الفصل الثاني

حول الثقب الأسود

الثقب في الزمن

لقد أشرنا سابقاً إلى أن نظرية الجاذبية تتكهن بأن الزمن يجري أبطأ كلما اقتربت الساعة من مجال الجاذبية. وهذا يعني إنه كائنة ما كانت العمليات التي تجري في حقل الجاذبية القوية، فإن المراقب البعيد عن الثقب الأسود سوف يرى أنها تجري بإيقاع متباطئ.

فبالنسبة إليه تحدث التقلبات في الذرات التي تشع ضوءاً في حقل الجاذبية القوية بتباطؤ، وترد إليه الفوتونات من هذه الذرات «محمرّة»، وبتواتر متناقص. وتدعى هذه الظاهرة بظاهرة الإقصاء التجاذبي الأحمر (لقد استخدمت هذه الظاهرة أساساً لأحد اختبارات صحّة نظرية أنشتاين). ولكن الواقعة المهمّة بالنسبة إلينا الآن، هي أن تباطؤ الزمن واحمرار الضوء يزيدان أكثر كلّما كانت منطقة الإشعاع أقرب إلى حدود الثقب الأسود (إلى مجال شفارسشيلد). فهناك يخفف الوقت من عدوه، وعلى حد الثقب الأسود تماماً، يبدو للمراقب البعيد كأنه يتوقف. فهذا المراقب يستطيع وهو يتابع على سبيل المثال، حجراً ساقطاً باتجاه الثقب الأسود، أن يرى كيف يتباطأ الحجر عند حدود مجال شفارسشيلد بالضبط، ويقترب من حدود الثقب الأسود في خلال زمن لا حدود لطوله.

ويستطيع المراقب البعيد أن يرى لوحة مماثلة أثناء عملية تشكل الثقب الأسود ذاتها: عندما تسقط مادة النجم نفسها مندفعة تحت تأثير الجاذبية نحو مركزه. فبالنسبة للمراقب لن يقترب سطح النجم من مجال شفارسشيلد إلا في خلال زمن

لا نهاية لطوله، وكأني به يتجمد في مجال الجاذبية. ولذلك دعيت الثقوب السوداء من قبل بالنجوم الجامدة أيضاً.

ولكنّ هذا الجمود لا يعني البتة أن المراقب سوف يبقى إلى الأبد يتأمل سطح النجم الجامد في حقل الجاذبية. لنتذكر تباطؤ الزمن، واحمرار الضوء المنطلق من حقل الجاذبية القوية. فمع دنو سطح النجم من مجال الجاذبية، يرى المشاهد ضوء النجم يزداد احمراره أكثر فأكثر، على الرغم من أن الفوتونات العادية تواصل توالدها على النجم نفسه. وزيادة على ذلك تتوارد إلى المشاهد أقل فأقل فوتونات أضعف نشاطاً («محمرّة»). تتراجع شدة الضوء.

كما يضاف إلى واقعة احمرار الضوء بسبب تباطؤ الزمن الذي يقضي به حقل الجاذبية القوية، حقيقة احمراره أيضاً بسبب ظاهرة دوبلر. وواقع الأمر أن سطح النجم المتقلص لا ينفك ينأى عن المشاهد. ومن المعروف أن الضوء المنبعث من مصدر متناء، يُرى محمراً أيضاً.

وعلى هذا النحو فإن الفعل المشترك لكل من ظاهرة دوبلر وتباطؤ الزمن في حقل الجاذبية القوية، يؤدي إلى أنه مع اقتراب سطح الكوكب إلى مجال شفارسشيلد، فإن المشاهد البعيد يرى الضوء يزداد احمراراً ويتناقص شدة: يغدو النجم غير مرئي. وينزع سطوعه نحو الصفر، ولن تفلح أيّ تلسكوبات في اكتشافه. وفي غضون ذلك يرد انطفاؤه إلى المشاهد في غمضة عين. إذن فالنجم الذي كتلته ككتلة الشمس ينطفئ بالنسبة للمشاهد الخارجي في خلال مئة ألف جزء من الثانية، حال انكماشه إلى ما يساوي أبعاد مجال الجاذبية المضاعف.

كما لا يمكن اكتشاف سطح النجم المنطفئ عند المجال المغناطيسي بطريقة الرادار. فالإشارات الرادارية سوف تتحرك إلى ما لا نهاية نحو المجال المغناطيسي ولن تعود أبداً إلى مرسلها. لقد «اختفى» النجم تماماً عن المشاهد، ولم يبق سوى حقل جاذبيته. ولن يكون في مقدور المشاهد أن يرى في أي يوم كان، ما يحصل للنجم بعد انكماشه إلى أبعاد أصغر من أبعاد مجال الجاذبية.

ولكن القارئ سوف يسأل: «وهل يمكن الحديث عن أبعاد أصغر من أبعاد مجال الجاذبية إذا كانت عملية الانكماش حتى مقدار مجال الجاذبية تتواصل إلى

ما لا نهاية؟ لقد قلنا منذ هنيهة إن النجم ينطفئ عند أبعاد تساوي مجال الجاذبة. فمتى تغدو هذه أصغر من مجال الجاذبية؟ أبعد زمن طويل إلى ما لا نهاية»؟

هنا بالضبط تظهر واحدة من أهم وأغرب الحقائق التي اكتشفتها نظرية النسبية العامة: نسبية الفواصل الزمنية، وتبعيتها لحالة حركة المراقب. لنتذكر الآن أنه في نظرية النسبية الخاصة، حيث لا يحسب حساب لدور حقول الجاذبية، تستغرق العملية عينها زمناً متبايناً وفق وجهة نظر كل مراقب: إن الساعة المركبة على صاروخ منطلق بسرعة تدور، من وجهة نظر المراقب على الأرض، أبطأ من دوران ساعته هو. وقد اختبرت هذه الظاهرة اختباراً فيزيائياً مباشراً. وفي حالة السقوط نحو الثقب الأسود، فإن نسبة دوام العملية تظهر في صورة مدهشة تماماً. وها نحن سوف ندرس هذه الظاهرة بتفصيل أكثر.

لنتخيل عدداً من المشاهدين متوضعين على خط هو امتداد لنصف قطر ثقب أسود، وليسوا متحركين بالنسبة إليه، بل ثابتون. إذ من الممكن مثلاً أن يكون هؤلاء على صواريخ تعمل محركاتها بشكل يمنع هؤلاء من السقوط على الثقب الأسود. ثم لنتخيل أيضاً مشاهداً آخر على متن صاروخ محرّكة مطفأ لا يعمل، وهو يهوي نحو الثقب. ومع سقوطه سوف يحلق على مقربة من المشاهدين الثابتين بسرعة متزايدة. ولدى سقوطه نحو الثقب الأسود من مسافة بعيدة، فإن هذه السرعة تساوي السرعة الكونية الثانية (سرعة الإفلات من الجاذبية. -م). إن سرعة السقوط تتجه نحو سرعة الضوء عندما يقترب الجسم الساقط من مجال الجاذبية. ومن الواضح أن وتيرة جريان الزمن على الصاروخ الساقط سقوطاً حراً، تتناقص مع تزايد السرعة. ويكون هذا التناقص ملحوظاً إلى درجة أنه، من وجهة نظر المراقب من أي صاروخ ثابت، لكي ينجح الساقط في بلوغ مجال شفارسشيلد، فإن فاصلاً زمنياً لا نهاية له يمضي، أما على ساعة المراقب الساقط فإن هذا الوقت يوافق الفاصل النهائي. وعلى هذا النحو فإن الزمن اللا نهائي بالنسبة لمراقب ما على صاروخ ثابت، يساوي الفاصل الزمني النهائي للمراقب الآخر (الذي على الصاروخ الساقط)، وهو في غضون ذلك فاصل صغير جداً: لقد رأينا أن هذا الفاصل هو بالنسبة لكتلة الشمس جزء من مئة ألف جزء من الثانية. فأي مثل يمكن أن يكون أكثر وضوحاً بالنسبة للمدى الزمني؟

