حلول الظلام

يتوهج درب التبانة بضوء من مئة بليون نجم، وكل واحد منها مقضي عليه بالموت. وفي غضون عشرة بلايين سنة، لا بد أن يحتجب عن الرؤية معظم ما نراه اليوم من تلك النجوم، بعد أن يقضي نحبه من حاجته إلى الوقود ضحية للقانون الثاني من قوانين الديناميات الحرارية.

ولكن درب التبانة سيواصل توهجه بضوء النجوم، لأنه حتى عندما تموت النجوم، فإن نجوماً جديدة سوف تولد لتحل محلها. ففي الأذرع الحلزونية للمجرات، كالمجرة التي تتموضع فيها شمسنا، تنضغط السحب الغازية، وتنهار بتأثير الجاذبية، وتتشظى، وتنتج شلالاً من الولادات النجمية. وتكفي مجرد لمحة إلى كوكبة الجبار لتكشف عن نشاط هذه الحضانة النجمية. فالنقطة المشوشة من الضوء في وسط سيف الجبار ليست نجماً، بل سديماً - سحابة ضخمة من الغاز رصعتها نجوم حديثة لامعة. وعن طريق ملاحظة الإشعاع تحت الأحمر أكثر من الضوء المرئي، لمح الفلكيون الذين كانوا يراقبون هذا السديم مؤخراً نجوماً في المراحل الأولى من التشكل، وما تزال تحيط بها ظلمة من الغاز والغبار.

وسوف يتواصل تشكل النجوم في الأذرع الحلزونية لمجرتنا طالما كان هناك ما يكفي من الغاز. ومحتوى الغاز في المجرة ابتدائي في جزء منه - مادة لم تتكدس بعد إلى نجوم - وفي جزء آخر غاز كان قُذِف من نجوم في المستعرات، ورياح نجمية، وجيشانات انفجارية، وعمليات أخرى. ومن الواضح إن إعادة دوران المادة لا يمكن أن يتواصل إلى ما لا نهاية. وبما أن النجوم القديمة تموت وتنهار لتصبح أقزاماً بيضاء، أو نجوماً نيوترونية، أو ثقوباً سوداء، فإنها ستكون غير قادرة على تجديد الغازات بين النجوم. وستندمج المادة الابتدائية ببطء إلى نجوم، إلى أن تُستنزَف بدورها أيضاً بصورة كلية. وبما أن

الدقائق الثلاث الأخيرة

نجوم الأيام الأخيرة هذه تقضي دورات حياتها وتموت، فإن المجرة ستصبح بعناد أكثر إعتاماً. وسيتطاول أمد التلاشي التدريجي. وسوف تنقضي بلايين عديدة من السنين قبل أن تكمل أصغر وأحدث النجوم احتراقها وانكماشها إلى أقزام بيضاء. ولكن الليل الأبدي سيحل بنهاية بطيئة معذبة.

المصير نفسه ينتظر كل المجرات الأخرى المتناثرة عبر الشقوق العميقة التي تتوسع باستمرار في الفضاء. والكون، الذي يتوهج حالياً بطاقة غزيرة من القوة النووية، سوف يستنزف في النهاية هذا المصدر القيِّم. وسينتهي عصر النور إلى الأبد.

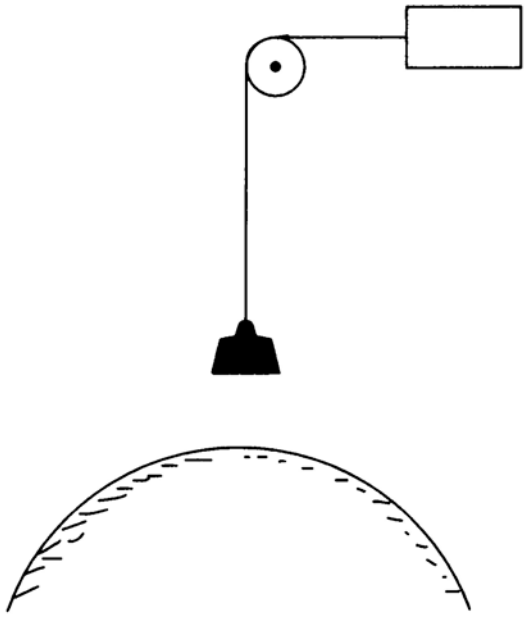
ولكن نهاية الكون لن تأتي مع خمود الضوء الكوني، لأن هناك مصدراً آخر للطاقة أكثر قوة حتى من التفاعلات النووية. فالجاذبية، وهي أضعف قوى الطبيعة في المستوى النووي، تصبح هي السائدة في النطاق الفلكي. وقد تكون لطيفة نسبياً في تأثيراتها، ولكنها، مع ذلك، مستمرة تماماً. فعلى مدى بلايين السنين، تدعم النجوم نفسها ضد وزنها الخاص عن طريق الاحتراق النووي. ولكن الجاذبية تكون طوال هذه المدة بانتظار المطالبة بها.

قوة الجذب بين بروتونين في نواة ذرية هي فقط عشر - ترليون - ترليون - ترليون - الترليون (10^{-37}) من القوة النووية الشديدة. ولكن الجاذبية تراكمية. فكل بروتون إضافي في نجم ما يضاف إلى الوزن الإجمالي. وفي النهاية، تكون قوة الجذب طاغية. وهذه القوة الطاغية هي المفتاح الذي يحرر القدرة الهائلة.

