

مِشْعَلُ مُرْشِدٍ مِنَ الْإِنْفِجَارِ الْأَعْظَمِ(*)

إذا تَبَيَّنَتْ عندَ الفحص والتدقيق صحة الاكتشاف الحديث عن موجات ثقالية (1) صدرت عن الكون المُوغَل في القَدَم، فإنه سينورُنَا عن علاقة بين الثقالة (2) والميكانيك الكومومي (3)، وربما - من خلال هذا الأمر - سيسمح لنا بالتحقق من وجود أكوان أخرى.

<M. L. كراوس>

باختصار

في وقت منصرم من عام 2014 أعلن علماء أنهم وجدوا موجات ثقالية(1) صدرت عن اللحظات الأولى بعد الانفجار الأعظم. لو تم التأكد من هذا الأمر، لسمح الاكتشاف للباحثين بدراسة اللحظات الأولى من الزمن، ومن ثم قد يزودونا بطريقة لتوحيد الميكانيك الكومومي مع الثقالة. ويمكن للاكتشاف أيضا أن يزودنا بدليل غير مباشر عن وجود متعدد الأكوان - فقاعات لا متناهية في العدد من أكوان منفصلة فيزيائيا.

في الشهر 3/2014 تمّ الإعلان من قبل فريق من العلماء يدير مقرابا يعمل بموجات ميكروية microwaves في القطب الجنوبي عن خبر أذهل المجتمع العلمي؛ إذ ادعى ملاحظة إشارة انبعثت عند بداية الزمن تقريبا. فقد أتت هذه الإشارة المفترضة مبطنة ضمن إشعاع خلفه فعل موجات ثقالية(1) تولدت في الكون المُوغَل في القدم أثناء الجزء الأول من بليون بليون بليون جزء للثانية التي تلت الانفجار الأعظم.

ولو تمّ التأكد من هذه الملاحظة، لكانت إحدى أهم الملاحظات خلال عقود؛ إذ إنها ستسمح لنا باختبار أفكار عن كيفية نشأة الكون ما قدر العلماء إلى اليوم إلا أن يقوموا بالتخمين والتحزير عنها، وستساعدنا على الربط بين أفضل نظرياتنا عن العالم دون الذري (الكومومي)(4) وأجود النظريات عن الكون الهائل القائمة على أساس نظرية النسبية العامة(5) لـ <أينشتاين>. كما يمكن للملاحظة أيضا أن تزودنا بدليل مقنع (وإن كان غير مباشر) عن وجود أكوان أخرى.

ومنذ صدور الإعلان، انتابت علماء آخرين ارتيابات حول صحة الإشارة. وجعلت هذه الشكوك الملاحظات الناجمة عن تجارب أخرى ذات أهمية قصوى، حيث إنها سوف تقطع الشك باليقين حول صحة الادعاء خلال عام 2015 غالبا. ومع أن هيئة المحلفين، عما إذا ما شاهدناه فعلا هو أثر متبق من الكون الطفل(6) أم لا، غائبة حاليا، فإننا لن ننتظر طويلا لمعرفة الإجابة. ويسود التوقع والتوجس الشديدان اللحظة الحالية في استكشافنا للكون.

الطريق إلى تضخم(**)

كيف وصلنا إلى هذه اللحظة الدرامية؟ بدأ الأمر من مفارقتين ظاهرتين تتعلقان بالكون المُوغَل في القدم، قد يستطيع مِشْعَلُنَا المُرْشِد beacon (في حال كونه صحيحا) أن يساعد على حلّهما.

وتتعلق المفارقة الأولى بهندسة الكون في مقاييسه الكبيرة. فقد استمر الكون باتساعه وتمدده خلال فترة الـ 13.8 بليون سنة التي مرّت منذ تشكّل الكون في الانفجار الأعظم. وبعد مرور هذه الفترة الطويلة من التمدد والانتساع فلا يزال الكون مُستويا flat بشكل كامل تقريبا. إن الكون المستوي ذا الأبعاد الثلاثة هو ما تنطوي عليه مخيلة غالبيتنا عن الكون الذي نعيش فيه، فالضوء يسير فيه وسطيا وفق خطوط مستقيمة.

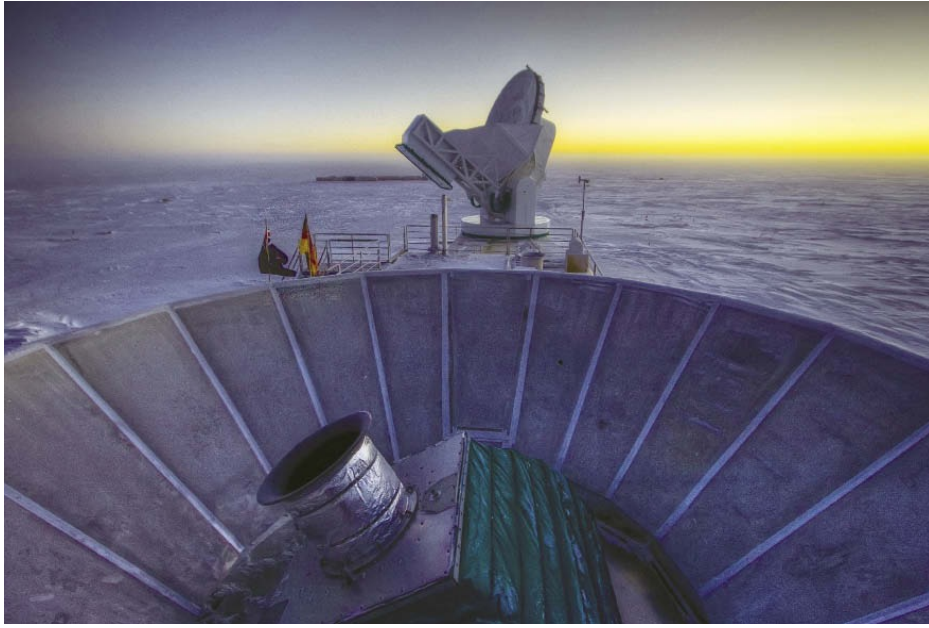
وتكمن المشكلة في أن النسبية العامة تقتضي أن استواء الكون أبعد ما يكون أمرا مضمونا، بل إن الكون المستوي في الحقيقة كونٌ خاص واحتمال وجوده ضئيل. وعندما يكون الشكل المهيم للطاقة في الكون مادة أو إشعاعا - وهذه يقينا حال كوننا خلال الفترة الغالبة من تاريخه - فإن كونا غير مستوي إلى حد ما سرعان ما تنحرف ميزاته أثناء تمدده واتساعه عن ميزات الكون المستوي. ولو كان كوننا بعيدا عن كونه مستويا بمقدار ضئيل جدا، لتعين على شكله اليوم أن يبدو إما مفتوحا - حيث المكان منحن كسرج فرس - أو مغلقا حيث ينحني المكان space كسطح كرة. وكان لا بد لميزات كوننا الموغل في القدم - من أجل أن يظل إلى اليوم يبدو مستويا - أن يتم ضبطها (تلك الميزات) بدقة فائقة لدرجة غير معقولة.

