هل ستحل النسبية التشابكية محل النسبية الآينشتاينية؟

إعداد وترجمة د. جواد بشارة

العالم المعجزة ألبرت أينشتاين اكتشف صورة الكون المرئي نظرياً لكنه لم يستطع رسمها عملياً، هذا العالم اللامع المولود في ألمانيا في مارس 1879 وتوفي في الولايات المتحدة عام 1955 ألبرت أينشتاين، زعزعت نظريته الأساسية للنسبية المفهوم البشري للزمان والمكان والكون. لكن علماء آخرين سارو على خطه وطوروا إنجازاته ومنهم أوليفييه مينازولي عالم فيزياء فلكية نسبية ، والعضو في مختبر أرتميس في مرصد كوت دازور ، والمنخرط جدًا في اكتشاف موجات الجاذبية. الذي اقترح مؤخرًا نظرية جديدة للجاذبية ، تسمى النسبية المتشابكة ، حيث تتبع المسار الذي اتخذه ألبرت أينشتاين بالفعل مع ما يسمى مبدأ ماخ. قرر موقع المستقبل ، الذي أجرى بالفعل عدة مقابلات مع الباحث بمناسبة الاكتشافات التي تم إجراؤها باستخدام موجات الجاذبية ، تقديم هذه تلخيص لهذه النظرية . غالبًا ما يفسر أن نتاج أينشتاين كان مستوحى مما أسماه هو نفسه مبدأ ماخ لاكتشاف نظرية النسبية العامة ولإنشاء النموذج الأول لعلم الكونيات النسبي في عام 1917. في المقال الذي نشره حول هذا الموضوع في ذلك العام ، أدخل أينشتاين في معادلات نظريته النسبية في الجاذبية ثابتًا ، وهو الثابت الكوني الشهير. سيكون هناك الكثير لنقوله عن الأسباب الدقيقة التي دفعت أينشتاين لإدخال هذا الثابت ، كان لابد من إدخال الثابت الكوني Λ ، الذي يمكن تفسير أصله بطرق مختلفة ، ولكن على وجه الخصوص من أجل تلبية مبدأ ماخ ، كما كتب آينشتاين لاحقًا ، ولكن ما هو مبدأ ماخ في الواقع؟ عادة ، يتم تقديمه على النحو التالي ، كما يتضح من مقاطع من مقدمات مشهورة لمبادئ علم الكونيات النسبية لمبادئ علم الكونيات والجاذبية لمايكل بيري ، ومقدمة في علم الكونيات بقلم جايانت نارليكار .منذ حوالي أربعة قرون ، لتفسير حقيقة أن التجارب على الأرض لا يبدو أنها تظهر الحركة الدوارة للأرض حول الشمس ويمكن القول أيضًا أنها تساعد في تفسير الحركات الظاهرة للكواكب في الإطار المرجعي المرتبط بالشمس ودوران الأرض حولها كباقي الكواكب الأخرى، تحت نموذج مركزية الشمس لكوبرنيكوس ، الأمر الذي قاد غاليليو إلى افتراض أن قوانين الميكانيكا هي نفسها لجميع المراقبين المتحركين الذين يمكن اعتبارهم تقريبًا على نحو ممتازًا مثل خط مستقيم وموحد. لذلك كانت السرعات مرتبطة بمراقب معين ويمكننا ببساطة صياغة مبدأ القصور الذاتي ، وهو أساس الميكانيكا .هذه قصة مبدأ النسبية! كان غاليليو هو من وضع أساساته في بداية القرن السابع عشر قبل أن يضعه نيوتن ، بعد بضعة عقود ، كما إنه أحد المبادئ الأساسية الثلاثة للميكانيكا الكلاسيكية ، بافتراض أن نفس القوانين الفيزيائية تنطبق على شيء ما ، سواء أكان أم لا متحركاً في الفضاء. بعد فترة وجيزة من الشك في النصف الثاني من القرن التاسع عشر ، كان ألبرت أينشتاين أخيرًا هو الذي أعاد للفيزياء كل نبلها في بداية القرن التالي ، من خلال نظرية النسبية الخاصة وطور ... مبادئ الجمود والنسبية ، وأسس الفيزياء ولكن ، كما كان نيوتن سيوضح ذلك ، إذا بدت السرعة نسبية وفقًا لمبدأ غاليليو للثبات لقوانين الميكانيكا ، فإن التسارع يبدو بالفعل مطلقًا والتجارب الميكانيكية جعلت من الممكن إظهار ما إذا أننا كنا في إطار مرجعي متسارع ، أم لا ، وبالتالي لاكتشاف حركة الأرض حتى تحت السماء الملبدة بالغيوم التي لا تظهر حركات النجوم والشمس ، وهو ما سيوضحه فوكو بتجربته الشهيرة مع البندول. أوضح نيوتن أيضًا أنه عندما يدور المرء دلوًا من الماء ، فإن قوة الطرد المركزي التي تشوه سطحه لإعطائه شكل مكافئ تُظهر بوضوح الطابع المطلق للتسارع ، وهو التسارع الذي يشير إلى وجود نقطة مرجعية مطلقة من خلالها يمكن أن تعطي قيمة مطلقة متساوية لقوة التسارع الطاردة المركزية ، أي الفضاء نفسه .لم يقتنع عالم الرياضيات

