

الحلقة العاشرة من دراسة نظرية الانفجار العظيم

(10)

نظرية الانفجار العظيم 10-10

هل هي حدث فريد أم متكرر إلى ما لانهاية؟ ماذا قبل وماذا بعد البغ بانغ؟

صراع النسبية العامة وميكانيكا الكم الكوانتوم وما بعدهما، هل سنصل يوماً لنظرية كل شيء، وهل نعيش في كون متعدد؟ (النماذج المختلفة لأكوان متعددة) وهل نعيش في محاكاة حاسوبية، كون "ماتريكس"؟

د. جواد بشارة

ما قبل البغ بانغ:

الكون قبل الانفجار العظيم لغز شبه دائم في الوقت الحاضر ويشير تطبيق نظرية الأوتار على علم الكونيات إلى أن الانفجار العظيم ليس بداية الكون، ولكنه ذروة حالة كونية سابقة. هناك سيناريوهان متعارضان لوصف هذا الـ "قبل" ماذا كان هناك قبل الانفجار العظيم؟ هل الانفجار العظيم هو بداية الزمن أم أن الكون موجود من قبل؟ قبل أقل من عشر سنوات، كان مثل هذا السؤال يبدو وكأنه تدنيس للمقدسات. بالنسبة لعلماء الكونيات، فإن مثل هذا السؤال ببساطة لا معنى له ولقد تجرأ الشقيقتان التوأمين إيغور وغريشكا بوغدانوف قبل خمسة عشر عاماً أن يكرسا أطروحتين للدكتوراه حول هذا الموضوع. تخيل الزمن قبل الانفجار العظيم كان بمثابة البحث عن نقطة شمال القطب الشمالي. وفقاً لنظرية النسبية العامة، يجب أن يكون الكون المتوسع قد بدأ بانفجار كبير، مما يشير إلى محدودية الزمن، والتي ظهر في وقت واحد مع الفضاء والمكان والمادة. تغيرت هذه النظرة في السنوات الأخيرة. عندما وُلد الكون، كان يتركز في منطقة صغيرة جداً لدرجة أن قوانين فيزياء الكم يجب أن تنطبق عليها هي الفردة الكمومية. النسبية العامة، التي ليست نظرية كمومية، لم تعد صالحة على مقياس الانفجار العظيم. من المرجح أن تتولى نظرية الأوتار، التي تطورت منذ حوالي ثلاثين عاماً، زمام الأمور من خلال تقديم وصف كمومي للجاذبية أو الثقالة. لقد جعل من الممكن مؤخراً تصميم نموذجين كونيين - نموذج ما قبل الانفجار العظيم والنموذج - ekpyrotic يصفان الكون قبل الانفجار العظيم. هذه السيناريوهات، حيث ليس للزمن بداية ولا نهاية، يمكن أن تترك أثراً يمكن ملاحظتها في الخلفية الكونية المنتشرة، والإشعاع المنبعث بعد وقت قصير من الانفجار العظيم والذي نكتشفه اليوم في شكل أحفوري ميكروي منتشر في السماء كلها. إن الاستعداد الأخير لمراعاة ما قد حدث قبل نشوء الكون ليس سوى أحدث التحولات الفكرية التي حدثت على مدى آلاف السنين. في جميع الثقافات، واجه الفلاسفة واللاهوتيون مسألة بداية الزمان وأصل العالم. تمر "شجرة عائلتنا" عبر الأشكال الأولى للحياة، وتشكيل النجوم، وتوليف العناصر الأولى، وتعود إلى الطاقة التي غمرت الفضاء البدائي. هل تستمر هكذا إلى الأبد أم أنها تتجذر في مكان ما؟ ناقش الفلاسفة اليونانيون مطولاً أصل الزمن. دافع أرسطو عن غياب البداية من خلال التذرع بالمبدأ القائل بأن لا شيء ينشأ من لا شيء. إذا كان الكون لا يمكن أن يولد من العدم، فلا بد أنه كان موجوداً دائماً. يجب أن يمتد الزمن إلى الأبد في الماضي وكذلك في المستقبل. اتخذ اللاهوتيون المسيحيون وجهة نظر معاكسة. أكد القديس أغسطينوس أن الله موجود خارج المكان والزمان وأنه قادر على خلقهما لأنه صاغ جوانب أخرى من العالم. ماذا كان الله يفعل وقتها قبل أن يخلق العالم؟ وفقاً للقديس أوغسطينوس، كان الزمن نفسه جزءاً من الخليقة الإلهية، ولم يكن هناك من قبل. تجانس غريب قادت نظرية النسبية العامة علماء الكونيات الحديثين إلى استنتاج مشابه جداً. ضمن هذا الإطار، المكان والزمان ليسا جامدين ومطلقين، لكنهما

