

الحتمية والإرادة الحرة بين العلم والدين (5-3)

د. جواد بشارة

نماذج بديلة غير صالحة للطاقة المظلمة أو المعتمدة:

أدت القياسات الدقيقة المتزايدة لثابت هابل إلى إبطال بعض نماذج الطاقة المظلمة البديلة التي تفسر التسارع الظاهري للكون بفراغ عملاق.

في عام 1998، اكتشفنا أن تمدد الكون يبدو أنه يتسارع، على الرغم من وجود المادة التي كان من المفترض أن تبطئه بسبب تأثير الجاذبية. يفسرها النموذج القياسي لعلم الكونيات بواسطة شكل غامض من الطاقة البغيضة، السوداء أو المعتمدة. وهو تفسير يُدعى نقص الطاقة المظلمة بشكل أفضل، والذي سيملاً كل المساحة. تخيل فرضية بديلة أن التسارع سيكون نوعاً من الوهم البصري الناتج عن معدلات التمدد المختلفة وفقاً للمناطق، بسبب التوزيع غير المتجانس للمادة؛ وبالتالي، وفقاً لنماذج معينة، ستكون مجرتنا ومحيطها في مركز منطقة شاسعة خالية نسبياً، حيث، بسبب نقص المواد، سيكون التمدد أقل تباطؤاً من أي مكان آخر. من خلال القياسات الدقيقة لمعدل تمدد الكون، أو ثابت هابل، الذي تم بفضل التلسكوب الذي يحمل نفس الاسم، قام فريق بقيادة آدم ريس، من جامعة جون هوبكنز، في بالتيمور، بإبطال جزء من هذه المسلمات.

لتقييم ثابت هابل، نستخدم انفجارات نجوم معينة، ما يسمى بالمستعرات الأعظم من النوع Ia. يعتمد المرء على وجه الخصوص على العلاقة بين بعدهم والتحول نحو الأحمر من الضوء (أي إطالة طول موجته بسبب التوسع). ثم ينتج الكسب في الدقة على ثابت هابل من قياس أفضل للمسافات.

تتمثل ميزة المستعرات العظمى السوبرنوفات من النوع Ia في أن لمعانها الداخلي مرتبط بشكل منحنى للمعانها (يمثل الحد الأقصى لبضعة أسابيع، ثم ينخفض في غضون بضعة أشهر). وهكذا يمكننا أن نعرف لمعانهم الجوهري، ثم نستنتج بعدهم عن اللمعان الواضح الذي تم التقاطه من الأرض.

يتم تحديد العلاقة التجريبية التي تربط مسافة السوبرنوفات وشكل منحنى لمعانها بفضل النجوم الموجودة في نفس المجرة والتي نعرف بعدها في مكان آخر: السيفيد cepheids. يختلف سطوع هذه النجوم مع فترة تتعلق بأقصى سطوع لها، وبالتالي، من خلال سطوعها الواضح، والمسافة الخاصة بها، مرة أخرى وفقاً لعلاقة يجب معايرتها (هذه المرة نستخدم طريقة هندسية تسمى اختلاف المنظر لتحديد المسافة). من خلال مراقبة عدد كبير من المستعرات الأعظم والأصفر بفضل الكاميرا الميدانية الواسعة WFC3 (كاميرا المجال الواسع 3)، جعل تلسكوب هابل من الممكن، من جهة، تحسين العلاقة بين فترة التباين واللمعان الداخلي للسيفيد cepheids، ومن ناحية أخرى، بين اللمعان الداخلي وشكل منحنى اللمعان من النوع Ia supernovae للسوبرنوفات. ثم تُعرف مسافات هذه بدقة أفضل بكثير.

استناداً إلى هذه المسافات، وجد أ. ريس وفريقه قيمة ثابت هابل تساوي 73.8 كيلومتراً في الثانية ولكل ميغا بكسال (واحد ميغا بكسال يساوي 3.26 مليون سنة ضوئية)، مع 3.3 في المئة من عدم اليقين. وهذا

يعني أن مجرتين بعيدتين عن ميغابارسك يبدو أنهما تبتعدان عن بعضهما بسرعة 73.8 كيلومترًا في الثانية. قياس سابق، نُشر في عام 2009، أعطى 74.2 كيلومترًا في الثانية لكل ميغا بكسال ، مع عدم اليقين بنسبة 4.8 في المائة.