ما من شيء يوضح قوة الجاذبية بدقة أكثر من الثقب الأسود. هنا، يكون انتصار الجاذبية تاماً، حيث ينسحق نجم إلى العدم ويخلف أثراً في الزمان المكاني المحيط على شكل انحناء زمني لانهائي. هناك تجربة فكرية جذابة فيما يخص الثقوب السوداء. لنتصور أننا ألقينا جسماً صغيراً - وزن 100غ، مثلاً - إلى ثقب أسود من مسافة كبيرة. سيغيب الوزن عن البصر في الثقب ويضيع بحيث لا يمكن استرجاعه. ولكنه يترك أثراً لوجوده السابق في بنية الثقب، الذي يتوسع قليلاً جداً نتيجة لابتلاعه للوزن. وبالحساب يتبين أنه إذا ألقينا كرة من مسافة كبيرة إلى الثقب، فإن الثقب سيكتسب كمية من الكتلة تساوي الكتلة الأصلية للوزن الملقى. وما من كتلة أو طاقة تفلت.

والآن، تعالوا ندرس تجربة مختلفة، فيها ندلّي الوزن ببطء نحو الثقب. ويمكن

القيام بذلك عن طريق ربط الوزن بخيط، يمر من فوق بكرة إلى طبلة، ثم نترك الخيط ينحل. (انظروا الصورة 5-1. أفترض أن الخيط لا يتمطط أو يثقل على أي شيء، إنه مجرد خيال لتفادي تعقيد المناقشة). وعند تدلية الوزن، يمكن أن ينقل طاقة - بتشغيل مولد كهربائي موصول إلى الطبلة، مثلاً - فكلما أصبح الوزن أكثر قرباً من سطح الثقب الأسود، سيكون الجذب الثقالي الذي يمارسه الثقب على الوزن أكبر. وعندما ترتفع قوة النزول، فإن الوزن يؤثر أكثر فأكثر على المولِّد. ويكشف حساب بسيط كم من الطاقة سينقل الوزن إلى المولد عندما يصل إلى سطح الثقب الأسود. في الحالة المثالية، يتبين أنها كامل طاقة كتلة السكون للوزن. (شرحنا سابقاً مفهوم كتلة السكون).



الصورة 5-1: في هذه التجربة الفكرية المثالية، يتدلى ببطء وزن بواسطة خيط نحو سطح ثقب أسود، باستخدام مجموعة بكرة ثابتة (أداة التثبيت غير ظاهرة). وبالنتيجة، ينجز الثقل النازل عمله وينقل طاقة إلى العلبة. ويقارب إجمالي الطاقة المنقولة كامل طاقة كتلة الوزن في حالة السكون، عندما يقترب الوزن من سطح الثقب الأسود.

لنتذكر معادلة أينشتاين الطاقة = الكتلة×مربع سرعة الضوء، التي تقول إن كتلة ما تمتلك كمية من الطاقة هي ناتج ضرب تلك الكتلة بمربع سرعة الضوء. فإذا استخدم أحدهم ثقباً أسود، فإنه يمكنه، من حيث المبدأ، أن يستعيد الطاقة بالكامل. وفي حالة وزن 100غ، فإن كامل الطاقة يعني حوالي ثلاثة بلايين كيلوواط-ساعة من الطاقة الكهربائية. وبالمقارنة، عندما تحرق الشمس 100غ من الوقود عن طريق الاندماج النووي، فإنها تحرر أقل من 1% من هذا الرقم. وهكذا، يمكن، من حيث المبدأ، أن يكون الإطلاق الثقالي للطاقة أكثر قوة بمئة مرة من الاندماج الحراري النووي الذي يزود النجوم بالطاقة.

من البديهي أن تكون الحالتان المبتكرتان اللتان أتينا على وصفهما هنا غير واقعيتين أبداً. ولا شك أن الأجسام تسقط باستمرار إلى ثقوب سوداء، ولكنها لا تتدلى أبداً من بكرات بالطريقة الأكثر فعالية لاستخلاص الطاقة. عملياً، تصدر قيمة ما تتوسط بين الصفر و100% من طاقة كتلة السكون. ويعتمد الجزء الحقيقي على الظروف الفيزيائية. وقد عكف علماء الفيزياء الفلكية، على مدى عقود ماضية، على دراسة مجموعة واسعة من الأشباه الحاسوبية والنماذج الأخرى الرياضية في محاولة لفهم سلوك الغاز عندما يدور مدوِّماً إلى ثقب أسود ولتقدير كمية الطاقة المحررة ونموذجها. العمليات الفيزيائية المتضمنة معقدة جداً؛ مع ذلك، من الواضح أن الكميات الضخمة من الطاقة الثقالية يمكن أن تتدفق من هذه المنظومات.

إن مشاهدة واحدة تستحق إجراء ألف عملية حسابية، وقد قام الفلكيون ببحوث مكثفة بخصوص الأجسام التي يمكن أن تكون ثقوباً سوداء في عملية التهام المادة. وعلى الرغم من أنه لم يتم حتى الآن اكتشاف ثقب أسود مرشح على نحو مقنع تماماً، فإن منظومة واحدة واعدة جداً، كما يبدو، تتوضع في كوكبة الدجاجة وتعرف باسم الدجاجة X-1. ويكشف منظار بصري نجماً كبيراً حاراً من النوع الذي يعرف باسم عملاق أزرق، بسبب لونه. وتشير الدراسات المطيافية إلى أن النجم الأزرق ليس وحيداً؛ إنه يؤدي اهتزازات إيقاعية، وهي دلالة على أن نجماً قريباً يشده بجاذبيته بصورة دورية. من الواضح أن النجم وجسماً آخر يدوران في مدار مغلق كل منهما حول الآخر. ولكن المناظير البصرية لم تكتشف علامة للرفيق: قد يكون جسماً أسوداً أو نجماً مدمجاً معتماً جداً. وهذا يوحي بثقب أسود، ولكنه لا يعتبر برهاناً أبداً.

