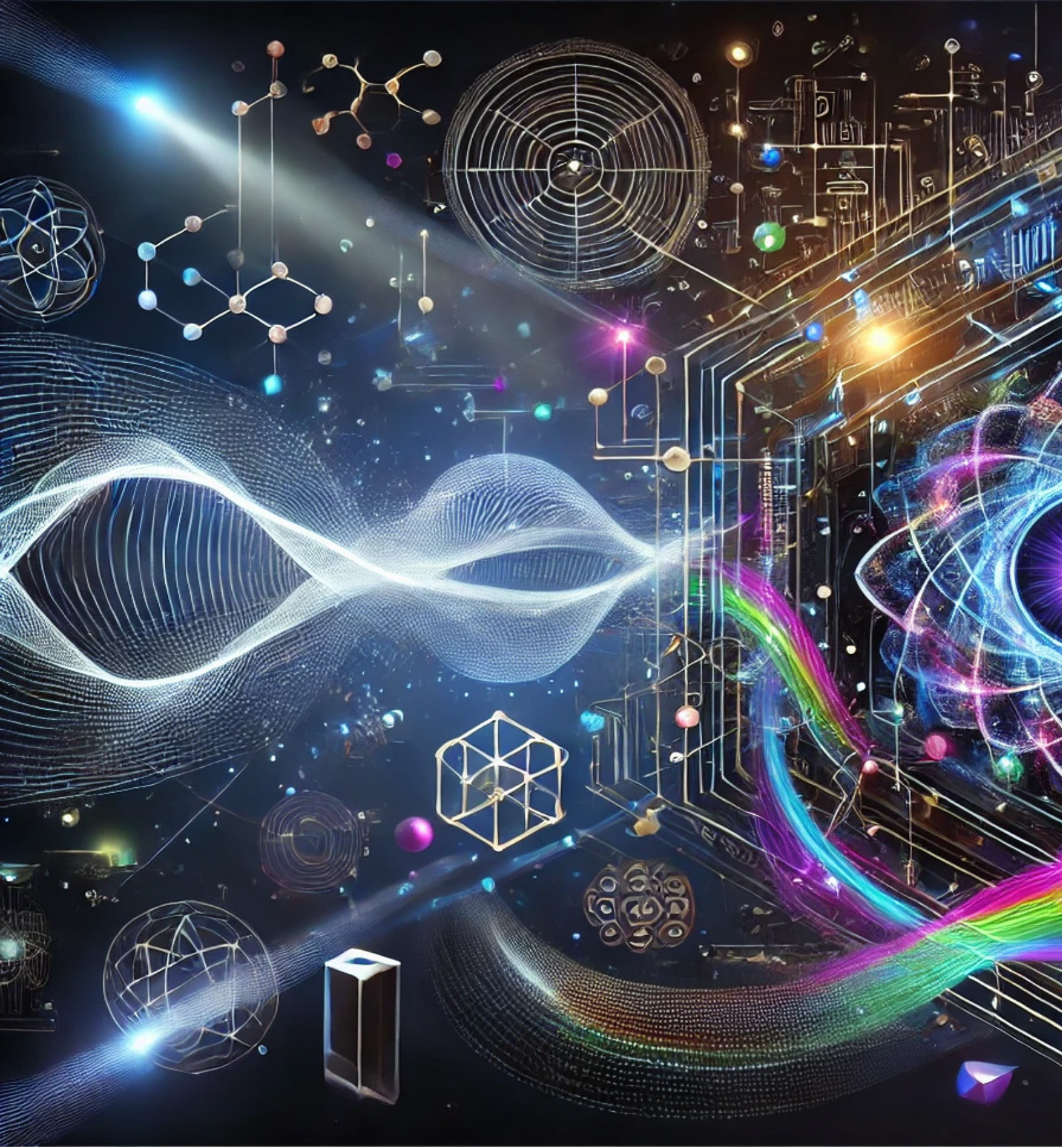




الضوء الكمومي واختبار أسس ميكانيك الكم

عبدالله قنيزح, ماجستير في الهندسة الطبيّة, سوريا



نقدّم هنا عرضاً موجزاً للضوء الكمومي، هذا المجال الذي يشغل أهميّة كبيرة في الأبحاث الراهنة سواء أكانت في المجالات التطبيقية -من مثل الليزر- أو في المجالات النظرية حيث يمكن اختبار أساسيات ميكانيك الكمّ عبر تجارب تتضمّنه -من مثل تجربة الخيار المتأخّر (المسّقة أيضاً تجربة المحاة الكمومية).

أولاً: نظرة إجمالية

اكتسبت هكذا صفةً الجسيم من حيث امتلاكها لطاقةً واندفاعٍ مُحدّدين، بقيت طبيعة الضوء الأساسية لغزاً لغاية سنة 1928 عندما بيّن أخيراً ديراك Dirac عند توحيد ميكانيك الكمّ اللانسبوي مع النسبية الخاصة Special Relativity ضرورة تعديل صورة سلوك الضوء المستمرّ continuous الذي تبرزه معادلات ماكسويل ودياكة مفهوم الفوتون ضمن نسيج نظرية ميكانيك الكمّ، وبالتالي ننتقل من صورة الحقل المستمرّ الكلاسيكي إلى نظرية حقل كمومي Quantum Field Theory عبر تقنية التكمية الثانية Second Quantization، حيث تُعتبر مركّبات فورييه للحقول الكلاسيكية بمثابة مؤثّرات تخضع لقواعد تبادل قانونية [1]. بدا ذلك عندها أمراً صعباً على الفهم، وكانت الرياضيات التي تضقنها صعبةً نسبياً، ولكن شيئاً فشيئاً بدت هذه الاستراتيجيّة قادرةً على تفسير جميع الأمور المتعلقة بالضوء، وبيّنت أن الضوء في جميع مجالات تطبيقه ما هو في الحقيقة إلّا ضوءً كموميّ Quantum Optics يكمن الأمر اللافت للنظر هنا في أن الأمور الكثيرة تحدث عندما تسلك كفاتّ الضوء-الفوتونات العديدة سلوكاً مترابطاً Coherent، بعيداً كلّ البعد عن الفوضى Chaos التي تحدث عندما تتصرّف الكفاتّ بشكلٍ عشوائي Random. يألّف العاملون في مجال الأمواج الراديوية -وهي نوعٌ من الموجات الضوئية ذو أطوال موجية كبيرة وبالتالي لا تنتمي إلى الضوء المرئي- وجودَ إشاراتٍ مترابطة correlated، فالراديو والتلفاز-الرأسي وكلّ وسائل الاتّصالات Communications الأخرى تتجلّى في ظواهر تسلك فيها جميع الكفاتّ السلوك نفسه تقريباً بدلاً من أن تتصرّف بشكلٍ عشوائي. يصف العاملون بالأمواج