ديناميكيان ومشوهان بتأثير المادة. في نطاقات المسافات الكبيرة، تتوسع منحنيات الفضاء أو تنقلص بمرور الوقت، مع الأخذ في الاعتبار ذلك. خلال عشرينيات القرن الماضي، بعد إدوين هابل، أكد علماء الفلك أن كوننا يتوسع: المجرات تبتعد عن بعضها البعض. ومن نتائج هذا التوسع أن الزمن لا يمكن أن يمتد إلى ما لا نهاية في الماضي. من خلال عرض فيلم التاريخ الكوني مقلوبًا، تقترب المجرات من بعضها البعض حتى تلتقي عند نقطة متناهية الصغر، تسمى التفرد أو الفردة. تم العثور على جميع المجرات - أو بالأحرى سلائفها - في حجم صفر. أصبحت الكثافة، ودرجة الحرارة لامتناهيتان، وكذلك انحناء الزمكان، لانهائي. التفرد أو الفردة هي الكارثة النهائية التي لا يمكننا بعدها متابعة علم الأنساب الكوني. يثير هذا الكشف العديد من الأسئلة. على وجه الخصوص، يبدو أنه غير متوافق مع حقيقة أن الكون يبدو متجانسًا، على نطاق واسع، في جميع الاتجاهات. لكي يبدو الكون متشابهًا من جميع النواحي، يجب إنشاء شكل من أشكال التفاعل بين المناطق البعيدة من الفضاء بحيث تتجانس خصائصها. لكن هذا يتناقض مع بيانات التوسع الكوني. تم إطلاق الضوء منذ 13.8 مليار سنة (هذه هي الخلفية الكونية المنتشرة التي لوحظت اليوم في مجال الإشعاعات الميكروية). في جميع الاتجاهات، هناك مجرات تفصل بينها أكثر من 13 مليار سنة ضوئية. إنها موجود. وهكذا، فإن المجرات، في اتجاهين متعاكسين، تفصل بينهما أكثر من 25 مليار سنة ضوئية. وبالتالي، لم تكن هذه المناطق على اتصال مطلقًا: لم يكن لديها الوقت الكافي لتبادل الضوء، ومن باب أولى. لا يمكن تجانس كثافتها ودرجة حرارتها وخصائص أخرى. ومع ذلك، فإن خصائص درب التبانة هي تقريبًا نفس خصائص هذه المجرات البعيدة. قد يكون هذا التجانس مصادفة. ومع ذلك، من الصعب الاعتراف بأن عشرات الآلاف من الأجزاء المستقلة في صورة الخلفية الكونية المنتشرة، متطابقة إحصائيًا، لها خصائص متطابقة منذ البداية. هناك تفسيران طبيعيين آخران: إما أن الكون كان في لحظاته الأولى أصغر بكثير مما يفترضه علم الكونيات الكلاسيكي، أو أنه أقدم بكثير. في كلتا الحالتين، يمكن أن يتفاعل جزءان بعيدان من السماء قبل انبعاث الإشعاع الكوني. الفرضية الأولى هي التي يفضلها علماء الفيزياء الفلكية. يقال إن الكون قد شهد فترة من التوسع المذهل والتضخم في بداية تاريخه. في السابق، كانت جميع مناطق الكون قريبة جدًا لدرجة أن خصائصها أصبحت متجانسة. ثم، خلال مرحلة التضخم، تسابق التوسع وتمدد الكون بشكل أسرع من الضوء. تم عزل الأجزاء المختلفة من الكون عن بعضها البعض. بعد جزء صغير من الثانية، انتهى التضخم وعاد التوسع إلى مسار هادئ. أعيد الاتصال بين المجرات تدريجيًا مع اشتعال الضوء مع التضخم. لتفسير هذا التوسع المحموم، أدخل الفيزيائيون مجال قوة جديدًا، وهو التضخم الفوري المفاجئ والهانئ *inflation*، والذي أنتج قوة جاذبية شديدة التنافر في اللحظات القليلة الأولى بعد الانفجار العظيم. على عكس الجاذبية، فإن الانتفاخات تسرع من التمدد. بعد جزء من الثانية بعد الانفجار العظيم، احترق، وذهبت القوة الطاردة، وسيطرت الجاذبية. هذه النظرية، التي اقترحها الفيزيائي آلان غوث عام 1981، ساعدت في تفسير عدد كبير من الملاحظات. ومع ذلك، لا تزال هناك بعض الصعوبات النظرية، بدءًا من طبيعة التضخم. الفرضية الثانية لحل المشكلة كانت أقل تقليدية: فهي تفترض أن الكون أقدم بكثير مما كان متوقعًا. إذا لم يبدأ الزمن بالانفجار العظيم، وإذا كانت هناك حقبة طويلة سبقت بداية فترة التوسع الحالية، فإن الكون لديه متسع من الوقت للتجانس. مثل هذا السيناريو يقضي على الصعوبة التي تفرضها التفردية التي تنشأ عندما يريد المرء أن يوسع النسبية العامة إلى ما وراء مجال تطبيقها. في الواقع، مع اقتراب الانفجار العظيم، فإن حصر المادة ينوه بأنه يجب أن تكون التأثيرات الكمومية هي المهيمنة، والنسبية لا تأخذ ذلك في الحسبان. لمعرفة ما حدث بالفعل، يجب على الفيزيائيين استبدال النسبية العامة بنظرية الكم للجاذبية. كان المنظرون يعملون على هذا منذ عهد أينشتاين، دون إحراز تقدم كبير حتى منتصف الثمانينيات انبثقت رؤيتان للبدائية. في كوننا المتسع، تهرب المجرات من بعضها البعض بسرعة تتناسب مع المسافة بينها: تفصل المجرات التي تفصل بينها 500 مليون سنة ضوئية ضعف سرعة المجرات التي تبعد 250 مليون سنة ضوئية. سنوات ضوئية. نتيجة لذلك، يجب أن تكون كل المجرات قد بدأت من نفس النقطة في نفس

