الفصل الخامس

الثقوب السوداء والكوانتات

هل الفراغ فارغ؟

لقد بدأ الصخب حول الثقوب السوداء في علم الفلك عند أواخر الخمسينيات وأوائل الستينيات من القرن العشرين. ومع مرور السنين اتضح كثير من غوامض هذه الأحجية فقد باتت جلية حتمية نشوء الثقوب السوداء بعد موت النجوم الجسيمة؛ واكتشفت الكوازارات التي تقع في مركزها على أغلب تقدير، ثقوب سوداء خارقة الجسامة. وأخيراً اكتشفوا في مصدر رونتجيني في برج البجعة أول ثقب أسود ذي منشأ نجمي. وفهم الفيزيائيون النظريون الخاصيات الشاذة للثقوب السوداء نفسها، وشيئاً فشيئاً اعتادوا على هذه المهاوي الجاذبة التي لا تستطيع إلا ابتلاع المادة، وزيادة حجمها، وبدا للوهلة الأولى أنها سوف تعيش إلى الأبد.

ولم يكن ثمة ما ينبئ باكتشاف عظيم جديد. ولكن مثل هذا الاكتشاف دوى في الأوساط العلمية كهزيم الرعد في سماء صافية.

فقد تبين أن الثقوب السوداء ليست أجساماً أبدية قط! فهي يمكن أن تختفي نتيجة عمليات كوانتية جارية في حقول جاذبية قوية. وينبغي علينا الآن أن نبدأ القصة من نقطة بعيدة بعض الشيء، لكي نجعل كنه هذا الاكتشاف أكثر وضوحاً.

ولنبدأ من الفراغ. فالفراغ بالنسبة للفيزيائي ليس فارغاً. وليس هذا جناساً لغوياً. فقد تبين منذ زمن بعيد أن الفراغ «المطلق»، أي «اللا شيء، اللا شيء»،

لا يمكن أن يكون موجوداً من حيث المبدأ. ولكن ما الذي يدعوه الفيزيائيون فراغاً؟ إنه ما يتبقى بعد إزاحة الذرات كلها، وكوانتات أيّ حقول فيزيائية كلها. ولكن قد يقول قائل: لن يبقى عندئذٍ أي شيء كان (هذا إذا كان القائل عازفاً عن الاهتمام بالفيزياء منذ زمن). كلا، فثمة ما يتبقى! فالفيزيائيون يقولون: يتبقى بحر من الذرات والذرات المضادة التي ينبغي أن تظهر. وهذه التي لم تولد بعد لا يمكن إزاحتها بأي طريقة كانت. وفي حال عدم وجود حقول خارجية، أي في حال غياب انتقال الطاقة، لا يمكن لهذه الذرات الكامنة أن تتحول إلى ذرات حقيقية.

وللحظة قصيرة فقط، يظهر في كل نقطة في الفراغ الفارغ زوج: ذرة وذرة مضادة[1]، وفي اللحظة عينها تندغمان، ثم تختفيان عائدتين إلى حالتهما «الجنينية». وغني عن البيان أن لغتنا المبسطة لا تعطي سوى بعض من صورة العمليات الكوانتية التي تجري. لقد أثبتت التجارب الفيزيائية منذ زمن بعيد وجود الذرات والذرات المضادة الكامنة. ونحن لن نتحدث عن هذا الآن كي لا نبتعد كثيراً عن موضوعنا الرئيس.

ولتفادي الجناس غير المقصود، يطلق الفيزيائيون على الفراغ اسماً آخر، هو الخلاء. ونحن بدورنا سوف نستخدم هذه التسمية الأخيرة.

إن حقلاً قوياً أو متبدلاً (الحقل الكهرومغناطيسي مثلاً)، يمكن أن يستدعي تحويل ذرات الخلاء الكامنة إلى ذرات وذرات مضادة حقيقية.

