مشروع ERATO للأجهزة الكمومية العيانية

ما هو مشروع ERATO؟

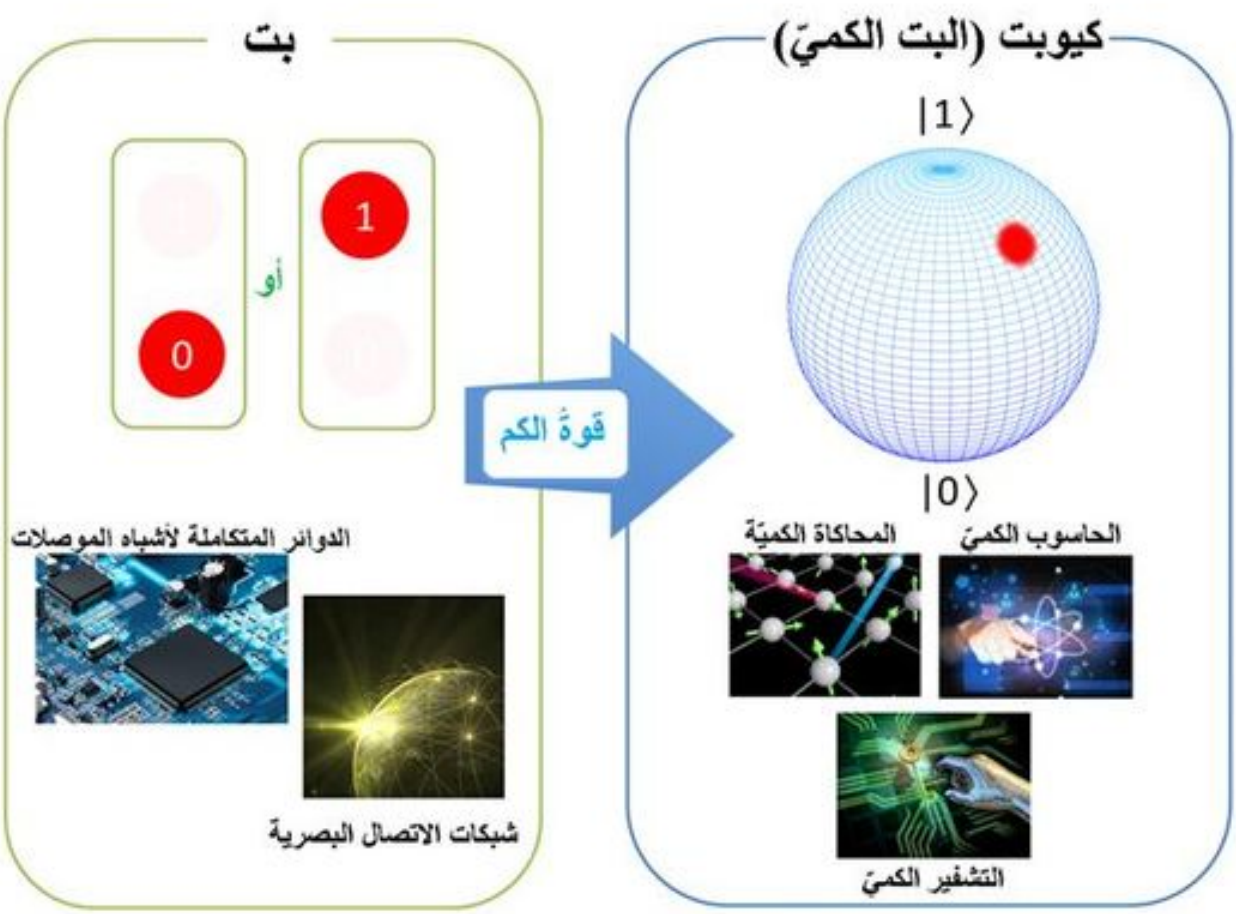
هو مشروع أنشأه البروفيسور الياباني ياسونوبو ناكامورا **Yasunobu Nakamura** في مركز أبحاث جامعة طوكيو للعلوم المتقدمة والتكنولوجيا (**CAST**) في الثالث من أكتوبر/تشرين الأول من عام 2016، ويهدف مشروع **ERATO** إلى بناء منصة لتكنولوجيات معالجة المعلومات المستقبلية على أساس مبادئ ميكانيكا الكم.

