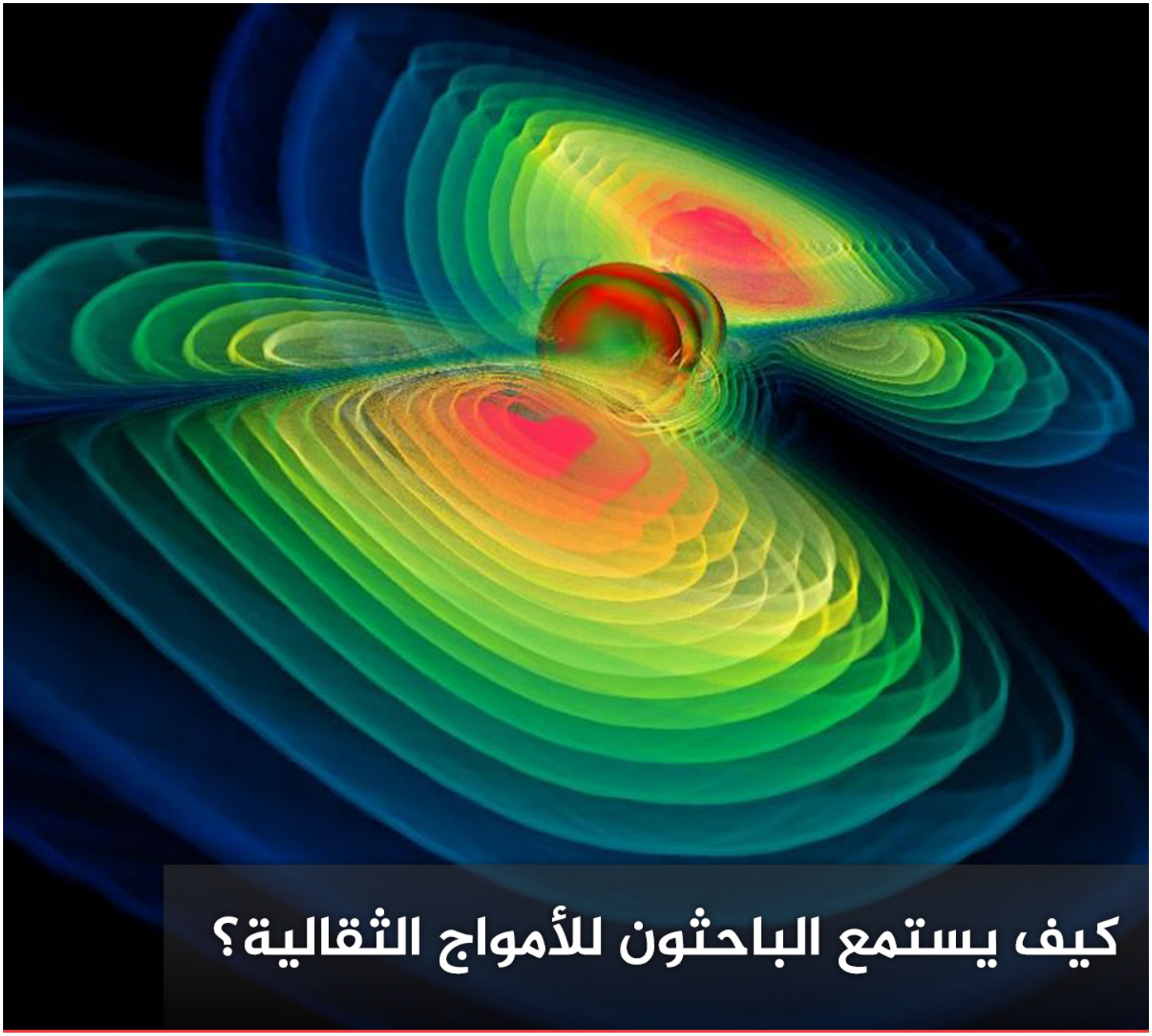
كيف يستمع الباحثون للأمواج الثقالية

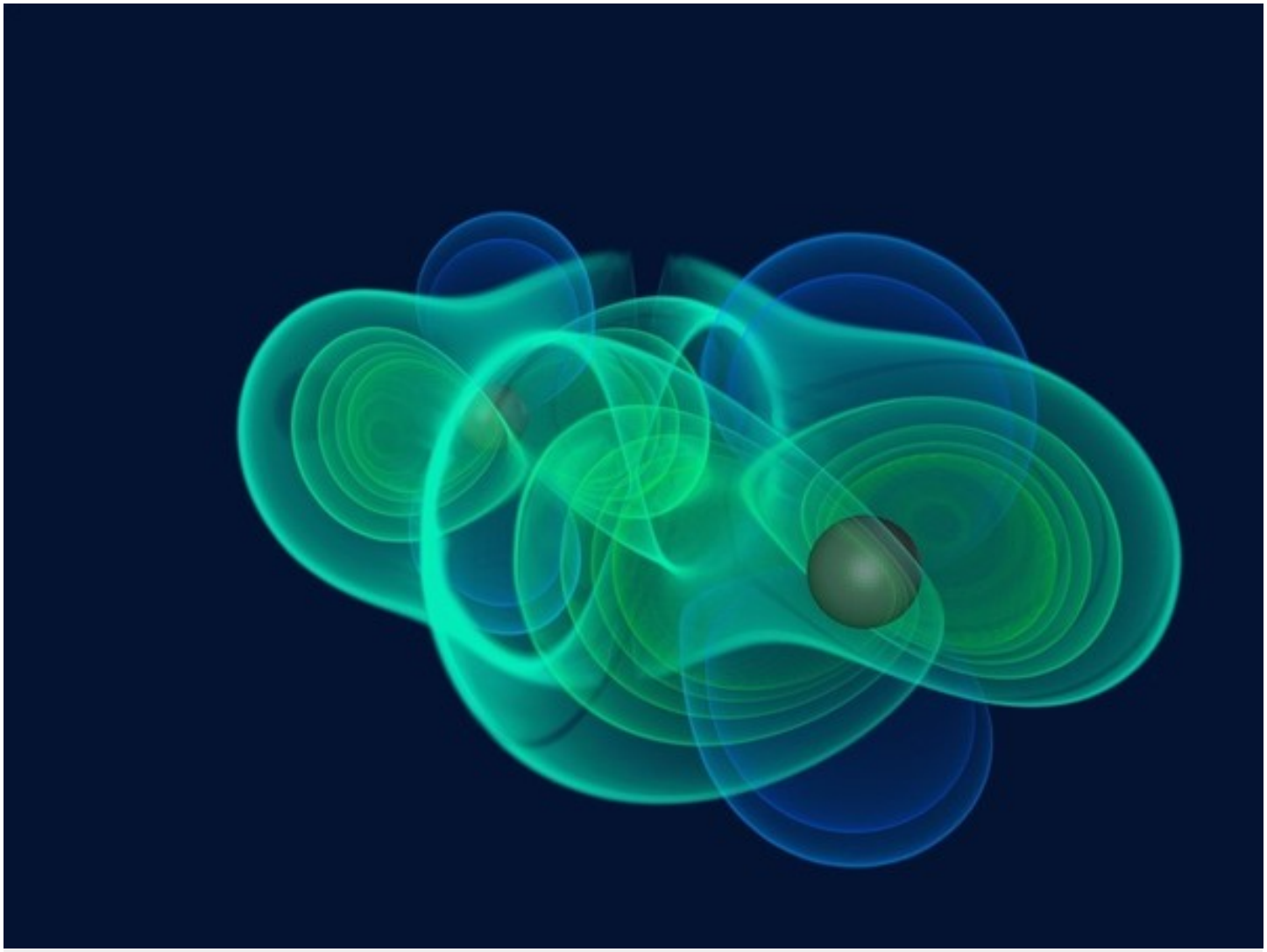


المستقبل يكمن في الفضاء: من المستحيل تجنب الاهتزازات في الكواشف الارضية حيث تؤثر على قياس الأمواج الثقالية التي تقل شدتها عن عشرة هرتز. ولذلك يخطط فريق دولي من العلماء لمشروع eLISA "هوائي مقياس التداخل الليزري الفضائي المطور". وابتداءً من عام 2034 ستقوم ثلاثة أقمار صناعية بملاحقة الأرض في مدارها وعلى مسافة 50 مليون كيلومتراً، حيث ستؤلف مثلثاً يبلغ طول ضلعه ملايين الكيلومترات. وسيكون مقياس التداخل الليزري هذا قادراً على استقبال الأمواج الثقالية ذات الترددات المنخفضة من جميع أنحاء الكون المرئي.

