الجزء الأول

الثقـــوب الســـوداء

الفصل الأول

ما هذا؟

نجوم ليست مرئية

إن الثقب الأسود وليد الجاذبية. ولذلك يمكننا أن نبدأ الحديث عن تاريخ اكتشاف الثقوب السوداء ابتداءً من زمن اسحق نيوتن الذي اكتشف قانون الجاذبية العامة، وهو القانون الذي يخضع له كل شيء من غير استثناء. فحتى وقتنا الراهن لم تكتشف أي قوة أخرى لها مثل هذه الشمولية. وكل أنواع التفاعل الفيزيائي الأخرى ترتبط بخاصيات محددة من الخاصيات التي للمادة. فالحقل الكهربائي على سبيل المثال، لا يؤثر إلا على الأجسام المشحونة، أما الأجسام الحيادية فلا تتأثر به إطلاقاً. إن الجاذبية وحدها تسود في الطبيعة كلها سيادة مطلقة: على الذرات الخفيفة والذرات الثقيلة، وحتى على الضوء. وكان نيوتن قد افترض في حينه أن الضوء أيضاً ينجذب إلى الأجسام الكثيفة. ومن هذه الحقيقة، من إدراك أن الضوء خاضع بدوره لقوى الجاذبية، يبدأ تاريخ الثقوب السوداء، تاريخ التكهن بخاصياتها المذهلة.

وكان عالم الرياضيات والفلكي الفرنسي الشهير لابلاس أول من فعل ذلك. واسم لابلاس معروف جيداً في الأوساط العلمية. فهو قبل كل شيء مؤلف كتاب «بحث في الميكانيكا الفلكية». وهو عمل مؤلف من خمسة مجلدات صدرت بين العامين 1798 و 1825. وقد عرض لابلاس في عمله هذا النظرية الكلاسيكية لحركة أجرام النظام الشمسي، التي لم تستند إلا إلى قانون الجاذبية العامة الذي وضعه اسحق نيوتن. وقبل هذا العمل لم يكن بعض الخاصيات المرصودة لحركة

الكواكب، والقمر، وسوى ذلك من أجرام النظام الشمسي، قد نال شرحاً وافياً. بل لقد بدا أنها تتعارض وقانون نيوتن. فبين ب. لابلاس وفق تحليل رياضي دقيق أن الخاصيات المعنية كلها تفسر بالتجاذب المتبادل بين الإجرام السماوية، وبتأثير جاذبية كل كوكب على الكوكب الآخر. وأعلن لابلاس أن قوة واحدة تسود في السماء، هي قوة الجاذبية. وكتب يقول في «بحثه» المذكور: «إن علم الفلك منظوراً إليه من وجهة النظر الأكثر عمومية، هو المعضلة الأعظم بالنسبة للميكانيكا». وكان لابلاس أول من استخدم مصطلح «الميكانيكا الفلكية» الذي ترسخ بعد ذلك في الميدان العلمي.

وكان ب. لابلاس من بين أول من أدركوا ضرورة الموقف التاريخي من مسألة شرح خاصيات نظم الأجرام السماوية. فبعد عمانوئيل كانت عرض لابلاس فرضية نشوء النظام الشمسي من المادة البدئية المتخلخلة.

ولا تزال الفكرة الرئيسة في فرضية لابلاس عن تكاثف الشمس والكواكب من السديم الغازي، لا تزال حتى يومنا هذا الأساس الذي تنطلق منه النظريات المعاصرة عن نشوء النظام الشمسي...

وقد كتب كثيراً عن هذا كله في مختلف الدراسات، كما كتب كثير أيضاً عن كلمات ب. لابلاس المتعالية عندما سأله نابليون: لماذا تخلو «ميكانيكا السماء» عنده من ذكر الإله فيها؟ فأجاب: «لست بحاجة إلى هذه الفرضية».

ولكن الأمر الذي لم يكن معروفاً إلا قليلاً حتى وقت قريب، هو ما تكهن به لابلاس عن إمكانية وجود نجوم غير مرئية. وكان قد ساق تكهنه هذا في كتابه «عرض نظم العالم» الذي صدر في العام 1795. ولم يلجأ لابلاس في كتابه هذا لو مرة واحدة إلى الصيغ أو رسم الأشكال. إن قناعة لابلاس العميقة بأن الجاذبية تؤثر على الضوء كما على كل جسم آخر، مكنته من أن يكتب الكلمات الشهيرة الآتية: «إن النجم المضيء الذي تساوي كثافته كثافة الأرض ويكبر قطره قطر الشمس بـ 250 مرة، لا يسمح لأي شعاع ضوئي من أشعته بالوصول إلينا، بسبب قوة جاذبيته؛ ولذلك قد تبقى أكثر الأجرام السماوية سطوعاً في الكون غير مرئية».

ولم يرد في الكتاب أي براهين على هذا الزعم. ولكن كيف استدل لابلاس على هذا؟ لقد استخدم نظرية الجاذبية العامة النيوتنية، وحسب المقدار الذي ندعوه نحن الآن بالسرعة الكونية الثانية[1]. على سطح النجم. وهذه هي عينها السرعة التي ينبغي أن تعطى لأي جسم لكي يقهر الجاذبية وينطلق بعيداً عن النجم أو الكوكب محلقاً إلى الأبد في الفضاء الكوني. وإذا كانت السرعة البدئية للجسم أقل من السرعة الكونية الثانية، فإن قوى الجاذبية تكبح حركة الجسم وتوقفه وترغمه على أن يقع ثانية في مركز الجاذبية. ومن المعروف في رحلاتنا الفضائية اليوم، أن السرعة الكونية الثانية على سطح الأرض تساوي أحد عشر كيلومتراً في الثانية. وبقدر ما تكون السرعة الكونية الثانية أعظم على سطح الجسم الكوني، بقدر ما تكون كثافته أكبر ومجاله أقل. وهذا مفهوم، لأنه مع تنامي الكثافة تزداد الجاذبية، ومع تزايد بعد المسافة عن المركز تضعف الجاذبية.

