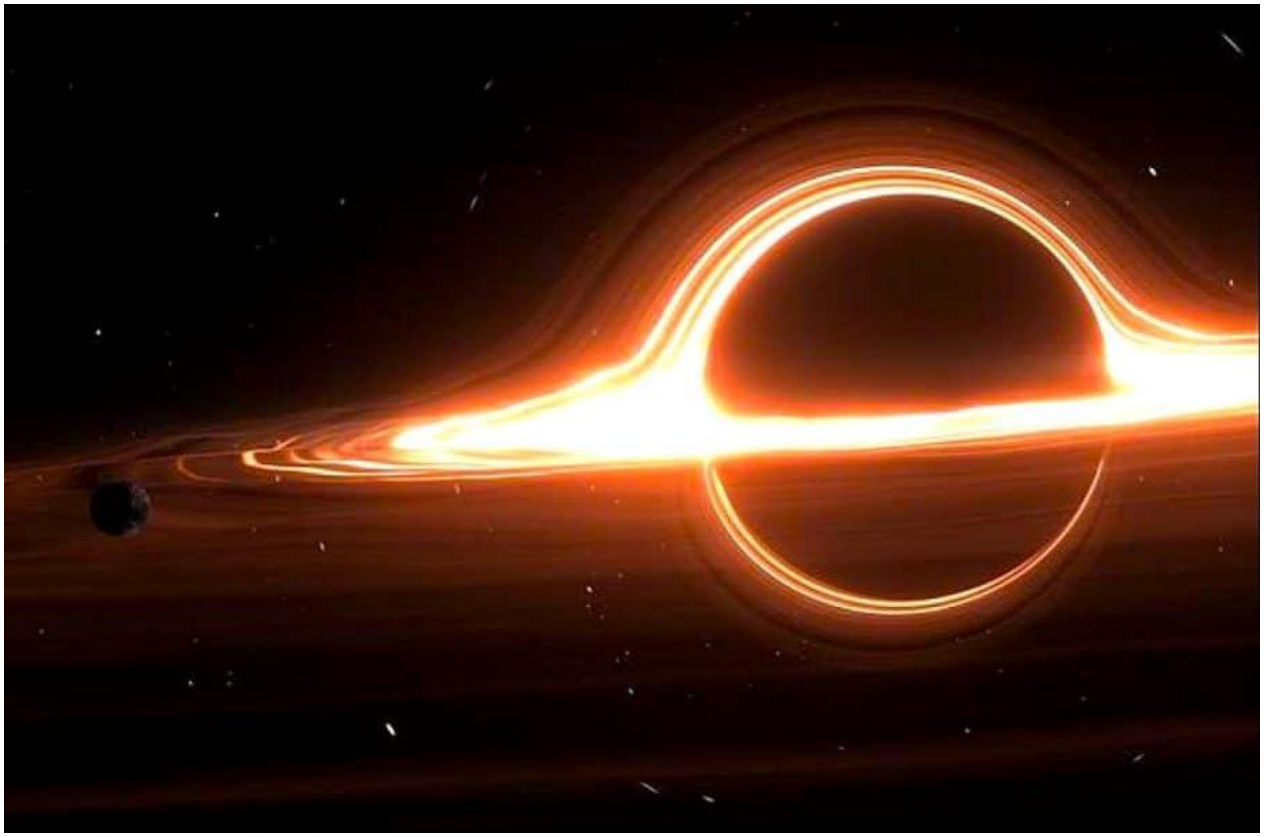
الفيزياء التجريبية

إعداد وترجمة د. جواد بشارة

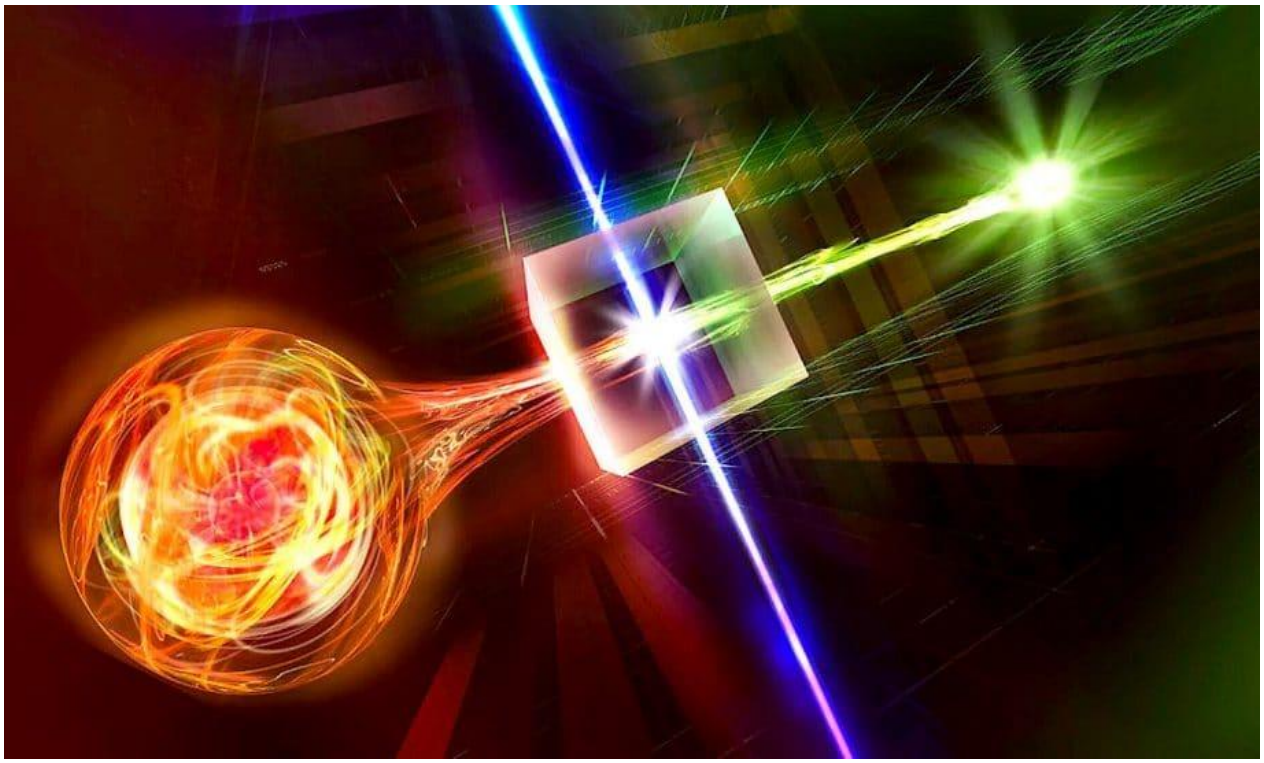


يمكن أن تتعرض الثقوب السوداء لنسختها الغريبة من الضغط ، والتي تسمى "الضغط الكمومي" جوناثان بايانو 11 سبتمبر 2021 يزيد علماء الفيزياء في جامعة ساسكس بالمملكة المتحدة من تعقيد فهمنا لفيزياء الثقوب السوداء (على الرغم من عدم اكتمالها) من خلال اقتراح أن لديهم نسختهم الغريبة من الضغط عند حوافها ، والتي تسمى "الضغط الكموميpression quantique ". بخلاف ذلك الموجود على الأرض وفي أي مكان آخر في الكون ، فإن وجوده لن يكون متوقعًا من قبل علماء الفيزياء. وفقًا للباحثين ، تشير حسابات تأثير ميكانيكا الكموم على الجاذبية في محيط الثقوب السوداء إلى أن هذه المناطق قد تخضع لهذا الضغط الكمومي. وهذا اكتشاف غير متوقع. إن مسألة التفاعل بين ميكانيكا الكموم والجاذبية هي واحدة من أعظم الألغاز في الفيزياء الحديثة ، وحافة الثقب الأسود هي واحدة من المناطق القليلة التي تكون فيها الظروف شديدة بما يكفي بحيث تكون تأثيرات الظاهرتين ذات صلة في وقت واحد. استخدم Xavier Calmet و Folkert Kuipers ، من جامعة ساسكس ، إطارًا يسمى نظرية المجال الكمومي thèorie quantique des champs لاستكشاف ما يحدث عندما تلتقي ميكانيكا الكموم والجاذبية على حافة ثقب أسود. الضغط الكمي: ضروري لشرح تقلبات الجسيماتfluctuations des particules لقد حسبوا كيف يمكن للتقلبات الكمومية الصغيرة أن تخلق تأثيرات لا تؤخذ في الاعتبار من خلال معادلاتنا القياسية للجاذبية. كشفت هذه الحسابات عن متغير مفاجئ ، والذي يبدو أنه يشير إلى أن التقلبات في الجسيمات الكمومية على حافة الثقب

الأسود يجب أن تمنح الثقب الأسود ضغطًا غريبًا ، يختلف عما نعرفه. يقول كالميتCalmet : "كان الأمر غير متوقع على الإطلاق". عندما تم افتراض وجود الثقوب السوداء لأول مرة ، اعتقد الفيزيائيون أنها يجب أن تكون بسيطة للغاية. أظهر العمل اللاحق للفيزيائي الشهير ستيفن هوكينغ وآخرون أنه، أي الثقوب السوداء، تبعث نوع من الجسيمات في عملية تُعرف الآن باسم