الوقت: هذا هو الانفجار العظيم. يظل هذا الاستنتاج ساريًا على الرغم من أن توسع الكون قد شهد فترات من التسارع أو التباطؤ. ومع ذلك، يصبح الموقف غير مؤكد عندما نفكر في اللحظة الدقيقة التي بدأت فيها المجرات (أو بالأحرى سلائفها) في تحليقها. كما جاء في كتاب صموئيل فيلاكو "الأوتار ترتد اليوم". هناك نهجان يبدوان واعدان، الأول، الجاذبية الكمومية الحلقية، حيث يحتفظ بجوهر النسبية - الطبيعة الديناميكية للزمان والفضاء فيما يتعلق بنظام الإحداثيات المستخدم - ويضع هذه المبادئ موضع التنفيذ في إطار الفيزياء الكمومية. يتكون الزمكان الناتج من قطع صغيرة غير قابلة للكسر. في السنوات الأخيرة، خطت جاذبية الانعراج الكمومي خطوات كبيرة، لكنها قد لا تكون جذرية بما يكفي لحل جميع المشكلات التي يطرحها قياس الجاذبية. الطريقة الثانية، التي تستند إليها السيناريوهات المعروضة هنا، هي نظرية الأوتار الفائقة. ظهرت مسودتها الأولى عام 1968 في نموذج اقترحته لوصف تفاعلات مكونات نواة الذرة. لم يتم إحيائها حتى الثمانينيات لتصبح نظرية مرشحة لتوحيد النسبية العامة مع نظرية الكم. ومفكرتها الأساسية هي أن المكونات الأساسية للمادة ليست دقيقة، ولكنها ذات بعد واحد، مثل الأوتار بدون سمك. تهتز هذه الأوتار مثل تلك الموجودة في آلة الكمان، وتعكس مجموعة الجسيمات الهائلة، ولكل منها خصائص مميزة، أنماط الاهتزاز المختلفة. تسمح قوانين الكم لهذه الأوتار المهتزة عديمة الكتلة لوصف الجسيمات وتفاعلاتها، وهي تبرز خصائص جديدة ذات آثار عميقة على علم الكونيات. أولاً، تجبر التأثيرات الكمومية الأوتار على أن تكون بطول 10^{-34} مترًا على الأقل. هذا الكم من الطول غير القابل للاختزال، والمشار إليه بـ l_p ، هو ثابت جديد في الطبيعة، إلى جانب سرعة الضوء وثابت بلانك. في نظرية الأوتار، يلعب دورًا حاسمًا من خلال فرض قيود محدودة على الكميات التي لولاها ستصبح صفرًا أو لانهاية. ثانيًا، تتوافق طاقة أنماط معينة من اهتزاز الأوتار مع كتل الجسيمات. علاوة على ذلك، تمنح هذه الاهتزازات الأوتار لحظة أو دورانًا ذاتيًا المعروف باسم السبين $spin$. يمكن أن تكتسب الأوتار عدة وحدات سينية مع بقاء كتلة صفرية: فهي قادرة على تمثيل البوزونات، وهي جزيئات تمثل رسائل للقوى الأساسية (مثل الفوتون للكهر ومغناطيسية). تاريخيًا، من خلال اكتشاف أنماط اهتزاز السبين التي تساوي اثنين، والتي تم تحديدها مع الجسيم المفترض أن تنقل تفاعل الجاذبية، الغرافيتون، لمُح الفيزيائيون اهتمام نظرية الأوتار لتقدير الجاذبية. ثالثًا، تكون معادلات نظرية الأوتار متسقة فقط إذا كان للفضاء تسعة أبعاد بدلاً من الثلاثة المعتادة، والأبعاد المكانية الستة الإضافية يتم لفها على مسافات صغيرة جدًا حول نفسها. رابعًا، الثوابت التي تصف شدة القوى الأساسية، مثل ثابت الجاذبية أو الشحنة الكهربائية، لم تعد ثابتة اعتباطًا، لكنها تظهر في نظرية الأوتار كحقول تتغير قيمها بمرور الوقت. يلعب أحد هذه المجالات، وهو الامتداد، دورًا خاصًا: فهو يحدد تطور المجالات الأخرى، أي شدة جميع التفاعلات. خلال العصور الكونية المختلفة، ربما عرفت "ثوابت" الفيزياء اختلافات طفيفة. يسعى علماء الفيزياء الفلكية الآن إلى قياسها من خلال مراقبة الكون البعيد. عندما يروض التناظر اللانهائي أخيرًا، كشفت الأوتار عن وجود تناظرات جديدة للطبيعة، ثنائيات، والتي تحول بشكل جذري فهمنا الحدسي لسلوك الأشياء في المقاييس الصغيرة للغاية. أحد هذه التناظرات، T -duality، يربط الأبعاد الإضافية الصغيرة والكبيرة. يرتبط هذا التناظر بأكبر مجموعة متنوعة من الحركات الممكنة للأوتار، مقارنة بجسيمات النقطة. فكر في حبل مغلق (حلقة) يتحرك في فراغ ثنائي الأبعاد، أحدهما مطوي في دائرة صغيرة. هذه المساحة تعادل مساحة الأسطوانة. بالإضافة إلى الاهتزاز، يمكن أن يتحرك الخيط على السطح، ولكن أيضًا يلتف حول الأسطوانة مرة واحدة أو أكثر، مثل شريط مطاطي يحمل ملصقًا ملفوفًا. تساهم الاهتزازات والحركة واللف في الطاقة الكلية للحبل. تعتمد طاقة الوضعين الأخيرين على حجم الأسطوانة. تتناسب طاقة اللف مع نصف قطر الأسطوانة: فكلما زاد حجمها، يجب أن يتم شد الحبل للرياح، بحيث يخزن المزيد من الطاقة. من ناحية أخرى، على طول البعد الملفوف، ينتج عن إزاحة الوتر طاقة تتناسب عكسيًا مع نصف القطر: فكلما كانت الأسطوانة أكبر، كلما تحرك الخيط هناك "بهدوء" (علاقات عدم التحديد تمنع ميكانيكا الكموم الجسيم المحدد بدقة من أن يكون في حالة سکون، وبالتالي فإن الجسيم

