية تمامًا. ويتبيَّن هنا أنَّ فُقدان المعلومات بهذه الطريقة مُشابِه تمامًا لما كنا نقوله عن سقوط المادة داخل ثُقبٍ أسود.

صحيح أنَّ مجال الديناميكا الحرارية ابتُكِر لوصفِ ما يتعلق بالمحركات البخارية، ولكن أغلب الظن أنَّ مبادئه تنطبق على كل العمليات في الكون. وكان من أوائل من فكروا في عَلاقة ذلك بالثقوب السوداء روجر بنروز أستاذ الفيزياء في أكسفورد. إذ استنتج أنه ربما يكون من الممكن استخراج طاقة من الثقوب السوداء، لأنَّ لدَيها زخمًا زاويًّا، ومن ثَمَّ استخدامها كأنها مُحركات. وتَفتَّق ذهنه عن مُخطَّطٍ عبقري تقوم فكرته على إلقاء مادة نحو ثقبٍ أسود دوَّار بحيث يخرج بعضها من تلك الرمية بطاقةٍ أكبر من طاقته الأصلية. وتُستخرَج الطاقة من المنطقة الواقعة خارج أفق الحدث مباشرةً (وبالتحديد منطقة «الإرجوسفير» التي نُوقِشت في الفصل الثالث). وهكذا تؤدي العملية التي تصوَّرها بنروز إلى إبطاء دوران الثقب الأسود. وصحيح أنَّ استخراج كميةٍ هائلة من الطاقة من الثقب الأسود بهذه الطريقة ممكن من حيث المبدأ، لكنَّ هذه بالطبع مجرد تجربة فكرية، ولذا لا تبدو في الوقت الحالي حلًّا عمليًّا لأزمة الطاقة التي يلوح في الأفق أنها ستُخيم على كوكب الأرض! وفي غضون بضع سنوات من هذا العمل الذي أجراه بنروز، حقق جيمس باردين، وبراندون كارتر، وستيفن هوكينج تقدمًا فارقًا وصاغوا ما أطلقوا عليه القوانين الثلاثة لديناميكيات الثقوب السوداء، التي أرست الأسس التي استند عليها تفكير هوكينج اللاحِق بخصوص الديناميكا الحرارية للثقوب السوداء، الذي تطلَّب إنشاء مفهوم درجة حرارة الثقب الأسود التي تُحدَّد بكتلته وزخمه الزاوي.

الثقوب السوداء والإنتروبيا

كانت رؤية بنروز حافزًا مهمًّا وجعلت آخرين يُفكرون في الديناميكا الحرارية للثقوب السوداء. إذ أظهر، مع آر إم فلويد، أنَّ مساحة أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود تميل، في تلك العملية التي تخيَّلها، إلى أن تزداد. بدأ ستيفن هوكينج العمل على المخطط الذكي الذي تصوَّره بنروز. وصحيح أنَّ المساحة تعتمد على الكتلة والزخم الزاوي (والشحنة) بطريقةٍ معقَّدة بعض الشيء، لكن هوكينج استطاع إثبات أنَّ مساحة هذه المنطقة، في أي عملية فيزيائية، دائمًا ما تزداد أو تبقى كما هي. وإحدى تبِعات هذه النتيجة المثيرة للاهتمام أنَّه في حالة اندماج ثُقبَين أسودَين، تكون مساحة أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود الناتج من اندماجهما أكبر من مجموع مساحتَي منطقتَي أفق الحدث المحيطتَين بالثُّقبَين الأسودَين الأصلِيَّين. (يتماشى هذا مع تصوُّراتنا البديهية لأن نصف قُطر أفق الحدث يتناسب مع الكتلة، ولأنه من المعروف تمامًا أنَّ مساحة السطح تعتمد على نصف القطر.)

وهذه هي نفس نوعية السلوك الذي نراه لدى الإنتروبيا في الديناميكا الحرارية؛ ولذا بدأ البعض يتساءل عما إذا كان ثمَّة ارتباط ما بين إنتروبيا الثقب الأسود ومساحته. هل هذا أكثر من مجرد تشابُه مُثير للاهتمام؟ انطلق أحد طلاب جون ويلر، وهو جيكوب بيكنشتاين، قُدُمًا في هذه الطريق مباشرة واقترح وجود علاقة مباشرة بينهما في أطروحته لرسالة الدكتوراه. إذ استعان بيكنشتاين بالأفكار المستمَدَّة من نظرية المعلومات الخاصة بالديناميكا الحرارية ليؤكد أنَّ مساحة أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود تتناسب مع الإنتروبيا الخاصة به. (تعني العَلاقة التي اختارها أنك إذا أخذتَ مساحة أفق الحدث وقَسَمتها على أحد الثوابت الفيزيائية الأساسية، وهو مساحة بلانك، التي تبلغ حوالي $١٠^{-٧٠}$ أمتار مربعة، مضروبًا في عامل عددي، فستحصل على قيمة إنتروبيا الثقب الأسود. وهكذا فاختيار الوحدات يجعل إنتروبيا الثقب الأسود هائلة للغاية.)

لم يُصدِّق هوكينج نتائج بيكنشتاين في البداية، ولكن بعدما تفحَّصها بمزيدٍ من التعمق، لم يستطع تأكيد صحة هذا النهج فحسب، بل تمكَّن أيضًا من تعميق فَهمنا لكيفية سير آليات الديناميكا الحرارية للثقب الأسود. ربما يكون من المفيد فَهم كيفية إجراء هذه التحليلات كي يتسنَّى 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 تتَّسِم بأنها صغيرة جدًّا، مثل نقاط التفرُّد في ثقبٍ أسود، لكنها في الوقت نفسه تشهد اضطلاع الجاذبية بتأثيرٍ كبير. ومع الأسف ليس لدَينا نظرية جيدة عن الجاذبية الكمية حاليًّا. ولكن من الطرق المُناسبة استخدام النسبية العامة لنمذجة الكيفية التي ينحني بها نسيج الزمكان ثم استخدام ذلك مع ميكانيكا الكم لفَهم سلوك الجُسيمات في نسيج الزمكان المنحني. كان هذا هو النهج الذي اتبعه هوكينج لمحاولة فهم الديناميكا الحرارية للثقوب السوداء.

هل الفضاء الفارغ فارغٌ بحق؟

يتَّسم مفهوم الفراغ (أي المنطقة التي «لا يُوجَد فيها أي شيء») بأنَّ له تاريخًا طويلًا ومُعقدًا للغاية. فمعظم الفلاسفة اليونانيين القدماء أبغضوا تلك الفكرة، استنادًا إلى أسبابٍ تبدو اليوم مُبهَمة جدًّا، ولكن تُوجَد قلة من الفلاسفة المؤمنين بمذهب الذرية أدرجوا الفراغ في وصفهم للكون. ولذا ظلَّ الكثيرون حتى عصر النهضة العلمية يعتبرون أنَّ فكرة الفراغ قد عفَّى عليها الزمن إلى حدٍّ كبير. ولكن بعد اختراع مضخَّة 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 تُنتِج فراغًا تامًّا كما ينبغي وفق المعايير الحديثة، فإنَّ فكرة العدم أصبحت أكثر قابلية للتصديق من ذي قبل بكثير. وحالما ثبَت وجود الذرات بما لا يدع مجالًا للشك المنطقي في أوائل القرن العشرين، لم تُصبح فكرة وجود منطقة من الفضاء خالية من الذرات محل اتفاق فحسب، بل صارت أكيدةً أيضًا.

وفور إثبات وجود الذرَّات، ظهرت نظرية جديدة من نظريات الفيزياء؛ وهي ميكانيكا الكم. كانت إحدى النتائج المدهشة لهذه النظرية الجديدة وجود لحظاتٍ عابرة يبدو فيها أنَّ الطاقة لا يُشترَط بالضرورة أن تبقى محفوظة. صحيح أنَّ قانون الديناميكا الحرارية الأول، ذاك المبدأ الفيزيائي العظيم الذي يبدو غير قابل للكسر، كان يُصِر على أنه لا بدَّ من وجود مُحاسَبة صارمة بين الرصيد الدائن والرصيد المدين من الطاقة في كل لحظةٍ وكل مكان. إذ يقول المحاسب الكوني بنبرةٍ صارمة عالية: «يجب أن تكون الطاقة الداخلة مساويةً للطاقة الخارجة دائمًا». ولكن في الواقع، يبدو أن قواعد المحاسبة الكونية أكثر تساهُلًا، ويبدو الحصول على قرضٍ ممكنًا. فمن المقبول تمامًا أن تقترض بعض الطاقة فترةً قصيرة ما دُمتَ سترُدها سريعًا بعد ذلك. وتعتمد الكمية التي يمكنك اقتراضها على مدة القرض، بمقدارٍ يصِفه مبدأ عدم اليقين الذي وضعه هايزنبرج. فعلى سبيل المثال، من الممكن، حتى في الفراغ الذي يُفترَض أنه فارغ، اقتراضُ طاقةٍ كافية لتكوينِ زَوج من جُسَيم وجُسَيم مضاد. إذ يُمكن أن يظهر هذان الجُسَيمان في دنيا الوجود كومضةٍ خاطفة ثم يُفني كلٌّ منهما الآخر بعد زمنٍ قصير للغاية، وبذلك يرُدَّان الطاقة المُقترَضة ضِمن الحد الزمني المسموح به (مدة زمنية تصير أقصر كلما كان مقدار الطاقة المُقترَضة أكبر). وهكذا تحدث هذه العملية في كل مكان، طَوال الوقت. بل ويُمكن قياسها حتى! وبذلك صرنا نفهم الآن أنَّ الفراغ ليس فارغًا بالفعل، بل يُعَد بمثابة حساء من تلك الأزواج المكونة مما يُسمَّى جُسَيمات افتراضية تظهر في الوجود وتختفي منه كومضاتٍ خاطفة. أي إنَّ الفراغ ليس عقيمًا وخاليًا، بل يعجُّ بنشاط كمِّي.

تبخُّر الثقوب السوداء وإشعاع هوكينج

استخدم هوكينج النظرية الحديثة التي تصف الفراغ، أي نظرية المجال الكمي، ليدرس سلوكه بالقُرب من أفق الحدث المحيط بالثقوب السوداء. وصحيح أنَّ تحليله كان

رياضيًّا، لكننا نستطيع تصويره بطريقةٍ مُبسطة جدًّا. الخُلاصة أنَّ زوجًا من الجسيمات «الافتراضية»، أي يتكوَّن من جُسيم وجُسيم مضاد له (يكون معاكسًا له في الشحنة ومُطابقًا له في الكتلة)، ناشئًا بالقُرب من أفق الحدث المحيط بالثقب الأسود قد يَئول في النهاية إلى التفتُّت بانفصال كِلا الجُسيمَين عن الآخر. وإذا سقط أحد عنصرَي هذا الزوج، سواء الجُسَيم أو الجُسيم المضاد، في أفق الحدث، فسيغوص في نقطة التفرُّد، ولن يُمكن أن يُسترَد أبدًا. لكن شريكه قد يبقى موجودًا خارج الثقب الأسود. وبذلك يكون هذا الجُسيم قد فقدَ شريكه الافتراضي، لكنه قد صار الآن جُسيمًا حقيقيًّا، وأصبح من الممكن له أن يهرُب. وإذا استطاع الجُسيم أن يهرب، بدلًا من أن يعاود السقوط نحو الثقب الأسود، يُشكِّل جزءًا مما يُسمَّى إشعاع هوكينج. ويرى أي راصدٍ بعيد أنَّ الثقب الأسود قد فقدَ بعضًا من كُتلته بسبب انبعاث جُسَيم. وما أُدرِكَ سلفًا بالفعل أنَّ الثقوب السوداء، بأخذ نظرية المجال الكمِّي في الحسبان، ليست سوداء تمامًا، بل تستطيع أن تبعث جُسَيمات في الواقع. تنطبق هذه الحُجة كذلك على الفوتونات، لذا فإنَّ الثقب الأسود ينبعث منه ضوء ضعيف جدًّا (معروف أيضًا بالإشعاع الكهرومغناطيسي) إذا صحَّت حجة هوكينج.

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

لكنَّ إشعاع هوكينج له تأثير مُثير للاهتمام على تطور الثقوب السوداء؛ فهو مسئول في النهاية عن الموت النهائي الذي يُصيب الثقب الأسود. فكِّر هنا مجددًا في الجُسيمين الافتراضِيَّين. يجب أن تكون طاقة الجسيم الحقيقي الذي يهرب من الثقب الأسود مُوجبة، ولكن نظرًا لأن زوج الجُسَيمَين الافتراضِيَّين ظهر تلقائيًّا من الفراغ، فلا بدَّ أن يكون

الجُسَيم الافتراضي المتص داخل الثقب الأسود ذا طاقة سالبة لموازنة الطاقة الموجبة. ولأن الطاقة والكتلة مُترابطتان، تتمثَّل مُحصلة التأثير النهائي لهذه العملية في أنَّ الثقب الأسود تُضاف إليه كتلة سالبة، وبالتبعية ستكون كتلته قد قلَّت بسبب انبعاث إشعاع هوكينج.

لذا كان هوكينج قد اكتشف آليةً يمكن أن يتبخَّر بها الثقب الأسود. فالثقب الأسود سيبعث إشعاعاتٍ ويفقد كُتلته ببطءٍ مع مرور الوقت. وتكون هذه العملية في البداية بطيئةً إلى حدٍّ لا يُصدَّق. وقد اتضح أنَّ «الجاذبية السطحية» للثقب الأسود تكون أقلَّ كلما كان الثقب أكبر. وهذا لأنَّ قوى الجذب الناتجة عن الجاذبية، وإن كانت الجاذبية السطحية تعتمِد على الكتلة، التي تكون أكبر لدى الثقوب السوداء الكبيرة، تتبع قانون التربيع العكسي، والثقوب السوداء الأكبر كتلة تكون أكبر حجمًا. وهكذا فالنتيجة النهائية أن الثقوب السوداء الكبيرة تتَّسِم بجاذبيةٍ سطحية ضئيلة جدًّا وهذا يكافئ درجة حرارة منخفضة جدًّا. لذا فإنَّ ما يبعثه ثقب أسود كبير من إشعاعِ هوكينج يكون أقل ممَّا يبعثه ثقب أسود صغير.

ولكن بينما يتبخَّر الثقب الأسود ويفقد كتلته شيئًا فشيئًا، ترتفع كمية إشعاع هوكينج مع زيادة الجاذبية السطحية، وبالتبعية زيادة درجة الحرارة. بافتراض أن الثقب الأسود لا يتلقى أي طاقة أخرى، فإن هذا يجعل معدل فُقدان 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 يُمكن أن يحدث هذا التبخُّر إلَّا لدى الثقوب السوداء التي تكون درجة حرارتها أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط بها. وفي الحقبة الحالية من التاريخ الكوني، تبلغ درجة حرارة الكون، التي قِيست استنادًا 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 تتبخَّر في الحقبة الحالية لأن درجات حرارتها أقل من درجة حرارة الوسط المحيط بها. غير أنَّ تلك الثقوب السوداء التي تساوي كتلتها جزءًا ضئيلًا من كتلة الشمس ستستطيع التبخُّر عندما تُصبح درجة حرارة الكون أكثر انخفاضًا بعدما يشهد مزيدًا من التمدُّد. ووصولًا إلى المرحلة الحالية من الزمن الكوني، فإنَّ كل الثقوب السوداء التي كانت كتلتها أقل من ١٪ من هذه القيمة الضئيلة ستكون قد تبخَّرت بحلول الوقت الحاضر.