إشعاع هوكينغ rayonnement de Hawking، مما يعني أنه يجب أن يكون لديها درجة حرارة. "هذا في حد ذاته ، شكل مفاجأة. الآن ، إضافة الضغط تعني أن الثقوب السوداء أكثر تعقيدًا ، "يقول كالميت. ومع ذلك ، لا يزال يتعين على الباحثين فهم ما يمكن أن يعنيه هذا الضغط بالمعنى المادي. يتضمن المفهوم المعتاد للضغط جزيئات تدفع ضد جسم ما وترتد عنه ، لكن حافة الثقب الأسود (أفق الحدث) فارغة تقريبًا. لذلك ليس هناك الكثير من "الدفع" ضده. يقول ستيفن هسو Stephen Hsu من جامعة ولاية ميتشيغان: "يجب أن يكون مصدر الضغط هنا هو تقلبات كمومية بحتة بنسبة 100٪". تخلق التقلبات الكمومية جسيمات افتراضية يمكن أن تكون ، من الناحية النظرية ، مصدر الضغط. ويشرح قائلاً: "إنه ليس نوع الضغط الذي اعتدنا عليه". مثل بالون يتسرب ... إذا تخيلت أفق الحدث لثقب أسود على شكل بالون ، فإن الضغط لا يأتي من الداخل أو الخارج لتقليص أو توسيع البالون ، إنه من داخل مادة البالون نفسها. "يمكننا تخيل الأفق كسطح معين إلى حد ما ، وبالتالي فإن الضغط سيدفعه إلى الداخل (إذا كان سالبًا) أو للخارج (إذا كان موجبًا) ، وهو ما يتوافق على التوالي مع انخفاض أو زيادة في كتلة يشرح روبرتو كاساديوRoberto Casadio من جامعة بولونيا بإيطاليا. وجد الباحثون أن الضغط سالب ، وهو ما يجب أن يتوافق مع تقلص الثقب الأسود بمرور الوقت ، مثل تسريب بالون. تتوافق هذه النتيجة مع الأعمال الأخرى التي تشير إلى أن الثقوب السوداء تفقد المادة عندما تتعرض للنيوترونات. يمكن حتى ربط الظاهرتين. يقول هسو إن الأمر سيستغرق على الأرجح الكثير من العمل الإضافي لفهم من أين يأتي هذا الضغط بالضبط وما هي العواقب على فهمنا للثقوب السوداء. ولكن نظرًا لأنه ينبع من التقلبات الكمومية ، فإن معرفة المزيد عنها يمكن أن يكون خطوة إلى الأمام في فهم الجاذبية الكمومية. يشرح كالميت قائلاً: "أي ميزة جديدة نكتشفها على الثقوب السوداء على المستوى الكمومي يمكن أن تعطينا بعض الأدلة حول كيفية دمج النسبية وميكانيكا الكموم ، وما هي الميزات التي يجب أن تمتلكها هذه النظرية الأساسية".
المصدر: Physical Review D