والفيلسوف الألماني جوتفريد ليبنيز في زمن نيوتن ولا لاحقًا في النصف الثاني من القرن التاسع عشر الفيزيائي والفيلسوف النمساوي إرنست ماخ بذلك. فقد وجدوا فكرة 'مساحة فارغة تمامًا لأنه كيف يمكن للمرء أن يرتبط بها حقًا بحركة ، على عكس ما يوفر جسمًا ماديًا ، على سبيل المثال سطح الأرض. رسم ماخ حلاً لجعل معادلات الميكانيكا ثابتة لجميع الأطر المرجعية ، معجلة أم لا ، وبالتالي لجعل التسارع نسبيًا مثل السرعة. إذا أخذنا تجربة دلو الماء لنيوتن ، فإن ما يجب مراعاته وفقًا لماخ ، هو أولاً أن الماء يتحرك بالنسبة للنجوم على مسافات طويلة في الكون. يمكن ملاحظته وخاصة أن هذه النجوم تمارس قوة على الماء في حالة تحرك جزء من المادة مبتعدًا عن بعض نجومه ليقترب من البعض الآخر. مجموعة القوى التي تمارس ، على سبيل المثال ، من قشرة كروية من النجوم تجتذب في جميع الاتجاهات ستنتج بعد ذلك قوة القصور الذاتي لهذا الجزء من المادة واستمرارها في حركة مستقيمة وموحدة في غياب مصدر قريب وأكثر كثافة، ويمتلك القوة ، على سبيل المثال الأرض. يمكن للمرء أن يحصل على تفسير لقصور الجسم ، وجزيئات المادة المكونة له ، وهذا يعني ميله إلى الاستمرار في حالة من الراحة والسكون أو الحركة المستقيمة المنتظمة في غياب القوى (بصرف النظر عن مجموع قوى الجاذبية التي تمارسها النجوم والتوزيعات الأخرى للمادة في جميع أنحاء الكون المرئي. وفقًا لماخ ، إذا أزلنا جميع النجوم وبشكل عام جميع الأجسام المادية باستثناء دلو نيوتن الدوار ، فإن قوى القصور الذاتي وبالتالي قوة الطرد المركزي ، وحتى كتلة الماء ، ستختفي. لذلك سيكون من المستحيل إثبات دوران الدلو على نفسه ليس فقط من خلال تجربة ميكانيكية ولكن أيضًا لأنه لن يكون لدينا أي شيء لمراقبة الحركة ، مثل حركة النجوم الموجودة في القبو السماوي إذا استبدلنا دلو نيوتن بالكرة الأرضية المعزولة والفريدة في الفضاء ومعنا نحن على سطحها. هناك طريقة أخرى لتقديم الفكرة التي اقترحها ماخ وهي أن نقول إنه من حيث المبدأ لا توجد تجربة تسمح لنا بالقول ما إذا كانت الأرض تدور بالنسبة لقشرة من النجوم أو المجرات الثابتة تمامًا أو ما إذا كانت الأرض ثابتة وقشرة المادة هي التي تدور حولها لأنه في كلتا الحالتين ، تأتي القوى الموجودة من كل مادة في الكون فيما يتعلق بما يسمى قوى القصور الذاتي فيما يتعلق بالمادة الموهوبة بالكتلة .ها هي قصة مبدأ القصور الذاتي! صاغه غاليليو لأول مرة في القرن السابع عشر ، وهو يشكل أحد المبادئ الأساسية الثلاثة لميكانيكا نيوتن. بعد ثلاثة قرون ، كان هذا المبدأ هو أصل الثورة المفاهيمية التي أدخلها ألبرت أينشتاين والتي تثبت أن الجاذبية ليست قوة بل مظهر من مظاهر انحناء الزمكان .اعتقد أينشتاين أنه حصل على شكل ملموس لأفكار ماخ من خلال نظريته عن النسبية العامة ، والتي اقترحت بعض الحسابات بالفعل أن القصور الذاتي بين الأجسام يعتمد على تفاعلات الجاذبية بمعنى النسبية العامة. حتى أنه ذهب إلى حد القول بأن وجود الزمكان نفسه مرتبط ارتباطًا وثيقًا بوجود المادة لدرجة أن إزالة المحتوى المادي للكون سيؤدي إلى اختفاء الزمكان. لكن في هذه النقطة ، كان عليه أن يعيد النظر في رأيه عندما أوضح له عالم الفلك الهولندي ويليم دي سيتر أن نظرية النسبية العامة تحتوي بالفعل على حلول كونية للكون ... حتى بدون مادة. حتى نهاية حياته ، كان أينشتاين يعمل على نظريات موحدة وغير ثنائية لتعميم نظريته النسبية في الجاذبية. لم يكن الأمر يتعلق فقط بإثبات أن المجال الكهرومغناطيسي كان أيضًا مظهرًا من مظاهر هندسة معينة من الزمكان ، ولكن يجب أن تكون جسيمات المادة نفسها تركيزات للطاقة ، وبالتالي الكتلة وفقًا لمعادلته $E = mc^2$ ، لحقل أحادي واحد بما في ذلك الجاذبية والكهرومغناطيسية .العديد من النظريات النسبية للجاذبية صارت ممكنة بعد وفاته في عام 1955 ، واستمرت الأبحاث حول مبدأ ماخ والنظريات التوحيدية للفيزياء وقادت منذ الستينيات إلى اقتراح ما يسمى بنظريات التنسور القياسي مثل نظريات كارل برانس وروبرت ديك ، والتي تسمى نظرية برانس ديك والتي يمكن أن تظهر أيضًا من

