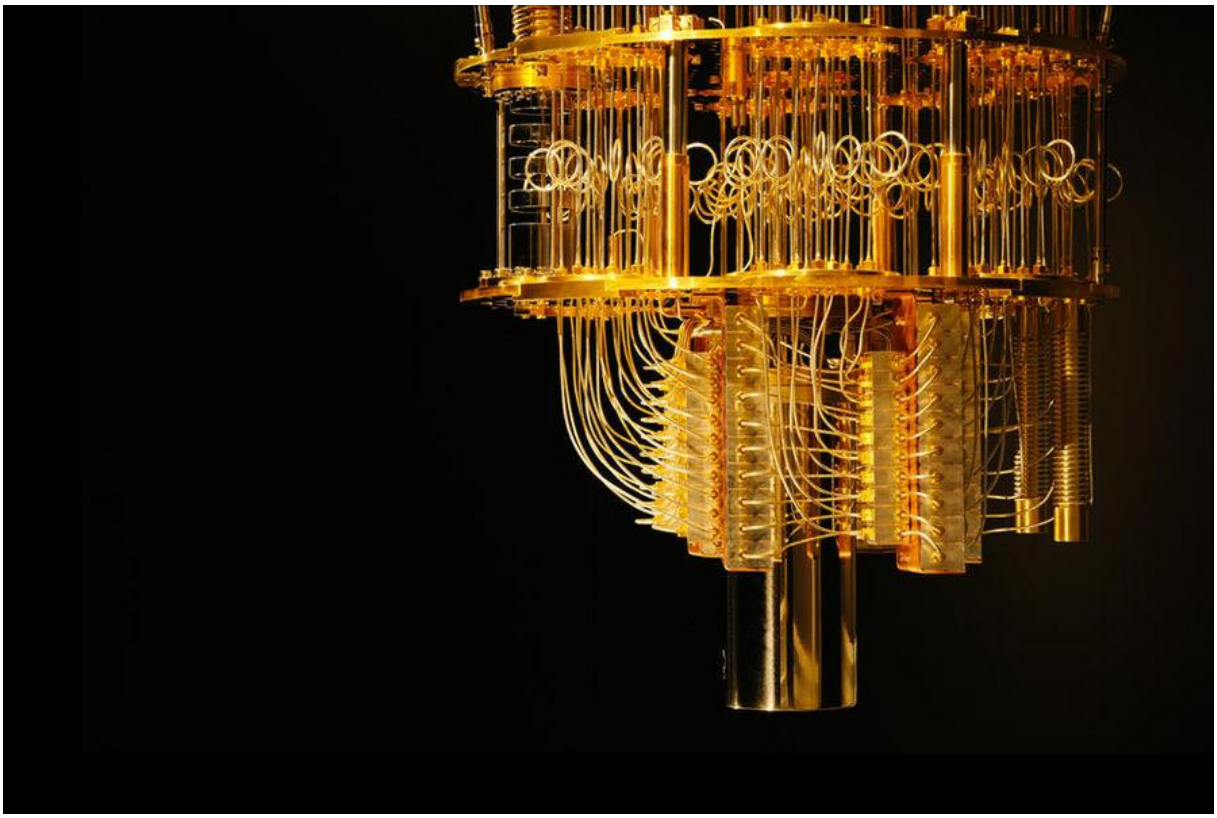
الكون الكمومي أو الكوانتي 6-10

أو

حكايات الكوانتوم الغريبة 6

ترجمة وإعداد د. جواد بشارة



رؤية علمية تترسخ ويتم التركيز عليها أخيرًا، كنتيجة تجريبية مهمة، علماً بأن الكثير بالنسبة للجاذبية الكمومية يأتي من علم الكونيات:

مهما كانت الصياغة الصحيحة لنظرية الجاذبية الكمومية، فهي على أي حال تبقى نظرية في مجال الثقالة الكمومية! لذلك سوف ترث الصعوبات المفاهيمية لفيزياء الكموم، والتي قد تتفاقم. لأنها ليست فقط الجسيمات التي يمكن العثور عليها في تراكب الحالات أو في التشابك، ولكن أيضًا في هندسة الزمكان نفسه.

حول السؤال عن أي تفسير لفيزياء الكموم هو الأنسب للجاذبية أو الثقالة الكمومية، كما هو متوقع، ينقسم المنظرون فيما بينهم. فهناك فكرة العوالم المتعددة التي تحظى بشعبية لدى البعض مثل "كورديستس"، في حين أن فكرة أن فيزياء الكموم تكشف عن بنية علائقية للواقع يفضلها مؤيدو النظرية الحلقية، وهي أقرب تاريخيًا إلى النسبية العامة، التي لديها بالفعل محتوى "علائقي" قوي.

يستكشف عدد صغير من المنظرين أيضًا فكرة أن العلاقة بين المشكلتين قد تكون أعمق. على سبيل المثال، اقترح الفيزيائي والرياضي البريطاني روجر بنروز أن الاختزال الديناميكي قد يكون ظاهرة من

أصل الجاذبية. تستند هذه الفكرة إلى حقيقة غريبة ومثيرة للاهتمام: إن مقياس الطول المرتبط بشكل طبيعي بالجاذبية الكمومية ("طول بلانك") صغير للغاية ومقياس الطاقة (! "" طاقة بلانك ") كبير للغاية، ولكن مقياس الكتلة المرتبط بشكل طبيعي بالجاذبية الكمومية ("كتلة بلانك") هو في حدود ميكروغرام، وهي قيمة قريبة بشكل غريب من تلك التي تميز الأنظمة "الصغيرة" (حيث التأثيرات الكمومية واضحة) عن الأنظمة "الكبيرة"، مع السلوك الكلاسيكي، وليس الكمومي. هل هذه مصادفة أم تلميح إلى ارتباط عميق بين الجاذبية ومشكلة تفسير فيزياء الكموم؟ نحن لا نعرف حتى الآن.