أما المفارقة الثانية فتتعلق بأن الكون يبدو متماثلا في جميع المناحي، فهو متسق الاتجاهات أو متناح. وهذا أمر غريب، فالضوء الآتي من جانب للكون المرئي الشاسع لم يتح له الوقت إلا مؤخرا ليبلغ الجانب الآخر. وتعني هذه المسافة الفاصلة الكبيرة وجود مناطق بعيدة عن بعضها في الكون ما كان لها في الماضي أن تتواصل معا (يقول الفيزيائيون إن هذه المناطق لم تكن في «تماس سببي»⁽⁷⁾)، ومن ثم كيف أمكن لها، إذن، أن تتطور لتبدو الآن بهذا التماثل؟

في عام 1980 كان الفيزيائي الشاب <A>. كوث< [الباحث في مرحلة ما بعد الدكتوراه] يتفكر في هاتين المفارقتين عندما خطر له حل لهما: حُمن اعتمادا على أفكار من فيزياء الجسيمات أن الكون انتفخ سريعا كالبالون بعد ولادته بفترة وجيزة. وتوصل <كوث> إلى هذه الفكرة التي دعاها تضخماً inflation أثناء تأمله بجزء مهم من النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات يعرف بكسر التناظر الآني⁽⁸⁾ يصف ما يحدث عندما تنفصل قوى كانت موحدة فيما مضى.

وهناك أدلة قوية على أن كسر التناظر الآني قد حدث في الكون مرة واحدة على الأقل، فبالنسبة إلى نظرية القوى الكهروضعيفة هناك قوتان من القوى الأساسية في الكون - هما: القوة الكهرومغناطيسية⁽⁹⁾ (القوة المغناطيسية والكهرباء) والقوة الضعيفة⁽¹⁰⁾ (المسؤولة عن التفكك الإشعاعي للنوى الذرية) - تبدوان مختلفتين اليوم لمجرد حصول حادثة في تاريخ الكون، إذ كانتا في زمن يسبق هذه الحادثة متحدتين في قوة واحدة.

ولكن أثناء تبرد الكون، عندما كان عمره نحو جزء من مليون مليون جزء من الثانية، طرأ عليه تحول طوري⁽¹¹⁾ (مماثل لحالة الماء عند انتقاله من السائل إلى الجليد) غير من طبيعة فضاء الخلاء، فبدلا من أن يكون فارغا تم ملؤه بحقل خلفية⁽¹²⁾ (شبيهة بالحقل الكهربائي ولكنه في حالتنا من نوع يصعب كشفه). وانتشر هذا الحقل المعروف بحقل هيگز the Higgs field في أرجاء الكون.



عيون قطبية: لاحظ مقراب التصوير BICEP2 في محطة القطب الجنوبي Amundsen-Scott رقعة السماء الصغيرة نفسها من الشهر 1/2010 إلى الشهر 12/2012، أثناء بحثه عن إشارات مميزة لموجات ثقالية بدئية في ضوء قديم.

ويؤثر حقل هيكل في الطريقة التي تنتشر وفقها الجسيمات في الفضاء، إذ إن هذه الجسيمات التي تتفاعل معه - مثل الجسيمات الناقلة للقوى الضعيفة - تعاني مقاومة تجعلها تسلك سلوك جسيمات ذات كتلة، أما التي لا تتفاعل معه - مثل الفوتون حامل القوة الكهرمغناطيسية - فتبقى عديمة الكتلة. وكنتيجة لهذا الأمر، شرعت القوتان الضعيفة والكهرمغناطيسية تتصرفان بطرق مختلفة كسرت التناظر الذي وحدهما سابقا. وتم التحقق من هذه الصورة الجامعة في المصادم الهادروني الكبير (LHC) ⁽¹³⁾ في مختبر سيرن بالقرب من مدينة جنيف عام 2012 عبر اكتشاف البوزون هيكل.

وقدم <غوث> الحجة في أنه ربما وقعت حادثة كسر تناظر آني مماثلة للحادثة الأنفة الذكر ولكن في وقت أبكر في ماضي الكون. فمن الممكن قبل هذا الكسر أن تكون ثلاث قوى من قوى الكون الأساسية الأربع - القوتان الكهرمغناطيسية والضعيفة، إضافة إلى القوة الشديدة⁽¹⁴⁾ (المسؤولة عن تماسك البروتونات protons والنيوترونات neutrons معا في النوى) ولكن باستبعاد قوة الثقالة gravity force - مرتبطة ببعضها البعض. وفي الحقيقة، هناك الكثير من الدلائل غير المباشرة يشير إلى أن مثل هذه الظاهرة قد حدث في الماضي السحيق عندما كان عمر الكون نحو 10^{-36} ثانية. ومع تبرد الكون، أمكن له أن يمر بتحول طوري غير أيضا من طبيعة الخلاء عبر حقل خلفية سبب سلوكا مختلفا للقوة الكهرضعيفة عن القوة الشديدة؛ مما كسر آنيا التناظر (أو الترابط) بين القوى.

وكما في حال حقل الهيكل، فإن هذا الحقل الكاسر للتناظر سيقود إلى جسيمات غريبة وثقيلة جدا، ولكن قيم الكتل المتضمنة ستكون أعلى بكثير من كتلة جسيم هيكل. وفي الحقيقة، سنحتاج إلى بناء مسرع أقوى بـ 10 تريليونات مرة من المصادم LHC لكي نستكشف مباشرة

النظريات الكامنة خلف هذه الظاهرة. وندعو هذه النظريات بالنظريات الكبرى التوحيدية (GUTs) ⁽¹⁵⁾، لأنها توحد قوى الكون الثلاث في قوة واحدة.

أدرك <غوث> أن مثل هذا الكسر الأنّي للتناظر في الكون المُوغل في القدم يقدر على حلّ جميع مشكلات نموذج الانفجار الأعظم المعياري لو تم احتباس الحقل المسؤول عن كسر التناظر هذا - ولو لفترة وجيزة على الأقل - في «حالة ذات استقرار قلق» ⁽¹⁶⁾.

ويغدو الماء في حالة ذات استقرار قلق عندما تنخفض مثلا درجة حرارة المحيط إلى ما دون درجة حرارة التجمد بسرعة، ولكن الماء على الطرقات لا يتجمد آنيا، وعندما يفعل ذلك - أي عندما يتم التحول الطوري - فإن الماء يحرر طاقة تدعى حرارة كامنة **latent heat**.