يمثّل حقل فيزياء الضوء مجال أبحاثٍ قديمة تعود ربّما لأيّام الإغريق، ولكننا لم نتعلّم كثيراً عن ماهيّته لغاية حوالي بداية القرن التاسع عشر عندما غداً واضحاً أن الضوء عبارة عن أمواج waves -استغرقتنا حوالي قرنٍ إضافي من الزمن لمعرفة طبيعتها- وتحقّقت أكثر الاكتشافات المتعلقة بالكهرباء والمغناطيسية. وأخيراً تمّ تأطير حقلّي الفيزياء هذين ضمن صياغة واضحة وضعها ماكسويل Maxwell عام 1860 بيّن فيها أن الضوء عبارة عن موجة كهرومغناطيسية، وبدأ أن كلّ شيء واضح لغاية بداية القرن العشرين، حيث أضى جلياً وجودَ ظواهر يسلك فيها الضوء سلوكاً جسيمات، ليست تقليديةً بالمعنى المألوف بل تسلك سلوكاً غريباً يجمع بين المظهرين الموجي Wave والجسمي Particle. ما كان غريباً وقتها هو ارتباط هذه الاكتشافات المتعلقة بالضوء باكتشافات تتعلق بطبيعة المادّة matter، إذ تبين أن المادّة أيضاً تسلك أحياناً سلوك موجاتٍ ممّا شكّل صدمةً لفيزيائيي العقود الأولى من القرن العشرين. وضح ميكانيك شرودينغر الكمومي اللانسبوي Non-relativistic Schrodinger Quantum Mechanics هذه الطبيعة الكمومية للمادّة، بينما عجز عن معالجة طبيعة الضوء وذلك بسبب حاجة الأخير إلى معالجة نسبية. على الرغم من التقدّم في فهم طبيعة الضوء -فرضية تكميم الطاقة لبلاك 1900، وتألّف الضوء من "كفاتّ" Quanta (دُعيت فوتونات Photons) في المفعول الكهروضوئي 1905 والذي بفضل حاز أنشتاين جائزة نوبل 1921، ثمّ مفعول كومبتون 1923 في تفسير تغيّر تواتر الأشعة السينية المتبعثرة عبر عزو اندفاع (كمية حركة) نسبوي لكفة الضوء التي

جائزة نوبل على أعمالهم في مجال الميزر- دوراً كبيراً في اختراع الليزر (عام 1960) الموافق لتوليد موجات مترابطة في مجال الضوء المرئي ذي الأطوال الموجية القصيرة. نجح العلماء في تحقيق هذا الأمر من خلال فهم عميق للتأثير Interaction بين الضوء المرئي والمادة، ولكن ما هو لافت للنظر هو أن عملهم النظري هنا كان قائماً على وصف نصف كلاسيكي للتأثير حيث وُصفت المادة كموميّاً بينما كان يوصف الضوء كلاسيكياً كحقل مستمر، ولذلك كانت نظريتهم رغم نجاح اعتمادها في صنع الليزر غير كاملة، وما عمل عليه النظريون لاحقاً في مجال الضوء الكمومي تمثل في إيجاد صياغة رياضية كمومية للترباط الضوئي الذي يحققه الليزر، عبّرت عن النظرية الإحصائية لسلوك كمّات الضوء تتضمن مؤثرات Operators خلقها Creation وإفنائها Annihilation، أي باستخدام لغة الإلكتروديناميك الكمومي QED. سمح ذلك في تحقيق تطوّرات هائلة في مجال التقانة وصنع العناصر الضوئية الإلكترونية Optoelectronic devices بخصائص ملائمة، ولكنه ساهم أيضاً في اختبار أسس ميكانيك الكمّ وفتح الباب أمام أبحاث في مجال الحوسبة والاتصالات الكمومية Quantum Communication/Computers. سوف نعرض السمات الرئيسية لليزر والحالات المترابطة في الضوء آخذين بالاعتبار وجود أدبيات غزيرة في هذا المجال، ولكننا سنتعرّض بعدها لمجال أقلّ ألفة، وهو التجارب الضوئية التي تسمح باختبار أسس ميكانيك الكمّ ذات المقترضات المُخالفة للحدس، وسنختار كمثال في مقالنا هذا تجربة الخيار المتأخّر لويلر [3 Wheeler]

ثانياً: تعريف وأساسيات

الراديوية هذه الحالة الأخيرة العشوائية بالضجيج Noise، وعلى الرغم من انتشارها الهائل في حياتنا، فإن الجهد ينصبّ الآن على تحضير ظروف يتم خلق الترابط Coherence خلالها. يتعلّق الترابط إذن بتلك الظروف حيث تتصرّف جميع الكمّات بشكل متشابهة ومنتظم، ما يعني وجود شيء يمكننا التنبؤ به. قابلية التنبؤ Predictability هذه هي أساس الاتصالات، فبدونها وبدون انتظام الظواهر لا يمكننا الاتصال مثلاً. تعلّمنا الكثير عن الترابط خلال العقود الأخيرة : عن ماهيته وعن كيفية خلقه والمحافظة عليه، وكان للعالم غلاوبر Glauber الحائز على جائزة نوبل بفضل أعماله في مجال الضوء الكمومي دور كبير في هذا المجال، وعلى الأخص فيما يُسمى بالنظرية الكمومية للترباط الضوئي Quantum Theory of Optical Coherence [2]، وهي تتعلّق بمسألة كيفية جعل هذه الأعداد الكبيرة من الفوتونات تسلك السلوك نفسه والقابل للتنبؤ بشكل كبير. لقد تمّ تحقيق تقدّم كبير في هذا المجال على الصعيدين النظري والتجريبي.