وعلى سطح القمر، تبلغ السرعة الكونية الثانية 2.4 كم في الثانية، وتبلغ على سطح المشتري 61 كم، وعلى سطح الشمس 620 كم، أما على سطح ما يدعى بالنجوم النيترونية التي تقترب كثافتها من كثافة الشمس لكن نصف قطرها لا يبلغ سوى عشرة كيلومترات، فإن هذه السرعة تصل إلى نصف سرعة الضوء: 150 ألف كيلومتر في الثانية.

ويواصل ب. لابلاس مناقشة الأمر فيقول: لنتخيل أننا نأخذ جسماً كونياً على سطح سرعته الكونية الثانية تفوق سرعة الضوء. عندئذٍ لن يكون بمقدور الضوء أن ينطلق من على هذا النجم في الفضاء الكوني بسبب قوة الجاذبية، ولن يصل إلى المراقب البعيد، وبالتالي لن نرى نحن النجم المعني على الرغم من أنه يشع!

وإذا ما زدنا كتلة الجسم الكوني بإضافة مادة لها متوسط الكثافة عينه، فإن السرعة الكونية الثانية سوف تزداد بالقدر نفسه الذي زاد فيه نصف قطر الجسم أو قطره.

1- السرعة الكونية الثانية، هي سرعة الإفلات من الجاذبية - م.

والآن بات الاستنتاج الذي وصل إليه لابلاس مفهوماً: لكي تحجز الجاذبية الضوء يجب أن نأخذ نجماً مادته لها درجة كثافة الأرض نفسها، وقطره أكبر من قطر الشمس بـ 250 مرة، أي أكبر من قطر الأرض بـ 27 ألف مرة. وفي واقع الأمر أن السرعة الكونية الثانية على سطح مثل هذا النجم سوف تكون أكبر بـ 27 ألف مرة منها على سطح الأرض، وتتساوى تقريباً مع سرعة الضوء: يغدو النجم غير مرئي.

وكانت هذه نبوءة فذة بواحد من خاصيات الثقب الأسود: لا يطلق الضوء، فيكون غير مرئي. وينبغي أن ننوه، وفاءً للحقيقة، إلى أن لابلاس لم يكن العالم الوحيد، بل لم يكن العالم الأول الذي تنبأ بهذه النبوءة. فقد تبين منذ بعض الوقت أن الكاهن والجيولوجي الإنكليزي وأحد مؤسسي علم الزلازل: ج. ميتشيل كان قد زعم مثل هذا الزعم في العام 1783. وكان تعليله يشبه تعليل لابلاس شبهاً كبيراً.

ويدور الآن بين الإنكليز والفرنسيين جدال هزلي وأحياناً جدي، حول: من هو المكتشف الأول لإمكانية وجود نجوم غير مرئية؟ هل هو الفرنسي ب. لابلاس أم الإنكليزي ج ميتشيل؟ في العام 1973 ساق عالما الفيزياء النظرية الإنكليزيان الشهيران س. هوكينغ وهـ. إيلليس في كتاب كرساه للمسائل الرياضية المعاصرة الخاصة ببنية المكان والزمان، ساقا كتاب الفرنسي ب. لابلاس كبرهان على إمكانية وجود الثقوب السوداء؛ فعندئذٍ لم يكن كتاب ج. ميتشيل قد اكتشف بعد. وفي خريف العام 1984 قال عالم الفيزياء الفلكية الإنكليزي م. ريس، في بحث ألقاه في المؤتمر العلمي المنعقد في تولوز، قال: مع أنه من غير المريح أن يقال هذا على الأراضي الفرنسية، إلا أنه ينبغي عليه أن ينوه إلى أن أول من تكهن بوجود نجوم غير مرئية، هو الإنكليزي ج. ميتشيل؛ ثم عرض صورة للصفحة الأولى من كتاب ميتشيل المعني. وقد قابل الحاضرون تلك الملاحظة التاريخية بالتصفيق والابتسامات.

وحري بنا أن نتذكر في هذا السياق الجدال الذي دار بين الفرنسيين والإنكليز بصدد التكهن بوضعية كوكب نيوتن وفق ثورات حركة أورانوس: من تكهن به

أولاً، الفرنسي (او. ليفيرييه) أم الإنكليزي (ج. آدمز)؟ ومن المعروف بالتأكيد أن كلاً من العالمين المذكورين قد حدد بصورة مستقلة الوضعية الدقيقة للكوكب الجديد. لكن الحظ كان إلى جانب الفرنسي. وكان ذلك هو مصير كثير من الاكتشافات. فغالباً ما يتوصل إليها في وقت واحد بصورة مستقلة أناس مختلفون. بيد أن الأولية تعطى عادة لمن يغوص أكثر إلى أعماق المسألة، وأحياناً ما يكون الأمر لعبة حظ وحسب.

ولكن تكهن ب. لابلاس وج. ميتشيل لم يبلغ درجة النبوءة الحقيقية بالثقب الأسود؟ لماذا؟ يتعلق الأمر هنا بأنه في زمن لابلاس لم يكن معروفاً بعد أنه لا شيء في الطبيعة يمكن أن يتحرك أسرع من الضوء. فمبدأ لا شيء يمكن أن يتجاوز الضوء في الفراغ، برهن عليه ألبرت أنشتاين في النظرية النسبية التي وضعها في قرننا هذا (أي في القرن العشرين. م). ولذلك بالنسبة للابلاس كان النجم الذي يدرسه نجماً أسود فقط، ولم يكن بمقدوره أن يعرف أن مثل هذا النجم يفقد قدرته على «التواصل» مع العالم الخارجي بأي طريقة كانت، ويعجز عن «إرسال» أي شيء إلى العوالم البعيدة عما يجري عليه. وبكلمات أخرى لم يكن لابلاس قد علم بعد أن هذا النجم ليس «أسود» وحسب، بل لم يكن قد علم أيضاً أنه «ثقب» يمكن السقوط فيه، ولكن الخروج منه مستحيل. ونحن نعلم الآن أنه إذا كان الضوء عاجزاً عن الخروج من منطقة ما في الفضاء، فإن هذا يعني أن أي شيء آخر على وجه العموم لا يمكنه أن يخرج من هناك، وندعو مثل هذا الموضع ثقباً أسود.