5- حلول الظلام

تقدم تقديرات كتلة الجسم الأسود دليلاً إضافياً. ويمكن استنتاج هذا من قوانين نيوتن، أي عندما نعرف كتلة النجم العملاق الأزرق - التي يمكن أن نقدرها بسبب العلاقة الوثيقة بين كتلة نجم ولونه: النجوم الزرقاء حارة ولذلك تكون كبيرة الكتلة. وتشير الحسابات إلى أن للجسم المرافق غير المرئي كتلة تعادل عدة شموس. ومن الواضح أنه نجم صغير عادي ومعتم، ولهذا لا بد أن يكون نجماً ضخماً منهاراً - قد يكون قزماً أبيض، أو نجماً نيوترونياً، أو ثقباً أسود. ولكن هناك أسباب فيزيائية أساسية لا يمكن معها لهذا الجسم المدمج الضخم أن يكون قزماً أبيض أو نجماً نيوترونياً. وتتصل المشكلة بشدة بمجال الجاذبية الذي يحاول أن يسحق الجسم. ويمكن تفادي الانهيار الكامل للثقب الأسود فقط في حال وجود نوع ما من ضغط داخلي، قوي بما يكفي لمقاومة قوة ضغط الجاذبية. ولكن إذا كان الجسم المنهار يعادل عدة كتل شمسية، فإنه ما من قوة معروفة يمكن أن تقاوم ثقل السحق الذي تحمله مادتها. والحقيقة أنه إذا كانت نواة النجم صلبة بما يكفي لتفادي انسحاقها، عندئذٍ يجب أن تتجاوز سرعة الصوت في المادة سرعة الضوء. وبما أن هذا يناقض نظرية النسبية الخاصة، فإن معظم الفيزيائيين والفلكيين يعتقدون أن تكوُّن ثقب أسود حتمي في ظل هذه الظروف.

يأتي الجزء الثابت للدليل من مشاهدة مختلفة تماماً على أن كوكبة الدجاجة X-1 تحتوي على ثقب أسود. فقد أطلقت عليها تسمية X-1 لأن المنظومة مصدر قوي لأشعة X، التي يمكن اكتشافها بواسطة أجهزة إحساس تحملها أقمار صناعية. وتقدم النماذج النظرية وصفاً مقنعاً لأشعة X هذه، يقوم على افتراض أن الجسم المرافق المظلم في كوكبة الدجاجة X-1 هو ثقب أسود. ومجال الجاذبية المحسوب قوي بما يكفي لامتصاص المادة من النجم العملاق الأزرق. وعندما تُسحَب الغازات المخطوفة نحو الثقب - والنسيان النهائي - فإن الدوران المداري للمنظومة يسبب هبوط المادة لكي تدور حول الثقب الأسود وتشكيل قرص. وقرص من هذا النوع لا يمكن أن يكون مستقراً تماماً، لأن المادة القريبة من المركز تدور حول الثقب الأسود بسرعة أكبر من المادة القريبة من الإطار الخارجي، وستحاول القوى اللزجة تهدئة الدوران التفاضلي. وبالنتيجة، يتسخن الغاز إلى درجة مرتفعة بما يكفي ليس لإصدار الضوء فقط، بل وأشعة X أيضاً. وفقدان الطاقة المدارية يجعل الغاز يتحرك ببطء بصورة حلزونية إلى الثقب.

ولهذا السبب، فإن الدليل على وجود ثقب أسود في كوكبة الدجاجة X-1 يعتمد على سلسلة طويلة إلى حد ما من الاستنتاج، بما في ذلك التفاصيل العيانية والصياغة النظرية. وهذا نموذجي بالنسبة لطبيعة معظم البحث في هذه الأيام؛ فليس هناك جزء واحد من دليل ملزم، ولكن مختلف الدراسات لكوكبة الدجاجة X-1، إذا تناولناها مجتمعة، تشير بقوة إلى وجود ثقب أسود. ولا شك في أن تعليل الثقوب السوداء تعليل متقن أكثر مما هو مبتكر.

يمكن أيضاً توقع تأثيرات أكثر إثارة من نشاطات تمارسها ثقوب سوداء أكبر. وفي هذه الأيام، يبدو من المحتمل أن الكثير من المجرات تحتوي في مراكزها على ثقوب سوداء فائقة الضخامة. والدليل على هذا هي سرعة الحركة التي تعرضها النجوم في هذه النوى المجرّيَّة؛ فالنجوم تبدو وكأنها تُسحَب نحو جسم قوي الجذب، مدمج بدرجة عالية. وتتراوح تقديرات كتلة هذه الأجسام المحتملة من عشرة ملايين إلى بليون كتلة شمسية؛ وهذا يعطيها شهية نهمة بخصوص أية مادة شاردة قريبة منها. وربما تقع كافة النجوم، والكواكب، والغازات، والغبار ضحية لهذه الوحوش. وعنف عملية السقوط لا بد أن يكون، في بعض الحالات، كبيراً بما يكفي لتشويش كامل بنية المجرة. يعرف الفلكيون الكثير من أنواع النوى المجرّيَّة النشيطة. فبعض المجرات تعرض مظهر التفجر حرفياً؛ والكثير منها مصادر فعالة للموجات اللاسلكية، وأشعة X، وأشكال أخرى من الطاقة. وأكثرها تمييزاً صنف من المجرات النشيطة التي تنتج نفثات هائلة من الغاز- نفثات بطول آلاف أو حتى ملايين السنوات الضوئية. ونتاج بعض هذه الأجسام مذهل. فعلى سبيل المثال، إن «النجوم الزائفة» Quasars البعيدة جداً- اسم مختصر «لأجسام شبيهة بالنجوم» - يمكن أن تُصدِر من الطاقة بمقدار ما تصدره آلاف المجرات، حتى من منطقة صغيرة بعرض سنة ضوئية، مما يعطيها مظهراً خارجياً كمظهر النجوم.