المحصور يتحرك بسرعة عالية، بينما يتحرك الجسم الذي يكون موضعه غير مقيد "بهدهوء" أكثر). في أسطوانة أضيق، يتطلب لف الحبل طاقة أقل، بينما تكون الحركة أكثر تقطعاً وتعطي طاقة أكبر للنظام. إذا قمنا بتبادل أسطوانة من نصف قطر معين R مع أسطوانة ذات نصف قطر عكسي $1/R$ (الوحدة هي الحد الأدنى لطول الأوتار)، يتم تبادل سلسلة حالات الطاقة الناتجة عن الوضعين، لكن مجموعة الحالات لا تزال متطابقة. بالنسبة للمراقب الخارجي، فإن الأبعاد الملفوفة الكبيرة تكون مكافئة فيزيائياً للأبعاد الصغيرة ذات نصف القطر المعاكس. نظرية الأوتار والازدواجية. يمكن أن تصف نظرية الأوتار ما حدث في وقت الانفجار العظيم. إنها تعتبر أشياء تشبه أوتار الكمان الرفيعة للغاية. عن طريق تحريك الأصابع، يقوم عازفو الكمان بتقصير الأوتار وزيادة تردد اهتزازاتها. ستمنعهم التأثيرات الكمومية من الذهاب إلى ما دون الحد الأدنى للطول، وهو 10^{-34} متراً. نظراً لأنواع الحركات المختلفة التي يمكن أن يؤديها الوتر، فإن المساحة التي تكون أبعادها الإضافية كبيرة (مقارنة بـ 10^{-34} متراً) لا يمكن تمييزها عن تلك التي تكون فيها هذه الأبعاد صغيرة. خذ بعين الاعتبار مساحة أسطوانية ثنائية الأبعاد. بالإضافة إلى الاهتزاز والتحرك ككتلة، يمكن أن يلتف الخيط مثل شريط مطاطي حول الأسطوانة. تمنع علاقات الاحتمالية الكمومية السلسلة من أن يكون لها موقع دقيق وسرعة صفرية: يتحرك جسم محصور في مساحة صغيرة بشكل محموم. إذا كان محيط الأسطوانة صغيراً، فإن حركات الحبل حول الأسطوانة تتأرجح: الطاقة المرتبطة بعمليات الإزاحة عالية (أ). من ناحية أخرى، فإن الحبل الملفوف ليس ضيقاً جداً: يوفر الملف القليل من الطاقة (ب). إذا زاد نصف قطر الأسطوانة، فإن احتياج الخيط يكون أقل وكل حركة تجلب كمية صغيرة من الطاقة (ج)، بينما يؤدي لف الخيط إلى توتر عالٍ وبالتالي طاقة عالية (د). بالنسبة لأسطوانتين مع مكابح عكسية R و $1/R$ ، تظل الطاقة الإجمالية - الكمية الوحيدة التي يمكن ملاحظتها - كما هي. تمنع هذه الخاصية الفضاء من الانهيار عند نقطة ما والوصول إلى حالة من الكثافة اللانهائية. يسهل فهم T-duality في سياق المساحات ذات البعد الدائري للحجم المحدود، ولكنها تنطبق أيضاً على الأبعاد الثلاثة اللانهائية للفضاء العادي. ليس حجم المساحة المأخوذة ككل هو المهم، ولكن عامل الحجم الخاص بها، والعلاقة بين تباعد الكائنات التي احتوتها في تاريخ معين وبعدها الحالي. وفقاً لـ T-duality، فإن الكون الذي يكون فيه عامل المقياس صغيراً جداً يعادل كوناً يكون فيه عامل المقياس كبيراً. مثل هذا التناظر غير موجود في النسبية العامة. إنه يأتي من الإطار الموحد لنظرية الأوتار. لسنوات، اعتقد منظرو الأوتار أن T-duality تنطبق فقط على الأوتار المغلقة. في عام 1995، أظهر جوزيف بولشينسكي، من جامعة سانتا باربرا، أنه لا يزال صالحاً للأوتار المفتوحة، وفقاً لشروط تسمى Dirichlet، في نهاياتها: بالإضافة إلى عكس نصف قطر الأبعاد الملفوفة، فإننا يجب أن نثبت نهايات الحبال في عدد من الأبعاد. وبالتالي، يمكن أن تطفو أطراف الحبل بحرية في ثلاثة من الأبعاد المكانية العشرة بينما يتم حظر حركتها في الأبعاد السبعة الأخرى. تشكل هذه الأبعاد الثلاثة الحرة فضاءً فرعياً يسمى الغشاء أو D-brane. في عام 1996، تخيل بيتر هورافا من جامعة روتجرز وإدوارد ويتن من معهد برينستون للدراسات المتقدمة أن كوننا يقيم على غشاء D-brane ثلاثي الأبعاد. تفسر الحركة الجزئية للإلكترونات والجسيمات الأخرى سبب عدم قدرتنا على إدراك الأبعاد العشرة للفضاء. تشير جميع خصائص الأوتار إلى نفس الشيء: الأوتار تكره اللانهائية. وبما أنه لا يمكن اختزالها إلى حد ما، فإنها تقضي على المفارقات التي سببها هذا الانهيار. يفرض حجمها غير الصفري والتماثلات الجديدة المرتبطة بها حدوداً عليا على الكميات الفيزيائية التي تزيد إلى أجل غير مسمى في النظريات الكلاسيكية، وحدوداً أقل على الكميات المتناقضة. عندما تعرض فيلم التاريخ الكوني مقلوباً، ينقل الزمكان وينقل نصف قطر الانحناء من جميع الأبعاد. وفقاً لمنظري الأوتار، تمنع T-duality نصف قطر الانحناء من التناقص إلى الصفر والتسبب في تفرد الانفجار الكبير القياسي. بعد الوصول إلى الحد الأدنى من الطول الممكن، يصبح هذا الانكماش مكافئاً مادياً لتمدد الفضاء، حيث يبدأ نصف قطر الانحناء في الزيادة مرة أخرى. إن الازدواجية "T" ترتد من الانهيار، الذي يصبح توسعاً إضافياً. انقلب الكون مع زوال التفرد، لا

شيء يمنعنا من تخيل وجود الكون قبل الانفجار العظيم. من خلال الجمع بين التناظرات التي قدمتها نظرية الأوتار مع التناظر الانعكاسي للزمن، والذي وفقاً له تعمل معادلات الفيزياء بشكل غير مبالٍ عند تطبيقها على المستقبل أو الماضي، ابتكر الباحثون علم الكون الجديد، حيث إن الانفجار العظيم ليس بداية الزمن، ولكنه مجرد انتقال عنيف بين حالتين من الكون: قبل ذلك، يتسارع التوسع، وبعد ذلك، يتباطأ. تتمثل ميزة هذا التصميم في أنه يدمج تلقائياً أفكار النموذج التضخمي، أي وجود فترة تضخم متسارع قادر على تبرير تجانس الكون. في النظرية المعيارية، يحدث التسارع بعد الانفجار العظيم بسبب الانفجار. في علم الكون من الأوتار، يحدث التسارع قبل الانفجار العظيم وينتج عن تناظرات النظرية. الظروف المحيطة بالانفجار العظيم شديدة لدرجة أنه لا يمكن لأحد حل المعادلات التي تصفها. ومع ذلك، تجرأ منظرو الأوتار على وصف جوانب الكون قبل الانفجار العظيم. نموذجان قيد الدراسة حالياً. الأول، المعروف باسم سيناريو ما قبل الانفجار العظيم، يفترض أن الكون ما قبل الانفجار العظيم هو صورة معكوسة لكون ما بعد الانفجار العظيم. يتوسع الكون إلى الأبد في المستقبل كما في الماضي. منذ فترة طويلة إلى ما لا نهاية، كانت فارغة تقريباً وتحتوي فقط على غاز مخلٍ من الإشعاع والمادة. كانت قوى الطبيعة، التي يتحكم فيها الديتاتون، ضعيفة لدرجة أن جزيئات هذا الغاز بالكاد تتفاعل. بمرور الوقت، تكثفت القوى وتبدأ المادة تتجمع. تراكمت في بعض المناطق على حساب جيرانها. أصبحت الكثافة هناك بحيث تشكلت الثقوب السوداء. تم عزل المادة المحصورة بالداخل وانقسم الكون إلى أجزاء منفصلة. داخل كل ثقب أسود، كانت كثافة المادة أعلى دائماً. عندما وصلت الكثافة ودرجة الحرارة والانحناء إلى القيم القصوى التي تسمح بها نظرية الأوتار، "ارتدت" هذه الكميات وبدأت في الانخفاض. الانفجار العظيم إذن ليس سوى اللحظة التي حدث فيها هذا الانعكاس. أصبح الجزء الداخلي من أحد هذه الثقوب السوداء كوننا. يقول صموئيل فيلاكو إن تصادم الأغشية كان سيناريو ما قبل الانفجار العظيم، الذي اقترحه مع زملائي في عام 1991، أول محاولة لتطبيق نظرية الأوتار على علم الكونيات. لقد أثار الكثير من الانتقادات، ويبقى أن نرى ما إذا كانوا قد حددوا عيباً كبيراً. يُشار إلى النموذج الرئيسي الآخر الذي يصف الكون قبل الانفجار العظيم بأنه سيناريو ekpyrotic (من الكلمة اليونانية التي تعني حريق). تم تطوير هذا السيناريو منذ عام 2001 من قبل العالمين نيل توروك، من جامعة كامبريدج، وبول ستينهاردت من جامعة برينستون، ويستند هذا السيناريو إلى فكرة أن كوننا سيكون عبارة عن غشاء D يطفو بالقرب من الآخر في مساحة ذات أبعاد أعلى. سوف تتصرف المسافة بين الأغشية مثل الزنبرك مما يتسبب في اصطدامها أثناء تقلصها. تتحول طاقة الصدمة إلى مادة وإلى إشعاع: هذا هو الانفجار العظيم. في أحد أشكال هذا السيناريو، تحدث الاصطدامات بشكل دوري. يلتقي غشاءان وينططان ويتفككان قبل أن يستقر أحدهما فوق الآخر وهكذا. بين هذه الاصطدامات، تتمدد الأغشية بشكل مستمر، باستثناء مرحلة من الانكماش قبل الصدمة مباشرة. يتباطأ التمدد عندما تتفكك الأغشية وتتسارع عندما تقترب مرة أخرى. إن مرحلة التسارع الحالية للتوسع الكوني، المكتشفة في السنوات الأخيرة من خلال مراقبة المستعرات العظمى البعيدة، قد تنذر بحدوث تصادم قادم. السيناريو ekpyrotic. إذا كان كوننا عبارة عن غشاء متعدد الأبعاد، وببساطة "غشاء"، يطفو في فضاء ذي أبعاد أعلى، فإن الانفجار العظيم كان سينتج عن اصطدام غشاءين متوازيين. قد تحدث اصطدامات بشكل دوري. تشترك سيناريوهات ما قبل الانفجار العظيم و Ekpyrotic في بعض السمات المشتركة. كلاهما يبدأ بكون ضخم وبارد وشبه فارغ، وكلاهما يكافح لشرح الانتقال بين مرحلتين ما قبل الانفجار العظيم وما بعده. رياضياتياً، يكمن الاختلاف الرئيسي بينهما في سلوك الديلاتون. في سيناريو ما قبل الانفجار العظيم، كانت قيمته منخفضة جداً في البداية، وبالتالي فإن القوى الأساسية ضعيفة، وتزداد حدتها تدريجياً. في السيناريو ekpyrotic، يكون الأمر عكس ذلك: يحدث الاصطدام عندما تكون شدة القوى في حدها الأدنى. أثار ضعف القوى هذا الأمل في تحليل الارتداد بنجاح باستخدام التقنيات التقليدية. لسوء الحظ، في المتغيرات الحالية، عندما تتجمع الأغشية حتى تتصادم، فإن البعد بينهما "ينهار" بحيث لا يمكن تجنب التفرد. هناك عقبة أخرى تتمثل في الضبط الدقيق للشروط