يمكن أن تكشف البلورة الكمومية cristal quantique عن هوية المادة المظلمة

جوناثان بايانو 31 أغسطس 2021



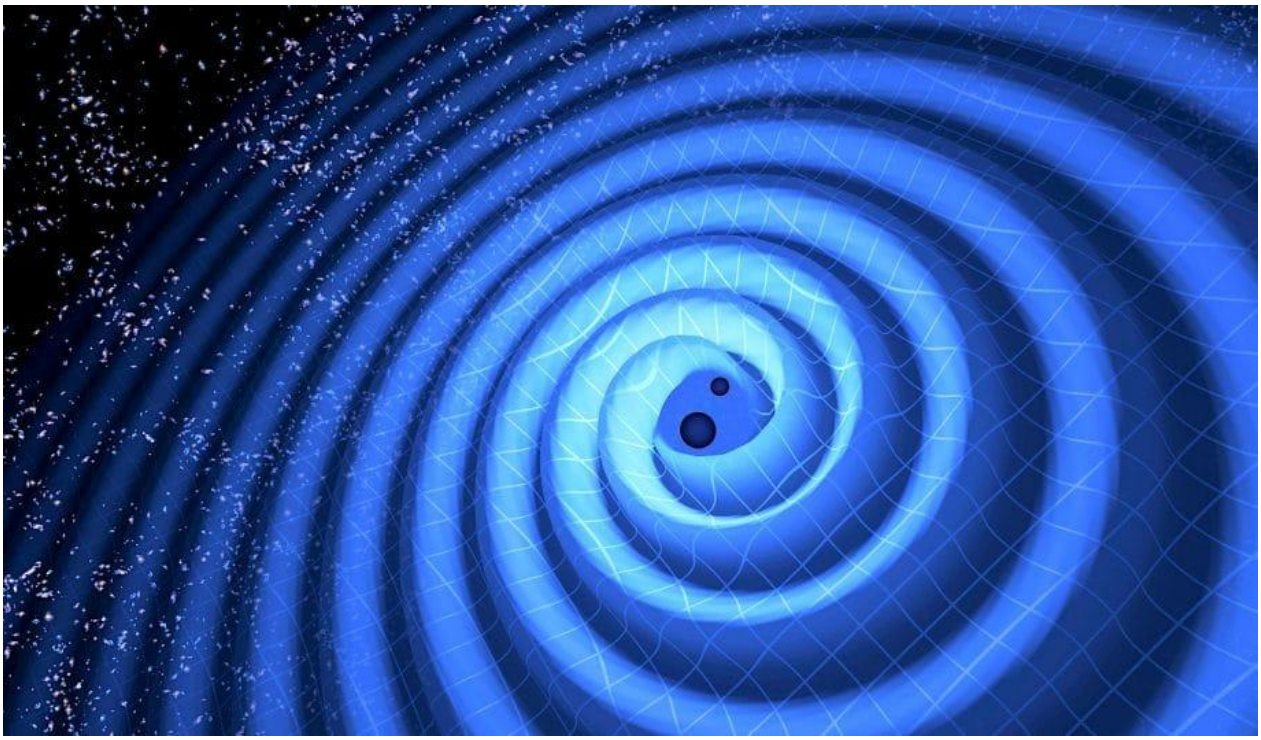
انطباع الفنان عن الضوء والمادة في التشابك الكمومي. | IQOQI إنسبروك / هارالد ريتش

