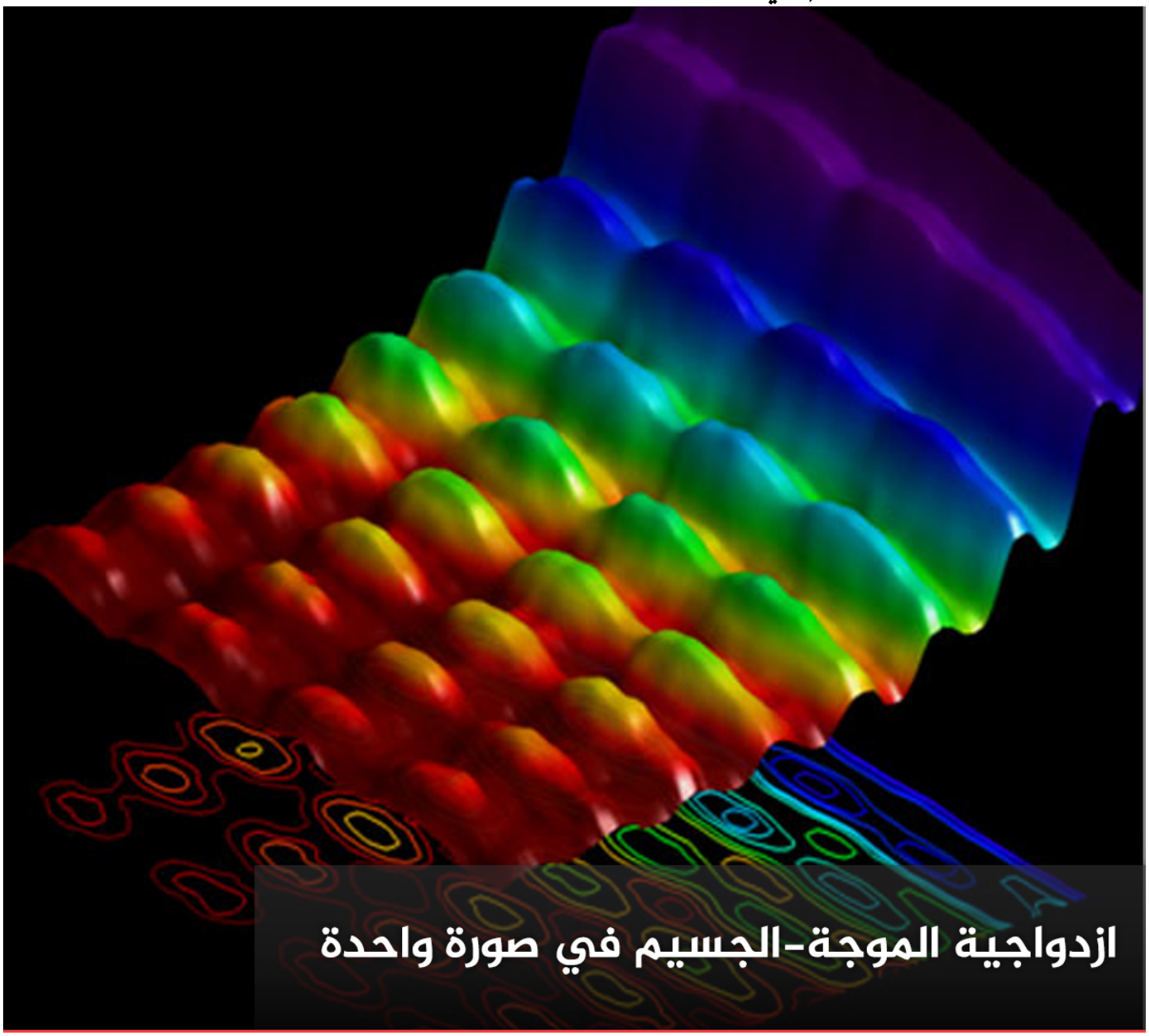
ازدواجية الموجة-الجسيم في صورة واحدة



قادت المراقبات الأخيرة للطبيعة الموجية والجسيمية في صورة واحدة مفردة للحقل البلازموني **plasmonic field**، وهو حقل يتم إنتاجه من خلال أرجحة الإلكترونات بشكل كلي على سطح معدن، إلى خبرٍ تصدَّر العناوين وإلى شيءٍ من سوء الفهم.
ظهرت الادعاءات حول احتمال نقض مبدأ التكامل **principle of complementarity** الذي ينص على أنه لا يمكن رصد سلوك الموجة والجسيم في آن واحد، في الإعلام مؤخراً. ولكن لا تقلقوا، ما يزال مبدأ التكامل مدعوماً.