إذن، حسب الساعة الموجودة على النجم المتقلص، ينكمش المدى الزمني حتى مقدار مجال الجاذبية، وسوف يواصل تقلصه أيضاً حتى مقادير أقل. ولكن المراقب البعيد لن يرى أبداً مراحل الارتقاء الأخيرة هذه. ولكن ما الذي يراه المراقب الموجود على النجم المتقلص بعد دخوله مجال شفارسشيلد؟ وما الذي سيحصل للنجم؟

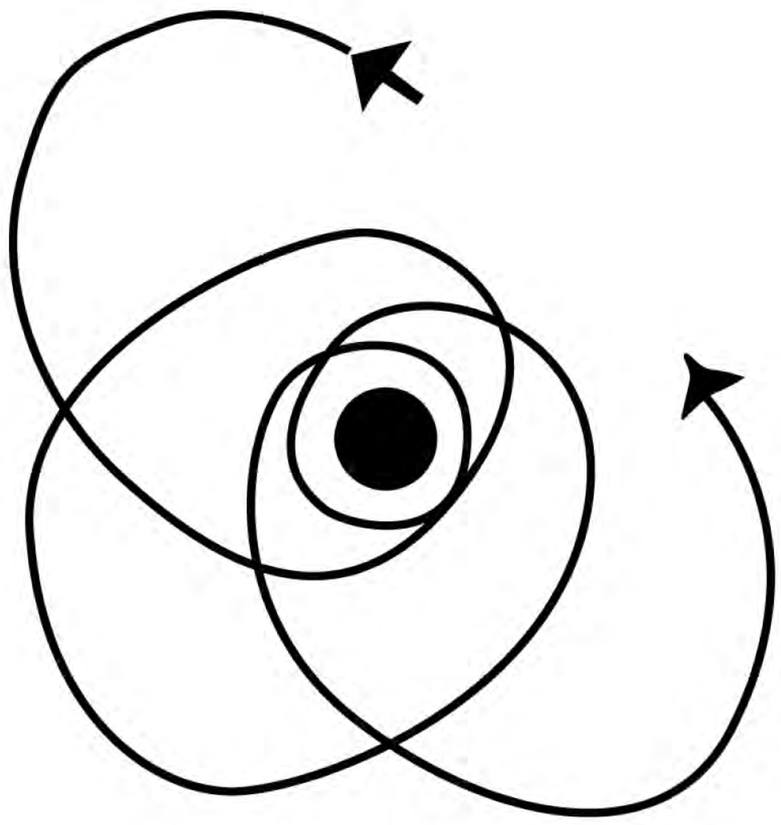
لنترك هذه الأسئلة الآن، ولنعد إلى الحقل الخارجي للثقب الأسود لكي نرى كيف تتحرك الأجسام في هذا الحقل الخارق القوة، وتنتشر أشعة الضوء.

ميكانيكا الثقوب السوداء

حسب نظرية الجاذبية عند نيوتن أن كل جسم يتحرك في حقل جاذبية نجم إما على منحن مفتوح - على قطع مكافئ، أو على قطع زائد - وإما على منحن مغلق: قطع ناقص (تبعاً لمقدار السرعة الابتدائية). وللثقب الأسود على مسافات بعيدة عنه، حقل جاذبية ضعيف، وهنا تصف نظرية نيوتن الظاهرات كلها بدقة كبيرة، أي أن قوانين ميكانيكا الأفلاك النيوتنية صحيحة هنا. بيد أنها تختل أكثر فأكثر كلما اقتربنا من الثقب الأسود.

فتعالوا معنا الآن لنتعرف على أهم خاصيات حركة الأجسام في حقل جاذبية الثقب الأسود.

وفق نظرية نيوتن أنه إذا كانت سرعة الجسم أقل من السرعة الكونية الثانية (= سرعة الإفلات من حقل الجاذبية. -م)، فإنه يتحرك على قطع ناقص حول الجسم المركزي: مركز الجاذبية. وللقطع الناقص (الإهليلج. -م) أقرب نقطة إلى مركز الجاذبية (بيرياستر)، وأبعد نقطة عنه (أبواستر). وحسب نظرية أنشتاين إنه في حال تحرك الجسم بسرعة أقل من السرعة الكونية الثانية، فإن لمساره أيضاً بيرياستر وأبواستر، إلا أنه لا يعود الآن قطعاً ناقصاً، فالجسم يتحرك على مدار مفتوح، فيقترب من الثقب الأسود تارة، ويبتعد عنه تارة أخرى. ويتوضع المسار كلّه على مستوٍ واحد، إلا أنه يمكن أن يبدو وهو قرب الثقب الأسود في صورة شديدة الغرابة، كما هو مبين على



الشكل - 1 -

سبيل المثال، في الشكل رقم 1. ولكنه إذا ما توضع بعيداً بما فيه الكفاية، فإن صورته تبدو على شكل إهليلج (قطع ناقص. -م) يدور ببطء في الفراغ. وهذا الدوران البطيء لمدار عطارد الإهليلجي بـ 43 ثانية زاوية في المائة عام، كان أول برهان على صحة نظرية أنشتاين.

ومن المهم أن نتبين أبسط حركة دورية للجسم في حقل الثقب الأسود على مدار دائري.

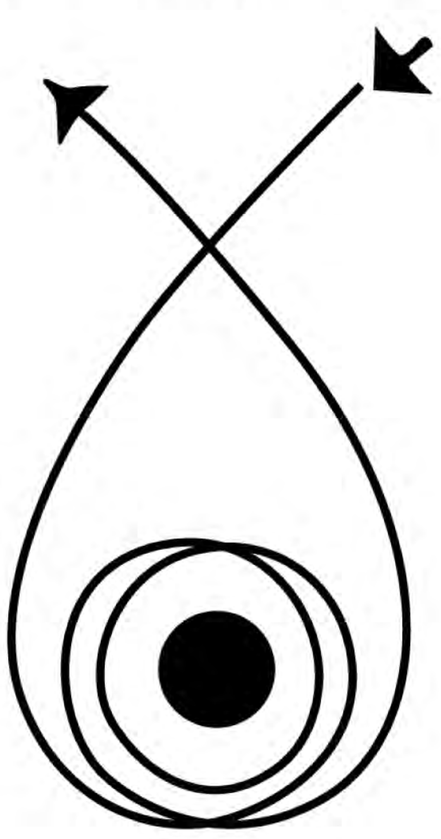
فحسب نظرية نيوتن أن الحركة على دائرة، ممكنة على أي مسافة كانت عن مركز الجاذبية. ولكن يستنتج من نظرية أنشتاين أن الأمر ليس كذلك. فبقدر القرب من مركز الجاذبية تزداد سرعة الجسم المتحرك على الدائرة. وعلى الدائرة التي تبعد مقدار مجال جاذبية واحد ونصف المجال، تصل سرعة الجسم الدائر، سرعة الضوء. أما على دائرة أكثر قرباً إلى الثقب الأسود، فإن الحركة غير ممكنة أصلاً، لأن ذلك يتطلب سرعة تفوق سرعة الضوء.