ويقوم السبب الآخر الذي يمنع استدلال ب. لابلاس من أن يكون استدلالاً حاسماً، في أنه درس حقول جاذبية ذات قوة كبيرة تتسارع الأجسام الساقطة فيها حتى تبلغ سرعتها سرعة الضوء، بينما الضوء الخارج منها نفسه يمكن أن يحجز، وأخذ في غضون ذلك بقانون الجاذبية النيوتني.

ولكن أنشتاين برهن على أن نظرية الجاذبية النيوتنية لا تصلح لمثل هذه الحقول، ووضع نظرية جديدة تصلح للحقول الفائقة القوة والحقول السريعة التبدل، ودعا أنشتاين نظريته الجديدة هذه بالنظرية النسبية. وينبغي استخدام نتائج هذه النظرية تحديداً للبرهان على إمكانية وجود الثقوب السوداء، ولدراسة خاصياتها.

فنظرية النسبية العامة، هي نظرية مدهشة. إنها عميقة ومنسجمة إلى درجة أنها تثير الإحساس بالمتعة الجمالية لدى كل من يطلع عليها. وكان الفيزيائيان السوفييتيان ل. لانداو، وي. ليفشيتس قد وصفاها في كتابهما التعليمي: «نظرية الحقل» بأنها «أجمل نظرية بين النظريات الفيزيائية المعروفة كلها». وقال الفيزيائي الألماني ماكس بورن عن اكتشاف النظرية النسبية: «إنني معجب بهذا الاكتشاف بصفته إبداعا فنيا». أمّا الفيزيائي السوفييتي ف. غينزبورغ فقد كتب يقول: إن هذه النظرية تثير «إحساساً شبيهاً بذاك الذي يحس به الناظرون إلى أروع التحف الفنية».

ولا ريب في أن المحاولات الكثيرة التي بذلت لتقديم عرض مبسط لنظرية أنشتاين، يمكن أن تعطي انطباعاً عاماً عنها. بيد أن ذلك كله ليس سوى ظل باهت لمعرفة النظرية عينها. فالفرق هنا تماماً كالفرق بين الإحساس الذي يخلقه تأملك للنسخة «السكستينية للجوكندا»، والإحساس الذي تخلقه مشاهدتك للأصل الذي أبدعته عبقرية رافائيل.

ومع ذلك، عندما لا تتوفر لك إمكانية الاستمتاع بالأصل، فلا بأس من أن تتعرف على النسخة المتاحة.

ولفهم الخاصيات الخارقة التي تتوفر عليها الثقوب السوداء، ينبغي علينا بالضرورة أن نوجز بعض تبعات نظرية النسبية العامة.

مجال الجاذبية

ما الذي تتميز به نظرية الجاذبية الأنشتاينية عن نظرية نيوتن؟ فلنبدأ من الأبسط. ولنفترض أننا موجودون على سطح كوكب كروي لا يدور، ولنقس قوة جذب هذا الكوب لجسم ما بميزان لولبي. ونحن نعرف أنه حسب قانون نيوتن فإن هذه القوة تتناسب طرداً مع حاصل ضرب كتلة الكوكب في كتلة الجسم، وتتناسب عكساً مع مربع نصف قطر الكوكب. ويمكننا أن نقيس نصف قطر

الكوكب إذا قسنا على سبيل المثال، طول خط استوائه وقسمناه على 2π.

ولكن ما الذي يقال عن قوة الجاذبية في نظرية أنشتاين؟ حسب هذه الأخيرة فإن القوة يجب أن تكون أكبر بقليل مما أنتجته معادلة نيوتن. ونحن سوف ندقق لاحقاً ماذا تعني هذه «الأكبر بقليل».

لنتصور الآن أننا نستطيع أن نقلص نصف قطر الكوكب بالتدرج، عن طريق ضغطه مع الإبقاء على كامل كتلته. في هذه الحال سوف تزداد قوة جاذبيته، لأن نصف قطره بات أصغر. وحسب نيوتن أنه لدى ضغط الكوكب بمعدل الضعف، فإن قوة الجاذبية سوف تزداد بمعدل أربع مرات. أما حسب أنشتاين فإن تزايد القوة سوف يحدث أسرع قليلاً. وبقدر ما يكون نصف قطر الكوكب أصغر بقدر ما يكون هذا الفرق أكبر.

وإذا ما ضغطنا الكوكب إلى الحد الذي يغدو معه مجال جاذبيته خارق القوة، فإن الفرق بين مقدار القوة المحسوب وفق نظرية نيوتن، وبين مدلولها الحقيقي الذي أعطته نظرية أنشتاين، سوف يزداد زيادة مهولة. فحسب نيوتن أن قوة الجاذبية تنزع نحو اللا نهاية عندما نضغط الجسم في نقطة (يكون نصف القطر قريباً من الصفر). أما حسب أنشتاين فإن النتيجة مغايرة تماماً: تنزع القوة نحو اللا نهاية عندما يغدو نصف قطر الجسم مساوياً لما يسمى بمجال الجاذبية. ويتحدد مجال الجاذبية هذا بكتلة الجسم السماوي. وبقدر ما يكون المجال أصغر بقدر ما تكون الكتلة أقل. بيد أنه صغير جداً حتى بالنسبة للكتل العملاقة. فهو بالنسبة للأرض مثلاً، يساوي سنتيمتراً واحداً! وحتى بالنسبة للشمس فإن مجال الجاذبية لا يساوي سوى 3 كم. إن أبعاد الأجسام السماوية، هي عادة أكبر بكثير من مجالات جاذبيتها. فمتوسط نصف قطر الأرض على سبيل المثال 6400 كم، ونصف قطر الشمس 700 ألف كم. وإذا كان نصف القطر الحقيقي للجسم أكبر بكثير من مجال جاذبيته، فإن فرق القوة المحسوب وفق نظرية أنشتاين ونظرية نيوتن سوف يكون قليلاً جداً. فعلى سطح الأرض مثلاً، سوف يشكل هذا الفرق جزءاً من مليار من مقدار القوة عينها.