جيل جديد من الخبرات:

يمكن أن تأتي القرائن المفيدة من التجارب المعملية التي هي قيد الدراسة ويمكن إجراؤها في المستقبل القريب. اقترحت ثلاثة فرق مؤخرًا بروتوكولات تختبر الطبيعة الكمومية لقوة الجاذبية. المجموعة حول ماركوس أسبيلماير، من جامعة فيينا ، النمسا ، وسوغاتو بوس ، من الكلية الجامعية ، لندن ، وبشكل مستقل كيارا مارليتو وفلاتكو فيدرال من جامعة أكسفورد ، وهي تجارب قادرة على إثبات تراكب كمومي لاثنين من الأشكال الهندسية المختلفة للزمكان.

تكمن الفكرة في ملاحظة التشابك الكمومي لجسيمين بعد وضع كل منهما في تكوين يكون تراكبًا كموميًا لموقعين مختلفين. بعد ذلك يحدث التشابك بسبب التراكب الكمومي لنسختين من هندسة الزمكان، بسبب المواضع المختلفة للجسيمات.

إذا كانت التجربة ستظهر تلك المساحة لا يمكن للزمن أن يضع نفسه في وضع الكمومي الفائق للحالات، وهذا من شأنه أن يشير إلى علاقة جديدة وعميقة بين الجاذبية والكموم، وربما كان امتداداً للأفكار التي اقترحها روجر بنروز. على العكس من ذلك، في الحالة التي نعتقد أنها الأكثر احتمالية، لوحظ تأثير التشابك، فإن هذا من شأنه أن يشهد على أن عالمنا ليس مرسومًا على قماش في مساحة زمنية معينة: سيكون كذلك نفسه يخضع لألغاز فيزياء الكموم. •

لا يوجد مخرج للتشابك:

اعتقد أينشتاين أن التشابك الكمومي قد تم تفسيره من خلال وجود متغيرات خفية تحترم مبدأ المحلية la localité. لكن الأمر ليس كذلك. التجارب الحديثة أثبتت العكس. في عام 1964، قام عالم الفيزياء جون بيل بتجربة باتت شهيرة وارتبطت باسمه أظهر فيها كيفية اختبار طبيعة التشابك الكمومي، وهي ظاهرة يحتفظ بها جسيمان بوصلة "شبحية" حتى عندما يكونان بعيدان عن بعضهما البعض بمسافة بعيدة جداً.

كان التشابك بالنسبة لأينشتاين، دليلًا على أن فيزياء الكموم غير مكتملة: "فالمتغيرات المخفية المحلية" تفسر هذه الظاهرة، كما كان يعتقد. قامت عدة فرق اختبار بتنفيذ تجربة بيل. بدت النتائج تؤكد رفض فرضية المتغيرات الخفية التي تذرع بها آينشتاين وأكدت تنبؤات فيزياء الكموم. لكن هذه التجارب كانت بها عيوب (أو "ثغرات")، والتي لم تقضي تمامًا على فرضية المتغيرات الخفية التي صارت تعمل خلف الكواليس. أخيرًا، في عام 2015، أجرت عدة مجموعات اختبارات بيل الأولى دون أي ثغرة، والتي استبعدت بشكل قاطع أي تفسير بواسطة المتغيرات المخفية المحلية.

بعض الثورات تبدأ بهدوء. كان هذا هو الحال مع الحالة التي بدأت في عام 1964، عندما شرح الفيزيائي الأيرلندي الشمالي جون بيل، ثم في CERN، كيفية الإجابة عن سؤال عميق كان يشغل بال مؤسسي

الفيزياء الكمية إلى حد كبير. إنها مسألة معرفة ما إذا كانت الجسيمات التي تفصل بينها مسافات كبيرة تحتفظ بوصلة أو اتصال بينها بحيث تؤثر القياسات التي يتم إجراؤها على أحدهما على الآخر على الفور. في الفيزياء الكلاسيكية، مثل هذا التأثير مستحيل، لأنه لا توجد إشارة يمكن أن تنتشر بسرعة أسرع من سرعة الضوء. ولكن في إطار نظرية الكموم، يبدو أن هذا هو الحال. بفضل التفاوتات الرياضية التي وجدها، فتح بيل إمكانية التحقيق في طبيعة هذا الرابط.

بعد خمسين عامًا، غيّرت أفكار بيل بشكل عميق نظرتنا إلى نظرية الكموم. وقد ألهم اختبار بيل علماء الفيزياء لابتكار تقنيات جديدة. ومع ذلك، لم يتمكن العلماء حتى عام 2015 من التحقق من تنبؤات نظرية بيل بأكثر طريقة شمولية ممكنة. تمثل هذه التجارب نهاية بحث طويل وبداية حقبة جديدة في تطوير التطبيقات الكمومية.

لفهم ما فعله بيل، دعنا نعود إلى جذور فيزياء الكموم، النظرية التي تصف سلوك الضوء والمادة في أصغر المقاييس. أحد الاختلافات الرئيسية هو أن الذرات والإلكترونات والجسيمات دون الذرية الأخرى توجد في حالات مميزة بختم عدم اليقين.

مبدأ عدم اليقين لهايزنبرج:

قد شكل مبدأ الارتياب لهايزنبرغ جدلا بين أكبر تيارين في الفيزياء الحديثة وهما تيار أينشتاين المؤمن بالحتمية فقط والرافض للإحتمالية ، وعبر عن ذلك أينشتاين بمقولته الشهيرة "إن الإله لا يلعب النرد بهذا الكون "....والتيار الثاني هو تيار نيلز بور مؤسس الكم والمؤمن بالإحتمالات وقوة الرياضيات والذي أرسل لأينشتاين قائلا : " لا تخبر الإله عما يجب عليه فعله "...وانتهى هذا الجدل بمؤتمر سولفاي الشهير : عندما تمكن علماء الكوانتم من إثبات صحة معادلاتهم و تنبؤاتهم ، إلا أن أينشتاين ظل رافضاً لفكرة الإحتمالية الخاصة بعالم ميكانيكا الكموم حتى وفاته!!..