ولكن يبدو في واقع الحال أن الحركة على دائرة حول الثقب الأسود غير ممكنة حتى على مسافات بعيدة، بدءاً من ثلاثة مجالات جاذبية، عندما لا تشكل سرعة الحركة سوى نصف سرعة الضوء. فما هو السبب؟

يكمن الأمر هنا في أن الحركة على الدائرة تكون حركة غير مستقرة إذا كانت المسافة أقل من ثلاثة مجالات جاذبية. فأي ارتجاج مهما كان صغيراً، وأي صدمة مهما كانت ضعيفة يرغمان الجسم الدائر على الخروج من المدار، أو السقوط في الثقب الأسود، أو الانطلاق على الفراغ (مثل هذا أو ما يشبه لم تفترضه «ميكانيكا الفلك» النيوتنية).. ولكن ربما يكون الأمر الأكثر غرابة في ميكانيكا الفلك الحديثة، هو إمكانية الثقب الأسود على اختطاف الأجسام الطائرة من الفضاء بجاذبيته.

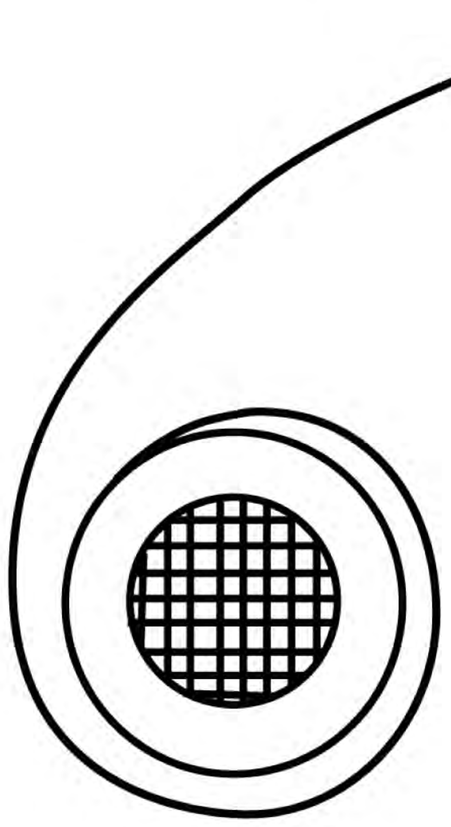
ومن المفيد أن نذكّر إنه وفق ميكانيكا نيوتن، كل جسم يهبط من الفضاء إلى كتلة جاذبة يلف حولها قطعاً مكافئاً أو قطعاً زائداً، ويعود ثانية (إذا لم «يصطدم»

بسطح الكتلة الجاذبة) ليحلق في الفضاء: الخطف بالجاذبية غير ممكن هنا. بيد أن الأمر مغاير في حقل جاذبية الثقب الأسود. ومن الواضح أنه إذا كان الجسم الهابط من الفضاء يتحرك على مسافة بعيدة من الثقب الأسود (على مسافة عشرات مجالات الجاذبية وأكثر)، حيث حقل الجاذبية ضعيف وقوانين ميكانيكا نيوتن صحيحة، فإن حركته تكون شبه دقيقة على قطع مكافئ أو قطع زائد. ولكنه إذا ما اقترب من الثقب الأسود بما يكفي، فإن مداره لن يشبه القطع المكافئ أو القطع في شيء. وإذا ما كانت سرعته وهو بعيد عن الثقب الأسود، أقل بكثير من سرعة الضوء، ومداره يدنو من دائرة نصف قطرها يساوي مجالي جاذبيته، فإنه يدور حول الثقب الأسود عدة مرات قبل أن ينطلق محلقاً في الفضاء. انظر الشكل رقم 2 الذي يبين هذه الحالة.



الشكل - 2 -

وأخيراً، إذا ما اقترب الجسم الدائر من الدائرة المعنية لمجالي الجاذبية اقتراباً مباشراً، فإن مداره على هذه الدائرة سوف يتفاقم؛ ويقع الجسم ضحية خطف جاذبي من قبل الثقب الأسود ولن يعود مرة أخرى إلى الفضاء (الشكل رقم 3). وإذا ما اقترب الجسم أكثر نحو الثقب الأسود، فسيقع فيه، تخطفه جاذبيته.



الشكل - 3 -

وقبل أن ننتقل إلى ظاهرات فيزيائية أخرى في حقل جاذبية الثقب الأسود، يجدر بنا أن نسجل ملاحظة أخرى تتعلق بالسرعة الكونية الثانية (= سرعة الإفلات من حقل الجاذبية. -م). فقد أشرنا سابقاً إلى أن صيغة نظرية نيوتن تصح بالنسبة للسرعة الكونية الثانية، وأن الجسم الذي يمتلك مثل هذه السرعة أو سرعة أكبر منها، يحلق في الفضاء الكوني إلى الأبد بعيداً عن الثقب الأسود. بيد أنه ينبغي أن نسجل تحفظاً هنا.

فمن الجلي أنه إذا كان الجسم يتحرك نحو الثقب الأسود على امتداد المجال، فإنه مهما كانت سرعته سوف ينزلق في الثقب الأسود ولن يحلق في الفضاء الكوني أبداً.

ضف إلى هذا أنه من المعروف لنا الآن، إنه إذا تحرك الجسم نحو الثقب الأسود، حتى لو لم تكن حركته على المجال مباشرة، لكن مداره يمر على مسافة قريبة بما يكفي من الثقب الأسود، فإنه سوف يقع ضحية عملية خطف بالجاذبية. وعليه، للتخلص من أطراف الثقب الأسود لا يكفي أن تكون السرعة أكبر من سرعة الإفلات من مجال الجاذبية، إنما ينبغي أيضاً أن يشكل اتجاه هذه السرعة مع الاتجاه نحو الثقب الأسود زاوية أكبر بعض الشيء من المدلول الحرج. أما إذا كانت الزاوية أقل، فإن الجاذبية سوف تخطف الجسم، وإذا كانت أكبر (والسرعة تساوي السرعة الكونية الثانية)، فإنه سيحلق في الفضاء الكوني. ويرتبط مدلول هذه الزاوية الحرجة بطول المسافة إلى الثقب الأسود. فبقدر ما تكون المسافة أبعد عنه، بقدر ما تكون الزاوية الحرجة أصغر. وعلى مسافة عدة مجالات جاذبية، يجب «التصويب» على الثقب الأسود بدقة، حتى تحدث عملية الخطف بالجاذبية.

ولا بد أخيراً من بعض الكلمات عن عملية مهمة أخرى تظهر لدى حركة الأجسام في حقل الثقب الأسود. والحديث يجري هنا عن انبثاق موجات الجاذبية. وكانت نظرية الجاذبية لدى أنشتاين قد تكهنت بوجودها.

فما الذي تمثله هذه الموجات؟ إنها كالموجات الكهرومغناطيسية التي تعد حقلاً كهرومغناطيسياً سريع التغير، «ينفصل» عن مصدره وينتشر في الفراغ بسرعة قصوى: سرعة الضوء. وموجات الجاذبية أيضاً تعد حقل جذب متغيراً «ينفصل» عن مصدره وينطلق في الفراغ بسرعة الضوء.