وبطريقة مماثلة، أمكن للحقل الذي سبب تحول الطور الخاص بالنظرية الكبرى التوحيدية أن يخزّن لفترة وجيزة في جميع أرجاء الفضاء مقدارا هائلا من الطاقة الحرارية الكامنة تسبب بتكوين تنافر ثقالي استطاع أن يجعل الكون يتمدد ويتسع بسرعة أسّيّة. فمن الممكن أن يكون حجم ما يمثل اليوم الكون المرئي قد تضاعف بمقدار 25 مرتبة في أقل من 10^{-36} ثانية. وكحال نفخنا لبالون، ينحو أيضا مثل هذا التمدد والاتساع الهائل إلى جعل الكون الذي نراه اليوم مستويا ومتناحيا، ومن ثم يتطرق بشكل طبيعي إلى المفارقتين الظاهريتين الخاصتين ببنية الكون في مقاييسه الكبيرة.

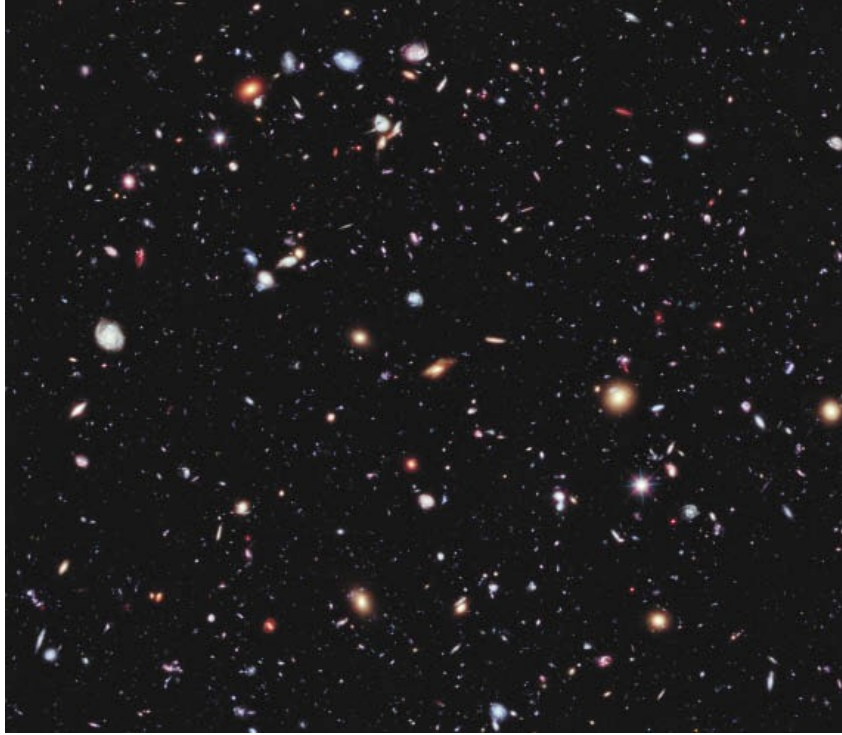
ومع أن كون فكرة التضخم قد تبدو مقنعة، لكننا لا نمتلك إلى الآن نظرية أساسية عن كيفية إتمام إنجاز التضخم تماما، ويعود ذلك بدرجة كبيرة إلى جهلنا بالتفاصيل المتعلقة بالتوحيد الكبير ⁽¹⁷⁾، من مثل مستوى الطاقة الدقيق الذي تتوحد عنده القوى. بينما تفسر نظريات التضخم البسيطة أكثر ما نلاحظه اليوم في دنيا الكون؛ فإن نسخا مختلفة للتضخم قد تنجم عنها أكوان متباينة جذري.

ما نحتاج إليه حقيقة هو طريقة نسبر بها الكون مباشرة بحثا عن دليل على خضوعه فعلا للتضخم، وفي هذه الحالة يلزمنا استكشاف تفاصيل الفيزياء المتعلقة به. وفي نهاية الأمر، ثبت أن الموجات الثقالية تزودنا بفرصة مناسبة تماما لذلك.

شارات مميزة للموجات الثقالية (***)

عندما نشر <A> أينشتاين نظريته عن النسبية العامة سنة 1915 أدرك أنها تقتضي وجود ظاهرة فيزيائية جديدة ومثيرة. فالحقل الثقالي **gravitational field** في النسبية العامة مجرد تشوّه في البنية التحتية لنسيج الزمكان **spacetime** الإجمالي. وسوف يولد منبع طاقة متغير مع الزمن - مثلا، حركة كوكب حول شمس أو حركة نجم حول آخر - تشوها متغيرا مع الزمن ينتشر بعيدا عن المنبع بسرعة مساوية لسرعة الضوء. وتتغير قليلا جدا المسافة الفاصلة بين الأشياء المتجاورة عندما تمر الموجات الثقالية بالقرب منها.

فمن الصعوبة بمكان الكشف عن الموجات الثقالية، ويعود ذلك إلى كون الثقالة أضعف بكثير من الكهرمغناطيسية، حتى أن <أينشتاين> انتابته شكوك في أنها ستُكتشف يوماً ما، ونحن بعد نحو 100 سنة من تنبُّئه بها أولاً لم نستطع تحقيق قياس مباشر لموجات ثقالية كهذه تصدر عن ظواهر فلكية كارثية من مثل ثقب سوداء⁽¹⁸⁾ متصادمة ببعضها البعض (مع أن العلماء يعتقدون أنهم صاروا قريبين من تحقيق هذا الهدف). ومع ذلك، ولحسن الحظ، يمكن للكون تزويدنا بمنبع للموجات الثقالية أقوى بكثير من هذه الظواهر، وهو الحقول الكمومية المتراوحة والمتأرجحة التي تكونت في اللحظات التي تلت الانفجار الأعظم.



كون منتظم: على مقاييس كبيرة، يبدو الكون نفسه تقريبا مهما كان الاتجاه الذي ننظر وفقه. وسطيا نجد كثافات متشابهة من المجرات في رقعات السماء المختلفة، تماثل كثافة الرقعة التي تبينها الصورة والمعروفة بالحقل العميق المتطرف the eXtreme Deep Field. وكشفت ساعات عديدة من مراقبات وملاحظات مقراب هبل الفضائي Hubble Space Telescope ضمن منطقة أصغر من مساحة القمر المكتمل عن آلاف من المجرات. ويمكن تفسير تماثل الكون في مختلف المناحي إذا عانى المكان تضخما سريعا بعد الانفجار الأعظم تماما.

وعندما كان الكون موعلا في القدم، قبل زمن التضخم، كان حجمه مضغوفا إلى ما هو أصغر بكثير جدا من حجم ذرة. وهنا، في هذه المقاييس البالغة الصغر تسود قواعد الميكانيك الكمومي⁽¹⁹⁾. لكن، بما أن مقدار الطاقة المحشور في كل جزء من هذا المكان المنمنم كان فائق الكبر؛ فإن هذه الطاقة الكبيرة تستلزم منّا استخدام النظرية النسبية⁽²⁰⁾ لوصفها. وهكذا، لفهم خصائص الكون الموعل في القدم نحتاج، كما فعل <غوٲ>، إلى استعمال أفكار نظرية الحقل الكمومي التي تتضمن كلاً من الميكانيك الكمومي والنسبية الخاصة⁽²¹⁾ - النظرية التي تربط المكان بالزمان. وتخبرنا نظرية الحقل الكمومي بأن جميع حقول الميكانيك الكمومي تتأرجح بشكل مستعر وهائج عند المقاييس الصغيرة جدا. وإذا تصرف جميع الحقول الكمومية

الأخرى بالطريقة نفسها خلال الفترة الزمنية الموافقة لهيمنة الكثافة الطاقية التضخمية على تمدد واتساع الكون، فقد تكون قيم الحقول الثقالية تآرجحت وتراوحت.