وقد وصف هايزنبرغ مبدأه بقوله :

"إن عدم استطاعتنا معرفة المستقبل لا تنبع من عدم معرفتنا بالحاضر ، وإنما بسبب عدم استطاعتنا معرفة الحاضر " ، وذلك كريم على المقولة السائدة : " أنه يمكننا معرفة المستقبل إذا عرفنا الحاضر بدقة «. ومعنى ذلك أنه مهما تطورت وسائل القياس والرصد لدينا لن نتمكن من الوصول لفهم كامل وشامل للطبيعة حولنا دوما هنالك مقدار من عدم الدقة وعدم التأكد!!...

أي عدم التأكد في دقة الموقع مضروبة في عدم التأكد في كمية الحركة (الزخم): لا بد أن يكون أكبر من المقدار h ثابت بلانك: أي أن حاصل ضربهما لا يمكن أن يكون صفرة وهذه النتيجة التي أدهشته وأدهشت الجميع.....في النهاية تقول ميكانيكا الكم أنه من المستحيل الحصول على قياسات تامة: فلم يعد بمقدور الفيزيائيين أن يعطوا توصيفة حتمية للأحداث الذرية وما دونها؛ بل مجرد تنبؤات احتمالية، وفي هذا كسر للاعتقاد العلمي السائد بأن المعرفة البشرية قادرة على التنبؤ الدقيق بمصير الكون من الذرة إلى المجرة: ومبدأ هايزنبرغ هو حقيقة تفسير طبيعة الوجود فقط!!.....

لنعد إلى تجربة جون بيل ونأخذ على سبيل المثال مشكلة دوران الإلكترون، وهي خاصية كمومية بحتة تقابل الزخم الزاوي الداخلي. إذا مر إلكترون ذو دوران أفقي من خلال مجال مغناطيسي موجه عموديًا، فإن الدوران يميل لأعلى مع احتمال 50٪، ولأسفل مع احتمال 50٪، والنتيجة تكون عشوائية بطبيعتها.

قارن ذلك بعملة رميت حولها. نحن نميل إلى الاعتقاد بأن رمي العملة هو أمر عشوائي أيضًا، ولكن إذا عرفنا بدقة كتلة العملة المعدنية، والقوة المستخدمة لرميها، وتفاصيل المسودات التي ضربتها ... يمكننا التنبؤ كيف ستسقط العملة. ينشأ الطابع العشوائي في هذه الحالة من نقص المعلومات عن النظام.

خطر أساسي:

بالنسبة لدوران الإلكترون، إنها مسألة أخرى كاملة. على الرغم من أننا نعرف جيدًا جميع خصائص الإلكترون ودورانه قبل أن يمر عبر المجال المغناطيسي، فإن عدم اليقين الكمومي يمنعنا من التنبؤ بالاتجاه الذي سينقلب فيه الدوران. مع الدوران الأفقي الأولي، يكون الإلكترون في تراكب متساوٍ للوزن لحالات الدوران "العالية" و "المنخفضة". إذا تم إجراء قياس على الإلكترون على طول المحور الرأسي، فإن هذا التراكب يتوقف عن الوجود: يتم تقليله إلى أحد شروطه ويتم الحصول على نتيجة فريدة؛ نقيس دوران موجه لأعلى أو لأسفل. عندما طور الفيزيائيون نظرية الكموم في بداية القرن العشرين، أصيب بعض مؤسسيها، مثل ألبرت أينشتاين وإروين شرودنغر، بالحرج من ضبابية الحالات الكمومية. ووفقًا لهم، لا يمكن أن تكون الطبيعة غامضة حقًا، ونظرية؛ تجاوز فيزياء الكموم يجب أن يتنبأ بدقة بسلوك الجسيمات. سيكون من الممكن بعد ذلك التنبؤ بنتيجة قياس دوران الإلكترون بنفس الطريقة التي يمكن بها معرفة كيفية سقوط قطعة نقود إذا كان لديك معلومات كافية.

والأكثر إثارة للدهشة، أن تراكب الحالات يمكن أن يمتد على جسيمين أو أكثر، وهي ظاهرة أطلق عليها شرودنغر "التشابك"intrication. فوفقًا لنظرية الكموم ، يمكن أن تتشابك خصائص الجسيمات بطريقة تجعل قيمتها الإجمالية معروفة جيدًا ، لكن القيم الفردية تظل غير مؤكدة تمامًا - تمامًا مثل وجود نردين خاصين ، عند رميهما ، سيعطي كل منها نتيجة عشوائية ، لكن مجموعها دائمًا يساوي 7.