الأولية حتى نتمكن من حل المشكلات الكونية الكلاسيكية. على سبيل المثال، قبل حدوث الصدمة، يجب أن تكون الأغشية متوازية تقريبًا، وإلا فلن تؤدي إلى حدوث انفجار كبير متجانس بما فيه الكفاية. وبغض النظر عن المهمة الصعبة المتمثلة في دعم هذين السيناريوهين رياضياتيًا، يبحث الفيزيائيون بالفعل عن عواقب يمكن ملاحظتها. للوهلة الأولى، يثير النموذجان تكهنات ميتافيزيقية أكثر من نظريات فيزيائية. ومع ذلك، قد يكون للتفاصيل من حقبة ما قبل الانفجار العظيم عواقب ملحوظة، تمامًا مثل تلك الموجودة في عصر التضخم. السليبيات توفر هذه التقلبات الملحوظة في درجة حرارة واستقطاب إشعاع الخلفية الكونية المنتشر اختبارات تجريبية. يتم تفسير تقلبات درجات الحرارة على أنها السمة المميزة للموجات الصوتية التي انتشرت في البلازما البدائية خلال 380.000 سنة قبل انبعاث إشعاع الخلفية الكونية. يثبت انتظام هذه التقلبات أن الموجات الصوتية تم إنشاؤها في نفس الوقت. تقي جميع النماذج التضخمية ونماذج ما قبل الانفجار العظيم والنماذج ekpyrotic بهذا القيد وتجتاز الاختبار الأول. تتولد الموجات الصوتية في نفس الوقت عن طريق التقلبات الكمومية التي يتم تضخيمها خلال مرحلة التوسع المتسارع. علاوة على ذلك، يتنبأ كل نموذج بتوزيع زاوي محدد للتقلبات. تظهر الملاحظات أن اتساع تقلبات الحجم الزاوي الكبير ثابت، بينما يتم ملاحظة القمم على المقاييس الصغيرة. النموذج التضخمي يعيد إنتاج هذا التوزيع بشكل مثالي. أثناء الانتفاخ، يتغير انحناء الزمكان ببطء. وهكذا تتولد تقلبات ذات أحجام مختلفة في ظل ظروف مماثلة ويكون طيف التذبذب الأولي ثابتًا فيما يتعلق بالمقياس الزاوي. تنتج القمم الصغيرة الحجم عن تغير التقلبات الأولية في التاريخ اللاحق للكون. في علم الكونيات الوترية، يتغير انحناء الزمكان بسرعة كبيرة، مما يزيد من حجم التقلبات على نطاق صغير. ومع ذلك، هناك عمليات أخرى تعوض عن هذه الظاهرة: في السيناريو ekpyrotic، ينتج عن تقلص الأغشية طيف تذبذب ثابت الحجم؛ في نموذج ما قبل الانفجار العظيم، يتدخل مجال كمومي يسمى curvaton أيضًا، في الوقت الحالي، تتوافق النماذج الثلاثة مع الملاحظات الرصدية. تبدو مراقبة الكون ما قبل الانفجار العظيم مستحيلة إلى الأبد. ومع ذلك، بقي شكل من أشكال الإشعاع من هذه الفترة: موجات الجاذبية. يمكننا اكتشاف تأثيرها على استقطاب الخلفية الكونية المنتشرة. تتنبأ سيناريوهات ما قبل الانفجار الكبير وسيناريوهات ekpyrotic بموجات جاذبية عالية التردد، وترددات منخفضة أقل من نموذج التضخم. لا تستطيع الملاحظات الرصدية الحالية فصل هذه النماذج، لكن قياس استقطاب الخلفية الكونية المنتشرة بواسطة القمر الصناعي بلانك، منذ عام 2007، ومن المفترض أن تساعدنا ملاحظات كاشفات الجاذبية VIRGO و LIGO. © ناسا (محاكاة)؛ غابرييل فينيزيانو (رسم) يوفر استقطاب الخلفية الكونية المنتشرة اختبارًا آخر. على عكس النماذج الأخرى، يتنبأ سيناريو التضخم بأن موجات الجاذبية ساهمت في تقلبات درجات الحرارة. قد تترك بعض موجات الجاذبية هذه بصمة في استقطاب إشعاع الخلفية الكونية. يمكن للملاحظات من القمر الصناعي Planck التابع لوكالة الفضاء الأوروبية الكشف عن هذا التوقع، إذا كان موجودًا. إن اكتشافه سيشكل حجة قوية للتضخم. تحليل الخلفية الكونية ليس الطريقة الوحيدة لاختبار هذه النظريات. يتنبأ سيناريو ما قبل الانفجار العظيم بانبعاث موجات الجاذبية، والتي سيكون بعضها متاحًا لكاشفات موجات الجاذبية مثل VIRGO. علاوة على ذلك، نظرًا لأن سيناريوهات ekpyrotic وما قبل الانفجار الكبير تتضمن اختلافات في الـ dilaton التمدد، المرتبط بالمجال الكهرومغناطيسي، فإنهم يتوقعون وجود تقلبات مجال مغناطيسي واسعة النطاق. يمكن العثور على بقايا هذه التقلبات في المجالات المغناطيسية للمجرة. متى بدأ الزمن؟ لم يجيب العلم بعد على هذا السؤال، لكن لديه على الأقل نظريتان قابلتان للاختبار تدعي بشكل معقول أن الكون - وبالتالي الزمن - كان موجودًا قبل الانفجار العظيم. إذا كان أي من هذين السيناريوهين صحيحًا، فهذا يعني أن الكون موجود دائمًا.