المصدر: NASA / JPL-Caltech

افترض ألبرت آينشتاين في نظريته النسبية العامة منذ قرن من الزمان وجود الأمواج الثقالية. ولكن هذه التشوهات بقيت حتى الآن مخفية بعناد في الزمكان عن أعين الرصد المباشر. يقتفي الباحثون في معهد ماكس بلانك لفيزياء الجاذبية في هانوفر أثر هذه الظاهرة بواسطة الكاشف الليزري **GEO600**.

لم يتجول إسحاق نيوتن في الجنة، وإنما في متنزه إنجليزي. وبالرغم من ذلك شغلته التفاحة –أو بطريقة أكثر دقة: هل ضربت التفاحة نيوتن على رأسه، أم أنها تدحرجت أمام قدميه؟ من الصعب الجزم بذلك. هناك بعض الشكوك بشأن حقيقة قصة سقوط التفاحة. ولكن مثل معظم الأساطير، فإن من الممكن القول إن هذا تلفيقٌ جيد. تحدّث عن ذلك هنري بيمبرتون للمرة الأولى عام 1728 في سيرته الذاتية لعالم الفيزياء الشهير.



التصادم الكوني: تتولد الموجات الثقالية حين تدور الثقوب السوداء حول بعضها البعض أو حتى تتصادم كما يظهر في هذه المحاكاة بواسطة الكمبيوتر. المصدر: MPI for Gravitational Physics / Institute for Theoretical Physics, Frankfurt / Zuse Institute Berlin

وفي الحقيقة فقد أُغلقت جامعة كامبردج لعامي 1665 و1666 بسبب الطاعون، وكان لدى الأستاذ الكثير من الوقت للتفكير. على أية حال فإن الصدفة التي جمعت التفاحة ونيوتن قد أثمرت. ويُقال أنها جعلته يفكر أن هذه الحركة هي نفس الظاهرة الفيزيائية التي تكمن وراء حركة قذف حجر في الهواء، ودوران القمر حول الأرض، وحركة سقوط التفاحة على الأرض: "**إنها الجاذبية**".

وهكذا كانت بداية تاريخ الجاذبية في منتصف القرن السابع عشر، وهي القوة التي تصل إلى أبعد زوايا الكون وتحافظ على تماسك العالم. وصيغت بدقة أكثر: "كتلتان نقطيتان تجذب إحداهما الأخرى بقوة على طول خط تقاطعهما، ويتناسب ذلك طردياً مع كتلتيهما، وعكسياً مع مربع المسافة بينهما". ينسجم قانون نيوتن للتجاذب بشكل رائع مع حياتنا اليومية. وهذا ما يفسر لماذا تدور الأرض حول الشمس وأيضاً لماذا تسقط الهواتف النقالة "**الأنواع الغالية منها بالطبع!**" على الأرض وتنكسر. وهذا القانون جيدٌ جداً حتى الآن ، ولكن هناك عقبة صغيرة واحدة: لا زالت تطبيقات قانون الجاذبية محدودة.

عندما رصد علماء الفلك في القرن التاسع عشر حركة الكواكب بطريقة أفضل بواسطة المعدات، فقد لاحظوا أن النقطة التي يكون فيها عطارد أقرب ما يمكن إلى الشمس في مداره "**وهي نقطة الحضيض**" تتغير في الفضاء. على الرغم من أن هذا التأثير يحدث مع جميع الكواكب، حيث تسحب بعضها البعض بسبب قوة الجاذبية المتبادلة بينها، إلا أن حركة محور دوران نقطة الحضيض لعطارد تحولت واتضحت أكثر وبشكل أكبر أيضاً مما كان متوقعاً وفقاً لقوانين نيوتن في الفيزياء: يبلغ مقدار التغير في كل قرن من الزمن حوالي 1/80 من الدرجة. هل هذا التأثير ناجمٌ عن جرم سماوي مجهول في الخفاء؟ أم أن بناء النظرية الكلاسيكية للجاذبية فيه خطأ بالتصميم؟