حلل آينشتاين وبوريس بودولسكي وناثان روزين عواقب التشابك ونشروا مقالًا في عام 1935 استنتجوا فيه أن نظرية الكموم غير مكتملة. اقترحوا أنه سيكون من الممكن حل هذا التناقض من خلال استكمال النظرية بمتغيرات إضافية لا يمكن الوصول إليها من قبل أليس وبرنارد (نتحدث عن المتغيرات المخفية). بمعنى آخر، ستكون هناك نظرية أكثر جوهرية من فيزياء الكموم حيث تتمتع الإلكترونات بخصائص إضافية. سيصف هذا كيف تتصرف الإلكترونات عند قياسها معًا. إذا كان لدينا طرقة للوصول إلى هذه المتغيرات المخفية، يمكننا أن نضحك على توقع ما سيحدث للإلكترونات. وبالتالي فالضبابية الظاهرة للجسيمات الكمومية هي نتيجة جهلنا. لتعيين هذا التخلف المحتمل لفيزياء الكموم، نتحدث عن "نظرية محلية ذات متغيرات خفية". يشير المصطلح "محلي" إلى حقيقة أن الإشارات المخفية لا يمكن أن تنتشر أسرع من الضوء. بالنسبة للمدافعين عن فيزياء الكموم ، مثل الدنماركي نيلز بور ، كانت نظرية الكموم كاملة ولم يخلق التشابك تناقضًا ، معتبرين أن فيزياء الكموم ليست محلية بطبيعتها. لم يشكك أينشتاين في تنبؤات فيزياء الكموم نفسها، بل كان يعتقد أن هناك حقيقة أعمق تحكم الواقع. بعد مقال EPR لعام 1935، انخفض الاهتمام بهذه الأسئلة الأساسية التي طرحتها فيزياء الكموم. كان يُنظر إلى إمكانية وجود متغيرات خفية على أنها مسألة فلسفية ليس لها أهمية عملية، حيث كان يعتقد أن تنبؤات النظريات مع أو بدون المتغيرات المخفية ستكون هي نفسها. لكن كل هذا تغير في عام 1964، عندما أظهر بيل أنه في ظل ظروف معينة تختلف تنبؤات النظريات المتغيرة الخفية عن تلك الخاصة بفيزياء الكموم. سيكون من الممكن اختبار ذلك من خلال تجربة ما إذا كانت المتغيرات الخفية موجودة وتشرح التشابك الكمومي.

أعاد بيل النظر في التجربة الفكرية للثلاثي آينشتين بودولسكي روزين EPR ، ولكن مع القليل من التغيير في اللعبة: فقد سمح لأليس وبرنارد بقياس دوران إلكترونات كل منهما في أي اتجاه. في التجربة الفكرية الأولية، قام Alice و Bernard بقياس الدوران على طول نفس المحور، وبالتالي عثروا على نتائج مضادة 100٪: وبالتالي، بالنسبة للمحور الرأسي، إذا كانت Alice "عالية"، فإن Bernard لا يزال يقيس " على نحو منخفض، والعكس صحيح. من ناحية أخرى، إذا قاس كل من أليس وبرنارد على طول محاور مختلفة، فإن الارتباطات بين النتائج تكون أكثر تعقيدًا، وهنا تظهر الاختلافات بين نظرية الكموم والنظريات المتغيرة الخفية.

أظهر بيل أنه بالنسبة لمجموعات معينة من الاتجاهات، ستكون الارتباطات بين قياسات أليس وبرنارد أقوى في فيزياء الكموم مقارنة بأي نظرية محلية ذات متغيرات خفية. رياضياتياً، يتم التعبير عن هذه الاختلافات من خلال مبدأ l'inégalité de Bell"عدم مساواة بيل". إنها ترجع إلى حقيقة أن المتغيرات المخفية لا يمكن أن تؤثر على بعضها البعض بشكل أسرع من سرعة الضوء، وبالتالي فهي أقل كفاءة في تنسيق جهودهم: تكون العلاقات المتبادلة محدودة. في فيزياء الكموم، توجد سبينات الإلكترونات المتشابكة معًا في حالة واحدة يمكن أن تمتد لمسافات طويلة. بفضل التريث، تتنبأ نظرية الكموم بارتباطات أقوى تصل إلى 40٪ من تلك الموجودة في النظريات ذات المتغيرات الخفية. وهكذا توفر نظرية بيل التفاوتات التي تشكل حداً أعلى للارتباطات التي يمكن أن توجد في أي نظرية محلية ذات متغيرات خفية. إذا تجاوزت البيانات التجريبية هذا الحد (إذا كانت "تنتهك" عدم مساواة بيل)، فهذا يعني أن النظريات ذات المتغيرات الخفية لا تصف الطبيعة.

بعد وقت قصير من نشر بيل لنتائج تجاربه، وجد الفيزيائي جون كلاوزر من جامعة كاليفورنيا في بيركلي وزملاؤه تفاوتات مماثلة، ولكن من السهل اختبارها في التجارب. أخذ الباحثون القياسات الأولى في أواخر الستينيات، ومنذ ذلك الحين اقتربت التجارب بثبات من الجهاز المثالي الذي اقترحه بيل. وجدت التجارب ارتباطات تنتهك مبدأ عدم مساواة بيل، مما أدى إلى القضاء على النظريات المحلية ذات المتغيرات الخفية. ولكن حتى عام 2015، كانت كل هذه التجارب تستند إلى فرضية مخصصة واحدة أو أكثر بسبب عيوب في الأنظمة. احتوت هذه الفرضيات على عيوب يمكن للنظريات المحلية ذات المتغيرات المخفية استغلالها من حيث المبدأ لاجتياز الاختبار.

في كل تلك التجارب تقريبًا في القرن العشرين، أنتج العلماء فوتونات متشابكة من مصدر، وأرسلوها إلى محطات قياس (تمثل أليس وبرنارد)، وسجل الأخير استقطاب فوتون واحد من الزوج، أي الاتجاه الذي يتذبذب فيه المجال الكهربائي للفوتون، ثم قام الباحثون بعد ذلك بحساب متوسط الارتباطات بين نتائج المحطتين وفحصوا ما إذا كان مبدأ عدم المساواة لدى بيل قد تم احترامه أو انتهاكه.

في التجارب الأولى، أجريت القياسات في اتجاهات ثابتة. في هذه الحالة، كان هناك وقت للتفاعل بين الأجهزة وإنشاء ارتباطات محتملة. بعبارة أخرى، تخبر الإشارات المخفية برنارد، دون الحاجة للسفر بأسرع من الضوء ، بالاتجاه الذي كانت تستخدمه أليس لقياس فوتونها.

هذه "ثغرة محلية":

يعني أن النظرية المحلية ذات المتغيرات المخفية ستحصل على نفس الارتباطات مثل نظرية الكموم.