قوةُ الكم

تُعد ميكانيكا الكم (**Quantum Mechanics**) واحدةً من أهم النظريات الأساسية في الفيزياء وأصبحت أساساً للتقدم في العديد من مجالات العلوم. وقد ساهمت بشكلٍ أساسي في تطوير الدوائر المتكاملة لأشباه الموصلات وشبكات الاتصال البصرية الموجودة في كلّ ركنٍ من أركان عالم تكنولوجيا المعلومات لدينا، ومن ناحيةٍ أخرى يُعد علم المعلومات الكميّة مفهوماً جديداً ناشئاً، مما يشير إلى استخدامات أكثر تعقيداً لميكانيكا الكم.

علم المعلومات الكميّة

تُستخدم ميكانيكا الكم في فهم وتصميم مبادئ تشغيل الأجهزة الأولية مثل الترانزستورات والليزر في تقنيات المعلومات التقليدية، ومع ذلك فإنها لا تلعب أي دورٍ واضح على مستوى معالجة المعلومات، وعلى النقيض من ذلك ففي علم المعلومات الكمية، فإن الخصائص الغريبة للحالات الكمية مثل التراكب والتشابك الكميّ (**Quantum entanglement and Superposition**) تُستغَل بالكامل في تكنولوجيات غير مسبوقة بما في ذلك الحوسبة الكمومية والمحاكاة الكمومية والتشفير الكمي إلخ.



تظهر الصورة قوة الكم من خلال توضيح الفرق بين الكيوبت والبت

التحديات

ومع ذلك، ما زلنا نواجه العديد من التحديات التقنية قبل تحقيق تقنيات المعلومات الكميّة، على سبيل المثال من أجل الحفاظ على حالات البِتّات الكميّة لفترة طويلة والتحكم بها بدقة، نحتاج إلى منع الأخطاء الناجمة عن الضوضاء (يُذكر بأنّ هناك تقنية يُطوِّرها فريق العمل للتغلب على هذه المشكلة، (فبشكلٍ عام للتغلب على المشاكل وتشغيل "آلات الكم" بشكلٍ صحيح، فإننا يجب أن نتعامل مع النواحي الفيزيائية للأجهزة (التجريبية) ومع البرمجيات (النظرية).

التطبيقات العيانية

هناك ثلاثة تطبيقات أساسية وهي:

1. إنشاء فضاء هيلبرت (**Hilbert space**) عياني قابل للوصول بالكامل عن طريق دمج عددٍ كبيرٍ من الكيوبتات فائقة التوصيل، حيثُ تُنفَّذ رموز تصحيح الخطأ الكمية التي تُعَدّ ضرورةً قصوى إذا أردنا تحقيق حساب كمي متسامح مع الخطأ وقادر على التعامل مع الضوضاء الخارجية وأيضاً مع القياسات الخاطئة، نحو حوسبة كمومية متحملة للأخطاء، أي تُمكِّن النظام من الاستمرار في العمل بشكلٍ جيد في حال حدوث خطأ أو أكثر في أحد مكوناته.
2. أن تُستخدم درجات الحرية (**Freedom degrees**) العيانية الموجودة في الإثارات المجمعة (وهي ظاهرة تحدث عندما يسلك نظام مجهري معقد مثل الصلب سلوكاً كأنه يحتوي على جسيمات مختلفة ذات تفاعل ضعيف في حيّزٍ من المادة) كمكونات للأجهزة الكميّة العيانية، ومن الجدير بالذكر أنّ الكيوبتات فائقة التوصيل هي أكثر الأمثلة تقدماً وأكثرها شهرة، ومن الأمثلة أيضاً أنظمة أخرى مثل المغنونات في المواد المغناطيسية الحديدية، والفونونات في الأجهزة النانوميكانيكية.
3. وأخيراً، من خلال الجمع بين هذه المكونات غير المتجانسة، نستطيع بناء آلات الكم الهجينة التي توسع قدرتنا على التحكم الكمي إلى نطاق أوسع للطاقة وإلى مدى مكاني أكبر.

وبشكلٍ عام، ستعمل هذه الأجهزة على تحسين فهمنا لميكانيكا الكم وإيجاد الكثير من التطبيقات في علم المعلومات الكميّة.

البتات الكميّة (الكيوبتات) فائقة التوصيل

في حياتنا اليومية، نحن لا نحتاج إلى أن نكون على دراية بالسلوكيات الميكانيكية الكمومية لأي دوائر كهربائية، ومع ذلك فإذا قمنا بتصميم دوائر توصيل فائقة بشكلٍ صحيح وتشغيلها في بيئة ذات درجة حرارة منخفضة وضجيج منخفض، فإننا سنتمكن من إيجاد خصائصها الميكانيكية الكمومية بسهولة.