وخلال فترة التمدد والانتساع الأسّي للتضخم سيمتد مع هذا التمدد والانتساع أي تآرجح كمومي ابتدائي ذي طول موجة صغير. فإذا بلغ طول الموجة قيمة كبيرة، فإن الزمن اللازم ليتم التآرجح اهتزازه سوف يزداد ويغدو أكبر من عمر الكون (فائق الطفولة). جوهريا، سوف «تتجمد» التآرجحات الكمومية إلى أن يغدو الكون مسنا بشكل كاف، لكي تعود تلك التآرجحات وتبدأ بالاهتزاز من جديد. وسوف ينمو الاهتزاز المجد أثناء التضخم ضمن إجرائية تضخم الاهتزازات الكمومية الابتدائية لتصبح موجات ثقالية كلاسيكية.

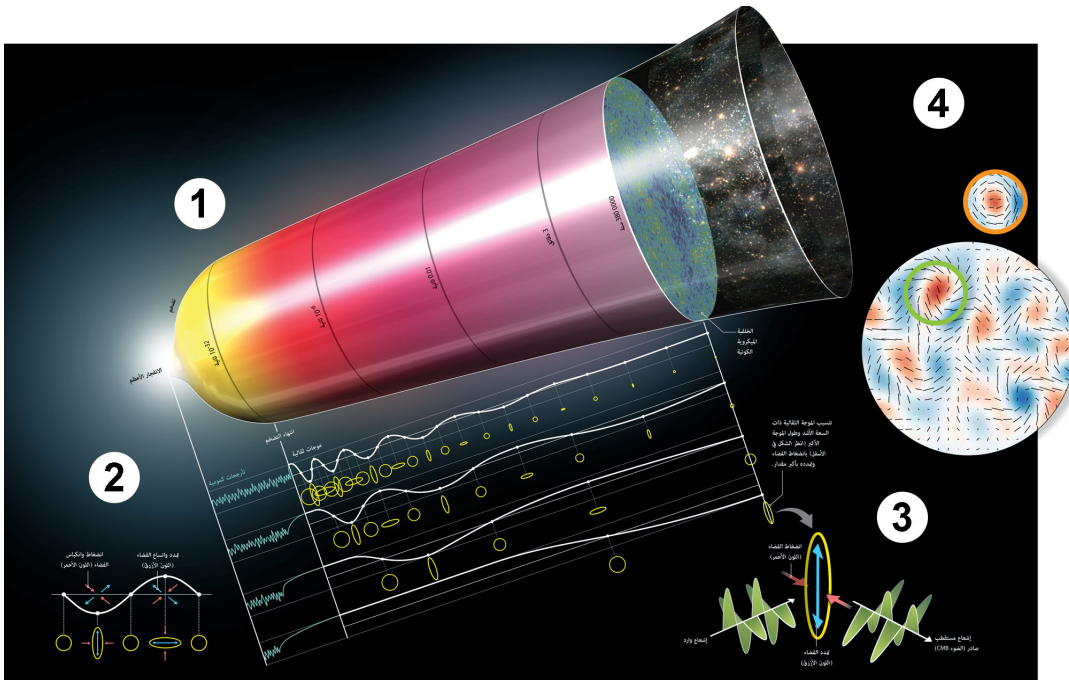
وفي الوقت نفسه تقريبا، الذي كان فيه <غوث> يقترح فكرة التضخم، بين فريقان من الفيزيائيين الروس - A. A. ستاروبينسكي و V. A. روباكوڤ - وزملاؤهما - وبشكل مستقل أن التضخم يُنتج دوما مثل هذه الخلفية من الموجات الثقالية، وأن كثافة الخلفية تعتمد ببساطة على الطاقة المخزنة في الحقل الذي يقود التضخم. وبعبارة أخرى، لو استطعنا إيجاد الموجات الثقالية الناجمة عن التضخم، فلن نحصل على مدفع دخاني يؤكد حدوث التضخم ذات مرة فحسب، بل سنحصل أيضا على مشهد نرى فيه مباشرة العمليات الكمومية التي قادت إلى التضخم.

دخان من المدفع (***)

إن أي إشارة كامنة، تُميز التضخم وغير قابلة للبس، لن تكون مفيدة ما لم تكن قابلة للكشف. وبينما نتوقع لمقاس التضخم أن يكون قريبا من المقاس الذي يمكن عنده للذبذبات الثقالية الكمومية أن تكون كبيرة، إلا أن ضعف الثقالة نفسها يجعل - كما يبدو - أرجحية احتمال السبر الفعلي لموجات ثقالية صدرت عن التضخم طفيفة في أحسن الأحوال.

[النتائج]

من تضخم إلى موجات ثقالية فإلى ضوء مستقطب (***)
إذا مر الكون تماما بعد ولادته بفترة تضخم تسببت بتمططه وانتفاخه سريعا،
لأمكننا إيجاد دليل على ذلك في بعض من أقدم ضوء نراه: إشعاع الخلفية
الميكروي الكوني (CMB) (22) الذي تم إصداره بعد نحو 380 000 سنة من
الانفجار الأعظم. وتتعاظم وتنتفخ التآرجحات الكمومية الموجودة في حقل
الثقالة للكون خلال فترة التضخم لتغدو موجات ثقالية، أو تغضنات في بنية
نسيج الزمكان spacetime. ويمكن لهذه الموجات أن تجعل الإشعاع CMB
مستقطبا، ويبدو أن تجربة التصوير BICEP2 قد تعرفت على مثل هذا
الاستقطاب.



(1) التضخم

كان الكون قبل التضخم كثيفا وصغيرا بشكل هائل. وخلال جزء طفيف من الثانية جعل التضخم الفضاء يتمدد ويتسع بأكثر من 25 مرتبة كبر.

(2) موجات ثقالية

خلال فترة تضخم تمططت واستطالت تأرجحات كمومية طفيفة موجودة ضمن الحقل الثقالي المتخلخل في أرجاء الكون. وسيغدو طول الموجة لبعض التأرجحات كبيرا جدا بحيث ستحتاج إلى زمن أكبر من عمر الكون - الذي كان طفلا وليدا حينها - من أجل أن تتم اهتزازها، ومن ثم سوف «تتجمد» إلى أن يغدو الكون مسنا بشكل كاف لكي تعود وتهتز من جديد. عندما انتهى التضخم تكون هذه الاهتزازات قد نمت وصارت موجات ثقالية بطول موجة كبير تجعل الفضاء حولها يمتد وينضغط على التناوب (القطوع الناقصة في الشكل).