في عام 1982، أجرى آلان أسبكت Alain Aspect، من معهد البصريات، أورساي وزملاؤه اختبارًا مُحسَّنًا تم فيه إرسال الفوتونات إلى طرفي غرفة. بينما هذه الفوتونات المتشابكة كانت في حالة طيران، وهي زاوية بولا حيث يتغير حجم جهاز القياس بشكل دوري. في أواخر التسعينيات، أتقن أنطون زيلينجر، الذي يعمل حاليًا في جامعة فيينا، وفريقه هذه الإستراتيجية باستخدام اتجاهات استقطاب عشوائية حقًا (وليس دورية فقط) للقياس تم تحديدها قبل إجراء القياسات. إذا كانت الإشارات المخفية موجودة، يجب أن تنتشر أسرع من الضوء للتأثير على هذه القياسات. تم إغلاق الثغرة المحلية بإحكام.

لكن هذه التجارب كان لها عيب كبير: من الصعب العمل مع الفوتونات، الجسيمات التي يمكن أن تضيع أثناء الطيران أو ببساطة لا يمكن رؤيتها بواسطة أجهزة الكشف. في معظم الأوقات، لا يعطي القياس أي نتيجة، لأن الفوتونات ضاعت في الطريق. أُجبر المجربون على استبعاد القياسات الفاشلة وافترضوا أن القياسات الناجحة كانت ممثلة لجميع الأزواج المتشابكة ("افتراض أخذ العينات غير المتحيز"). بدون هذا الافتراض، من المستحيل ضمان أن إضافة الفوتونات المفقودة لا تعطي نتيجة متوافقة مع نظريات المتغيرات الخفية. وصار من الملزم التخلص من الفشل، لذلك لقد ألغى العلماء هذا الهروب في ساحة الكشف في بداية هذا القرن، من خلال التخلي عن الفوتونات لصالح أنظمة أخرى متشابكة ومقاسة ذات كفاءة جيدة: الأيونات والذرات والدوائر فائقة التوصيل. تكمن المشكلة في أنه في هذه الحالات، تتطلب القيود التقنية أن تكون الجسيمات قريبة جدًا من بعضها، مما ترك خطأ الموقع مفتوحًا. اختبار الانذار للجميع أصبح اختبار بيل الذي يتم فيه إغلاق جميع الثغرات والذي بات أحد أكبر تحديات علم الكموم.

بفضل التقدم في التحكم في الأنظمة الكمومية وقياسها، أصبح من الممكن في عام 2015 إجراء اختبار Bell بجهاز مثالي، اختبار Bell بدون ثغرة. في الواقع، في أي وقت من الأوقات، وجدت أربع مجموعات مختلفة من الفيزيائيين نتائج تنتهك عدم مساواة بيل مع إغلاق كلتا الثغرتين. وهكذا قدمت هذه التجارب أدلة لا جدال فيها تدحض النظريات المحلية بمتغيرات خفية.

الاتصالات بواسطة التشابك INTRICATION:

أحد العلماء (رونالد هانسون) لديه تأثير قتل مع زملائه أول تجربة لسد الثغرات في جامعة دلفت للتكنولوجيا بهولندا. يقول هانسون:" لقد تسببنا في تشابك دوران إلكترونين كل منهما موجود في عيب بلوري من الماس، أي في موقع مفقود فيه ذرة كربون. كان الإلكترونان المتشابكان في المختبرات على جانبي الحرم الجامعي، وللتأكد من عدم وجود اتصال ممكن بين الاثنين، استخدمنا مولد أرقام عشوائي سريع لتحديد اتجاه القياس. تم الانتهاء من هذا القياس وتسجيله محليًا على قرص صلب. لم يكن لدى من قبل أدنى معلومات حول القياس على الجانب الآخر وقت للوصول، حتى في سرعة الضوء. إشارة مخفية تشير إلى أحد أجهزة القياس إلى الاتجاه الذي يستخدمه الآخر لم يكن لديه وقت للقيام بالرحلة بين المختبرين: وهكذا تم التحكم في الخطأ المحلي بالكامل.

جعل هذا التوقيت الصارم من الضروري فصل الإلكترونين بأكثر من كيلومتر واحد، وهي مسافة تزيد بمقدار أمرين عن الأرقام القياسية العالمية السابقة للجسيمات المتشابكة. كيف تشابك الإلكترونات على هذه المسافة؟ استخدمنا تقنية تسمى la téléportation de l’intraction "النقل الآني للتشابك"، حيث نبدأ بربط كل إلكترون بفوتون. ثم نرسل الفوتونات للقاء بعضها البعض، في منتصف المسافة بين المختبرين. ينتهي بهم الأمر على مرآة شبه عاكسة حيث وضعنا أجهزة الكشف على كل جانب. إذا اكتشفنا الفوتونات

على جانبي المرآة، فإن لفات الإلكترونات المتشابكة مع كل فوتون نفسها تصبح متشابكة. بمعنى آخر، من خلال التشابك بين الإلكترونات والفوتونات، يتم نقل النغمات إلى كلا الإلكترونين.