وكان العلماء النظريون، والعلماء التجريبيون، قد أظهروا اهتماماً بمثل هذه العمليات منذ زمن بعيد. وها نحن نناقش الآن عملية نشوء الذرات الحقيقية بفعل الحقل المتبدل. ومثل هذه العملية بالذرات، هي العملية المهمة في حالة حقل الجاذبية. فمن المعروف أن العمليات الكوانتية، هي عمليات غير عادية، وغالبا غير معتادة للمحاكمات الذهنية من وجهة نظر «التفكير السليم». ولذلك، قبل أن نتحدث عن نشوء الذرات بفعل حقل الجاذبية المتبدل، ها نحن نسوق مثالاً

1- أو جسيم وجسيم مضاد.- م.

بسيطاً من ميدان الميكانيكا، لنجعل ما سيأتي الحديث عنه مفهوماً أكثر.

لنتخيل رقاصاً معلقاً على بكرة، وإذا جذبنا الحبل أو أنزلناه يمكن أن نغير طول تعليقة الرقاص. فلندفع الرقاص. سوف يأخذ بالتأرجح. وفترة التأرجحات ترتبط بطول التعليقة فقط: بقدر ما تكون التعليقة أطول، بقدر ما تطول فترة التأرجحات. والآن دعونا نجذب الحبل بهدوء شديد. سوف يتقلص طول الرقاص، وتتقلص فترة التأرجحات، لكن مدى التأرجحات سوف يزداد. ولنعد الآن الحبل إلى وضعه السابق: تعود فترة التأرجحات إلى مدلولها السابق، ويعود مداها إلى حالته السابقة أيضاً. وإذا ما تجاهلنا خمود التأرجحات نتيجة الاحتكاك، فإن الطاقة الكامنة في التأرجحات تبقى كسابق عهدها في آخر المطاف: تماماً كما كانت قبل البدء بسلسلة التغيرات في طول الرقاص. بيد أنه يمكن تغيير طول الرقاص بحيث يتبدل مدى تأرجحاته بعد العودة إلى نقطة الطول البدئية. وينبغي لتحقيق ذلك دفع الحبل بتردد أعلى بمرتين من تردد الرقاص. وهذا ما نفعله نحن عندما نتأرجح على الأراجيح. فننزل أرجلنا ونضمها على إيقاع الأرجحة، فيتزايد مدى الأرجوحة أكثر فأكثر. ومن الواضح طبعاً أنه يمكن إيقاف الأرجوحة إذا ما ثنينا أرجلنا بعكس إيقاع الأرجحة.

وعلى الوجه نفسه يمكن «أرجحة» الموجات الكهرومغناطيسية في المرنان: اسم أطلق على تجويف جدرانه مرايا تعكس الموجات الكهرومغناطيسية. وإذا ما كان في مثل هذا التجويف ذي المرايا العاكسة والمكبس الصقيل موجة مغناطيسية، فإننا عندما ندفع المكبس إلى الأمام وإلى الخلف بتردد أعلى من تردد الموجة الكهرومغناطيسية بمرتين، فسوف نغير مدى الموجة. وإذا ما حركنا المكبس على إيقاع تذبذبات الموجة، يمكننا أن نزيد المدى، أي كثافة الموجة الكهرومغناطيسية أيضاً، أما إذا ما حركنا المكبس بعكس الإيقاع، فدائماً ما نحصل وسطياً على زيادة قوة الموجة، أي إن الطاقة «تُضخ» في التذبذبات الكهرومغناطيسية.

لنفرض الآن أن في مرناننا موجات مختلفة الترددات. في مثل هذه الحال كيفما حركنا المكبس فسوف تكون ثمة موجة تحدث حركة المكبس وفق إيقاعها. فيزداد

مدى هذه الموجة وكثافتها. ولكن بقدر ما تزداد كثافة الموجة بقدر ما تحتوي أكثر على فوتونات كوانتات الحقل الكهرومغناطيسي. وهكذا فإن حركة المكبس عندما تغير مقياس المرنان، تفضي إلى نشوء فوتونات جديدة.

