



Kraków, 18 października 2023

Lasery rentgenowskie: Dlaczego jaśniej oznacza ciemniej?

Gdy coś oświetlamy, zwykle oczekujemy, że im jaśniejszego użyjemy źródła, tym jaśniejszy będzie otrzymany obraz. Reguła ta działa również w przypadku ultrakrótkich impulsów światła laserowego – lecz tylko do pewnego momentu. Odpowiedź na pytanie, dlaczego rentgenowski obraz dyfrakcyjny może „ściemnieć” gdy promieniowania elektromagnetycznego jest więcej, nie tylko pozwala lepiej zrozumieć oddziaływanie światła z materią, ale także daje nadzieję na produkcję impulsów laserowych istotnie krótszych od dotychczasowych.

Im więcej światła, tym jaśniej? Spostrzeżenie można byłoby uznać wręcz za trywialne, gdyby nie fakt, że... nie zawsze jest prawdziwe! Gdy próbki zawierające kryształy krzemu oświetla się ultrakrótkimi impulsami laserowymi światła rentgenowskiego, powstające obrazy dyfrakcyjne początkowo rzeczywiście są tym jaśniejsze, im więcej fotonów padło na próbkę, czyli im większa była intensywność wiązki. Niedawno zaobserwowano jednak efekt sprzeczny z intuicją: gdy intensywność wiązki zaczyna przekraczać pewną wartość graniczną, obrazy dyfrakcyjne niespodziewanie słabną. Zagadkowe zjawisko właśnie doczekało się wyjaśnienia dzięki wysiłkowi fizyków doświadczalnych i teoretycznych z japońskich, polskich i niemieckich instytucji naukowych, między innymi z ośrodka akceleratorowo-laserowego RIKEN SPring-8 Center w Hyogo, Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie oraz Centrum Badań z Użyciem Laserów na Swobodnych Elektronach w laboratorium DESY w Hamburgu.

Rentgenowskie lasery na swobodnych elektronach (X-Ray Free-Electron Laser, XFEL) generują ultrakrótkie, bardzo silne impulsy promieniowania rentgenowskiego o czasach trwania liczonych w femtosekundach, czyli miliardowych częściach sekundy. Urządzenia tego typu, obecnie działające w zaledwie kilku miejscach na świecie, służą m.in. do analizowania struktury materii za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej. W technice tej próbkę oświetla się impulsem rentgenowskim, po czym rejestruje się rozproszone promieniowanie, by na jego podstawie próbować zrekonstruować pierwotną strukturę krystaliczną badanego materiału.

„Intuicja podpowiada, że im więcej będziemy mieli fotonów, tym obraz dyfrakcyjny próbki powinien być wyraźniejszy. Tak rzeczywiście jest, lecz tylko do pewnej granicznej intensywności, rzędu dziesiątków trylionów watów na centymetr kwadratowy. Gdy ją przekraczamy – a dopiero od niedawna potrafimy to robić – sygnał dyfrakcyjny nagle zaczyna słabnąć. Nasze badania są pierwszą próbą wyjaśnienia tego nieoczekiwanego efektu”, mówi prof. dr hab. Beata Ziaja-Motyka (IFJ PAN, DESY), zajmująca się teoretycznym modelowaniem i komputerowymi symulacjami zjawisk związanych z oddziaływaniem ultrakrótkich impulsów promieniowania rentgenowskiego z materią.

Badania teoretyczne, podjęte w celu wyjaśnienia wyników eksperymentów z ostrzeliwaniem próbek krystalicznego krzemu przez laser XFEL w japońskim ośrodku SACLA w Hyogo, zostały wsparte symulacjami komputerowymi. Z prac naukowców wyłania się następujący przebieg zjawiska.

„Gdy w sieć krystaliczną materiału uderza lawina fotonów o dużej energii, dochodzi do masowego wybijania elektronów z różnych powłok atomowych, wskutek czego atomy szybko się jonizują. W zeszłym roku nasza grupa wykazała, że pierwsze ruchy zjonizowanych atomów w sieci krystalicznej

licznej, inicjujące proces strukturalnego samozniszczenia próbki, pojawiają się z pewnym opóźnieniem, po mniej więcej 20 femtosekundach od momentu uderzenia impulsu świetlnego w próbkę. Teraz jesteśmy przekonani, że przyczyną zaobserwowanego słabnięcia sygnału dyfrakcyjnego są zjawiska zachodzące wcześniej, w pierwszych sześciu femtosekundach interakcji”, mówi dr Ichiro Inoue z RIKEN SPring-8 Center, odpowiedzialny za część eksperymentalną badań.