ازدواجية الموجة-الجسيم.

في أوائل القرن العشرين، تطورت فيزياء الكمّ من اكتشافات لإمكانية أن تسلك الأمواج الكهرومغناطيسية سلوك الجسيمات عندما تصطدم بسطح معدن وتقذف إلكتروناً. لو سلكت سلوك الموجة فقط، عندئذٍ فزيادة سعة الموجة سيزيد من سرعة قذف الإلكترون.
ولكن بدلاً من زيادة سرعة الإلكترون، زادت السعة المتزايدة من عدد الإلكترونات المقذوفة.
وجد الفيزيائيون أيضاً أن تردد الموجة الضوئية المتفاعلة مع سطح المعدن قد لعب دوراً هاماً. إذا كان تردد الموجة الكهرومغناطيسية تحت قيمة معينة، والتي تعتمد على نوع المعدن، عندها لن يتم قذف أية إلكترونات.
وإذا كان تردد الموجة الضوئية يزداد بشكل مستمر فوق القيمة الدنيا، فعندئذٍ ستكون للإلكترونات المقذوفة طاقة حركية أكبر.

اقترح أينشتاين عام 1905 أن الموجة الكهرومغناطيسية التي تصطدم بسطح المعدن سلكت سلوك جسيمٍ يدعى الفوتون **photon**.
الفوتون هو وحدة عامة أو حزمة من الطاقة الكهرومغناطيسية. تعادل الطاقة التي يحملها الفوتون قيمة تردده مضروباً بثابت يدعى ثابت بلانك **Planck's constant** (قدم بلانك هذه القيمة قبل بضعة سنوات أثناء محاولة مطابقة بيانات إشعاع الجسم الأسود).

$$E = hf$$

عندما يصدِم فوتونٌ سطح المعدن، فإنه يتلاشى، ناقلاً طاقته إلى الإلكترون. إذا كان الفوتون يمتلك أدنى حد من التردد المطلوب لقذف الإلكترون، عند ذلك يُقذَف الإلكترون من دون حركة بعد القذف. إذا كان الفوتون يمتلك تردداً أكبر (أي يمتلك طاقة أكبر)، عندها يُقذَف الإلكترون وتكون له حركة يمكن قياسها. كمية الطاقة المرتبطة بحركة الإلكترون تعادل الطاقة التي امتلكها الفوتون فوق الكمية الدنيا المطلوبة لقذف إلكترون.

اعتمد الفيزيائيون بشكل كبير على أفكار أينشتاين في السنوات القليلة التالية، من بينهم نموذج "بور" الذي قدمه نيلز بور **Niels Bohr** عام 1913. قام نيلز بور بتطوير نموذج كمومي لذرة الهيدروجين التي تمتلك إلكترونات تدور حول النواة عند قيمٍ محددةٍ من أنصاف الأقطار والطاقة الموافقة لها. ساعد هذا النموذج في تفسير أطياف الانبعاث التي تم رصدها في ذلك الوقت. يترافق الانتقال من مستوى طاقي أعلى إلى مستوى أدنى مع انبعاث فوتونٍ طاقته مساوية لفرق الطاقة بين المستويين.

بعد عشرين سنة من طرح أينشتاين لفكرة طبيعة الجُسيم المرتبطة بالموجة الكهرومغناطيسية، طرح دي بروغلي **de Broglie** فكرة طبيعة الموجة المرتبطة بالجسيم.لأن الأمواج الكهرومغناطيسية يمكن أن تسلك سلوك الجسيمات وأن تمتلك عزماً (تم وصفه أيضاً في النسبية الخاصة)، اقترح دي بروغلي في 1924 أن الجسيمات يمكن أن تسلك سلوك الأمواج.
العلاقة بين عزم الفوتون وطوله الموجي:

