

الثقوب السوداء وموجات الجاذبية

يمثل اكتشاف موجات الجاذبية علامة فارقة من أجل فهم أفضل لفيزياء الكون، وبداية حقبة جديدة في مجال علم الفلك. كما إنه أول اكتشاف لمنظومة ثقب سوداء وأول ملاحظة لثقوب سوداء وهي تصطم وتتوحد. يُعدّ استخدام موجات الجاذبية كمصدر جديد للاستكشاف الكوني تطورًا مهمًا يُسببه الاكتشافات السابقة عبر استخدام موجات الراديو والأشعة السينية والتي أسفرت عن اكتشاف العديد من الأسرار الكونية غير المرئية بالنسبة للتلسكوبات الضوئية التقليدية. ومن خلال فتح نافذة جديدة على الكون، يمكن استخدام هذه التقنيات الجديدة لاكتشاف الثقوب السوداء وحل لغزها، فضلًا عن الكثير من الألغاز الكونية الأخرى وكذلك الكون المبكر وأسراره.

شعبان خليل

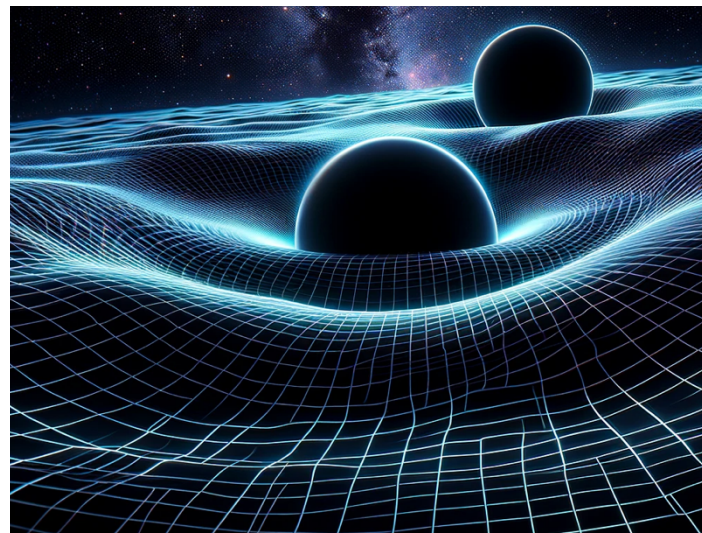
أستاذ فيزياء الطاقة العالية بمدينة
زويل للعلوم والتكنولوجيا، مصر

مركبة فضائية، تغدو في النسبية العامة أمثلةً لحركة قصورية في فضاءٍ مُقوّسٍ للمكان والزمان. وكانت إحدى نتائج نظرية النسبية أن حركة الكواكب المتحركة حول الشمس تختلف قليلاً عما يتنبأ به لها قانون نيوتن للجاذبية، وقد تمّ التأكد من هذا الاختلاف بقياس الحركة التبادلية في مدار كوكب عطارد. والنتيجة الهامة الأخرى لنظرية النسبية أنها تنبأت بأن قوة الجاذبية ذات تأثير على جسيمات الضوء المعروفة باسم الفوتونات رغم أنها عديمة الكتلة. لقد تم التحقق من هذه الحقيقة بشكل دقيق خلال الكسوف الكلي للشمس عام 1919 وأيضاً في العديد من التجارب الأخرى بعد ذلك، إذ أصبح واضحاً أن أشعة الضوء تتجاذب مع الأجسام ذات الكتل الهائلة مثل الشمس وتتحرف عن مسارها المستقيم عند المرور بالقرب منها. بالإضافة إلى ذلك، فإن أي جسم ضخم متسارع يولّد تغييراتٍ في هذا الانحناء الذي ينتشر من مصدره في جميع الاتجاهات بسرعة الضوء، ويعرف باسم موجات الجاذبية.