وبعد أن تعرفنا الآن على هذه الأمثلة البسيطة نعود إلى مسألة الخلاء، إلى هذا البحر من شتى ضروب الذرات الكامنة. ولتبسيط الأمر لن نتحدث الآن إلا عن نسق واحد من الذرات - عن الفوتونات الكامنة - عن ذرات الحقل الكهرومغناطيسي. فقد تبين أن العملية التي تشبه عملية تغيير أبعاد المرنان التي نناقشها، والتي تفضي في الفيزياء الكلاسيكية إلى زيادة قوة التذبذبات الموجودة أصلاً، يمكن أن تفضي في الفيزياء الكوانتية إلى «زيادة قوة» التذبذبات الكامنة، أي إلى تحويل الذرات الكامنة إلى ذرات حقيقية. إذن، مع الزمن يجب يستدعي تبدّل حقل الجاذبية نشوء فوتونات بتردد متوافق مع زمن تغير الحقل. لكن مثل هذه التأثيرات، هي عادة تأثيرات ضئيلة، لأن حقول الجاذبية ضعيفة. بيد أن الوضع يتغير في حقول الجاذبية القوية.

لنعد الآن إلى الثقوب السوداء. هل يمكن أن تنشأ الذرات من الخلاء في ضواحي الثقوب السوداء؟

نعم يمكن. وهذا أمر معروف من قبل وليس ثمّة ما يثير. فلدى انكماش جسم مشحون كهربياً وتحوله إلى ثقب أسود مشحون، يتضاعف الحقل الكهربي إلى حد تنشأ عنده الإلكترونات والبوزيترونات. وقد درس الأكاديمي م. ماركوف وتلاميذه مثل هذه العمليات. غير أن نشوء الذرات هذا ممكن أيضاً من غير الثقب الأسود، وكل ما ينبغي عمله، هو مضاعفة الحقل الكهربي بأي وسيلة إلى القدر الكافي. فلا شيء هنا يتميز الثقب الأسود به.

وكان الأكاديمي يا. زيلدوفيتش قد بين أن الذرات تنشأ في إرغوسفير الثقب الأسود منتزعة منه طاقة الدوران. وتشبه هذه الظاهرة، العملية التي اكتشفها ر. بينروز والتي تحدث عنها في فقرة سابقة.

إن هذه العمليات كلها تستدعيها الحقول التي حول الثقب الأسود، وهي تؤدي إلى تغيير هذه الحقول، لكنها لا تقلص الثقب الأسود نفسه، ولا تقلص أبعاد المنطقة التي لا يخرج الضوء منه ولا أي إشعاع آخر أو ذرات.

اكتشاف هوكينغ

في العام 1974 أعلن عن اكتشاف مثير اكتشفه النظري الإنكليزي س. هوكينغ. وكان الفيزيائيون الأمريكيون تش. ميزنر، وك. ثورن، وج ويلر، قد قالوا في كتابهم التدريسي عن أعمال هوكينغ، إنه «يتجلى فيها حدس عظيم، وعمق وإحاطة، إضافة إلى هبة تصميم غير عادية على تجاوز أكثر المعضلات الفيزيائية صعوبة، والسعي إلى العثور على الحقيقة وفهمها». لقد بين س. هوكينغ أنه توجد عملية كوانتية لنشوء ذرات بالثقب الأسود نفسه وبحقل جاذبيته، الذي يؤدي إلى تقلص كتلة الثقب الأسود وأبعاده.

وقد يبدو هذا الأمر غريباً للوهلة الأولى. فلدى تشكل الثقب الأسود سرعان ما تتباطأ العمليات كلها على النجم المنكمش، «تبرد» بالنسبة للمراقب الخارجي، ويغدو حقل الجاذبية في كل مكان غير متبدل في الزمان. وليس بمقدور مثل هذا الحقل أن ينشئ ذرات. وبالتالي إذا ما أنتج الحقل المتبدل كمّا ما (ضئيلاً جداً) من الذرات في أثناء نشوء الثقب الأسود، فإن تيار هذه الذرات الخارجة من الثقب الأسود الناشئ سرعان ما يخبو، مثله مثل العمليات الأخرى كلها، مع اقتراب سطح النجم من مجال الجاذبية. أما س. هوكينغ فإنه يؤكد أن الأمر ليس كذلك، فالتيار لا يخبو البتة، بل سوف يستمر حتى بعد أن يتشكل الثقب الأسود. فما الأمر هنا؟