$$p = {h \over \lambda}$$

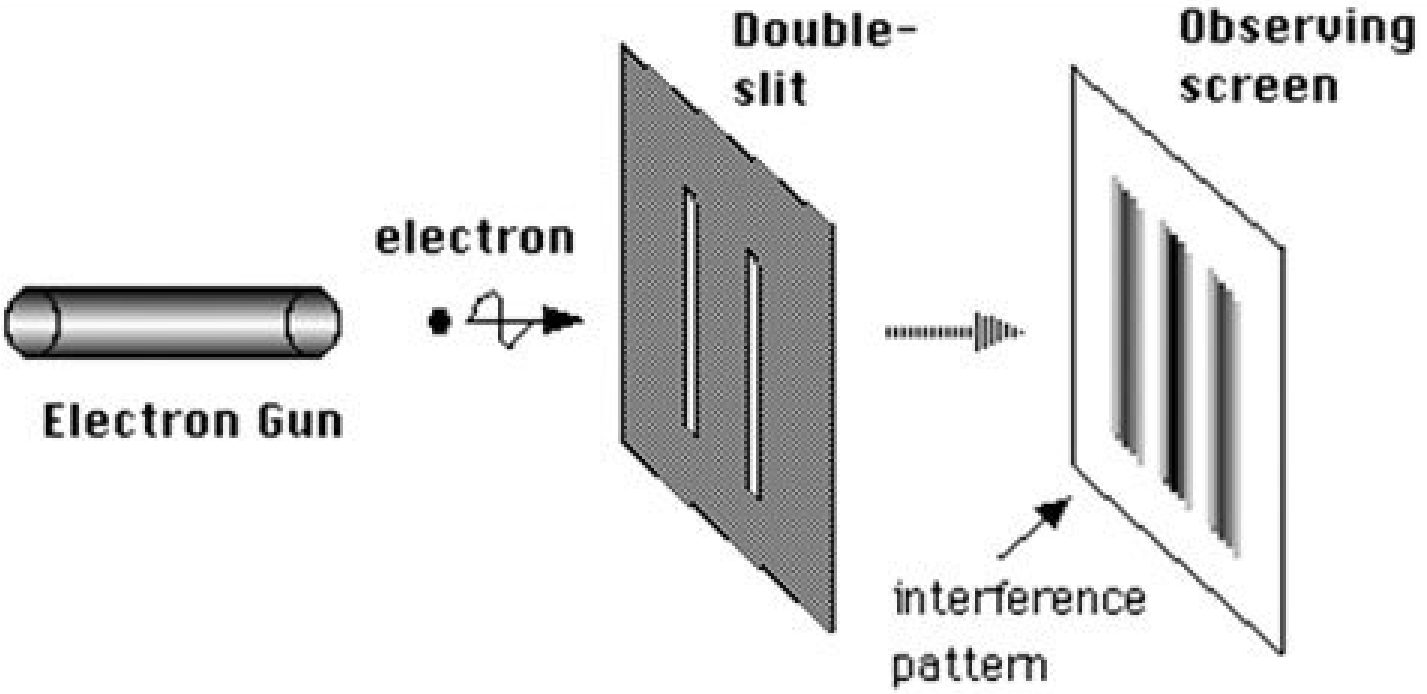
طرح دي بروغلي فكرة أن الطول الموجي الذي يصف طبيعة موجة الجسيم هو:

$$\lambda = {h \over mv} $$

الجسيمات اللانسبية السرعة **Nonrelativistic particles** هي جسيماتٌ تتحرك بسرعة ليست قريبة من سرعة الضوء. يساوي عزم الجسيم اللا نسبي السرعة حاصل جداء كتلته بالسرعة. من أجل شيء مثل سيارة بوزن 1800 كيلوغرام، تتحرك بسرعة 65 ميل بالساعة