ومع ذلك، فإن معظم النماذج التي تقدم "فراغ عملاق" (بترتيب غيغابارسك gigaparsec) تتنبأ بثابت هابل أقل من 65 كم في الثانية ولكل ميغا. لذلك، فإن التدابير الجديدة غير مؤهلة لهم. ومع ذلك، فهي لا تشير إلى نهاية علم الكونيات غير المتجانس - وهو تعبير نجمع بموجبه النماذج التي، على عكس النموذج القياسي، تعتبر أن توزيع المادة ليس متجانسًا على نطاق واسع. في الواقع، هناك العديد من النماذج غير المتجانسة، بعضها يتخيل فراغات عملاقة بأحجام مختلفة، والبعض الآخر كثافات زائدة محلية، والبعض الآخر أخيرًا عدة فراغات صغيرة محاطة بكثافة (ما يسمى نماذج الجبن السويسرية). أحدهما، اقترحه ماري نويل سيليري ، من مرصد باريس ، وتم بناء زملائها لاحترام قيمة ثابت هابل. ولا يزال البعض الآخر، بما في ذلك نماذج "الجبن السويسري" الواقعية بشكل متزايد، حديثًا جدًا بحيث لم يتوقعوا هذه القيمة. يبقى أن يتم اختبارها ...

علم الكونيات غير المتجانسة:

يتم تفسير التسارع الواضح للتوسع الكوني بشكل طبيعي عندما نتخيل أن الكون ليس متجانسًا على نطاق واسع وأن مجرتنا تقع في منطقة فارغة. ثم نستغني عن الطاقة المظلمة.

في العلم، غالبًا ما تنجم الثورات الكبرى عن أصغر الخلافات. في القرن السادس عشر، استنادًا إلى ما اعتبره معظم معاصريه لانحرافات ضئيلة في حركة الكواكب والنجوم، قدم كوبرنيكوس فكرة أن الأرض ليست في مركز الكون. في عام 1998، حدثت ثورة أخرى في علم الفلك مع اكتشاف أن توسع الكون يتسارع. أدى انحراف ضئيل عن القيمة المتوقعة لسطوع المستعرات العظمى البعيدة (انفجارات النجوم) إلى استنتاج الفلكيين أنهم لم يكونوا على علم بما يتكون منه 70 في المائة من محتوى الكون. كل ما يمكن قوله هو أن الفضاء مليء بمادة غير معروفة تعزز تمدد الكون بدلاً من إبطائه. تسمى هذه المادة الغامضة اليوم الطاقة المظلمة.

بعد عقد من الزمان، لا تزال طبيعة وماهية الطاقة المظلمة تتحدى الخيال. من بين العديد من النظريات التي تم اقتراحها حتى الآن، لا يوجد منها ما هو مقنع تمامًا. ثم تعهد بعض علماء الكون بإعادة النظر في الافتراضات الأساسية التي أدت إلى اقتراح وجود الطاقة المظلمة.

أحد موروثة الثورة الأولى المذكورة: مبدأ كوبرنيكوس، والذي بموجبه لا تحتل الأرض موقعًا مركزيًا أو مميزًا بأي شكل من الأشكال في الكون. من خلال التخلي عن هذا المبدأ الأساسي، يمكننا إعادة تفسير ملاحظات تسارع التوسع الكوني في بيئة مختلفة.

اليوم، اعتدنا جميعًا على فكرة أن كوكبنا هو مجرد نقطة صغيرة تدور حول أي نجم، تقع على مشارف مجرة قياسية. وبقدر ما نرى، فإن الكون مأهول بمئات مليارات المجرات الأخرى، الموزعة بشكل متجانس نسبيًا. وبالتالي، لدينا كل سبب للاعتقاد بأن موقفنا ليس بأي شكل من الأشكال رائعًا.

مكانة خاصة في الكون؟

ولكن ما هو البرهان الملموس الذي لدينا؟ وإذا كنا في مكان معين، فكيف نعرف؟ يتجنب علماء الفلك هذه الأسئلة بشكل عام، معتقدين أن تفاهة وضعنا واضح بما فيه الكفاية. إن فكرة أننا قد نحتل مكانة خاصة إلى حد ما في الكون هي بالنسبة لكثير منهم غير متناسقة. ومع ذلك، هذا ما يفكر فيه بعض الفيزيائيين مؤخرًا.