نظريات كالوزا كلاين Kaluza-Klein ، كما أوضح باسكوال جوردان ، أحد مؤسسي ميكانيكا الكم ورائد نظريات .KK في حالة نظرية برانس ديك المستوحاة من ماخ وأفكار المشرف على أطروحة ستيفن هوكينغ دينيس سياما (انظر كتب بيري ونارليكار المذكورة سابقًا) ، يعتمد ثابت الجاذبية لنيوتن على محتوى الكون ويمكن أن يختلف في المكان والزمان كما هو الحال مع الحقول القياسية ، وهي أسهل الأمثلة على ذلك لفهم درجة الحرارة أو الضغط على الأرض .نظرًا لأن نظرية الجاذبية تُصلح هندسة الزمكان بمجال محدد هنا أيضًا في أي نقطة في الزمكان ولكن في شكل موتر ، فإننا نتحدث بشكل عام عن نظريات الجاذبية ، القريبة لبرانس ديك. كنظريات موتر عددي. يمكننا اختبارها من خلال دراسة حركات الأجسام المادية ، ومسار أشعة الضوء وبشكل عام انتشار الموجات الكهرومغناطيسية في الزمكان المنحني وأيضًا مع موجات الجاذبية المنبعثة من الأنظمة الثنائية للنجوم المدمجة (الثقوب السوداء أو النجوم النابضة .(أنتج معهد Henri-Poincaré فيلمًا وثائقيًا مدته 32 دقيقة عن عالم الرياضيات الاستثنائي جوزيف لويس لاغرانج ، في إنتاج مشترك مع CNRS Images وبالشراكة مع معهد لاغرانج في باريس حول هذا الموضوع و مساهمة لاغرانج. يتتبع لاغرانج حياة جوزيف لويس لاغرانج ، عالم الرياضيات خلال عصر التنوير. في البداية كان أكاديميًا محميًا من الأقوياء ، ثم أصبح لاغرانج تدريجيًا أستاذًا مسؤولًا عن تثقيف المواطنين الجدد خلال الثورة الفرنسية. يتتبع الفيلم خطواته ، ويأخذنا إلى تورين ، مسقط رأسه ، ومن إلى برلين حيث أكمل عمله في الميكانيكا السماوية ، قبل أن يعود إلى باريس. وهكذا يشكك الفيلم في مشاركة العلماء في الحياة السياسية في ذلك الوقت). معهد هنري بوانكاريه ساعد في صياغة جميع النظريات البديلة لنظرية الجاذبية لأينشتاين باستخدام إطار عام جدًا للفيزياء اكتشفه عالم الرياضيات العظيم لاغرانج منذ أكثر من قرنين ، واستنادًا إلى ما يسمى بمبدأ الفعل الأقل. عند تطبيقه على الفيزياء الحديثة ، فإنه يؤدي إلى النظر في ما يسمى مبدأ لاغرانج (انظر للاقتناع بمقررات الفيزياء النظرية للفيزيائي الروسي العظيم ليف لانداو) وهذه هي الطريقة التي يمكن بها وصف معادلات أينشتاين للجاذبية وفي نفس الوقت لوصف المعادلات في مجالات الفيزياء الأخرى التي تصف جسيمات المادة والقوى الأخرى (النيوترينوات ، والكواركات ، والفوتونات ، والغلونات ، وما إلى ذلك) ، بما في ذلك مجال البوزون الشهير هيغز. دعونا نحدد بواسطة R ، نظرية لاغرانج لأينشتاين (ترتبط Rبموترات انحناء ريمان الشهيرة التي تصف انحناء هندسة الفضاء ذي البعد (n و Lm ، اللاغرانجية لبقية الفيزياء. في حالة النموذج القياسي للفيزياء الراسخة ، يمكن كتابة إجمالي لاغرانج الذي يلخص معرفتنا بجزيئات الكون المرئي على النحو التالي .R + Lm :بدائل معادلات أينشتاين تستبدل R بوظيفة غير خطية f (R)والتي يمكن اختزالها إلى R عندما لا يكون انحناء الزمكان قويًا جدًا. وبالتالي ، يمكن اختزال f (R) إلى aR + bR2على سبيل المثال ، مع a و b وهما ثوابت مثبتة على شكل الدالة f (R) . توجد نظريات غير خطية متشابهة تتضمن مصطلحات أخرى (موتر ريتشي ، موتر ريمان ، موتر متري ، إلخ) مما يسمى الهندسة التفاضلية للمساحات المنحنية. هناك أيضًا ، في ظروف غير قاسية جدًا ، يمكنهم إرجاع نظرية أينشتاين بتعبيرات معينة لـ f ، تمامًا كما تعيد هذه النظرية إلى فيزياء نيوتن ذات الكثافة المنخفضة والسرعات البطيئة مقارنةً بالضوء، دورها. تم اقتراح استخدامها لحساب طبيعة الطاقة المظلمة ، أو حتى المادة المظلمة. هذه النظريات مقيدة بالملاحظات في النظام الشمسي ، النجوم النابضة والنجوم الثنائية وأيضًا المجرات التي تظهر تأثيرات عدسات الجاذبية على وجه الخصوص .على الرغم من كل شيء ، تبقى العديد من الاحتمالات مفتوحة لاستغلالها لبناء بدائل لمعادلات النسبية العامة ، لتوحيد الفيزياء ولحل أهم مشاكل علم الكونيات والفيزياء الأساسية ، على سبيل المثال، مع وجود أو عدم وجود فرادات الزمكان في قلب الثقوب السوداء أو