ولكن عندما يغدو نصف قطر الجسم لدى ضغطه، قريباً من حقل الجاذبية، عندئذٍ فقط وفي مثل هذا الحقل الشديد الجاذبية، يزداد الفرق زيادة ملحوظة، وكما نوهنا سابقاً أنه لدى تساوي نصف قطر الجسم مع حقل الجاذبية فإن المدلول الحقيقي لقوة حقل الجاذبية يغدو لا متناهياً.

وقبل أن نبحث في العواقب التي تتأتى عن ذلك، لنتعرف على بعض الاستنتاجات الأخرى لنظرية أنشتاين.

إن ماهية هذه النظرية تقوم في أنها ربطت ربطاً محكماً بين الخاصيات الهندسية للفراغ وتيار الزمن، وبين قوى الجاذبية. وقد جاءت هذه الروابط معقدة وشديدة التنوع. ونحن لن نشير الآن سوى إلى حالتين مهمتين.

فوفق نظرية أنشتاين أن تيار الزمن في حقل الجاذبية الشديدة القوة أكثر بطئاً من تيار الزمن المقيس بعيداً عن الكتل الجاذبة. ولا شك في أن القارئ المعاصر قد سمع أن الزمن يمكن أن يجري جرياناً متبايناً. ومع ذلك يصعب الاعتياد على هذه الحقيقة. فكيف يمكن أن يسير الزمن سيراً مختلفاً؟ فحسب تصوراتنا البدهية أن الزمن هو امتداد، وهو مشترك تتسم به العمليات كلها. إنه كالنهر يجري بثبات. بيد أنه ثمة عمليات يمكن أن تسير أسرع وأخرى أبطأ، إذ إننا نستطيع أن نؤثر على مسيرها إذا وضعناها في ظروف متباينة. فنحن يمكننا مثلاً، أن نسرع مجرى التفاعلات الكيميائية عن طريق التجميد، ولكن حركة الإلكترونات في الذرات سوف تجري في غضون ذلك وفق الإيقاع المعتاد عينه. فالعمليات كلها من وجهة نظرنا، تغوص في نهر الزمن المطلق، الذي كان يظن أن أي شيء كان لا يمكن أن يؤثر في جريانه. ويمكن وفق تصورنا، أن ترفع العمليات كلها من ذلك النهر، ومع ذلك فإن الزمن سوف يواصل سيره كامتداد فارغ.

هذا ما كان سائداً في العلم في زمن أرسطو، وفي زمن نيوتن، ثم بعد ذلك وصولاً إلى ألبرت أنشتاين. وها كم ما كتبه أرسطو في كتابه «الفيزياء»: «إن الزمن الذي يجري في حركتين متماثلتين متزامنتين، يكون هو عينه. وحتى لو لم يجر الفاصلان الزمنيان متزامنين فإنهما في الأحوال كلها متماثلان... وعليه فإن الحركات يمكن أن

تكون مختلفة ومستقلة واحدتها عن الأخرى. وفي هذه الحال وتلك فإن الزمن هو عينه بالمطلق».

وكان نيوتن أكثر تعبيرية عندما كتب عاداً أنه يتحدث عما هو عياني: «إن الزمن الرياضي، الحقيقي، المطلق مأخوذاً بحد ذاته من غير أي علاقة مع أي جسم، يجري متماثلاً وفق طبيعته نفسه».

وفي بعض الأحيان كانت قد أطلقت منذ أقدم الأزمنة تخمينات تؤكد على أن التصورات عن الزمن المطلق ليست تصورات بدهية. ففي القرن 1 ق. م كتب لوكريسيوس كار في ملحمته: «بصدد طبيعة الأشياء» يقول: «ليس الزمن موجوداً بذاته... ولا يمكن أن يفهم الزمن بحد ذاته بمعزل عن حالة سكون الأجسام وحركتها».

ولكن أنشتاين وحده الذي برهن الزمن المطلق ليس له وجود قط. فمجرى الزمن يرتبط بالحركة، وبحقل الجاذبية، وهذا الخير هو الأمر الذي له أهمية خاصة بالنسبة لنا الآن. إن العمليات كلها، كلها على الإطلاق، ومهما اختلفت طبيعتها تتباطأ في حقل الجاذبية القوية، بالنسبة للمراقب الحيادي، ومعنى هذا أن الزمن، أي القاسم المشترك الذي تتسم به العمليات كلها، يتباطأ.

وليس هذا التباطؤ كبيراً عادة. فعلى سطح الأرض مثلاً، يجري الزمن أبطأ مما عليه الحال في الفضاء البعيد بمقدار جزء من مليار، تماماً كما في حالة حساب قوة الجاذبية.

ويجدر أن نؤكد هنا خاصة على أن مثل هذا التباطؤ الضئيل لمجرى الزمن في حقل جاذبية الأرض، قد قيس مباشرة. وقيس كذلك تباطؤ الزمن في حقل جاذبية النجوم، مع أنه ضئيل هناك أيضاً إلى الحد الأقصى. ويظهر التباطؤ أوضح في حقل الجاذبية الشديدة ويغدو أكبر إلى ما لا نهاية عندما يتساوى نصف قطر الجسم مع مدى الجاذبية.

ويتلخص الاستنتاج المهم الثاني لنظرية أنشتاين في أن الخاصيات الهندسية للفراغ تتبدل في حقل الجاذبية القوية. وهكذا تغدو الهندسة الإقليدية التي اعتدنا عليها باطلة. وهذا يعني على سبيل المثال أن مجموع الزوايا في المثلث لا يساوي زاويتين قائمتين، وأن

امتداد المحيط لا يساوي بعده عن المركز مضروباً في 2π. إذن تبدو خاصيات الأشكال الهندسية المعتادة كأنها ليست مرسومة على مسطح إنما على سطح ملتوٍ. ولذلك يقولون إن الفراغ «يلتوي» في حقل الجاذبية. وغني عن البيان أن هذا الالتواء لا يلاحظ إلا في حقل الجاذبية القوية، إذا كان بعد الجسم قريباً من بعد حقل الجاذبية.