مفارقة 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 لاحقًا. فيما يدَّعي رأي آخر أنَّ هذه المعلومات لا تضيع. وتستند حُجة هذا الرأي الثاني إلى أنَّ المعلومات التي كانت كامنةً في المادة الأصلية التي سقطت في الثقب الأسود لا بدَّ أن تكون مُخزنةً بطريقة أو بأخرى في الإشعاع المنبعث من الثقب الأسود، لأنَّ الثقوب السوداء تتبخَّر. وبذلك فإذا تمكنتَ من تحليل كل إشعاع هوكينج المنبعث من ثقب أسود وفهمه تمامًا، فستتمكن من إنشاء نموذج يُحاكي تفاصيل كل المادة التي كانت قد سقطت داخل الثقب الأسود في البداية. يُذكَر أنَّ ستيفن هوكينج وكيب ثورن قد راهنا جون بريسكيل رِهانًا شهيرًا بخصوص هذه المسألة تحديدًا. إذ كان ثورن وهوكينج يتبنيان الرأي الأول، بينما كان بريسكيل يتبنى الرأي الثاني. واتفقوا على أن يكافئ الخاسرُ الفائزَ بموسوعةٍ يختارها الفائز. وفي عام ٢٠٠٤، اقتنع هوكينج بفكرة أنَّ المعلومات يُمكن أن تُشفَّر بالفعل في الإشعاع المنبعث من الثقوب السوداء اقتناعًا كافيًا ليُعلن أنه خسِر الرِّهان، وأعطى بريسكيل موسوعة عن لعبة البيسبول (مسألة ما إذا كنتَ ترى تلك الموسوعة موسوعةً من المعلومات القيِّمة تعتمِد على رأيك في لعبة البيسبول أصلًا)؛ غير أنَّ المسألة ما زالت محلَّ جدال.

فبالرغم من كل هذه التكهُّنات النظرية البارعة، يجدُر تَكرار القول إنَّ كل عمليات الرصد الفعلية لم تستطع حتى الآن رصد ولو حتى إشعاع هوكينج عادي من أي ثقبٍ أسود. ويعجُّ تاريخ الفيزياء ببقايا نظرياتٍ قديمة بارعة، ولكن تبيَّن أنها خاطئة في النهاية. فالكثير من التجارب والأرصاد الفعلية قد حقَّقَت نتائج غير مُتوقَّعة إلى حدٍّ مُدهش مِرارًا وتَكرارًا. بل وظهرت أرصادٌ لظواهر مُذهلة لم يكن أحد على الإطلاق ليتنبَّأ بها على الأرجح وفق المبادئ الأولى عن الثقوب السوداء. ويتمثَّل أحد أسباب عدم رصد إشعاع هوكينج الخافت في أنَّ العديد من الثقوب السوداء التي نعرفها تقع في مراكز بعضٍ من أكثر الأجسام سطوعًا في الكون، وهذه الثقوب السوداء ذات كتلةٍ أكبر بكثير، وبالتبعية أبرد بكثير، من أن تتبخَّر عبر إشعاع هوكينج. تجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ هذه الأجسام ساطعة سطوعًا استثنائيًّا لسببٍ مختلف تمامًا، وهو ما نستعرِضه في الفصلَين السادس والثامن.

الفصل السادس

كيف تزن ثقبًا أسود؟

تُشكِّل الشمس والكواكب التي تدور حولها، مع الكواكب القزمة (التي يُعَد أشهر أمثلتها كوكب بلوتو)، والكويكبات والمُذنَّبات مُجتمعةً المجموعة الشمسية. وتدور المجموعة الشمسية نفسها داخل قُرص مجرَّتِنا حول مركز كُتلتها عند مركز المجرة. وتبلغ السرعة التي تتحرك بها مجموعتنا الشمسية حول مسارها الدائري عبر القرص المجري حوالي ٧كم/ث، ويستغرق إتمام دائرة كاملة حول المركز المجري حوالي ٢٠٠ مليون سنة. وبالإضافة إلى هذه الحركة المدارية، تتحرك المجموعة الشمسية كلها في اتجاهٍ عمودي على مستوى المجرة. وهذه النوعية من الحركة التي تُبديها المجموعة الشمسية معروفة تمامًا للفيزيائيين بأنها حركة توافُقية بسيطة تَنشأ فيها القوة المُعيدة، التي تجذب مجموعتنا الشمسية لتُعيدها نحو موضِع اتزان مستوى المجرة، من قوى الشدِّ الجَذبي لدى النجوم والغازات التي يتكوَّن منها القرص المجري. وفي الوقت الحالي، تُوجَد مجموعتنا الشمسية فوق نقطة الاتزان هذه بنحو ٤٥ سنة ضوئية. وفي غضون نحو ٢١ مليون سنة من الآن، ستكون المجموعة الشمسية عند أبعد نقطة يُمكن أن تصِل 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 واقعةً في مركز المستوى المجري، سيتعرض كوكب الأرض لأقصى كمية مُمكنة من الأشعة الكونية التي تتحرك بسرعة بالِغة في مستوى المجرة، حيث تكون محصورةً على طول خطوطٍ من المجال المغناطيسي، وتتحرك حولها في مسارٍ أشبَهَ بمزيجٍ من مسار حلزوني وآخر مُستقيم. وقد طُرِحَت تكهُّنات بأنَّ حركة الشمس عبر المستوى المجرِّي يمكن أن تكون هي السبب في انقراض الديناصورات الجماعي. ولكن من الصعب تأكيد صِحة هذه النوعية من التكهُّنات أو دحضُها لأنَّ معرفة النطاقات الزمنية لهذه الحركة المدارية صعبة بعض

الشيء بالطبع على الراصِدِين البشريِّين، الذين عادةً لا يعيشون عمرًا يزيد كثيرًا على قرنٍ واحد. وتُعَد هذه مشكلة شائعة في عِلم الفلك الرصدي عندما نرغب في مُتابعةِ عمليةٍ مُعيَّنة تتغير على مرِّ 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 يُمكن قياسُها بسهولةٍ أكبر بكثير، على الأقل لأنَّ النطاقات الزمنية المتعلقة بها تُناسِب مُدد تركيز البشر وتلسكوباتهم. وممَّا له أهمية خاصة في سياق الثقوب السوداء الحركات المدارية للنجوم في أعمق المناطق داخل مجرة درب التبانة، التي تظهر في جُزءٍ من السماء مُعروف باسم «منطقة الرامي أ*». وعندما ينظر المرء إلى داخل هذه المنطقة، التي تكون أوضح عند رؤيتها من نصف الكرة الجنوبي، يكون بذلك ناظرًا إلى مركز مجرتنا نفسه، الذي يبعُد عنَّا ٢٧ ألف سنة ضوئية. وهذه منطقة مأهولة بكثافة شديدة من الفضاء، ما يُوقِعنا في مشكلتَين عندما نريد دراسة المركز المجري. الأولى تتمثل في وجود كثافةٍ عالية نسبيًّا من النجوم في هذا الجزء من الفضاء، وتكمُن الثانية في وجود كميات هائلة من الغبار.

وبذلك تعني المشكلة الأولى أنك تحتاج إلى استخدام أسلوب قياس يُتيح تصويرًا عالي الاستبانة، أي يُمكن فيه فصل تفاصيل دقيقة عن بعضها بحيث تُبيِّن عدسة التيليفوتو تفاصيل أدقَّ على كاميرا مُعينة من تلك التي تُبيِّنُها عدسة واسعة الزاوية. والاكتفاء باستخدام تلسكوبٍ أكبر لن يكون كافيًا لذلك في كل الحالات، ولكن تُوجَد تقنيات متنوعة ابتُكِرَت لفضِّ التشابُك الناجم عن الاضطرابات الموجودة في الغِلاف الجوي ونستطيع من خلالها حتمًا أن نرى كل الأجرام السماوية، إلَّا إذا وضعنا التلسكوب على قمرٍ صناعي فوق الغلاف الجوي. ومن التقنيات التي تتَّسِم بأهميةٍ خاصة تقنيةٌ تُعرَف باسم «البصريات المتكيِّفة». إذ تُصحِّح هذه التقنية التبايُنات الناتجة من الغلاف الجوي، وذلك برصدِ تشوُّش وضوحِ نجم ساطع (يُسمَّى النجم الدليل) وتغيير شكل مرآة التلسكوب الأولية لإلغاء هذا التشوُّش المتباين. وعندما يكون الجزء السماوي محل الاهتمام خاليًا من أي نجم ساطع، يُمكن تسليط حزمةٍ ليزرية قوية مُكوَّنة من أشعةٍ مُتوازية بدقةٍ مُتناهية لإثارة ذرات في الغلاف الجوي، ومن ثَمَّ تُستمَد من ذلك تصحيحات التبايُنات الناتجة من الغلاف الجوي.

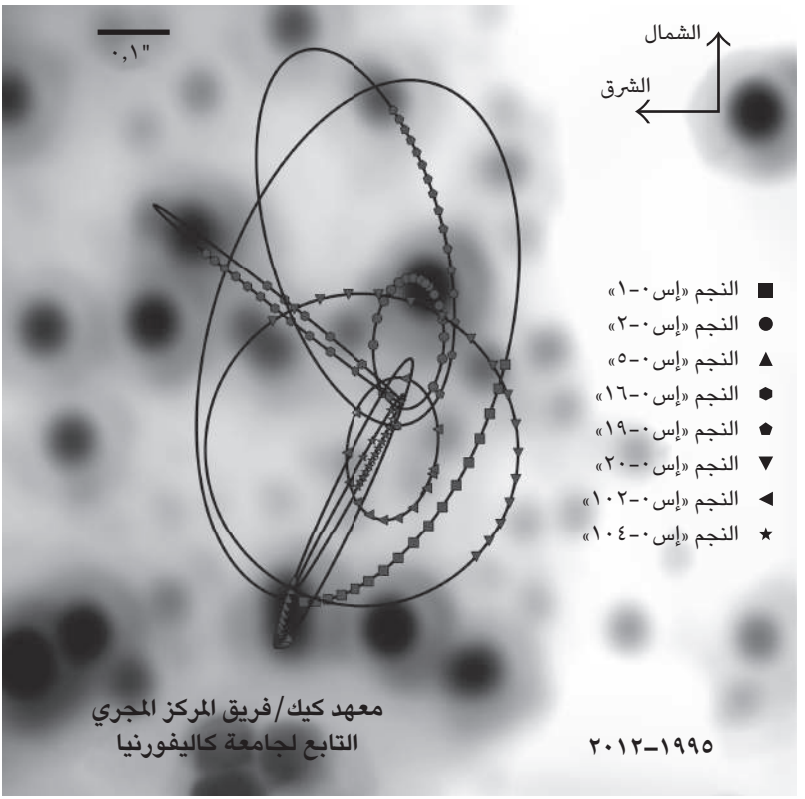
أمَّا المسألة الثانية، أي وجود كمياتٍ هائلة من الغبار ناحية مركز المجرة، فهي مشكلة لأنَّ رؤية الضوء المرئي خلال الغبار صعبة بقدْرِ ما هو صعبٌ على ضوءٍ فوق

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

كيفية قياس كتلة الثقب الأسود عند المركز المجرِّي

لاقت تقنية الاستعانة بعمليات الرصد القائمة على الأشعة تحت الحمراء تأييدًا من فريقَين بحثِيَّين: أحدُهما بقيادة أندريا جيز في كاليفورنيا، والآخر بقيادة راينهارد جينزل في ألمانيا. ويُقدم العمل الذي أنجزه كلٌّ من الفريقَين على حِدة قياسًا واضحًا جدًّا لكتلة الثقوب السوداء عند مركز المجرة. يُبين شكل ٦-١ البيانات المأخوذة من أندريا جيز وفريقها. فعلى مرِّ السنوات القليلة الماضية، أجرَوا أرصادًا مُتكرِّرة داخل قلب المركز المجرِّي نفسه بالضبط، وشاهدوا الكيفية التي تحركت بها النجوم منذ المرة الأخيرة التي رصدوها فيها. ولأنَّ أنواع أطياف تلك النجوم معروفة، فكُتَلُها معروفة. وهكذا مع مرور سنةٍ تلوَ الأخرى، واتضاح المسار المداري الذي تسلكه كل من هذه النجوم، تُمكِّن المعادلات الديناميكية (المعروفة باسم قوانين كبلر، وهي القوانين نفسها التي تحكم حركة الكواكب حول شمسنا) جيز وفريقها من حلِّها لكلِّ مدار على حدة واستنتاج كتلة المنطقة «المظلِمة» الواقعة عند البؤرة المشتركة لكل تلك المدارات. وتلك الحلول المستقلَّة تُحدِّد كتلة هذه المنطقة المظلِمة بدقةٍ جيدة بعض الشيء. ومن المعروف الآن أنها تساوي مقدارًا أكبر بقليلٍ من كتلة الشمس أربعة ملايين مرة، ضِمن حدود منطقةٍ لا يزيد نصف قطرها على ستِّ سنوات ضوئية. ولأنَّ الجسم مُظلِم لكنه يتَّسِم بكُتلةٍ هائلة للغاية، فالاستنتاج الوحيد أنَّ مركز مجرتنا يُوجَد عنده ثقب أسود ضخم.

ولا يُوجَد سبب يجعلنا نعتقِد أنَّ مجرتنا، درب التبانة، هي الوحيدة التي تحوي ثقبًا أسود عند مركزها. بل بالعكس، ثمة ظنٌّ قوي بأن كل المجرات على الأرجح تحوي ثقوبًا سوداء عند مراكزها، على الأقل المجرات الأضخم. ويكمُن 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 نجاحًا جميلًا في مركز مجرتنا لا يُمكن أن يُطبق على مجراتٍ خارجية لأنها ببساطة بعيدة للغاية.



شكل ٦-١: شكل يُبين المواضع المتعاقبة للنجوم التي تدور حول الثقب الأسود المركزي في مجرَّتنا درب التبانة.

هذا وتتجاوز كُتَل الثقوب السوداء المركزية الواقعة في قلوب المجرات الإهليلجية قيمًا تساوي كتلة شمسنا مليون مرة، بل وتصل إلى مقدارٍ يساوي كتلة شمسنا مليار مرة وتتجاوزه. ولذا غالبًا ما تُسمَّى الثقوب السوداء فائقة الضخامة.

وبالرغم من الصعوبات في قياس كتل الثقوب السوداء وكُتَل المجرات، وُجِد في مجموعة واسعة من مجرات مختلفة أن كتلة الثقب الأسود المركزي تتناسَب مع كتلة المجرة المُضيفة. ويُظَنُّ أنَّ هذا يشير إلى أن الثقب الأسود المركزي والمجرة نفسها نمَوَا وتطوَّرَا معًا عبر الزمن الكوني.

ثقوب سوداء عديدة في مختلف أنحاء القُرص المجرِّي

وإلى جانب الثقب الأسود الفائق الضخامة في قلب المجرة، يُظَن أنَّ ملايين من الثقوب السوداء موزعة في مختلف أنحاء مساحة المجرة، ويُعتقَد أنها تشكلت بطريقةٍ مختلفة تمامًا عن الثقوب الواقعة في المراكز المجرِّية التي تنمو بالتراكُم التدريجي للمادة المنهارة المتساقِطة فيها. إذ كانت تلك الثقوب السوداء ذات الكتلة النجمية نجومًا ضخمةً في الماضي، وكانت تتألَّق بسطوعٍ شديد، في ظل سريان تفاعُلات الاندماج داخلها دون توقُّفٍ مُمِدةً إيَّاها بالطاقة، فكانت تُبقِيها ساخنةً جدًّا ومتأثرة بضغطٍ شديد، وتمنحها قدرةً مصيرية على مقاومة الانهيار تحت تأثير الجاذبية. وعندما يُستنفد الوقود النووي تمامًا، لا يبقى أي قدرٍ من ضغط الإشعاع ليُبقي النجم صامدًا، ولا يتبقى شيء لموازنة قوة الجاذبية التي تَسحبه نحو الداخل. وإذا كان النجم ذا كتلةٍ مُشابهة لكتلة شمسِنا، فإن الانهيار تحت تأثير الجاذبية يُسفِر في النهاية عن جسمٍ مضغوط يُعرف بالقزم الأبيض. تجدر الإشارة إلى أنَّ كلمة «مضغوط» لها معنًى خاص في الفيزياء الفلكية، وتُشير إلى أن المادة كثيفة بطريقةٍ تختلف تمامًا عن المادة العادية. وبمعايير المادة العادية، فالنجوم القزمة البيضاء مضغوطة لأنَّ المادة منضغطة للغاية. هذه المادة مُؤيَّنة، ما يعني أن الإلكترونات كلها منفصلة عن نُويِّها الأصلية، وإن كانت باردة (فعادة ما لا تُصبح المادة مُؤيَّنة 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)؛ والمُصطلح المتخصِّص 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 ستندمِج معًا لتُشكِّل نيوترونات. وهذه يُمكن أن تكوِّن جسمًا أشد انضغاطًا بكثيرٍ من القزم الأبيض؛ أي نجمًا نيوترونيًّا.