وفي عام 1999 وضّح البروفيسور ياسونوبو ناكامورا مدير المشروع وزملاؤه أوّلَ عملية توصيل دائرة فائقة التوصيل، ومنذ ذلك الحين طُوِّرت خصائص الكيوبتات فائقة التوصيل بشكلٍ هائل مما أدى إلى ظهور أنشطة بحث مكثفة ومستمرة عالمياً على دوائر الكم المتكاملة فائقة التوصيل. وفي حقيقة الأمر، إنّ التحكم الكامل طويل الأمد في الحالة الكميّة في نظام كميّ متكامل هو هدف صعب غير مستهدف من جهات البحث، وهو الذي نهدف إليه في مشروع **ERATO**.

الدارات الكمومية فائقة التوصيل

في حقيقة الأمر، لا تعمل البتات الكميّة فائقة التوصيل بتلك السهولة، ومن الضروري تنفيذ دارات القراءة وكذلك دارات الاقتران بين تلك البتات، والأهم من ذلك هو حماية البتات الكميّة فائقة التوصيل من البيئة المحيطة الصاخبة، ولتحقيق هذه الأهداف طُوِّرت عناصر مثيرة

للاهتمام في العديد من البلدان حول العالم تُسمَّى دارات كَمِّومية فائقة التوصيل، وهي أجهزة دارة صغيرة تعمل وفقاً لمبادئ ميكانيكا الكم.

الموجات الميكروية

تفيض الموجات الميكروية من حولنا مثل الاتصالات من الهواتف المحمولة أو أفران المايكرويف لتسخين الطعام أو الرادارات داخل السيارات لحماية الأشخاص، والموجات الميكروية هي موجات كهرومغناطيسية ذات طول موجة قصير بين الموجات الراديوية والأشعة تحت الحمراء، ويعني هذا أنها تشمل نطاق الأشعة بطول موجي من 1 سنتيمتر إلى الأشعة المليمترية، أي أنها تتميّز بطول موجةٍ قصير يكافئ تردداً عالياً، مما يجبر مكونات الدارات الإلكترونية بأن تكون صغيرة الحجم بسبب قصر الطول الموجي، ولهذا السبب غالباً ما تكون أجهزة الموجات الميكروية بحجم راحة اليد، حيث يصبح من السهل تحقيق عناصر مثيرة للاهتمام باستخدام الظروف الحدودية للموجات الكهرومغناطيسية.

ثلاجة التمديد

لنفترض وجود بتات كميّة داخل غرفة تساوي درجة حرارتها 25 درجة مئوية تقريباً، وهي ذات درجة الحرارة التي تحيط بها جدران هذه الغرفة من جميع الجهات، وبما أنّ درجة حرارة الجدار هي درجة حرارة الغرفة العادية، فإنّ إشعاع الجسم الأسود (وهو نوع من أنواع الإشعاع الكهرومغناطيسي من داخل الجسم أو من خلال الإحاطة بجسم في حالة اتزان حراري تُسمى توازن ترموديناميكي) ينبعث من هذا الجدار مما يسبب الكثير من الضوضاء الحرارية داخل هذه الغرفة والتي بدورها تنهي التراكب الكمي في البتات الكميّة.

ومن أجل حماية هذه البتات من الضوضاء الحرارية، طوّر فريق عمل المشروع نظاماً لتبريد درجة حرارة الجدار إلى 0.01 كلفن (ـ 273.13 درجة مئوية) لمحاولة تقليل الإشعاع المنبثق من الجدار، ويُعرف هذا النظام بثلاجة التمديد: وهي عبارة عن جهاز تبريد عميق يستخدم نظيري الهيليوم **He-4/He-3** للحصول على درجات حرارة دون 0.02 كلفن دون الحاجة لاستخدام أجزاء متحركة في مناطق درجات الحرارة المنخفضة، وفي ظل هذه البيئة التي تُهيئها الثلاجة، يمكن أن تتصرف البتات الكميّة والموجات الميكروية ميكانيكياً دون أن تتعرض للضوضاء الحرارية.