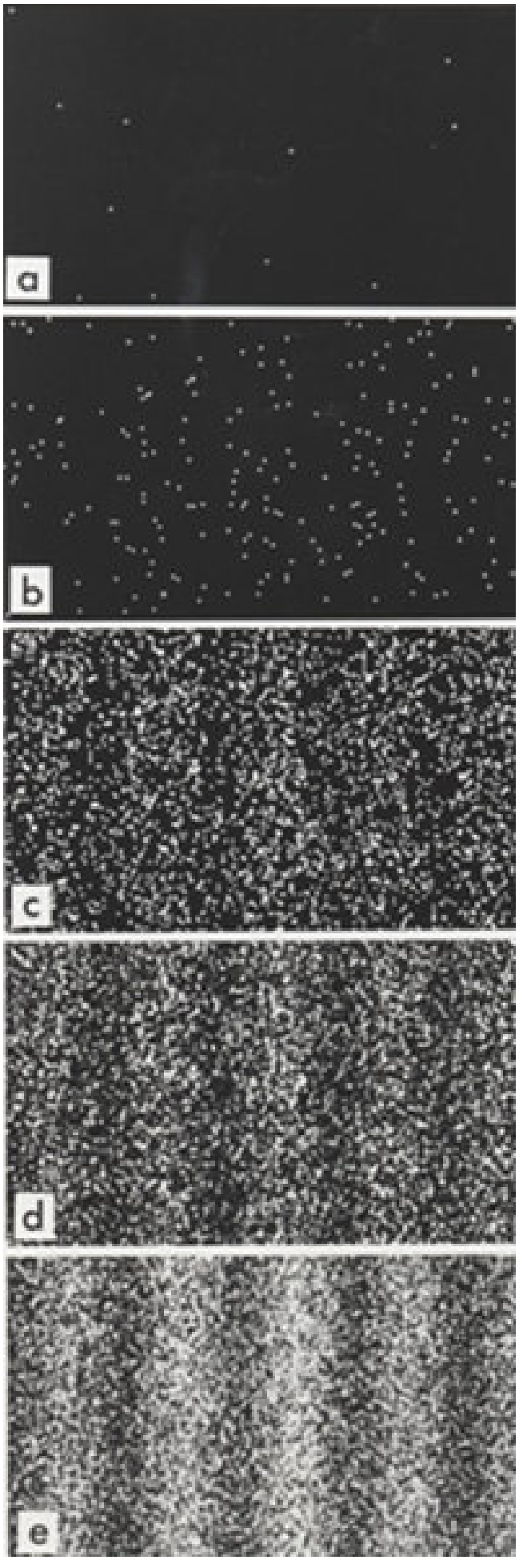
(حوالي 30 متر بالثانية)، سيكون الطول الموجي 1.227×10−38 متر، أي صغير جداً ليتم قياسه. من أجل الكترون يسافر بسرعة تعادل ربع سرعة الضوء، سيكون الطول الموجي 9.698×10−12 متراً، تأثير صغير ولكن قابل للقياس.

تاريخ ازدواجية الموجة–جسيم.



مخططٌ لتجربة الشقين باستخدام الإلكترونات.

منذ تم طرحُ أفكارٍ على أن الأمواج يمكن أن تسلك سلوك الجسيمات وأن الجسيمات يمكن أن تسلك سلوك الأمواج، كان هناك عدد مذهل من التجارب التي تدعم هذه الأفكار، ولم تُظهر أي من التجارب حدوث مشكلة ذات أهمية فيها.