قد تساعدنا دراسة الثقوب السوداء العميقة على معرفة ماذا كان يوجد قبل الانفجار العظيم.

الثقوب السوداء: كيف تحل مفارقة المعلومات؟ في حين أن جائزة نوبل في الفيزياء قد كافأت للتو ثلاثة متخصصين في الثقوب السوداء، فإن هذه الأجسام الغريبة لا تزال تثير أسئلة مهمة. على وجه الخصوص، سوف تدمر الثقوب السوداء المعلومات المرتبطة بالمادة التي يبتلعونها، والتي ستكون مخالفة لقوانين فيزياء الكموم. مفارقة أن الملاحظات الجديدة يجب أن تساعد في تبديدها. الثقب الأسود والمعلومات معضلة دائمية فكيف يبدو الثقب الأسود حقاً؟ يتعارض وصفها الكلاسيكي، الذي قدمته النسبية العامة، مع بعض المبادئ الأساسية لميكانيكا الكموم. على وجه الخصوص، يشكل مصير المعلومات مشكلة خطيرة. لأول مرة، في 10 أبريل 2019، شاهدت البشرية صورة ثقب أسود حقيقي. باستخدام مجموعة من التلسكوبات الراديوية الأرضية التي تعمل معاً، قام فريق برنامج Event Horizon Telescope (EHT) بإنشاء لقطة لثقب أسود كتلته 6.5 مليار شمسي يترصد في مركز المجرة القريبة M87. هذا عمل محير للعقل: لقد تم التنبؤ بوجود الثقوب السوداء منذ فترة طويلة، لكن هذه الأجسام الغامضة لم يتم "رصدها" بشكل مباشر. وهذا الأداء لا يتعلق فقط بالحصول على لقطة. ستعطينا هذه الصورة والملاحظات القادمة أدلة لكشف أحد أعظم ألغاز الثقوب السوداء وجميع الفيزياء. هذا اللغز هو تناقض حول مصير المعلومات في الثقب الأسود. من خلال دراسة هذا السؤال، اكتشف الفيزيائيون أن مجرد وجود الثقوب السوداء يتعارض مع قوانين فيزياء الكموم، والتي تصف حتى الآن بنجاح بقية الكون. لحل هذا التناقض، قد يكون من الضروري إجراء ثورة مفاهيمية عميقة مثل تلك التي أدت إلى ظهور ميكانيكا الكموم. أنشأت شبكة Event Horizon Telescope أول صورة لثقب أسود حقيقي اكتشف المنظرون العديد من السبل، لكن ليس لديهم سوى القليل جداً من الأدلة المباشرة لمساعدتهم على حل هذه المشكلة. ومع ذلك، فإن الصورة الأولى للثقب الأسود تمثل بداية فترة مثيرة، والتي ترى وصول بيانات حقيقية لتوجيه أفكارنا. ستوفر الملاحظات المستقبلية من EHT، ولا سيما تلك التي من المحتمل أن تظهر تطور الثقوب السوداء بمرور الوقت، والاكتشافات الأخيرة لتصادم الثقوب السوداء بفضل مرصد موجات الجاذبية LIGO و Virgo، رؤى حاسمة. وسيمهد الطريق لعصر جديد من الفيزياء. المعلومات المفقودة أو المحتفظ بها؟ ملاحظات EHT واكتشافات موجات الجاذبية هي أحدث دليل مباشر على وجود الثقوب السوداء. ومع ذلك، فإن هذه الأشياء تتعارض مع الأسس الحالية للفيزياء. من المفترض أن تنطبق مبادئ فيزياء الكموم على جميع الكائنات في الطبيعة، ولكن عندما نستخدمها لوصف الثقوب السوداء، فإننا نواجه تناقضات، والتي تسلط الضوء على خلل في الشكل الحالي لهذه القوانين. تتنبع المشكلة من أحد أبسط الأسئلة التي يمكن لأي شخص طرحها حول الثقوب السوداء: ماذا يحدث للمادة التي تقع فيها؟ نحن نعلم من القوانين الحالية لفيزياء الكموم أن المادة والطاقة يمكنهما تغيير الشكل. يمكن للجسيمات، على سبيل المثال، أن تتحول إلى جزيئات أخرى. لكن هناك شيئاً واحداً مقدساً ولا يتم تدميره أبداً: المعلومات الكمومية، أي معلومات حول حالة النظام الكمومي. إذا كنا نعرف تمامًا الحالة الكمومية لمثل هذا النظام، فلا يزال بإمكاننا تحديد حالته السابقة أو المستقبلية بدقة دون فقدان المعلومات. إذن، السؤال الأكثر تحديداً هو: ماذا يحدث للمعلومات الكمومية التي تقع في الثقب الأسود؟ إن كشف موجات الجاذبية يفتح نافذة جديدة على الكون. يأتي فهمنا للثقوب السوداء من النظرية النسبية العامة لألبرت أينشتاين، التي تصف الجاذبية بأنها مظهر من مظاهر انحناء الزمكان. غالباً ما يتم تصور هذه الفكرة من خلال كرة تشوه سطح الترامبولين. مسار الأجسام الضخمة والانحناءات الضوئية بعد تشوه الزمكان، وهذا ما يسمى الثقالة أو "الجاذبية". وإذا تراكمت كتلة كافية في مساحة صغيرة بما يكفي، فإن تشوه الفضاء المحيط يكون كبيراً جداً لدرجة أنه حتى الضوء لا يستطيع الهروب. المنطقة التي لم يعد من الممكن، حتى للضوء، الهروب منها تشكل "ثقباً أسود". يحدها ما يسمى "أفق الحدث". وبما أنه لم يكن هناك شيء لا يمكنه السفر أسرع من الضوء (بما في ذلك المعلومات)، لذلك يجب أن يظل كل شيء محاصراً داخل هذه الحدود. وبالتالي فإن الثقوب السوداء هي فجوات كونية تسجن المعلومات تماماً مثل الضوء والمادة. الصورة الأولى لثقب أسود في عام 2019، أنشأ فريق Event Horizon Telescope (تثبيت