(3) الاستقطاب

يمكن لانضغاط وتمدد الفضاء الناجمين عن موجات ثقالية أن يتسببا في جعل سعة الضوء CMB المتبعثر - والذي يشق طريقه نحو مقراباتنا - أكبر في اتجاه ما منها في الاتجاه المعامد -بعبارة أخرى، أضحي الضوء CMB مستقطبا.

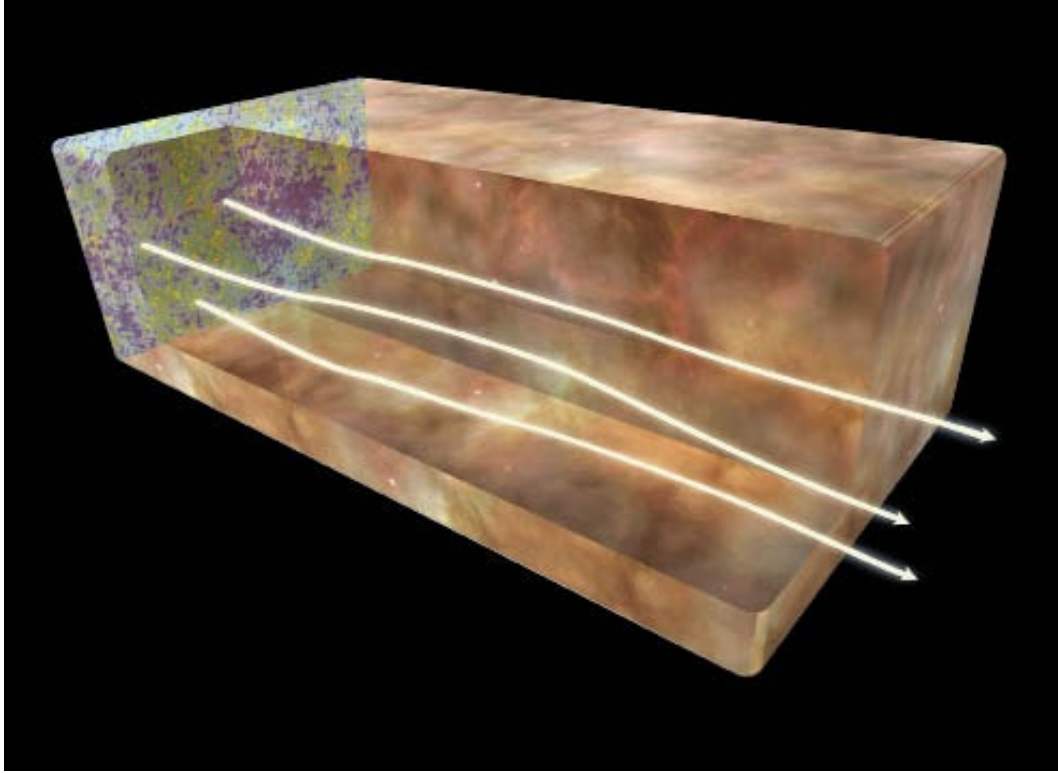
(4) دوLAB الهواء

يمكن للاستقطاب أن يأخذ أشكالا عديدة. والتأرجحات العادية في الكثافة وفي درجة الحرارة الموضعتين تُنتج في الفضاء نمط استقطاب متشعشا نصف قطري أو دائريا (الدائرة البرتقالية). ومن ناحية ثانية، ينجم عن الموجات الثقالية نمط استقطاب لافت للنظر بشكل دوLAB الهواء (الدائرة الصفراء). وتوافق البقع الحمراء هنا أماكن انضغاط الفضاء، ومن ثم تتكدس الفوتونات معا بشكل أشد عند هذه البقع فيكون الإشعاع أعلى حرارة، بينما تكون المناطق الزرقاء أكثر برودة.

[مصادر مثيرة للشكوك]

آثار ملوثة(*****)

لا يعد اكتشاف الاستقطاب في الإشعاع CMB (السطح المرقط باللون الأزرق) دليلا قاطعا بعد على وجود موجات ثقالية، وذلك بسبب وجود إجراءات وعمليات أخرى يمكنها تفسير وجود الاستقطاب هذا. فعلى سبيل المثال، انحنت مسارات فوتونات الإشعاع CMB (خطوط منحنية) حول تجمعات المجرات الجسيمة، حيث تتسبب ثقالة المجرات بقتل الزمكان the spacetime حولها ضمن إجراءات تدعى التنبؤ الثقالي gravitational lensing تُدخل بدورها استقطابا. وتُصدر حبيبات الغبار في مجرتنا درب التبانة أيضا ضوءا مستقطبا من الصعوبة بمكان تمييزه عن الإشعاع CMB. مؤخرا، بيّن ساتل پلانك أن مثل هذا الغبار يمكن أن يكون رائجا وسائدا بشكل أكثر مما كان يظن سابقا.



ومهمة السبر الأنف الذكر صعبة لكنها ليست مستحيلة. فإشعاع الخلفية الكوني الميكروي (CMB) (23)، قد يساعد في هذا الصدد. والإشعاع CMB، إشعاع تم إصداره عندما تبرد الكون الطفل بشكل كاف لأول مرة بحيث استطاعت البروتونات معها احتجاز الإلكترونات لتشكيل نوى؛ مما جعل الكون شفافا بالنسبة إلى الضوء الذي تمكن عندئذ من الانتشار ليصلنا الآن. وبهذا المعنى يكون الإشعاع CMB أقدم ضوء مرئي في الكون. وإذا وجدت موجات ثقالية بمقاييس كبيرة حين تم تكوين الإشعاع CMB - عندما كان عمر الكون 380 000 سنة - فسنكون قادرين على رؤية إشارات دالة عليها فيه. فقد كانت الإلكترونات الحرة حينئذ مغمورة في مغطس إشعاع ذي شدة في أحد الاتجاهات أكبر قليلا منها في اتجاه آخر، ويعود سبب

ذلك إلى أن موجات ثقالية ذات مقاييس كبيرة كانت تضغط وتكبس المكان في واحد من الاتجاهات بينما تمطه وتشدّه في الاتجاه الآخر. لو كان هذا الأثر كبيراً كفايةً لأمكنه تكوين تشويه بسيط في الإشعاع CMB يمكن أن يكون قابلاً للكشف. ولكن هناك أثراً آخر للموجات الثقالية أكثر دقة وحداقة حيث يمكن للتشويه المكاني الناجم عنها أن يتسبب بامتلاك الإشعاع CMB المتبعثر من قبل الإلكترونات لسعةً وشدةً على طول محور ما أكبر منهما بموازاة الاتجاه المعامد. وبعبارة أخرى، يمكن أن يكون الإشعاع CMB مستقطباً.