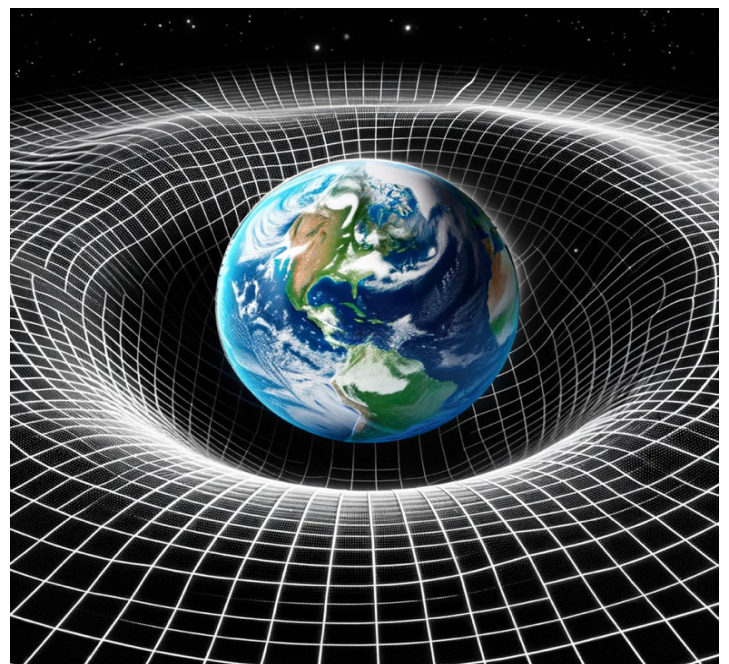
تظهر الموجات الجاذبية كت موجات في نسيج الزمكان نفسه، وتنتشأ نتيجة بعض العمليات مثل اندماج الثقوب السوداء أو النجوم النيوترونية. عندما تنتقل الموجات الجاذبية عبر الفضاء، فإنها تسبب تمدداً وانقباضاً طفيفاً في الفضاء الذي تمر فيه، كما هو موضح في الشكل التالي.

11 فبراير 2016 هو تاريخ مهم في تاريخ الفيزياء، ففيه تمّ الإعلان عن أول اكتشاف مباشر لموجات الجاذبية من خلال تعاون مشترك في مرصد موجات الجاذبية بالليزر (LIGO) في الولايات المتحدة. كان هذا خبراً رائعاً ومثيراً نظراً لأن موجات الجاذبية كانت آخر التنبؤات التي لم يتمّ التحقق منها لنظرية النسبية العامة لأينشتاين، التي تمّت صياغتها قبل حوالي 100 عام من أجل وصف الجاذبية. بعد ذلك، حصل على جائزة نوبل في الفيزياء لعام 2017 راينر فيس وكيب ثورن وباري باريش نظير دورهم في الكشف المباشر عن موجات الجاذبية.

وتعتبر النظرية النسبية العامة، التي وضعها ألبرت أينشتاين في 1915، نظريةً هندسيةً للجاذبية. ففيها لا تنشأ الجاذبية بسبب قوة ما، بل تنجم نتيجة تقوّس فضاء المكان والزمان. وينجم هذا التقوّس عن الطاقة والكتلة الموجودة في فضاء المكان والزمان رباعي الأبعاد (المُوحدّ تحت اسم الزمكان)، كما هو موضح بالشكل 1. وبالتالي فإن الظواهر المعروفة في الميكانيكا الكلاسيكية والتي كانت تُنسب إلى عمل قوة الجاذبية، مثل السقوط الحرّ، والحركة المدارية، ومسارات



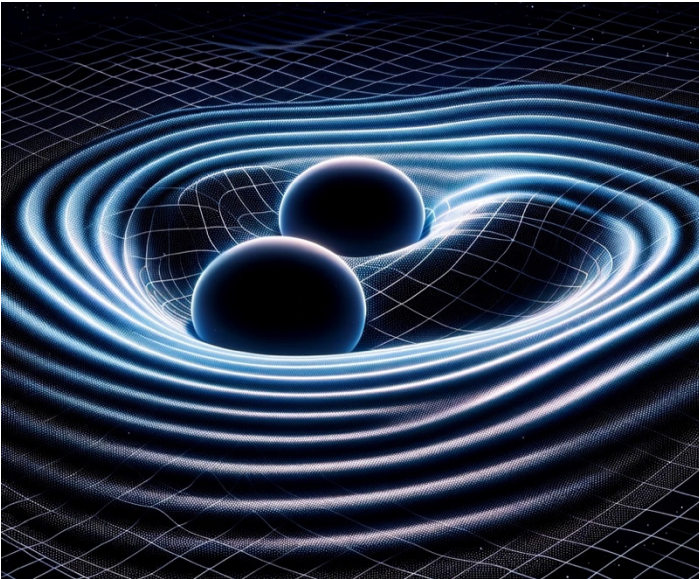
الموجات الجاذبية: تموجات في نسيج الزمكان