في أصل الانفجار العظيم .هنا نمتلك بعض المفاتيح اللازمة لمقاربة نظرية النسبية المتشابكة. في أكثر أشكالها وضوحًا ، حيث يتم التحكم في انتشار الضوء وانعكاسه ، ولكنه ينطبق أيضًا على موجات الرادار ، وعلى ما يسمى بالأشعة الزاحفة ، وحركة الأجسام الصلبة ... ثمرة عدة قرون من التشكيل ، هنا مبدأ قدمت لنا فرانسواز كومبس تحليلها الفيزيائي الفلكي للماضي ، ولكن أيضًا في العشرين عامًا القادمة . وفي هذا السياق من عرض لنظرية النسبية المتشابكة ، التفت موقع المستقبل إلى الباحث الذي اقترحها ، أوليفييه مينازولي ، والذي كان لطيفًا بما يكفي للإجابة على أسئلتنا. إنه عالم فيزياء فلكية نسبية ، وعضو في مختبر أرتميس في مرصد الساحل اللازوردي ــ كوت دازورــ ، وهو مختبر مشارك جدًا في الكشف عن موجات الجاذبية. لا يزال استكشاف هذه النظرية في بدايته فقط ، ولكن يمكن تقديمه بالفعل كمثال معين لما يسمى بنظريات التنسور القياسي المقترحة لتجاوز نظرية النسبية العامة لأينشتاين . محاولات التغلب على معادلات النظرية العامة للنسبية هي تقريبا قديمة قدم نظرية النسبية للجاذبية التي نشرها أينشتاين في نهاية عام 1915 في شكلها النهائي. قام أينشتاين نفسه بتعديل هذه المعادلات في وقت مبكر من عام 1919 بهدف المساعدة في فهم الجسيمات الأولية، مادون الذرية، المعروفة في عصره ، وهي الإلكترونات والبروتونات (عند اكتشاف هذه الجسيمات ، ويمكن للمرء الرجوع إلى الكتاب الذي كرسه العالم الحائز على نوبل ستيفن واينبرغ لهذا الموضوع). في الواقع ، احتاج علماء الفيزياء في بداية القرن العشرين إلى اعتبار الإلكترون بمثابة توزيع ممتد للشحنة الكهربائية ، لكن كان من الضروري بعد ذلك شرح سبب عدم انفجاره تحت تأثير التنافر الكهروستاتيكي لأجزائه. لذلك افترض بوانكاريه وجود قوة جديدة تحبط هذا التنافر ، كما هو موضح في دورة الفيزياء الخاصة به ، كما أثبت ذلك ريتشارد فاينمان. من ناحية أخرى ، عندما تحدث عن جلب أينشتاين ببساطة لقوة الجاذبية. بعد بضع سنوات ، في عام 1933 ، سعى ماكس بورن وليوبولد إنفيلد إلى إيجاد حل في اتجاه آخر ، وهو التعديل غير الخطي لمعادلات ماكسويل بنظرية تتلخص في نظرية الفيزيائي البريطاني عندما لا تكون الحقول الكهربائية والمغناطيسية شديدة للغاية . .المعادلات غير الخطية ، مفتاح للفيزياء الجديدة في الواقع ، ويمكننا القول إن التقدم في الفيزياء غالبًا ما يكون ناتجًا عن مرور ما يسمى بالمعادلات الخطية ، لأن مجموع حلين من هذه المعادلات كان لا يزال حلاً ، للمعادلات غير الخطية التي لم تعد لها هذه الخاصية ولكن تم اختصارها إلى الأول في القضايا التي تم النظر فيها في البداية. هذا هو الحال بالضبط مع نظرية الجاذبية لأينشتاين ، التي تحل محل المعادلات غير الخطية التي ندين بها لنيوتن ولابلاس وبواسون . لذلك من الطبيعي أن نتساءل عما إذا كانت المعادلات غير الخطية أكثر من معادلات أينشتاين، يمكن أن تشكل امتدادًا لنظريته ، وتكون قادرة بشكل خاص على شرح طبيعة الجسيمات الأولية ، أو حتى استبدال المعادلة الخطية الأساسية لميكانيكا الكم ، كما فعل أينشتاين بالفعل (توجد محاولات في هذا الاتجاه مع إصدارات غير خطية من معادلة شرودنغر ، على وجه الخصوص لحل مشكلة القياس الشائكة في نظرية الكم. يمكننا الاقتراب من نظرية الجاذبية الجديدة التي اقترحها عالم الفيزياء الفلكية أوليفييه مينازولي من هذه الزاوية. إن نظرية النسبية المتشابكة هي في الواقع تعميم غير خطي لمعادلات أينشتاين ، .ثم تم توضيح أن هناك إطارًا أساسيًا لجميع المعادلات المركزية للفيزياء النظرية بناءً على ما يسمى بمبدأ الإجراء الأقل وشكلية لاغرانج. لكن أولاً وقبل كل شيء ، دعنا نحدد على الفور أنه على حد علمنا في هذه المرحلة ، لا توجد صلة بين هذه النظرية قيد الاستكشاف ومفهوم التشابك الكمومي .دعونا أيضًا نتعاطى مع ما يسمى بنظريات التنسور القياسي التي تبناها ألبرت أينشتاين ونظام المعادلات التفاضلية الجزئية غير الخطية لنظرية النسبية العامة، أي معادلات آينشتاين باعتبارها مظهرًا من مظاهر قانون تشوه الزمكان استجابةً للإجهاد الميكانيكي ، أي موتر