يمثّل الليزر Laser المثال الأهمّ عن التقدّم التجريبي هنا. الليزر جهاز تمّ اختراعه على مراحل إذ بدأ في مجال الموجات المكمروية microwaves ذات الأطوال الموجية الكبيرة (التواترات المنخفضة) من خلال ما يُعرّف بالميزر maser، حيث اكتشف العلماء بعد الحرب العالمية الثانية أن أحد استعمالات الرادار هو في جعل هذه الموجات المكمروية تتأثر وتتواصل بشكل مترابط مع مغناطيسية النوى، وتمّ اختراع مُشعّات مكمروية microwave radiators تولّد حزم موجات مكمروية تتمتع بالترباط. لعب تاوونز Townes الذي حاز مع باسوف Basov وبروخوروف Prokhorov

والفيزياء عموماً، ممّا فتح آفاقاً جديدةً لأفكار وتقانات جديدة في مجالاتٍ من مثل الضوء الذري ومعالجة المعلومات. في الحقيقة، استلزم الأمر عقوداً حتى أخذ مُصطلح الضوء الكمومي معناه الدقيق والضروري لوصف ظواهر كموميّة، فمن اللافت للنظر أنه عند اختراع الليزر كان الوصف شبه الكلاسيكي لتأثير الضوء مع المادة كافياً، ولم يكن ضرورياً استخدام نظريّة الحقل الكمومي للضوء -التي تعود في أسسها الأولى إلى عمل ديراك في عشرينيّات وثلاثينيّات القرن العشرين-، ولم تتجلّ الظواهر الكموميّة حصرًا إلا بعد مرور زمن، وخاصّةً بعدما نجح غلاوبر بتطبيق لغة الحقل الكموميّة للضوء على أجهزة ضوئية كلاسيكية من مثل مُداخل مايكلسون النجمي Michelson Stellar Interferometer وكواشف Detectors الضوء. تكلم الناس إذن عن "فيزياء ذريّة" أو عن "إلكترونيّات كموميّة" لوصف التأثير بين المادّة والإشعاع لغاية 1960 فُرِّجَين أكثر على المادّة، بينما أضحى "علم الليزر" المهتمّ بمبادئ وتصميم واستعمالات الليزر مجالَ بحوثٍ مهمّاً مع تركيزٍ على خصائص الضوء الموافق عند استقصاء المبادئ الكموميّة لعمل الليزر، وشيئاً فشيئاً غدا مصطلح الضوء الكمومي مألوفاً [4]

مع تطبيق ميكانيك الكم على الضوء، تمّ فهم آليّة الكشف الضوئي Photodetection بعمقٍ أكبر، وتمّ وضع الأسس النظرية للمعالجة الإحصائية Statistics للضوء من خلال لغة مؤثرات خلق وإفناء الفوتونات. قاد ذلك إلى مفهوم الحالات المترابطة [5 Coherent state] كمفهومٍ يميّز ضوءً منابغ الليزر عن ضوء المنبع الحراري، وعندما أوجد تجريبياً كيمبل

يعنى الضوء الكمومي بدراسة التأثيرات بين المادّة وحقل الإشعاع حيث الآثار الكموميّة مهمّة. يتعلّق قسمٌ مهمٌ من الدراسة هنا باقتضاءاتها فيما يخصّ أسس ميكانيك الكم، ولكن السؤال الرئيس في الضوء الكمومي يكمن في وجوب تكميم الحقل الكهرمغناطيسي أم لا من أجل الحصول على الصورة الصحيحة للتأثير بين المادّة والحقل الكهرمغناطيسي وكيفيّة توصيف امتصاص Absorption الأخير أو تبعثره Scattering أو إصداره Emission . أقنع التنبؤ النظريّ بظاهريّ تحزيم الفوتونات المُضادّ Antibunching- حيث تصل الفوتونات إلى الكاشف في بعض التجارب بشكلٍ منفصلٍ وليس معاً كما يتنبأ النموذج الكلاسيكي- وعُضِر الفوتونات Squeezing- حيث تكون موجة الفوتون "معصورة" في أحد الاتجاهات وممتدّة في الاتجاه العمودي- والتحقّق التجريبيّ منهُما الباحثين بضرورة تكميم الحقل وبدؤوا يركّزون أنظارهم على الآثار الكمومية غير الكلاسيكية للضوء من مثل التشابك الكمومي Quantum Entanglement

الضوء الكمومي هو إذن مجال بحوثٍ تقع عند تقاطع الفيزياء الذريّة والجزيئية والضوئية، وأهم سماته الفميّزة هي تعامله مع الليزر -منابع الإشعاع الكهرمغناطيسي المترابط-. من الواضح الآن أهميّة الضوء الكمومي في حياتنا اليومية وذلك بسبب الاستخدامات المتزايدة لليزر منذ اختراعها أوائل ستينات القرن المنصرم: في الطب، والاتصالات، وعلوم البيئية، وعلوم القياسات، والبيولوجيا، إلخ. علاوةً على ذلك، وخلال العقدين الأخيرين من الزمن تبين أن هناك خصائص كثيرة لضوء الليزر يمكن استخدامها في البحوث عن أساسيات ميكانيك الكم