a
b
c
d
e

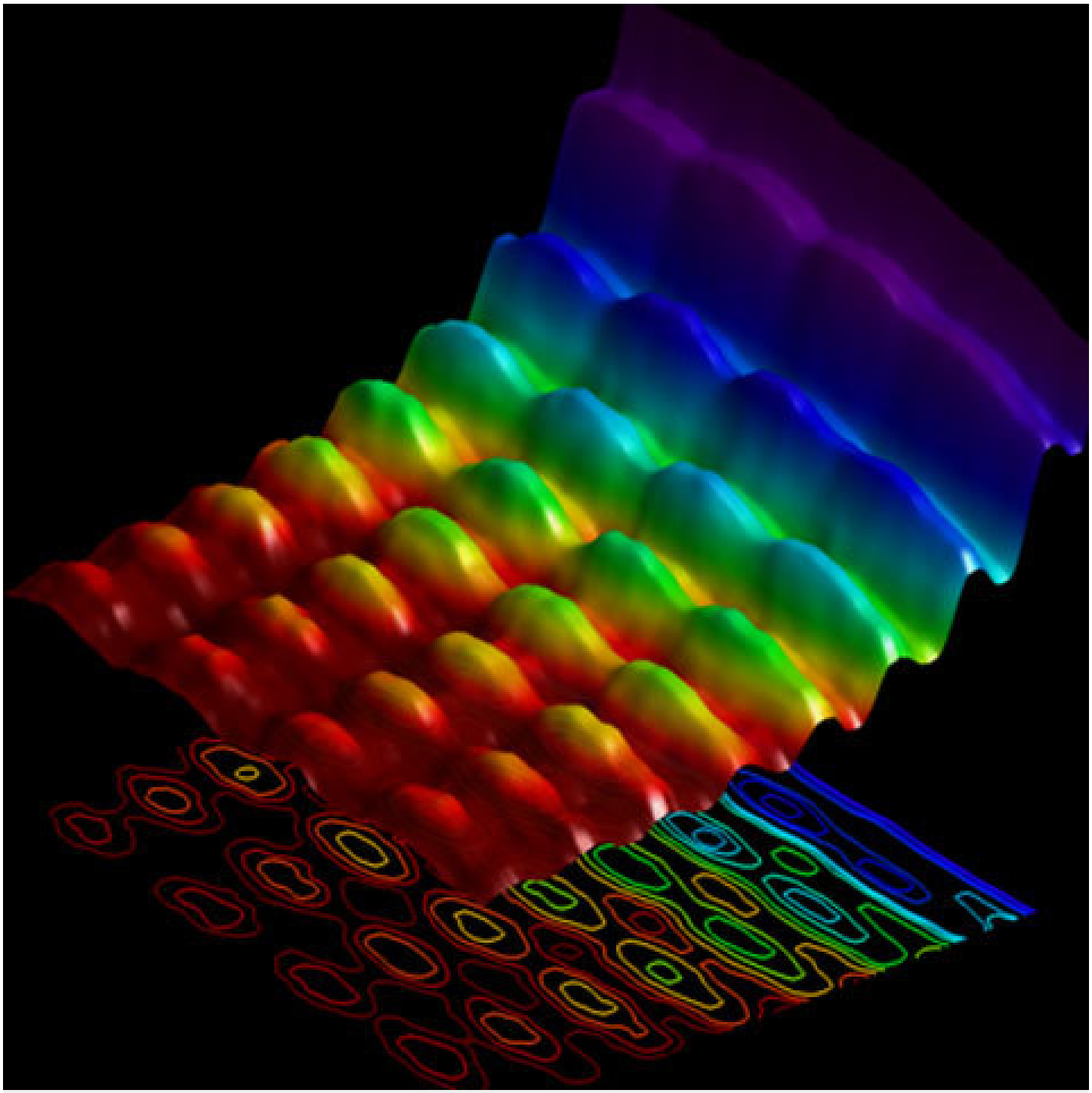
تظهر نتائج تجربة الشقين التي قام بها الدكتور تونومورا Tonomura، نمطَ التداخل المتشكل لإلكترونات مُفردة. عدد الإلكترونات في الصور هو 11 (e) 140000 ,(d) 40000 ,(c) 6000 ,(b) 200 ,(a).

مثال كلاسيكي وهو تجربة الشقين **double-slit experiment-** ضوء متناسق أحادي اللون يشع عبر شقين- التي تنتج نمطَ تداخلٍ على شاشة بعيدة، وأيضاً من أجل جسيمات، طالما لا نحاول تحديد أي من الشقين قد عبره الجسيم.

هل مبدأ التكاملية لازال متماسكاً؟

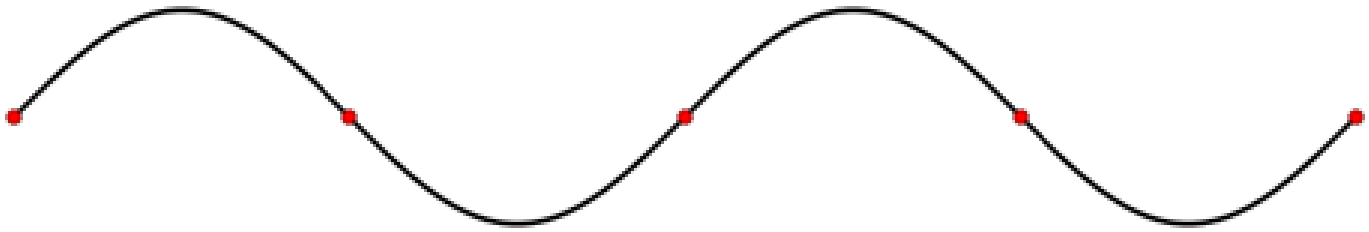
نحتاج كلاً من وصف الموجة والجسيم لكي نَصف بشكل كامل الفوتون أو الإلكترون. ولكن كما تُبين تجربة الشقيْن، فلسنا قادرين على قياس كِلا السلوكين في آن معاً. لو حاولنا قياس سلوك الموجة عندها سنرى السلوك الموجي فقط، ولو حاولنا قياس سلوك الجسيم عندها نرى السلوك الجسيمي فقط. ويُعرف هذا بمبدأ التكاملية.