الطاقة النبضية، حيث يصف الجانب الأيسرمن المعادلة انحناء الزمكان بينما يصف الجانب الأيمن توزيعات النبضات والطاقات ، سواء كانت مادة أو ضوء أو طاقة مظلمة. يمكن النظر إلى الثابت الموجود على اليمين على أنه ثابت لوسط مرن حسب أورين جاك تورنر ونظريات التنسور العددية كما يشير اسم الموتر إلى ذلك ، تم اكتشاف هذا النوع من الكمية الرياضياتية التي تعمم تلك الخاصة بالمتجه نفسه في شكل عمود من الأرقام ، من خلال تطوير ميكانيكا الوسائط المرنة القابلة للتشوه تحت تأثير الضغوط والتوترات (انظر أطروحة كاملة من قبل ليون بريلوين حول هذا الموضوع). في أبسط صوره ، يكون الموتر عبارة عن مجموعة من الأرقام المحددة في كل نقطة من الجسم المرن ، تمامًا مثل متجه السرعة للسائل المتحرك .العدد القياسي هو رقم بسيط ، مثل درجة الحرارة عند كل نقطة من جسم مرن ساخن. يتم تعريف مثل هذا الجسم تقريبًا من خلال إعطاء ثوابت مرنة تجعل من الممكن حساب كيفية تشوهه استجابةً لضغوط معينة ، على سبيل المثال عن طريق التمدد. أبسط مثال على ذلك هو الثابت k في الزنبرك الذي يمتد بطول x استجابة للقوة F وفقًا للمعادلة .F = kx ولكن في كثير من الأحيان ، يجب إضافة المصطلحات غير الخطية بحيث يكون لدينا F = ax + bx2 + cx3 + ... لتعكس سلوك نظام مادي بشكل أفضل .يمكننا تحديد ما نسميه موتر متري gμν ، وهي مجموعة من الأرقام حيث تشير المؤشرات إلى الصفوف والأعمدة ، والتي تعمل على إصلاح هندسة السطح وبشكل عام للمساحة ، أو حتى الزمكان في إطار نظرية أينشتاين . يمكن أن يختلف الموتر المتري في المكان والزمان ، وبالتالي يشير إلى تباين ديناميكي في انحناء الفضاء ، على سبيل المثال الكرة التي تتضخم أو تصبح بيضاوية الشكل .وبالتالي ، فإن النظرية النسبية للجاذبية هي بطريقة ما نظرية ذات معادلات تصف كيف يمكن للوسط المرن الذي يمثل الزمكان أن يتشوه ويموج استجابة لمحتواه. إنها ما يسمى بنظرية الشد أو حتى النظرية المترية ولكنها لا تتطابق بالضرورة مع نظرية أينشتاين ، لذلك لدينا نظريات بديلة لنظرية الجاذبية لأينشتاين والتي لها وجود فقط في مقياس الزمكان مع موتر .gμν عندئذٍ تكون نظرية الجاذبية العددية والموتر هي النظرية التماثلية لوسط مرن مع مجال درجة حرارة يعدل حالة الضغوط والثوابت المرنة لهذا الوسط. أحد هذه الثوابت القابلة للتعديل يمكن أن يكون ثابت الجاذبية لنيوتن ولكن أيضًا ثابت آينشتاين الكوني. واستمرارًا للتماثل ، سيكون لها بالتالي مجال قياسي مُلاحظ مقترنًا بالمجال المتري .g لا يمكن أن يكون لهذا الحقل نفس القيمة اليوم أثناء الانفجار العظيم أو داخل النجوم شديدة الكثافة مثل النجم النيوتروني ، لذا فإن مظاهر فيزياء الزمكان اعتمادًا على قيمة Φ ستكون مختلفة مثل قيمة صخرة عند درجة حرارة منخفضة أو على شكل حمم بركانية ، أو حتى مختلفة كما لو كان المعدن فائق التوصيل أو لم يعد كذلك. و لمعرفة المزيد ، لجأنا إلى أوليفييه مينازولي الذي كان لطيفًا بما يكفي للإجابة على أسئلتنا .عمل أوليفييه مينازولي ، الباحث في الفيزياء الفلكية النسبية ، في وكالة ناسا في مختبر الدفع النفاث) JPL مختبر الدفع النفاث) ، في باسادينا ، كاليفورنيا ، في الولايات المتحدة.