في تجربة مبتكرة ، ابتكر الباحثون بلورة البريليومcristal de béryllium قادرة على اكتشاف المجالات الكهرومغناطيسية الضعيفة للغاية. يُعتقد أن المادة المظلمة تتكون من جسيمات افتراضية تسمى الأكسيونات axions ، من بين أشياء أخرى ، ويعتقد الباحثون أنه يمكن اكتشافها يومًا ما باستخدام أجهزتهم التجريبية ، والتي يسمونها "بلورة الكمومcristal quantique ". من خلال محاصرة 150 جسيمًا مشحونًا من البريليوم (أيوناتdes ions) باستخدام نظام من الأقطاب الكهربائية والمجالات المغناطيسية (للتغلب على تنافرها الطبيعي) ، نجح الباحثون في JILA ، وهو معهد مشترك في المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا ، وفي جامعة كولورادو بولدر. في تكوين بلورة كمومية بخصائص فريدة. عندما حاصرت عالمة الفيزياء الذرية في JILA آنا ماريا رايAna Maria Rey وزملاؤها الأيونات بنظام مجالها وإلكترودها leur système de champs et d’électrodes ، تجمعت الذرات معًا في لوح مسطح يبلغ سمكه ضعف سمك شعرة الإنسان. هذا الكل المنظم يشبه البلورة التي اعتقدوا أنها ستهتز عندما تزعجها قوة خارجية. وهنا توجب تجاوز مبدأ عدم يقين هايزنبرغl’incertitude d’Heisenberg grâce بالتشابك الكمومي l’intrication quantique يقول راي: "عندما تثير الذرات ، فإنها لا تتحرك منفردة". "إنهم يتحركون ككل". عندما تواجه "بلورة" البريليوم هذه مجالًا كهرومغناطيسيًا ، فإنها تتحرك استجابةً لذلك ، ويمكن ترجمة هذه الحركة إلى مقياس لشدة المجالl’intensité du champ . لكن قياسات أي نظام ميكانيكي كمومي تخضع للحدود التي وضعها مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ ، والتي تنص على أنه لا يمكن معرفة خصائص معينة للجسيم ، مثل موقعه وزخمه ، في وقت واحد بدقة عالية. وجد الفريق طريقة للتغلب على هذا القيد من خلال التشابك الكمومي ، حيث ترتبط سمات الجسيمات الكمومية ارتباطًا جوهريًا. قال راي: "باستخدام التشابك ، يمكننا

اكتشاف الأشياء التي لا يمكن تحقيقها بطريقة أخرى". في هذه الحالة ، تشابكت هي وزملاؤها حركات أيونات البريليوم مع دورانها. يجب أن تعلم أن الأنظمة الكمومية تبدو مثل قمم الغزل الصغيرة والدوران يصف الاتجاه (على سبيل المثال لأعلى أو لأسفل) الذي تتجه فيه هذه "القمم". أثناء التجربة ، عندما اهتزت البلورة ، تحركت إلى حد معين. ولكن بسبب مبدأ عدم اليقين ، فإن أي قياس لهذا الإزاحة ، أو مقدار حركة الأيونات ، سيخضع لحدود الدقة ويحتوي على "ضوضاء كموميةbruit quantique " ، كما يقول راي. وأضافت أنه لقياس الإزاحة ، "نحتاج إلى إزاحة أكبر من الضوضاء الكمومية". تم نشر تفاصيل الدراسة في مجلة Science. يعمل التشابك بين حركات الأيونات ودوراتها على توزيع هذه الضوضاء ، مما يقللها ويسمح للباحثين بقياس التقلبات فائقة الدقة في البلورة. اختبر الباحثون النظام عن طريق إرسال موجة كهرومغناطيسية ضعيفة إليه ومشاهدته يهتز.

نحو الكشف عن المحاور الافتراضية للبلورة التي صممها الفريق بالفعل والتي هي أكثر حساسية بعشر مرات لاكتشاف الإشارات الكهرومغناطيسية الدقيقة من أجهزة الاستشعار الكمومية الشائعة. لكنهم يعتقدون أنه مع المزيد من أيونات البريليوم ، يمكن الحصول على كاشف أكثر حساسية قادرًا على تمييز الأكسيونات. الأكسيون هو جسيم افتراضي من مادة مظلمة خفيفة للغاية ، كتلته تساوي واحدًا أو أقل من واحدًا من المليار من كتلة الإلكترون. تشير بعض نماذج الأكسيون إلى أنه يمكن أن يتحول إلى فوتون في ظل ظروف معينة ، وفي هذه الحالة لن يكون موجودًا في مجال المادة المظلمة وينتج مجالًا كهرومغناطيسيًا ضعيفًا. إذا مرت الأكسيونات عبر مختبر يحتوي على بلورة البريليوم هذه ، فيمكنها اكتشاف وجودها. قال دانيال كارني Daniel Carney ، الفيزيائي النظري في مختبر لورانس بيركلي الوطني في بيركلي ، كاليفورنيا ، والذي لم يشارك في البحث: "أعتقد أنها نتيجة جميلة وتجربة رائعة". بالإضافة إلى المساهمة في دراسة المادة المظلمة ، يعتقد كارني أن هذا العمل يمكن أن يجد العديد من التطبيقات ، مثل البحث عن المجالات الكهرومغناطيسية الشاردة في المختبر أو الكشف عن العيوب في المادة. المصدر: Science

