

Mixing waves in a diamond

خلط الأمواج في الماس

استخدام ليزر اشعة اكس العالي الشدة سمح لأمواج اشعة اكس ان تختلط في عينة من الماس. هذا التأثير مهد الطريق لدراسة الاستجابة الضوئية الميكروسكوبية للمواد على المقياس الذري. انظر المقال صفحة 603

نينا روهينجر Nina Rohringer

اختراع الليزر الضوئي فتح المجال امام البصريات اللاخطية التي تقوم بدراسة التفاعل الغير خطي للضوء مع المادة. بدأ هذا المجال من الدراسة بتوليد توافق الرتبة الثانية (second-harmonic generation) او مضاعفة التردد، وهي عملية غير خطية يتحول فيها فوتونين بترددين متماثلين إلى فوتون واحد يمتلك ضعفي تردد الفوتون الأصلي. حديثاً، طورت ليزرات اشعة اكس الالكترن الحر والتي تعرف بالاختصار XFELs أي X-ray free-electron lasers [2, 3]، والتي تنتج نبضات قصيرة جداً من اشعة اكس بشدة عالية جداً. وتعد بتطبيقات هامة في منطقة اشعة اكس من الطيف الكهرومغناطيسي. في الصفحة رقم 603 من هذه الاصدارة افاد جلوفر وزملائه Glover et al. [4] كيف استخدموا جهاز XFEL لمراقبة اشعة اكس وجمع التردد الضوئي المتولد، والتأثير البصري اللاخطي التي من الممكن ان تسمح بقياس الخواص البصرية الميكروسكوبية للمواد بدقة تحليلية ذرية.

اذا شععت المادة بضوء ذو شدة منخفضة بتردد محدد، فان استجابة الوسط الضوئية تكون خطية. في هذا النظام يكون الاستقطاب الكهربائي المستحث للوسط له مركبات تردد تتطابق تماما مع الضوء الساقط – أي تتذبذب كثافة الشحنة الكهربائية للوسط النشط ضوئياً (قابل للاستقطاب) بنفس طور المجال الكهربائي للضوء. التفاعلات الخطية للضوء مع الوسط والتي تشمل على الامتصاص والاستطارة لا تغير الخواص البصرية للوسط.

على أي حال، عند استخدام ضوء ذو شدة عالية بما فيه الكفاية فان الخواص البصرية للوسط تتغير وتظهر له استجابة غير خطية: يكون للاستقطاب المستحث مركبات تردد تختلف عن المجال الكهربائي للضوء. كنتيجة لذلك فان المادة التي تتعرض لأشعة ليزر تحتوي على، لنفترض على سبيل المثال مركبتي تردد (w_1 و w_2) يمكنها ان تبعث ضوء بتردد (w) اما ان يكون مجموع المركبتين ($w = w_1 + w_2$) او يكون الفرق بينهما ($w = w_1 - w_2$). نفس التأثيرات تعرف على التوالي توليد جمع التردد وتوليد فرق التردد، ويمكن ان يحدث إذا كان شعاعي الليزر المتداخلين زمنياً ومكانياً والذين لهما ترددتين مختلفتين (w_1 و w_2) سلطا على العينة. باستخدام الضوء البصري لوحظ ان الاستجابة اللاخطية للترتب العالية - ترددات الضوء المنبعثة التي هي مضاعفات للضوء الساقط – تعطي ضوء متزامن أي مشابه لليزر، واشعاع بطول موجي قصير في بداية منطقة الاشعة فوق البنفسجية وفي اقصى المنقطة فوق بنفسجية من الطيف الكهرومغناطيسي.