ومن المفارقات، أن مبدأ كوبرنيكوس، الذي يفترض أننا غير مهمين في الكون، كان أداة تفسيرية قوية: فهو يسمح باستقراء الكون كله الذي نلاحظه في جوارنا الكوني. تستند جميع النماذج الحديثة للكون على "المبدأ الكوني". هذا التعميم لمبدأ كوبرنيكوس ينص على أن جانب الكون متشابه في جميع النقاط وفي جميع الاتجاهات؛ وبعبارة أخرى، أن الكون هو موحد الخواص. إلى جانب فهمنا الحديث للفضاء والزمان والمادة - لا سيما في إطار نظرية النسبية العامة لأينشتاين - يشير المبدأ الكوني إلى أن الفضاء بدأ بمرحلة من الكثافة ودرجة حرارة عالية بشكل لا يصدق، وأن نسيج الزمكان يتوسع أثناء تبريد الكون. وهو السيناريو الذي أكدته الملاحظات والمشاهدات الرصدية وعمليات المحاكاة الكومبيوترية.

وهكذا، يتحول ضوء المجرات البعيدة نحو الجزء الأحمر من طيف الضوء مقارنة بالمجرات القريبة، وكلما كانت بعيدة كان التسارع أكبر. ينتج تأثير التحول الأحمر عن تمدد طول موجة الضوء عن طريق توسيع الفضاء على طول مساره.

الخلفية الإشعاعية الكونية الميكروية المنتشرة، في جميع الاتجاهات، هو دليل آخر على التوسع: إنه أحفور أول ضوء ينبعث في الكون، والذي انتشر منذ ذلك الحين في جميع الاتجاهات من خلال رؤية طول الموجة الممتدة. متجانسة لأقرب $1 / 100,000$. الخلفية المنتشرة هي حجة قوية لصالح تساوي الخواص في الكون. وأخيرًا، تكشف المسوحات الضخمة للمجرات على المقاييس الكونية أيضًا أن الكون هو، على الأقل كتقريب أول، متناح أو متجانس ومتماثل إيزوتروب $isotrope$. لذا، إذا كان المبدأ الكوني مثيرًا جدًا وتم التحقق منه بقوة، فلماذا يشكك البعض في هذه الصيغة المعيارية؟ لأن بعض الملاحظات الفلكية الأخيرة تزعج هذا الانسجام الجميل. قبل عقد من الزمن، اكتشف علماء الفلك أنه بالنسبة للانزياح الأحمر، فإن ما يسمى بانفجارات المستعرات العظمى البعيدة من النوع Ia ليست مشرقة كما يجب أن تكون. يرتبط التحول الأحمر مباشرة بتوسيع المساحة. من خلال قياس الإزاحة التي تعرض لها ضوء المستعرات العظمى البعيدة خلال رحلتها، يمكننا بالتالي استنتاج حجم الكون في وقت الانفجار مقارنة بحجمه الحالي. كلما كان التحول الأحمر للمستعر الأعظم أكبر، كان الكون أصغر عندما انفجر النجم، وبالتالي كلما زاد الكون منذ ذلك الحين.

علاوة على ذلك، تتميز المستعرات العظمى من النوع Ia بسمات حاسمة: فجميعها تقريبًا لها نفس اللعان الداخلي (لذلك يطلق عليها الشموع القياسية). وبالتالي، يمكننا استنتاج المسافة من النوع Ia supernova، وبالتالي الوقت الذي مر منذ الانفجار، من القياس البسيط لللعان الظاهري.

الآن فكر في كون تكون سرعة توسعه ثابتة. يتوافق التحول الأحمر للسوبرنوفات مع عامل تمدد معين، وبالتالي لفترة معينة، والتي ترتبط بالمسافة وبالتالي مع لعان واضح.

ومع ذلك، في نهاية التسعينات، اكتشفت العديد من الفرق البحثية أن السطوع الظاهر للمستعرات العظمى البعيدة أقل مما هو متوقع وفقًا للتحول الأحمر. ولذلك، فإنها أبعد ما يكون عن المتوقع، وقد استغرق نورها وقتًا أطول للوصول إلينا. لا بد أن الكون قد استغرق وقتًا أطول للوصول إلى حجمه الحالي، أو بعبارة

أخرى، يجب أن تكون سرعة توسع الكون أبطأ في الماضي مما هي عليه اليوم. أي أن هناك تسارع في توسع الكون.