في عام 1907 قدّم "**خبيرٌ من الدرجة الثانية**" في مكتب براءات الاختراع في برن قدم أفكاراً قوية عن الجاذبية. وكان قبل ذلك بعامين قد قدم خمس مقالات لمجلة **Annalen der Physik**، إحداها كانت بعنوان "**الديناميكا الكهربائية للأجسام المتحركة**". وفي هذه المقالة هزّ الباحث الهاوي أسس الفيزياء تماماً، كما فعل أيضاً في ملحق من ثلاث صفحات بعنوان: "هل **يعتمد القصور الذاتي للجسم على محتواه من الطاقة؟**".

سُمي المنشوران في وقت لاحق بالنظرية النسبية الخاصة. يدعى هذا المؤلف العبقري ألبرت آينشتاين. ويعتبر 1905 عاماً رائعاً "**سنة المعجزة**". في 20 يوليو/تموز احتفل آينشتاين مع زوجته ميليفا بمنشوراته. وقد وصف نهاية احتفاله الباذخ في بطاقة بريدية لصديقه كونراد هابتشيت: "للأسف أصبحنا كلانا تحت الطاولة، سكرانان تماماً".

لقد فصلت نظرية النسبية الخاصة عقيدة نيوتن حول الزمن المطلق، من بين أمور أخرى، ودحضت الادعاء بأن السرعات تضاف لبعضها مباشرة. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن يكون التغيير في تأثير الجاذبية على جسم ما ظاهراً في الكون كله وفقاً لنظرية نيوتن. والمعنى من وراء ذلك هو أن الجاذبية تعمل في كل مكان على الفور. وهذا لا يتوافق مع تقرير آينشتاين، والذي جاء فيه أن هناك حداً أقصى طبيعي للسرعة لانتشار آثار أي قوة، ألا وهي سرعة الضوء (**س= 300,000 كم/ث**).

وبالتالي فقد وضع الفيزيائي قوانين الجاذبية على أسس جديدة. وأشار في وقت لاحق: "لقد خطرت لي أسعد الأفكار في حياتي في عام 1907: هل يمتلك حقل الجاذبية وجوداً نسبياً فقط؟ لأنه إذا افترضنا وجود شخص يراقب سقوطاً حراً، على سبيل المثال من سقف المنزل، فسيبدو له أثناء السقوط أنه لا وجود لمجال الجاذبية ـ على الأقل في المنطقة المحيطة به. وتبدو كل الأشياء التي يُسقطها هذا المراقب في الواقع وكأنها لا تزال في حالة من السكون أو بحركة منتظمة، بغض النظر عن طبيعتها الكيميائية أو الفيزيائية".

ويمكن تفسير خدعة آينشتاين بعبارات بسيطة جداً: إنه يحاكي الجاذبية باستخدام التسارع، وبما أن التسارع يولد قوة كما يحدث بسرعة في مصعد التعجيل، على سبيل المثال: إذا انتقل أشخاص داخل سيارة عازلة للصوت وعازلة للضوء، فهم سيعتقدون أن الجاذبية الأرضية قد ازدادت فجأة. ولكن هل الجاذبية هي قوة دائماً، كما أعرب نيوتن؟

إن إدراك أن الجاذبية هي مسألة جزئية من النظام المرجعي قد قادت ألبرت آينشتاين للأفكار الثورية التي قدمها في عام 1915 بعد ثمان سنوات من العمل في نظريته النسبية العامة. تنتج الانحرافات الصغيرة في نموذج نيوتن عن نظرية النسبية العامة لحركة الكواكب. وتشاهد بشكل واضح لدى تسارع حركة عطارد حين يصبح في أقرب نقطة له من الشمس. ويمكن تفسير نقطة الحضيض وحسابها

بالضبط: "في بعض الأيام كنت مع نفسي وبإثارة عيد الميلاد"، كتب آينشتاين بعد أن كان قد حل هذا اللغز.