غالبًا ما تفشل عملية النقل هذه، حيث تضيع الفوتونات بين الماس والمرآة، كما في التجارب السابقة. لكننا نجري اختبار بيل فقط إذا تم اكتشاف الفوتونين؛ وبالتالي، فإننا نتعامل مع فقدان فوتونات المنبع. بهذه الطريقة نزيل عيب الكشف، لأننا لا نستبعد أي نتائج من اختبارات بيل على الإلكترونات المتشابكة. وبالتالي، فإن فقدان الفوتونات المرتبطة بمسافة الفصل الكبيرة لا يحد من جودة التشابك، ولكنه، من ناحية أخرى، يقلل بشكل كبير من عدد الأحداث المتاحة لنا لاختبار بيل. بعد عدة أسابيع من القياسات في يونيو 2015، وجدنا أن عدم مساواة بيل قد انتهكت بنسبة 20٪، بالاتفاق مع تنبؤات نظرية الكموم. كان احتمال الحصول على مثل هذه النتيجة بالصدفة في إطار نموذج بمتغيرات مخفية محلية (وبافتراض أن الأجهزة تآمرت باستخدام جميع البيانات المتاحة) كانت النسبة 3.9٪. في جولة ثانية من القياسات في ديسمبر 2015، وجدنا معدلًا مشابهًا لانتهاك عدم المساواة في بيل. في نفس العام، أجرت ثلاث مجموعات أخرى اختبارات بيل لعدم الهروب. في سبتمبر، استخدم فريق المعهد الأمريكي للمعايير والتكنولوجيا (NIST) بقيادة أحد علماء الفريق وهو(كريستر شالم) وفريق أنتون زيلينجر، فوتونات متشابكة. بعد فترة وجيزة، استخدم هارالد فينفورتير Harald Weinfurter من جامعة Ludwig-Maximilian في ميونيخ وزملاؤه ذرات الروبيديوم التي تفصل بينها مسافة 400 متر في بروتوكول مشابه لتلك الخاصة بمجموعة رونالد هانسون. من ثم قامت فرق من المعهد القومي للمعايير والتكنولوجيا (NIST) وفيينا بتشبيك حالات الاستقطاب لفوتونين باستخدام أشعة ليزر مكثفة موجهة إلى مادة بلورية معينة. نادرًا جدًا (مرة واحدة تقريبًا لكل مليار فوتون يدخل البلورة)، يتفاعل الفوتون المنبعث من الليزر بطريقة معينة، مما أدى إلى ظهور زوج من الفوتونات التي كانت حالات الاستقطاب فيها متشابكة. باستخدام ليزرات قوية بما يكفي، أنتج الباحثون عشرات الآلاف من أزواج الفوتونات المتشابكة في الثانية. ثم تم إرسال هذه الفوتونات إلى محطات منفصلة 184 متراً في تجربة NIST، و60 مترًا في تجربة فيينا) حيث تم قياس حالات الاستقطاب. تم تحديد اتجاه القياس خلال وقت طيران الفوتونات، مما أدى إلى القضاء على خطأ الموقع. بالنسبة لعيب الاكتشاف، كان لا بد من استعادة أكثر من ثلثي الفوتونات المتشابكة للتأكد من وجود عينة تمثيلية. في NIST، قام العلماء المختبرون بتطوير كاشفات الفوتون الفردي عالية الأداء المصنوعة من مواد فائقة التوصيل الباردة. هذه المستشعرات قادرة على رصد أكثر من 90٪ من الفوتونات التي تصل إليها. وهكذا تمت إزالة الخلل في الكشف. بتكرار هذه القياسات أكثر من 100000 مرة في الثانية، قاموا بسرعة بتجميع نتائج إحصائية مهمة حول الارتباطات بين حالات الاستقطاب للفوتونات؛ كانت الارتباطات الملاحظة في التجربتين أقوى بكثير من تلك التي تنبأت بها النظريات ذات المتغيرات الخفية. في الواقع، فإن احتمال أن تكون نتائج NIST هي نتيجة الصدفة هو في حدود مليار من المليار، والفرص أقل مع تجربة فيينا. اليوم، تستخدم مجموعة NIST نسخة محسّنة من الجهاز لانتهاك عدم مساواة بيل بدرجة مماثلة في أقل من دقيقة، وستؤدي التحسينات المتوقعة إلى زيادة تسريع العملية بمقدار ضعفين. تجبرنا هذه التجارب على الاستنتاج

أن جميع النماذج ذات المتغيرات الخفية، مثل تلك التي يدعمها أينشتاين، غير متوافقة مع الطبيعة. إن الارتباطات التي لاحظناها بين الجسيمات تتحدى حدسنا، وتبين لنا أن الفعل الوهمي عن بعد يحدث بالفعل.

تبرز النتائج أيضًا القوة الرائعة للتشابك للتطبيقات الممكنة. على المدى القصير، فإن أحد المواقف التي قد تكون فيها اختبارات بيل الخالية من العيوب مفيدة هو توليد أرقام عشوائية. تعتمد العديد من تقنيات التشفير على القدرة على توليد أرقام عشوائية. ومع ذلك، من الناحية العملية، من الصعب إنتاج هذا الأخير. مولدات الأرقام العشوائية بعيدة كل البعد عن الخطأ، وإذا كان من الممكن توقع الأرقام التي تنتجها، فإن العديد من الأنظمة المالية وأنظمة الاتصالات ستكون في خطر. لذلك فإن وجود مصدر جيد للأرقام العشوائية له أهمية حاسمة. الاستخدام الأكثر شيوعًا للخوارزميات أو العمليات الفيزيائية هو إنشاء أرقام عشوائية. باستخدام الخوارزميات، إذا عرفنا المعلمات المستخدمة كقيم أولية، فمن الممكن غالبًا التنبؤ بالنتيجة. مع العمليات الفيزيائية، يلزم فهم مفصل للفيزياء الأساسية للنظام. يكفي أن تهرب منك أو تتسلل هذه التفاصيل، وسرعان ما سيستغل القرصان هذه الثغرة. تاريخ الكريبتوغرافي، علم فك الشفرات، مليء بأمثلة لمولدات الأرقام العشوائية من كلا النوعين التي تم كسرها.

إن فيزياء الكموم نعمة لهذه التطبيقات. فمن الممكن "استخلاص" الفرصة الكامنة في العمليات الكمومية من أجل إنتاج أرقام عشوائية حقيقية. يمكننا تحويل الارتباطات المقاسة في اختبار بيل بدون ثغرة إلى سلسلة من الأرقام العشوائية. في عام 2018، استخدم فريق NIST أجهزتهم لإنتاج 1024 بتًا عشوائيًا حقًا من 10 دقائق من البيانات التجريبية. يضمن انتهاك بيل لعدم المساواة أن سلسلة البت عشوائية.