هل من المتوقع أن يتباطأ التوسع؟

كان اكتشاف هذا التسارع هو أصل الثورة الحالية في علم الكونيات. كل المادة الموجودة في الكون، من خلال ميله إلى التجمع تحت تأثير الجاذبية، كان من شأنه أن يبطئ التمدد. لكن المستعرات الأعظم البعيدة توحى بالعكس. إذا كان المبدأ الكوني صالحاً، فإن هذا التسارع يحدث بنفس الطريقة في أي نقطة في الكون في نفس الوقت. هناك طريقة واحدة للخروج: تخيل أن الكون مغمور في شكل غريب من الطاقة التي تمارس قوة طاردة وتدعم التوسع وهي التي تسمى الطاقة المظلمة أو المعتمدة. إذن الطاقة المظلمة تطرح إشكالية. إنها تختلف عن أي شيء معروف في النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات. حتى الآن، نجت من القياس المباشر ولها خصائص غريبة. يبدو أن كثافة الطاقة في الفراغ الكمومي، هو المرشح الأكثر طبيعية للعب دور الطاقة المظلمة، مرتفع للغاية 10^{120} مرة. طرح الفيزيائيون العديد من الأفكار حول طبيعة الطاقة المظلمة، لكنهم لا يزالون مضاربين إلى حد كبير. باختصار، نحن في الظلام بشأن الطاقة المظلمة ... تم إطلاق مهام طموحة على الأرض وفي الفضاء لمحاولة وصفها. بالنسبة للكثيرين، هذا هو التحدي الأكبر لعلم الكون الحديث.

ماذا لو لم يكن التوسع متجانساً؟

في مواجهة مثل هذه الفكرة الإشكالية، جاء بعض علماء الفيزياء الفلكية لإعادة النظر في المنطق الذي أدى إلى افتراض وجود الطاقة المظلمة. إذا انتقد البعض مقاييس التوسع بناءً على طريقة المستعرات العظمى (على سبيل المثال، التشكيك في المظهر القياسي للنوع المستعر الأعظم من النوع Ia أو الإشارة إلى عدم كفاية العينة الإحصائية)، فإن أحد أهم الفرضيات موضع تساؤل هي المبدأ الكوني. هل يمكن تفسير المظاهر المنسوبة إلى الطاقة المظلمة بأسباب أخرى بافتراض أن الكون ليس متجانساً أو متجانساً وأن ملاحظتنا صالحة فقط في منطقتنا؟

نتحدث دائماً ضمنياً عن توسع الكون ككل. إنه يشبه إلى حد ما بالوناً منتفخاً: ننظر إلى تمدد البالون بأكمله، دون الاهتمام بالتوسع الجزئي أو المحلي في هذا المكان أو ذاك. ومع ذلك، فقد اخترنا جميعاً أن بعض البالونات لا تنتفخ بشكل موحد: حلقة تمتد على سبيل المثال أولاً، ويتبع بقية البالون لحظة بعد ذلك. وبالمثل، يمكننا أن نتخيل سيناريو كونياً بديلاً، حيث يتسع الفضاء بشكل غير متساو. هذا ما تم تخيله في التسعينيات، قبل اكتشاف فرضية الطاقة المظلمة، علماء الكونيات في جنوب إفريقيا نظيم مصطفى، تشارلز هلابي وجورج إليس، في إطار مشكلة الطاقة المظلمة، ماري - نويل سيليرييه من مرصد باريس، (انظر الطاقة المظلمة وبدائلها، بقلم G.Börner ، ثم يتم الكشف عن أن المشهد أكثر تعقيداً).

دعونا نلقي نظرة على السيناريو التالي. لنفترض، بشكل عام، أن التمدد يتباطأ، لأن وجود المادة يميل إلى إبطاء تمدد الكون. افترض علاوة على ذلك أننا نعيش في نوع من الفراغ الكوني العظيم؛ ليست منطقة فارغة تماماً (من الواضح أن هذا ليس هو الحال)، ولكن منطقة حيث متوسط كثافة المادة على سبيل المثال أصغر بمرتين أو ثلاث مرات من أي مكان آخر. كلما زادت المساحة الفارغة، قل احتواءها على المواد التي تبطئ توسع المساحة. وبالتالي، فإن سرعة التمدد المحلية أكبر داخل فقاعة التفريغ من الخارج. تكون سرعة التمدد هي القصوى في وسط المنطقة الفارغة وتتناقص باتجاه الحواف، حيث يبدأ

الشعور بتأثير كثافة أعلى للمواد. والنتيجة هي أن مناطق متميزة من الفضاء تتوسع بسرعات مختلفة اعتماداً على كثافة المادة، مثل البالون الذي لا يتضخم بشكل متجانس.