افتراضي يعتمد على تلسكوبات راديو متعددة حول العالم تقوم بمزامنة ملاحظاتهم) صورة للثقب الأسود الهائل في وسط المجرة M87 (على اليسار). إنه بالتحديد ظلها ، الضوء الذي ينبعث من المادة الساخنة جدًا لقرص التراكم. معادلات النسبية العامة تجعل من الممكن التنبؤ بالشكل الدقيق لهذا الظل. لذلك يمكننا استخدام هذه الصورة لاختبار هذه النظرية وربما إبراز بعض الحالات الشاذة. أثبتت الصورة أنها متوافقة مع النسبية العامة. في دراسة جديدة ، اتخذ الفريق الإستراتيجية المعاكسة: لقد أخذوا في الاعتبار مجموعة متنوعة من النظريات التي تعدل النسبية العامة وفحصوا ما إذا كانت تنبؤات المحاكاة (على اليمين) متوافقة مع الصورة الحقيقية. تضع هذه الدراسة قيودًا أكثر شدة بمقدار 500 مرة.

هوكينغ والثقوب السوداء:

طريق جديد لمشكلة المعلومات هل تدمر الثقوب السوداء بشكل لا يمكن إصلاحه المعلومات التي تحملها المادة التي تبتلعها، بما يتعارض مع مبادئ فيزياء الكموم؟ ظل هذا التناقض يمثل تحدياً لعلماء الفيزياء لأكثر من 40 عاماً. يقدم ستيفن هوكينغ وأندرو سترومينجر ومالكولم بيرري مهلة جديدة لحلها. الثقب الأسود Gargantua من فيلم Interstellar هل المعلومات التي تحملها المادة التي تسقط في ثقب Gargantua الأسود في فيلم Interstellar مفقودة نهائياً؟ يقترح ستيفن هوكينغ وزملاؤه طريقة جديدة لحل هذا التناقض [Shutterstock.com/Anuchit kamsongmueang](https://www.shutterstock.com/anuchit_kamsongmueang). ماذا يحدث لرسالة تلقيتها في ثقب أسود؟ وفقاً لنظرية النسبية العامة ، عندما يتجاوز نصك حداً معيناً ، وهو أفق حدث الثقب الأسود ، فلن يتمكن أبداً من الخروج ، حتى لو كان يتحرك بسرعة الضوء. يبدو أنه ضائع بالتأكيد ... ولكن في السبعينيات ، أصبح ستيفن هوكينغ مهتماً بالتأثيرات الكمومية التي تظهر بالقرب من أفق الحدث وأثبت أنه على الرغم من مبادئ النسبية العامة ، فإن انخفاض الإشعاع لا يزال يهرب من الثقب الأسود. بعبارة أخرى ، "يتبخر" ، وكل المواد التي نشأت أو سقطت في الثقب الأسود تخرج في النهاية كإشعاع. لذا ، هل يمكننا استعادة رسالتنا؟ للأسف ، فإن الإشعاع الذي تنبأ به ستيفن هوكينغ هو إشعاع الجسم الأسود (على غرار الإشعاع الحراري المنبعث من المعدن المسخن) ، والذي لا يحمل أي معلومات عن الجسم المنبعث بخلاف درجة حرارته. على وجه الخصوص ، لا يحمل إشعاع هوكينغ أي معلومات عن المادة التي سقطت في الثقب الأسود. في النهاية ، تبدو رسالتنا ضائعة بشكل ميؤوس منه. ومع ذلك ، فإن مثل هذا الاستنتاج يتعارض بشكل مباشر مع مبادئ فيزياء الكموم: يمكن تحويل المعلومات ، لكنها لا تضيع أبداً. لا يزال من الممكن نظرياً إعادة بناء الرسالة الأولية. كيف نحل هذا التناقض؟ اكتشف الفيزيائيون الذين تصارعوا مع هذه المشكلة لمدة 40 عاماً أكثر الجوانب المدهشة للفيزياء النظرية، مناشدين مفاهيم غريبة مثل "مبدأ التصوير المجسم" أو "جدار النار". يقترح الآن ستيفن هوكينغ، إلى جانب مالكولم بيرري من جامعة كامبريدج بالمملكة المتحدة وأندرو سترومينجر من جامعة هارفارد بالولايات المتحدة، حلاً جديداً. الثقوب السوداء هي نوع من المختبرات الافتراضية للفيزيائيين، الذين يمكنهم اختبار نظرياتهم هناك. في الواقع، نظرًا لأنها تركز كتلة كبيرة في منطقة صغيرة جدًا، فإن هذه النجوم هي نقطة التقاء النسبية العامة وميكانيكا الكموم، وهما نظريتان لا يمكن التوفيق بينهما حتى الآن. قد تكون دراسة الثقوب السوداء هي المفتاح لبناء نظرية كمومية للجاذبية. إحدى العقبات بالتحديد هي مسألة فقدان المعلومات في الثقوب السوداء. في عام 1997، حقق الفيزيائي الأرجنتيني خوان مالداسينا إنجازاً مهماً. أظهر أن الإجراء الرياضي جعل من الممكن ترجمة نظرية تتضمن الجاذبية إلى نظرية مكافئة ولكن بدون جاذبية في فضاء ببعد واحد أقل. يسمى هذا الإجراء مبدأ مطابقة AdS / CFT أو مبدأ التصوير المجسم. على سبيل المثال، يمكن ترجمة نظام الثقب الأسود في الفضاء ذي الأبعاد الأربعة إلى نظام غاز ساخن من ذرات ثلاثية الأبعاد. الجوهر هنا هو أن هذه الصيغة الأخيرة تحكمها فقط فيزياء الكموم، والتي تضمن عدم فقدان المعلومات. أدى هذا النهج إلى استنتاج مفاده أنه لم يكن هناك فقدان للمعلومات في الثقب الأسود. أقنع هذا المنطق العديد من الباحثين، بما في ذلك ستيفن هوكينغ. الذي غير رأيه. يبقى أن نرى كيف تفلت