من الممكن تحديد مدى قوة النظام: هناك احتمال واحد من كل 1 تريليون أن سلسلة بت NIST ليست عشوائية تمامًا. وبالمقارنة، قد يستغرق مولد الأرقام العشوائية التقليدية عدة مئات الآلاف من السنين للحصول على بيانات كافية لضمان مثل هذه الجودة من العشوائية. يعمل الباحثون الآن على تطوير أداة عامة: سيكون المولد بمثابة مصدر مرجعي للأرقام العشوائية المؤرخة المرسلة عبر الإنترنت على فترات زمنية محددة لاستخدامها في تطبيقات الأمان.

بشكل عام، فإن التقنيات التي تم تطويرها في تجارب بيل فلاويس Bell Flawless من شأنها أن تجعل من الممكن نشر أنواع جديدة من شبكات الاتصال مثل اختراع إنترنت المستقبل. مثل هذه الشبكات، التي تشكل ما يُطلق عليه غالبًا "الإنترنت الكمومي"، من شأنها أن تؤدي مهامًا تتجاوز قدرات الشبكات التقليدية. سيضمن الإنترنت الكمومي اتصالات آمنة ومزامنة الساعات والعديد من المهام الحساسة الأخرى.

مثل هذه المشاريع تقوم على التشابك الكمومي وجودة الأجهزة، كما في التجارب المذكوره أعلاه. في عام 2017، أظهر فريق Delft طريقة لتحسين جودة الدورات المتشابكة، وفي عام 2018، قاموا بتحسين معدلات التشابك لديهم بثلاثة أوامر من حيث الحجم. بناءً على هذا التقدم، يعمل الباحثون على تطوير أول نسخة أولية من الإنترنت الكمومي والتي يجب نشرها في نهاية عام 2020 في عدد قليل من المدن في هولندا. لقد تركت هذه المنطقة الغامضة علماء الفيزياء في حيرة من أمرهم منذ ولادة نظرية الكموم قبل قرن من الزمان. لكن في السنوات الأخيرة، أجرى سايمون غروبلاشر وآخرون تجارب مع فريقه من جامعة Delft للتكنولوجيا في هولندا، يتمتع إيمون غروبلاشر Imon Groblacher بجنون العظمة. ولم يتوقف أبدًا عن الرغبة في تنمية إبداعاته! ويعلنها: "نحن نحاول إنشاء أشياء كبيرة وكبيرة جدًا." لا يزال يتعين علينا الاتفاق على المصطلح ... لأن أحد أعماله لا يتجاوز طوله بضعة ميكرومترات - بالكاد يزيد عن بكتيريا - وسمكه 250 نانومتر، أو واحد على ألف من السمك. من ورقة. وبالنسبة لهذا الفيزيائي، تعني كلمة "كبير جدًا" "1 ملم × 1 ملليمتر". بالكاد مرئي للعين المجردة! من خلال العمل على هذا

المقياس، يأمل هذا العالم في الإجابة عن سؤال غير عادي: هل يمكن العثور على جسم مجهري في مكانين في نفس الوقت؟ هذا الجواب هو في الواقع المعيار للذرات والفوتونات وجميع الجسيمات الأخرى. أكثر من ذلك، في هذا العالم اللامتناهي في أصغر، هذا العالم حيث تسود فيزياء الكموم، يتحدى الواقع الفطرة السليمة: الجسيمات ليس لها موقع ثابت أو طاقة وليس لها أي خصائص محددة - على الأقل طالما أن الشخص لا تراعيهم انتباهاً. توجد في وقت واحد في العديد من الحالات المتراكبة. لكن لأسباب لا تزال غير واضحة إذا أخذناها، فإن الحقيقة التي ندركها مختلفة. يبدو عالمنا بلا ريب غير كمومي. الأشياء الكبيرة - أي من حجم الفيروس - تظهر دائمًا في مكان واحد. اللغز كله موجود: أي جسم يتكون من مادة وطاقة يخضع لقوانين الكموم، فلماذا لا نختبر شاشة geté الكمومية؟ بمعنى آخر، أين ينتهي العالم الكمي وأين يبدأ العالم الكلاسيكي؟ هل هناك فجوة بين الاثنين، عتبة تتوقف عندها التأثيرات الكمومية عن الظهور؟ أم أننا عميان عن ميكانيكا الكموم التي تسود على جميع المستويات؟ قبل ثمانين عامًا، عندما ظهرت نظرية الكموم لأول مرة، تحسر المتشككون على تناقضها الواضح مع قرون من الحدس الفيزيائي. ومنذ ذلك الوقت فصاعدا، أربع تجارب وجهت الضربة القاضية لهذا الحدس؛ ولكن في الوقت نفسه، فتحت هذه النتائج الباب لتسخير الطبيعة بطريقة لم يتوقعها آينشتاين ولا بيل. الثورة الصامتة التي بدأها جون بيل تسير الآن على قدم وساق. في الواقع، "نتجاهل الطبيعة الحقيقية للمادة التمايز والاختلاف بين العالمين الجزئي والكلي"، كما يعترف أنجيلو باسي، الباحث في الفيزياء النظرية بجامعة تريست بإيطاليا. المعضلة تكمن في أن كل شيء يتغير أثناء القياس. عند هذه النقطة، تظهر الخصائص الملموسة، كما لو تم استحضارها بمحاولة بسيطة لمراقبتها. لا تفسر النظرية هذا التحول، ولا لهذا الأمر سبب ظهور إمكانية واحدة فقط بدلاً من واحدة من العديد من الاحتمالات الأخرى. تصف ميكانيكا الكموم ما يمكن أن يحدث عندما تأخذ القياس، لكن ليس ما سيحدث. بمعنى آخر، لا توفر النظرية آلية تشرح الانتقال من المحتمل إلى المثبت. من أجل "حدوث الأشياء" في ميكانيكا الكموم، يعتبر أحد مؤسسي النظرية أنه من الضروري وجود خطأ ميتافيزيقي. في أواخر العشرينيات من القرن الماضي، صاغ فيرنر هايزنبيرغ فكرة أن القياس "يقلل من الحزمة الموجية" للجسيم وغيرها العديد من القضايا المحتملة. أحداث حساسة للغاية يمكن أن تكشف أسرار الانتقال من الحياة الكمومية إلى الحياة اليومية. لا أحد يعرف ما إذا كانت هذه الجهود ستؤتي ثمارها، ولكن هناك أمر واحد مؤكد: من خلال التحقيق في الخطوط العريضة غير الواضحة للعالم الكمومي، قد يكتشف الباحثون مجالًا جديدًا بالكامل للفيزياء. إن مفارقات المقاييس هذه لا تفي بالغرض.