تخيل الآن أن المستعرات العظمى تنفجر في مناطق مختلفة من هذا الكون غير المتجانس، بعضها بالقرب من مركز الفراغ، والبعض الآخر أقرب إلى حافته، والبعض الآخر أخيراً خارج هذه المنطقة الفارغة. إذا كنا قريبين من مركز المنطقة الفارغة وانفجر مستعر أعظم من مسافة، فإن الفضاء يتوسع بشكل أسرع في جوارنا منه في جوار المستعر الأعظم. من خلال الانتشار تجاهنا، يعبر الضوء المنبعث من المستعر الأعظم مناطق تتوسع بسرعة أكبر. كل منها يمتد الطول الموجي للضوء أكثر قليلاً، والتأثير التراكمي ينتج التحول إلى الأحمر الذي نلاحظه. بعد السفر لمسافة معينة، يبدو الضوء أقل تحولاً نحو الأحمر مما لو كان الكون بأكمله ممتدداً بشكل متسق مع سرعة التوسع المحلي. على العكس من ذلك، في نموذج الكون هذا، فإن التحول نحو الأحمر المحدد يتوافق مع مسار ضوء أطول من ذلك المرتبط بعبور الكون في توسع موحد، وفي هذه الحالة يجب أن تكون المستعر الأعظم أكثر بعداً، وبالتالي يظهر أقل سطوعاً.

طريقة أخرى لتقديم الأشياء هي أن نقول إن الاختلاف المكاني في سرعة التوسع له تأثيرات رصدية مماثلة لتلك التي للاختلاف في وقت هذه السرعة. وبالتالي من الممكن شرح الملاحظات الإشكالية للمستعرات الأعظم دون استدعاء الطاقة المظلمة!

لكي يكون هذا التفسير البديل صحيحاً، يجب أن نكون في فراغ من البعد الكوني. يبلغ عدد المستعرات الأعظم المعنية عدة مليارات من السنين الضوئية، وهو جزء هام من الكون المرئي. يجب أن يكون الفراغ قابلاً للمقارنة على الأقل في الحجم.

هل هذا الفراغ الكوني واقعي؟ للوهلة الأولى، لا. يبدو هذا بالفعل في تناقض صارخ مع إشعاع الخلفية الميكروية الكونية المنتشر، والتي هي خلفية موحدة بشكل غير عادي: لا تتجاوز الاختلافات 1 / 100,000. وبالمثل، على نطاق واسع، يبدو توزيع المجرات متجانساً. ولكن عند الفحص الدقيق، فإن هذه الاختبارات ليست بالضرورة قاطعة.

يوحي توحيد إشعاع الخلفية المنتشر فقط أن الكون متشابه في جميع الاتجاهات. وهو متوافق مع وجود منطقة فارغة شبه كروية نشغل منها المركز تقريباً. بالإضافة إلى ذلك، تحتوي خلفية الميكروويف الكونية على تباين معين، يمكن تفسيره من خلال عدم التجانس على نطاق واسع.

أما بالنسبة لتوزيع المجرات، فإن المسوحات الحالية لا تذهب إلى حد كافٍ في الكون لاستبعاد فراغ الحجم القادر على إعادة إنتاج آثار الطاقة المظلمة. تظهر فقاعات الفراغ وشعيرات المادة والعقد على مقياس مئات الملايين من السنوات الضوئية، ولكن الفراغ اللازم لفرضيتنا يجب أن يكون أكبر بترتيب من الحجم.