ولكن، إذا كنا مُهتمِّين بالثقوب السوداء، فعلينا إذن أن ننتقل إلى النجوم التي لدَيها كتلة أكبر بكثيرٍ من كتلة تلك النجوم التي تُواصِل الانهيار لتُنتِج نجومًا قزمة بيضاء أو حتى نجومًا نيوترونية. فالنجم الذي لدَيه كتلة أكبر من تلك سيكون مضيئًا جدًّا بينما يبقى وقوده موجودًا ويُمكن الحفاظ على استدامة الاندماج النووي فيه. وفور استنفاد كل الوقود، ينتهي أمر النجم وستنطفئ الأضواء. يتَّسِم النجم الآن بكُتلة كبيرة كافية لتجعل قوة الجاذبية قادرة على أن تطغى حتى على ضغط الطباق النيوتروني القوي،

وبذلك يكون الانهيار قويًّا جدًّا لدرجة أنَّه حتى هذا الضغط لا يستطيع أن يُوازِن تأثير الجاذبية، ويؤدي الانهيار حتمًا إلى ثُقبٍ أسود. وغالبًا ما يكون انهيار النجم الضخم مصحوبًا بانفجار بقايا مُستعر أعظم مُذهلة، تاركًا الثقب الأسود ليكون الجزء المتبقي الوحيد في الموقع الأصلي للنجم السلف الأصلي. وتشهد مثل هذه الانفجارات تخليق عناصر كثيرة، خاصة تلك الأثقل من الحديد.

تجدر الإشارة هنا إلى أنَّ أول ثقبٍ أسود تعرَّفه الباحثون بدقة لا تحتمِل الخطأ بناءً على تحديد كُتلتَي النجمَين في نظامٍ نجمي ثنائي يُسمى «في٤٠٤ سيج». إذ استطاع خورخي كاساريس وفيل تشارلز وزملاؤهما رصد مدارات النجمَين بتدقيقٍ شديد واستنتجوا من تحليلاتهم أنَّ هذا الزوج الثنائي يحوي جسمًا مضغوطًا ذا كتلةٍ أكبر ست مراتٍ من كتلة شمسنا، وبذلك فهو ثقب أسود. (اكتُشف لاحقًا أنَّ كتلته تساوي كتلة الشمس ١٢ مرة.)

ومن الممكن إجراء تقديراتٍ معقولة لأعداد النجوم في المجرات وكُتَلها. ثم يمكننا بعد ذلك تقدير عدد الثقوب السوداء ذات «الكتلة النجمية» في مجرتنا، بالتفكير في عدد النجوم الضخمة التي ربما قد تكوَّنت في وقتٍ مُبكر من تاريخها، بما يكفي لتكون قد تطورت تطورًا كافيًا يجعل كل وقودها النووي قد استُنفِد بحلول الوقت الحالي عن طريق الاندماج. وحتى وإن كانت نسبة صغيرة جدًّا من النجوم في مجرتنا تُكوِّن ثقوبًا سوداء، فإنَّ وجود أكثر من ١١١٠ أجسام في مجرة درب التبانة يُعطينا الكثير من الثقوب السوداء.

ولكن كيف يمكن قياس كتل هذه الثقوب السوداء المنتشِرة في المجرات؟ في الواقع، تتشابه ديناميكيات أسلوب تحديد بعض كُتَل الثقوب السوداء المتبقِّية من النجوم تشابُهًا كبيرًا مع ديناميكيات الأسلوب المُستخدَم لقياس كتلة الثقب الأسود الواقع في مركز مجرَّتِنا. وذلك لأنَّ جزءًا كبيرًا جدًّا من النجوم في مجرتنا، وبالتبعية في المجرات الأخرى أيضًا على الأرجح، يُوجَد في أزواجٍ شكَّلت أنظمةً نجمية ثنائية. ومن السهل تخمين الكيفية المُحتَملة لحدوث ذلك؛ فقوى الجاذبية تجاذُبية والعديد من المدارات التي يدور فيها جسمان مُستقِرَّة، ولذا حالما يتلاقى نجمان ويرتبطان معًا بفعلِ قوى الجاذبية، يبقيان هكذا على الأرجح. وإذا استطَعْنا قياس الوقت الذي يستغرقه كِلا النجمَين لإتمام دورةٍ كاملة حول الآخر في النظام النجمي الثنائي، وهو وقت يُعرف باسم الفترة المدارية، وإذا عرفنا المسافة بينهما، نقترِب من معرفة كُتلتَيهما. إذا كان الجسم المضغوط يدور في مدارٍ حول نجم

عادي (أي يستمدُّ وقوده من الاندماج) ذي طيف معروف النوع، وكتلة معروفة بالتبعية، يُمكن عندئذٍ اشتقاق كتلة النجم المضغوط مباشرة. أمَّا إذا كان جسمٌ مضغوط كالثقب الأسود مفردًا وليس في نظام ثنائي، فتكون المعلومات الديناميكية غير مُتاحة، وهذا يعني عدم وجود وسيلة لاستنتاج كُتلته أو تحديد أنه ثقب أسود أصلًا. تجدُر 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 شمسِنا.

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

الفصل السابع

التهام المزيد والتضخُّم أكثر

ما مقدار سرعة الالتهام؟

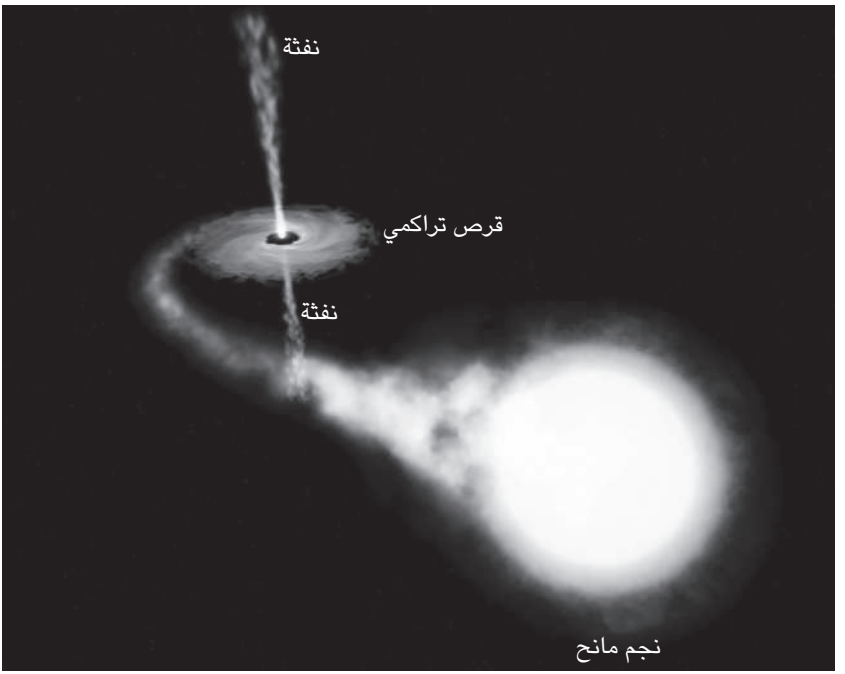
الفكرة الشائعة عن الثقب الأسود بأنه «يمتصُّ كل شيء» من الوسط المحيط به، ليست صحيحة إلَّا بالقُرب من أفق الحدث، وحتى في تلك الحالة، لا يحدُث ذلك إلَّا إذا كان الزخم الزاوي للمادة المنهارة المتساقِطة نحوه ليس كبيرًا جدًّا. أمَّا بعيدًا عن الثقب الأسود، فيكون مجال الجاذبية الخارجي مُطابقًا لمجال الجاذبية الخارجي لأي جسمٍ كروي آخَر له الكتلة نفسها. ولذا، يمكن لجُسَيم ما أن يدور حول ثقبٍ أسود وفقًا لديناميكيات نيوتن، تمامًا كما سيدور حول أي نجمٍ آخر. فما الذي يمكن أن يحلَّ لُغز هذا النمَط من الدوران المستمر في دوائر (أو قطوع ناقصة في الواقع) ويمهد الطريق لسلوكٍ أغرَب؟ الإجابة أنَّ الثقب الأسود دائمًا ما يدور حوله أكثر من جُسَيم واحد. إذ تُعَد الظواهر الفيزيائية الفلكية التي نرصدها ثريةً لأنَّ الثقوب السوداء يدور حولها قدْر كبير من المادة ولأن هذه المادة يُمكن أن تتفاعَل مع نفسها. وفوق ذلك، فقانون الجاذبية ليس القانون الفيزيائي الوحيد الذي يجب الخضوع له، بل يجب الخضوع أيضًا لقانون حفظ الزخم الزاوي. ويؤدي تطبيق هذه القوانين على الكميَّات الكبيرة من المادة التي قد تنجذِب نحو الثقب الأسود إلى ظهور ظواهر لافتة قابلة للرصد، وتتجسَّد بعض أبرز أمثلة هذه الظواهر في حالة أجسامٍ غريبة تُسمَّى أشباه النجوم. تُعرَف أشباه النجوم بأنها أجسام موجودة في مراكز المجرات تتضمَّن ثقبًا أسود فائق الضخامة عند مركزها بالضبط، وبسبب تأثير هذا الثقب على المادة القريبة منه، يمكن أن يجعلها أشدَّ سطوعًا من كل الضوء المنبعِث من جميع النجوم في إحدى تلك المجرات، عبر أجزاء المجال الكهرومغناطيسي كلها. سنتعرَّف على أشباه النجوم، وأمثلة أخرى لـ «المجرَّات النشِطة»، في الفصل الثامن، مع نظائر

مُصغَّرة لها تُسمَّى أشباه النجوم الميكروية، وتكون كتلة ثقوبها السوداء أقل بقِيمٍ أُسيَّة من كتلة الثقوب الموجودة داخل أشباه النجوم. أمَّا الآن، فدعونا نعود إلى التفكير في المادة الموجودة حول الثقب الأسود.

كما ذُكِر سلفًا، لا يمكن رصد ثُقبٍ أسود مُنعزل مباشرة، لأنه ببساطة لن يبعث ضوءًا؛ بل كل ما يُمكن هو اكتشاف ثقب أسود عن طريق تفاعُلاته مع مواد أخرى. فأي مادة تسقط نحو الثقب الأسود تكتسِب طاقة حركة، وبسبب الحركة المضطربة، أي دورانها في مدار حلزوني عكس اتجاه دوران مادة ساقطة أخرى تسلك سلوكًا مُشابهًا، تُصبح ساخنة. ويُؤيِّن هذا التسخين الذرَّات، مؤديًا بذلك إلى انبعاث إشعاع كهرومغناطيسي. ومن ثَمَّ، فتفاعُل الثقب الأسود مع المادة القريبة منه هو الذي يؤدي إلى انبعاث إشعاعٍ من المنطقة المجاورة للثقب الأسود، وليس إشعاعًا مباشرًا من الثقب الأسود نفسه.

الثقوب السوداء ليست كيانات مُنعزلة وغير متفاعلة في الفضاء. بل إنَّ مجالات الجاذبية الموجودة لدَيها تجذب نحوَها كل المواد، سواءٌ أكانت غازات أم نجومًا قريبة. ولأنَّ الشد الجذبي يزداد بقوةٍ مع زيادة القُرب، تتفتَّت النجوم تمامًا إذا كان حظها عثرًا بما يكفي ليجعلها تقترب من ثُقبٍ أسود؛ ويُصوِّر شكل ٧-١ مثالًا على ذلك. وثمة جزء مُعين من المادة المجذوبة سيبتلِعه الثقب الأسود تمامًا أو سيُراكِمه. لا يقتصر ما يحدث على أنَّ المادة تهرع بوتيرةٍ مُتسارعة إلى داخل الثقب الأسود، متحركةً بسرعةٍ بالغة عبر أفق الحدث. بل ينشأ شيءٌ أشبه بطقوس تَودُّد مُعقدة بينما تقترِب المادة المجذوبة بتأثير الجاذبية من الثقب الأسود. ففي كثيرٍ جدًّا من الأحيان، وُجِد أنَّ المادة المتراكِمة تتَّسِم بشكلٍ هندسي مُعين يُميزها؛ شكل قرص. وإذا كان مجال الجاذبية يتَّسِم بتماثُلٍ كروي، فلن يؤدي الثقب الأسود أي دورٍ في تحديد المستوى الذي سيتراكم فيه الغاز ليُشكِّل قرصًا تراكميًّا، بل سيتحدَّد مستوى القرص وفق طبيعة الغاز المتدفِّق بعيدًا عن الثقب الأسود. ولكن إذا كان الثقب الأسود ذا زخم زاوي، فسيستقر الغاز المتراكم في نهاية المطاف ضِمن المستوى العمودي على محور دورانه، بغضِّ النظر عن الكيفية التي يتدفَّق بها على بُعد أنصاف أقطار أطول. وإذا كانت المادة المجذوبة تدور على الإطلاق، فيجب التفكير في ذلك من منظور الالتزام بقانون حفظ الزخم الزاوي الذي عُرض سلفًا في الفصل الثالث عند استعراض مسألة دوران المادة التي تنهار في النهاية لتكوِّن ثقبًا أسود دوَّارًا. فالدوران يعني أنَّ المادة وهي تفقد طاقتها ستتبع مدارات (دائرية إلى حدٍّ

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



شكل ٧-١: تصور فني عن قرص تراكُمي (تنبعِث منه نفثة كما هو موضح-طالِع الفصل الثامن) ونجمٍ مانح يُفتَّت بفعلِ قوى المد والجذر الناشئة عن الجاذبية من الثقب الأسود الواقع عند مركز القرص التراكمي.

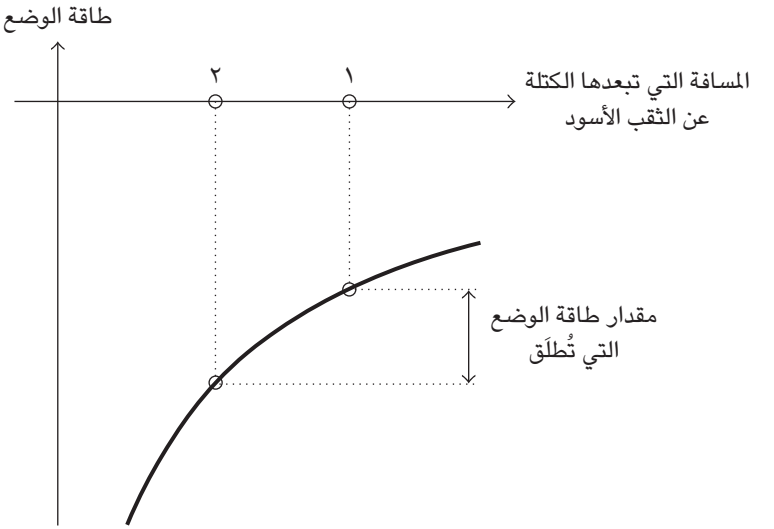
وإذا كان الغاز يكوِّن جزءًا كبيرًا من المادة المنهارة المتساقطة، فيمكن عندئذٍ أن تصطدم ذرات الغاز بجُسَيمات الغاز الأخرى في مداراتها الخاصة، وتؤدي هذه الاصطدامات إلى إثارة الإلكترونات في تلك الذرَّات ورفعها إلى مستويات طاقةٍ أعلى. وعندما تعود هذه الإلكترونات إلى مستويات الطاقة المنخفِضة، تُطلَق فوتونات ذات طاقةٍ مساوية

بالضبط للفرْق بين مستوى الطاقة الأعلى الذي كان الإلكترون يشغَله ومستوى الطاقة الأدنى الذي انخفض إليه. ويعني إطلاق الفوتونات أنَّ ثمة طاقةً إشعاعية تترك سحابة الغاز المنهارة، وبذلك تفقد السحابة قدرًا من الطاقة. وبينما تتضمَّن هذه العمليات خروج طاقة، فإنها لا تتضمَّن خروج أي قدرٍ من الزخم الزاوي. ولأن الزخم الزاوي يبقى في النظام، تُواصِل المادة المتراكِمة الدوران في أي مستوى يحافظ على اتجاه مُحصِّلة الزخم الزاوي الأصلية. ومن ثَم، دائمًا ما ستُكوِّن المادة المجذوبة قرصًا تراكميًّا؛ وهو بمثابة حالة تظلُّ فيها المواد التي تدور حول الثقب الأسود مُعلَّقةً فترة طويلة بعض الشيء. واعتمادًا على مدى القُرب الذي يُمكن أن تبلُغه المادة التي تدور حول الثقب الأسود منه، يمكن أن تُصبح المادة ساخنةً جدًّا لدرجة أنَّ الإشعاع المنبعِث من القرص التراكُمي يكون مكوَّنًا في الواقع من فوتونات الأشعة السينية، وهذا يُكافئ درجات حرارة عالية تصل إلى ١٠ ملايين درجة (سواءٌ أكانت وحدة القياس المُستخدمة 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 كميةٍ مُعينة من الكتلة الساقطة يعتمِد على نسبة كُتلتها مضروبة في نسبة كتلة الثقب الأسود الذي تدور حوله في مدار حلزوني، ومدى القُرب الذي يُمكن أن تبلُغه الكتلة الساقطة من الثقب الأسود. في حالة جسمٍ جاذب ذي كتلةٍ مُعينة كالثقب الأسود، كلما اقتربت منه الكتلة الساقطة، زادت طاقة وضْع الجاذبية التي تُطلِقها، كما يتَّضح في المخطط المُبسَّط في شكل ٧-٢. ويساوي مقدار الطاقة المُتاح لتُطلِقه المادة في صورة إشعاعات، الفرق بين الطاقة التي كانت موجودة لدى الكتلة الساقطة عندما كانت بعيدة قبل أن تُسرَّع (تُحسب باستخدام معادلة أينشتاين الشهيرة $E = mc^2$، حيث يرمز E إلى الطاقة، وm إلى الكتلة، وc إلى سرعة الضوء) والطاقة الموجودة لدَيها عند أقرب مدار دائري مُستقر إلى الثقب الأسود.