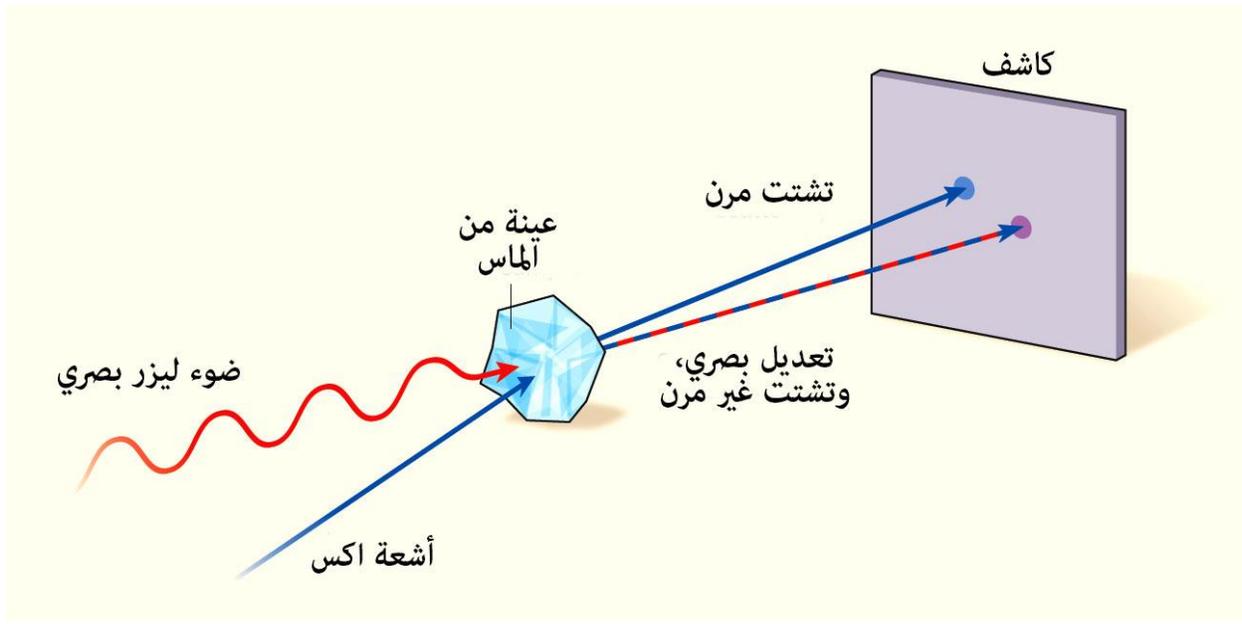
عند الطول الموجي لأشعة اكس فان الاستقطاب المستحث يكون في العادة صغير جداً لحدوث توليد جمع التردد. تحايل جلوفر وزملائه Glover et al. [4] على هذه المشكلة بدمج الضوء البصري وضوء اشعة اكس. لقد تداخلت نبضات اشعة اكس من ضوء ليناك Linac المتزامن من مصدر XFEL [2] مع نبضات من ليزر بصري، وسلط الشعاعين على عينة من الماس وتبين حدوث توليد جمع التردد لأشعة اكس والنبضات البصرية.

تم التنبؤ بهذا التأثير في العام 1971، لكن لم يتم ملاحظته من قبل لعدم وجود مصادر اشعة اكس بشدة عالية بما فيه الكفاية. بقياس الكفاءة مع إشارة جمع التردد المتولدة، تمكن الباحثون من تحديد الاستقطاب الميكروسكوبي المستحث ضوئياً والمجال الكهربائي المصاحب له. من ثم قاموا بمقارنة النتائج مع النظرية، وتحققوا من التوقع بان الاستقطاب المستحث ضوئياً في الماس يكون مصحوباً بشحنات في الروابط التساهمية للبلورة.

يمكن تفسير تأثير خلط الأمواج البصرية مع اشعة اكس في البلورات كتعديل بصري لحيود اشعة اكس [6]. الضوء البصري بتردد w_0 يستحث استقطاب في الوسط، مما ينتج عنه إعادة توزيع اهتزازي مؤقت لكثافة شحنة الاستقطاب. بشكل عام تكون إلكترونات التكافؤ مستقطبة عندما تشع بالضوء البصري. اشعة اكس بتردد w_x المتفاعلة مع النشاط بصريا والجزء المتذبذب لكثافة الشحنة سوف يتشتت عن بشكل غير مرن، مع انزياح تردداتها بتأثير دبلر إلى $w = w_x + w_0$. معظم اشعة اكس على أي حال سوف تتشتت بشكل مرن (أي ان ترددها w_x سيكون محفوظاً) عن الجزء البصري الغير متأثر، والمركبة الاستاتيكية لكثافة الشحنة. هذا التشتت المرن سوف يعطي قمة شدة براج (Bragg) القياسية على الكاشف. العملية الغير مرنة سوف تنتج قمة شدة مزاحة قليلاً عن قمة براج Bragg المرنة (الشكل 1).