يظن الكثيرون من علماء الفلك أن المحركات المركزية لكافة هذه الأجسام الممزقة إلى حد خطير هي ثقوب سوداء ضخمة دائرة، تقوم بعملية هضم المادة القريبة منها. وأية نجوم تقترب من ثقب أسود يحتمل أن يمزقها إرباً بجاذبيته أو تتحطم نتيجة لاصطدامها بنجوم أخرى. وكما في حالة كوكبة الدجاجة X-1، إنما على نطاق أوسع، ربما تشكل المادة الموزعة قرصاً من الغاز الحار يدور حول الثقب ويغوص ببطء

إلى داخله. فقد أُعلِن في شهر مايو/أيار عام 1994 أن مرصد هابل الفضائي اكتشف قرصاً من الغاز يدور بسرعة في مركز المجرة M87. وتشير المشاهدات بقوة إلى وجود ثقب أسود فائق الضخامة.

قد يحدث أن تجري الطاقة الغزيرة المنطلقة من قرص الغاز الذي يتدفق على الثقب الأسود على طول محور دوران هذا الثقب، فتسبب، كما يُلاحَظ غالباً، نفثات مزدوجة في اتجاهين متعاكسين. هذه الآلية لإطلاق الطاقة، وتَشكُّل النفثات، يحتمل أن تكون معقدة جداً، وتتطلب قوى كهرطيسية، ولزجة وغيرها إضافة إلى الجاذبية. ويبقى الموضوع مادة للبحث المكثف، النظري والعياني.

وماذا عن درب التبانة؟ هل يمكن أن تتمزق مجرتنا بهذه الطريقة؟ يقع مركز درب التبانة على بعد ثلاثين ألف سنة ضوئية، في كوكبة القوس والرامي. تحجب المناطق الداخلية سحب كبيرة من الغاز والغبار، ولكن المعدات اللاسلكية، وأشعة X، وأشعة غاما، والأشعة تحت الحمراء ساعدت الفلكيين على تمييز وجود جسم نشيط جداً ومدمج بدرجة عالية يدعى كوكبة القوس والرامي A^*. وعلى الرغم من أن كوكبة القوس والرامي A^* ليست أكبر من بضعة بلايين كيلومتر عرضاً (صغيرة بالمعايير الفلكية)، فإنها المصدر الإشعاعي الأكثر فعالية في المجرة. ويتوافق موقعها مع موقع مصدر للأشعة تحت الحمراء البالغة الشدة، وقريبة أيضاً لجسم غير عادي لأشعة X. ومع أن الحالة معقدة، فإن الاحتمال يتزايد بوجود ثقب أسود واحد ضخم، على الأقل، يترصد هناك وهو المسؤول عن شيء من الظاهرة المنظورة. مع ذلك، ربما تكون كتلة الثقب عشرة ملايين كتلة شمسية على الأكثر، مما يجعلها تماماً في أسفل مدى الضخامة الفائقة. وليس هناك دليل على وجود نوع من العنف في إصدار الطاقة والمادة التي تظهر في بعض النوى الأخرى المجرّيَّة، ولكن قد يكون هذا لأن الثقب الأسود في طور هدوء حالياً. ويمكن أن تثور ثائرته في مرحلة ما في المستقبل - ربما إذا استقبل إمداداً أكبر من الغاز - مع أنه ربما لا يكون تمزيقياً ككثير من المنظومات الأخرى المعروفة. وما تمارسه ثورة كهذه من تأثير على النجوم والكواكب في الأذرع اللولبية للمجرة غير معروف.

يواصل ثقب أسود إطلاق طاقة الكتلة الساكنة للمادة الضحية طالما كانت هناك مادة مجاورة له يتغذى بها. وبمرور الزمن، تلتهم الثقوب السوداء المزيد والمزيد من

المادة، ونتيجة لذلك، تصبح الثقوب أكبر وأكثر جوعاً. وأخيراً، تستسلم حتى النجوم في المدارات البعيدة جداً حول الثقب. والسبب هو ظاهرة ضعيفة جداً ومع ذلك فهي حاسمة في النهاية وتعرف بإشعاع الجذب.