الذرات فوتوناتها في اتجاه واحد وبالتواتر والطور نفسها. رياضياً، تُعرّف الحالة المترابطة وفق أحد الشروط الثلاث التالية المتكافئة: إنها الحالات الذاتية Eigen states لمؤثر الإفناء Annihilation Operator (أي الحالات التي لا تتغير عند إضافة أو امتصاص فوتون منها)، أو هي الحالات الناجمة عن تطبيق مؤثر الانسحاب Displacement Operator (تركيب مُعيّن من مؤثرَي الموضع والاندفاع) على حالة الفراغ (الحالة المُعرّفة بأنها لا تحوي أيّ فوتون)، أو -أخيراً- هي الحالات ذات الارتياح الأصغري Minimum Uncertainty State (أي التي تحقّق المساواة في متراجحات هايزنبرغ للارتياح) بتشتتين نسبئين للموضع وللاندفاع متساويين. يُبرهن كذلك أن الحالة المترابطة هي التي توافق توزيعاً إحصائياً بواسونياً Poissonian لعدد الفوتونات التي يمكن كشفها فيها، وبالتالي يكون متوسط هذا العدد مساوياً لتباينه (مربع انحرافه المعياري). يمكن بتطبيق بعض المؤثرات المُعبّرة عن تأثيرات غير خطيّة تحويل الحالة المترابطة إلى حالة مترابطة معصورة Squeezed Coherent State، حيث يكون التوزيع الإحصائي لعدد الفوتونات المُكتشفة بواسونياً فوقياً super-Poissonian (التباين أكبر من المتوسط) أو تحتياً Sub-Poissonian (التباين أصغر من المتوسط).

رابعاً: الميزر والليزر [6]

الليزر اختصار لعبارة "تضخيم الضوء عبر الإصدار المحثوث للإشعاع" Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation، وهو جهاز يُصدر ضوءاً مترابطاً مكانياً وزمنياً. يسمح الترابط المكاني Spatial Coherence ببقاء حزمة الضوء ضيقةً وبتركيزه ضمن بقعة صغيرة جداً، ممّا سمح

Kimble عام 1977 نُظماً حيث تُصدر الفوتونات عن ذرّة منفردةٍ واحداً فواحداً ازداد الاقتناع بأن هذه المعالجة الكمومية الإحصائية للضوء تمثّل فعلاً ما يحدث في نظم الضوء الكمومي

فتح تطويز الليزرزات النبضية فائقة القصر Ultrashort Laser Pulses -بواسطة تقنيات تعديل الجودة Q switching حيث تكون حزمة الخرج نبضيةً وبذروةٍ تفوق بكثير ما يمكن أن ينتجه الليزر لو كان يعمل في مجال الموجة المستمرة ممّا يؤدي إلى معدّلات تكرار نبضات أخفض وطاقات أعلى ومدّة أطول- الباب أمام تطبيقات كثيرة في مجال فيزياء الجسم الصلب (مطيافية رامان Raman Spectroscopy) وفي دراسة القوى الميكانيكية للضوء على المادّة، ممّا يسمح بوضع عُماماتٍ من الذرات في مصيدةٍ ضوئيةٍ Optical trap حيث ساعدت هذه التقنية على تحقيق تكاثف بوز-أنشتاين Bose-Einstein Condensation وهو حالة فريدة من المادّة تنبأ بها العلماء نظرياً منذ مدّة ولكن لم يتمّ تحقيقها تجريبياً إلا بعد فترة.

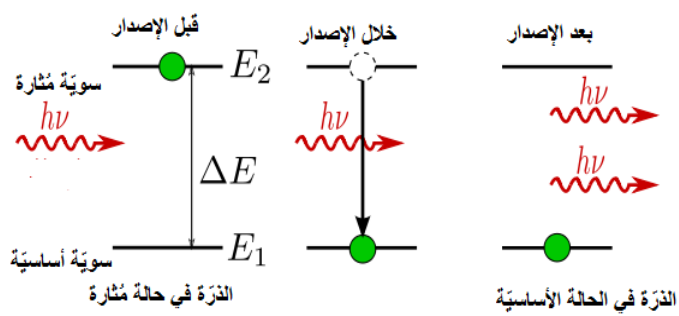
تمثّلت إحدى نتائج الضوء الكمومي الأخرى المهمة في تصنيع نُظُم برهنت على صحّة التشابك الكمومي Quantum Entanglement والنقل الكمومي عن بُعد Quantum Teleportation، وسمحت باختبار أسس ميكانيك الكمّ إزاء بدائل أخرى مثل نظرية المتغيّرات الخفية Hidden Variables Theory

ثالثاً: الحالات المترابطة

في مجال الضوء الكمومي، تصف الحالة المترابطة فيزيائياً حالة الحقل الكهرمغناطيسي المُكمّم الصادر عن منبعٍ ليزريّ وحيد التواتر، حيث تُصدر

المحثوث مترابطاً، فتشارك جميع فوتوناتِه بقيم الطاقة والطور، ويكون لها الاتجاه والاستقطاب نفسها

تاريخياً، تمّت الدراسة والتصاميم الأولى على العيزر الموافق لتضخيم الموجات المكروية Microwaves وليس على الليزر الموافق لتضخيم الضوء المرئي، ولكنهما يقومان على المبدأ نفسه في وجود وسطٍ ماديٍّ مُضخَّم يوضع في حاوية رنينية Resonant Cavity، ويتمّ خلق تغذية رجعية Feedback تسمح بتوليد إشعاعٍ مترابط. تُفيد الميزرات حالياً كساعاتٍ ذرية دقيقة، كما أن هناك ظواهر عديدة في الفيزياء الفلكية يصدر فيها إشعاعٌ ميزريّ محثوث من الوسط بين النجوم Interstellar space.