وفي نهاية المطاف فإن نظرية النسبية العامة هي نظرية مجال ـ تماماً مثل الديناميكا الكهربائية لماكسويل. قام عالم الفيزياء الاسكتلندي وعالم الرياضيات جيمس كلارك ماكسويل في معادلاته بالربط بين المجال الكهربائي والمغناطيسي وبين الشحنات والتيارات. واليوم جربنا نتائج الديناميكا الكهربائية على سبيل المثال، فهي تجلب الإذاعة والتلفزيون الى بيوتنا كموجات كهرومغناطيسية، ويتم إنشاء الموجات بتسريع الشحنات الكهربائية. على الرغم من الاختلاف في بعض النقاط، فإن النظرية النسبية العامة والديناميكا الكهربائية يمتلكان العديد من الأشياء المشتركة.

تؤثر الحقول الناتجة عن توزيع الشحنات في الديناميكا الكهربائية على الجسيمات المشحونة، والتي بدورها يكون لها تأثير على الحقول. ويحدد توزيع المادة في نظرية النسبية العامة هندسة الزمكان، والتي لها تأثير على توزيع المادة، والذي يغير بدوره هذه الهندسة في النهاية.

وتشترك النظريتان بشيء آخر، فعلى سبيل المثال تنتقل الاضطرابات في المجالات الكهرومغناطيسية في نظرية ماكسويل من نقطة انطلاقها كشحنة كهربائية بسرعة الضوء. أما بالنسبة لنظرية آينشتاين فإن الحركة المتسارعة للكتل في حقل الجاذبية تؤدي إلى اضطرابات تتحرك خلال الفضاء بسرعة الضوء. وفي كلتي الحالتين يمكن الاستعاضة عن كلمة "**اضطرابات**" بكلمة "**أمواج**".

البحث الميداني: يمتد ذراعا الكاشف الليزري GEO600 في روث، بالقرب من هانوفر، على مسافة 600 متراً. يتوسط المشروع البناء الموجود في الوسط والذي يضمن نظام الليزر (في الخلف والأيسر). المصدر: Harald Lück / MPI for Gravitational Physics / Leibniz Universität Hannover

إذا قفزت صعوداً وهبوطاً على الترامبولين فإنك ستفقد الطاقة "**ليس فقط بشكل سعرات حرارية**" وتولد موجات في الزمكان. ولكن الإنسان يمتلك كتلة منخفضة ويقفز ببطء نسبياً، ولذلك فإن الأمواج الثقالية المنبعثة من الإنسان صغيرة ولا يمكن قياسها.

أما الفضاء فهو موطن الكتل الكبيرة، ويتمثل الترامبولين فيه بالزمكان. كل شيء يتحرك هنا، لأنه لا يمكن لأي جرم سماوي واحد أن يبقى في حالة السكون في مكان واحد. تؤدي الأرض إلى انحناء الفضاء حين تدور حول الشمس، وهي تصدر أمواجاً ثقالية بقوة 200 واط. ولكن حتى هذه الأمواج لا تزال ضعيفة جداً بحيث لا يمكن تعقبها بواسطة كاشف.

ولحسن الحظ فإن الكون يشهد اهتزازات أكثر عنفاً في الزمكان، مثلاً حين يدور اثنان من النجوم النيوترونية أو الثقوب السوداء حول بعضهما البعض بسرعة فائقة أو حتى حين تصطدم ببعضها البعض، أو حين ينفجر نجم كبير في مستعر أعظمي (**supernova**). تولد مثل هذه الأحداثُ الكونية أمواجاً ثقالية بطاقات تصل إلى حوالي 1045 واط.

وقد كشف عالما الفلك الأمريكيان راسل هالس وجوزيف تايلور أن الفترة المدارية لاثنين من النجوم النيوترونية وهما (**PSR 1913+16**) تتناقص نظراً لأن النظام المزدوج يفقد الطاقة وتنبعث منه أمواج ثقالية. وقد حصل الباحثان بسبب هذا الكشف على جائزة نوبل للفيزياء في عام 1993. ولكن كيف يمكن أن يتم الكشف عن هذه الأمواج في الزمكان؟ وكيف تمكنا من الإحساس بها؟

دعنا نتخيل لهذا الغرض ورقة مطاطية افتراضية يمسك بها شخصان ـلنسميهما ألبرت وإسحاقـ من الطرفين المتقابلين. يقوم ألبرت وإسحاق بسحب الورقة في الوقت نفسه من خلال الرجوع خطوتين أو ثلاثة إلى الوراء. وتبقى أيديهما على مقربة من الجسم أثناء حركتهما بعيداً عن بعضهما. وبهذه الطريقة ستصبح الورقة المطاطية أطول وأضيق في الوقت نفسه.