دائرة الرنين الميكروية

لنتخيل أنّ هناك مرآة عاكسة بعرض عدة سنتيمترات بطرف أنبوب مغلق من الجهتين يُسلَّط عليه موجات ميكروية من مصدرٍ خارجي، بحيث تصطدم الموجات الميكروية ثم تنتشر باتجاه المرآة وتعود مرةً أخرى لترتد ولن تتمكن من الهرب إلى الفضاء الخارجي أثناء ارتدادها ذهاباً وإياباً، إذ تصبح هذه الموجات الميكروية معزولة عن الفضاء الخارجي، وتُسمَّى هذه التجربة بـ الرنان أو دائرة رنين (**Resonator**).

والمثير للاهتمام هنا أنه يمكن للموجات الميكروية التي تتصف بخصائص ميكانيكا الكم أن تُحاصَر في هذا الرنان ومن ثم تُستخدم كعنصر ذاكرة لتخزين الحالات الكمومية! وعند وضع بت كميّ فائق التوصيل في الرنان، يعمل على عزل الدائرة عن الضوضاء الخارجية، ويعيش البت الكميّ في بيئةٍ آمنةٍ بعيدةٍ عن الضوضاء الخارجية ويتواصل بنفس الوقت مع العالم الخارجي من خلال الرنان.

المضخم الكميّ القياسي

في الواقع هناك مشكلة في الموجات الميكروية التي تتذبذب وفقاً لقواعد ميكانيكا الكم وهي أن هذه الإشارة الموجية الميكروية ميكانيكياً هي إشارة صغيرة جداً، أي ما يقارب عدد قليل من النانو فولت! ومن أجل مراقبة هذه الإشارة، نحتاج إلى مضخم إلكتروني ممتاز معزول عن الضجيج الحراري، وفي ظل عدم وجود ضجيج حراري فإن الضوضاء الناجمة عن مبدأ عدم اليقين (**Uncertainty principle**) في ميكانيكا الكم، أو ما يسمى الضوضاء الكمومية تصبح مهيمنة، ويُسمى المضخم الذي يعمل عند هذا الحد المضخم الكميّ القياسي المحدود ويمكننا إنشاؤه بواسطة دارة فائقة التوصيل، ومن الممكن الحصول على إشارات موجات ميكروية مع هذا المضخم دون أن يتأثر بالضجيج الحراري.

معالجة المعلومات الكمية باستخدام دارة التوصيل الفائق

يقول البروفيسور ناكامورا: "يمكن تلخيص آليات عمل مكونات الآلات الكميّة العيانية بأنها تتمحور حول البتات الكميّة فائقة التوصيل بحيث تكون البتات الكميّة داخل الرنانات محمية من البيئة الخارجية (وفقاً لنفس المبدأ الذي ذُكر) ويصبح التواصل عبر الرنان، كما يجري الاقتران بين البتات الكميّة من خلال رنانات مخصصة أو دوائر فائقة التوصيل، وتُنفّذ قياس الحالة الكمية عن طريق إدخال موجات ميكروية ذات تردد دقيق وضعيف في الرنان، ومن ثم تُقرأ باستخدام المضخم الكميّ القياسي المحدود، كما أننا نهدف إلى توسعة بنية البتات الكميّة إلى 18 بتاً كميّة استناداً إلى مصفوفة كمومية (3 × 3)، مما يسمح لنا بتصميم بنية قابلة للتوسيع مستقبلاً إلى نظام أكبر، كما نقوم أيضاً بتطوير معالج إشارات رقمي عالي السرعة يهدف إلى التحكم الكامل والمتماسك للبتات الكمومية بطريقةٍ يمكن فيها للنظام مقاومة انهيار الحالة الكمية بمجرد الكشف عن خطأ في مجموعة بتات كميّة".

الموجات الميكروية الكمية

من الجدير بالذكر أن هناك خاصية مميزة للموجات الميكروية، وهي أنها تتصرف وفقاً لقواعد الكم ميكانيكياً عند درجات الحرارة المنخفضة للغاية لأن الضجيج الحراري قليلٌ جداً في درجات الحرارة المنخفضة وذلك وفقاً لطبيعة الذرات، ومن خلال هذه الظروف المناسبة تستطيع الموجات الميكروية أن تعالج الإشاراتِ بنفسها بالإضافة إلى كونها ناقلات جيدة للحالات الكمومية. وباستخدام البتات الكميّة فائقة التوصيل والأجهزة فائقة التوصيل مثل المضخم الكميّ القياسي المحدود، سنتمكن من إجراء معالجة للمعلومات الكمومية باستخدام الموجات الميكروية فقط! ونحن نهدف في هذا المشروع إلى تحقيق مثل هذه المعالجات بواسطة انتشار فيض من الموجات الميكروية.