ومن الواضح أن تصور التواء الفراغ نفسه يصعب أن يتوافق مع تصوراتنا البدهية المتجذرة، ومثله في هذا مثل تصور اختلاف مجرى الزمن.

وكتب نيوتن عن الفراغ بالدقة عينها التي كتب فيها عن الزمن: «إن الفراغ المطلق، هو من حيث طبيعته نفسه لا يرتبط بأي علاقة مع المواد الخارجية، ويبقى حرّاً مستقلاً وساكناً». لقد رأى نيوتن في الفراغ «مسرحاً» ما لا متناهياً تجري عليه «أحداث» لا تؤثر أبداً على هذا «المسرح» نفسه.

وكان الرائد الأول للهندسة اللا إقليدية «الملتوية»، ن. لوباتشيفسكي، قد طرح فكرة مؤدّاها إن هندسته يمكن أن تتجلى في بعض الحالات الفيزيائية، الأمر الذي لا ينسحب على هندسة إقليدس. أما أنشتاين فقد أظهر في حساباته أن الفراغ «يلتوي» فعلاً في حقل الجاذبية الشديدة. وقد أكّدت التجارب المباشرة صحة هذا الاستنتاج النظري. ولكن لماذا لا نقبل نحن إلا بصعوبة فائقة استنتاجات نظرية النسبية العامة عن الفراغ والزمن؟ ذلك لأن التجربة اليومية للبشرية، وحتى تجربة العلم، لم تتعاملا على امتداد قرون إلا مع ظروف كان التغير الذي يطرأ فيها على خاصيات الزمن والفراغ، غير ملحوظ قط، ولذلك أهمل تماماً. إن معارفنا كلها تتأسس على التجربة اليومية. وهذا ما أدى بنا إلى الاعتياد على عقيدة عمرها ألف عام، مؤداها أن الزمن والفراغ لا يتغيران.

فحل عصرنا هذا. وواجهت البشرية في سعيها إلى المعرفة ظروفاً بات من المستحيل معها تجاهل تأثير المادة على خاصيات الفراغ والزمن. وبصرف النظر عن خمول تفكيرنا، إلا أنه ينبغي علينا أن نعتاد على مثل هذه الحال غير المألوفة. وها هو الجيل الجديد من البشر يقبل الآن بسهولة أكبر حقائق نظرية النسبية العامة (باتت أسس هذه النظرية تدرس اليوم في المدارس، الأمر الذي لا يمكن أن يقال عن عدة عقود خلت حتى بالنسبة لأكثر العقول تقدماً.

والآن لا بأس إذا علقنا بملاحظة أخرى على استنتاجات نظرية النسبية العامة. وكان المؤلف قد بين أن خاصيات الفراغ والزمن لا يمكن أن تتغيّر وحسب، بل إن الفراغ والزمن يمكن أن يتحدا في كل واحد، هو «الفراغ - الزمن» الرباعي الأبعاد. وهذا التنوع الموحد هو بالذات الذي يلتوي. وغني عن البيان أن التصورات العيانية في مثل هذه الهندسة الفائقة الرباعية الأبعاد، أكثر صعوبة؛ ولذلك فإننا لن نتوقف عندها.

لنعد الآن إلى حقل الجاذبية حول الكتلة الكروية.

بما أن الهندسة في حقل الجاذبية القوية، هي هندسة لا إقليدية، هندسة ملتوية، فإنه ينبغي أن نحدد بدقة ماذا يعني نصف قطر المحيط، مثلاً، خط استواء الكوكب. ففي الهندسة المعتادة يمكن تحديد نصف القطر بطريقتين: إنه أولاً مسافة نقاط محيط الدائرة عن المركز، وهو ثانياً طول المحيط مقسوماً على 2π ولكن هذين المقدارين لا يتطابقان في الهندسة اللا إقليدية بسبب «التواء» الفراغ.

ولاستخدام الطريقة الثانية لتحديد نصف قطر الجسم الجاذب (وليس لتحديد المسافة من المركز إلى المحيط)، عدد من الميزات. فلقياس مثل هذا المجال لا حاجة إلى الدنو من مركز الكتل الجاذبة. ولهذا الأمر الأخير أهمية فائقة، فلقياس نصف الأرض على سبيل المثال سوف يكون من الصعب جداً الغوص إلى مركزها، بيد أنه ليس صعباً قط قياس طول خط الاستواء.

وبالنسبة للأرض ليس هناك ضرورة لقياس المسافة حتى المركز مباشرة، لأن حقل جاذبية الأرض ليس كبيراً، وبالنسبة لنا فإن هندسة إقليدس صالحة بدقة أكبر، وطول خط الاستواء مقسوم على 2π يساوي طول المسافة إلى المركز. لكن الأمر ليس على هذا النحو في النجوم ذات الكثافة الخارقة وحقل الجاذبية الشديد القوة: يمكن أن يكون الفرق ملحوظاً جداً بين «أنصاف الأقطار» المحددة بوسائل مختلفة. ضف إلى هذا أن بلوغ مركز الجاذبية أمر مستحيل في حالات عدة. ولذلك فإننا سوف نفهم دائماً نصف قطر المحيط على أنه طوله مقسوم على 2π.

لقد دعي حقل جاذبية الجسم الكروي الذي لا يدور، والذي ندرسه هنا، دعي بحقل شفارسشيلد، وهو اسم العالم الذي ما إن وضع أنشتاين نظريته عن النسبية العامة حتى أعطى حلاً لمعادلتها المتصلة بهذه الحالة.