ولا يُعدّ قياس الاستقطاب في الإشعاع CMB بحد ذاته دليلاً على وجود موجات ثقالية. فهناك أسباب عديدة أخرى ممكنة للاستقطاب، كأن ينجم عن تآرجحات وتراوحدات تحتية مستبطنة في قيم درجة حرارة الإشعاع CMB، أو أن ينتج من منابع ممكنة في الطليعة القريبة من مثل غبار مستقطب في مجرتنا. ومع ذلك يستطيع المرء محاولة فصل الآثار الممكنة للموجات الثقالية عن المصادر الأخرى عبر استكشاف النمط المكاني للاستقطاب وشكله في السماء.

تعتبر، وبشكل خاص، أي عينة انفتالية⁽²⁴⁾ مميزة للموجات الثقالية، إذ إن مصادر الاستقطاب الأخرى تنحو إلى توليد عينات تغيب عنها مثل هذه الانفتالات. ويدعى نمط الاستقطاب المكانيان الممكنان النمطان E و B⁽²⁵⁾. وترتبط الأنماط B - وهي من النوع الانفتالي - بالموجات الثقالية، بينما يغلب على الأنماط E النشوء من منابع أخرى.

وهذه الفكرة المبصرة والخلاقة التي بزغت عام 1997 جعلت مجتمع العاملين على الإشعاع CMB مفعماً بالحيوية لأنها عننت أنه حتى ولو كانت التغيرات المباشرة في درجة الحرارة الناجمة عن موجات ثقالية بدئية صغيرة جداً لكي تكتشف مباشرة ضمن التشوهات الحرارية الأخرى في الإشعاع CMB، فإن قياس الاستقطاب في هذا الإشعاع قد يثبت هوية إشارة موجة ثقالية فائقة الصغر. وخلال العقد الحالي تقريباً تم تصميم العديد من التجارب التي تجرى إما على الأرض أو في الفضاء بحثاً عن هذا الصحن المقدس⁽²⁶⁾ الممكن للتضخم.

وحيث إن التجريبيين قاموا سابقاً بقياس التآرجحات والتراوحدات في درجة حرارة الخلفية الميكروية الكونية، فإن الباحثين يقدمون نتائجهم بدلالة نسبة إشارة استقطاب الموجة الثقالية الممكنة إلى مقدار إشارة التآرجح في درجة الحرارة الذي تم قياسه. ويرمز إلى هذه النسبة بـ r في الأدبيات.

النتائج الجديدة*****

إلى هذه السنة، لم يُبلَّغ إلا عن حدود عليا لاستقطاب الإشعاع CMB، ويعني ذلك معرفتنا بعدم تجاوز الاستقطاب لهذه الحدود وإلا لكان قد لاحظناه. فقد أعلن ساتل⁽²⁷⁾ بلانك التابع لوكالة الفضاء الأوروبية أنه وفقاً لقياساته المجرة، فإن قيمة r يمكن أن تقع عند أي نقطة في المجال الممتد من الصفر - الموافقة لغياب الموجات الثقالية - إلى قيمة الحد الأعلى المساوية تقريباً لـ 0.13. وهكذا أصيب عالم الفيزيائيين بالصدمة في الشهر 3/2014 عندما أعلنت تجربة تصوير الخلفية للاستقطاب الكوني الآتي مما وراء المجرات (BICEP2)⁽²⁸⁾ في القطب

الجنوبي أنها وجدت قيمة لـ r حوالي 0.2 - أي أكبر من الحد الأعلى الذي أشار إليه ساتل بلانك - مما يقترح وجود موجات ثقالية. وفي ذلك الوقت أعلنت أيضا تجربة التصوير BICEP2 أن فرصة كون الإشارة التي تمت ملاحظتها ناجمة عن خلفية زائفة أصغر من 1 في المليون، ومن ثم فإن كل شيء في هذه الإشارة كان يعكس صفة إشارة نتوقعها ناجمة عن التضخم.

ولسوء الحظ، لا يزال الوضع حتى لحظة كتابة هذه السطور غير مفصول فيه. ولأن ملاحظة الاستقطاب أمر في غاية الصعوبة، ومع أن الإشارة واضحة إحصائيا، فإن هناك إجراءات فيزيائية فلكية ممكنة تستطيع توليد آثار يمكنها تقليد ومحاكاة إشارة موجة ثقالية صدرت عن التضخم.

وبينما قام فريق التصوير BICEP2 بتفحص عدد من ملوثات ممكنة، فإن أصعبها على الإسقاط من الاعتبار هو الإشعاع الصادر عن غبار مستقطب موجود في مجرتنا. فقد درس العلماء المتعاونون في مشروع التصوير BICEP2 ما ظنوه غالبا تمرکزات غبار في مجرتنا واستنتجوا أن هذه المنابع لم تلوث بشكل كبير إشارة ذلك التصوير. لكن ساتل بلانك وخلال الأشهر الحالية اعترض هذه الدراسة وأعلن عن قياسات جديدة أشارت إلى أن مجرة درب التبانة the Milky Way قد تحتوي على غبار بمقدار أكبر مما افترضه فريق التصوير BICEP2. وحاولت مجموعات عمل عديدة إعادة تحليل إشارة هذا التصوير في ضوء هذه البيانات الجديدة، إضافة إلى تضمين نماذج أكثر تعقيدا وغنى عن خلفيات غبارية من تجارب أخرى، فتوصلوا إلى الاستنتاج القائل إن من الممكن للغبار أن يعيد إنتاج مجمل الإشارة الاستقطابية (أو الجزء الأكبر منها) التي ادعى وجودها التصوير BICEP2.

ومع أن هذه التطورات خمدت حماسة العديد في مجتمع الفيزيائيين فيما يخص نتيجة تجربة التصوير BICEP2، فإن فريق هذه التجربة متمسك بتقديراته، ولكنه يقبل الآن بعدم إمكان استبعاد تفسير للإشارة ناجم عن الغبار. ومع ذلك يشير العلماء إلى أن شكل الطيف الملاحظ ينسجم مع تنبؤات التضخم بشكل لافت للنظر - أفضل مما تفعله تنبؤات الغبار.

والأهم من ذلك، هو وجود جمهرة من تجارب جديدة متوفرة على الخط تسلط الضوء على إصدارات الغبار وتستكشف وجود إشارة استقطابية على مقاييس مختلفة وفي اتجاهات متباينة. وسوف يغدو التأكد أو الدحض لإشارة التصوير BICEP2 عبر التجربة - وبما يوافق العرف العلمي إلى أبعد حد - ممكنا خلال نحو السنة بعد نشر هذه المقال.