بعد أن وضع أينشتاين نظريته العامة في النسبية عام 1915 بوقت قصير، اكتشف خاصية مهمة لمجال الجاذبية. فقد اكتشف، من دراساته لمعادلات نظرياته في المجالات، أنها تتنبأ بوجود ذبذبات جذب تشبه الموجات تنتشر بسرعة الضوء عبر مكان فارغ. يذكّر هذا الإشعاع الجذبي بالإشعاع الكهرطيسي، كالموجات الضوئية واللاسلكية. ولكن إشعاع الجذب، مع أنه يمكن أن يحمل قدراً كبيراً من الطاقة، فإنه يختلف عن الإشعاع الكهرطيسي في القوة التي يشوش بها المادة. وفي حين أنه يتم بسهولة امتصاص موجة لاسلكية من قبل بنية هشة كشبكة أسلاك، فإن تفاعل موجة الجذب ضعيف جداً حتى أنها تمر مباشرة عبر الأرض من دون أي نقص تقريباً. إذا استطاع المرء أن يصنع ليزراً جذبياً، فإنه سيحتاج إلى حزمة شعاعية بقدرة ترليون كيلوواط لكي يغلي ملء إبريق شاي من الماء بصورة فعالة كوشيعة كيلوواط واحد كهربائية. يمكن تتبع أثر الضعف النسبي لإشعاع الجذب إلى حقيقة أن الجاذبية هي القوة الأضعف بكثير بين القوى المعروفة في الطبيعة. فعلى سبيل المثال، إن نسبة قوى الجذب إلى القوى الكهربائية في الذرة هي 10^{-40} تقريباً. والسبب الوحيد الذي يجعلنا نلاحظ الجاذبية هو أن تأثيراتها تراكمية، ولهذا فهي تسيطر في أجسام كبيرة كالكواكب.

موجات الجذب ضعيفة جداً ليس فقط بتأثيراتها ولكن في إنتاجها أيضاً. مبدئياً، يتم إنتاج الإشعاع الجذبي عندما تُشوَّش الكتل. فعلى سبيل المثال، تصدر عن حركة الأرض حول الشمس سلسلة متواصلة من موجات الجذب، ولكن النتاج الكلي لقدرة هذه الموجات هو ميلي واط واحد فقط! يسبب هذا الصرف للطاقة تفكك مدار الأرض، ولكن بسرعة بطيئة إلى حد مضحك: حوالي ألف/ترليون سنتيمتر في العقد.

مع ذلك، تختلف الحالة إلى حد مثير فيما يخص الأجسام الفلكية التي تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء. فهناك نوعان من الظواهر يحتمل أن تؤدي إلى تأثيرات مهمة، جذبية - إشعاعية. وأحد هذه التأثيرات هو حادث عنيف مفاجئ - مستعر، أو انهيار نجم لتشكيل ثقب أسود. يؤدي حادث كهذا إلى إصدار نبضة قصيرة الأجل من

الإشعاع الجذبي، تستمر ربما بضعة أجزاء من مليون من الثانية وتجرف نموذجياً 10^{44} جولاً من الطاقة. (قارن هذا بإنتاج الشمس من الحرارة الذي يبلغ 3×10^{26} جولاً تقريباً في الثانية). والظاهرة الأخرى هي حركة عالية السرعة لأجسام ضخمة في مدار حول بعضها بعضاً. فعلى سبيل المثال، ستولّد مجموعة من النجوم المزدوجة المتباعدة على نحو متعادل تدفقاً كبيراً متواصلاً من الإشعاع الجذبي. هذه العملية فعالة، خصوصاً، إذا كانت النجوم الدائرة أجساماً منهارة، كالنجوم النيوترونية أو الثقوب السوداء. هناك، في كوكبة العقاب، نجمان نيوترونيان يدوران على بعد بضعة ملايين من الكيلومترات فقط من بعضهما. ومجالا جاذبيتهما قويان جداً إلى درجة معها يكتمل كل مدار في أقل من ثمان ساعات، وهكذا تتحرك النجوم بجزء محسوس من سرعة الضوء. هذه الحركة السريعة غير العادية تضخم، إلى حد كبير، سرعة إصدار موجات الجذب، وتسبب تفكك المدار بمقدار سنوي يمكن قياسه (تغيير 75 ميكروثانية تقريباً في الفترة). وستزداد سرعة الإصدار عندما تدور النجوم حلزونياً مع بعضها بعضاً. فهي مقدر لها أن تصطدم ببعضها بعضاً بعد ثلاثمئة مليون سنة من الآن.

يقدر الفلكيون أن مجموعة نجوم مزدوجة من هذا النوع تلتحم مرة تقريباً كل مئة ألف سنة في كل مجرة. خلال اللحظات الأخيرة التي تسبق اصطدامها، تكون النجوم مدمَّجة جداً، ومجالات جاذبيتها قوية جداً، ولذلك سوف تدور حول بعضها بعضاً آلاف المرات في الثانية، وسيزداد تواتر موجة الجذب بزقزقة مميزة. تنبأت معادلات أينشتاين بأن نتاج قوة الجذب سيكون هائلاً في الطور النهائي هذا، وسينهار المدار بسرعة. وسوف يتشوه بشده شكل النجوم تحت تأثير الدفع المتبادل، حتى أنها سوف تبدو، في الوقت الذي تتلامس به، كمجموعة سيجار تدور بسرعة. والالتحام الناتج سيكون حدثاً مشوشاً، حيث يندمج النجمان لتشكيل كتلة معقدة، تثب بجنون، وتقوم أيضاً بإرسال إشعاع جذبي بغزارة حتى تستقر بشكل كروي تقريباً، ترن وتتأرجح كجرس مهول بطريقة اهتزازية مميزة. وستنتج هذه الالتحامات أيضاً كمية محددة من الإشعاع الجذبي، مستنزفة الجسم من مزيد من الطاقة، حتى يهدأ ويصاب بالخمول في النهاية.