ومن المعروف أنه لاكتشاف الموجة الكهرومغناطيسية يكفي من حيث المبدأ أن تأخذ كرة مشحونة كهربائياً وتراقبها؛ فعندما تبدأ الموجة الكهرومغناطيسية تتساقط عليها، تبدأ الكرة تتذبذب. بيد أن كرة واحدة غير كافية لاكتشاف موجة الجاذبية، بل يتطلب الأمر على الأقل كرتين موضوعة واحدتهما بعيداً عن الأخرى بعض البعد (وليس ثمة ضرورة طبعاً لشحنهما كهربائياً). ومع سقوط موجة الجاذبية عليهما، تأخذ الكرتان بالاقتراب من بعضهما تارة والابتعاد عن بعضهما تارة أخرى. وإذا قسنا تغير المسافة بينهما، فإنه يمكننا أن نكتشف موجة الجاذبية. ولكن لماذا لا تكفينا كرة واحدة؟

يكمن الأمر هنا في الآتي. إذا لم تكن ثمة قوى خارجية تؤثر على الكرة، فهذا يعني أنها تقع داخل حقل موجة الجاذبية في حالة انعدام الوزن. إن الكرة لا تتعرض لأي قوى جاذبة، ولذلك لا يمكن اكتشاف موجة الجاذبية التي تعبر المجال، والحالة نفسها يعيشها رواد الفضاء في قمرة السفينة الفضائية عندما تكون في مدارها. أما الكرتان الواقعتان على مسافة ما واحدتهما من الأخرى، فإنهما تتعرضان لتأثير حقل الجاذبية بقدر ضئيل من التباين، وتظهر بينهما حركة نسبية. وهذه الحركة النسبية هي التي يمكن قياسها.

أما الموجات الكهرومغناطيسية فإن الكشف عنها لا يتطلب بالضرورة حتى كرة واحدة، فهناك أنواع مختلفة من الهوائيات الكهرومغناطيسية. كما ابتكرت أيضاً تصاميم شتى لهوائيات الجاذبية.

ولكن كل شيء يبدو من الوجهة النظرية، بسيطاً نسبياً. أما في واقع الأمر، وفي الظروف المعتادة بعض الشيء بالنسبة لنا، فإن موجات الجاذبية التي تظهر، هي موجات ضعيفة جداً: يجب أن تنطلق في أثناء حركة متسارعة لأجسام كثيفة ضخمة. ولكن حتى في أثناء حركة الأجسام السماوية، فإن انطلاق موجات الجاذبية شديد الضعف. فلدى حركة الكواكب في المجموعة الشمسية على سبيل المثال، تنطلق طاقة جذب تساوي فقط قوة مائة مصباح كهربائي. ومع أن هذا الرقم قد يبدو كبيراً بمقاييسنا نحن، إلا أنه هزيل جداً بالمقارنة مع إشعاع ضوء الشمس مثلاً، الذي يصل إلى مائة ألف مليار مرة أكبر (يكتب هذا الرقم بالعدد 1 وأمامه ثلاثة وعشرون صفراً). وقد فشلت حتى الآن كل محاولات إنشاء مخابر لبث موجات الجاذبية.

لنفرض أنه يمكن صناعة جهاز لبث الموجات الجاذبة يكون على شكل لولب سريع الدوران. وإذا أخذنا سبيكة فولاذية طولها 20 م، وكتلتها 500 طن ومددناها حتى أخر حد ممكن على قطع بين قوى طرد مركزي (تردد الدوران في أثناء ذلك حوالي 30 هيرتس)، فإنها لن تبث سوى جزء من عشرة آلاف مليار مليار جزء من الإرج في الثانية الواحدة.

تبين الأمثلة التي سقناها هنا مدى صعوبة الكشف عن موجات الجاذبية. وحتى اللحظة لم تكشف التجارب المباشرة على الأرض عن هذه الموجات، مع أن مختلف

مخابر العالم أنشأت وتنشئ عشرات الهوائيات المخصصة للالتقاط موجات الجاذبية من الفضاء. وكان الأمريكي د. فيبر رائد هذا العمل عند أواخر خمسينيات وأوائل ستينيات القرن 20. أما في الاتحاد السوفيتي فإن العمل على إنشاء هوائيات لاقطة لموجات الجاذبية يسير بوتائر عالية خاصة في جامعة موسكو، إذ يقود العمل هناك ب. براغينسكي.

ولكن على الرغم من أن الهوائيات اللاقطة على الأرض لم تفلح حتى الآن في الكشف على موجات الجاذبية، إلا أن بعض أعمال الرصد الفلكي تبين أن موجات الجاذبية تنطلق لدى حركة الأجسام السماوية فما هي هذه الأرصاد؟

يتلخص الأمر في الآتي. نحن نعلم أنه لدى حركة الكواكب، أو حركة النجوم في نظامين نجوميين مزدوجين، تنطلق موجات الجاذبية حاملة طاقة. ولكن فاقد الطاقة هذا ضئيل جداً عادة. بيد أنه بقدر ما تكون كتلة الأجسام السماوية المتحركة أكبر، والمسافة بينها أقصر، بقدر ما يكون انطلاق الموجات أكثر كثافة، فيؤدي فقدان الطاقة في نظام النجم المزدوج إلى تقارب النجوم شيئاً فشيئاً بعضها من بعض، وتقصير زمن دورانها حول مركز الكتل. ومن الواضح بالتأكيد أن هذا يحدث ببطء متناه، ومع ذلك أمكن رصد تناقص هذه المدة بمساعدة وسائل خاصة للرصد، وبما يتوافق بدقة مع تكهنات نظرية أنشتاين. ونحن لن نتحدث هنا بالتفصيل عن الأرصاد الفلكية، لأن مثل هذا الحديث يقودنا بعيداً عن موضوع بحثنا.

لنعد إلى حركة الجسم حول الثقب الأسود على مدار دائري. فلدى ذلك يحدث انطلاق موجات الجاذبية، ويتناقص نصف قطر المدار بالتدرج وسوف تستمر الحال هكذا إلى أن يتخذ نصف القطر المدلول الحرج لثلاثة مجالات جاذبية. ونحن نعلم أن الحركة على المسافات القليلة غير ثابتة. وعليه، عندما يبلغ الجسم المدار الحرج، يدور عدة دورات أخرى ويطلق مقداراً ما من الطاقة، ثم «يهوي» من هذه المسافة في الثقب الأسود.

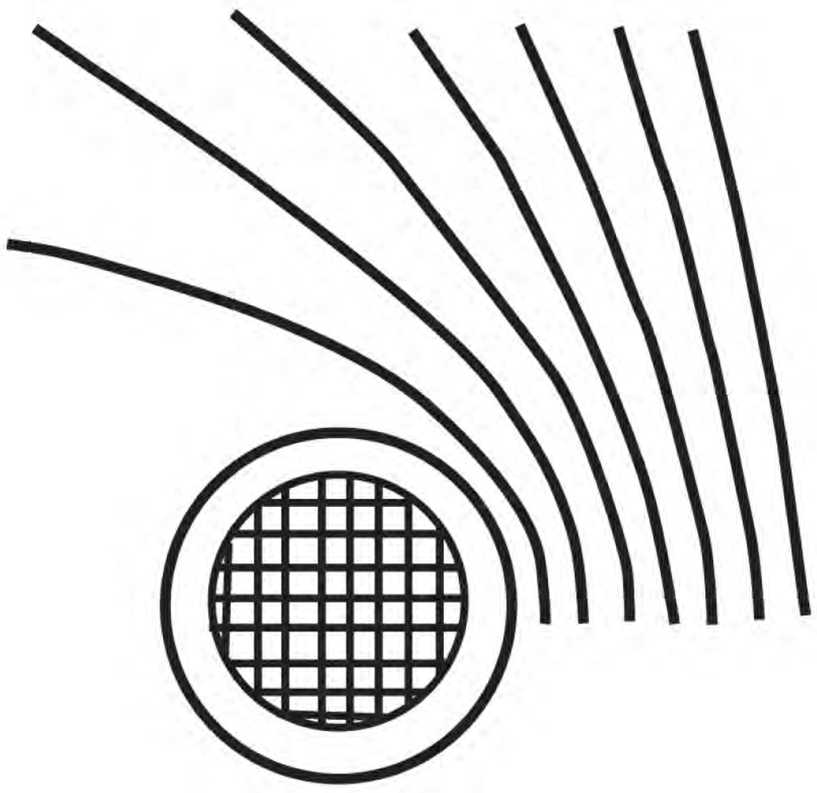
ما هو المقدار الكلي للطاقة التي يطلقها الجسم على شكل موجات الجاذبية، خلال زمن تحركه حول الثقب الأسود على المدار الدائري، مع التناقص البطيء لنصف قطر المدار؟ لقد رأينا أن انطلاق الطاقة يجري بكثافة ضئيلة، إلا أن العملية نفسها