يُنَاقَشُ الجدل الدائر حالياً داخل أوساط الفلكيين: هل تؤكد استطلاعات المجرات المبدأ الكوني؟ يشير تحليل حديث أجراه دوغلاس هوغ من جامعة نيويورك إلى أن الحجم المميز لأكبر الهياكل في الكون يبلغ حوالي 200 مليون سنة ضوئية. وعلى نطاق واسع، تبدو المادة موزعة بشكل موحد، وفقاً للمبدأ الكوني. لكن بالنسبة إلى فرانشييسكو لابيني، من مركز إنريكو فيرمي في روما، فإن أكبر الهياكل المكتشفة حتى الآن محدودة فقط بحجم مسوحات المجرات التي جعلت من الممكن اكتشافها. قد توجد هياكل أكبر خارج

نطاق المسوحات. للتحقق من المبدأ الكوني، نحن بحاجة إلى مسوحات للمجرات أكبر من أكبر الهياكل في الكون. هل البيانات الحالية واسعة بما يكفي؟ هذا هو موضوع النقاش. هل الفراغ العملاق ممكن؟

بالنسبة للمنظرين، من الصعب تصور الفراغ الهائل. يشير كل شيء اليوم إلى أن المجرات والهياكل الكبيرة، مثل الخيوط والفراغات، تشكلت من تقلبات مجهرية ودون مجهرية من أصل كمومي في الكون البدائي، والتي توسع التمدد الكوني لاحقاً في أبعاد فلكية. يقدم النموذج الكوني القياسي أو المعياري تنبؤات قوية حول تكرار الهياكل وفقاً لحجمها. فكلما كان الهيكل أكبر، كلما كان أكثر ندرة. إن احتمال وجود فراغ كبير بما يكفي لمحاكاة تأثيرات الطاقة المظلمة ضئيل للغاية.

ومع ذلك، هناك احتمال واحد. في أوائل التسعينات، أظهر أندريه ليندي ، أحد مخترعي مفهوم التضخم الكوني ، أن الفراغات العملاقة حتى النادرة تتوسع بشكل أسرع من الباقي في بداية تاريخ الكون وينتهي بها الأمر مهيمنة على حجم الكون. وبالتالي فإن احتمال وجود المراقبين في مثل هذا الفراغ قد لا يكون منخفضاً جداً.

ما هي الملاحظات التي يمكن أن تقرر بين توسع موحد للكون مدفوعاً بالطاقة المظلمة والتوسع غير المتجانس الملحوظ لمكان معين؟ لتحديد ما إذا كانت هناك منطقة فارغة، يحتاج علماء الكون إلى نموذج جيد لسلوك المكان والزمان والمادة بالقرب من مثل هذه المساحة الفارغة. تم صياغة هذا النموذج في عام 1933 من قبل جورج لوميتز. أعاد ريتشارد تولمان اكتشافه بشكل مستقل بعد ذلك بعام، وتم تطويره بعد الحرب العالمية الثانية بواسطة هيرمان بوندي. تصور هذا النموذج كوناً بسرعة التوسع التي لا تعتمد فقط على الوقت أو الزمن، ولكن أيضاً على المسافة إلى نقطة معينة، كما هو الحال في فرضيتنا الحالية.

كيفية تسليط الضوء على عدم التجانس؟

بفضل نموذج Lemaître-Tolman-Bondi، يتوقع علماء الكون كميات معينة يمكن ملاحظتها. فكر أولاً في المستعرات العظمى البعيدة. كلما لاحظ أو رصد الفلكيون أكثر، تمكنوا من إعادة بناء تاريخ تمدد الكون بدقة أكبر. بالمعنى الدقيق للكلمة، لا يمكن لهذه الملاحظات أن تستبعد نموذج الكون غير المتجانس، لأنه يمكن للمرء دائماً العثور على فراغ من الكثافة والشكل المناسبين لإعادة إنتاج أي مجموعة بيانات من المستعر الأعظم. ومع ذلك، لكيلا يمكن تمييز كون غير متجانس تماماً عن كون متجانس مع طاقة مظلمة، يجب أن يكون للفقاعة - الفراغ خصائص غريبة جداً.

التسارع الواضح للتوسع مستمر اليوم. لكي تقوم منطقة فارغة بإعادة إنتاج هذه الصورة، يجب أن تزيد سرعة التوسع بسرعة عندما نبتعد عن موقعنا، في جميع الاتجاهات. يجب أن يكون لملف كثافة المواد ذروة عالية تتمحور حول موضعنا. هذا يتعارض مع معرفتنا بهياكل المادة في الكون، والتي لا تظهر بشكل عام اختلافات مفاجئة. ومع ذلك، إذا كان الفراغ يحتوي على ملف تعريف كثافة أقل حدة أكثر تماشياً مع نماذجنا الحالية، فيجب أن يكون التوقع المميز قابلاً للكشف. يشير غياب القمة إلى أن الفراغ لا ينتج بالضبط نفس الملاحظات مثل الطاقة المظلمة. على وجه الخصوص، تختلف سرعة التسارع الواضح للتوسع بشكل مميز مع التحول الأحمر. مع كات لاند Kate Land، ثم في جامعة أكسفورد ، أظهرنا أن مراقبة عدة مئات من المستعرات العظمى الجديدة ، بالإضافة إلى المئات القليلة التي تمت ملاحظتها حتى الآن - فقط - يجب أن تكون كافية لتسوية السؤال. يجب تحقيق هذا الهدف في غضون فترة زمنية قصيرة.