W początkowej fazie interakcji ultrakrótkiego impulsu rentgenowskiego z materią lawina wysokoenergetycznych fotonów gwałtownie wybija z atomów nie tylko elektrony „wierzchnie” (walencyjne), ale także część tych okupujących głębokie powłoki atomowe, bliższe jądra atomowemu. Okazuje się, że atomy z elektronami powybijanymi z głębokich powłok szczególnie silnie redukują atomowe czynniki rozpraszania, czyli wielkości determinujące natężenie obserwowanego sygnału dyfrakcyjnego.

„Z naszych badań wynika zatem, że zanim dojdzie do strukturalnego uszkodzenia materiału i próbka się rozpadnie, najpierw pojawia się szybko postępujące uszkodzenie elektroniczne. W rezultacie końcowa część impulsu praktycznie nie jonizuje już materiału, bo dalsze wzbudzenia elektronów przez fotony rentgenowskie nie są już energetycznie możliwe”, precyzuje prof. Ziaja-Motyka.

Na pierwszy rzut oka zaobserwowany efekt wydaje się wyłącznie niekorzystny, ponieważ skutkuje osłabieniem jasności rejestrowanych obrazów dyfrakcyjnych. Wydaje się jednak, że dzięki głębokiemu zrozumieniu natury zjawiska uda się je z powodzeniem wykorzystać. Kluczowe jest tu spostrzeżenie, że różne atomy okazują się w różny sposób reagować na ultrakrótkie impulsy rentgenowskie. Ta dodatkowa wiedza może pomóc w dokładniejszym rekonstruowaniu trójwymiarowych, złożonych struktur atomowych.

Inny obszar potencjalnych zastosowań ma związek z produkcją ultrakrótkich impulsów laserowych. Skoro bowiem materiał, przez który przechodzi laserowy impuls rentgenowski o wielkiej intensywności, odcina znaczną część i tak już ultrakrótkiego impulsu, można go z premedytacją użyć w charakterze „nożyczek” do generowania impulsów efektywnie krótszych od dotychczas wytwarzanych – a to oznaczałoby kolejny przełom w obrazowaniu świata zjawisk kwantowych.

Omówione badania były współfinansowane ze środków własnych Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Główna część działalności naukowej Instytutu koncentruje się na badaniu struktury materii, w tym własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po cząstki elementarne. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek, obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN prowadzi też cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fizykę fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz szeregu seminariów i innych spotkań naukowych. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”, któremu, na lata 2012-2017, nadany został status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW). Wiele projektów i przedsięwzięć realizowanych przez Instytut jest wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej (PMIB). Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W kategoryzacji MEIN Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w obszarze nauk fizycznych.

KONTAKT:

prof. dr hab. **Beata Ziaja-Motyka**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk; Center for Free-Electron Laser Science CFEL, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
tel.: +49 40 8998 6303
email: ziaja@mail.desy.de

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Femtosecond reduction of atomic scattering factors triggered by intense x-ray pulse”
I. Inoue, J. Yamada, K. J. Kapcia, M. Stransky, V. Tkachenko, Z. Jurek, T. Inoue, T. Osaka, Y. Inubushi, A. Ito, Y. Tanaka, S. Matsuyama, K. Yamauchi, M. Yabashi, B. Ziaja
Physical Review Letters, 131, 16, 2023
DOI: [10.1103/PhysRevLett.131.163201](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.163201)

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>

Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>

Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ231018b_fot01s.jpg

HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2023/10/18/IFJ231018b_fot01.jpg

Ośrodek akceleratorowo-laserowy SACLA z laserem na swobodnych elektronach, gdzie przeprowadzono doświadczenia nad rozpraszaniem ultrakrótkich impulsów rentgenowskich na próbkach krystalicznego krzemu. (Źródło: SACLA)

IFJ231018b_fot02s.jpg

HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2023/10/18/IFJ231018b_fot02.jpg

Stanowisko eksperymentalne w ośrodku SACLA, gdzie badano rozpraszanie ultrakrótkich impulsów rentgenowskich na próbkach krystalicznego krzemu. (Źródło: SACLA)