الصورة في الأسفل هامة جداً، لم يسبق أن تم التقاط صورة تحوي كلا السلوكين الموجي والجسيمي معاً. على أي حال، هذا ليس التقاطاً للطبيعة الموجية والجسيمية لفوتون واحد أو إلكترون واحد، بل هو التقاطٌ للموجة عند تبادل الحقل للفوتونات (حزم الطاقة) مع شعاع من الإلكترونات المستخدم لتصوير الحقل.



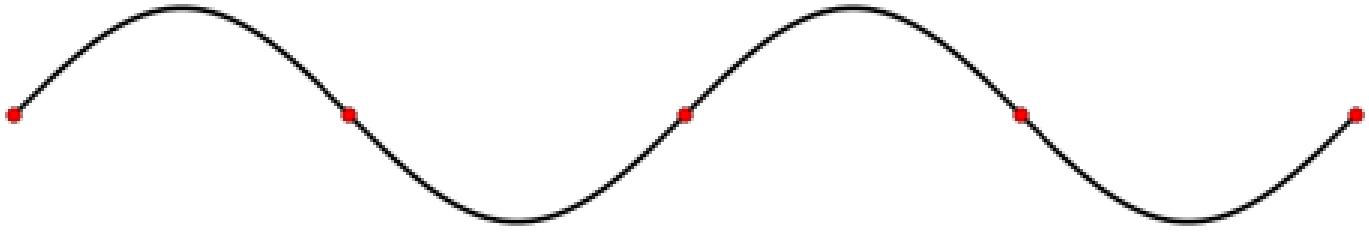
يظهر الجزء الأدنى من الصورة إسقاطاً ثلاثي الأبعاد لخريطة فوقها. يمكن رؤية التكميم على طول المحور x والنمط الموجي على طول المحور y.

يتم حصر حقل كهربائي خاص يُعرف بحقل بولاريتون ذي سطح بلازموني **surface plasmon polariton field**، على سطح سلك نانويٍ معدني. لا يمكن أن يتحرك الحقل عمودياً على السطح، ولكن يمكن أن يتحرك على طوله، وبذلك يمكن أن يتداخل مع الحقول المرتدة عن نهايات السلك النانوي لتنتج نمط موجة مستقرة، مثل الأمواج الرنانة على وتر.



موجة مستقرة.

يتم إنتاج الحقل السطحي من خلال التذبذبات الكلية للإلكترونات الحرة على سطح المعدن. يتم إنتاج أنماط الموجة المستقرة (الأنماط الرنانة) من خلال إرسال نبض إشعاع ليزر تحت أحمر بطول موجي يبلغ 800 نانومتر. يسبب نبض الليزر اهتزاز الإلكترونات بشكل كُلي على السطح الذي يدعى السطح البلازموني، ويتم خلق حقل بولاريتون ذي سطح بلازموني. يستخدم مصطلح بولاريتون لتحديد اقتران قوة الحقل عند إثارة ثنائية القطبية، وذلك بسبب توزع الإلكترونات في السلك النانوي المعدني. يتم الحصول على وضع الرنين من خلال تعديل استقطاب (جهة الحقل الكهربائي) لنبضة شعاع الليزر تحت الأحمر.
يقوم العلماء بحقن الحقل بالإلكترونات من أجل تصويره. تأتي الإلكترونات من بندقية إلكترونية، وتستخدم التأثير الكهروضوئي الذي ذكرناه سابقاً.يصدم ضوء الليزر فوق البنفسجي النابض سطح المعدن، ويطلق مجموعة من الإلكترونات بسرعات نسبية.يتم رصد الإلكترونات وقياس التغير في طاقتها. استخدم العلماء طريقةً جديدةً من أجل تصوير الحقل وتدعى "المجهر الإلكتروني ذو الحقل القريب المستحث بالفوتونات" **Photon Induced Near-field Electron Microscopy** واستخدموا لذلك مجهرَ إلكترونٍ ذو طاقة مرشحة نافذة وفائقة السرعة.من خلال قياس كيف تتأثر طاقة الإلكترون، راقب العلماء كيف تفاعل الحقل مع الإلكترونات. لهذا يمكنهم تصوير الحقل.إذا تسارعت الإلكترونات، عندها تكون الطاقة قد انتقلت من الحقل إلى الإلكترونات، ولو تباطأت، عندها تكون الطاقة قد انتقلت من الإلكترونات إلى الحقل.من خلال تصفية الإلكترونات التي تسارعت وتصوير كمية الإلكترونات القادمة من موقع معين حول السلك النانوي لفترات تأخير زمنية متعددة، قاموا بتسجيل كيفية تطور نمط الموجة المستقرة مع مرور الزمن على سطح السلك النانوي.