وعلى الرغم من أن سرعة فقدان الطاقة بطيئة، فإن إصدار الإشعاع الجذبي يحتمل أن يمارس تأثيرات عميقة طويلة الأجل على بنية الكون. ولهذا السبب، من المهم أن يحاول

العلماء إثبات فكرتهم حول هذا الإشعاع عن طريق الملاحظة. تظهر الدراسات لمنظومة النجوم النيوترونية المزدوجة في كوكبة العقاب أن المدار يتفكك بدقة بالسرعة التي تنبأت بها نظرية أينشتاين. ولذلك، فإن هذه المنظومة تؤمِّن دليلاً مباشراً على إصدار الإشعاع الجذبي. ولكن اختباراً حاسماً أكثر يتطلب تحري هذا الإشعاع في المختبر على سطح الكرة الأرضية.وقد قام كثير من مجموعات البحث بنصب أجهزة مصممة لتسجيل المرور السريع لعصفة من الموجات الجذبية، ولكن أياً من هذه المعدات، حتى الآن، لم يكن حساساً بما يكفي لاكتشاف أي شيء من هذا القبيل، ويحتمل أنه يتوجب علينا انتظار جيل جديد من المستكشفين قبل أن يصبح بالإمكان إثبات وجود الإشعاع الجذبي تماماً.

قد ينتج التحام نجمين نيوترونيين إما نجماً نيوترونياً كبيراً أو ثقباً أسود. والتحام نجم نيوتروني وثقب أسود، أو التحام ثقبين أسودين، يجب أن يُنتِج ثقباً واحداً أسود. وهذه العملية يجب أن تترافق بفقدان طاقة موجات جذبية كما في حالة النجوم النيوترونية المزدوجة، يتبعه رنين معقد وحركات متأرجحة، تتضاءل ببطء تحت تأثير فقدان قدرة موجات الجذب.

من المهم العمل على استقصاء الحدود النظرية لطاقة الجذب التي يمكن استخلاصها من ثقبين أسودين أثناء الالتحام. وقد وُضِعَت تفاصيل نظرية هذه العمليات من قبل روجر بنروز، وستيفن هوكينغ، وبراندون كارتر، وريمو روفيني، ولاري سمار، وآخرون في مطلع السبعينيات (القرن الماضي-م). فإذا كانت الثقوب غير دوَّارة ومتماثلة في الكتلة، فإنه يمكن أن يتحرر حوالي 29% من إجمالي طاقة الكتلة في وضع السكون. ولا حاجة لأن تكون هذه الطاقة كلها على شكل إشعاع جذبي إذا ما عولجت الثقوب السوداء بطريقة ما - بنوع ما من تقنية متقدمة مثلاً - ولكن معظم الطاقة المنطلقة، في اندماج طبيعي، ستكون في هذا الشكل الذي يفتقر إلى الوضوح التام. وإذا كانت هذه الثقوب تدور بالسرعة القصوى التي تسمح بها قوانين الفيزياء (بسرعة الضوء، تقريباً) والدوران المعاكس المندمج على امتداد محاور دورانها، فإنه يمكن أن تصدر 50% من طاقة الكتلة.

حتى هذا الجزء الضخم ليس هو الحد الأقصى النظري. ومن الممكن أن يحمل الثقب الأسود شحنة كهربائية. وللثقب الأسود المشحون حقل كهربائي إضافة إلى حقل

مغنطيسي، وكلاهما يمكن أن يختزنا الطاقة. فإذا واجه ثقب أسود إيجابي الشحنة ثقباً أسود سلبي الشحنة، عندئذٍ يحدث «تفريغ»، فتتحرر في العملية طاقة كهرطيسية إضافة إلى طاقة جذبية.

هناك حد لهذا التفريغ، لأن ثقباً أسوداً لكتلة مفترضة يمكن أن يحمل شحنة كهربائية تصل فقط إلى قيمة ما أعظمية. هذه القيمة، بالنسبة لثقب غير دوَّار، يحددها الاعتبار التالي. لنتصور ثقبين متماثلين يحملان الشحنة نفسها. يسبب حقلاهما الجذبيان قوة جذب بينهما، في حين يسبب حقلاهما الكهربائيان قوة دفع (مثلما تدفع الشحنات). فعندما تبلغ نسبة الشحنة إلى الكتلة قيمة حرجة، فإن هاتين القوتين المتعارضتين سوف تتوازنان تماماً، ولن تكون هناك قوة صافية بين الثقبين الأسودين. هذه الحالة هي التي تميز الحد لكمية الشحنة الكهربائية التي يمكن أن يحتويها ثقب أسود. وقد يتساءل المرء حول ما يمكن أن يحدث لو أنه حاول أن يزيد الشحنة على الثقب الأسود إلى أكثر من هذه القيمة الأعظمية. هناك طريقة واحدة للقيام بهذه المحاولة هي إجبار شحنة أكبر بالنزول إلى الثقب. سيعمل هذا الإجراء على زيادة الشحنة الكهربائية، ولكن العمل المنجز في التغلب على الشحنة الكهربائية يستخدم طاقة، وهذه الطاقة تصل إلى الثقب. وبما أن للطاقة كتلة (لنتذكر أن الطاقة = الكتلة × مربع سرعة الضوء)، فإن الثقب يصبح أكثر ضخامة، وبالتالي أكبر. ويُظهِر حساب بسيط أن الكتلة تصعد، في هذه العملية، بأكثر من الشحنة، وبالتالي تنقص نسبة الشحنة إلى الكتلة، وتفشل محاولة التغلب على الحد.