انحناء في فضاء المكان والزمان

الإشعاع الكهرومغناطيسي خارج أقطابه المغناطيسية— دَوَّارٌ مع نجم آخر حول مركز مشترك للكتلة. إن تقلص المدار، الذي تنبأت به النظرية النسبية، يرجع إلى الطاقة المنبعثة في شكل موجات الجاذبية. ومع ذلك، كانت موجات الجاذبية هذه ضعيفةً ويصعب اكتشافها. لذلك ركّز فريق LIGO على موجات الجاذبية الناتجة من ثقبين أسودين ضخمين تبلغ كتلتهما أكثر من 36 و29 ضعف كتلة الشمس، تمّ دمجهما

لتشكيل ثقب أسود بكتلة 62 مرة كتلة الشمس، على بعد حوالي 1.3 مليار سنة ضوئية. وتحولت الكتل المفقودة (ثلاث أضعاف كتلة الشمس) إلى موجات جاذبية قوية بما يكفي لاكتشافها بواسطة أجهزة على الأرض.



اندماج ثقبين أسودين

من الجدير بالذكر أن الثقوب السوداء هي أجسام ذات مجالٍ (حقلٍ) تجاذبيّ كبير جداً لدرجة أنه لا يوجد شيء يمكنه الإفلات من جاذبيتها، وحتى أشعة الضوء التي تدخل المدى المحيط بها لا تخرج منه ولذلك تظهر هذه الأجسام معتمّةً تمامًا. إن قوة المجال التجاذبي للثقوب السوداء يعادل أكثر من مليون نجم مثل الشمس مجمع في مركز مجرة، ويعتقد العلماء أن الثقوب السوداء قد تكوّنت من نجوم انهارت وكوّنت أجساماً ذات كثافةٍ لانهائية. فكما هو معلوم، إن الاندماج النووي في مركز أي نجم يُنتج إشعاعاً كهرومغناطيسياً يولّد ضغطاً هائلاً

ربما يكون من المفيد إجراء مقارنة بين موجات الجاذبية وموجات الكهرومغناطيسية المعروفة لدينا جميعاً، مثل موجات الضوء وأمواج الراديو والميكروويف والأشعة السينية والأشعة فوق البنفسجية وغيرها. فموجات الجاذبية تُعتبر تموجاتٍ في الزمان والمكان معاً، مما يعني أنها تنتشر في نسيج الكون. وتُسبب هذه الموجات ضغطاً وتوسّعاً في فضاء الزمان والمكان المتداخل أثناء انتقالها. وبالمقابل، تتألف الموجات الكهرومغناطيسية من تموجات في الحقل الكهرومغناطيسي، وهي التي تنتقل عبر الزمان والمكان بسرعة الضوء. تتراوح ترددات الموجات الكهرومغناطيسية عادة من 10^7 هرتز إلى 10^{20} هرتز، بينما تتراوح ترددات موجات الجاذبية تقريباً من 10^{-9} (واحد بالمليار) هرتز إلى 10^4 هرتز، مشابهة لترددات الصوت. لذلك يكون من السهل نسبياً الكشف عن الموجات الكهرومغناطيسية، وكذلك حجبتها، بينما يمكن لموجات الجاذبية اختراق مناطق الفضاء التي لا تستطيعه الموجات الكهرومغناطيسية. حيث أن موجات الجاذبية لا تتبدد أو تُمتص أثناء مرورها عبر المادة، لذلك فإنها تسمح بمراقبة اندماج الثقوب السوداء وربما أجسام غريبة أخرى في الكون البعيد. هذه النظم لا يمكن مراقبتها بوسائل تقليدية مثل التلسكوبات البصرية أو التلسكوبات الراديوية، لذا فإن علم الموجات الجاذبية يقدم رؤى جديدةً في عمل الكون. في علم الفلك، تم استخدام الموجات الكهرومغناطيسية منذ فترة طويلة لإنشاء صور للأجسام السماوية، بينما تقدّم الموجات الجاذبية منظوراً مميزاً، مشابهاً للاستماع إلى الأصوات التي تنبعث من هذه الظواهر الكونية، مما يوفّر منهجاً جديداً لفهم أسرار الكون.