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

الشكل 1. آلية الإصدار المحثوث

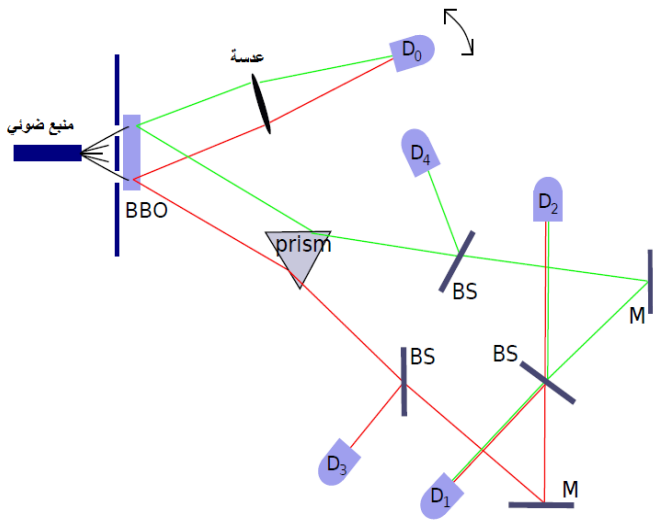
خامساً: اختبار تجربة الخيار المتأخر لأسس ميكانيك الكم

دأب العلماء ومنذ اكتشاف ميكانيك الكم إلى مناقشة مدى صحة مسلماته الأساسية، وفيما إذا كان ممكناً اختبارها وفق تجارب تتجلى فيها الظواهر الكمومية بشكلٍ يخالف حدسنا التقليدي، ومثّل الضوء إحدى أهم الأدوات التي مكنتهم من ذلك، سواء أكان ذلك عبر تجارب ذهنية Gedenken أم عبر تجارب حقيقية. من بين تجارب كثيرة سوف

بتطبيقاتٍ من مثل القطع بالليزر والمؤثرات الليزرية، أمّا الترابط الزمني Temporal Coherence فيسمح بإصدار ضوءٍ بتواترٍ واحد، فيكون ذا لونٍ وحيد. هناك تطبيقات كثيرة لليزرات تمتدّ من مساق الأقرص الضوئية Optical Disk Drives إلى تجهيزات الإظهار الضوئية Laser Lighting Displays مروراً بالطابعات الليزرية والألياف الضوئية والتطبيقات الطبية والعسكرية وغيرها.

يتألف الليزر من وسطٍ ماديٍّ بخواصّ تسمح بتضخيم الضوء فيه عبر آلية الإصدار المحثوث Stimulated Emission، حيث تتمّ إثارته عبر إسقاط ضوء خارجيٍّ عليه أو عبر حقنه بتيار كهربائي. يكون الليزر عادةً بشكل حاوية ضوئية Optical Cavity تتكوّن من مرآتين على طرفي الوسط حيث ينتقل الضوء جيئةً وذهاباً بين هاتين المرآتين مروراً بالوسط المُضخَّم، وينفذ قسمٌ منه للخارج مشكلاً خرج الليزر فيزيائياً، توضع إلكترونات ذرات الوسط المادي في سويةٍ طاقةٍ عليا عبر امتصاصها لضوءٍ واردٍ مثلاً، فتصدر الذرات ضوءاً عندما تعود لسويتها الأساسية. يمكن أن يتمّ هذا الإصدار تلقائياً فيسمى بالإصدار التلقائي Spontaneous Emission ويكون طوره هنا عشوائياً يختلف من ذرة لأخرى، وبالتالي لا يكون مترابطاً. ولكن هناك آلية أخرى -الإصدار المحثوث- حيث يحرض ورود فوتونٍ بقيمٍ محدّدة للتواتر والطور والاستقطاب إصدار الذرات لفوتونٍ بالقيم نفسها للوارد -في حال كانت السوية الطاقةية المُثارة أعلى من السوية الأخرى بمقدارٍ يعاثل تماماً طاقة الفوتون الوارد- كما في الشكل 1¹. وهكذا يكون الضوء

1 من الجدير ذكره أن ميكانيك الكم اللانسبوي يقدر على تفسير ظاهرة الإصدار المحثوث، بينما يعجز عن تفسير ظاهرة الإصدار التلقائي الأكثر ألماً -بسبب تشابهها مع ميل النظم في الفيزياء الكلاسيكية لتخفيض طاقتها- التي تحتاج لنظرية حقل كمومية نسبية للتفسير.



الشكل 2. الشكل 2: يُبثع منبع ضوئي على الشقين. تسمح بلورة BBO بشطر الفوتون إلى فوتونين متشابكين entangled. يكشف الكاشف D0 "فوتون الإشارة" المتحرك للأعلى ويبين وجود أهداب تداخل أو عدفه. يتلقى موشور "الفوتون الوسيط" ليمر بعدها في أجهزة شطر حزمة BS ومرايا M. [المرجع 8]

شاطر حزمة (BS) لينعكس عنه نحو الكاشف (D3) (D4) أو لينفذ منه نحو مرآة (M) (Mirror) بنسبة 50-50% تقوم بعكسه نحو شاطر حزمة آخر فينعكس عنه نحو الكاشف (D1) (D2) أو ينفذ منه نحو الكاشف (D2) (D1) وذلك أيضاً بنسبة 50-50%. إذا تم الكشف عن الفوتون الوسيط في الكاشفين D3 أو D4 فهذا يعني معرفة أي من الفوتونين A2 أم B2 تم رصده، وبالتالي علم الشق الذي مر منه، أي غاب التداخل فينبغي على D0 ألا يبين أي أهداب تداخل، بينما إذا تم الكشف في D2 أو D1 لما علمنا أي من الفوتونين A2 أم B2 تم رصده، ولبقي مجهولاً الشق الذي مر منه، فهناك إذن تداخل يجب على D0 تبيانه. وهكذا فإن قرار القياس بالكاشفين D3,4 يوافق الحصول على معلومة أي طريق سلكه الفوتون 2، وبالتالي معرفة مسار الفوتون 1 المتشابك معه، بينما يوافق قرار القياس بالكاشفين D1,2 القيام بقياس هذه المعلومة، ومن هنا أتت تسمية المحاة. حيث أن التجربة توافق دوماً الكشف بـ D0

نناقش تجربة واحدة، ولكن الاستنتاج يصلح عمومًا لجميع تجارب اختبار أسس ميكانيك الكم المُجرأة لغاية اليوم.