موجة مستقرة.

تتشكل الموجة المستقرة بعد أن يصلها نبض أشعة الليزر تحت الحمراء، من ثم تتأرجح القمم والقيعان لنمط الموجة المستقرة صعوداً ونزولاً، تبقى العقد ثابتة، وفي النهاية تتشتت الموجة المستقرة.وفيما تقترب الإلكترونات من الحقل السطحي تتسارع باتجاه الحقل أو بعيداً عنه وذلك بالاعتماد على جهة الحقل في تلك اللحظة. لو تسارعت الإلكترونات باتجاه الحقل فيما تتوجه نحو الكاشف، سيكون هناك عدد من الإلكترونات القادمة من ذلك الموقع أكبر من المواقع التي لا يتم سحبها نحوها.هذا ما يوفر معلومات حول التغير المكاني للموجة المستقرة على السلك النانوي، ما يسمح بتصوير طبيعة لحقل الموجية على السلك النانوي.

يمتلك الباحثون طريقةً للتحكم بمقدار الوقت بين خلق الحقل الرنان على السلك النانوي المعدني والتفاعل بين الحقل الرنان والإلكترونات. يقومون بذلك من خلال تعديل الوقت بين النبض تحت الأحمر الذي يخلق الحقل الرنان والنبض فوق البنفسجي الذي يصدر حزم الإلكترون. يسمح لهم هذا بمراقبة الحقل الرنان في الوقت الذي ينشأ فيه على سطح السلك النانوي المعدني، تبقى عقد الموجة الرنانة عقداً وتتحول القمم إلى قيعان وإلى قمم مرة ثانية. يمكن التحكم بزمن التأخير إلى حدود الفيمتوثانية (جزء من مليون من الثانية). بالمقارنة مع الأفلام التي نشاهدها والتي تعرض عادةً 25 إطاراً في الثانية، كان هؤلاء العلماء يشاهدون حوالي ترليوني إطار في الثانية، ولكن تذكروا أن العملية كلها تحدث في أزمنة أقل بكثير من ثانية. عندما يتفاعل الإلكترون مع حقل كهرومغناطيسي، يتبادلان حزماً مكممةً من الطاقة. تُظهر نتائج التجربة طيف امتصاص وإصداراً منفصلاً عندما يتم ضبط وقت التاخير الزمني إلى الصفر. قام العلماء بقياس كميات من الطاقة مقدارها 1.55 إلكترون فولت، ومضاعفات صحيحة لكميات الطاقة.

من خلال فلترة الإلكترونات عبر رؤية تلك التي تزايدت الطاقة فيها (الحاصلة على حزم طاقة)، تمكن العلماء من تسجيل متى يتبادل الحقل حزمة طاقة (الفوتون) مع إلكترون. من خلال مطابقة معلومات كثافة الإلكترون المكانية لأجل تأخر زمني يساوي الصفر، مع معلومات تبادل حزم الطاقة، تمكن العلماء من التقاط كل من الطبيعة الموجية والجسيمية للحقل السطحي، المبينة من خلال تبادلها الفوتونات مع إلكترونات التصوير.اتبعت التجربة في هذه الأثناء قواعد ميكانيكا الكم التي نفهمها، من خلال عدم رصد طبيعة الموجة والجسيم لأي فوتون مفرد في آن معاً.

- التاريخ: 2016-01-27
- التصنيف: اسأل فلكي أو عالم فيزياء

#فيزياء الجسيمات #موجة جسيم

المصطلحات

- **الالكترون (Electron)**: جسيم مشحون سلبياً، ويُوجد بشكلٍ عام ضمن الطبقات الخارجية للذرات. تبلغ كتلة الالكترون نسبة تصل إلى حوالي 0.0005 من كتلة البروتون.

المصادر

- Physicscentral

المساهمون

- ترجمة

- ريم المير أبو عجيب
- مُراجعة
  - محمد جهاد المشكاوي
- تحرير
  - همام بيطار
  - منير بندوزان
- تصميم
  - يامن الحاج علي
- نشر
  - أنس الهود