لوحظ وجود موجات الجاذبية أولاً في السبعينيات، عندما تم رصد تقلص بطيء بمرور الوقت في مدار النجم النابض (pulsar)، وهو نجم نتروني مُمغنط للغاية يُصدر أشعة من

على حتمية وجود جسم تبلغ كتلته من 2.5 الى 3.5 بليون مرة من كتلة الشمس. ويرجح العالم الإنجليزي ستيفن هوكنج أن هناك العديد من الثقوب السوداء تكوّن في البدايات الأولى للكون، وإذا كان هذا الأمر صحيحاً فقد يكون هناك العديد من الثقوب السوداء في الفراغ ولكنها بعيدة عنّا جداً بحيث يصعب اكتشافها، ولكنها قطعاً تمثل نسبة مهمة من المادة الكلية للكون.

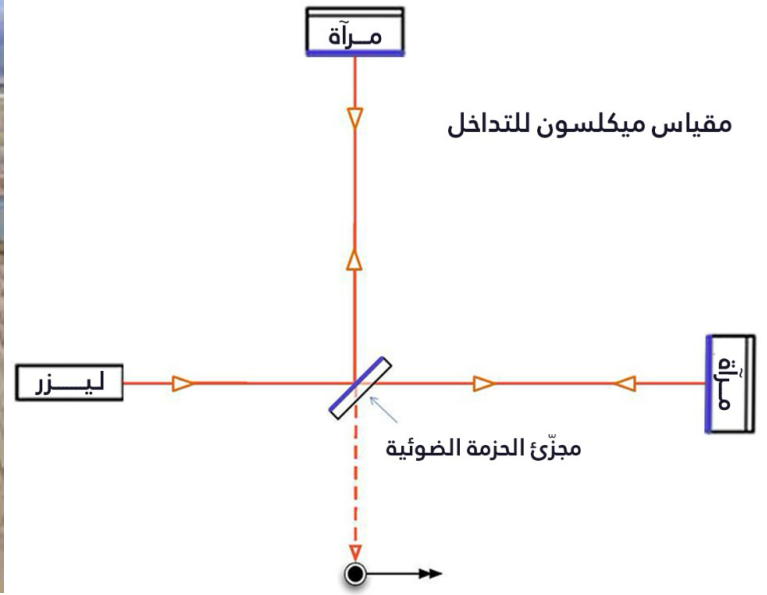


أول صورة للثقب الأسود

للكشف عن التغيير الصغير في المسافة الناجم عن مرور موجات الجاذبية في المكان، يستخدم العلماء أجهزة دقيقة للغاية تُعرف باسم مقاييس التداخل. تقوم هذه الأجهزة بقياس أنماط التداخل لأشعة الليزر المنعكسة بين المرايا الموضوعة عند أطراف أنابيب فارغة طويلة. عن طريق مراقبة التغيرات في أنماط التداخل الناتجة عن تمدد وضغط الزمكان بسبب موجات الجاذبية، يمكن للعلماء استنتاج وجود هذه الموجات العابرة للزمكان وتحديد خصائصها، وهذا ما تمّ تحقيقه في تجربة LIGO. تتألف هذه التجربة من موقعين رئيسيين، وهما LIGO Livingston في لويزيانا وLIGO Hanford في واشنطن، حيث احتوى كلّ موقع على منظومة متطورة من الأنابيب الطويلة، يبلغ طول كلّ منها حوالي 4 كيلومترات.