لقد كان الفلكي الألماني ك. شفارسشيلد واحداً من خالقي علم الفيزياء الفلكية النظري المعاصر، إذ حقق عدداً من الأعمال القيمة في ميدان الفيزياء الفلكية العملية وسواه من ميادين علم الفلك الأخرى. وها كم التقويم الذي أعطاه أنشتاين لمساهمة شفارسشيلد في تطوير العلم؛ ففي كلمة ألقاها أنشتاين في اجتماع أكاديمية العلوم البروسية المكرس لذكرى شفارسشيلد الذي كان قد توفى في الثانية والأربعين من عمره، قال أنشتاين: «إن ما يثير الدهشة خاصة، في أعمال شفارسشيلد النظرية، هو امتلاكه اليقيني لطرائق البحث الرياضي، وتلك السهولة التي يصل بها إلى جوهر المسألة الفلكية أو الرياضية. ومن النادر أن تجتمع في مؤلف معارف رياضية على هذه الدرجة من العمق مع فكر نقي صاف، ومرونة في التفكير تثير الإعجاب الشديد، كما لدى شفارسشيلد. إن هذه المواهب بالذات هي التي مكنته من أن يحقق أعمالاً نظرية مهمة. في تلك الميادين التي أثارت خوف الباحثين الآخرين بمعضلاتها الرياضية. ومن الواضح أن السبب الذي حفز إبداعه الذي لا ينضب كامن على أرجح تقدير، في سعادة الفنان الذي يكتشف الصلة الدقيقة بين المفاهيم الرياضية، أكثر منه في سعيه إلى معرفة التبعيات الخفية في الطبيعة».

في كانون الأول من العام 1915، أي بعد شهر واحد على انتهاء أنشتاين من نشر نظريته، كان ك. شفارسشيلد قد توصل إلى حل معادلة أنشتاين عن حقل جاذبية الجسم الكروي. وكانت هذه النظرية كما أسلفنا، نظرية معقدة جداً بسبب مفاهيمها الجديدة الثورية تماماً، ولكن تبين أن معادلاتها أيضاً شديدة التعقيد من الوجهة التقنية الصرف إذا صح التعبير. وإذا كانت صيغة قانون الجاذبية لدى نيوتن قد اشتهرت ببساطتها وإيجازها الكلاسيكيين، فإن تحديد حقل الجاذبية حسب النظرية الجديدة يتطلب حل نظام من عشر معادلات يتضمن كل منها مئات الحدود. وليست هذه مجرد معادلات جبرية، إنما معادلات تفاضلية في مشتقات خاصة من الدرجة الثانية.

وفي وقتنا الراهن تستخدم ترسانة الآلات الحاسبة كلها، للتعامل مع مثل هذه المسائل. وغني عن البيان أن زمن شفارسشيلد لم يعرف شيئاً من مثل هذه التقنية، بل كان القلم والورقة أداتيهم الوحيدتين.

بيد أنه ينبغي القول إن العمل في ميدان نظرية النسبية العامة يتطلب اليوم أيضاً، تحويلات رياضية يدوية (من غير استخدام الآلة الحاسبة) طويلة دقيقة

ومتعبة، فهي في الغالب عمليات مملة ومتماثلة بسبب الكثرة المهولة لأطراف صيغها. ولكن العمل المضني من ضرورات هذا الميدان بالذات. فغالباً ما أطلب إلى طلابي (وحتى إلى طلاب الدراسات العليا والكادر العلمي) المعجبين جداً بخيالية نظرية النسبية العامة، والذين اطلعوا عليها في المقررات الدراسية ويرغبون الآن في العمل عليها، أن يحسبوا يدوياً لو واحداً من المقادير البسيطة نسبياً في مسائل هذه النظرية. وبعد أيام من العمليات الحسابية لا يبقى كلهم متحمساً ليكرس حياته لهذا العلم.

ومبرري لهذا الاختبار «القاسي»، هو أنني مرت به أنا نفسي. فعندما كنت طالباً كان معلمي في نظرية النسبية العامة، هو المتخصص المعروف أ. زلمانوف. وقد وضع أمامي لكتابة أطروحة التخرج حل المسألة المتعلقة بخاصية مدهشة من خاصيات حقل الجاذبية، هي إمكانية «تدمير» هذا الحقل في أي مكان يقع عليه الاختيار. ولا شك في أن القارئ سوف يقول متعجباً: «كيف؟ فالمقررات الدراسية علمتنا أنه من حيث المبدأ، لا يمكن درء الجاذبية بأيّ حاجز كان، وإن مادة «الكيفوريت» التي اختلقها خيال هـ. ويلس الخصب، ما هي إلا اختلاق صرف لا يمكن أن يكون له وجود في الواقع».

وهذا كله صحيح، فإذا بقيت ساكناً بالنسبة للأرض مثلاً، فإن قوّة جاذبيتها لن تدمر. ولكن فعل هذه القوّة يمكن تحييده تحييداً تاماً، إذ تبدأ السقوط سقوطاً حراً! عندئذٍ تحل حالة انعدام الوزن. ففي قمرة السفينة الفضائية والمحركات واقفة عن العمل، والسفينة تدور حول الأرض، لا وجود لقوّة الثقل، فالأشياء وكذلك روّاد الفضاء أنفسهم يسبحون في القمرة من غير أن يشعروا بأي ثقل كان. وقد رأى كلنا هذا على شاشات التلفزة مراراً. ومن الجدير ذكره في هذا السياق، أن أيّ حقل آخر ما عدا حقل الجاذبية، لا يجيز مثل هذا «الدمار» البسيط. فالحقل الكهرومغناطيسي مثلاً، لا يمكن تحييده على هذا النحو.

وترتبط بخاصية «تحييد» الجاذبية أكثر معضلات النظرية تعقيداً: معضلة طاقة حقل الجاذبية. ويرى بعض الفيزيائيين أن هذه المعضلة لم تلق حلاً حتى اليوم. فصيغ النظرية تجيز حساب الطاقة الكاملة لحقل جاذبية كل كتلة في الفراغ كله. بيد أنه

لا يمكن تحديد موقع هذه الطاقة على وجه الدقة، ما هو مقدارها في هذا المكان من الفراغ أو ذاك. وكما يقول الفيزيائيون: ليس ثمة مفهوم لكثافة الطاقة الجاذبة في نقاط الفراغ.