يتعلق الأمر بتجربة مخالفة للحدس تعود تاريخياً إلى العالم ويلر وفق نسختها المعروفة بالمحاة الكمومية للعالمين سكاللي Scully ودروول Druhl [7]. يقوم مبدأ التجربة على تجربة الشقين المألوفة ليوونغ Young ما عدا عن أنه يمكننا إزالة شاشة الكاشف في اللحظة الأخيرة قبل سقوط الضوء عليها مع اجتيازه للشقين، وعندها يتوجه بعيداً نحو مقارب يمكننا تحديد المسار الذي سلكه. يسمح ذلك بتحقيق "خيار متأخر Delayed Choice" للمراقب بعد اجتياز الفوتون المُفترض لحاجز الشقين. بالرغم من توصيف ميكانيك الكم لهذه التجربة بشكل صحيح، فإنها قد تبدو مخالفة لحدسنا المباشر في أن اختيارنا لجهاز الكشف "بعد" اجتياز الفوتون لحاجز الشقين يُلزمه في لحظة الاجتياز "الماضية" هذه بأن يختار إما النفوذ من الشقين معاً أو عبر واحد منهما، وكأن "الماضي لم يعد موجوداً، بل يمكن التأثير عليه، وبشكل يناقض -ظاهرياً- إذن مبدأ السببية Causality" في أن السبب يسبق النتيجة

يبين الشكل 2 رسماً تبسيطياً للتجربة [من المرجع 8]، بينما يعرض الشكل 3 [من المرجع 9] تحقيقاً تجريبياً تم إجراؤه والتأكد فيه من مقتضيات ميكانيك الكم. كما نرى في الشكل 2 فإن الضوء الوارد من الشق يمكنه إثارة ذرات بلورة بورات الباريوم (Barium Borate (BBO لتصدر زوجين من فوتونين متشابكين: زوج (A (B باللون الأخضر (الأحمر) يتوجه أحد عنصريه (B1) (A1) نحو الكاشف D0 بينما يتجه الآخر (B2) (A2) عبر موشور prism نحو

تتشكّل أهدابُ التداخلِ عنده، وحصل على الرسّمين المُقيّنين في الشكل 4 و5.

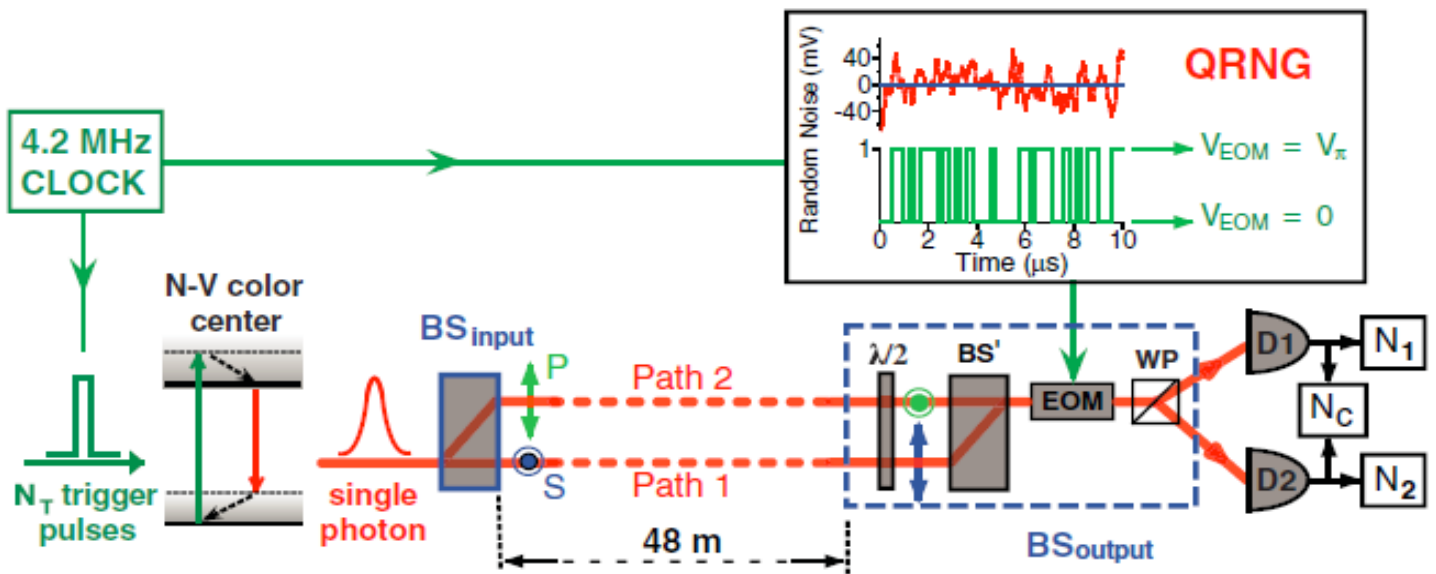
يصدر فوتون وحيد عن مركز الـ $N-V$ ، ويُرسَل عبر مقياس تداخل استقطابي طوله 48 م، ممّا يكافئ زمنَ طيرانٍ 160 نانو ثا. يولّد الـ QNRG أعداداً عشوائية 0,1، تجعل فلتية الـ EOM مساويةً لـ 0، V_0 على الترتيب خلال 40 نانو ثا بعد تأخّر إلكتروني 80 نانو ثا. تُستعمل إشارتان متواقتتان من الساعة لإطلاق الفوتون المنفرد ولتوليد أعداد الـ QNRG. في مرجع المخبر، يجري الاختيار العشوائي بين التشكيل المغلق والمفتوح (الموافقين لإدخال شاطر حزمة خارجي BSinput أم لا) آتياً مع ولوج الفوتون مقياس التداخل. بالاستفادة من كون الـ QNRG متوضّعاً عند خرج مقياس التداخل، تسمح مثل هذه المُواقفة للفوتون أن يدخل المخروط الضوئي المستقبلي للخيار العشوائي عندما يكون في منتصف مقياس التداخل، بعد اجتيازه لـ BSinput بفترة معتبرة.