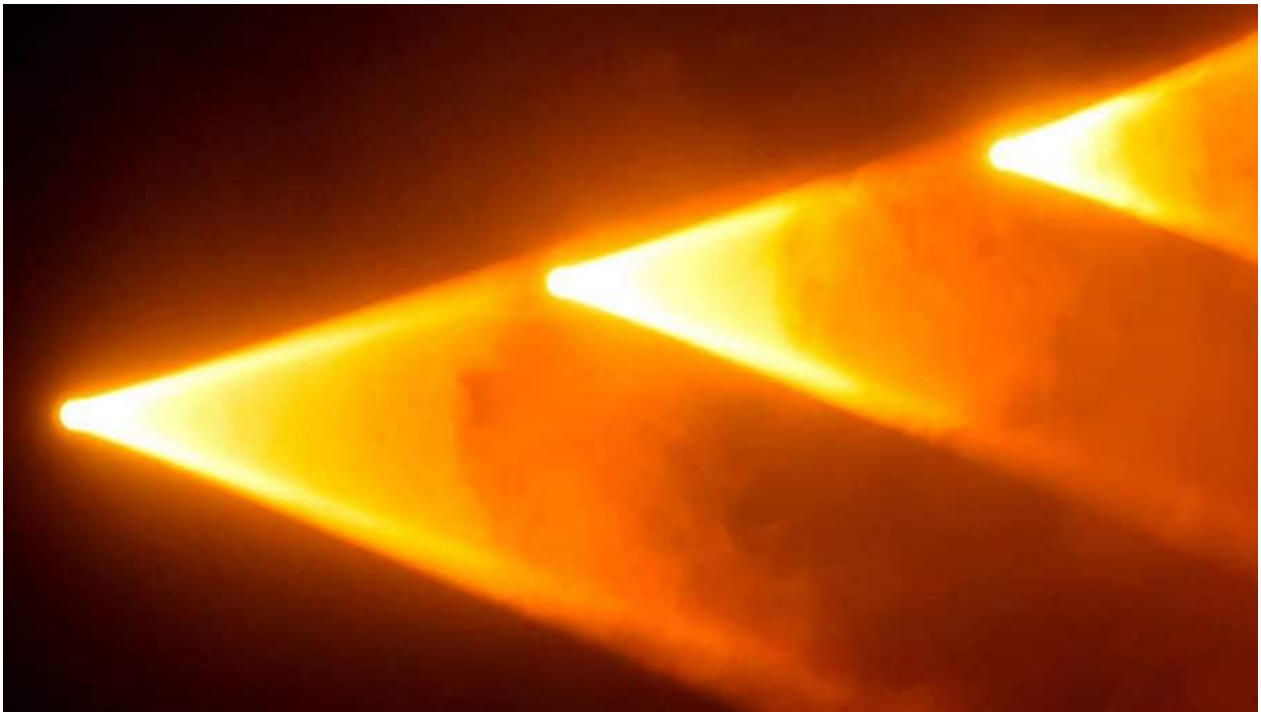
يمكن اكتشاف الطبيعة الكمومية للجاذبية في موجات الجاذبية جوناثان بايانو 31 أغسطس 2021



انطباع فني عن وجود ثقبين أسودين على وشك الاندماج ، مما ينتج موجات ثقالية.