لقد كان علي أن أبين في أطروحة التخرج التي أعدها، وبطريقة الحساب المباشر، أن التعابير الرياضية المعروفة وقتئذٍ عن كثافة طاقة حقل الجاذبية، هي تعابير عقيمة ولا مغزى لها حتى بالنسبة للمراقب الذي لا يجرب السقوط الحرّ، كما هي على سبيل المثال حال المراقب الواقف على الأرض ويشعر بوضوح بقوة جاذبية الكوكب الذي يجذبه. وكانت التعابير الرياضية التي يجب علي التعامل معها، أكثر جسامة من معادلات حقل الجاذبية التي تحدثنا عنها أعلاه. حتى أنني طلبت من أ. زلمانوف أن يعطيني أحدهم لمساعدتي في إجراء هذه الحسابات بالتوازي مع حساباتي، فقد كان يمكن أن أخطئ. لكنه رفض طلبي رفضاً قاطعاً. وقال: «يجب أن تفعل هذا بنفسك».

وبعد أن انتهى كل شيء اكتشفت أنني صرفت مئات الساعات على هذا العمل الروتيني. فقد تأتى لي أعيد الحسابات كلها مرتين وأحياناً أكثر. ومع اقتراب يوم مناقشة أطروحتي تسارعت وتائر العمل كثيراً، حتى باتت كسرعة الجسم الساقط في حقل الجاذبية سقوطاً حراً. والحق يقال، إن لبّ الأطروحة لم يكن في العمليات الحسابية المباشرة وحدها. ففي أثناء سير العمل كان ينبغي أيضاً أن أفكّر في مسائل مبدئية وأجد لها حلولاً.

لقد كانت أطروحتي تلك أول أعمالي الصادرة في نظرية النسبية العامة.

ولكن لنعد الآن إلى عمل ك. شفارسشيلد. فقد استخدم هذا، التحليل الرياضي الرشيق وحلّ مسألة الجسم الدائري وأرسل الحل إلى ألبرت أنشتاين لكي ينقله إلى أكاديمية برلين. فأذهل الحل أنشتاين، لأنه هو نفسه لم يكن قد توصل بعد سوى إلى حل تقريبي صحيح بالنسبة لحقل الجاذبية الضعيفة فقط. أمّا حلّ شفارسشيلد فقد كان حلاً دقيقاً، أي حلاً صحيحاً بالنسبة لأي حقل جاذبية حول الكتلة الدائرية مهما بلغت قوّته؛ وفي هذا بالذات كانت أهمية دلالته. ولكنّ أيّاً من أنشتاين أو شفارسشيلد لم يكن قد عرف بعد أن الحلّ

المعني ينطوي على ما هو أكثر أهمية بكثير، إذ تبين فيما بعد أنه يتضمن وصفاً للثقب الأسود.

ولنعد الآن لمتابعة حديثنا عن السرعة الكونية الثانية. فما هي السرعة التي ينبغي أن نعطيها حسب معادلات أنشتاين، للصاروخ الذي ينطلق من سطح الكوكب لكي يستطيع أن يتغلب على قوة جاذبيته وينطلق إلى الفضاء الكوني؟

لقد تبين أن الإجابة في غاية البساطة. وتصح هنا الصيغة عينها التي جاءت في نظرية نيوتن. وهذا يعني أن استنتاج ب. لابلاس عن عجز الضوء عن الإفلات من كتلة جاذبة متماسكة، قد أكدته نظرية الجاذبية الأنشتاينية التي تقول، إن السرعة الكونية الثانية يجب أن تكون مساوية لسرعة الضوء في مجال الجاذبية بالذات. وقد دعي المجال الذي يتساوى نصف قطره مع مجال جاذبيته، بمجال شفارسشيلد.

التكهن

إذن، وفق نظرية أنشتاين إنه عندما يتساوى نصف قطر الجسم الفلكي مع مجال جاذبيته، فإن الضوء يعجز عن الإفلات عن سطحه ليصل إلى المراقب البعيد، أي أن الجسم المعني يغدو غير مرئي. ولكن لا بد أن القارئ قد انتبه إلى أن هذه الخاصية غير العادية ليست «المعجزة» الوحيدة التي يجب أن تحصل للجسم الذي تتساوى أبعاده مع مجال جاذبيته. فحسب ما أوردناه في المقطع السابق أن قوّة الجاذبية على سطح نجم نصف قطره يساوي مجال جاذبيته، يجب أن تصبح لا متناهية، تماماً كما ينبغي أن تصبح لا متناهية أيضاً سرعة السقوط الحرّ. فإلى ماذا يقودنا هذا؟

للإجابة على هذا السؤال يجب أن نتذكر أولاً، لماذا لا تنكمش النجوم والكواكب العادية نحو المركز تحت تأثير فعل الجاذبية، بل تبقى أجساماً متوازنة؟

إن قوى الضغط الداخلي للمادة هي التي تمنع عملية الانكماش نحو المركز. ففي النجوم هذا الضغط المانع، هو ضغط الغاز الذي تصل درجة حرارته إلى مستويات عالية جداً، وهو يتحرك دوماً باتجاه تمديد النجم. أمّا في الكواكب التي على نمط الأرض، فإن هذا الضغط المانع، هو ضغط قوى الشدّ، والمرونة، والضغط. وهذا التوازن بين قوى الجذب والقوى المقاومة التي ذكرناها، هو الذي يضمن توازن الجسم الفلكي.

وترتبط القوى المقاومة للجاذبية بحالة المادة: بضغطها وحرارتها. ففي حالة انكماشها، يرتفع الضغط وترفع الحرارة. ولكن إذا ما ضغطت المادة إلى كثافة متناهية (وليس إلى كثافة غير متناهية)، فإنهما يبقيان متناهين أيضاً. بيد أن الأمر مغاير بالنسبة لقوة الجاذبية. فمع دنو مقياس الجسم الفلكي من بعد مجال الجاذبية، فإن الجاذبية تندفع نحو اللا تناهي. وهي الآن لا يمكن أن تكون موازية لقوة الضغط المقاومة المتناهية، ويجب أن يأخذ الجسم بالانكماش نحو المركز بفعل تأثيرها عليه.