ومع أنَّ الاندماج تُعلَّق عليه آمال كبيرة في أن يكون مصدرًا مُستقبليًّا لإمداد كوكب الأرض بالطاقة، فإنه لا يُنتِج سوى ٠٫٧٪ من الطاقة المتاحة وفق معادلة «E». وفي المقابل، يمكن إطلاق قدْرٍ 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، يعتمِد مدى القُرب الذي يُمكن أن تبلُغه المادة المتراكِمة في اقترابها من الثقب الأسود على مدى سرعة دوران الثقب الأسود. فإذا كان الثقب الأسود يدور بسرعة، فيمكن أن يدور

القرص التراكُمي على بُعد مسافةٍ أقصر بكثيرٍ من الثقب الأسود في مدارات أصغر بكثير. وفي الواقع، يُمثِّل تراكُم الكتلة على ثقبٍ أسود دوَّار الطريقة الأكثر فاعلية من بين الطُّرق المعروف أنها تَستخدِم الكتلة للحصول على طاقة. ويُعتقد أن هذه العملية هي الآلية التي تَستمِدُّ بها أشباه النجوم وقودَها. فأشباه النجوم تُعَد بمثابة مواقع أقوى إطلاق للطاقة المستدامة في الكون، وستُناقَش بمزيدٍ من التفصيل في الفصل الثامن.



شكل ٧-٢: مُخطط بياني يُوضِّح كيف تقلُّ طاقة وضع كتلة مُعينة (جُسيم اختبار) مع انخفاض المسافة التي تبعُدها عن ثقبٍ أسود.

ذكرتُ بالفعل أنَّ الكتلة والطاقة بينهما تكافؤ، وفي حالة ثقبٍ أسود من نوعية شفارتزشيلد (أي غير دوَّار)، يمكن نظريًّا إطلاق كميةٍ من الطاقة تُكافئ ٦٪ من كتلته الأصلية، وأنَّ الحلول التي توصَّل إليها روي كير لمعادلات المجال التي وضعَها أينشتاين تُظهر أنَّ طول نصف القُطر من آخِر مدار دائري مُستقر إلى الثقب الأسود الدوَّار يكون أقصر بكثيرٍ ممَّا لو كان المدار موجودًا حول ثقبٍ أسود غير دوَّار له الكتلة نفسها. ومن حيث المبدأ، يمكن استخلاص قدْر أكبر بكثير من طاقة الدوران من ثقوب «كير» السوداء،

ولكن فقط إذا كانت المادة الساقطة تدور في نفس اتجاه دوران الثقب الأسود نفسه. أمَّا 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 ثُقب أسود يدور بأقصى زخم زاوي تدور حوله في نفس اتجاه دوَرانه، فيمكن من حيث المبدأ إطلاق نسبةٍ لافتة تبلغ ٤٢٪ من طاقة السكون في صورة إشعاع، إذا كان من الممكن أن تفقد المادة قدرًا كافيًا من الزخم ليجعلَها قادرةً على الدوران حول الثقب الأسود في أقرب مدارٍ دائري مباشر مُستقر إلى مركزه.

ما مقدار سرعة الالتهام؟

يساوي معدل تراكُم الثقب الأسود في مركز مجرَّتنا، في منطقة الرامي أ*، التي تعرَّضنا لاكتشافها في الفصل السادس، جزءًا واحدًا من ١٠٠ مليون جزء من كتلة الشمس سنويًّا. ولا يبدو هذا الرقم كبيرًا جدًّا إلى أن تُدرِك أنَّ هذا يكافئ التهام كتلةٍ مقدارها ٣٠٠ كتلة أرضية سنويًّا. ولتفسير مستويات شدة الإضاءة الهائلة التي عادةً ما تتَّسِم بها أشباه النجوم، يلزم أن تكون معدلات سقوط المادة مساويةً لكتلة شمسِنا بضعة أضعاف في السنة الواحدة. وأمَّا لتفسير شدَّة الإضاءة التي عادةً ما تتَّسِم بها أشباه النجوم الميكروية الأصغر حجمًا، التي سنستعرِضها هي أيضًا في الفصل الثامن، ربما يلزم أن تكون معدلات سقوط المادة جزءًا واحدًا من مليون جزءٍ من هذه القيمة.

ومن السياقات الأخرى التي قد يحدُث فيها استخراجٌ للطاقة على غرار هذه العملية دفقاتُ أشعة جاما. وهي ومضات مفاجِئة من حِزَمٍ مُكثفة من أشعة جاما تبدو مرتبطةً بانفجاراتٍ عنيفة في المجرات البعيدة. وقد رُصِدَت لأول مرة باستخدام أقمارٍ صناعية تابعة للولايات المتحدة في أواخِر ستينيات القرن الماضي، وكان يُحسَب في البداية أنَّ الإشارات المُستقبَلة صادرة من أسلحة نووية سوفيتية.

ونظرًا لأنَّ المادة التي تدور في مدارٍ حلزوني مُتجه إلى داخل الثقب الأسود موجودة في كل مكانٍ عبْر القرص التراكمي، يجد الفيزيائيون أنه من المفيد إجراء حساباتٍ بسيطة وتوضيحية مفيدة لفهم مقادير بعض الكميات الفيزيائية المهمة جيدًا؛ فعند اعتبار أنَّ المادة المتراكِمة تأخذ شكلًا كُرويًّا وليس شكل قُرص، تظهر بعض الحدود المثيرة للاهتمام. ويكمنُ مثال توضيحي جدًّا على ذلك في عالم النجوم، التي تُعَد أكثر شبهًا بكثيرٍ بكراتٍ من البلازما مُقارنةً بالأقراص التراكُمية. وقد أشار السير آرثر إدينجتون إلى أنَّ الإشعاع

المنبعِث من تصادُم الإلكترونات المُثارة بأيوناتٍ أخرى في الغاز الساخن لدى نجمٍ ما سيؤثر بضغطٍ إشعاعي على أي مادةٍ يعترِضها لاحقًا. ويمكن للفوتونات أن «تُشتت» الإلكترونات الموجودة في البلازما المؤيَّنة الساخنة داخل النجم (وهذا يعني ببساطةٍ أن «تُعطيها طاقة وزخمًا»). ويُوَصَّل هذا الضغط، الذي يؤثر من الداخل إلى الخارج، عبر قوًى كهروستاتيكية (وهي قُوى مُناظرة لقوى الجاذبية لكن الفرق أنها تحمل شحناتٍ كهربائية) إلى الأيونات الموجبة الشحنة مثل أنوية الهيدروجين (المعروفة كذلك باسم البروتونات) وأنوية الهيليوم والعناصر الأثقل الأخرى الموجودة.

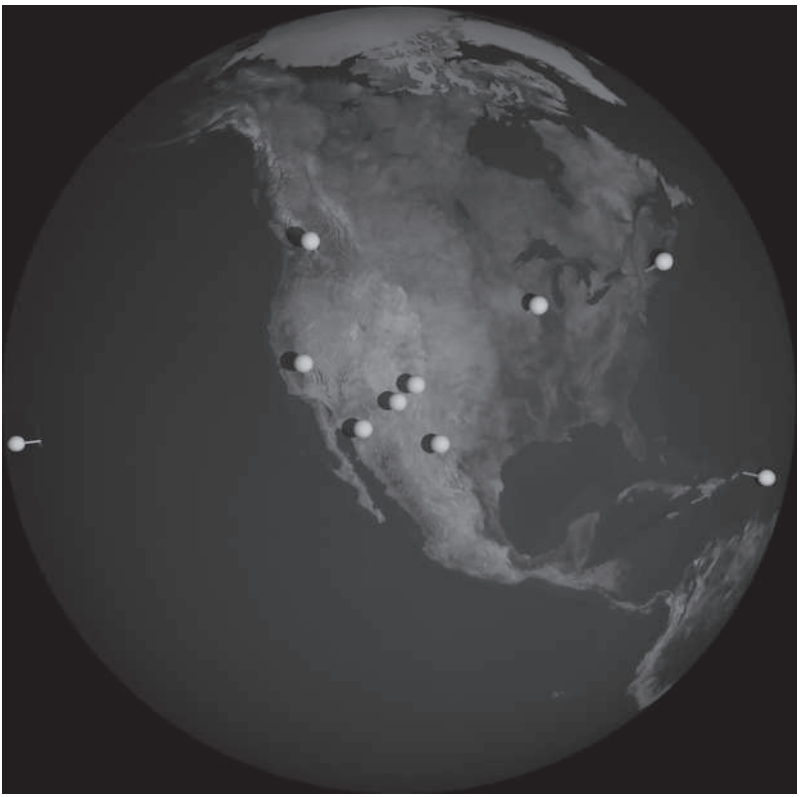
في حالة النجوم، تتَّجِه مُحصِّلة الإشعاع النهائية نحو الخارج في اتجاه أنصاف الأقطار، وهذا الضغط الإشعاعي الناتج المُتجه نحو الخارج يؤثر عكس اتجاه تأثير قوة الجاذبية التي تسحب المادة إلى الداخل نحو المركز. وفي حالة شكل النجوم شِبه الكروي، يُوجَد حدٌّ أقصى لمقدار الضغط الإشعاعي المتَّجِه نحو الخارج، وعندما يتجاوز الضغط هذا الحد، يفوق قوة الجاذبية المتجهة نحو الداخل، ويُفجر النجم نفسه ببساطة. يُعرَف هذا الضغط الإشعاعي الأقصى باسم حدِّ إدينجتون. ومن المؤكد حتمًا أنَّ الضغط الإشعاعي الأعلى ينتج من مستوًى أعلى من شدة إضاءة الإشعاع، ويمكن تقدير شدة إضاءة جسمٍ مُعين من سطوعه إذا عرَفنا المسافة إلى الجسم. ولذا يُمكن استنتاج مقدار الضغط الإشعاعي داخل جسمٍ ما باستخدام بعض الافتراضات المُبسِّطة، بما فيها اعتبار القرص التراكُمي شِبه كروي. يُمكن استخدام هذه الطريقة البسيطة أحيانًا للتوصُّل إلى تقديرٍ دلالي لكتلة الثقب الأسود؛ استنادًا إلى شدة الإضاءة المرصودة للإشعاع المنبعِث من البلازما المحيطة، فإذا اعتُبِر أنها واصِلة إلى الحد الأقصى المتمثِّل في «شدة إضاءة إدينجتون» (الذي ستؤدي شدة الإضاءة عند تجاوزه إلى ضغطٍ إشعاعي عالٍ بما يكفي ليفوق قوة الجاذبية الناتجة من الكتلة في الداخل وبذلك سيُفجِّر الجسم نفسه)، عندئذٍ يُمكن تقدير الكتلة.

ويُمكن التفكير في «شدة إضاءة إدينجتون» من منظورِ وجود مُعدَّلٍ أقصى يُمكن أن تتراكم به المادة، في حالة وضع افتراضاتٍ مناسِبة عن مدى كفاءة عملية التراكُم. يُعطي ذلك كمية تُسمَّى «مُعدل إدينجتون»، وهذا الحد يُعَد قيمةً قصوى (في حالة الكفاءة المُفترَضة). وتُوجَد حالات يُكسَر فيها هذا الحد الأقصى المعين، أهمها رفض افتراض أنَّ الجسم يتَّسِم بتماثُل كروي (فهذا الافتراض مناسِب في حالة النجوم، ولكن من الواضح أنَّه لا ينطبق على شكل القُرص الهندسي الذي تتخذه الأقراص التراكمية التي نحتاج إلى أخذِها في الحسبان لفهم كيفية نمو الثقوب السوداء).

كيفية قياس سرعة الدوران داخل قرصٍ تراكُمي

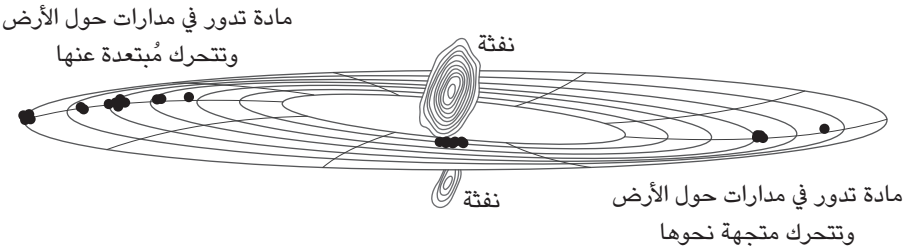
بفضل التقدُّم الذي أُحرِزَ في التكنولوجيا المتعلِّقة بمجال الفلك، أصبح من الممكن قياس السرعة التي تدور بها المادة حول ثقبٍ أسود، على الأقل في حالة الأمثلة القريبة نسبيًّا من كوكب الأرض. ويتمثَّل أحد أكبر التحدِّيات في صعوبة الحصول على معلوماتٍ على مقياسٍ زاوي دقيق بدرجةٍ كافية. فمقدار الاستبانة المكانية المطلوبة يجب أن يكون أدق ١٠٠ مرة على الأقل، إن لم يكن ١٠٠٠ مرة، من الاستبانة التي عادةً ما تتحقَّق باستخدام التلسكوبات البصرية. ومن حيث المبدأ، تتمثَّل طريقة تحقيق استبانة أدق باستخدام التلسكوب في إجراء الأرصاد عند أطوالٍ موجية أقصر وإنشاء تلسكوبٍ أكبر، لا سيما لتقليل النسبة بين الطول الموجي الذي يُجرَى الرصد عنده وقُطر التلسكوب المستخدَم. ولكن مع الأسف، فالحل الثاني سرعان ما يُصبح باهظًا إلى حدٍّ بِشِع بسرعةٍ كبيرة، فيما ينقل الحل الأول أطوال الرصد الموجية المرئية المعتادة إلى نطاق الأشعة فوق البنفسجية، التي يبدو لها غلاف الأرض الجوي مُعتمًا بعضَ الشيء. وتتمثَّل طريقة تحقيق نسبةٍ أصغر بين الطول الموجي وقطر التلسكوب، على عكس ما قد يتبادر إلى الذهن بالبديهة، في إجراء الأرصاد عند الأطوال الموجية الراديوية (وهي أطوال موجية أطول بكثيرٍ سواءٌ من الطول الموجي للضوء المرئي أو الطول الموجي للأشعة فوق البنفسجية) التي عادةً ما يبدو الغلاف الجوي والغلاف الأيوني شفَّافَين لها، وافتراض أنَّ قطر التلسكوب يكاد يُساوي قطر الأرض.