ما تكشف عنه الموجات الثقالية(*****)

لو تم التأكد من إشارة التصوير BICEP2، لازداد مقياس نافذتنا التجريبية المشرفة على الكون بمقدار أكبر مما حدث جوهريا في أي لحظة أخرى من التاريخ البشري. وتناثر الموجات الثقالية بشكل ضعيف جدا مع المادة، ومن ثم تستطيع الانتشار منذ بدء الزمان دون أن يعيقها شيء ما عمليا. ولن تمثل كشوفات التصوير BICEP2 الاكتشاف الأول للموجات الثقالية نفسها فحسب - كما تتنبأ بها أساسا النسبية العامة، بل إن هذه الموجات ستمنحنا إشارة

مباشرة عن الفيزياء العاملة عندما كان عمر الكون لا يتجاوز 10^{-36} ثانية، أي ما يمثل زمنا يسبق بـ 49 مرتبة كبر اللحظة التي تكون عندها الضوء CMB.

لو كانت إشارة التصوير BICEP2 فعلا المدفع الدخاني للتضخم، لتعين علينا تعلم الكثير عن الكون. ففي المقام الأول، سوف تفتضي الشدة المستدلة لإشارة الموجة الثقالية أن التضخم قد حصل عند مقاس طاقة قريب جدا من قيمة الطاقة التي توحدت عندها القوى الثلاث غير الثقالية في الطبيعة ضمن نظرية توحيدية كبرى، شريطة وجود تناظر جديد في الطبيعة يدعى بالتناظر الفائق supersymmetry. وبدوره، قد يقتضي وجود التناظر الفائق وجود فيض من جسيمات جديدة تقع كتلتها في المدى القابل للسبر بواسطة المصادم LHC عند إعادة تشغيله سنة 2015. وهكذا، لو كانت إشارة التصوير BICEP2 صحيحة لربما غدت سنة 2015 سنة مميزة بالنسبة إلى فيزياء الجسيمات، حيث ستتضح خلالها ظواهر جديدة قد تحمل معها تفسيراً لطبيعة القوى الأساسية في الكون.

وهناك اقتضاء آخر أقل تحزرا ينجم عن اكتشاف الموجات الثقالية الناتجة من التضخم. وكما وصفنا، فإن مثل هذه الموجات تولدت عندما تمّ تضخيم التآرجحات والتراوحات الكمومية البدئية في الحقل الثقالي خلال فترة التضخم. ولكن لو كانت هذه هي الحال لعنى ذلك وجوب وصف الثقالة عبر نظرية كمومية.

وهذه المسألة مهمة بشكل خاص لأنه ليس لدينا إلى الآن نظرية كمومية للثقالة معرّفة بشكل جيد - أي نظرية تصف الثقالة باستخدام القواعد الناظمة لسلوك المادة والطاقة عند المقاييس الفائقة الضالة. وتعد نظرية الأوتار (29) string theory - ربما - أفضل المحاولات حتى الآن، ولكن لا دليل على صحتها أو على قدرتها على إيجاد حل متسق لجميع الأسئلة التي ينبغي على نظرية كمومية تامة للثقالة التطرق إليها. إضافة إلى ذلك، وكما بين F . دايسون > [من معهد الدراسات المتقدمة في برنستون بولاية نيوجيرسي]، فلا يوجد جهاز أرضي قادر على كشف جرافيتونات gravitons، جسيمات كمومية مفترضة تحمل قوة الثقالة منفردة؛ لأن على مثل هذا الجهاز أن يكون ضخما وكثيفا لدرجة ينهار معها فيشكل ثقبا أسود قبل إتمامه عمل الملاحظة. وهكذا، كما خمن <دايسون>، لن نستطيع أبدا الادعاء بشكل أكيد أن الثقالة في نهاية الأمر توصف عبر نظرية كمومية.

ومع ذلك، إذا تم إثبات وجود موجات ثقالية صادرة عن التضخم فسيبدو أنها استطاعت تفادي حجة <دايسون>، إلا أنه لا تزال هناك ثغرة واحدة. فإذا وجدنا موجات ثقالية ناجمة عن التضخم، وهي أغراض كلاسيكية (غير كمومية)، فإننا نستطيع حساب مصدر هذه الموجات باستخدام الميكانيك الكمومي، ولكن أي نتيجة في الفيزياء الكلاسيكية - بما في ذلك حركة كرة البيسبول - يمكن حسابها عبر الميكانيك الكمومي. ولا تبرهن مشاهدتنا لكرة البيسبول طائفة في الهواء على أن الميكانيك الكمومي يقف وراءها، وفي الحقيقة ستبقى حركتها نفسها حتى ولو كان الميكانيك الكمومي غير موجود غائبا. فما نحتاج إلى إثباته هو أن توليد موجات ثقالية من التضخم، بخلاف حركة كرة بيسبول، ينشأ عن عمليات وإجرائيات كمومية.

ومؤخرا قمنا أنا وزميلي <F. ويلتشيك> [من معهد ماساتشوستس للتقانة (M.I.T)] بإغلاق هذه الثغرة المتبقية. وباستخدام التقنية الأكثر أساسية في الفيزياء - المدعوة بالتحليل البعدي⁽³⁰⁾ والتي تستكشف الظواهر الفيزيائية بدلالة تمثيلها ضمن وحدات تصف الكتلة والمكان والزمان - استطعنا أن نبين، اعتمادا على قواعد عامة جدا، غياب خلفية موجة ثقالية سببها التضخم وحده في حال انعدمت قيمة ثابت پلانك التي تتحكم في سعة وشدة آثار الميكانيك الكمومي في العالم. ومن ثمّ إذا كانت إشارة التصوير BICEP2 صحيحة وكانت تُعبّر عن قياس لموجات ثقالية آتية من التضخم، تعيّن عندها على الثقالة أن توصف عبر نظرية كمومية.

مقتضيات متعدد الأكوان(*****)

من وجهة نظر فهم الأصول الأولى لكوننا والسؤال المزعج عن سبب وجوده بأي حال من الأحوال، فإن سبر التضخم عبر ملاحظة موجات ثقالية يمتلك القدرة الكامنة على تحويل، ما يعتبره العديد واحدا من أكبر التخمينات الغيبية الإجمالية، إلى فيزياء صلبة محسوسة.

تذكر أن التضخم يقوده حقل يخزن ويحرر مقادير هائلة من الطاقة أثناء مروره بتحويل طور⁽³¹⁾. وفي نهاية المطاف تم الإثبات أن الخصائص المميزة لهذا الحقل تقتضي استمراره، بمجرد ما بدأت إجرائية وعملية التضخم، بنفخ وتضخيم الكون من غير حدود. وسوف يستمر التضخم من دون نهاية مانعا خلق الكون كما نعرفه، وذلك لأن أي كمية من مادة أو إشعاع موجودة مسبقا ستترقق وتتخفف لتغيب وتختفي بفعل التمدد والاتساع؛ مما لا يدع أي شيء البتة ما عدا مكانا فارغا يتمدد ويتسع بسرعة.