ليست استطلاعات المستعر الأعظم هي الملاحظات الوحيدة التي لدينا. اقترح جيريمي غودمان من جامعة برينستون اختباراً آخر في عام 1995 باستخدام الخلفية الميكروية الكونية. في ذلك الوقت، لم يتم إدخال الطاقة المظلمة بعد، وكان غودمان يبحث عن دليل على المبدأ الكوني نفسه. كانت فكرته استخدام مجموعات من المجرات البعيدة "كمرايا" للنظر إلى الكون من نقاط مراقبة مختلفة. في الواقع، تعكس مجموعات المجرات جزءاً صغيراً من إشعاع الميكروويف للخلفية المنتشرة. من خلال قياس وتحليل هذا الإشعاع المنعكس، يمكننا نظرياً استنتاج شكل الكون عندما ننظر إليه من مجرة بعيدة. الكون الذي يظهر بعد ذلك بشكل مختلف سيكون مؤشراً قوياً لوجود فراغ أو بنية قابلة للمقارنة.

أخضع فريقان مؤخرًا هذه الفكرة على المحك. درس روبرت كالدويل، من كلية دارتموث، في نيو هامبشاير، وألبرت ستيبينز، من مختبر فيرمي، في إلينوي، تشويه الخلفية، بينما خوان غارسيا بيليدو، من جامعة مدريد، وترويلز هاوغبول من جامعة آرهوس، الدنمارك، لاحظوا ورصدوا التجمعات الفردية بشكل مباشر. لم يكتشف أي من الفريقين فراغاً؛ أفضل ما كان يمكن للباحثين القيام به هو تحديد الخصائص التي يمكن أن يمتلكها هذا الفراغ. يجب أن يكون القمر الصناعي بلانك، الذي أطلق في 14 مايو 2009، قادراً على تحديد قيود أكثر صرامة على خصائص الفراغ الكوني المحتمل، أو حتى استبعاد وجوده تماماً.

النهج الثالث، الذي دعمه بروس باسيت، وكريس كلاركسون وتيريزا لو، في جامعة كيب تاون، جنوب أفريقيا، هو قياس سرعة التوسع في مواقع مختلفة. يحدد الفلكيون بشكل عام سرعة التوسع من حيث الانزياح نحو الأحمر، الذي يفسر توسع جميع مناطق الفضاء بين مصدر الضوء وبيننا. هذا التراكم يجعل من المستحيل التمييز بين الاختلاف في سرعة التوسع في الفضاء والاختلاف في الوقت. للقيام بذلك، يجب علينا قياس سرعة التوسع محلياً في نقاط مختلفة في الفضاء. إنه إجراء صعب التنفيذ. أحد الاحتمالات هو مراقبة كيفية تشكيل الهياكل في أماكن مختلفة. يعتمد تكوين وتطور المجرات وعناقيد المجرات إلى حد كبير على معدل التوسع المحلي. إذا نجحنا في استخراج هذه الإشارة من جميع التأثيرات الأخرى التي تدخل في تطورها، فربما نسلط الضوء على الاختلافات المحلية الدقيقة في سرعة التوسع. وماذا لو كانت هناك فقاعات فارغة بأعداد كبيرة؟