س: إحدى الصفات التي طرحتها لتقديم نظرية النسبية المتشابكة هي أنها تقدم توضيحًا ملموسًا لمبدأ ماخ.

أوليفييه مينازولي: بالتأكيد ، لكن من الضروري إعطاء بعض التفاصيل حول هذا الموضوع. بادئ ذي بدء ، نحن ندين بهذا الاسم بشكل أساسي لأينشتاين في إشارة إليه عند طرح الأفكار التي وضعها إرنست ماخ في القرن التاسع عشر ، وهو عالم فيزياء نمساوي ، أثرت كتاباته ، مثل تلك التي تتناول التطور التاريخي لعلم الميكانيكا ، بشكل كبير على صاحب نظرية النسبية .لكن ماخ نفسه لم يأت بنظرية محددة ويمكن للمرء أن يتساءل عما كان يدور في خلده حقًا وما إذا كان يتوافق مع ما أسماه أينشتاين مبدأ ماخ. نتيجة لذلك ، كانت

هناك العشرات من الصيغ المختلفة لهذا المبدأ حيث يمكن إقناعنا بقراءة العمل الذي حرره الفيزيائي البريطاني جوليان باربور ،" مبدأ ماخ: من دلو نيوتن إلى الجاذبية الكمية". لذلك يجب أن نحدد ما نتحدث عنه في أي مناقشة حول هذا الموضوع .

س: إذن ماذا تقصد بمبدأ ماخ؟

أوليفييه مينازولي: بكل بساطة ما قاله أينشتاين نفسه في عدة مناسبات وعلى وجه الخصوص ردًا على أحد الصحفيين خلال زيارته الأولى للولايات المتحدة في عام 1921: "لقد اعتقدنا سابقًا أنه إذا اختفت كل المواد في الكون ، فسيستمر المكان والزمان في أن يكونا موجودين. بينما وفقًا لنظرية النسبية ، فإنهما يختفيان أيضًا. "نحن نعرف أيضًا بيانًا أكثر تقنية عنه:" في رأيي ، تعتبر نظرية النسبية العامة نظامًا مرضيًا إذا أظهرت أن الصفات الفيزيائية للفضاء يتم تحديدها تمامًا من خلال المادة وحدها. لهذا السبب ، لا يمكن أن يوجد مجال) gμνأي لا توجد سلسلة متصلة من الزمكان) بدون المادة التي تولده " .مع نظرية أينشتاين ، تستند الفيزياء المعروفة على مجموع اثنين من شكلية لاغرانج ، Rللجاذبية و Lm للمادة ، وتصنع كل الجسيمات والقوى الأخرى في النموذج القياسي. لذلك يمكن كتابة رمز لاغرانج الكلي للكون L ببساطة في المعادلة + L = R Lmولكن في حالة نظرية النسبية المتشابكة ، لم يعد من الممكن أن توجد هندسة الزمكان بدون وجود محتوى ، سواء كان ذلك المجال الكهرومغناطيسي أو النيوترينوات أو مجال بوزون .Brout-Englert-Higgs تذهب النظرية الجديدة إلى أبعد من ذلك بكثير ، لإعادة صياغة جون ويلر ، من وجود هندسة الزمكان التي يتم تحديدها من خلال محتواها وهذه الهندسة هي التي تخبر الأجسام المادية أو الأشعة الضوئية كيف تتحرك . في الواقع ، تمت كتابة العامل اللاغرانجي للكون Lagrangian of the World الجديدة L = L2m / R وبالتالي نرى بوضوح أنه إذا كانت Lm صفرًا ، فإن L تكون أيضًا صفراً ولا يمكن حتى تعريف النظرية بعد الآن .

س: عامل لاغرانج مذهل للغاية ، كيف جئت لتطبيقه؟

أوليفييه مينازولي: إنه أمر مذهل حقًا وغير بديهي أيضًا! بدأ كل شيء بعمل بحث تم إجراؤه حول نظريات الجاذبية المتوترة مع زميلي وصديق اورليان هيس Aurélien Hees يمكن العثور على مثل هذه النظريات في عدة بدائل لنظرية الجاذبية لأينشتاين أو محاولات لتوحيد قوى الفيزياء كما هو الحال في سياق-Kaluza Klein (KK)أو نظريات الأوتار الفائقة ، ولكن تم اقتراح إحدى النظريات الشائعة الأولى من هذا النوع في أوائل الستينيات من قبل برانس وديك. في حالة أبسط نظريات KK ، نرى بالفعل حقلاً عدديًا يظهر من إضافة بُعد مكاني إضافي واحد على الأقل ، وفي تلك الخاصة بالسلاسل الفائقة يوجد حقل قياسي مهم جدًا يسمى دالاتون يتبع الحقل القياسي من هذه النظريات، ولكن هناك أيضًا حالات ، لا سيما مع نظريات لاغرانج من النوع f (R) ، وبالتالي بدون حقل عددي في البداية ، حيث يمكننا إظهار أن محتواه مكافئ رياضياتيًا وماديًا للنظرية اقترن ثابت آينشتاين بطريقة خاصة جدًا بحقل عددي .ومع ذلك ، فإن وجود هذا المجال القياسي يمكن أن يكون مشكلة كبيرة لأنه إذا كان يمكن استخدامه في بعض الأحيان لبناء ، على سبيل المثال ، نماذج الطاقة المظلمة ، فإنه يؤدي إلى وجود نوع من القوة الخامسة التي تعمل على تعديل حركات الأجرام السماوية أو الضوء الأشعة في حالات معينة بإعطاء تأثيرات تتعارض مع الملاحظات. إذا كنا لا نريد أن نفقد مزايا النظرية الموحدة المدروسة ، فيجب علينا التأكد من وجود آليات فصل بين المجال القياسي وهندسة