يُعتبر جهاز مقياس التداخل في تجربة LIGO تطويراً متقدماً لتجربة Michelson-Morley التاريخية التي أُجريت

للخارج، وهذا الضغط يعادل قوة السحب للداخل الناتجة عن الجاذبية مما يسبب انزلاق النجم. ومع نفاذ الوقود النووي تبدأ القوى الطاردة للخارج في التلاشي مما يؤدي الي تفوق قوى الجاذبية في ضغط النجم إلى الداخل. يُسبب هذا الانقباض زيادة درجة حرارة النجم ما يسمح للمواد النووية المتبقية من أن تُستخدم كوقود يساهم في اتزان النجم بعد انقباضه، وهكذا تتكرر هذه العملية إلى أن ينفذ الوقود النووي تماماً مما يؤدي إلى انهيار كَلْبٍ للنجم. يتوقف حجم انهيار النجم ونوع الجسم الناتج عنه على كتلة هذا النجم فإذا كان النجم ذا كتلة هائلة أكبر من حدِّ مُعيّن فإنه ينهار إلى ثقب أسود؛ أما إذا كانت كتلته أقلّ من ذلك فإنه قد يتحوّل إلى ما يُعرف باسم القزم الأبيض أو النجم النوروني. فعلى سبيل المثال، يتحوّل نجم كتلته حوالي ثمانين ضعف كتلة الشمس بعد انهياره إلى قزم أبيض يعادل حجمه حجم كرتنا الأرضية فقط، وبالطبع النجوم ذات الكتل الأكبر سوف تنهار إلى أجسام أصغر في الحجم. ومن الجدير بالذكر أن ملعقة شاي صغيرة من مادة القزم الأبيض تزن حوالي أكثر من خمسة أطنان من مادة الأرض. وهناك العديد من الأقزام البيضاء في مجرتنا وأول هذه الأجسام اكتشافاً هو ما يعرف بأسم القزم الأبيض Sirius B. أما بالنسبة للنجوم التي تصل كتلتها إلى حوالي 20 ضعف كتلة الشمس فإنها تنهار إلى ما يعرف بالنجوم النورونية، حيث تزن ملعقة شاي واحدة منها حوالي 100 مليون طن، وحتى الآن لم تتمكن من اكتشاف أيّ من تلك النجوم النورونية في الكون. وإذا زادت كتلة النجم عن هذا الحد فإنه يتحوّل بعد الانهيار إلى ثقب أسود حيث تنعدم فيه أيّ قوة طاردة للخارج، ولذلك يستمر في الانهيار إلى أن يصل لما يعرف بالحجم الحرج. في عام 1994 أكد تلسكوب هابل وجود ثقب أسود في مركز المجرة M87 حيث دلّت إشارة السرعات العالية للغازات في هذه المنطقة



صورة ومخطط مرصد موجات الجاذبية بالليزر (LIGO)

(والبروتون هو أحد تشكل الجسيمات التي تشكل نواة الذرة). في حالة وجود تغيير في المسافة بين المرايا نتيجة لتمدد أو انقباض الزمكان بسبب الموجات التجاذبية، فإن نمط تداخل لأشعة الليزر العائد يتشكل، وهذا ما يتم قياسه بواسطة LIGO. استناداً إلى هذه القياسات، تمكن فريق LIGO من اكتشاف وتأكيد وجود موجات الجاذبية وتحديد خصائصها بدقة.