وبهذا التتابع للتقنيات المذكورة، يأمل فريق العمل بإيجاد خليطٍ متجانس من هذه التقنيات لإنشاء آلات وأجهزة كميّة عيانية في المستقبل القريب، لتثبت للعالم أجمع أهمية هذا الفرع من الفيزياء ليس فقط مجهرياً بل وحتى عيانياً.

مصطلحات

ميكانيكا الكم (Quantum Mechanics): فرع من الفيزياء يتعلّق بدراسة سلوك الأجسام الصغيرة جداً.

التراكب الكميّ (Quantum superposition): تطبيق لمبدأ تراكب الأمواج (التداخل البنّاء) ضمن ميكانيكا الكم حيث يشكل مبدأ التراكب أحد المبادئ الأساسية لها. مثال: من المفترض نظرياً طبقاً لميكانيكا الكم بأن يتواجد الإلكترون في نظام في عدة حالات كمومية في نفس الوقت، ولكن عند أخذ القياس ينهار إلى حالة معينة بذاتها، ونظراً لأن الإلكترون يُعامل معاملة موجة فهو يمثل بتراكب لعدة أمواج أو بعدة حالات كمومية.

التشابك الكميّ (Quantum entanglement): هي ظاهرة كَمّية ترتبط فيها الجسيمات الكميّة مثل الفوتونات والإلكترونات والجزيئات ببعضها رغم وجود مسافات كبيرة تفصل بينها مما يقود إلى ارتباطات في الخواص الفيزيائية المقاسة لهذه الجسيمات الكمّية.

المحاكيات الكمومية (Quantum Simulations): هي برمجيات تسمح بدراسة الأنظمة الكمومية التي يصعب دراستها في المختبر ويستحيل تشكيلها باستخدام الحاسوب الفائق.

الحوسبة الكمومية (Quantum computing): هي تسخير الظواهر الغريبة التي تحدث للجسيمات في المستويات الصغيرة جداً لمعالجة المعلومات بطريقة واعدة.

فضاء هيلبرت (Hilbert space): وهو مفهوم رياضي بحت سُمِّي على اسم الرياضي الألماني ديفيد هيلبرت. يعمم مفهوم الفضاء الإقليدي، حيث يوسع طرق الجبر المتجه وحساب التفاضل والتكامل من المستوى الإقليدي ثنائي الأبعاد والفضاء ثلاثي الأبعاد إلى فضاء مع أي عدد محدود أو غير محدود من الأبعاد.

رموز تصحيح الخطأ الكمية (Quantum error correction): وهي تقنية تُستخدم في الحوسبة الكمومية لحماية المعلومات الكمومية من الأخطاء الناجمة عن فك الترابط والضوضاء الكمية الناتجة عن مبدأ عدم اليقين. يُعد تصحيح الخطأ الكميّ ضرورياً إذا أردنا تحقيق حساب كمومي متسامح مع الخطأ. إذ يمكنه التعامل مع الضوضاء على المعلومات الكمية المخزنة، ومع البوابات الكمية المعطلة، والتحضير الكمي الخاطئ، والقياسات الخاطئة.

درجات الحرية (Freedom degrees): هي صفة فيزيائية تستخدم في وصف حالة نظام فيزيائي. ومجموعة الصفات التي تصف بجملتها نظام فيزيائي يسمى فضاء طوري. وهي تحديداً عدد انتقالات جزيئي أو جسم أو عدد إمكانيات دورانه حول محور، وهي تصف بدقة كاملة إمكانيات حركة جسم أو اتجاه حركته.

ماغنونات (Magnons): هي من أشباه الجسيمات (إثارة مجمعة ـ collective excitation) في بنية اللفَ المغزلي (spin) للإلكترونات في شبكة تبلور.

المغناطيسيات الحديدية (Ferromagnetism): تظهر الخاصية المغناطيسية على بعض المعادن مثل الحديد والكوبلت والنيكل، إذ تتسم ذرات تلك العناصر بوجود المغناطيسية بها حيث يحدث ترابط بين اللف المغزلي للإلكترونات التي تشغل المدار 3d في الذرة، وينتج عن محصلة ذلك ترابط مغناطيسي صغير بحجم الذرة. أي أن ذرات تلك العناصر لها تلك الخاصية المغناطيسية الحديدية، حيث أن الذرات المتجاورة تهيئ اتجاه مغناطيسيتها بحيث تتخذ جميعها نفس الاتجاه، ويظهر ذلك في هيئة المغناطيس المستقيم المعهود لنا.