الزمكان في المواقف التي تنطوي على مشاكل .يمكننا أن نأخذ على سبيل المثال حالة ما يسمى بنظرية "الحرباء" لحقل قياسي معين تم تخيله لتفسير الطاقة المظلمة. كتلة هذه الجسيمات المرتبطة بالحقل القياسي هي دالة لكثافة البيئة التي توجد فيها. ستكون خفيفة في بيئات قريبة من الفراغ مثل الفضاء بين النجوم ، لكنها ثقيلة على سبيل المثال في نجم مثل الشمس. لذلك نُسب اسم "الحرباء" إليها بقدر ما يتكيف هذا الجسيم مع بيئته بطريقة ما. بهذه الطريقة ، من الممكن التوفيق بين الملاحظات في النظام الشمسي وكذلك على مستوى مجموعات المجرات . مع Aurélien Hees ، وجدنا فئة من نظريات التنسور القياسي التي بدت أنها تسمح تلقائيًا بالفصل الضروري لمراعاة القيود المعروفة في ذلك الوقت ، ولا سيما ملاحظات النظام الشمسي. كانت الخطوة التالية هي معرفة ما إذا كانت هناك وظيفة خاصة جدًا f (R) ، أو بالأحرى(f R ، Lm) في هذه الحالة ، تتوافق مع هذه النظرية.

س: ما الذي وجهك في تحديد هذه الوظيفة؟

أوليفييه مينازولي: في الواقع ، تم ذلك عن طريق التجربة والخطأ من خلال افتراض أشكال مختلفة ممكنة وعن طريق الاختبار في كل مرة إذا كان بإمكاننا الرجوع إلى معادلات نظرية التنسور القياسي الأولية ، والتي نجحت في القيام بها. ، في عام 2015 ، في محاضراتي لطالبتي في ذلك الوقت ثم في أطروحة ، هندريك لودفيج. ثم قمنا بفحص حساباتنا من قبل أحد الخبراء في النظريات البديلة لنظرية أينشتاين ، سالفاتور كابوزويلو ، الذي لم يعثر على أخطاء .ما قفز في وجهنا وكان غير متوقع تمامًا هو أنه لا يمكن حتى تعريف النظرية بهذا الشكل دون تعريف المادة في نفس الوقت. علاوة على ذلك ، فإن العاملين ، f (R، Lm) من ناحية و tensor-scalar من ناحية أخرى ، يكونان متساويين فقط إذا فرض أحدهما وجودًا في تعريف النظريتين .كما أوضحت في بيان صحفي من مختبر Artemis (CNRS-UCA-OCA) ، في عام 2021 ، مع اثنين من الطلاب ، دينيس أروجا وأوليفييه روسيل ، جاءت الفكرة إلينا لتعميد هذه النظرية الجديدة المسماة النظرية "النسبية المتشابكة" لأن المادة وانحناء الزمكان لا ينفصلان عن طريق البناء.

س: كما أوضح كارل بوبر بوضوح ، يجب أن تقوم النظرية العلمية بعمل تنبؤات ، أو تأخيرات ، أيًا كان ، يمكن مقارنتها بالتجربة والتي تسمح ، إن لم تكن ، بدحض النظرية ككل. ، لإظهار أنه من المحتمل جدًا على الأقل أن يكون هناك شيء خاطئ يجب مراجعته بجدية. ماذا عن نظرية النسبية المتشابكة؟

أوليفييه مينازولي: حتى الآن ، اجتازت النظرية الاختبارات في النظام الشمسي في ظل نظام مجال ضعيف حيث تعطي تأثيرات نظرية النسبية العامة لأينشتاين ، وهي بحد ذاتها تصحيحات طفيفة لمعادلات حركة الكواكب المستخلصة من نظرية نيوتن .من ناحية أخرى ، أظهرنا أن للنظرية عواقب مثيرة للاهتمام ، وربما قابلة للقياس ، على النجوم النيوترونية والثقوب السوداء وعلم الكونيات ، لكن هذه النتائج لا تزال قيد التنفيذ مع النتائج الأولية. لذلك لا يزال من الممكن تمامًا ألا تكون النظرية فعالة مثل النسبية العامة في تفسير الملاحظات ككل لكوننا .من ناحية أخرى ، يبدو أن العمل الآخر حول النظريات ذات الصلة يشير إلى أنه لا ينبغي أن يكون هناك أي تغيير في شكل موجات الجاذبية فيما يتعلق بالثقوب السوداء الثنائية. قد يكون الأمر مختلفًا بالنسبة لثنائيات النجوم النيوترونية ، ولكن في هذه الحالة هناك انحطاط محتمل بين عدم اليقين في معادلات حالات المادة المكونة للنجوم النيوترونية والاختلافات الناتجة عن النظريات النسبية المختلفة ..