يسهم المجال الكهربائي لثقب أسود مشحون إلى إجمالي كتلة الثقب. وفي حالة ثقب يحمل أقصى كتلة مسموحة، فإن المجال الكهربائي يمثل نصف الكتلة. إذا كان ثقبان غير دائرين يحملان الشحنة القصوى ولكنهما *متعاكسي* الإشارة، فإن كلاً منهما سيجذب الآخر ثقالياً وكهرطيسياً في وقت واحد. وعندما يندمجان، فإن الشحنات الكهربائية ستتعادل، ويمكن أن تُستخلَص الطاقة الكهربائية. ونظرياً، يمكن أن تصل الطاقة المستخلصة إلى 50% من إجمالي طاقة الكتلة في المنظومة.

نحصل على الحد الأعلى المطلق لاستخلاص الطاقة إذا كان كلا الحقلين يدوران وشحنتاهما الكهربائيتين مختلفتين، كل منهما إلى القيمة القصوى. وعندئذٍ، يمكن

أن يتحرر ثلثا الطاقة الإجمالية للكتلة. وبطبيعة الحال، إن أهمية هذه القيم نظرية فقط، لأن الثقب الأسود عملياً لا يُتوَقَّع له أن يحمل شحنة كهربائية كبيرة، ولا يحتمل أن يندمج ثقبان بطريقة مثلى، ما لم يكونا قد أعِدَّا لذلك من قبل مجتمع تقني متقدم. ولكن، حتى الالتحام غير الفعال لثقبين أسودين ربما يسبب، بطريقة ما، تحرير طاقة فورية، تبلغ جزءاً مهماً من إجمالي طاقة الكتلة للأجسام صاحبة العلاقة. ويمكن مقارنة هذه الكمية من الطاقة بتلك الكمية الزهيدة المقدرة بـ1% من طاقة الكتلة التي تصدرها النجوم عن طريق الالتحام النووي خلال حياتها التي تستمر عدة بلايين من السنين.

تكمن أهمية هذه العمليات الجذبية في أن النجم المحترق، بصرف النظر عن الموت، يتمتع، وهو كجمرة منهارة، بإمكانية إطلاق كمية من الطاقة أكبر بكثير مما يطلقه، وهو ككرة متوهجة من الغاز، تحت تأثير عمليات نووية حرارية. عندما لوحظت هذه الحقيقة قبل عشرين سنة تقريباً، كوَّن الفيزيائي جون ويلر - الرجل الذي ابتكر أصلاً عبارة «ثقب أسود» - فكرة عن حضارة افتراضية قادها تزايد حاجاتها من الطاقة إلى أن تهجر نجمها وتتخذ مسكناً لها حول ثقب أسود دائر. كان يجري يومياً تحميل فضلات المجتمع في شاحنات وإرسالها نحو الثقب على مسار منحن محسوب بدقة. ويتم تحرير محتويات الشاحنات قرب الثقب، بقلب الفضلات إليه، وهي وسيلة للتخلص منها إلى الأبد. تمارس المادة الساقطة، التي تنتقل على امتداد طريق دائر معاكس لحركة الثقب الزاوية، تأثيراً كابحاً إلى حد ما. ونتيجة لذلك، تتحرر الطاقة الدورانية للثقب، ويمكن أن تستخدمها الحضارة لتزويد صناعتها بالطاقة. ولهذا السبب، فإن هذه العملية تتميز بفضيلة مزدوجة هي أنها تخلصنا تماماً من كل النفايات عن طريق تحويلها إلى طاقة صرف! وبهذه الطريقة، يمكن للحضارة أن تحرر عند الطلب من نجم ميت إمداداً من الطاقة أكبر بكثير مما يصدره النجم في طوره المنير.

ومع أن استعمال طاقة ثقب أسود هو سيناريو من سيناريوهات الخيال العلمي، فإن قدراً كبيراً من المادة سيؤول مصيره إلى داخل الثقب الأسود بصورة طبيعية - إما كجزء من النجم الذي ينهار ليشكل ثقباً أو كحطام يُبتلَع أثناء مواجهة عارضة. عندما ألقي محاضرات حول الثقوب السوداء، فإن الكثيرين من الناس يريدون دائماً أن يعرفوا ما الذي يحدث للشيء الذي يدخل أحد تلك الثقوب. ونجيب بإيجاز: لا نعرف. ففهمنا الراهن

للثقوب السوداء يقوم على أساس دراسات نظرية وصياغة رياضية. ونحن، في الواقع، لا يمكننا أن نشاهد داخل الثقب الأسود من الخارج، وحتى لو تهيأ لنا مأتىً جيداً إليه (وهو أمر ليس متاحاً)، فإنه لا يمكننا أبداً أن نعرف ما يجري داخله. مع ذلك، يمكن أيضاً استخدام نظرية النسبية، التي تتنبأ بوجود الثقوب السوداء أولاً، للتنبؤ بما يحدث لرائد فضاء يسقط في أحد الثقوب. وما يتبع ذلك هو خلاصة لتلك الاستنتاجات النظرية.