ويتضمَّن هذا النهج بضع مسائل تقنية تستدعي مناقشتها قليلًا؛ إذ اتضح أنه من الممكن، بفضل بعض النظريات والمعادلات الرياضية المفيدة جدًّا التي ابتكرها عالم الرياضيات الفرنسي جان باتيست جوزيف فوريه، استعادة جزءٍ كبير من الإشارة التي سترصُدها فتحة تلسكوب كاملة، حتى وإن لم تكن مساحة التجميع الفعلية موجودة إلَّا في أجزاء فرعية مُتناثِرة من الفتحة الكاملة التي كانت ستُصبِح الخيار المُفضَّل الأمثل. فإذا كانت الإشارات الصادرة من الهوائيات المنفِصلة (التي يُشبه كل منها تلسكوبًا مفردًا — انظر شكل ٧-٣ الذي يوضح «مصفوفة الخط الأساسي الطويل جدًّا») مترابطة معًا، من الممكن إعادة إنشاء صورٍ لمناطق صغيرة من السماء تحتوي على تفاصيل دقيقة بقدْر دقَّة التفاصيل التي كان سيُمكن الحصول عليها لو كان من الممكن إنشاء تلسكوبٍ كامل بحجم الأرض. وعلى سبيل إعطاء فكرة عن مدى دقة هذه الاستبانة ليس إلا، تخيَّل أنني



شكل ٧-٣: تصورٌ فني عن مصفوفة الخط الأساسي الطويل جدًّا من الهوائيات التي تُعطي، مُجتمعةً، صورًا ذات استبانةٍ مساوية للاستبانة التي كانت ستتحقَّق باستخدام تلسكوبٍ له فتحة ذات قُطر يُساوي جزءًا كبيرًا من قُطر الأرض.

كنتُ أقف فوق مبنى «إمباير ستيت» في نيويورك، وأنك كنتَ تقِف في سان فرانسيسكو. بهذا المستوى من الاستبانة، سيُمكن توضيح تفاصيل قريبة جدًّا من بعضها بمسافاتٍ فاصلة تساوي حجم ظفر إصبعي الصغير. (أحاول تجاهل حقيقة أنَّ الأرض كرة، ولذا لا يُوجَد خط رؤية مباشر بين سان فرانسيسكو ومبنى إمباير ستيت، لكنكم تفهمون الفكرة.) هذا يعني أنَّ استخدام أدوات مثل «مصفوفة الخط الأساسي الطويل جدًّا» يُتيح رؤية سماتٍ مُفردة تَبعُد عن بعضها أقلَّ من شهرٍ ضوئي في مجراتٍ أخرى.



شكل ٧-٤: قاست مصفوفة الخط الأساسي الطويل جدًّا توزيع مادة تدور في مداراتٍ داخل القرص التراكُمي لمجرة «إن جي سي ٤٢٥٨» (المعروفة كذلك باسم مجرة «مسييه ١٠٦») حول ثُقبها الأسود المركزي الذي تُساوي كتلته كتلة شمسِنا ٤٠ مليون مرة.

تُشكِّل الاستبانة العالية عبْر صورةٍ ما بالمعنى المكاني، والاستبانة العالية بالمعنى الطيفي (بمعنى أنَّ المرء يستطيع تمييز الأطوال الموجية لسماتٍ مُعينة في طيفٍ ما بدقة شديدة) مزيجًا قويًّا جدًّا. فقد استخدم فريق بقيادة جيم موران من جامعة هارفارد «مصفوفة الخط الأساسي الطويل جدًّا»، مُستفيدِين من تأثير دوبلر، في إجراء عمليات رصدٍ للقُرص التراكُمي المحيط بالثقب الأسود المركزي لدى مجرةٍ قريبة تُسمَّى مجرة «إن جي سي ٤٢٥٨». قاسوا التبايُن في الطول الموجي لإشارةٍ طيفية مُعينة («ميزر مائي») عَبر القرص التراكُمي الدوَّار، واستخدموا هذا الانزياح نحو الأحمر ونحو الأزرق، أثناء اقتراب المادة التي تبعث إشعاع الميزر من كوكب الأرض وابتعادها عنها، لاكتشاف التبايُن 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 ستصِفها تمامًا، وهذه المدارات موضحة في شكل ٧-٤.

مادة دوَّامية الحركة

في أقرب مدارٍ مُستقر إلى مركز ثقبٍ أسود ذي كتلة تعدل كتلة شمسنا ١٠٠ مليون مرة، يكون الزخم الزاوي أصغر بأكثر من ١٠ آلاف مرة من الزخم الزاوي لمادةٍ تدور في مداراتٍ في مجرَّة عادية. ومن الواضح أنَّ تراكُم المادة بفعلِ الثقب الأسود يتطلَّب تبديد مُعظم هذا الزخم الزاوي، وهذا يتحقَّق بعملياتٍ تحدُث داخل القرص التراكمي. يمكن

اعتبار أنَّ المدارات الموجودة في القرص التراكُمي أقرب إلى أن تكون دائرية، مع أنها في الواقع تتَّخِذ مسارًا حلزونيًّا نحو الداخل بشكلٍ تدريجي ودقيق جدًّا يصعُب ملاحظته. وتنصُّ قوانين كبلر على أنَّ المادة التي تدور عند أنصاف أقطار أقصر ستتحرَّك بوتيرةٍ أسرع من المادة التي تدور في مداراتٍ أكبر بقليل. وهذا الاختلاف في سرعة الدوران يسمح للثقب الأسود بامتصاص البلازما التي يتكوَّن منها القرص التراكُمي؛ والتي تُعَد بمثابة حَرقٍ ينشأ من احتكاك المدارات الداخلية السريعة الدوران بالمادة المجاورة الموجودة في مداراتٍ ذات أنصاف أقطار أطول قليلًا. وسيؤدي هذا الاختلاف في السرعة إلى أنَّ المادة الموجودة في المدارات الأكبر قليلًا ستُسحَب بوتيرة أسرع قليلًا، بفعلِ تأثيرات الاضطراب اللزج، ولذا ستُصبح المادة الموجودة في المدارات الداخلية أبطأ قليلًا بالتبعية. ومن ثَم، نظرًا لأن الحركة المدارية ازدادت في المدارات الأبعد، فإنَّ الزخم الزاوي انتقل إلى المادة الخارجية من المادة الداخلية، رافعًا درجة الحرارة في أثناء ذلك.

بوجهٍ عام، يُعتبَر الزخم الزاوي كمية محفوظة، ويمكن أن تفقد المادة الأقرب إلى الثقب الأسود زخمًا زاويًّا بانتظام، ما يزيد من احتمالية أن يبتلِعها الثقب الأسود. لاحظوا أنه إذا كانت كتلة مُستديرة لزِجة من المادة المدارية لها زخم زاوٍ كبير للغاية، فستبقى بعيدًا عن مركز الكتلة التي تدور حولها؛ حيث ستكون السرعة التي تتحرك بها أكبر من أن تسمح لها بأي اقتراب. فما نوع تأثيرات اللزوجة التي قد تكون مرتبطةً بالبلازما داخل الأقراص التراكُمية؟ يمكن أن تكون اللزوجة بين الذرَّات صغيرةً في هذه الحالة؛ فالبلازما الغازية التي يتكوَّن منها القرص التراكمي مختلفة تمامًا عن لزوجة العسل الأسود. وفي الواقع، قد تكون المجالات المغناطيسية مهمَّة جدًّا في نقل الزخم الزاوي من حركة التدفُّق التراكُمي نحو الداخل. فمن أين تأتي المجالات المغناطيسية إذن؟ تكون البلازما في القُرص التراكمي شديدة السخونة، وبذلك تتأيَّن الذرات جزئيًّا لتتحوَّل إلى إلكترونات ونيوكليونات موجبة الشحنة. ولذا تُوجَد تدفُّقات لجُسَيمات مشحونة، وتُنتج الشحنات المتحركة مجالات مغناطيسية، كما هو موضح في معادلات جيمس كليرك ماكسويل. وحالما تنشأ ولو مجالات مغناطيسية ضعيفة للغاية، يمكن مطُّها وتضخيمها بفعلِ الاختلاف في سرعة الدوران، وتعديلها بفعلِ اضطراب البلازما، حتى تصل إلى المستويات التي يمكن عندَها أن تعطي اللزوجة المطلوبة. وهذا هو أساس ما يعرف بعدم الاستقرار الدوَراني المغناطيسي. كان أول مَن أدرك أهمية هذه الآلية في هذا السياق ستيف بالبَس وجون هولي في أوائل التسعينيات من القرن العشرين عندما كانا يعملان في جامعة فيرجينيا.

وبفعلِ الاضطراب اللزِج ووسائل أخرى على الأرجح، يمكن أن تفقد البلازما الزخم الزاوي في النهاية وتدور في مدار عند أنصاف أقطار أقصر وتكون أقربَ إلى الثقب الأسود. وحالما تصِل 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 تُرى مجددًا أبدًا، لكنها ستكون قد زوَّدت مقدار كتلة الثقب الأسود ودوَرانه.

ما خصائص الأقراص التراكُمية وما مدى سخونتها؟

رأينا أنَّ تأثيرات اللزوجة والحركة المضطربة تؤدي دورًا مهمًّا في تبديد الزخم الزاوي من المادة التي تدور في المدارات بحيث يمكن أن تدور على مسافةٍ أقرب من الثقب الأسود وتُبلَع داخِلَه. غير أنَّ إحدى نتائج تأثير اللزوجة أنَّ الحركة المدارية الحلزونية للكتلة تتحول 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 يُصدِر إشعاعًا حراريًّا، إلا إذا كانت درجة حرارته عند الصفر المطلق.

وهذا الارتفاع في درجة الحرارة هو الذي يُسبِّب الإشعاع الشديد الإضاءة الذي نرصد انبعاثه من الأقراص التراكُمية. وإذا كان القرص التراكُمي واحدًا من الأقراص التراكمية التي تُحيط بالثقوب السوداء الفائقة الضخامة الموجودة عند مراكز أشباه النجوم، فعادةً ما يبلغ حجمه مليار كيلومتر، ويكون الجزء الأكبر من الإشعاع المنبعث من تلك الأقراص التراكمية واقعًا في نطاق الأشعة المرئية والأشعة فوق البنفسجية من الطيف. أمَّا إذا كان القرص واحدًا من تلك الأقراص التراكمية التي تُحيط بالثقوب السوداء الأقل ضخامةً بكثير داخل ما يُسمَّى أشباه النجوم الميكروية (التي ستُستعرَض في الفصل الثامن)، فإنَّ حجمه عادةً ما يكون أصغر مليون مرة، ويكون معظم إشعاعه مكونًا من الأشعة السينية. وكلما كانت كتلة الثقب الأسود أكبر، كان أقرب مدار دائري مُستقر منه أكبر قُطرًا، وبالتبعية سيكون القرص التراكُمي المحيط أبرد.

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

كيف يُمكن قياس سرعة دوران الثقب الأسود؟

نظرًا لأنَّ رؤية الثقوب السوداء مُباشرة غير مُمكنة في الواقع، فلا يُمكن كذلك رؤيتها تدور. ولكن تُوجَد طريقتان رئيسيتان لقياس سرعة دوران الثقوب السوداء. فكما نوقش في الفصل الرابع، عندما تكون سرعة دوران الثقب الأسود كبيرةً جدًّا، فمن الممكن أن تدور المادة في مدارٍ مستقر حول الثقب الأسود أقرب إليه بكثيرٍ ممَّا كان سيكون ممكنًا لو لم يكن الثقب الأسود يدور. وقد اتضح أنَّ حرارة المادة في هذه المدارات الضيقة جدًّا تزداد بفعلِ تأثيراتٍ قوية ناجمة عن الحركة المضطربة واللزوجة في أثناء دورانها في مسار حلزوني نحو الداخل، ويمكن أن تؤديَ هذه الحرارة الهائلة إلى انبعاث أشعةٍ سينية، اعتمادًا على مدى القُرب الذي وصلَت إليه المادة من الثقب الأسود أثناء دورانها قبل أن يبتلِعها. هذا وتتنبَّأ النسبية العامة بأنَّ شكل الخطوط الطيفية (الناشئة من الانزياح نحو الأحمر تحت تأثير الجاذبية) يتأثر بالمسافة بين المادة الباعِثة للإشعاع والثقب الأسود بطريقةٍ لها أثر مميز. وينشأ هذا الأثر من بعض ذرَّات الحديد المتألِّقة داخل هذه المادة، وقد ابتكر أندرو فابيان من جامعة كامبريدج طريقة استخراج المعلومات من ضوء الأشعة السينية.

ويُعَد تفسير هذه القياسات صعبًا، بسبب العديد من العوامل المختلفة، مثل مَيل القرص بالنسبة إلى الأرض، وبالطبع طبيعة الرياح والمواد المتدفِّقة 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 يتعذَّر الوصول إليها بطريقةٍ أخرى. وتتضمَّن 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 أسخن) والمناطق الخارجية الأبعد (التي تصير أبرد تدريجيًّا). ومن الممكن تقدير مَيل 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 طرقًا مُشابهة من أجل قياس الزخم الزاوي للثقوب السوداء الفائقة الضخامة في مراكز أشباه النجوم. وتجدُر الإشارة إلى أنَّ مدى القُرب الذي يُمكن أن تصِل إليه المادة من الثقب الأسود أثناء

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

الثقوب السوداء تُبعثِر الكثير من الفُتات عند الالتهام

يتضح أنَّ مجرد جزء صغير (يُقدَّر بنحو ١٠٪، مع أنه يمكن أن يكون أكبر بكثيرٍ جدًّا) من المادة التي تنجذب نحو الثقب الأسود يصِل إلى أُفق الحدث ويُبتلَع بالفعل. ويتناول الفصل الثامن ما يحدث للجزء المتبقِّي الذي لا يُبتلَع بالفعل داخل أفق الحدث من المادة الساقطة نحو الثقب الأسود. فمن مختلف أجزاء القرص التراكُمي نفسه، يمكن أن تنبعِث المادة كريحٍ؛ أمَّا من داخل أقرب نطاقٍ حول مركز القُرص التراكمي، فتتدفَّق نفثات سريعة جدًّا من البلازما نحو الخارج بسرعاتٍ قريبة جدًّا من سرعة الضوء. وكما يُوضِّح الفصل الثامن، فإنَّ ما لا يلتهِمه الثقب الأسود يُطرَد من المدارات الموجودة حوله ويُبصَق بشكلٍ مُذهل نوعًا ما.