بعد ذلك يقترب ألبرت وإسحاق من بعضهما البعض مرة أخرى، وتمتد أيديهم بعيداً عن جسميهما: في هذه الحالة تصبح ورقة المطاط أقصر وأعرض في نفس الوقت. وفي النهاية يعود الاثنان إلى وضعهما الأصلي. تم خلال هذه التجربة رسم صورة ألبرت آينشتاين على الورقة المطاطية، والتي تمددت وانضغطت كما لو أن موجة الجاذبية التي انتشرت من الأسفل إلى الأعلى خلال مستوي ورقة المطاط قد شوهت الفضاء.

في تجربة ثانية سنرسم دائرتين بعيدتين عن بعضهما قدر الإمكان على ورقة مطاطية. ندعو الأولى بنقطة البداية والنهاية، وندعو الثانية بنقطة الانعطاف. بعد ذلك ننظم جيشاً من النمل المدرب جيداً. نضع كلَّ النمل في نقطة البداية والنهاية ونسمح لواحدة بعد الأخرى بالتحرك إلى نقطة التحول والعودة مرة أخرى على فترات زمنية منتظمة. طالما كان النملُ يتحرك بسرعة ثابتة، فسيعود جميع النمل إلى نقطة النهاية في الفترات الزمنية نفسها، وستكون الفواصل الزمنية بين عودته مشابهة للفواصل الزمنية بين بدئه بالتحرك.

الآن قام ألبرت وإسحاق بسحب الورقة المطاطية لمضاعفة حجمها. يسبب هذا تمدداً بمسيرة جيش النمل، وتتسع الفواصل بين النمل: يصل النمل عائداً إلى النهاية بفاصل زمني يبلغ ضعف وقت الفاصل الأصلي. وليس هذا التأخير في الوقت سوى حدثٍ مؤقت، لأنه لا ينطبق إلا على النمل الموجود على الطريق فقط. إذا بقي تمدد الورقة بسبب عامل أو اثنين، فإن النمل الذي يبدأ بالخروج سيعود أيضاً

بنفس الفترات الزمنية مرة أخرى. وموجة الجاذبية (**التي تمت محاكاتها**) تجعل هذا النمل يتبع بعضها بعضاً بشكل أسرع أو أبطأ مما هو متوقع.

وكما وضحنا سابقاً، فإن موجة الجاذبية تغير المسافة الفاصلة بين الأجسام الموجودة في الفضاء بزاوية قائمة على اتجاه الانتشار. ومن الصعب للغاية قياس ذلك. دعونا نتخيل السيناريو الأسوأ في مجرتنا: انفجار نجم ضخم. حين تصل الأمواج الثقالية المنبعثة من هذا الانهيار إلى نظامنا الشمسي بعد بضعة آلاف من السنين فهي ستغير المسافة بين الشمس والأرض (1.5 × 1011 **متراً**) من خلال قطر ذرة الهيدروجين فقط (10−10 **متراً**) وخلال فترة زمنية تبلغ بضع عشرات من الألف من الثانية.

ولذا يعتقد ألبرت أينشتاين أنه من المستحيل الكشف عن الأمواج الثقالية. ورغم ذلك فقد قام عددٌ من العلماء لاحقاً بتحضير المعدات التي توقعوا أنها قد تنجح بذلك. يتكون الجيل الأول من المعدات من أسطوانات من الألمنيوم تزن عدة أطنان ومزودة بأجهزة استشعار. ستؤدي أي نبضة من الأمواج الثقالية إلى تأرجح هذه الأسطوانات مثل جرس الكنيسة. ومع ذلك فإن كشافات الرنين هذه لم تُظهر أية نتائج على الرغم من وجود مكبرات الصوت الحساسة للغاية.