تترك نظرية الانفجار العظيم التي تقدم وصفاً ناجحاً جداً لتطور الكون على مدى الأزمنة العديدة من الأسئلة بدون أجوبة، ومنها -على سبيل المثال- سبب تجانس الكون الهائل على النطاق الواسع. قد يبدو الكون المرئي غير متجانس، حيث تتوزع النجوم والمجرات وعناقيد المجرات توزيعاً غير متساوٍ بالنسبة للكتلة، إلا أن كل هذه التشكيلات في الكون لا تشغل إلا نطاقاً ضيقاً جداً، وإذا ما أخذنا متوسط هذه الكتل بالنسبة لبقية أجزاء الكون والتي تزيد عن 300 مليون سنة ضوئية، فإن الكون يبدو متجانساً تماماً. إن تجانس النطاق الواسع هذا يتجسد بشكل أكثر وضوحاً في إشعاع الخلفية الكونية (Cosmic Microwave Background) المتماثلة للغاية في اتجاهات مختلفة لدرجة أن الفرق بين درجات الحرارة في اتجاه معين

في عام 1887 لمقارنة سرعة الضوء في اتجاهين متعامدين من أجل اكتشاف الحركة النسبية للضوء من خلال الأثير، والتي أدت إلى نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين. تم تصميم جهاز LIGO لاكتشاف الحركة النسبية للضوء والتغيرات الدقيقة في المسافة بين المرايا نتيجة لتأثير الموجات التجاذبية، ويتكون من ذراعين بطول يُقدَّر بنحو 4 كيلومترات لكلٍ منهما وبزاوية قائمة بينهما مع مرايا في نهايتهما، حيث تُحفظ هاتان الذراعان في أنابيب مفرغة للحماية من العوامل الخارجية. في هذه التجربة، تُرسل أشعة الليزر إلى مُقسِّم الشعاع، حيث يُقسَّم إلى نصفين ويتجه كل نصف إلى ذراع من الذراعين المتعامدين. بعد ذلك، يُعكس الضوء عند نهاية كل ذراع باستخدام المرايا الموجودة هناك. يتم إرسال الضوء العائد بعد 400 انعكاس من المرآة في كل ذراع، ليتم جمعه مرة أخرى في مُقسِّم الشعاع ورصده عن طريق كاشف الصور. وتقوم المنظومة بقياس الفرق بين الضوءين الواردين لتحديد أيّ تغيير في طول الذراعين حدث بسبب موجات الجاذبية. لقد تم تصميم جهاز مقياس تداخل LIGO بدقة تصل 0.00001 من عرض البروتون

من خلال تحسين التقنيات، حيث سيتمّ تحسين حساسية الأجهزة الحالية مثل LIGO و Virgo و KAGRA، وبما يُزيد من قدرتها على اكتشاف الأحداث الفلكية مثل اصطدامات الثقوب السوداء والنجوم النيوترونية، وكذلك من خلال توسيع الشبكة العالمية للمرصد، فبالإضافة إلى المراصد الحالية، سيتمّ إنشاء مزيدٍ من المراصد في مواقع مختلفة حول العالم، ما يُزيد من فرص رصد الأحداث الفلكية وتحديد مواقعها بدقة أفضل. علاوةً على ذلك، سوف يسمح لنا اعتمادُ وتطويرُ مهامّ وإرساليّات فضائية مثل eLISA بالكشف عن موجات الجاذبية من مصادر أكبر، ممّا يوسع نطاق الاكتشافات ويفتح الباب أمام فهمٍ أعمق لظواهر الكون. وأخيراً، يساعد تطوير التقنيات التحليلية لموجات الجاذبية في فهم خصائص الإشارات بشكل أفضل واستخلاص المزيد من المعلومات منها. نذكر أيضاً في هذا السياق وجودَ فرصٍ متزايدة لرصد موجات الجاذبية الأولية التي نشأت في الكون المبكر. إن موجات الجاذبية الأولية هي تموجات في النسيج الزمكاني نتجت عن العمليات الكونية في المرحلة الأولى من تاريخ الكون، مثل الجاذبية الكمومية والتضخم الكوني. هذه الموجات ضعيفة نسبياً، ورصدها يشكّل تحدياً كبيراً، ولكن مع تطور التقنيات الحديثة وزيادة حساسية المرصد، من الممكن أن نتوقع تحسناً في القدرة على رصد هذه الإشارات. على سبيل المثال، قد تساعد تقنيات معينة -من مثل مشاريع تحسين حساسية LIGO و Virgo، بالإضافة إلى المشاريع المستقبلية مثل تلسكوب أينشتاين- في تحسين فرص الكشف عن موجات الجاذبية الأولية، وكذلك قد توفّر مهمة eLISA فرصاً جديدة لرصد موجات الجاذبية الأولية بشكل أكبر وبدقة أعلى. بالطبع، مع تقدم البحوث والتطور التكنولوجي، قد نحصل على فهم أفضل وأكثر دقة للكون الموهل في القدم وتأثيراته على تشكيل هيكل الكون الحالي.