الفصل الثامن

الثقوب السوداء وتأثيراتها الثانوية

الثقوب السوداء لا تَمتص فقط

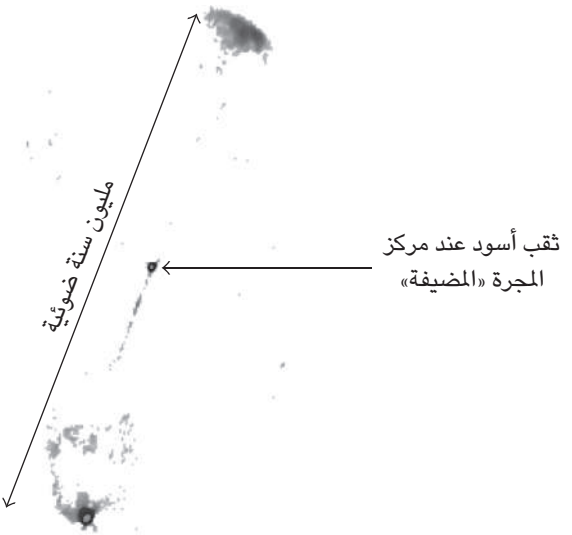
لو كانت أعيُننا تستطيع رصد ما يُوجَد في السماء عند أطوالٍ موجية تقع في النطاق الراديوي أو نطاق الأشعة السينية، لكُنَّا سنرى أنَّ بالوناتٍ ضخمة أو فصوصًا من البلازما تمتدُّ عَبر بعض المجرات. وتحتوي هذه البلازما على جزيئات مشحونة تتحرك بسرعاتٍ قريبة من سرعة الضوء، وتُصدِر إشعاعًا قويًّا له أطوال موجية مُتنوعة عَبر نطاقٍ واسع. وتنشأ فصوص البلازما التي تظهر في بعض هذه المجرات (التي تُعَد أمثلة لما يُعرَف باسم «المجرات النشطة») بفعلِ نفثاتٍ تتحرك بسرعات عالية إلى حدٍّ يجعلها قريبةً من سرعة الضوء، وتتدفَّق خارجًا من الوسط المحيط بالثقب الأسود مباشرة، خارج منطقة أفق الحدث الموجودة حوله. وقد أوضح روجر بنروز بأسلوبٍ عام كيف يمكن، من حيث المبدأ، استخراج طاقة دوران ثقب أسود من منطقة الإرجوسفير المحيطة به. وقد بيَّن روجر بلاندفورد ورومان زنايك كيف يمكن تحويل الطاقة المخزَّنة في ثقبٍ أسود دوَّار إلى مجالات كهربائية ومغناطيسية في الواقع؛ وبذلك تُتيح القدرة على إنتاج هذه النفثات النسبوية من البلازما، أي التي تقترب سُرعتها من سرعة الضوء. وكذلك تُوجَد تفسيرات أخرى للآلية التي تُطلَق النفثات بها من الثقوب السوداء القريبة. غير أنَّ معرفة التفسير الصحيح من بين هذه التفسيرات ما زالت قيد الدراسة في أبحاثٍ حالية دءوبة ومُثيرة.

وأيًّا كانت الآلية أو الآليات التي يُكشَف عنها، فإن هذه النفثات عبارة عن تدفُّقات من أشعة متوازية شديدة مقذوفة من المنطقة المحيطة بالثقب الأسود، ولكن خارج أُفق الحدث بالطبع. وفي الحقيقة، فالمناطق الواقعة بين المجرَّات ليست فضاءً فارغًا. بل تمتلئ بغازٍ مُتناثر ومُخفَّف جدًّا يُسمَّى الوسط الكائن بين المجرات. عندما تصطدم النفثات

بالوسط الكائن بين المجرات، تتشكل موجات صدمية تتسارع داخلها الجسيمات تسارُعًا مذهلًا، وتتصاعد البلازما النشِطة المفعمة بالطاقة، التي نشأت في نفثةٍ بالقُرب من الثقب الأسود، إلى الأعلى وتتدفَّق خارج المنطقة المحيطة بموضع حدوث الصدمة مباشرة. ومع تمدُّد البلازما، فإنها تنقُل كمياتٍ هائلة من الطاقة إلى الوسط الكائن بين المجرات. تُوجَد أمثلة عديدة على بعضٍ من نفثات البلازما هذه تمتدُّ عبر مسافاتٍ تُساوي ملايين السنين الضوئية. وبذلك فإنَّ الثقوب السوداء لها تأثير كوني هائل يتجاوز مناطق أُفق الحدَث المحيطة بها بسنين ضوئية عديدة. وسأصِف في هذا الفصل تأثير الثقوب السوداء في الوسط المحيط بها وتفاعلاتها معه.

كما نُوقِش في الفصل السادس، يُوجَد عند مركز معظم المجرَّات (على الأرجح) ثقبٌ أسود تتراكم عليه المادة؛ ما يؤدي إلى انبعاث إشعاع كهرومغناطيسي. تُعرف هذه المجرَّات بالمجرات النشِطة. وفي بعضها، تكون عملية التراكُم فعَّالة للغاية ويكون انبعاث الإشعاع الناتج شديدَ الإضاءة. وتسمَّى هذه المجرات أشباه النجوم (وهو مصطلح مشتق من تعريفها الأصلي الذي تُعرَف فيه بأنها «مصادر إشعاع راديوي شِبه نجمية»، وهي نقاط بعيدة جدًّا ينبعِث منها إشعاع راديوي شديد الإضاءة). نفهم الآن أنَّ أشباه النجوم تشهد أقوى إطلاق للطاقة المستدامة بين كل إطلاقات الطاقة المعروفة في الكون. فأشباه النجوم تُشعُّ طاقةً عبر الطيف الكهرومغناطيسي كله، من الموجات الراديوية ذات الطول الموجي الطويل، مرورًا بالأطوال الموجية للضوء البصري (المرئي)، وصولًا إلى الأشعة السينية وما بعدَها. ويمكن أن تكون الفصوص الباعثة للإشعاع الراديوي، المذكورة أعلاه، مُثيرةً ولافتة جدًّا لأنها تمتدُّ عبر مسافاتٍ تزيد على مئات الآلاف من السنين الضوئية (انظر شكل ٨-١). وتنشأ الطاقة التي تُشَع عند الأطوال الموجية الراديوية من تلك الفصوص الكبيرة؛ وهي خزانات من البلازما المغنطة الفائقة السخونة التي تستمدُّ طاقتها من نفثاتٍ تنقُل الطاقة عبْر مسافاتٍ هائلة في الفضاء. وتتعرض الإلكترونات العالية الطاقة (والمقصود هنا بالعالية الطاقة أنها تتحرك بسرعة قريبة جدًّا من سرعة الضوء) لقوًى تؤثر عبر اتجاه حركتها من المجالات المغناطيسية المحيطة التي تنتشِر خلال فصوص البلازما التي تتحرك داخلها تلك الإلكترونات.

وهذا التسريع يجعلها تُصدر إشعاعًا من الفوتونات يُعرَف باسم الإشعاع السنكروتروني (وهو قد يكون راديويًّا، أو قد يكون مُنتميًا، في حالات نادرة تتَّسِم بطاقةٍ عالية، إلى نطاقٍ ذي أطوال موجية أقصر بكثير، وصولًا إلى الأشعة السينية).



شكل ٨-١: هذه صورة مبثوثة بالموجات الراديوية لأحد أشباه النجوم العملاقة الذي يمتدُّ عبْر نطاقٍ مقداره مليون سنة ضوئية.

ولإعطاء فكرةٍ عن حجم الطاقة التي تُنتِجها أشباه النجوم، تأمَّلوا القِيَم التالية. تُنتِج مصابيح الصمام الثنائي الباعِث للضوء (إل إي دي) التي أعملُ على ضوئها طاقةً مقدارها ١٠ وات. وتُضاء تلك المصابيح بكهرباء مُستمَدَّة من محطة توليد الكهرباء المحلية التي تُوجَد في منطقتِي وتُنتِج بضعة مليارات وات (يُساوي المليار وات $^{٩}١٠$ وات أو جيجاوات). وتُنتج الشمس نحو $٤ \times ^{٢٦}١٠$ وات، أي أكثر ممَّا تُنتِجه محطة الكهرباء هذه بمائة مليون مليار مرة. أمَّا مجرَّتنا، درب التبانة، فتحوي أكثر من ١٠٠ مليار نجم، ويقترب مقدار الطاقة التي تُنتِجها من $^{٣٧}١٠$ وات. لكن الطاقة التي يُنتِجها أحد أشباه النجوم يمكن أن تتجاوز حتى الطاقة التي تُنتِجها المجرَّة بأكثر من ١٠٠ مرة. تذكروا أنَّ ما يُطلِق هذه الطاقة ليس مجرة مُكونة من ١٠٠ مليار نجم، بل العمليات الجارية حول ثقب أسود واحد. ويمكن أن يُلحِق إشعاعٌ كهذا أضرارًا جسيمة بصحة الكائنات الحية هنا على كوكب الأرض؛ لذا من حُسن حظِّنا عدم وجود أشباه نجوم قوية كهذه بالقُرب من مجرَّتِنا!

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

حتى وصلَت إليه. وبذلك فإنَّ علاقةً بسيطة بين المسافة والزمن والسرعة تُقدِّم خيطًا إرشاديًّا إلى معرفة المُدَد المحتملة لاستمرارية نشاط النفثات في أشباه النجوم المرصودة عبر الكون.

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

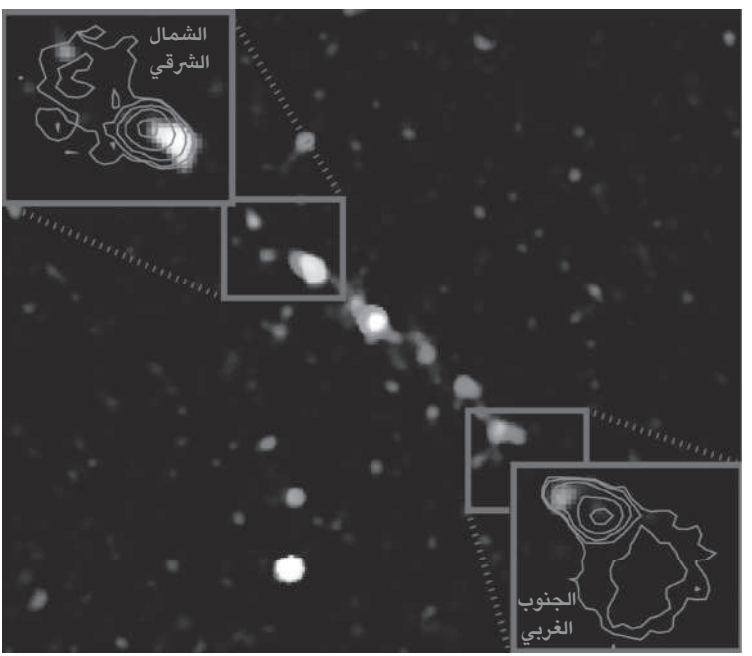
ولا يعني هذا أنَّ العرض قد انتهى، لكنَّ المشهد انتقل إلى نطاقٍ مختلف من الأطوال الموجية. وهكذا يحدُث شيء لافِت بعض الشيء؛ إذ تُضيء الفصوص بالأشعة السينية. ويحدُث هذا من خلال عملية تشتُّت تُعرَف باسم تشتت كومبتون العكسي. ففي وجود مجال مغناطيسي كبير بما يكفي، يُمكن أن تُصدِر الإلكترونات إشعاعًا سنكروترونيًّا، وبذلك تفقد طاقة. وكذلك تُوجَد آلية أخرى لفُقدان الطاقة مرتبطة بهذا الموضوع الذي نُناقِشه، وهي تحدُث من خلال تفاعُل هذه الإلكترونات مع الفوتونات التي تُشكِّل إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، أي الإشعاع المتبقِّي من الانفجار العظيم، والذي يغمر الكون حاليًّا بوهجٍ بارد 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 عمومًا). ومن الظواهر التي تحمل أهميةً

خاصة أنه عندما تنخفِض طاقات الإلكترونات السريعة الحركة إلى مقدارٍ يساوي طاقة إلكترون في وضع السكون ١٠٠٠ مرة فقط (بعدما كانت في السابق أعلى من ذلك بنحو ١٠٠ أو ١٠٠٠ مرة)، تكون طاقاتها مُكافئة تمامًا للقدْر الذي يجعلها تُشتِّت فوتونات إشعاع الخلفية الكونية الميكروي وترتقي بها إلى فوتوناتٍ في نطاق الأشعة السينية. تجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ تفاعُل أحد الإلكترونات العالية الطاقة مع فوتون مُنخفِض الطاقة لإنتاج فوتون عالي الطاقة يتشابَهُ بعض الشيء مع ما يحدُث في لعبة السنوكر حين تصطدم الكرة البيضاء (تخيل أنَّ هذه إلكترون) بإحدى الكرات الحمراء، وتكتسب الكرة الحمراء قدرًا كبيرًا من الطاقة على حساب انخفاض طاقة الكرة البيضاء (من أجل أن يكون هذا المثال التوضيحي مُناسبًا، يرجى التغاضي عن حقيقة أنَّ هذه الكرة لا تتحرك بسرعة الضوء!). وفي حين أنَّ المطاف ينتهي بالكرة الحمراء (حسبما يأمُل اللاعب) داخل أحد جيوب طاولة السنوكر، فإنَّ الفوتون (الذي كان طوله الموجي الأصلي يبلُغ نحو ملِّيمتر واحد) يكتسِب قدرًا من الطاقة يساوي طاقته قبل الاصطدام نحو مليون مرة؛ ولذا يُصبح طوله الموجي أقصر مليون مرة.

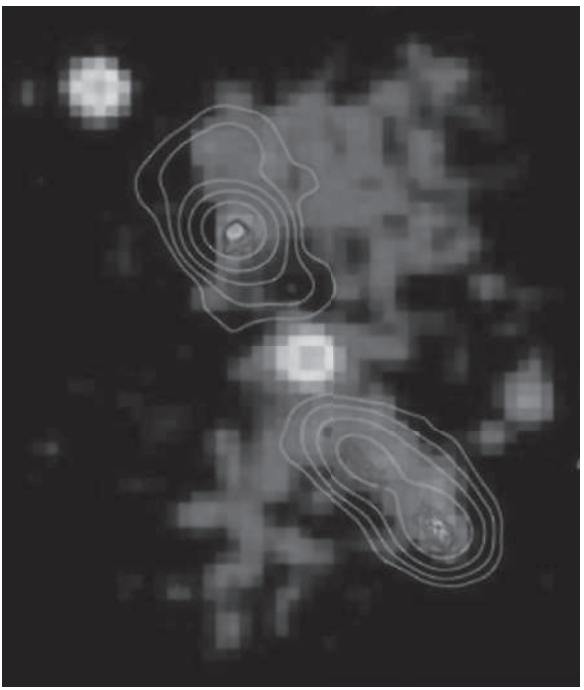
يتَّسِم قمر تشاندرا الصناعي، الذي أطلقَتْه وكالة ناسا في عام ١٩٩٩، بأنه حساسٌ للأطوال الموجية الموجودة في نطاق الأشعة السينية، ويستطيع في الواقع اكتشاف أزواجٍ من فصوصٍ على شكل أثقال التمارين (الدمبل) من إشعاعاتٍ في نطاق الأشعة السينية تمامًا كما يستطيع التلسكوب الراديوي اكتشاف هذه البِنَى المزدوجة عند أطوال موجية تُقدَّر بالسنتيمترات. تَظهر بعض البِنى المزدوجة التي رُصدت عند أطوالٍ موجية في النطاق الراديوي على هيئة مخططات كنتورية في شكلَي ٢٠ و٢١، بينما تَظهر فيهما تلك البنى المزدوجة في نطاق الأشعة السينية على هيئة تدرُّج رمادي.

وفي الواقع إذا استطعْنا مُراقبة دورة حياة أحد أشباه النجوم هذه خلال كل تلك المراحل التطوُّرية (على غرار الطريقة التي قد يُراقِب بها عالِم الأحياء دورة تطور حياة الضفدع من طورِ بيض الضفادع إلى شراغيف إلى شراغيف بسيقان صغيرة، إلى ضفادع صغيرة بذيول قصيرة، إلى ضفادع أكبر، ثم إلى ضفادع ميتة) فسنرصد تحوُّلًا من تألُّق البِنى المزدوجة بإشعاعٍ ذي أطوال موجية في النطاق الراديوي إلى أنها تُصبح مُهيمنة بدرجةٍ متزايدة في نطاق الأشعة السينية. أولًا، ستتلاشى البِنى ذات الإشعاع الراديوي إلى أن تُصبح غير قابلة للاكتشاف، ثم تتلاشى البِنى ذات الأشعة السينية إلى أن تُصبح غير قابلةٍ للاكتشاف. وبالطبع إن كان ممكنًا أن تبدأ النفثات من جديد، لو كان ممكنًا أن يحصل

الثقب الأسود على مزيدٍ من الوقود مثلًا، فعندئذٍ ستزوِّد النفثات فصوصًا مزدوجة جديدة باعثة للإشعاع الراديوي بالوقود، ثم تزوِّد فصوصًا باعِثة للأشعة السينية بالوقود مُجددًا. وكما رأينا في الشكلَين ٨-٢ و٨-٣، في بعض أشباه النجوم، نستطيع أن نرى كلًّا من البِنى المزدوجة ذات الإشعاع الراديوي والبِنى المزدوجة ذات الأشعة السينية في آنٍ واحد، ولكن في البعض الآخر، إمَّا أن نرى هذه أو تلك (شكل ٨-٤). وفي حالتَين لافتتَين، نرى أنَّ البنية المزدوجة ذات الأشعة السينية تتوافق مع تجسيدٍ سابق لنشاط النفثات، ولكن مع نشاط راديوي جديد أيضًا، بزاوية مختلفة لأنَّ الاتجاه الذي تُطلَق بطوله النفثات المتعاكسة التوجيه قد تأرجَح؛ أي تغيَّر موضعه الزاوي، ويظهر مثال لهذه الظاهرة في شكل ٨-٣.