ومن التداعيات الجانبية للتطور الكمومي إن ميكانيكا الكموم تقوم بتعديل تدفق الزمن: تعترف فيزياء الكموم بوجود عدة تدفقات زمنية لنفس الجسم. في نظرية النسبية لأينشتاين، لا يتدفق وقت الأجسام التي تتحرك بسرعات مختلفة بنفس المعدل. في ميكانيكا الكموم الكوانتوم، يمكن العثور على نفس الجسم في عدة حالات متميزة. الخلاصة: يمكن أن يكون لنفس الجسم عدة مرات مميزة. وهذه من الغرائب التي تعصف الذهن البشري.

كانت نتيجة هذه الدراسة التي أجراها باحثان أمريكيان مثيرة للإعجاب خاصةً لأنها تتعلق بالزمن، بتوسعها أو تقلصها، وتوضح أن نفس الجسم المادي يمكنه أن يتبع دفقين من الوزمن ... في نفس الوقت - في هذا المستوى، تصبح الكلمات في اللغة اليومية فخاخًا.

لكن الدراسة هي أيضًا وقبل كل شيء خطوة مهمة للفيزيائيين الذين ربطوا حرفيًا لعقود، باستخدام الأوتار والحلقات، للبحث عن نظرية أساسية جديدة تدمج ميكانيكا الكموم مع نسبية أينشتاين، للوصول إلى نظرية "الجاذبية الكمومية" التي ينتظرها الجميع ولكن لا أحد يعرفها بعد.

في الجوهر، أظهر الباحثون أن تأثير تمدد (أو تقلص) الزمن، الذي اكتشفه أينشتاين في وقت مبكر من عام 1905 بنسبية خاصة وأصبح أساسيًا مع النسبية العامة في عام 1915، ممزوجًا بمبدأ التراكب المؤسس لميكانيكا الكموم، يؤدي إلى الاستنتاج الغريب التالي:

نفس النظام الكمومي (جسيم أو غيره) في حالة متراكبة من سرعتين مختلفتين يعيش "في وقت واحد" على تدفقين من الزمن بإيقاعات مميزة. قبل كل شيء، يقترح الباحثون تجربة لإثبات هذه الحقيقة، ويطرحون أيضًا معادلة أساسية جديدة، غير معروفة حتى الآن.

نظريتان، معادلة واحدة:

لنستأنف بهدوء. جسمان يتحركان بسرعات مختلفة يريان أن زمنهما يمر بمعدلات مختلفة. وإذا جعل أحد الأجسام سرعته تتطور لتساوي سرعة الآخر (عن طريق التسارع أو التباطؤ)، فلن تكون هذه الأجسام قد عاشت نفس الفترة الزمنية. يُعرف هذا التأثير، الذي ينبع من نظرية النسبية، باسم "المفارقة المزدوجة": إذا كان الجسمان توأمين، فسيحصل المرء على تفاوت زمني ملحوظ وملموس بين الجسمين التوأمين اللذين تفرق بينهما سرعة التنقل.

وحدة قياس معيارية ، للحجم الكمومي :

GAUTIER VIROL HÉRAULT، HONEYWELL، IBM، QUANTUM، START UP وغيرها من الشركات تتسابق في تصميم الكومبيوتر الكمومي العملاق الذي سيغير وجه عالم الاتصالات والحوسبة

وبعدالتدقيق في إدعاءات هانيويل وآي بي إم ، الأمر متروك الآن لشركة IonQ للمطالبة بلقب مبتكر "أقوى كمبيوتر كمومي في العالم". مع حجم كمومي يبلغ 4 ملايين، فإن الشركة الأمريكية الناشئة تفوق بكثير آلة هانيويل الأقوى، والتي تم الكشف عنها في 29 أكتوبر والتي تحتوي على واحدة من 128. ولكن استخدام وحدة القياس هذه موضع جدل. لأنها وحدة قياس تحطيم الأرقام القياسية، فحجم الكموم بات موضع نقاش، وإن أقوى كمبيوتر كمومي لشركة IBM له حجم كمومي يبلغ 64.

السجلات تمطر في عالم الحوسبة الكمومية. مع مرور الأشهر، تتبع أجهزة الكمبيوتر "الأقوى في السوق" بعضها البعض. تقوم IBM وHoneywell، على وجه الخصوص، بنشر تقدمهما بانتظام، مما يشير إلى الحجم الكمي المتطور لأجهزتهما. آخر إعلان: في 29 أكتوبر، أعلنت شركة Honeywell أنها وصلت إلى حجم كمي قدره 128، مقابل 64 سابقًا. بالكاد بعد شهر من إعلان الشركة الأمريكية الناشئة IonQ عن حجم كمومي قدره ... 4 ملايين، دون تحديد كيف حققت ذلك.

تم تقديم وحدة القياس هذه، التي قدمتها شركة IBM في عام 2017 لتقييم قوة الكمبيوتر الكمومي، من قبل البعض على أنها المعيار الذهبي في سباق الحوسبة الكمومية. ومع ذلك، يتجنبها الآخرون، بما في ذلك Google، التي لا تستخدمها أبدًا في اتصالاتها. تم تقديم الحجم الكمومي على أنه سطحي للغاية من قبل

العديد من الخبراء، مثل أستاذ معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا سكوت آرونسون ، سيكون ذا أهمية علمية محدودة.