الفونونات (Phonons): هو عبارة عن حالة اهتزاز كمومية تحدث في الشبكات البلورية الصلبة، مثل شبكات الذرات في بلورات المواد الصلبة، مما يجعلها تلعب دوراً كبيراً في فيزياء المادة الصلبة حيث تسهم في تحديد بعض خواص الجسم الصلب مثل الناقلية الحرارية والناقلية الكهربائية.

الرنان أو دائرة رنين (Resonator): هو جهاز أو دائرة كهربية تنتج الرنين، ويتذبذب طبيعياً في بعض الترددات تسمى ترددات بالرنانة، وذلك لأنه يرن بكثرة على هذه الذبذبة أكثر من الذبذبات الأخرى. تُستخدم لتوليد موجات لها ترددات معينة أو تستخدم لاختيار ترددات معينة للإشارة.

مبدأ عدم اليقين (Uncertainty) principle: ينص هذا المبدأ على أنه لا يمكن تحديد خاصيتين مُقاستين من خواص جملة كمومية إلا ضمن حدود معينة من الدقة، أي أن تحديد أحد الخاصيتين بدقة متناهية (ذات عدم تأكد ضئيل) يستتبع عدم تأكد كبير في قياس الخاصية الأخرى، ويشيع تطبيق هذا المبدأ بكثرة على خاصيتي تحديد الموضع والسرعة لجسيم أولي. صاغ المبدأ العالم الألماني هايزنبرغ عام 1927.

الضوضاء الحرارية (Thermal noise): هو نوع من الضجيج الإلكتروني الذي يتولد من الإثارات الحرارية لحاملات الشحنة (عادة الإلكترونات داخل المواد الناقلة كهربائياً عند التوازن، والذي يحدث بغض النظر عن أي جهد كهربائي مطبق.

الضوضاء الكمومية (Quantum noise): وهي تشير إلى عدم التيقن في تحديد الخصائص الفيزيائية بسبب أصلها الكمومي.

دارة فائقة التوصيل (Superconductive circuit): وهي دوائر تسمح بمرور الكهرباء خلالها دون أي مقاومة كهربائية تقريباً ودون فقد للطاقة.

- التاريخ: 2019-01-29
- التصنيف: اسأل فلكي أو عالم فيزياء

#الحوسبة الكمومية #علم المعلومات الكميّة #مشروع ERATO #التراكب الكمي #فضاء هيلبرت

المصطلحات

- **التشابك الكمومي (quantum entanglement)**: التشابك الكمومي: ظاهرة كَمّية ترتبط فيها الجسيمات الكميّة ببعضها، رغم وجود مسافات كبيرة تفصل بينها. مما يقود إلى ارتباطات في الخواص الفيزيائية المقيسة لهذه الجسيمات الكمّية. المصدر: العلوم الأمريكية.
- **الفونونات (phonons)**: الفونون: يُشير هذا المصطلح في الفيزياء إلى ترتيب دوري للذرات أو الجزيئات داخل المادة الكثيفة مثل المواد الصلبة وبعض السوائل. توجد الذرات والجزيئات داخل المواد في بنية بلورية وترتبط مع بعضها البعض بقوة، وبالتالي لا يُمكنها الاهتزاز بشكلٍ مستقل، وإنما يأخذ اهتزازاها أنماطاً جمعية تنتشر داخل المادة. تُعالج طاقات الاهتزاز في البلورة على أنها هزّازات توافقية كمومية. وهي لا تقبل أو تخسر الطاقة إلا بوحدات محددة بعلاقة بلانك hu. تُعرف أنماط الاهتزاز هذه الموجودة في البلورة والتي تقبل كميات محددة من الطاقة بالفونونات.
- **الأيونات أو الشوارد (Ions)**: الأيون أو الشاردة هو عبارة عن ذرة تم تجريدها من الكترون أو أكثر، مما يُعطيها شحنة موجبة.وتسمى أيوناً موجباً، وقد تكون ذرة اكتسبت الكتروناً أو أكثر فتصبح ذات شحنة سالبة وتسمى أيوناً سالباً

المصادر

- ERATO
- ERATO

المساهمون

- ترجمة
  - سلمان عبود
- مُراجعة
  - مي منصور بورسلي
- تحرير
  - رأفت فياض
  - أحمد كنينة
- تصميم
  - رنيم ديب
- نشر
  - بيان فيصل