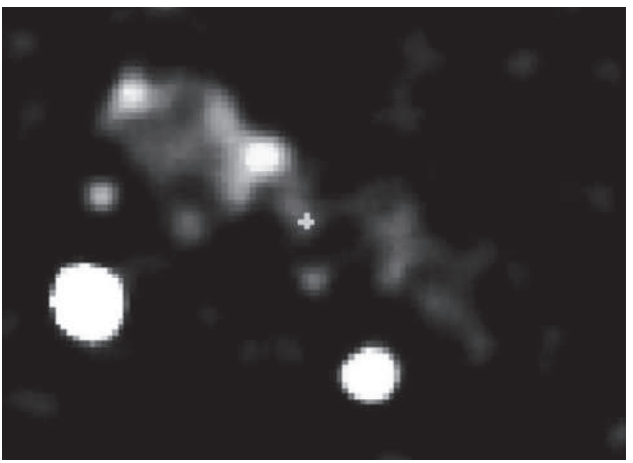
شكل ٨-٢: يمتد شِبه النجم (الكوازار) العملاق هذا على مسافةٍ مقدارها نصف مليون سنة ضوئية، ويتضمن بِنية مزدوجة الفصوص عند كلٍّ من نطاق الأطوال الموجية الراديوية (الموضح في هيئة خطوط كنتورية) ونطاق الأطوال الموجية للأشعة السينية (الموضح في هيئة تدرُّج رمادي).



شكل ٨-٣: البنية المزدوجة الفصوص التي رُصدَت في شبه النجم هذا عند أطوالٍ موجية راديوية [خطوط الكنتور] توضح أنَّ اتجاه النشاط الأحدث مختلف تمامًا عن ذلك الذي يظهر عند طاقات نطاق الأشعة السينية [التدرُّج الرمادي] (بقايا الانبعاث الذي كشفَه تشتُّت كومبتون العكسي لفوتونات إشعاع الخلفية الكونية الميكروي) ما يُشير إلى أنَّ الموضع الزاوي لمحور النفثة ربما يكون قد تغير كما يتغير الموضع الزاوي لمحاور النفثات في أشباه النجوم الميكروية.

يُعَد ثبات محور النفثة في العديد من أشباه النجوم والمجرات الراديوية مؤشرًا على ثبات الزخم الزاوي للثقب الأسود الفائق الضخامة، فيُعتبَر هكذا بمثابة جيروسكوب. ولا يُمكن معرفة السبب الذي يجعل الموضع الزاوي لبعض محاور النفثات هذه يتغيَّر دون غيرها من المحاور الأخرى إلَّا عند اكتشاف العوامل التي تحكم الزخم الزاوي للنفثات عند نقطة الإطلاق بالقُرب من الثقب الأسود. ولم يتضِح بعدُ ما إذا كان هذا هو محور دوران الثقب الأسود نفسه، أم مُتَّجه الزخم الزاوي للجزء الداخلي من القرص التراكُمي،

وما يُفاقِم هذا الغموض بالتأكيد تأثير لينز-ثيرينج أو تأثير باردين-بيترسون، اللذين ذكرتهما في الفصلَين الثالث والسابع على الترتيب، ويَلزم وجود مزيد من البيانات لتفسير السلوك المرصود تفسيرًا تامًّا. ولكن ثمة خيوط إرشادية من أجسام أصغر أقرب إلى كوكب الأرض ربما تُشير إلى أنَّ تغير الموضع الزاوي لمحاور النفثات يرتبط ارتباطًا تامًّا بالزخم الزاوي للقُرص التراكمي.



شكل ٨-٤: هذه صورة مُلتقطة بالأشعة السينية وتُظهِر البنية المزدوجة الفصوص التي تمتدُّ عبر هذه المجرة والتي لا يمكن اكتشافها إلَّا عند الأطوال الموجية الواقعة في نطاق الأشعة السينية.

أشباه النجوم الميكروية

تُعَد أشباه النجوم التي ناقشناها حتى الآن كلها عبارة عن ثقوب سوداء فائقة الضخامة تقع في مراكز المجرات النشطة. ولكن اتضح وجود فئةٍ أخرى من الأجسام تسلك سلوكًا مُشابهًا جدًّا ولكن على نطاقٍ أصغر بكثير. ويمكن رصد هذه الثقوب السوداء ذات الكتلة الأقل عند مسافاتٍ أقرب إلى كوكب الأرض، بل وتقع داخل مجرتنا درب التبانة، ويُطلَق عليها «أشباه النجوم الميكروية». ومع أنَّ الاختلاف في الحجم هائل، فإنَّ كلًّا من أشباه النجوم الميكروية الموجودة في مجرَّتنا والموجودة خارجها عند مراكز المجرات الأخرى

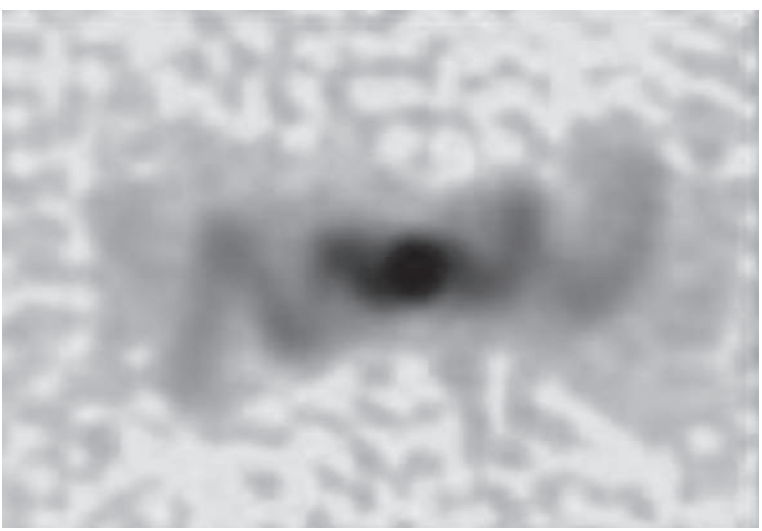
يُصدِر نفثاتٍ من البلازما ذات خصائص فيزيائية مُتشابهة. يُعتقد أنَّ كِلا النوعَين يستمدُّ الطاقة من سقوط المادة نحو ثُقبٍ أسود تحت تأثير الجاذبية. وفي حالة أشباه النجوم العادية، تكون كتلة الثقب الأسود مشابهةً لكتلة الشمس. أمَّا في حالة أشباه النجوم القوية الواقعة خارج المجرة، فيمكن أن تكون كتلة ثقوبها السوداء أكبر من كتلة شمسِنا بمائة مليون مرة. ويرى علماء الفيزياء الفلكية أنَّ إحدى الميزات المُهمَّة لأشباه النجوم المحلية الواقعة في مجرتنا تتمثَّل في أنها أصغر كتلة ولذا تتطوَّر بسرعةٍ أكبر بكثيرٍ على نطاقاتٍ زمنية تُقدَّر بأيام بدلًا من ملايين السنين في حالة أشباه النجوم. لكنَّ النفثات التي تتدفَّق خارجًا من على مقربةٍ من مركز النشاط كله تُطلَق من خارج أُفق الحدث، كما يحدث في حالة أشباه النجوم، ومن المرجَّح جدًّا أنها تُطلَق من أقرب حواف القرص التراكمي الداخلية إلى مركزه.

ثمة آليات مُعقدة تؤثر في هذه العمليات، ولا تُوجَد عَلاقة بسيطة بين السرعة التي تُطلَق بها النفثة وكتلة الثقب الأسود الذي ترتبط به. ففي أثناء مراقبة النفثات في شبه النجم الميكروي الذي يُحيط بثقبٍ أسود ويُسمَّى «سيجنوس إكس-٣»، تَظهر حالات وُجِد فيها أنَّ السرعات التي تتحرك بها نفثات البلازما بعيدًا عن الثقب الأسود تتباين. وقد قِيسَ ذلك بقياساتٍ فلكية مُتتالية الأزمنة تتضمَّن إجراء أرصادٍ عند أزمنةٍ متتالية، وهذه الأرصاد تُتيح تحديد مقدار سرعة اندفاع نفثة البلازما بعيدًا عن مُحيط الثقب الأسود. وقد أظهرت هذه القياسات في إحدى المرات أنَّ سرعة النفثة تساوي ٨١٪ من سرعة الضوء، في حين أنها وصلت بعد ذلك بأربع سنوات إلى ٦٧٪ من تلك السرعة. ولا يُوجَد ما يوحي بأن سرعة النفثة تتناقص فقط مع مرور الوقت؛ لأنَّ تحرُّك النفثة في شِبه النجم الميكروي هذا بسرعاتٍ سريعة وسرعات أبطأ منذ اكتشافه قد شُهد في عددٍ من المرات. ويبدو أنَّ تبايُن سرعات النفثة يُميِّز شبه نجمٍ ميكرويًّا آخر معروفًا جيدًا في مجرَّتنا، يُسمَّى «إس إس٤٣٣»، وسأصِفه بمزيدٍ من التفصيل أدناه. ويبدو أنَّ سرعة النفثة في شبه النجم الميكروي هذا تتبايَن بدرجةٍ كبيرة أيضًا، بل يمكن أن تساوي أي مقدار يتراوح بين ٢٠٪ و٣٠٪ من سرعة الضوء خلال أيام قليلة فقط.

جمال التناظُر

يُظهر شكل ٨-٥ صورة مُلتقَطة بالأشعة الراديوية لشِبْه النجم «إس إس٤٣٣»، الذي يقع في المجرة ويبعُد عنَّا ١٨ ألف سنة ضوئية فقط. ويُمثِّل هذا النمط اللافت الذي يمزج بين

نمطٍ مُتعرِّج وآخر لولبي بِنية نفثات البلازما كما تظهر لنا على مستوى السماء. تتحرك الشُّهُب المتفجِّرة المفردة من البلازما التي تُكوِّن تلك النفثات بسرعاتٍ هائلة تتراوح بين ٢٠٪ و٣٠٪ من سرعة الضوء. وتتبايَن محاور الاتجاهات التي تتحرك على طولها الشُّهُب المتفجِّرة مع مرور الزمن تباينًا دوريًّا باستمراريةٍ ثابتة. وفي الواقع، فإنَّ الموضع الزاوي للمحور الذي تُطلَق النفثات على طوله يتغير بالطريقة نفسها التي يتغير بها الموضع الزاوي لمجداف قائد أحد قوارب الكاياك، في الإطار المرجعي لقارب الكاياك، باستثناء أنَّ ذلك يحدُث على نطاقٍ زمني مُدته ستة أشهر بدلًا من عدة ثوانٍ. ويبدو أنَّ هذا السلوك نفسه يحدث في بعض أشباه النجوم على الأقل (انظر شكل ٨-٣)، وإن كان حدوثه في تلك الحالة يكون بحركةٍ بطيئة جدًّا إلى حدٍّ يُعجِزنا عن أخذ عيناتٍ زمنية مناسبة تُعبِّر عن مُدد التغيرات التي تحدث.



شكل ٨-٥: النفثتان المنبعِثتان من شِبه النجم «إس إس٤٣٣» كما تظهران عند أطوالٍ موجية راديوية.

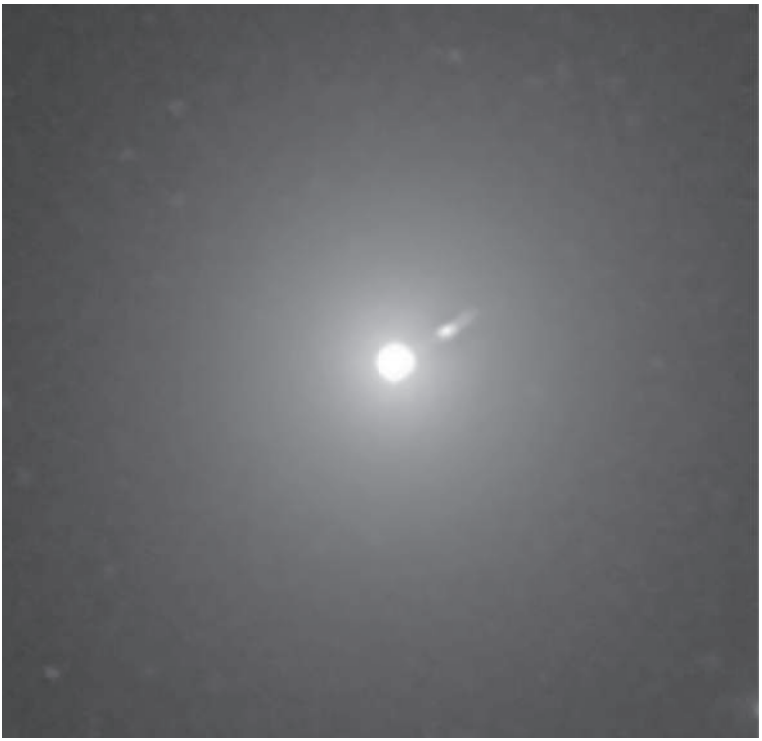
ويعتمِد المظهر التفصيلي للنمَط الذي يمزج بين نمطٍ مُتعرِّج وآخر لولبي في السماء اعتمادًا مباشرًا على الحركات المادية للشهب المتفجِّرة، بالإضافة إلى الزمن الذي يُجرى عنده

الرصد. وتتمثل إحدى السمات اللافتة للنفثات في تناظُرها؛ فالحركات المادية للمُكونات الموجودة في النفثة الشرقية مساوية لتلك الموجودة في النفثة الغربية ومُعاكسة لها؛ فعندما تكون سرعة أحد الشهب المتفجِّرة من البلازما ٢٨٪ من سرعة الضوء، تكون سرعة نظيره في النفثة ذات الاتجاه المعاكس مساويةً لهذه القيمة أيضًا؛ وإذا كانت سرعة شهاب متفجِّر آخر من البلازما تساوي ٢٢٪ من سرعة الضوء، فستكون سرعة نظيره في النفثة ذات الاتجاه المعاكس مساويةً لهذه القيمة أيضًا. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ ظهور إحدى النفثتَين ببنيةٍ مُتعرِّجة وظهور النفثة الثانية بنمطٍ لولبي مختلف بعض الشيء يحدثُ نتيجةَ أنَّ نفثة البلازما دائمًا ما تتحرك بسرعاتٍ مقاربة لسرعة الضوء، وللانحرافات النسبوية المعروفة التي تحدث في مثل هذه الظروف. صحيح أنَّ الطاقة التي يُشعُّها شِبه النجم الميكروي هذا متواضعة بعض الشيء مُقارنةً بالطاقة التي تُشعُّها أشباه النجوم الواقعة خارج المجرة، لكنها ما تزال هائلةً مُقارنة بطاقة الشمس التي تبدو ضئيلةً بعض الشيء؛ إذ يبلغ إجمالي شدة إضاءتها ٤ × ١٠^{٢٦} وات فقط، وهذه القيمة أقل بمائة ألف مرة من شدة الإشعاع الذي يُصدِره شبه النجم الميكروي الموضح في شكل ٨-٥.

إطلاق النفثات

يُمثل عنقود العذراء المجرِّي عنقودًا مؤلَّفًا من أكثر بكثيرٍ من ألف مجرَّةٍ تبعُد أكثر من ٥٠ مليون سنة ضوئية عن مجرة درب التبانة. وتُوجَد في قلبه مجرة عملاقة تُسمَّى «إم٨٧» (اختصارًا لكلمة «مسييه ٨٧»، وهي مُدرجة في القائمة التي أنشأها عالم الفلك الفرنسي تشارلز مسييه). ويُوجَد في قلبها ثُقب أسود فائق الضخامة ذو كتلةٍ تَعدِل كتلة شمسنا ثلاثة مليارات مرة. وتنبثق من هذا الثقب نفثة مُستقيمة قوية، كما هو موضح في شكل ٨-٦.