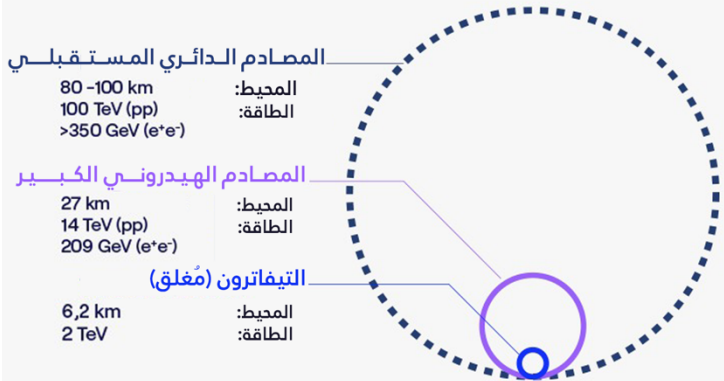
وعكسه يصل إلى واحد في مائة الألف. تمّ تفسيرُ هذا التماثل من خلال نموذجٍ جديد للكون الموهل في القدم يُعرف باسم الكون التضخمي، حيث اتّسع الفضاء بمعدّل كبير في وقت قصير جداً، في غضون 10^{-34} من الثانية. خلال هذه الفترة الصغيرة جداً، كان الكون قد تمدد -أو تضخّم- بنسبة هائلة، حيث تضاعف حجمه بحوالي 10^{75} مرّة. أول من اقترح نموذج الكون التضخمي في عام 1981 هو العالم Alan Guth. وبالتالي إذا لم تكن هذه التوسعة متماثلةً في جميع الاتجاهات، فإنها من الممكن أن تكون قد أصدرت إشعاعاً جاذبيّة يمكن اكتشافه اليوم كخلفية لموجات الجاذبية (Gravitational Waves Background). إن إشارة موجات الجاذبية الأولية (الناجمة عن الكون الموهل في القدم) ضعيفةٌ جداً بحيث لا يمكن لأيّ جهازٍ كشفٍ حاليٍّ للموجات التجاذبية أن يلاحظها، ويُعتقد أن الأمر قد يستغرق عقوداً قبل أن نتمكّن من إجراء مثل هذا الاكتشاف.

لكن في عام 2023، أعلنت فرق بحوثٍ متنوّعة (NANOGrav و EPTA و PPTA و IPTA) أنها وجدت أدلة على وجود خلفية عامة لموجات الجاذبية. ويؤكد مرصد شمال أمريكا نانوهيرتز لموجات الجاذبية بأنه تمّ توليدها على مدى فترات زمنية كونية من قبل ثقوب سوداء فائقة الكتلة. تمّ نشر نتائج مماثلة من قبل المجموعة الأوروبية لمراقبة توقيت نجم نتروني، حيث يُتوقّع تحقيقُ نتائجٍ اكتشافٍ تصل إلى مستوى موثوقية 5σ بحلول عام 2025. تتميز موجات الجاذبية هذه عن الأنواع التي تم الإبلاغ عنها سابقاً من مرصد تداخل الليزر لموجات الجاذبية (LIGO) وأجهزة الاستشعار الأخرى الموجودة على الأرض بأنها لن تكون جميعها قابلةً للنتبّع إلى أحداث الدمج الفردية: إنها سوف تُشكّل ما يسمى بالخلفية الجاذبية GWB.