إن المسألة تكمن هنا في أن الحقل في داخل الثقب الأسود لم يبرد أبداً. فالثبات في الزمن هناك أمر غير ممكن، وينبغي على كل ما في جوف الثقب الأسود أن يتحرك نحو المركز، وبهذه الحالة ترتبط العملية المدهشة التي اكتشفتها هوكينغ. ونحن نذكّر أنه في الظروف العادية تشكل الذرات الكامنة في الخلاء للحظة زوجاً: ذرة وذرة مضادة، تندغمان في اللحظة عينها. وفي حقل جاذبية الثقب الأسود يمكن أن تقع إحدى الذرات التي تظهر على هذا النحو، في دائرة الأفق

وسوف تندفع لا تلوي على شيء صوب المركز، أما الأخرى فتبقى خارجاً. وبذا يغدو من المستحيل على زوج الذرات هذا أن يندغم في أي وقت كان. فتحلق الذرة التي بقيت خارجاً في الفضاء حاملة معها قسماً من طاقة الثقب الأسود، أي قسماً من كتلته أيضاً.

وعلى هذا النحو يظهر الإشعاع الكوانتي لذرات الثقب الأسود. والحقيقة أن هذه العملية عادة ما تكون ضعيفة جدا. فحسب حسابات هوكينغ أن الثقب الأسود يشع كجسم ساخن عادي، لكنه ساخن إلى حد غير كبير أبداً. فإشعاع ثقب أسود له كتلة تعادل كتلة الشمس، يوازي حرارة بعشرة ملايين درجة. وهذا إشعاع ضعيف جداً. وطول موجة الفوتونات الناشئة يوازي أبعاد ثقب أسود قدرها 10 كم. أما فاقد الطاقة على هذا الإشعاع فلا أهمية له أبداً.

ففي الشروط الواقعية للكون الراهن، يعد سقوط حتى بعض ذرات الغاز من الفراغ الذي بين النجوم، وتيارات ضعيفة من الضوء، من مثل تلك التي تخترق الكون، يعد سقوطها في مثل هذا الثقب الأسود، أكبر بكثير مما يبدده الإشعاع. ومعنى هذا أن أبعاد الثقوب السوداء لا تتناقص بل تتزايد. فبقدر ما يكون الثقب الأسود أكبر، بقدر ما تكون حرارة إشعاعه اضعف. ولذلك فإن الإشعاع الكوانتي للثقوب السوداء العملاقة لا أهمية له البتة.

الثقوب السوداء تنفجر!

بعد قراءة الفقرات السابقة قد يرفع القارئ كتفيه متعجباً ويقول: «ظاهرة ضئيلة هذه الضآلة كلها، فلماذا أثارت إذن هذه العاصفة من الدهشة والحماس في أوساط الفيزيائيين؟»

أولاً وقبل كل شيء لأن الفيزيائيين قبل اكتشاف س. هوكينغ، كانوا على يقين بأن حقل الجاذبية الساكن لا يستطيع خارج الثقب الأسود أن يلد ذرات. أما الحقل المتبدل، فهو خارج دائرة أفق الثقب الأسود «غير مرئي»، و «غير

ملموس» بالنسبة للمراقب الخارجي، ولذلك اعتقدوا بأنه يمكن نسيان أمره تماماً. ولكن العمليات الكوانتية تتصف تحديداً بأنه يمكن للذرة أن تقع حيث، من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية، لا يجب أن تكون أبداً. فالذرة مثلاً، يمكن أن «تتسرب» عبر حاجز الطاقة عندما لا يكون لديها ما يكفي من القدرة على تجاوزه. وكان س. هوكينغ قد بيّن أن خاصية الذرات الكوانتية هذه تقود في حالة الثقوب السوداء، إلى ظاهرة جديدة نوعياً: تبخر الثقوب السوداء كوانتياً. فهذه الأخيرة متمثلة في ذاتها، من غير أي تأثيرات خارجية، تختفي بالتدرج، وتتحول إلى إشعاع حراري، وتتمدد رويداً رويداً في الفراغ والزمن. إن الأهمية الجوهرية لاكتشاف هوكينغ تكمن تحديداً في دحض الاعتقاد بأزلية الثقوب السوداء.