ومع ذلك، فقد وجد <A. ليند> [الفيزيائي في جامعة ستانفورد] طريقة للإفلات من هذه المشكلة. إذ بين أنه طالما وجدت منطقة صغيرة في المكان أتمت تحولها الطوري بعد تمدد واتساع كافيين، فإن هذه المنطقة يمكن أن تضم مجمل كوننا المرئي اليوم. وسوف يستمر التضخم في المناطق المتبقية من المكان إلى الأبد مع تشكل بذور صغيرة في مواضع مختلفة حيث تم إنجاز التحول الطوري. وسوف يبرز في كل من هذه البذور كون منعزل يعاني تمدا واتساعا موافقين لانفجار أعظم عالي الحرارة.

وضمن صورة «التضخم السرمدى»⁽³²⁾ هذه، يشكل كوننا، إذن، جزءا من بنية أكبر بكثير وقد تكون لامتناهية الكبر، وقد تحتوي في نهاية الأمر على عدد كبير كفيّا من أكوان غير مترابطة يمكن أن تكون قد تشكلت أو هي في طور التشكل أو أنها سوف تتشكل. إضافة إلى ذلك، يمكن للفيزياء النازمة في كل كون ناتج أن تكون مختلفة عنها في الأكوان الأخرى، ويعود ذلك إلى الطريقة التي يحدث فيها تحول الطور منهيّا التضخم في كل بذرة.

وتعرف هذه الإمكانية اليوم بفرضية تعدد الأكوان⁽³³⁾، فهي تقترح أن كوننا يمكن أن يكون واحدا من عدد كبير لامتناه من أكوان متباينة ومنفصلة. وفي هذه الحالة من الممكن أن تكون الثوابت الفيزيائية التحتية في كوننا متحلية بالقيم التي لها بسبب الصدفة لا غير. ولو كانت

هذه القيم مختلفة ولو بشيء طفيف؛ لما استطاعت كائنات مثلنا التطور لدرجة القدرة على قياسها.

ويعد هذا الاقتراح، الموسوم غالباً بتباهٍ نوعاً ما باسم المبدأ الإنساني⁽³⁴⁾، ممقوتاً بالنسبة إلى كثيرين، ويقود إلى عدد من المشكلات الممكنة التي لا تزال مهمة تبديدها ملقاة على عاتق الفيزيائيين. ويعتبر الكثير من الناس متعددات الأكوان والمبدأ الإنساني إشارتين تدلان على المدى الذي قد تبدو فيه الفيزياء الأساسية مبتعدة عما يعتبر من نواح أخرى علماً تجريبياً راسخاً لا عيب فيه.

لو كانت إشارة التصوير BICEP2 حقيقية وكانت تقيس موجات ثقالية صادرة عن تضخم، لتعين وصف الثقالة عبر نظرية كمومية.

ولكن إذا خولتتنا تجربة التصوير BICEP2 (مع تجربة المصادم LHC وتجارب أخرى) أن نسبر ظاهرة التضخم والتوحيد الكبير، فسنقدر ربما - وعلى نحو فريد - على تحديد الفيزياء الأساسية الناظمة للكون عند مقاييس الطاقة والزمن الموافقة. وتكمن إحدى النتائج في أن التحويل التضخمي الذي يعطي كوننا المرئي يتطلب تضخم <ليند> السرمدى. وفي هذه الحالة، ومع أننا قد لا نستطيع أبداً ملاحظة أكوان أخرى مباشرة، فإننا سنكون واثقين من وجودها، تماماً كما كان أسلافنا في أوائل القرن العشرين متأكدين من وجود الذرات مع أنهم بدورهم عجزوا عن رؤيتها مباشرة في ذلك الوقت.

فهل ستزودنا تجربة التصوير BICEP2 بمعلّم ثوري يرشدنا نحو فهم فيزياء المستقبل، كما فعلت التجارب المبكرة التي قادت إلى نظرية كمومية للذرات؟ لا نعرف الإجابة بعد. ولكن هناك إمكانية حقيقية في أنها - أو تجربة لاحقة لسبر استقطاب الإشعاع CMB - ستفتح نافذة جديدة على الكون تعود بنا وراءاً في الزمان نحو بدايته، وخارجاً في المكان نحو مسافات وظواهر يمكنها أن تجعل ركوب الرحلة العاصف الذي قدمته إلينا الفيزياء في القرن العشرين باهتاً مقارنة بما ستفتحه تلك النافذة على الكون.

المؤلف

Lawrence M. Krauss

<كراوس> فيزيائي نظري وكوسمولوجي. فهو أستاذ متميز Foundation Professor ومدير مشروع Origins في جامعة أريزونا الحكومية.



Grand Unification, Gravitational Waves, and the Cosmic Microwave Background Anisotropy. Lawrence M. Krauss and Martin White in **Physical Review Letters**, Vol. 69, No. 6, pages 869–872; August 10, 1992.

Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background. Uroš Seljak and Matias Zaldarriagain in **Physical Review Letters**, Vol. 78, No. 11, pages 2054–2057; March 17, 1997.

Statistics of Cosmic Microwave Background Polarization. Marc Kamionkowski, Arthur Kosowsky and Albert Stebbins in **Physical Review D**, Vol. 55, No. 12, pages 7368–7388; June 15, 1997.

Primordial Gravitational Waves and Cosmology. Lawrence M. Krauss et al. in **Science**, Vol. 328, pages 989–992; May 21, 2010.

A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing. Lawrence M. Krauss. Free Press, 2012.

Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2. P.A.R. Ade et al. (BICEP2 Collaboration) in **Physical Review Letters**, Vol. 112, No. 24, Article No. 241101; June 19, 2014.

A BEACON FROM THE BIG BANG(*)
THE ROAD TO INFLATION()**
GRAVITATIONAL-WAVE SIGNATURES(*)**
SMOKE FROM THE GUN(**)**
From Inflation to Gravitational Waves to Polarized Light(***)**
Contaminating Effects(***)**
THE NEW RESULTS(***)**
WHAT GRAVITATIONAL WAVES REVEAL(***)**

IMPLICATIONS FOR THE MULTIVERSE(*****)

- gravitational waves (1)
- gravity (2)
- quantum mechanics (3)
- the subatomic (quantum) world (4)
- general theory of relativity (5)
- the infant universe (6)
- “causal contact” (7)
- spontaneous symmetry breaking (8)
- the electromagnetic force (9)
- the weak force (10)
- phase transition (11)
- background field (12)
- the Large Hadron Collider (13)
- the strong force (14)
- grand unified theories (15)
- metastable state (16)
- grand unification (17)
- black holes (18)
- quantum mechanics (19) ؛ أو ميكانيك الكم
- the theory of relativity (20)
- special relativity (21)
- the cosmic microwave background (22)
- the cosmic microwave background (23)
- twisting pattern (24)
- E and B modes (25)
- holy grail (26)
- satellite (27) ؛ أو: قمر صناعي
- the Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2 (28)
- (29) انظر: «الكون الذكي»، مجلة العلوم، العددان 7/8 (2007)، ص 74: كتابان جديان يقولان إن الوقت قد حان لإسقاط نظرية الأوتار!
- dimensional analysis (30)
- phase transition (31)
- eternal inflation (32)
- the multiverse hypothesis (33)
- the anthropic principle (34)