سطح الثقب، في الواقع، ليس أكثر من تركيب رياضي - ليس هناك غشاء حقيقي، بل فقط حيز فارغ. ورائد الفضاء الذي يسقط فيه لن يلاحظ شيئاً مختلفاً على نحو خاص عندما يعبر إلى الثقب. ومع ذلك، يتمتع السطح بأهمية فيزيائية أكيدة - ومثيرة إلى حد ما. الجاذبية داخل الثقب قوية جداً حتى أنها تحتبل الضوء، وتشد الفوتونات الراحلة وتعيدها إليه. هذا يعني أن الضوء لا يمكنه أن يفلت من الثقب، ولهذا يبدو أسوداً من الخارج. وبما أنه لا يمكن لجسم أو معلومات فيزيائية أن تنتقل بسرعة أعلى من سرعة الضوء، فإنه لا يمكن لشيء أن يفلت من الثقب الأسود بعد عبور هذا الحد. والحوادث التي تقع داخل الثقب تبقى إلى الأبد محجوبة عن المراقب الخارجي. ولهذا السبب، يُطلَق على سطح الثقب اسم «أفق الحوادث» - لأنه يفصل الحوادث على السطح الخارجي، التي يمكن ملاحظتها من بعيد، عن تلك على السطح الداخلي، التي لا يمكن مشاهدتها. ولكن النتيجة هي فقط طريق وحيدة الاتجاه. ويمكن لرائد الفضاء داخل أفق الحوادث أن يواصل رؤية خارج الكون، مع أنه لا يمكن لأحد هناك أن يراه.

عندما يغوص رائد الفضاء إلى عمق أكبر داخل الثقب، يرتفع مجال الجاذبية. ونتيجة لذلك، يتشوه الجسم. فإذا سقط رائد الفضاء بقدميه أولاً، فإن القدمين سيكونان أقرب من الرأس إلى مركز الثقب، حيث تكون الجاذبية أقوى. ونتيجة لذلك، تنسحب قدما رائد الفضاء نزولاً بشدة أكبر، ويتمطط جسمه طولاً. وفي الوقت نفسه، ينشد الكتفان نحو مركز الثقب على مسالك تتجه نحو نقطة واحدة، وهكذا يكون رائد الفضاء منضغطاً بالعرض. ويشار أحياناً إلى عملية المط والانضغاط هذه بخيال السباغيتي.

ترى النظرية أن الجاذبية ترتفع بدون حد عند مركز الثقب الأسود. ولأن مجال الجذب يتظاهر كانحناء، أو التواء للزمان المكاني، فإن تصاعد الجاذبية يترافق بانحناء الزمان المكاني الذي يرتفع أيضاً من دون حد معروف. ويشير علماء الرياضيات

إلى هذه السمة كـ شذوذ زماني مكاني. إنه يمثل حداً، أو حافة، للمكان والزمان لا يمكن أن يتواصل من خلاله المفهوم السوي للزمان المكاني. يعتقد كثير من الفيزيائيين أن الشذوذ داخل ثقب أسود يمثل بإخلاص نهاية المكان والزمان، وأن أية مادة تواجهه ستمحى تماماً. فإذا صح ذلك، فإنه حتى الذرات في جسم رائد الفضاء ستتلاشى إلى الشذوذ، في جزء من ألف مليون من الثانية من خيال السباغيتي الفائق.

إذا كان لثقب أسود كتلة مليون شمس - كالثقب الذي يقع عند مركز درب التبانة-وغير دائر، عندئذٍ، يكون الأمد الذي يخبُرُه رائد الفضاء في سقوطه من أفق الحوادث إلى شذوذ الفناء سيمتد ثلاث دقائق تقريباً. ستكون هذه الدقائق الأخيرة الثلاث متعبة جداً؛ فمن حيث المبدأ، إن خيال السباغيتي سيقتل الشخص العاثر الحظ قبل وصوله إلى الشذوذ بمدة طويلة. وأثناء هذا الطور النهائي، سيكون رائد الفضاء، في كل حالة، غير قادر على رؤية الشذوذ المهلك، لأن الضوء لا يمكن أن يفلت منه. إذا كان للثقب الأسود الذي نحن بصدده كتلة تعادل فقط كتلة شمس واحدة، فإن نصف قطره يكون 3كم تقريباً، وتستغرق الرحلة من أفق الحوادث إلى الشذوذ فقط بضعة أجزاء من مليون من الثانية.

عندما يقترب رائد الفضاء من أفق الحوادث، فإن سرعة الحوادث في الجوار تبدو للمراقب البعيد وكأنها آخذة في التباطؤ. وفي الواقع، يبدو وكأن رائد الفضاء سيستغرق مدة لانهائية من الزمن لكي يصل إلى الأفق. وهكذا، فإن كل ما يساوي الخلود في المناطق البعيدة من الكون يخبُره رائد الفضاء دفعة واحدة. ومن هذه الناحية، فإن الثقب الأسود هو نوع من بوابة إلى نهاية الكون، زقاق كوني مسدود يمثل مخرجاً إلى لا مكان. فثقب أسود هو منطقة صغيرة من الفضاء تحتوي على نهاية الزمن. وبالقفز داخل واحد من هذه الثقوب، يمكن لأولئك الذين يهتمون بنهاية الكون أن يخبُروا ذلك مباشرة بأنفسهم.

ومع أن الجاذبية هي أضعف بكثير من كافة قوى الطبيعة، فإن عملها المخاتل والتراكمي يعمل لتقرير المصير النهائي ليس فقط للأجسام الفلكية المستقلة، بل أيضاً لكامل الكون. وشدة الجذب بالذات التي تسحق نجماً تؤثر على نطاق أكبر بكثير على الكون ككل. ويعتمد ناتج شدة هذا الجذب الكوني بدقة على إجمالي كمية المادة الموجودة لممارسة الجذب الثقالي. ولاكتشاف ذلك، يجب علينا أن نقوم بوزن الكون.