إن مستقبل الكشف عن موجات الجاذبية واعدٌ للغاية وذلك

المُصادِم الدائري المستقبلي FCC مشروع بناء مُصادِم جديد في مخبر سيرن

تدرس منظمة سيرن الأوروبية للأبحاث النووية مُقترح بناء مصادِم جديد يُسمّى المُصادِم الدائري المستقبلي FCC أكبر بثلاث مرّات من المُصادِم الهادروني الكبير LHC، وبتكلفة مبدئيّة حوالي 20 مليار يورو. بينما يبلغ قطر الـ LHC 27 كم وتبلغ طاقته الأعظميّة 14 تيرا إلكترون فولط، سيبلغ قطر الـ FCC 91 كم وستبلغ طاقته الأعظميّة 100 تيرا إلكترون فولط. بالنسبة للبعض يُمثل هذا المشروع الطموح استثمارًا كبيرًا في البحث الأساسي، بهدف دفع حدود فهمنا لفيزياء الجسيمات والقوى الأساسية للطبيعة، فإذا تمّ تحقيقه، يمكن أن تُؤدّي هذه الآلة إلى اكتشافات رائدة تعمّق معرفتنا بالعناصر الأساسية للكون، مثل طبيعة المادة العاتمة أو ماهيّة الطاقة العاتمة. ولكن بالنسبة لآخرين لا يوجد أيّ تأكيد بقدره هذه الآلة المستقبلية على تحديد هويّة المادة والطاقة العاتمة، وجلّ ما ستفعله هذه الآلة هو تحسين الدقّة في قياس بعض بارامترات النموذج المعياري، وبالتالي إنفاق هذه المبالغ الضخمة ليس مُسوِّغاً على الإطلاق، بخلاف الـ LHC حيث كان الدافع الرئيس وراءه هو الكشف عن جسيم الهيغز، وهذا ما تحقّق فعلاً. مرجع



أخيرًا، يجب الإشارة أنه على الرغم من أن العمليات التي تولّد الموجات الجاذبية القابلة للقياس تكون عنيفةً للغاية، إلا أنه بمجرد وصول هذه الموجات إلى الأرض، فإنها تكون قد ضعفت بآلاف مليارات مرة، تمامًا كما تصبح الأصوات أضعف عندما تتحرك بعيدًا عن المصدر. من أجل ذلك، قد تُسبّب موجات الجاذبية انضغاطًا طفيفًا في أجسادنا بمقدار جزء من مليون متر، وهذا أقلّ بكثير من الضغط الذي نشعر به عندما نقفز ونهبط على الأرض.

خلاصة: في الختام، يعد اكتشاف موجات الجاذبية في 11 فبراير 2016 إنجازًا تاريخيًا في مجال الفيزياء، وهو يؤكد على دور العلم والبحث العلمي في توسيع آفاق معرفتنا وفهمنا للكون. من خلال تأكيد نظرية النسبية العامة التي وضعها ألبرت أينشتاين قبل قرن من الزمن، أثبت العلماء أن التفاعلات الفيزيائية الأكثر تعقيدًا يمكن فهمها وتفسيرها بواسطة العقل البشري والأدوات التقنية المتقدمة.

تعكس جائزة نوبل التي حصل عليها العلماء المشاركون في هذا الاكتشاف قيمة البحث العلمي والتعاون الدولي في تحقيق التقدم العلمي. ومن خلال استمرار الدراسات والأبحاث في مجالات الفيزياء والفضاء، يمكننا توقع مزيد من الاكتشافات الرائعة التي ستغيّر منظورنا للعالم وتعزز فهمنا لعمق وتعقيدات الكون الذي نعيش فيه.

بعض المراجع

1. Castelvechi, Davide; Witze, Witze (11 February 2016). "Einstein's gravitational waves found at last". Nature News, doi:10.1038/nature.2016.19361.
2. Michio Kaku, Einstein's Cosmos: How Albert Einstein's Vision Transformed Our Understanding of Space and Time, ISBN: 9780393051650,039305165X
3. Kitchin, C.R., Understanding Gravitational Waves, Springer press, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-74207-2>
4. Seth Fletcher, The First Picture of the Black Hole at the Milky Way's Heart Has Been Revealed, Scientific America, May 2022.
5. Alan H. Guth and Paul J. Steinhardt, The Inflationary Universe, Scientific American, May 1984.