تستمر زمناً طويلاً! إذن، سوف يكون الكم الكلي للطاقة المنطلقة مهولاً. ولكي نبينه، نسوق المقارنة الآتية. من المعروف أنه في أثناء التحولات النووية، كتحويل الهيدروجين إلى هليوم مثلاً، أو إلى عناصر أخرى أكثر ثقلاً، يتحول جزء من الكتلة إلى طاقة. والحد الأقصى الذي يمكن أن يشكله هذا الجزء في مختلف أنواع التفاعلات، هو 1٪ تقريباً. أما في حالة انبعاث موجات الجاذبية أثناء حركة الجسم حول الثقب الأسود، فإن مقدار الطاقة المنطلقة يتجاوز ستة أضعاف هذا الرقم!

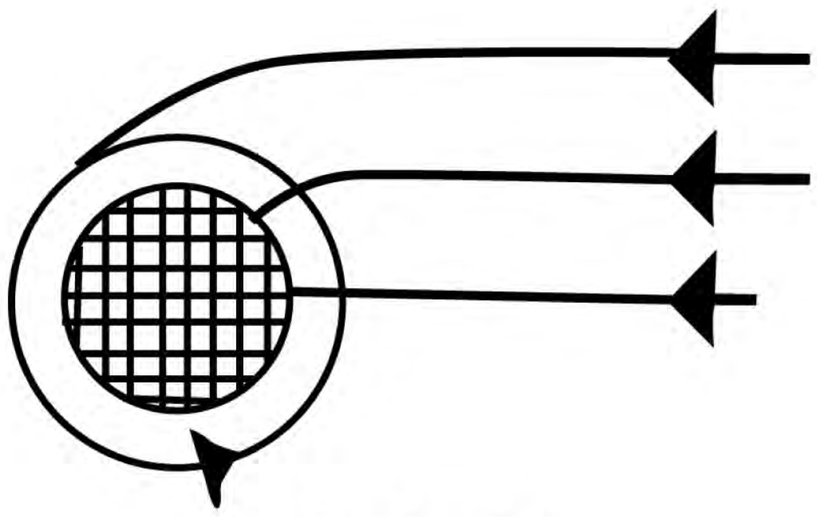
إننا نرى إنه من حيث المبدأ يمكن حتى بهذه الوسيلة البسيطة استغلال الثقوب السوداء كمصدر للطاقة. وغني عن البيان أنه عملياً لا فائدة من مثل هذه الآلية تقريباً؛ لأن موجات الجاذبية تتفاعل تفاعلاً ضعيفاً جداً مع المادة. ولذلك سوف يكون من الصعب جداً التقاط الطاقة المنطلقة على شكل موجات الجاذبية واستخدامها للأغراض العملية: سوف تتشتت موجات الجاذبية في الفراغ الكوني. ونحن سوف نرى أدناه أنه ثمة وسائل أخرى لاستخدام الطاقة الهائلة لجاذبية الثقوب السوداء.

الثقوب السوداء والضوء

نحن نعرف الآن أن حقل الجاذبية يؤثر على الضوء. فهو يرغم الفوتونات على تغيير ترددها ويلوي مسار الأشعة. وبقدر القرب من الثقب الأسود يزداد التواء المسار. وثمة في (الشكل رقم 4) حزمة من الأشعة تنطلق على مسافات متباينة من الثقب الأسود (متعامدة على قطره). ونرى هناك دائرة حرجة نصف قطرها يساوي مجال جاذبية واحد ونصف المجال (وكأن قد مر الحديث معنا عن هذا). ويمكن للفوتون الذي تحجزه على الدائرة جاذبية الثقب الأسود الجبارة، أن يتحرك عليها بحرية كاملة. بيد أن حركته هذه ليست ثابتة. فأي ارتجاج يؤدي به إما إلى الثقب الأسود أو إلى الفضاء الخارجي.



الشكل - 4 -



الشكل - 5 -

ويفضي وجود دائرة حرجة للفوتونات إلى اختطاف جاذبية الثقب الأسود لأي ضوء يعبر على مقربة كافية منه (انظر الشكل رقم 5). فالشعاع الذي يقترب مباشرة إلى دائرة مقدارها مجال جاذبية واحد ونصف المجال، يدور عليها دوراناً أبدياً... أما الشعاع الذي يقترب أكثر فإنه يلتصق بالثقب الأسود.

ويتغير في أثناء الحركة حول الثقب الأسود، تردد ذبذبة الموجات الضوئية أيضاً. فبقدر ما تكون الفوتونات أقرب إلى الثقب الأسود، بقدر ما تكون قوة تردد الذبذبات أقوى. وبقدر البعد عن الثقب الأسود، يضعف تردد ذبذبات الموجات الضوئية. وإذا كانت المسافات بعيدة جداً عن الثقب الأسود، فإن هذه التغيرات تكون ضعيفة، ولا تصبح مهمة إلا بالقرب من مجال شفارسشيلد.

«ليس للثقوب السوداء شعر»

نحن لم نتحدث حتى الآن إلا عن الثقوب السوداء التي تظهر لدى انكماش الأجسام الكروية، ولذلك فهي ذات حقل جاذبية كروي متماثل. ولكن ما هو الثقب الأسود الذي ينشأ عن انكماش جسم غير كروي، جسم مسطح مثلاً؟ ونحن لن نتحدث الآن إلا عن الأجسام التي لا تدور، تاركين الحديث عن الأجسام الدائرة إلى الفقرة التالية.

إذن قبل انكماشه لم يكن للجسم حقل جاذبية كروي. فهل يعني هذا أنه ينشأ ثقب أسود مسطح له حقل جاذبية مسطح؟ لقد بقيت الإجابة على هذا السؤال مجهولة لزمن طويل، ولم تحل المسألة إلا منذ بعض الوقت. وقد تبين إنه في واقع الأمر لا يمكن أن يكون بالأصل ثمة ثقوب سوداء مسطحة أو سوى ذلك من الثقوب اللا متماثلة. ويكمن الأمر هنا في أنه أثناء الانكماش، وعندما تقترب أبعاد الجسم من مجال

الجاذبية، تزداد كثافة انبعاث أمواج الجاذبية. ويبدو أن كل ما يميز حقل الجاذبية عن الشكل الدائري الدقيق يتناقص في أثناء ذلك و «ينطلق» على شكل موجات الجاذبية.

وفي اللحظة الأولى التي تلي ظهوره يتخذ الثقب الأسود شكلاً مشوهاً فعلاً، شكلاً مسطحاً. بيد أن مثل هذا الثقب لا يستطيع أن يستمر محافظاً على وجوده في الزمن. ومثله مثل فقاعة الصابون، إذا مددتها ثم تركتها فإنها سرعان ما تتخذ الشكل الدائرى، وكذلك هى حال حدود الثقب الأسود «المشوهة»، إذ سرعان ما تتخذ شكلاً دائرياً مستوياً. وينطلق منها كل ما هو «زائد» على شكل موجات الجاذبية. ويظهر نتيجة لذلك ثقب أسود متماثل ومستدير استدارة كاملة، وله حقل جاذبية خارجي دائري متماثل تماماً، حقل شفارسشيلد الذي يتصف بمقدار واحد فقط: كتلة مركز الجذب.