في علم البلورات فان اشعة اكس الساقطة والمتشتتة على اتجاهات متعددة للبلورة تنتج معلومات عن كثافة شحنة البلورة في ثلاثة ابعاد. بطريقة مشابهة فان اشعة اكس المعدلة بصريا والمتشتتة يمكن ان تسمح بإعادة بناء تغيرات كثافة الشحنة المستحث بصريا في الابعاد الثلاثة [5, 6]. تجربة جلوفر Glover وزملائه كانت الاثبات الأول لمبدأ إعادة البناء هذا: تم تسجيل إشارات جمع التردد لاتجاه واحد فقط من البلورة. لكن بتوسيع التجربة لتشمل اتجاهات مختلفة للبلورة والذي سوف يسمح بشكل مباشر بإظهار التغيرات في كثافة الشحنة المستحثة في الابعاد الثلاثة.

خلط الموجة البصرية و اشعة اكس في البلورات يمكننا من قياس الاستقطاب البصري على المقياس الميكروسكوبي. الاستقطاب الميكروسكوبي المنشط ضوئياً والمجال الكهربائي المصاحب له يتغير بشكل كبير على المقياس الذري ويحدد الخواص البصرية الميكروسكوبية العامة للمواد بما فيها معامل الانكسار. بالرغم من ان المبدأ مألوفاً الا ان هذه التفاصيل الميكروسكوبية لم تقاس من قبل، لان الطرق البصرية التقليدية تعطي فقط نظرة عامة لها فقط. بين جلوفر Glover وزملائه ان اشعة اكس تجعل من الممكن دراسة ادق التفاصيل.



الشكل 1. التعديل البصري لحيود اشعة اكس. جلوفر Glover وزملائه [4] وجه ضوء ليزر بصري وشعاع اكس من مصدر ضوء ليناك Linac متزامن في عينة ماس. معظم اشعة اكس تنتشت بشكل مرن (طولها الموجي محفوظ) وتنتج قمة شدة براج Bragg على الكاشف. باقي اشعة اكس تتعرض لتشتت غير مرن مما ينتج عنه تعديل في اشعة اكس والتي تمتلك تردد عبارة عن مجموع تردد اشعة اكس وتردد الليزر. هذه الاشعة تولد قمة شدة مزاحة قليلا عن القمة القياسية.

القدرة على استخدام جمع التردد المتولد للضوء البصري واشعة اكس لاستشعار تفاعلات المادة مع الضوء على المقياس الميكروسكوبي سوف يكون لها أثر كبير على تقدم الأبحاث في المجالات البصرية والطاقة وعلوم المواد. اصبحت الليزر البصرية تطلق نبضات بمعدل ترددي عالي (يصل إلى الميجا هيرتز MHz) متوفرة في مراكز السينكروترون synchrotron، فانه من الممكن استكشاف هذا التأثير باستخدام مصادر اشعة اكس المتوفرة بدلا من استخدام مصادر XFEL. هذا سوف يسمح بدراسات مكثفة للخواص البصرية الميكروسكوبية والساكنة. لكن دراسة العمليات الميكروسكوبية المستحثة ضوئيا بشكل ديناميكي في الزمن الحي – تحدي لا يزال امامنا - فان مصادر XFEL لا غنى عنها.

نينا روهينجر Nina Rohringer تعمل في معهد ماكس بلانك Max Planck لفيزياء الأنظمة المعقدة، وفي مركز علوم ليزر الالكترن الحر، هامبورج المانيا.

البريد الالكتروني: nina.rohringer@asg.mpg.de

1. Franken, P. A., Hill, A. E., Peters, C. W. & Weinreich, G. *Phys. Rev. Lett.* **7**, 118–119 (1961).
2. Emma, P. *et al.* *Nature Photon.* **4**, 641–647 (2010).
3. Ishikawa, T. *et al.* *Nature Photon.* **6**, 540–544 (2012).
4. Glover, T. E. *et al.* *Nature* **488**, 603–608 (2012).
5. Eisenberger, P. M. & McCall, S. L. *Phys. Rev. A* **3**, 1145–1151 (1971).
6. Freund, I. & Levine, B. F. *Phys. Rev. Lett.* **25**, 1241–1245 (1970).