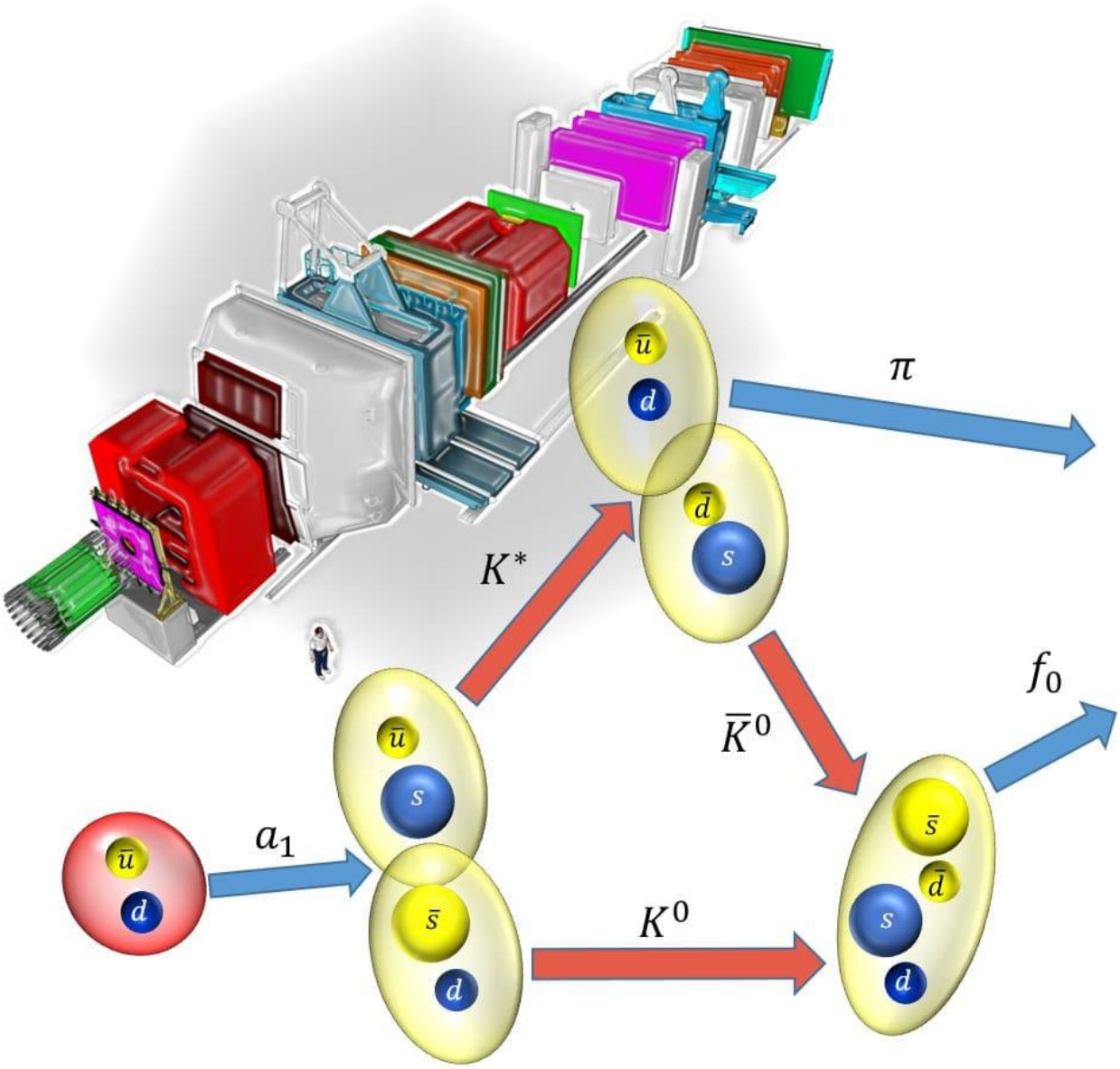
الجاذبية ، التي شرحها نيوتن بطريقة بسيطة ثم بعد ذلك ببضعة قرون بطريقة أكثر اكتمالا من قبل أينشتاين ، سيكون لها أيضًا طبيعة كمومية. نظرية النسبية لأينشتاين ، التي تقدم الزمكان على أنه "نسيج قابل للنمذجة" يسحب قوة الجاذبية ، وبالتالي لن تكون كافية لشرح جميع جوانب هذه الميكانيكا الطبيعية المبهرة. في الآونة الأخيرة ، عكف فريق من الباحثين على دراسة موجات الجاذبية - الناتجة عن اصطدام الثقوب السوداء أو النجوم النيوترونية - على أمل اكتشاف المكون الكمومي للجاذبية وإثباته. كان السؤال عن كيفية توافق الجاذبية وميكانيكا الكموم معًا أحد أعظم خطوط البحث في الفيزياء لعقود. كيف تؤثر التقلبات الكمومية على موجات الجاذبية (تموجات في الزمكان الناجمة عن حركة واصطدام الأجسام الضخمة) يمكن أن توفر للفيزيائيين طريقة لحل هذا اللغز. الجاذبية هي المجال الوحيد في الفيزياء الذي لا يتناسب حاليًا مع الفهم الميكانيكي الكمومي للكون. قال كارلو روفيلي Carlo Rovelli ، من جامعة إيكس مرسيليا بفرنسا ، والذي لم يشارك في هذا العمل: "نظريتنا الفيزيائية الأساسية غير متسقة حاليًا: إنها تتكون من جزأين لا يتماشيان معًا". "للحصول على صورة متماسكة للعالم ، علينا الجمع بين النصفين." جسيم الغرافيتون: يمكن اكتشاف تأثيره في موجات الجاذبية وقد تم تكريس الكثير من العمل النظري لهذه المشكلة ، لكن الملاحظات والتجارب لم تحلها بعد. هذا يرجع أساسًا إلى حقيقة أن مستويات الطاقة التي تظهر فيها تأثيرات الكموم على سلوك الجاذبية مرتفعة بشكل غير عادي. توجد مستويات الطاقة العالية هذه بشكل خاص في الأحداث الفلكية التي تنتج موجات الجاذبية. الموجات التي تنتجها الحقول الكمومية ، مثل الضوء ، هي بطبيعتها موجات وجسيمات في آن واحد. لذلك إذا كانت حقول الجاذبية حقًا حقول كمومية ، فيجب أن تتصرف موجات الجاذبية أيضًا مثل الجسيمات. تسمى هذه الجسيمات الافتراضية الغرافيتونات. قام موليك باريكMaulik Parikh من جامعة ولاية أريزونا وزملاؤه بحساب أن وجود الغرافيتونات يمكن أن يخلق اضطرابات في إشارات موجات