وعلى هذا النحو قد تكون الثقوب السوداء كبيرة (جسيمة)، وقد تكون صغيرة، وفيما عدا ذلك فإن بعضها يشبه بعضاً شبهاً تاماً في كل شيء. ولكن ماذا سيحدث لو كان للجسم المتقلص شحنة كهربائية، أو حقل كهربائي، أو مغنطيسي أو أى حقل آخر إلى جانب حقل الجاذبية؟ فهل سيكون للثقب الأسود الذى يتشكل من مثل هذا الجسم، مثل هذه الحقول؟

لقد أفضت دراسة هذه المسألة إلى نتائج في غاية الطرافة. فقد ظهر أن أنواع الحقول الفيزيائية كلها سوف تنطلق في خلال عملية الانهيار النسبي، أو تدفن في الثقب الأسود عينه. لكن الشحنة الكهربائية وحدها تمثل استثناء في هذا الميدان. ففي أثناء عملية الانكماش تبقى حول الثقب الأسود الذي تشكل، مثلها في هذا مثل حقل الجاذبية الدائري.

إذن، لدى الانهيار النسبي، مهما كان الجسم الذي يدور معقداً، ومحاطاً بحقول كهربية ومغناطيسية أو بأي حقول أخرى، فإن الثقب الأسود الذي ينشأ نتيجة لذلك، تكون له خاصيات تتصف كلياً بوسيطين اثنين فقط: الكتلة التي ترتبط بها قوة حقل الجاذبية الخارجي، والشحنة الكهربية التي يختص بها الحقل الكهربي. أما باقي السمات التفريقية للمادة التي شكلت الثقب الأسود، فتبدو كأنها اندثرت. ولن تنجح أي قياسات أو تجارب تجري على الثقب الأسود في الإجابة على مسألة ما إذا كان

الثقب المعني قد نشأ مثلاً: من مادة أو من نقيض المادة، وهل كان للمادة حقل مغناطيسي، و... تتحدد خاصية «نسيان» العلامات كلها هذه، بكون الثقب الأسود لا يطلق إلى الفراغ الخارجي أي إشارات كانت.

وإذا ما تركنا جانباً ظاهرة الشحنة الكهربائية التي لا تعد جوهرية بالنسبة للأجسام السماوية، فلا يبقى من الصفات التي تحدد خاصيات الثقب الأسود، سوى كتلته. فالثقوب السوداء التي لها الكتلة عينها، هي نسخة طبق الأصل بعضها عن بعض. وقد شكل هذا التشابه بين الثقوب السوداء حجة لعالم الفيزياء النظرية الأمريكي د. ويلر، لكي يقول: «ليس للثقوب السوداء شعر».

لكن إظهار واقعة التشابه كان مسألة صعبة، لها تاريخها وما قبل تاريخها، تماماً مثلما كانت عليه الحال أثناء التكهن نظرياً بوجود الثقوب السوداء.

لكننا لن ننوه هنا إلا بعملين وضعا في أواسط ستينيات القرن العشرين. ولم أكن أنا لدى إنشاء العمل الأول سوى شاهد، بينما شاركت مباشرة في إنشاء العمل الثاني. وقد وضع العمل الأول، الفيزيائي السوفييتي ف. غينزبورغ. لقد درس غينزبورغ المسألة التالية: كيف سيكون الحقل المغناطيسي لنجم إذا ما ضغطناه إلى أقل أبعاد ممكنة؟ قد ظهر أنه إذا تم ضغط النجم إلى ما يقارب مجال الجاذبية، وتوقف الانكماش هنا، فإن الحقل المغنطيسي سوف يبلغ مستويات غير عادية عند سطح النجم بالضبط. وإذا ما واصلنا ضغط النجم حتى مقدار مجال الجاذبية بالضبط، فإن توتر الحقل المغناطيسي سوف يندفع نحو اللا نهاية! بيد أن هذا محال! ولا أزال أذكر حماس ف. غينزبورغ وتوتره وهو يتحدث عن هذا في معهد علوم الفلك، كما أذكر أيضاً الحماس الذي ناقش فيه المتخصصون هذه النتائج. لقد كانت أهمية البحث عظيمة؛ لأنه إذا كانت فرضية وجود حقل مغناطيسي لدى الثقب الأسود إلى المحال (وهذا ما حصل فعلاً)!، فمعنى ذلك أن الثقب الأسود تقود لا يمكن أن يكون له حقل مغناطيسي البتة! يجب أن ينطلق الحقل المغناطيسي كله، أو يدفن في الثقب!

لكن هذه النتيجة لم تكن متوقعة قط، ولذلك لم يستطع المتخصصون أن يستوعبوها مباشرة.

أما البحث الثاني فقد بحث في إمكانية ظهور ثقب أسود مسطح. وفي تلك الأثناء كنت قد أنهيت دراستي الجامعية لتوي وبدأت أعمل في فريق أسسه الأكاديمي يا. زيلدوفيتش. وبما أنني كنت منذ عدة سنوات قد بدأت أهتم بمسألة الثقب الأسود المسطح، فقد أطلعت رئيس فريقي على المسألة، كما أطلعت عليها في الوقت نفسه زميلي أ. دوروشكيفيتش. وبدأ ثلاثتنا يدرس المسألة من مختلف جوانبها. وقد كان أسلوب العمل لدى كل منا مختلفاً عن الأخر، لكن عمل كل منا كان يكمّل عمل الآخر بنجاح. لقد أنجزنا كم عمل كبير.

وسرعان ما تبين لنا، أنه إذا ما ظهر ثقب أسود مسطح كحبة اللفت، أو متطاول كحبة الخيار، فإن تسطحه أو تطاوله يجب أن يكونا لا متناهيين! ومعنى ذلك أن خط استواء الثقب المسطح يجب أن يكون لا متناهياً. وهذا محال من غير شك! ومن هنا استنتجنا أنه لا يمكن أن يكون ثمة ثقوب سوداء مسطحة أو متطاولة أبداً. وكل حيد عن الشكل الكروي يجب أن ينطلق على شكل موجات جاذبية ويندثر!

لقد تميز البحثان اللذان تحدّثنا عنهما هنا بسمة مشتركة واحدة: توصلنا إلى استنتاج مفاده، أن الحقول ينبغي أن تنطلق في أثناء ظهور الثقب الأسود. وقد يبدو مثل هذا الاستنتاج استنتاجاً جزئياً جداً. فنحن لم نحسب عملية الانطلاق (الإشعاع. -م) نفسها، لأنه لم يكن بمقدورنا أن نفعل ذلك، ذلك أن الجهاز الحاسب المطلوب لم يكن قد أنشئ بعد. ومع ذلك كان الاستنتاج الذي تم التوصل إليه عن نتيجة عملية الإشعاع، استنتاجاً يركن إلى صحته بالمطلق، لأن أي استنتاج كان سيقود إلى المحال. وكان هذا مثالاً على أنه يمكن الوصول إلى خلاصات صحيحة عن نتائج ظاهرة حسابها غير ممكن. وبعد ست سنوات فقط نجح العالم النظري الأمريكي ر. برايس، ثم تلاه آخرون كثر، في إجراء الحسابات المتعلقة بعملية إشعاع الحقول. وغني عن البيان، أنهم أكدوا بحساباتهم صحة خلاصاتنا.