س: إذن هناك العديد من التنبؤات الجديدة التي تظهر انحرافات عن تلك الخاصة بنظرية النسبية العامة ، أو حتى نظريات التنسور القياسي الأخرى؟

أوليفييه مينازولي: نعم ، هناك أسباب للاعتقاد أنه عندما تصبح كثافة المادة مهمة ، يمكن للجاذبية أن تصبح مثيرة للاشمئزاز ، والتي يمكن أن تزيل أيضًا التفردات في قلب الثقوب السوداء في النسبية العامة كما تؤدي بطبيعة الحال إلى طور التضخم خلال الانفجار العظيم. إذا كانت هذه المرحلة من التضخم مع التوسع السريع جدًا ولكن العابر للفضاء كافية ، فسيكون من الممكن حل بعض الألغاز في علم الكونيات. لكن هذا لا يزال يتعين إثباته .تتشابه نظرية لاغرانج للنسبية المتشابكة إلى حد ما مع بعض الأشكال التقريبية لنظرية الأوتار منخفضة الطاقة ، مع وجود الشعاع كحقل قياسي. نحن نعرف حلولًا لهذه النظرية الفعالة والتي هي مكافئة للثقوب السوداء المشحونة للنسبية العامة مع الشد. مع أطروحة الطالب ، إديسون سانتوس ، تمكنا من إظهار أنه في الحد الذي أصبحت فيه شحنة هذه الثقوب السوداء ضئيلة ، عدنا إلى حل شوارزشيلد الكلاسيكي ، والذي يعد حلاً تقريبيًا لنظرية النسبية رغم كونه معقد. تظل مسألة حدوث التفرد في قلب الحل الدقيق مفتوحة ، ولكن في الوقت الحالي يمكننا أن نعتقد أنه في كثير من الحالات في الممارسة العملية ، لا يمكن التمييز بين حلول الثقوب السوداء لنظريتي النسبية .هنا مرة أخرى ، لا يزال هناك الكثير من العمل الذي يتعين القيام به . من ناحية أخرى ، مع النجوم النيوترونية ، نرى بوضوح اختلافات يمكن قياسها. يمكن أن تكون النجوم النيوترونية أكثر كتلة بنسبة 8٪ تقريبًا مقارنة بنظرية أينشتاين التي تؤدي إلى كتلة محدودة بالتزامن مع ما هو معروف عن حالة المادة في هذه النجوم. الأهم من ذلك ، تتنبأ النظرية بوجود اختلافات يمكن ملاحظتها مع النبضات السينية للنجوم النيوترونية ، وهي اختلافات يمكن إبرازها باستخدام أداة مستكشف التكوين الداخلي للنجم النيوتروني .(Nicer) لقد كان في محطة الفضاء الدولية منذ 3 يونيو 2017. نحن ندرس حاليًا هذا المسار .أخيرًا ، ولكن هناك أيضًا عمل مستمر وما زلنا فقط في بداية استكشاف عواقب نظرية النسبية المتشابكة ، لا يمكننا إدخال ثابت آينشتاين الكوني في النظرية مباشرة لأن ذلك سيؤدي إلى انتهاكات لمبدأ التكافؤ الذي لا نلاحظه .ومع ذلك ، فإننا نرى بالفعل أننا نعيش في كون يمكن ملاحظته مع توسع متسارع. إذا كانت نظرية النسبية المتشابكة صحيحة ، فإن تسارع تمدد الكون يجب أن يكون بسبب شيء آخر ، ويفترض أن نموذج ΛCDM لا يمكن أن يكون صحيحًا. اقترحت مؤخرًا فرضية يمكن أن تفسر هذا التسارع دون الحاجة إلى حقل جديد (الطاقة المظلمة الشهيرة). هذه الفرضية في الوقت الحالي بعيدة جدًا عن التحقق ، وربما لا تكون التفسير الجيد أيضًا لتسريع توسع الكون في إطار النسبية المتشابكة. على أي حال ، لا يزال هناك الكثير الذي يتعين القيام به لتقييم أهمية هذه النظرية الجديدة ومدى ملاءمتها لقوانين الطبيعة !للتدوين بالنسبة لأولئك الذين لم تثبطهم التطورات التقنية ، هناك مراجعة ممتازة لبدائل نظرية أينشتاين النسبية للجاذبية ، والتي يمكن العثور عليها في .arXiv نحن مدينون بذلك لسلفاتوري كابوزييلو وماريافيليسيا دي لورينتيس. سيكمل العرض التقديمي الذي قدمه أوليفييه مينازولي في أحد الفيديوهات وفيهعرض تقديمي للخبراء في نظرية النسبية المتشابكة.