هناك نوعان مختلفان تماماً من ظواهر التداخل في تجربة كيم، فالأول يتضمّن تداخلاً لفوتونٍ منفردٍ

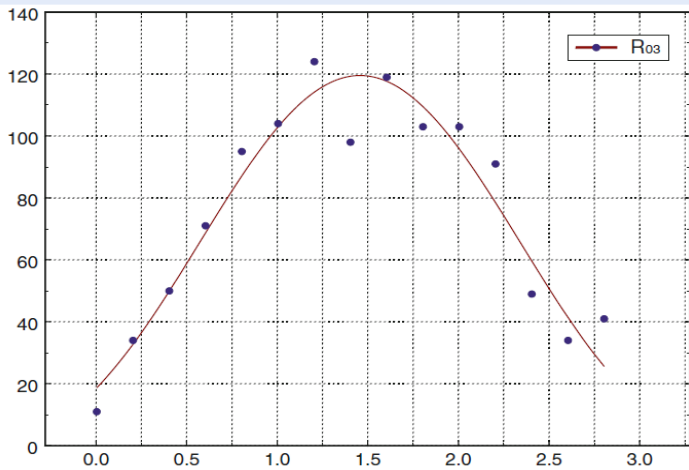
قبل الكشف بالكواشف الأخرى، فإن انهيار الدالة الموجية Collapse of wave function المُلاحَظ في D0 (تحديد مسار الفوتون أهو عبر الشقين أم عبر شقٍّ واحد) تمّ خلقه عبر حادثة -موافقةٍ للكشف عن الفوتون الوسيط في D3 أو D4 على الأقلّ- وقعت في لحظةٍ لاحقةٍ في الزمن، ومن هنا المفارقة عن كيفية تسبّب عمليّة قياس ما في انهيار الدالة الموجية في الماضي.

يمكن حلّ المفارقة باستخدام لغة المؤثرات في الضوء الكمومي، كما يمكن وباستخدام مفهوم الاحتمالية الشرطية لعمليات القياس على جسيمات متشابكة تبيان اتّساق ميكانيك الكمّ مع التجربة، وألاً تناقض مع مفهوم السببية. في الحقيقة، قام فريقُ كيم [10] Kim بقياس R0k معدّل تعداد الكشف المُشترك Joint Detection Counting Rate (أي تمّ تسجيل عدد حوادث الكشف المُشتركة خلال

وحدة الزمن) للفوتونات بين الكواشف D_k ($k=1,2,3$) والكاشف D_0 أثناء تغيير موضع الأخير ومع جعل الشقين بعيدين عن بعضهما بحيث لا

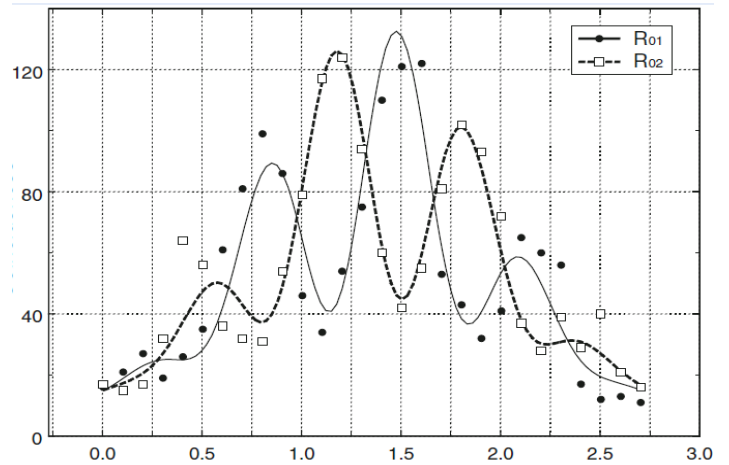


الشكل 3. تحقيق تجربة الخيار المتأخّر في المرجع [9].



الشكل 5. معدّل التعداد R03 (يوافق المنحني المتصل مواءمةً نظريّةً مع نقاط المعطيات) على المحور الشاقولي إزاء موضع D0 بالمم على المحور الأفقي. نلاحظ غياب أيّ عيّنة تداخلية. نحصل على منحنيّ مماثل من أجل R04. [المرجع 10]

الذي يتعامل مع سلوك الضوء عند "تفكيكه" إلى مكوناته وكمّاته الأساسيّة: الفوتونات، وبعض من هذا السلوك يختلف تماماً عما نتوقّعه كلاسيكياً للضوء. تمّ توضيحُ أساسيات النظرية عبر رياضيات ثلاثيّات القرن العشرين في أمثلةٍ بسيطة لا تتضمّن أعداداً كبيرةً من الفوتونات، بينما غالبية النظم الضوئية التي نراها تحوي مقاديرَ كبيرةً من الضوء. أحياناً يسلك هذا العدد الكبير من الكمّات سلوكاً مستمراً بحيث لا يمكن تمييزه عن السلوك الذي كانت تصفه معادلات ماكسويل، ولكن هناك سياقات كثيرة وأنواع عديدة من التجارب حيث نرى وبشكلٍ وثيقٍ جداً العلاقة بين الضوء وبين الذرات التي تُصدره أو تُبعثه أو تمتصّه، وكلّما رأينا هذه التأثيرات بين الضوء والمادّة بشكلٍ وثيقٍ كانت الطبيعة الكموميّة للضوء القائلة بتألّف الأخير من كمّاتٍ متقطّعةٍ ضروريّةً لفهم ما يجري. هذا هو جوهر الضوء الكمومي، فهو ليس ضرورياً لتفسير كثيرٍ من ظواهر الضوء المعروفة، ولكنه شرطٌ لا بدّ منه لفهم تأثير الضوء مع ذرات المادة، وبعض من هذه التأثيرات مثل أحجياتٍ وألغازاً من وجهة النظر الكلاسيكيّة للضوء