لكن الأمر لم يتوقف عند هذا الحد. فبقدر ما يكون الثقب أصغر، بقدر ما تكون الحرارة التي يوافقها إشعاعه أكبر.

ومع تناقص كتلة الثقب الأسود أثناء التبخر، ترتفع درجة حرارته، وهذا يؤدي بدوره إلى تسارع عملية تبخره. وعندما تتقلص كتلة الثقب الأسود إلى آلاف الأطنان، ترتفع حرارة إشعاعه إلى 10^{17} درجة! فتتحول عملية التبخر إلى انفجار خرافي. فهذه الآلاف الأخيرة من الأطنان المحتشدة في مقياس ميكروسكوبي، يشعها الثقب، والأصح القول: يفجرها الثقب في جزء من عشرة أجزاء الثانية. وتعادل الطاقة التي تنطلق هنا، انفجار مليون قنبلة هيدروجينية ميغاطنية! وتختفي في هذه الألعاب النارية ما اعتقدوا سابقاً بأنها لجة جاذبية أبدية.

وغني عن البيان إن هذا لا يمكن أن يحدث بسرعة. فقد بينت الحسابات أنه إذا كانت التأثيرات الخارجية غير موجودة، فإن الثقب الأسود النجمي الكتلة يتبخر وينفجر في نهاية عصر من 10^{66} عام. ولا يمكن حتى لعلماء الفلك أن يتخيلوا مثل هذا الأمد المهول.

بيد أنه ربما يكون لهذه العمليات دور مهم في المستقبل البعيد للكون. وهذا ما سوف نتحدث عنه في الجزء الثاني من هذا الكتاب.

والآن لنعد قليلاً إلى ما قبل اللحظات الأخيرة في حياة الثقب الأسود، إلى حالته الطبيعية، لكي نرى أي الذرات تشع أثناء ذلك.

ولا ينتج الثقب الأسود الفوتونات فقط، إنما الذرات الأخرى أيضاً. فالثقوب السوداء الكبيرة نسبياً، أي تلك التي تعادل كتلتها عدة كتل شمسية، تملك حرارة منخفضة إلى درجة لا تسمح لها بأن تنتج سوى ذرات غير جماعية. وتطير هذه دوما بسرعة الضوء وليس لها كتلة استقرار ذاتية. وتنتمي إلى مثل هذه الذرات: الفوتونات، والنيترينو الإلكترونية والميوونية، إضافة إلى ذراتها المضادة، وأخيراً الغرافيتونات غير المكتشفة بعد: كوانتات موجات الجاذبية. وينتج الثقب الأسود الذي له كتلة نموذجية بالنسبة للنجوم، كثرة كثيرة من النيترينو (81٪ من مجمل التيار) من مختلف الأصناف، ثم من الفوتونات (17٪)، والغرافيتونات (2٪). ويرجع سبب إشعاع مختلف الذرات بكميات متباينة، إلى اختلاف خاصياتها هي نفسها. فأكثرها انطلاقاً، هي النيترينو، لأن دورانها الكوانتي عند الحد الأعلى (2).

فالثقوب السوداء التي لها كتل صغيرة، تكون درجة حرارتها أقل. فالثقوب السوداء التي كتلتها أقل من 10^{16}-10^{17} غرام، حرارتها أعلى من 10^{9}-10^{10} درجات. وتنتج هذه الثقوب السوداء، علاوة على الذرات التي أتينا على ذكرها، أزواجاً الكترونية - بوزيترونية. ونشير إلى أن أبعاد مثل هذه الثقوب السوداء لا تشكل إلا 10^{-11} سم: أصغر بألف مرة من أبعاد الذرة.