الجاذبية. اكتشفوا أنه يمكن ، من الناحية النظرية ، اكتشافها بواسطة مراصد موجات الجاذبية الحالية مثل LIGO و VIRGO. يقول باريك: "ربما لا تكون الطبيعة الكمومية للجاذبية بعيدة المنال ، وربما هناك توقيع تجريبي عليها". "تنبؤنا هو أن هناك نوعًا من الضوضاء ، والتداخل ، في الجاذبية - وخصائص تلك الضوضاء تعتمد على الحالة الكمومية لحقل الجاذبية." الجاذبية الكمومية: من خلالها توحيد ميكانيكا الكموم والنسبية العامة ويمكن تمييزها عن مصادر الضوضاء الأخرى من حيث أنها من المحتمل أن تظهر بنفس تقلبات الإشارة بالضبط في العديد من أجهزة الكشف في وقت واحد. ستكون مراقبة هذه الضوضاء دليلًا على أن الجاذبية لها مكون كمومي. قال روفيلي: "لدينا كل الأسباب للاعتقاد بأن هذا هو الحال". يقوم باريك وزملاؤه حاليًا بنمذجة كيف ستبدو ضوضاء الكموم في الاكتشافات الفعلية لموجات الجاذبية من الأحداث الفلكية ، مثل اندماج الثقوب السوداء أو النجوم النيوترونية ، لذا فهم يعرفون ما الذي يبحثون عنه. إن اكتشاف هذه الإشارة وإثبات أن الجاذبية هي ظاهرة كمومية جزئية على الأقل سيشكلان خطوة رئيسية نحو توحيد النسبية العامة وميكانيكا الكموم ، وهو جهد بحثي يسميه العلماء "الجاذبية الكمومية". نظرًا لأن الجاذبية هي سمة من سمات كل الزمكان ، وميكانيكا الكموم تصف المادة في نطاقها المجهري مادون الذري، في اللامتناهي في الصغر، فإن هذا من شأنه أن يقربنا من نظرية الاتساق الذاتي théorie autoconsistante لكل شيء متعلق بالفيزياء. يقول باريك: "القصة الكاملة للجاذبية هي في الواقع قصة المكان والزمان". "في نظرية كل شيء théorie du tout ، نتوقع أن يكون المكان والزمان والمادة شيئاً واحدًا بطريقة ما ، وستكون مراقبة هذه الظاهرة خطوة نحو إثبات ذلك." المصدر: خطابات المراجعة المادية



أول اكتشاف محتمل لـ "التفرد الثلاثي" ، وهي عملية دون ذرية غامضة جوليان كلوديت 10 سبتمبر 2021 . إنه أول كشف محتمل عن التفرد الثلاثي يدعي فريق دولي من الباحثين ، بعد مراجعة البيانات القديمة من مسرعات الجسيمات ، تحديد الأدلة على عملية دون ذرية غامضة اقترحها الفيزيائي الروسي ليف لاندو Lev

Landau في الخمسينيات من القرن الماضي ، ولكن لم يتم إثباتها مطلقًا حتى الآن: التفرد الثلاثي أو الفرادة المثلثية la singularité triangulaire. في الخمسينيات من القرن الماضي ، افترض الفيزيائي ليف لاندو وجود التفرد الثلاثي أو الفرادة المثلثية، وهي عملية دون ذرية نادرة تتبادل فيها الجسيمات هوياتها قبل أن تبتعد عن بعضها البعض. في هذا السيناريو ، جسيمان - يسميان kaons - تشكلان زاويتي المثلث ، بينما تشكل الجسيمات المتبادلة النقطة الثالثة في المثلث. قال برنارد كيتزرBernhard Ketzer ، المؤلف المشارك في الدراسة المعنونة "الجسيمات المتضمنة تبادل الكواركات وتغيرت الهوية أثناء العملية"، التي نُشرت في مجلة فيزيكال ريفيو ليترز ، وهوعضو معهد هيلمهولتز للفيزياء النووية والإشعاعية في جامعة بون:" يطلق عليه التفرد الثلاثي أو الفرادة المثلثية لأن الطرق الرياضية لوصف التفاعلات بين الجسيمات دون الذرية تتعطل. إذا حدث هذا التبادل لهوية الجسيمات حقًا ، فقد يساعد الفيزيائيين على فهم التفاعل القوي (أو القوة النووية الشديدة أو القوية) ، الذي يربط الكواركات داخل النكليونات (النوى الذرية). لذا فإن التفرد الثلاثيSingularité triangulaire هو مفتاح فهم التفاعل القوي. في عام 2015 ، اعتقد علماء الفيزياء الذين يدرسون تصادم الجسيمات في CERN بسويسرا ، أنهم حصلوا على لمحة موجزة عن مجموعة جسيمات غريبة قصيرة العمر تسمى تيتراكوارك tetraquark. لكن الدراسة الجديدة تقدم تفسيرًا مختلفًا - شيء أكثر غرابة. بدلاً من تكوين مجموعة جديدة ، يتبادل زوج من الجسيمات الهويات قبل أن تختفي. يُعرف تبادل الهوية هذا باسم التفرد الثلاثي أو الفرادة المثلثية، وربما قدمت هذه التجربة بشكل غير متوقع أول دليل على هذه العملية. تدرس تجربة CERN's COMPASS (جهاز Muon والبروتون المشترك للهيكل والتحليل الطيفي) التفاعل القوي L’expérience COMPASS (Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) du CERN étudie l’interaction forte. في حين أن للقوة وظيفة بسيطة للغاية (تجمع البروتونات والنيوترونات معًا) ، فإن القوة نفسها معقدة بشكل مذهل ، وقد كافح الفيزيائيون لوصف سلوكها بشكل كامل في جميع التفاعلات. لفهم التفاعل القوي ، يصطدم العلماء في كومباس بجزيئات عالية الطاقة جدًا في معجل يسمى بروتون السينكروتون الفائق Super Proton Synchrotron. ثم يشاهدون ما يحدث. يبدأون ببيونun pion (أوméson pi "باي ميزون") ، ويتكون من عنصرين أساسيين ، كوارك وكوارك مضاد. القوة القوية تحافظ على الكوارك والكوارك المضاد عالقين معًا داخل البيون. على عكس القوى الأساسية الأخرى في الطبيعة ، والتي تضعف مع المسافة ، فإن التفاعل القوي يزداد قوة كلما ابتعدت الكواركات عن بعضها البعض (تخيل كواركات بيون مرتبطة بشريط مطاطي). ثم يسرع العلماء هذا الرائد ليقترب من سرعة الضوء ويصطدم بذرة الهيدروجين. هذا الاصطدام يكسر رابطة القوة بين الكواركات ، وبالتالي يطلق كل الطاقة المتراكمة. يوضح Ketzer: "يتم تحويل هذا إلى مادة ، مما يؤدي إلى تكوين جسيمات جديدة". "لذلك فإن مثل هذه التجارب تزودنا بمعلومات مهمة حول التفاعل القوي." تمثيل التفرد الثلاثي. يتحلل الجسيم a1 الناتج أثناء الاصطدام إلى جسيمين * K و K-quer. تتفاعل هذه مع بعضها البعض لإنتاج الجسيمين π و f0. كما في الشكل أدناه.