الشكل 4. معدّلا التعداد R01 و R02 (توافق المنحنيات مواءمةً نظريّةً مع نقاط المعطيات) على المحور الشاقولي إزاء موضع D0 بالمم على المحور الأفقي. نلاحظ وجود عيّنة تداخلية نمطيّة (مع فرق في الطور بين المنحنيين) تماثل عيّنة تداخل تجربة الشقّين الكلاسيكيّة، لأن الكشف وفق D0,1 يقتضي ممحاةً كمومية لمعلومة مسار الفوتون. [المرجع 10]

وحيد، بينما يشتمل الآخر على تداخلٍ لفوتونين إثنيين. ينجم غيابُ التداخل عند قياس معدّل التعداد الأحاديّ في كاشفٍ واحد D0 عن كون المسافة الفاصلة بين الشقّين أكبرَ بكثير من عرض الهدب، أمّا غيابه في معدّل التعداد الثنائي R03 المشترك للكاشفين D0, D3 فينجم عن مساهمةٍ دالّةٍ موجيّة لفوتونين (1 و 2) واحدةٍ لا غير موافقةٍ للمسار B، بينما يتأتّى التداخل في معدّل التعداد الثنائي R01 المشترك للكاشفين D0, D1 من مساهمةٍ دالّتين موجيّتين لفوتونين (1 و 2) توافقان المسارين A و B

نستنتج إذن أن ميكانيك الكم يتفق مع النتائج التجريبية لاختباره الضوئي في تجربة الخيار المتأخّر، ولا انتهاك لمبادئه، بل إن جميع نتائج الرصد في اختبارات ضوئية مشابهة ناجمة عن تداخلٍ لفوتونات متعدّدة، حيث لا يمكن تفسير ظاهرة التداخل اللاموضعية والمشمّلة لجسيمات عديدة ضمن النظرية التقليديّة ولا بدّ من تفسير كمومي لها.

سادساً: خلاصة

يعبر الضوء الكمومي إذن عن ذلك المظهر من الضوء

المراجع

مجالّي التنمية المستدامة والاتصالات العالمية
المصدر: [American Physical Society](#)
**انطلاقة جديدة في الفوتونات
الكمومية**
**عدسات معدنية متعددة الوظائف
تحدث ثورة في التكنولوجيا**
قدم الباحثون عدسات معدنية رقيقة
متعددة الوظائف أحدثت ثورة في طريقة
التحكم بالإصدار الكمومي من مُصدّرات
الفوتونات الأحادية في نيتريد البورون
السداسي (hBN). وكما هو مُفصّل في
مجلة eLight، فإن هذا الابتكار يسمح
بالتحكم المتزامن في اتجاه واستقطاب
والزخم الزاوي المداري للانبعاثات
الكمومية
صمم الفريق من جامعة موناخ وجامعة
بوهانغ وجامعة التكنولوجيا في سيدني
هذه العدسات المعدنية باستخدام
السيليكون الهيدروجيني منخفض الضياء،
ما يحقق كفاءة تجميع عالية وتحكمًا
دقيقًا في الفوتونات. يمكن هذا النظام
من توجيه والتحكم في خصائص الفوتونات
الأحادية بطرق غير مسبوقة
يعد هذا التقدم بإنجازات كبيرة في الحوسبة
الكمومية والاتصالات الآمنة والاستشعار
الكمومي. يهدف الفريق البحثي إلى
دمج مصدّرات الفوتونات الأحادية في
hBN مباشرة مع العدسات المعدنية في
المستقبل، كما يعزز قدراتها ويفتح الباب
أمام إمكانيات جديدة في تصميم الأجهزة
الكمومية المتكاملة. المصدر: [Nature](#)

- [1] Dirac P (1930) The principle of quantum mechanics. Oxford University Press, Oxford
[2] Glauber RJ (1963) The quantum theory of optical coherence. Phys Rev 130:2529
[3] Wheeler JA (1982) A delayed choice experiment. Maryland lectures collection,
[4] Scully MO, Suhail Zubairy M (1997) Quantum optics. Cambridge University Press, Cambridge
[5] Glauber RJ (1963) Coherent and incoherent states of the radiation field. Phys Rev 131:2766
[6] Kastler A (1985) Birth of the maser and laser. Nature 316:307–309
[7] Scully MO, Druhl H (1982) Quantum eraser: a proposed photon correlation Experiment concerning observation and “delayed choice” in quantum mechanics. Phys Rev A 25:2208
[8] Demystifying the Delayed Choice Experiments, B. Gaasbeek, arXiv 1007/3977 (2010)
[9] Experimental Realization of Wheeler’s, Delayed-Choice Gedanken Experiment, V. Jacques et al., Science, v. 315, 966 (2007)
[10] Kim YH, Yu SP, Kulik SP, Shih YH, Scully MO (2000) A delayed “choice” quantum eraser. Phys Rev Lett 84:1

خبر

أعلنت الأمم المتحدة أن عام 2025 هو السنة الدولية للعلوم والتكنولوجيا الكمومية. يُقرّ هذا الإعلان بإمكانية العلوم الكمومية في دفع الابتكارات في