ولذلك فقد قام الباحثون بتصميم أجهزة استقبال أكثر حساسية. وقد استندوا في ذلك على مبدأ فكرة تجربة الورقة المطاطية. ولهذا الغرض فقد استبدلنا نقطة البداية والنهاية بالليزر، واستبدلنا نقطة الانعطاف بالمرآة، ولنتصور أن النمل هو قمة موجة لإشارة ضوئية. ومن أجل الكشف عن أية تأخيرات صغيرة في وقت الوصول، فلا بد من أن يُعدل مسار الشعاع الثاني ليكون عمودياً على الأول بحيث تتراكب موجات الضوء الصادرة عن هذين الذراعين.

وقد تم تصميم جهاز لهذه الغاية منذ حوالي عام 1882، وهو مقياس ميكلسون للتداخل (**Michelsen interferometer**) الذي تم تصميمه أصلاً لاختبار ثباتية سرعة الضوء. وقد تم تجهيزه بأحدث ما توصلت إليه التكنولوجيا، وهو مثالي للكشف عن الأمواج الثقالية. وتعمل جملة الكاشف الليزري **GEO600**، والذي يقع في حقل في روث بالقرب من هانوفر، وفقاً لمبدأ مقياس ميكلسون للتداخل.

تحت الأرض: تسير أشعة الضوء تحت الارض في الكاشف الليزري GEO600 عبر أنابيب الفولاذ المقاوم للصدأ المتموجة التي يبلغ قطرها 60 سم وسماكة جدرانها 0.9 ملليمتر (في الأيمن). المصدر: MPI for Gravitational Physics / University of Hanover

يتم توليد الضوء بواسطة عدة ديودات ليزرية، وهي مماثلة لتلك الموجودة في مشغل الأقراص الليزرية، حيث تتألف من بلورة صغيرة تحول الضوء إلى شعاع ليزر الأشعة تحت الحمراء، وتبلغ قدرته عشرة واط بعد الإعداد عالي الدقة والتصفية (**أي أكثر بكثير من مؤشرات الليزر**)، ولكنها من الضعف بحيث لا يمكن أن تفيد في القياسات.

لذلك فقد وظف الباحثون "إعادة تدوير الضوء" (**light recycling**): مرآة تقوم بإرجاع كل الضوء غير المستخدم إلى الليزر، والذي يوجه مرة أخرى نحو مقياس التداخل. وتتكرر هذه العملية عدة مرات لتضاعف قوة الضوء الى 1000 واط، وكذلك تزيد من حساسية الكاشف أيضاً. ويكون الليزر مستقراً للغاية، فهو ينتج ضوءاً بنفس السعة والتردد لشهور ولسنوات.

يتألف ذراعا مقياس التداخل من أنابيب بطول 600 متر يتم وضعها في خنادق. والفكرة هي أن أشعة الليزر يمكنها الانتقال داخل الأنابيب دون أن تضطرب بفعل التأثيرات الخارجية. وفي الواقع لا بد من التخلص من الاهتزازات الناجمة عن حركة المرور، وحركة الزلازل الطبيعية أو الأمواج في بحر الشمال. وتقيس أجهزة قياس الزلازل الاهتزازات، والتي يتم بعد ذلك تصحيحها بواسطة محركات كهروضغطية.

بالإضافة إلى هذا النظام النشط فقد تم تجهيز جميع المكونات البصرية بعنصر آخر مُنفعل: المخمدات مزدوجة الطبقة والمصنوعة من المطاط والفولاذ المقاوم للصدأ. تعمل النوابض الصفيحية والبندول متعدد المراحل كمخمدات للاهتزاز. وللمحافظة على التقلبات الحرارية في كثافة الهواء عند أدنى مستوى ممكن، فقد تم وضع مقياس التداخل في أنابيب الفولاذ المقاوم للصدأ المفرغة من الهواء. وتولد مضخات التربو الجزيئي تفريغاً فائقاً يتجاوز 10−11 بار.

يعتبر **GEO600** مشروعاً ثنائياً بقيادة معهد ماكس بلانك لفيزياء الجاذبية وجامعة لايبنيز في هانوفر في ألمانيا، بالإضافة إلى جامعتي غلاسكو وكارديف في بريطانيا. وتعتبر هذه المنشأة واحدة من عدة مواقع أرضية للتنصت، والتي خصصت للإصغاء إلى تناغم النجوم.