المعلومات التي سقطت في الثقب الأسود إذا كان إشعاع هوكينغ يعتمد فقط على درجة حرارته؟ تم اقتراح العديد من السبل، لكن لم يتم حل المشكلة بعد. يؤدي أحد أكثر المقاربات التي نوقشت في السنوات الأخيرة إلى مفارقة حاول جو بولتسينسكي حلها من خلال تقديم فكرة جدار النار: يصبح أفق الحدث مقرًا لانبعاث كبير للطاقة، ذات طبيعة مختلفة عن إشعاع هوكينغ. لكن حتى هذا النهج به عيوب. حدد ستيفن هوكينغ، في مؤتمر عقد في ستوكهولم في أغسطس 2015، فكرة رئيسية جديدة اكتشفها مع مالكولم بيرري وأندرو سترومينجر. مثل أي إعلان لستيفن هوكينغ، تلقى الكثير من التغطية الإعلامية، لكن الفيزيائيين كانوا ينتظرون لرؤية الحسابات لتقييم الوعود. ظهر المقال أخيرًا في أوائل يناير 2016 على موقع خادم ما قبل النشر arXiv. ظهرت الفكرة في قلب هذه الدراسة من العمل السابق لأندرو سترومينجر. كان مهتمًا بالتحويلات، المسماة الترجمة الفائقة، والتي تعمل في الزمكان. تمت دراسة هذه الترجمات أو التفسيرات الفائقة في وقت مبكر من عام 1962 من قبل الفيزيائيين إتش بوندي، إم فان دير بورغ، إيه ميتزرنر وأر. ساكس، وبشكل مختلف من قبل ستيفن واينبرج في عام 1965. نتيجة لهذه الترجمة الفائقة هو ظهور ما يسمى بالجسيمات الغرافيتونات اللينة والفوتونات اللينة، وكلها ذات طاقة صفرية ولكنها تتميز عن بعضها بعزم زاوية مختلفة. وبالتالي، فإن أدنى حالة طاقة ("فراغ") لنظام مادي ليست فريدة من نوعها، فيمكن ملؤها بهذه الجسيمات اللينة ذات الطاقة الصفرية، مما يؤدي إلى تعدد الفراغات الممكنة. وهي تتميز بالزخم الزاوي للجزيئات اللينة التي تحتويها. عندما طبق أندرو سترومينجر هذه النتيجة على ثقب أسود يتبخر تمامًا، أدرك أنه في هذه الحالة أيضًا، فإن الفراغ الذي تم الحصول عليه ليس فريدًا ويعتمد على محتوى الجسيمات اللينة، وهي معلومات ثورية بحد ذاتها. هذا يفتح الطريق للحفاظ على المعلومات حتى لو تبخر الثقب الأسود تمامًا. بالإضافة إلى ذلك، قوضت الترجمة الفائقة مبدأ آخر مرتبطًا بالثقوب السوداء. عادة ما يتميز هذا الجسم بثلاث معلمات فقط: كتلته وزخمه الزاوي وشحنه الكهربائي. ليس له أي خاصية أخرى، وهناك ثقبان أسودان متماثلان في الأحجام الثلاثة متشابهان تمامًا. أطلق على هذه النظرية اسم "نظرية الصلح". ومع ذلك، فإن الترجمة الفائقة تفرض الحفاظ على الكميات الإضافية حتى من خلال تبخر الثقب الأسود. لذلك سيكون لكل ثقب أسود خصائص إضافية، وبالتالي بعض أشكال المعلومات. تشير نتائج أندرو سترومينجر حول الترجمات الفائقة إلى وجود صلة بين تحولات الزمكان ومفارقة المعلومات. أراد ستيفن هوكينج ومالكولم بيرري وأندرو سترومينجر توضيح الآلية بناءً على هذه الترجمة الفائقة التي تضمن الحفاظ على المعلومات. لقد درسوا نموذجًا مبسطًا للترجمات الفائقة المطبقة على القوة الكهرومغناطيسية وحددوا تطبيقها في حالة الجاذبية، والتي تعتبر أكثر تعقيدًا من حيث الشكل الرسمي. وهكذا أظهر الباحثون أن الجسيمات اللينة يتم إنشاؤها في أفق الحدث للثقب الأسود ويسجلون المعلومات من كل جسيم يعبر الأفق يسقط في الثقب الأسود، وبالتالي ضمان الحفاظ على المعلومات. ومع ذلك، فإن هذا المسار لا يزال في مهده. أراد أندرو سترومينجر وزملاؤه، لاختبار نموذجهم، إعادة حساب الصيغة الشهيرة، إنتروبيا Bekenstein-Hawking، التي تربط إنتروبيا الثقب الأسود بمنطقة أفقه. حصل الباحثون الثلاثة على النتيجة الصحيحة باستثناء عامل الضرب. هذا أمر مشجع، لكن يبقى أن نرى سبب عدم اكتمال النتيجة. في مقابلة مع مجلة Scientific American، يشير أندرو سترومينجر إلى أنه يعتقد أن الترجمة الفائقة ليست سوى جزء من الآلية التي تعمل، ويجب علينا أيضًا التفكير في التناوب الفائق، وهو نوع آخر من التحول الذي لم يدرسه الباحثون إلا منذ ذلك الحين قبل عشر سنوات. وبالتالي، لا تزال هناك مناطق رمادية ونقاط فنية يجب تحديدها في نموذجهما. لكن العديد من علماء الفيزياء يتفقون بالفعل على أن هذا الطريق الجديد مثير للاهتمام ويستحق الاستكشاف ...