يمكن رؤية هذه النفثة بسهولة عند أطوالٍ موجية موجودة في نطاق الضوء المرئي، وأطوال موجية في نطاق الموجات الراديوية وأطوال موجية في نطاق الأشعة السينية. ويُظَن أن المادة المتساقِطة تتراكَم بمعدلٍ كُتَلي يتراوح بين كُتلتَين شمسيتَين وثلاث كتل شمسية سنويًّا، على النواة الموجودة عند المركز بالضبط حيث يُوجَد قرصٌ تراكُمي من النوع المذكور في الفصل السادس يؤثر في تلك العملية حسبما يُعتقَد. وتُعَد السرعة التي تتحرك بها هذه النفثة بعيدًا عن نقطة انطلاقها، التي تُوجَد على الأرجح في أقرب منطقةٍ من مركز القرص التراكمي، قريبة جدًّا من سرعة الضوء، ولذا توصَف بأنها نفثة نسبوية. وقد



شكل ٨-٦: نفثة من البلازما تتدفَّق خارجًا، بسرعاتٍ قريبة من سرعة الضوء، من الثقب الأسود الفائق الضخامة الموجود عند مركز مجرة «إم٨٧».

كُشِف عن سرعات النفثات القريبة من سرعة الضوء من خلال المراقبة المتتالية باستخدام أداة مصفوفة الخطِّ الأساسي الطويلة جدًّا التي قدَّمتُها في الفصل السابع، وتلسكوب هابل الفضائي والأقمار الصناعية التابعة لمرصد تشاندرا للأشعة السينية؛ إذ يُوجَد كلٌّ من ذلك التلسكوب وهذا المرصد فوق الغِلاف الجوي للأرض، ولذا يبلغان حساسية أعلى مما كانا سيبلغانها لو كانا على سطح الأرض. وعلى بعد ٥٠ مليون سنة ضوئية من الأرض، فإنَّ الجسم الذي يتحرك بسرعة الضوء سيكون متحركًا عبر السماء بمعدل أربعة ملِّي ثوانٍ قوسية في السنة. وعندما يوضع في الحسبان أنَّ الثانية القوسية تكافئ ١ / ٣٦٠٠ من الدرجة، فإنَّ جزءًا من أربعة آلاف منها قد تبدو زاوية بالِغة الصغر يستحيل قياسها،

لكنَّ مثل هذه المسافات الدقيقة الفاصلة قابلة للاستبانة بسهولة باستخدام أداة مثل مصفوفة الخط الأساسي الطويلة جدًّا. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ مصفوفة الخط الأساسي الطويلة جدًّا قد تمكنت بالفعل من تصوير قاعدة هذه النفثة حتى مسافةٍ تقع في نطاقٍ يبلُغ أقل من نصف قطر شفارتزشيلد ٣٠ مرة من ثُقبها الأسود الفائق الضخامة.

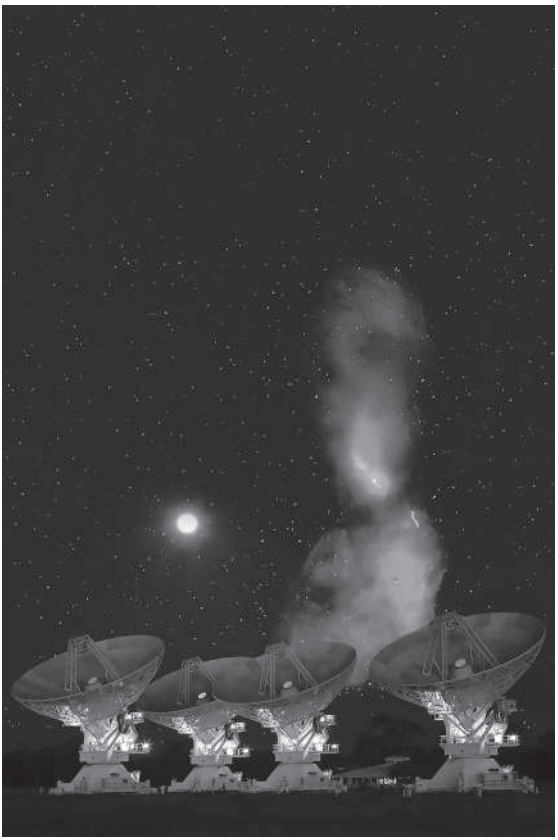
يوضح شكل ٨-٧ مثالًا لفصوص وأعمدة ريشية الشكل من بلازما باعثة لإشعاع راديوي تُغذِّيها النفثات النسبوية المنبعثة من الثقب الأسود الفائق الضخامة في مجرة «إم٨٧».

ولتسليط مزيدٍ من الضوء على مسألة أنَّ ثمة فصوصًا ممتدَّة مرتبطة بالنفثات النسبوية، يُظهِر شكل ٨-٨ مثالًا يمتدُّ ستَّ درجات عبر السماء، ومُوضَّح أنه يُعطي فكرة عن الحجم بالنسبة إلى مصفوفة التلسكوبات المُستخدَمة لإجراء الرصد. وكانت مصفوفة التلسكوبات التي استخدمتها إيلان فين وزملاؤها هي مصفوفةُ التلسكوباتِ المتقارِبة في أُستراليا.

صحيح أنَّ الآليات التي تُسيِّر إطلاق النفثات النسبوية من المنطقة المحيطة بالثقب الأسود ما زالت أقربَ بكثيرٍ إلى أن تكون مجرد تخميناتٍ من أن تكون حقيقةً مقبولة بما لا يدع مجالًا للشك المنطقي. ولكن يبدو أنَّ عدة مسارات بحثية مُستقلة، تنتهجها فرق مستقلة تمامًا تستقر في بلدان مختلفة في أنحاء العالم، تُشير ضمنيًّا إلى أنَّ أغلب الأدلة تُرجح أنَّ التفاصيل الأساسية الناشئة صحيحة. ولكن بعيدًا عن الصورة العامة، فالآليات وكيفية عملها المفصلة قائمة على التخمينات، لكنها تُختَبر بصبرٍ وسط عدم كفاية الفوتونات وتأثيرات التحيُّز الانتقائي. لا تنتمي الإثباتات إلى العلم لكنَّ الأدلة تنتمي إليه بدرجةٍ كبيرة. وما يعوقنا مسألة أنه حتى التقنيات الأكثر تقدُّمًا بين تقنيات التصوير المستخدَمة حاليًّا لا تستطيع تمييز أصغر المناطق التي يُطلق عندها معظم الطاقة، وتوضيحها باستبانةٍ كافية، ولكن هذه هي الحالة الذي يمكن فيها أن تتجاوز المحاكاة العددية على الحواسيب القوية قيود التكنولوجيا الحالية. وفي الواقع، تُنشَر للتو نتائج من عملياتٍ لمُحاكاة إطلاق النفثات من الأقراص التراكمية تُفسِّر تأثيرات النسبية العامة تفسيرًا تامًّا. وتسمح عمليات المحاكاة هذه، مع عناصر إدخال ومُسلَّمات معروفة، بتطوُّر النفثات والأقراص إلى نطاقات مُعنية من الأحجام يمكن عندها مُقارنة خصائصها بالخصائص الواردة في أحدث عمليات الرصد.

شكل ٨-٧: الفصوص الباعثة للإشعاع الراديوي التي تُغذيها النفثات النسبوية المنبعثة من الثقب الأسود الفائق الضخامة الموجود عند مركز مجرة «إم٨٧».

فما الذي نعرفه الآن عن كُتَل الثقوب السوداء في الكون إذَن؟ يبدو أنها تندرِج تحت فئتَين رئيسيتين. أولاهما تضم تلك التي لها كُتَل مُقاربة لكتل النجوم. وتساوي كتلة هذه الثقوب السوداء ذات الكتلة النجمية مقدارًا يتراوح بين ثلاث كتل شمسية وثلاثين كتلة شمسية، وهي تتولَّد من نجوم أُحرِقَ كل وقودها.



شكل ٨-٨: صورة مركبة تُظهر صورةً بصرية للقمر ومصفوفة التلسكوبات المتقاربة في أستراليا، وصورة راديوية لمجرة «قنطورس أ».

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

تحدَّثنا عن سقوط الأشياء في ثقب أسود، ولكن ماذا يحدُث عند سقوط ثقبٍ أسود في ثقب أسود؟ هذا ليس سؤالًا مجردًا، لأنه من المعروف أنَّ الكون يُمكن أن يشهد وجود أنظمة ثنائية من ثُقبين أسودين. ويُوجَد في مثل هذه الأنظمة ثقبان أسودان يدور كلٌّ

منهما في مدارٍ حول الآخر. ويُعتقَد، بسبب انبعاث الإشعاع القائم على موجات الجاذبية، أنَّ كِلا الثقبَين الأسودَين في تلك الأنظمة الثنائية سيبدأ في فُقدان الطاقة والدوران في مدار حلزوني نحو الداخل إلى أن يسقُط داخل الثقب الأسود الآخر. وفي المراحل الأخيرة من هذا الدوران في مسار حلزوني، تُدفَع النسبية العامة إلى نقطة الانهيار، ويندمج الثقبان فجأةً ليُكوِّنا ثقبًا أسود واحدًا ذا أفُق حدثٍ مُشترك. وتُعَد كمية الطاقة التي تُطلَق في اندماج ثقبَين أسودَين فائقَي الضخامة في نظامٍ ثنائي مُذهلة، ومن المحتمَل أن تكون أكبر من طاقة كل الضوء في كل النجوم في الكون المرئي. يتحوَّل معظم هذه الطاقة إلى موجاتٍ جاذبية، أي تموُّجات في انحناء نسيج الزمكان، تنتقِل عبر الكون بسرعة الضوء. وجارٍ البحث عن أدلة على هذه الموجات. الفكرة أنَّه عندما تمر إحدى موجات الجاذبية بجسمٍ مادي، كقضيبٍ طويل مثلًا، يزيد طوله وينقُص بدرجةٍ طفيفة بينما تتدفَّق عبره التموُّجات في انحناء نسيج الزمكان. وإذا أمكن قياس هذه التغيُّرات البالِغة الصغَر في الطول، باستخدام تقنيةٍ كقياس التداخُل بالليزر، تُتاح بذلك طريقة لاكتشاف موجات جاذبية متولِّدة في مكانٍ آخر من الكون. وتتَّسِم كلٌّ من الأجهزةِ الأرضية والفضائية المستخدَمة في الكشف عن موجات الجاذبية — وهي أجهزةٌ أُنشِئت أمثلة لها بالفعل ويُعتزَم إنشاء المزيد منها — بالقدرة على التقاط إشاراتٍ من اندماجات الثقوب السوداء. وفي الواقع، فإن اكتشاف موجات الجاذبية صعبٌ جدًّا إلى حدٍّ يُحتِّم وجود مصدرٍ قوي جدًّا كي تسنح أي فرصة لنجاح مثل هذه التجارب، ويُعَد اندماج الثقوب السوداء من أبرز المصادر المُرشَّحة ليكون واحدًا من هذه المصادر القوية. وحتى وقت تأليف هذا الكتاب، لم يُكتشَف أيٌّ من موجات الجاذبية اكتشافًا مباشرًا بعد، لكنَّ التجارب مستمرة.

صَمَدت صحة أفضل نظرياتنا عن الجاذبية، المُستمَدة من نظرية النسبية العامة التي وضعها أينشتاين، أمام اختباراتٍ لا حصر لها منذ اكتشافها في عام ١٩١٥. فقد اتضح أنها تتَّفِق مع التجارب اتفاقًا أفضل بكثيرٍ من نظرية نيوتن التي حلَّت محلها. ولكن إذا كان سيُمكن على الإطلاق أن تُختبَر نظرية النسبية العامة حتى أقصى حدود صمودها، فلكُم أن تتوقَّعوا بكل ثقةٍ أنَّ الثقوب السوداء ستُثبت أنها أصعب اختبارٍ لصحة هذه النظرية التي تُعَدُّ من أركان الفيزياء الحديثة. فالحالات التي تكون فيها الجاذبية عند أشدِّ مستوياتها في أصغر حيِّزٍ في الفضاء، بحيث يُفترَض أن تكون التأثيرات الكمية مُهمة، هي بالضبط الحالات التي قد تنهار فيها النسبية العامة. ولكن ربما تنهار النسبية

العامة على نطاقاتٍ كبيرة في الكون أيضًا. فمن الموضوعات التي يَكثُر النقاش بشأنها بالطبع مسألة كمال النسبية العامة لشرح التوسُّع المتسارِع للكون على أكبر النطاقات. إذ تدور نقاشاتٌ حول انحرافاتٍ مُحتملة عن النسبية العامة فيما يتعلق بالتوسُّع المتسارع والطاقة المظلمة. وإذا كُشِف عن موجات الجاذبية من اندماجات الثقوب السوداء، أو إذا عمَّقت عمليات الرصد فَهمَنا للظواهر والعمليات الفيزيائية الأساسية التي تحدث في المنطقة المحيطة بهذه الأجسام الرائعة، فستكون هناك فرصة جيدة لأن نتمكَّن من معرفة إلى أيِّ مدًى 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: أحدُها أنها تُتيح استكشاف فضاءٍ من المقاييس الفيزيائية المُحدِّدة سيكون الوصول إليه بطريقةٍ أخرى مُستحيلًا حتى وإن سُخِّرت لذلك ميزانيات اتحاد دولي. إذ تُمثل أنظمة الثقوب السوداء أشدَّ البيئات التي يُمكننا استكشافها تطرُّفًا، وبذلك فنحن نستكشِف أشد الظواهر المتطرفة في الفيزياء. وتجمع تلك الثقوب السوداء بين النسبية العامة والفيزياء الكمِّية اللتَين لم يتحقَّق توحيدهما معًا بعد، وما زال بمثابة حدٍّ مُقيِّدٍ في الفيزياء لا يُمكن تجاوزه. وثاني الأسباب أنَّ محاولة فهم ظواهر الثقوب السوداء تُثير انبهارًا لدى العلماء والكثير من الأشخاص العادِيِّين المتأمِّلين، وتُتيح طريقة يُمكن بها تحفيز الكثيرين بالعلم وحثِّهم على معرفة عظمة الكون الهائلة من حولنا. ويتمثَّل سبب ثالث، وربما يكون مفاجئًا، في التأثيرات الفرعية التي تلحق بكوكب الأرض. فكيف يُمكن أن تُغيِّر الأبحاث التي تدرس الثقوب السوداء حياتنا يا تُرى؟ الإجابة أنها غيَّرَتها بالفعل. فبينما أكتب هذه الجمل الأخيرة من هذا الكتاب الصغير على حاسوبي المحمول، يُنشئ في نفس الوقت نسخةً احتياطية من عملي على خادم الجامعة الخاص بي عبر بروتوكول ٨٠٢١١ الخاص بالاتصال اللاسلكي بالإنترنت. وهذه التكنولوجيا المعقَّدة الذكية انبثقت مباشرةً من بحثٍ عن أثرٍ مُعيَّن، عند أطوالٍ موجية راديوية، لثقوب سوداء متفجرة، وكان هذا البحث قد أجري بقيادة رون إيكرز لاختبار نموذجٍ اقترحه مارتن ريس (الذي صار الآن عضوًا في مجلس اللوردات وصاحب منصب الفلكي الملكي). وقد أدرك بعض المهندِسين العباقرة المتخصِّصين في الأنظمة الراديوية في أستراليا، بقيادة جون أوسوليفان، في أثناء ابتكار خوارزميات لكبح

التداخُل سعيًا إلى إنجاز المهمة الصعبة المتمثِّلة في اكتشاف الإشارات الدقيقة من الفضاء البعيد، أنَّ تلك الخوارزميات يمكن تطبيقُها على تحويل الاتصالات هنا على كوكب الأرض. وهكذا فإنَّ الثقوب السوداء لدَيها 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).

هنـــداوي