وستقوم الولايات المتحدة الأمريكية في نهاية عام 2015 بوضع الكاشف **aLIGO** قيد العمل، وذلك في موضعين منفصلين يبعدان عن بعضهما البعض 3000 كيلومتراً. ويمثل هذا الكاشف الجيل الثاني من مقاييس التداخل الكاشفة، حيث يمتلك الكاشف الموجود في كل موضع ذراعين يبلغ طول الواحد منهما أربعة كيلومترات، ويستخدم العديد من تقنيات القياس الموجودة في **GEO600**. ويتم حالياً توسيع الكاشف **Virgo** الموجود قرب مدينة بيزا في إيطاليا بحيث يصل طول كل ذراع إلى ثلاثة كيلومترات، كما يعمل العلماء اليابانيون في الوقت الراهن على بناء كاشف **KAGRA** تحت الأرض وبنفس الحجم. ومن المتوقع أن يتم استقبال أول الإشارات من الفضاء بنجاح خلال السنتين القادمتين.

ومع ذلك فإن علماء الفلك الآن يفكرون بالفعل بالمستقبل، وتحديداً بعام 2034 حين يصبح مقياس التداخل **eLISA** قادراً على الإصغاء من الفضاء للأمواج الثقالية ذات التردد المنخفض القادمة من الكون المرئي كله، مما يساعد بالتالي في استكمال الكواشف الأرضية.

النقاط الأساسية في النظرية النسبية الخاصة

- لا يوجد أثير لحمل الضوء والموجات الراديوية.
- تتخذ جميع القوانين الفيزيائية الشكل نفسه في النظم التي تتحرك بشكل ثابت بالنسبة لبعضها البعض.
- يرتبط الزمان والمكان ببعضهما البعض بشكل غير قابل للانفصال.
- لا توجد تزامنية مطلقة.
- تشكل سرعة الضوء ثابتاً كونياً وهي مستقلة عن الحركة نسبة لمصدر الضوء.
- تعتبر الطاقة والكتلة متكافئتين، والكتلة هي مقياس مباشر للطاقة الموجودة في الجسم، والضوء ينقل الكتلة.

النقاط الأساسية في النظرية النسبية العامة

- الجاذبية ليست قوة بالمعنى التقليدي، بل هي إحدى الخواص الجغرافية لهندسة الزمكان.
- تؤدي المادة إلى انحناء الزمكان، وتزداد درجة الانحناء مع زيادة كتلة الجسم، وتنقص مع الابتعاد عنه. يشكل الزمان والمكان كميات ديناميكية ويحددان بدورهما حركة المادة.

- يلعب الزمن دوراً هاماً في النظرية النسبية العامة. حين تكون الساعة قرب جرم سماوي ثقيل فإن الزمن يسير بشكل أبطأ مقارنة بالمناطق الأبعد حيث يكون تأثير الجاذبية أقل.

- التاريخ: 2015-07-08
- التصنيف: أسئلة كُبرى

#النسبية العامة #النظرية النسبية الخاصة #الامواج الثقالية #الديناميكا الكهربائية #GEO600

المصطلحات

- **مقياس التداخل (interferometer)**: عبارة عن أداة تقوم بقياس التداخل (Interferometry)
- **المستعرات الفائقة (السوبرنوفا)** (1 :(**supernova**. هي الموت الانفجاري لنجم فائق الكتلة، ويُنتج ذلك الحدث زيادة في اللمعان متبوعةً بتلاشي تدريجي. وعند وصول هذا النوع إلى ذروته، يستطيع أن يسطع على مجرة بأكملها. 2. قد تنتج السوبرنوفات عن انفجارات الأقزام البيضاء التي تُراكم مواد كافية وقادمة من نجم مرافق لتصل بذلك إلى حد تشاندراسيغار. يُعرف هذا النوع من السوبرنوفات بالنوع Ia. المصدر: ناسا

المصادر

- phys.org
- الصورة

المساهمون

- ترجمة
  - علي كاظم
- مُراجعة
  - فراس الصفدي
- تحرير
  - هبة الأمين
- تصميم
  - نيكولا رحال
- نشر
  - مي الشاهد