إن الفكرة القائلة بأننا قد نكون في مركز منطقة ضخمة فارغة من الفضاء تعارض بشدة المبدأ الكوني، لكن الاحتمالات الأخرى أقل جذرية. يمكن للكون، على سبيل المثال، أن يطبع المبدأ الكوني على نطاق واسع، لكن فقاعات الفراغ وشعيرات المادة المرئية في المسوحات الكبيرة للمجرات يمكن أن تنتج بشكل جماعي آثار الطاقة المظلمة. يبدو الكون وكأنه الجبنة المبشورة emmental، موحدة بشكل عام، ولكن مليئة بالنقوب. وبالتالي، تختلف سرعة التوسع قليلاً من منطقة إلى أخرى. ينتشر الضوء المنبعث من المستعرات العظمى البعيدة من خلال العديد من هذه الفراغات الصغيرة قبل الوصول إلينا. هل التباين التراكمي لسرعة التوسع، وبالتالي التحول نحو الأحمر، يعيد إنتاج تأثير التسارع في وقت توسع الفضاء؟ أظهر العالمان (ت. كليفتون) وجوزيف زونتس، من جامعة أكسفورد، مؤخراً أنه، من أجل إعادة إنتاج تأثيرات الطاقة المظلمة، فإن كمية كبيرة من فقاعات الفراغ منخفضة الكثافة جداً يجب توزيعها بطريقة معينة. يتمتع هذا النموذج بميزة عدم افتراض وجود فراغ كبير واحد نشغل مركزه بدقة.

الاحتمال الآخر هو أن الطاقة المظلمة هي قطعة أثرية للتقريب الرياضي المستخدم في النماذج الكونية. لحساب سرعة التوسع الكوني في منطقة معينة من الفضاء، نقوم بتقييم كمية الطاقة الموجودة في هذه

المنطقة ونقسمها على حجمها؛ ثم نقدم متوسط كثافة الطاقة الذي تم الحصول عليه على هذا النحو في معادلات النسبية العامة لأينشتاين، لاستنتاج متوسط معدل التوسع في هذه المنطقة. في الواقع، نحن نفعل ذلك من أجل الكون ككل: على الرغم من أن كثافة الطاقة تختلف باختلاف المناطق، فإننا نتعامل مع هذه الاختلافات على أنها تقلبات ضئيلة حول متوسط كثافة الكون ونستنتج سرعة "متوسط التوسع"، وهذا يعني بالضرورة أنه متجانس في الفضاء.

لكن حل معادلات أينشتاين لتوزيع متوسط للمادة ليس مكافئاً أولاً لحلها مع التوزيع الحقيقي للمادة، ثم حساب متوسط هندسة الزمكان الناتجة. بعبارة أخرى، نرتكب خطأً حسابياً عن طريق حساب المتوسط أولاً ثم حل المعادلات، بينما يتوجب علينا أن نحلها أولاً ثم نحسب النتيجة فقط. المشكلة هي أنه من المعقد بشكل رهيب حل معادلات النسبية العامة للبيانات التي تعيد إنتاج الكون الحقيقي، إن كان غامضاً فقط. إذا كان هذا التعقيد يبرر بسهولة التقريب الذي قام به الرواد ألكسندر فريدمان وجورج لوميتير في عشرينيات القرن العشرين، فهل يمكننا أن نرضي حل البساطة هذا اليوم؟ شرع توماس بوخرت، من جامعة ليون، في تحديد درجة صلاحية هذا التقريب. أدخل مصطلحات إضافية في المعادلات الكونية لحساب الخطأ الذي أدخله الحد المتوسط قبل معالجة المعادلات بدلاً من حلها. إذا تبين أن هذه المصطلحات صغيرة، فإن التقريب جيد؛ إذا كانت مهمة، فهي سيئة. ومع ذلك، فإن النتائج ليست قاطعة في الوقت الحالي. بالنسبة لبعض علماء الفيزياء الفلكية، ستكون المصطلحات الإضافية كافية لاحتساب الطاقة المظلمة بالكامل؛ بالنسبة للآخرين، تكاد لا تذكر ويمكن إهمالها. الطاقة المظلمة، الفراغ الكوني العظيم الذي يشكك في المبدأ الكوني، تراكم الفراغات المحلية أو التقريب الرياضي غير المبرر: النقاش أكثر انفتاحاً من أي وقت مضى. ينبغي إجراء ملاحظات حاسمة في المستقبل القريب. يجب أن يلقي مسح تراث المستعر الأعظم Supernova Legacy السوبر نوبا، بالإضافة إلى مهمة الطاقة المظلمة المشتركة، قيد التطوير حالياً، الضوء على تاريخ توسع الكون. سيحدد القمر الصناعي بلانك وغيره من الأدوات الخلفية الكونية الميكروية بمزيد من التفاصيل، وسيزودنا التلسكوب الراديوي SKA، المخطط له في عام 2020، بمسح غير مسبوق للمجرات. بدأت الثورة في علم الكونيات منذ أكثر من عشر سنوات بقليل. إنها بعيدة عن النهاية.