وهكذا فإن أهم استنتاج في نظرية أنشتاين، هو: أن الجسم الكروي الذي يساوي قطره مجال جاذبيته وأقل، لا يمكن أن يكون مستقراً، بل يجب أن ينكمش باتجاه المركز. ولكن القارئ قد يتساءل قائلاً: «إذا كانت قوة الجذب في مجال الجاذبية متناهية، فكيف ستغدو حال تقلص الجسم إلى أبعاد أقل من مجال الجاذبية؟».

تبدو الإجابة على هذا السؤال جليّة إلى حدّ كبير. فنحن لم نتحدث حتى الآن إلا عن قوة الجاذبية على سطح جسم ساكن لا ينكمش في الوقت المعني. ولكن هذه القوة ترتبط بحالة الحركة. ونحن أشرنا من قبل إلى أن حالة انعدام الوزن تنشأ لدى سقوط الجسم سقوطاً حراً: إن الجسم الساقط سقوطاً حراً لا يعاني على الإطلاق من تأثير القوة الجاذبة. ولذلك فإن الإحساس بقوة الجاذبية ينعدم تماماً على سطح الجسم الذي ينكمش انكماشاً حراً (خارج مجال شفارسشيلد وداخله). إن المادة التي تجذبها الجاذبية لا يمكنها أن تتوقف في مجال شفارسشيلد (لأنها ستخضع عندئذٍ لقوة جذب لا متناهية). كما لا يمكنها أن تتوقف أيضاً داخل مجال شفارسشيلد. إن أيّ ذرة (الصاروخ على سبيل المثال) مهما بلغت قوة المحرك الذي يدفعها، إذا ما وقعت على مسافة من المركز الجاذب أقل من مدى مجال الجاذبية، فإنها يجب أن تسقط باتجاه هذا المركز من غير عائق.

وبذا نكون قد حصلنا على إجابة لسؤالنا الذي يقول: إلى ماذا يؤدي التنامي اللا متناهي للقوة الجاذبة مع اقتراب الجسم من مجال شفارسشيلد: إلى انكماش مدمر منفلت من كل عقال. وقد دعا الفيزيائيون هذه الظاهرة *بالانهيار النسبي*.

وعلى هذا النحو فإنه يكفي أن يضغط الجسم حتى أبعاد المجال الجاذب، ثم يبدأ هو نفسه بعد ذلك يتقلص باندفاع لا رادع له وهكذا يظهر الموضع الذي أطلق عليه فيما بعد اسم: *الثقب الأسود*.

وكانت عملية الانهيار النسبي الجاذبي التي وصفناها هنا، قد حسبت لأول مرة بدقة صارمة، على أساس معادلات نظرية النسبية العامة، في العام 1939 على أيدي الفيزيائيين الأمريكيين ر. اوبنهيمر، وهـ. فولكوف. وتعد مقالتهما في هذا الموضوع نموذجاً للإيجاز والوضوح. فقد عرض فيها كنه الظاهرة كاملاً ودقيقاً على عدد قليل من الصفحات.

واسم ر. اوبنهيمر معروف جيداً ليس في أوساط الفيزيائيين وحسب، بل في الأوساط الاجتماعية العالمية كذلك. فقد شارك هذا العالم في صناعة القنبلة الذرية الأمريكية في الأعوام 1943-1945، حيث كان على رأس مختبر لوس - آلاموس الشهير. بيد أنه أدرك بعد ذلك مدى الخطر الذى تحمله للجنس البشرى صناعة القنبلة الهدروجينية وسباق التسلح، فأعلن ضرورة استخدام الطاقة النووية للأغراض السلمية حصراً، وفي العام 1953 عزل من مناصبه كلها بصفته أمريكياً مشبوهاً.

وينبغي أن يعد بحث ر. اوبنهيمر وهـ. فولكوف تكهناً دقيقاً بإمكانية ظهور الثقوب السوداء. ومصطلح «الثقب الأسود» نفسه لم ينشأ إلا بعد ذلك بكثير: في أواخر ستينيات القرن العشرين. وقد اشتقه الفيزيائي الأمريكي د. ويلر. وكانت الثقوب السوداء معروفة قبل ذلك بتسميات شتى: المنهارة («كالآبساري»)، عندنا في الاتحاد السوفيتي، على سبيل المثال. ثم تبين أن لهذه الكلمة وقع غير مستحسن باللغة الإنكليزية. وعلى أي حال، على الرغم من أن تسمية «الثقوب السوداء»، هي تسمية دقيقة ومعبرة، إلا أن لها إشكالاتها أيضاً.

وقصارى القول، إن الثقب الأسود يمكن أن يحدث صناعياً. ويكون ذلك بضغط أي كتلة حتى أبعاد الحقل الجاذب، ثم بعد ذلك سوف تنكمش هي ذاتياً حتى لحظة الانهيار التجاذبي.

والحقيقة أن صعوبات تقنية كبيرة تنتظر على هذه الطريق. فبقدر ما تكون الكتلة المزمع تحويلها إلى ثقب أسود أصغر، بقدر ما يجب ضغطها حتى أبعاد أصغر، لأن الحقل الجاذب يتناسب طرداً مع الكتلة. فنحن نعرف مثلاً أن حقل جاذبية الأرض يساوي تقريباً سنتيمتراً واحداً. ولكن لكي نحول جبلاً يزن مليار طن إلى ثقب أسود فإنه ينبغي ضغطه ليصبح بحجم النواة الذرية!

وسوف نرى لاحقاً أنه ثمة في الكون كتل كبيرة يمكن أن تتحول من تلقائها إلى ثقوب سوداء في خلال عملية ارتقائها الطبيعي. بيد أننا قبل أن نتحدث عن هذا، نواصل تعرفنا على خاصيات الثقوب السوداء.