كما تستطيع الثقوب السوداء الأصغر ذات الكتلة التي تقل عن 10^{14}غ أن تشع ميويونات وذرات بسيطة أثقل.

ولكن حجم هذه الثقوب السوداء أصغر من حجم نواة الذرة. ومن الواضح أن مثل هذه الثقوب القزمة لا يمكن أن تنشأ في سياق ارتقاء النجوم. بيد أن ظهورها في الماضي البعيد كان ممكناً. وإذا كانت مثل هذه الثقوب السوداء «البدئية» ذات الكتلة التي تقل عن 10^{15}غ (وهذا أمر ممكن نظرياً، كما أثبتت زيلدوفيتش وكاتب هذا الكتاب)، قد تشكلت في بداية تمدد الكون، عندما كانت المادة

لا تزال كثيفة، فإنها حتى وقتنا الراهن يجب أن تكون قد تبخرت. ولهذا السبب فإن العملية التي اكتشفها س. هوكينغ، تحظى بأهمية فائقة بالنسبة لعلم الكونيات.

وعلى الراجح أننا نستطيع من باب الأحلام (الأحلام العلمية الصرف)، أن نتخيل إنشاء ثقوب سوداء صناعية صغيرة في الفضاء مستقبلاً. ولو حدث هذا فإنه يمكن لهذه الثقوب أن تجمع الطاقة التي استهلكتها عملية إنشائها، ثم تشعها بالوتيرة المعطاة وطاقة الذرات المعطاة، التي تحددها كتلة الثقب الأسود نفسه. فالثقب الأسود الذي كتلته 10^{15}غ مثلاً (وهي تعادل كتلة جبل كبير)، سوف يطلق 10^{17} إرج في الثانية على امتداد عشرة مليارات عام.

وهناك كثير مما هو غير واضح في الظاهرة الجديدة حتى الآن. فليس معروفاً مثلاً ما إذا كان الثقب الأسود يتبخر نهائياً دون أن يترك أي بقايا، أم أن ذرة ذات كتلة 10^{-5}غ تبقى في مكانه. وليس واضحاً كذلك ما إذا كان يمكن مشاهدة عملية تبخر الثقوب السوداء في الكون. ومن البدهي أن تخيل أي تجارب على الثقوب السوداء في مخابر الفيزيائيين، لا يزال أمرا أسطوريا. ولكن ما هو معروف حتى الآن يرغمنا على أن نعيد النظر في كثير من جوانب ارتقاء المادة في الكون.

وها نحن الآن ننهي حديثنا عن الثقوب السوداء في الفراغ والزمن. فقبل مئة عام لم يكن لدى الناس مجرد فكرة عن هذا، بل لم يكن بمقدورهم حتى أن يتخيلوها، إذا ما جاءهم رحالة خرافي من زمننا وحاول أن يروي على مسامعهم عن وجود مثل هذه المعجزات في الطبيعة.

ونحن نأمل أن يكون ما سقناه هنا قد ألقى شيئاً من ضوء على موضوع الثقوب السوداء الشهيرة. إننا نستطيع أن ننهي هذا الجزء بأبيات من الشعر عبر فيها الشاعر عن إحساس إنسان صادفته واحدة من أعظم أحجيات الطبيعة، صادفه ذلك العالم الجديد الرحب، الذي ينشأ بعد موت النجوم:

والنجوم في الكون تموت...
كأن النجم يغور في عمق ذاته،
عند الصرخة الأخيرة،
قاذفاً كل المشاعر...
يمضي إلى الجوف، إلى الظلمة، إلى اللا شيء
تاركاً وراءه لجة الزمن – الفراغ،
وحفرة الديجور وسط الغبار النجمي.
بلعوم العوالم الأخرى الجائع...
وما جهنم دانتي بالمقارنة مع هذه الجهنم!
لجة صامتة، مسجونة في الجو،
حيث اختلط الزمان بالفراغ،
وكل الطرق تقود إلى الدمار.
وتبقى الريح السوداء وحدها في الكون،
الريح الباردة، إعصار من الغبار النجمي،
واقفة تحرس على أطراف الهوة...

م. كاتيس