إشارة مشوشة خلطت مع إشارة tetraquark :

في عام 2015 ، قامت تجربة كومباس بتحليل رقم قياسي بلغ 50 مليون تصادم من هذا القبيل ووجدت إشارة مثيرة للاهتمام. ونتيجة لهذه الاصطدامات ، ظهر جسيم جديد في أقل من 1٪ من الحالات. أطلقوا على هذا الجسيم اسم "a1 (1420)" واعتقدوا في البداية أنه مجموعة جديدة من أربعة كواركات - رباعي كوارك. ومع ذلك ، كان هذا الرباعي غير مستقر وتفتت إلى أجزاء أخرى. تحدث الكواركات عادة في مجموعات من ثلاثة (التي تشكل البروتونات والنيوترونات) أو في أزواج (مثل البيونات). كانت مجموعة من أربعة كواركات اكتشافًا نادرًا بالفعل. لكن التحليل الجديد يقدم تفسيرًا أكثر غرابة. بدلاً من إنشاء رباعي رباعي جديد لفترة وجيزة ، أنتجت كل تصادمات البيدق شيئًا غير متوقع وهوالتفرد الثلاثي الغامض la mystérieuse singularité triangulaire. وفقًا للباحثين الذين يقفون وراء التحليل الجديد ، يصطدم البيون بذرة

الهيدروجين ويتحطم ، كل طاقة القوة القوية تنتج فيضانًا من الجسيمات الجديدة. بعض هذه الجسيمات هي الكاونات kaons ، وهي نوع آخر من أزواج الكواركات والكواركات المضادة، وهي نادرًا جدًا ، عندما يتم إنتاج كاونين ، يبدأان في اتخاذ مسارات مختلفة. سوف تتحلل هذه الكاونات في النهاية إلى جسيمات أخرى أكثر استقرارًا. لكن قبل ذلك ، يتبادلون أحد كواركاتهم مع الآخر ، ويتحولون في هذه العملية. إن هذا التبادل القصير للكواركات بين الكواركات هو الذي يحاكي إشارة رباعي الكواركات tétraquark . يقول Ketzer ، وهو أيضًا عضو في مشروع البحث متعدد التخصصات "اللبنات الأساسية للتفاعلات الأساسية" Building Blocks of Matter and Fundamental Interactions (TRA مادة). "ثم تبدو الإشارة الناتجة تمامًا مثل تلك الخاصة بـ tetraquark." إذا قمت بتتبع مسارات الجسيمات الفردية بعد الاصطدام الأولي ، فإن زوج الكاونات يشكل "ساقين" ، وتشكل الجسيمات المتبادلة ثلثًا بينهما ، مما يتسبب في ظهور مثلث في الرسم التخطيطي ، ومن هنا جاء اسم هذه العملية. على الرغم من أن الفيزيائيين قد توقعوا وجود التفردات المثلثية لأكثر من نصف قرن ، فإن هذه التجربة هي الأقرب إلى الملاحظة الأولى. لكنها لم تفز بعد. يحتوي النموذج الجديد للعملية التي تنطوي على تفردات مثلثة على معلمات أقل من نموذج tetraquark ويناسب البيانات بشكل أفضل. لكنها غير حاسمة ، لأن نموذج رباعي الكواركات الأصلي لا يزال بإمكانه تفسير هذه البيانات. ومع ذلك فهي فكرة مثيرة للاهتمام. إذا تم تأكيده ، فسيكون تحقيقًا قويًا للتفاعل النووي القوي ، حيث أن ظهور التفردات المثلثية هو توقع لفهمنا لهذه القوة ، والتي لم يتم التحقيق فيها بشكل كامل بعد. البروتونات والنيوترونات والبيونات والجسيمات الأخرى (تسمى الهادرونات) لها كتلة. لقد حصلوا عليها بفضل آلية هيغز المزعومة ، ولكن من الواضح أنها ليست حصرية: يمتلك البروتون كتلة أكبر بحوالي 20 مرة من تلك التي يمكن تفسيرها بواسطة آلية هيغز وحدها. يوضح Ketzer أن "الجزء الأكبر بكثير من كتلة الهادرونات يرجع إلى التفاعل القوي". ومع ذلك ، لم يتضح بعد بالضبط كيف تتشكل كتل الهادرونات. تساعدنا بياناتنا على فهم خصائص التفاعل القوي بشكل أفضل ، وربما الطرق التي يساهم بها في كتلة الجسيمات. " المصدر: خطابات المراجعة المادية.