وجاءت نتيجة حسابات برايس والعلماء الآخرين، لتبين حقيقة مثيرة للفضول: إن كل الحقول التي يمكن من حيث المبدأ أن تنطلق (تشع. -م) تنطلق فعلاً في أثناء ظهور

الثقب الأسود. لكن نوعين منها لا ينطلقان أبداً: حقل الجاذبية الكروي والحقل الكروي للشحنة الكهربية (إذا كان لمثل هذا الحقل وجود). فهذان الحقلان بالذات يبقيان لدى الثقب الأسود الذي ينشأ.

وهناك استثناء آخر سيجري الحديث عنه في الفقرة القادمة.

لقد اشتهرت في أوساط الفيزيائيين «قوانين تشيزهولم». وفي صيغة هزلية، تعكس هذه القوانين صعوبات بعيدة عن أن تكون صعوبات هزلية، إذ تظهر هذه الأخيرة في أثناء إجراء تجارب فيزيائية، وأثناء العمل على مسائل فيزيائية معقدة. وينص أول «قوانين تشيزهولم» على أن «كل ما يتبخر يفسد». وبمحاكاة هذا صاغ ر. برايس استنتاجه على النحو الآتي: «كل ما يمكن أن يشع ينطلق».

ونحن تحفظنا في بداية هذا المقطع بشكل خاص وقلنا، إننا سوف نتحدث فقط عن الثقوب السوداء التي تنشأ من الأجسام التي لا تدور. ولم يأت تحفظنا هذا اتفاقاً. فجوهر الأمر أن الجسم الذي يدور، يؤدي في أثناء انهياره إلى نشوء ثقب أسود يدور هو أيضاً. وكما سنرى في الفقرة القادمة، فإن الدوران يقود إلى تغيرات معينة في حقل الجاذبية، ولذلك فهو يمثل الوسيط الثالث (والأخير، إضافة إلى الكتلة والشحنة الكهربية) الذي يتصف به الثقب الأسود.

إعصار من الجاذبية حول الثقب الأسود

وفق نظرية نيوتن أن حقل الجاذبية لا يرتبط بحركة المادة بأي شكل من الأشكال. فحقل جاذبية الكرة الثابتة متماثل تماماً مع حقل جاذبية الكرة التي تدور، إذا كانت كتلتاهما متماثلتين. لكن لنظرية أنشتاين رؤية أخرى: ثمة بعض الفرق بين حقلي جاذبية الكرتين المعنيتين. فأين يكمن الفرق المقصود؟

إن التصور الأكثر وضوحاً لهذا الفرق يمكن تخيله إذا ما ظهر حول الجسم الذي يدور، حقل جاذبية عاصف إضافي يجر وراءه الجسم كله في حركة دائرية. ويحدث الأمر كما لو أن طبقات الفراغ تدور ببطء حول مثل ذلك الجسم، وترتبط

السرعة الزاوية لدوران الطبقات في غضون ذلك، بالمسافة، فهي ضعيفة بعيداً عن الجسم الذي يدور، وتتزايد مع الاقتراب منه. لكن مثل هذه التأثيرات هزيلة جداً بالنسبة للأجسام السماوية العادية. وأسهل طريق للكشف عنها، هي وضع جيروسكوب على مقربة من الجسم الدائر فإذا كان الجسم ثابتاً لا يدور، سوف يشير الجيروسكوب إلى ثبات الاتجاه في الفراغ بالنسبة إلى النجوم البعيدة (يستخدم الجيروسكوب استخداماً واسعاً جداً لتوجيه السفن الفضائية مثلاً). لكن الجيروسكوب يدور ببطء قرب الجسم الذي يدور. فعلى مقربة من سطح الأرض الدائر على سبيل المثال، لا يدور الجيروسكوب إلا بمقدار جزء من عشرة أجزاء الثانية الزاوية في العام. ومن الواضح أن سرعة الدورات الضئيلة هذه لا يمكن أن تعيق توجه السفن الفضائية. زد إلى هذا أن هذا التأثير لم يكشف بالتجربة حتى الآن.

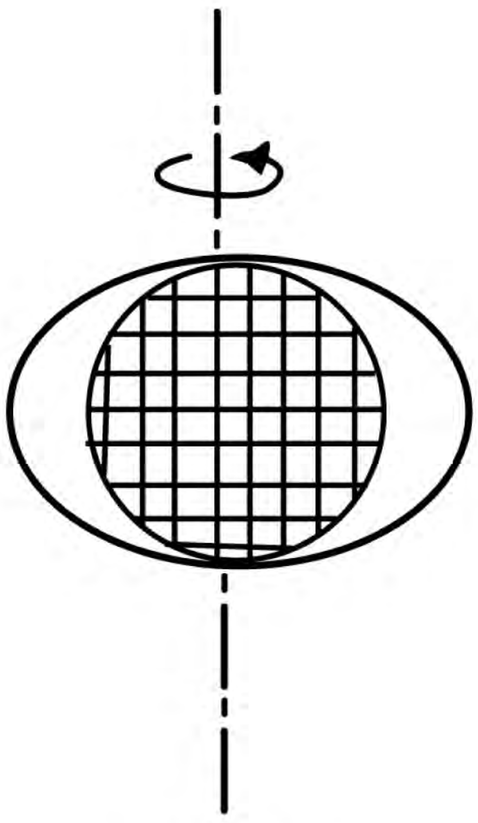
وعند سطح النجوم النيترونية يمكن أن تكون السرعة الزاوية لدوران الجيروسكوب كبيرة جداً: أقل بعدة مرات فقط من سرعة دوران النجم النيتروني نفسه. وقد تدور النجوم النيترونية نفسها بسرعة عشرات الدورات في الثانية الواحدة أو أكثر. وعلى هذا النحو يمكن للجيروسكوب أن يدور دورات كثيرة في الثانية الواحدة عندما يكون على مقربة من سطح مثل هذا النجم الذي يدور بمثل هذه السرعة. ولكن ما الذي سيحصل لمثل هذا النجم الذي له هذا السطح العاصف من الجاذبية، لدى حدوث عملية الانهيار النسبي؟

لقد تبين أنه لن يتغير، تماماً مثلما لا يتغير أيضاً حقل الجاذبية الدائري. فحقل الجاذبية العاصف للنجم يتحدد كلياً بالمقدار الذي يسميه الفيزيائيون لحظة دافع الجسم. ويساوي هذا المقدار بالنسبة للنجم العادي، حاصل ضرب سرعة الدوران على خط الاستواء، في كتلة النجم ونصف قطره.

وهكذا يظهر لدى انهيار الجسم الدائر ثقب أسود يدور. فما الذي يعنيه دوران الثقب الأسود؟ إنه يعني وجود حقل جاذبية عاصف حول الثقب الأسود، باق بعد الانهيار. ويدعونه أيضاً بالإعصار الجاذب. وبقدر القرب من الثقب الأسود تزداد قوة الإعصار.

فإلى ماذا يؤدي هذا؟

قبل كل شيء يؤدي الدوران إلى بعض تسطيح الثقب الأسود عند القطبين، تماماً مثلما يسطح الدوران الأرض والنجوم. ونذكّر، بأنه لولا الدوران لكان شكل الثقب كروياً دقيقاً. بيد أن هذا ليس بالأمر الأساس. فبغير الدوران تتحول قوة الجاذبية إلى قوة لا متناهية في مجال شفارسشيلد. وهذا المجال هو الذي كان سيشكل حدود الثقب الأسود، أو دائرة الأفق التي يعجز أي شيء عن الإفلات منها. لكن وجود الجاذبية يجعل الأمر مختلفاً. فالجاذبية تتحول إلى اللا نهاية خارج دائرة الأفق، على السطح الذي أطلق عليه اسم حدود الإرغوسفير (انظر الشكل رقم 6). إنها بقدر ما تبتعد عن حدود الثقب الأسود، بقدر ما يكون الدوران أسرع، إلا أن الابتعاد عنها كثيراً أمر غير ممكن.



الشكل - 6 -

وعلى حدود الإرغوسفير وتحتها، لن تستطيع أيّ قوة أن تحافظ على استقرار الجسم الغريب الذي يدخل إلى هناك. فالحقل العاصف سوف يشده إلى الحركة بالنسبة للثقب الأسود. ولكن، خلافاً للأجسام الواقعة في داخل مجال شفارسشيلد (في حالة غياب الدوران)، حيث تتساقط نحو المركز مندفعة لا يستطيع شيء أن يوقفها، فإن الأجسام هنا داخل حدود الإرغوسفير، تُدفع في حركة دائرية حول الثقب الأسود؛ ولا تتحرك بالضرورة نحو المركز: يمكن أن تقترب من الثقب الأسود، وتبتعد عنه، ويمكنها أن تعبر حدود الإرغوسفير نحو الداخل ونحو الخارج.

والسؤال الذي يطرح نفسه هنا هو الآتي: كيف إذن تؤثر القوة الجاذبة على هذه الأجسام داخل حدود الإرغوسفير، إذا كان حجمها على الحدود يساوي اللا نهاية؟

هنا ينبغي علينا أن نذكّر بما قلناه لدى دراستنا لقوة الجاذبية التي تؤثر على سطح شفارسشيلد.

فقوة الجاذبية لا متناهية على الحدود فقط بالنسبة للأجسام الثابتة، أما إذا كان الجسم يتحرك متسارعاً، فإن القوة سوف تكون مغايرة. لدى الحركة الدائرية

حول الثقب الأسود بالاتجاه عينه الذي يدور فيه الثقب الأسود، تكون القوة على حدود الإرغوسفير وفي داخله، متناهية. ولذلك يستطيع الجسم أن يتحرك دائرياً داخل حدود الإرغوسفير من غير أن يقع على المركز. وعلى هذا النحو، فإن حد السكون (أي حدود المنطقة التي يمكن أن يكون سكون الجسم فيها بالنسبة للثقب الأسود) يختلف لدى وجود الدوران، اختلافاً حاداً عن مجال شفارسشيلد في حالة غياب الدوران.

ونحن نرى أن حدود الإرغوسفير لا تعد أبداً حدود الثقب الأسود، طالما أنه يمكن الخروج إلى الخارج من تحت هذا السطح. لنر الآن ما الذي يحدث لدى الاقتراب أكثر من الثقب الأسود.

إذا ما تحركنا نحو العمق فإننا سوف نصل في آخر الأمر حدود الثقب الأسود: دائرة الأفق. وعلى هذا السطح وتحته لا يتحرك الجسم (وأي أجزاء أخرى، والضوء) إلا إلى داخل الثقب الأسود. أما الحركة نحو الخارج، فهي هنا غير ممكنة، ولن تستطيع أي معلومات أن تخرج إلى المراقب الخارجي من تحت دائرة الأفق هذه.

والفراغ القائم بين دائرة الأفق وحد السكون، هو ما يدعونه بالإرغوسفير. فهناك ترغم قوة الجذب الأجسام كلها على الدوران حول الثقب الأسود.

وإذا ما قربنا الجيروسكوب ببطء من سطح الإرغوسفير، فإن السرعة الزاوية لدورانه سوف تتزايد وتتزايد مندفعة نحو أعلى السطح واللا نهاية (بالنسبة للجيروسكوب الثابت).

ولكن كيف ستجري الأحداث بالنسبة للمراقب الخارجي لدى سقوط جسم ما من مسافة بعيدة نحو الثقب الأسود الدوار؟

عندما يقع الجسم على الثقب الأسود، يميل بادئ ذي بدء في حركته باتجاه دوران الثقب، ثم يعبر حدود الإرغوسفير ويقترب شيئاً فشيئاً من دائرة الأفق. وعلى دائرة الأفق تكون السرعة الزاوية للدوران هي نفسها بالنسبة للأجسام كلها، بغض النظر عن المكان الذي يسقط فيه الجسم على سطح دائرة الأفق. وتعد هذه خاصية مهمة جداً من خاصيات الثقب الأسود. وفي الإرغوسفير نفسه يمكن أن تكون السرعة الزاوية

لحركة الأجسام مختلفة، إلا أن هذه بعد أن تسقط على سطح الثقب الأسود، تصبح لها السرعة الزاوية نفسها، وتدور مع سطح الثقب الأسود كأنها التصقت إلى سطح جسم صلب يدور.

وبالنسبة للمراقب الخارجي فإن الضوء الذي يتلقاه منها يغدو أكثر احمراراً وأقل كثافة، ثم لا يلبث أن ينطفئ تماماً، وتصبح هي غير مرئية فيعجز المشاهد عن رؤية ما يحدث تحت دائرة الأفق. أما إذا ما سقط المشاهد سقوطاً حراً في الثقب الأسود الذي يدور، فإنه سوف يصل دائرة الأفق في زمن منته، كما هي الحال مع الثقب الذي لا يدور، وسوف يواصل سقوطه في الداخل. ولكن، لنترك هذا المشاهد الآن ونعود إلى الفراغ الخارجي: إلى ضواحي الثقب الأسود.

إن دوران الثقب الأسود لا يمكن أن يكون سريعاً قدر ما يشاء. ويكمن الأمر هنا في أنه لا يمكن له أن يظهر أصلاً إذا كان الجسم يدور بسرعة فائقة. وواقع الحال أنه لدى انكماش الجسم الذي يدور بسرعة كبيرة بما يكفي، فإن قوى طرد مركزي تظهر على خط الاستواء، تعيق انكماشه في مسطح خط الاستواء. ويمكن أن يواصل الجسم انكماشه على امتداد القطبين فقط. لكنه يتحول في هذه الحالة إلى «زلاّبية» نصف قطره أكبر بكثير من مجال جاذبيته، بالتالي لن يظهر منه أي ثقب أسود. إن الحد الأقصى الممكن لدوران الثقب الأسود، هو عندما تتساوى سرعة دوران نقاط خط استوائه مع سرعة الضوء.

وتتبدل لدى الثقب الأسود قوانين الميكانيكا الفلكية أيضاً. فلنتذكر الآن ظاهرة خطف الثقب الأسود للأجسام بقوة جاذبيته. إذا كان الثقب يدور فإنه من السهولة بمكان بالنسبة إليه أن يخطف الأجزاء الطائرة على مقربة منه بالاتجاه المعاكس لحركة دورانه، أما إذا كانت الأجزاء تطير باتجاه حركة دورانه، فإن اختطافها لا يتم إلا بصعوبة كبيرة. ونحن يمكننا أن نتخيل هذا بوضوح إذا ما تصورنا أن مركّب إعصار الحقل المغناطيسي يتحرك حول الثقب الأسود كما يتحرك المقلاع: يسرع ويقذف الأجزاء التي تتحرك على مقربة من الثقب الأسود في الاتجاه عينه الذي

يدور فيه إعصار هذا الحقل، والعكس تماماً، أي يوقف ويخطف الأجزاء التي تتحرك ضد حركة الإعصار.

وهاك مثالاً آخر على تبدل قوانين الميكانيكا الفلكية. في حالة دوران الجسم على مدار دائري حول ثقب أسود يدور بسرعة قصوى، فإن الطاقة التي يمكن أن تنطلق على شكل موجات جاذبية، أكبر بسبع مرات من تلك التي تنطلق لدى الحركة حول ثقب أسود لا يدور.