



Kraków, 14 lipca 2022

## Zbawienne opóźnienie w reakcji atomów kryształu na lawinę fotonów

*Za pomocą rentgenowskich impulsów laserowych można badać strukturę materii z wcześniej niespotykaną dokładnością. Impulsy są jednak tak silne, że niszczą naświetlaną próbkę. Polsko-japońskiemu zespołowi fizyków udało się właśnie wykazać, że atomy badanego kryształu reagują na lawinę fotonów z pewnym opóźnieniem. Odkrycie oznacza, że używając dostatecznie krótkich impulsów laserowych będzie można oglądać niezaburzoną strukturę materii.*

Czy można z rozdzielczością subatomową zobaczyć reakcje chemiczne z udziałem złożonych cząsteczek? Wydaje się, że tak, ale pod warunkiem, że skorzystamy z laserów na swobodnych elektronach (Free Electron Laser, FEL). Lasery tego typu potrafią generować impulsy promieniowania rentgenowskiego o unikalnych własnościach: nie tylko ultrakrótkie, liczone w pojedynczych femtosekundach (czyli milionowych częściach miliardowej części sekundy!), ale także zawierające bardzo dużo fotonów. Po oświetleniu próbki takim impulsem powstaje obraz dyfrakcyjny, na którego podstawie fizycy mogą próbować odtworzyć strukturę przestrzenną badanych cząsteczek. W zaprezentowanym tu przepisie kryje się jednak pewien bardzo poważny problem...

*„Gdy naświetlamy próbkę wieloma fotonami o dużej energii, jej atomy zaczynają oddziaływać z promieniowaniem tak silnie, że dochodzi do zniszczenia materiału. Co zatem widać na zarejestrowanych obrazach dyfrakcyjnych: prawdziwą strukturę próbki czy już obraz jej destrukcji?”,* pyta prof. dr hab. Beata Ziaja-Motyka z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie i Centrum Badań z Użyciem Laserów na Swobodnych Elektronach (CFEL) w DESY w Hamburgu.

Prof. Ziaja-Motyka jest członkiem międzynarodowego zespołu fizyków doświadczalnych i teoretyków, kierowanego przez dr. Ichiro Inoue z japońskiego ośrodka akceleratorowo-laserowego RIKEN SPring-8 Center. Grupa od kilku lat zajmuje się badaniem interakcji laserowych impulsów rentgenowskich z materią. W najnowszym artykule, zaprezentowanym na łamach prestiżowego czasopiśma fizycznego „Physical Review Letters”, naukowcy przedstawili wyniki prac nad takimi procesami dla kryształów korundu, zbudowanych z atomów tlenu i glinu. Część eksperymentalną przeprowadzono z użyciem lasera rentgenowskiego SACLA, działającego w Hyogo w Japonii.

*„Unikatową cechą naszego lasera jest możliwość wytwarzania impulsów twardego – czyli wysokoenergetycznego – promieniowania rentgenowskiego, które są jednocześnie ultrakrótkie i mają dużą intensywność. W badaniach nanokryształów korundu używaliśmy impulsów trwających zaledwie sześć femtosekund. Zebrane dane pozwoliły nam oszacować, że atomy kryształu zaczynają reagować na wiązkę fotonów z opóźnieniem wynoszącym 20 femtosekund”,* mówi dr Inoue.

*„Wyniki eksperymentalne znakomicie zgadzają się z przewidywaniami naszych modeli i symulacji, gdzie także pojawia się podobne opóźnienie”,* podkreśla z kolei prof. Ziaja-Motyka, która wraz z dr Victorem Tkachenko (IFJ PAN) zajmowała się opisem teoretycznym i symulacjami badanych zjawisk. *„Uważamy, że główną przyczyną tego opóźnienia jest fakt, że elektrony znajdujące się w atomach uwięzionych w węzłach sieci krystalicznej działają trochę jak zderzak i jako pierwsze przejmują impet impulsu rentgenowskiego”,* uzupełnia dr Tkachenko.

Opóźniona reakcja atomów glinu i tlenu w korundzie na impuls rentgenowski okazuje się być konsekwencją następującego ciągu wydarzeń. Gdy w kryształ wpadają fotony o dużej energii, przekazują ją głównie elektronom w atomach tkwiących w węzłach sieci krystalicznej. W wyniku tej interakcji elektrony są masowo wybijane z atomów. Z uwagi na znaczną różnicę mas między uwalnianymi się elektronami a ulegającymi jonizacji atomami, te ostatnie początkowo nie reagują odrzuceniem. Jednak same atomy, dotychczas elektrycznie obojętne, stają się silnie naładowane elektrycznie i zaczynają odczuwać odpychanie ze strony podobnie naładowanych sąsiadów. Właśnie ten proces ładowania zajmuje około 20 femtosekund. Na jeszcze późniejszym etapie jony zyskują dodatkową energię wskutek oddziaływań ze swobodnymi elektronami w kryształce. Ostatecznym rezultatem jest destrukcja próbki.

Wcześniej za pomocą rentgenowskich laserów FEL badano już układy zbudowane z atomów różnych pierwiastków. Do ich oświetlenia używano jednak impulsów o czasach trwania 15-20 femtosekund. Teraz wiadomo, że właśnie w podobnej skali czasowej atomy w układach zaczynają już się przemieszczać w odpowiedzi na naświetlanie. Fakt ten oznacza, że obrazy otrzymywane dotychczas mogły przedstawiać struktury już częściowo zaburzone interakcją z wiązką laserową.

Zgodność czasów reakcji atomów w nanokryształce korundu na impuls rentgenowski, zmierzonych w ostatnim eksperymencie, z czasami przewidywanymi przez symulacje, pozwala z optymizmem myśleć o kolejnych próbach obserwacji innych, bardziej złożonych układów, zwłaszcza zawierających pierwiastki lekkie, będące budulcami materii ożywionej.

Budowa prostych nanokryształów, takich jak korund, jest powtarzalna. Istniejące symetrie ułatwiają prowadzenie obserwacji, analizę obrazów dyfrakcyjnych oraz symulowanie reakcji próbek na impulsy laserowe. Niestety, wiele interesujących struktur jest pozbawionych symetrii. Dalekosiężnym celem prac polsko-japońskiego zespołu fizyków jest więc wypracowanie metod i stworzenie narzędzi umożliwiających obrazowanie i symulowanie układów istotnych biologicznie, takich jak konglomeraty białkowe czy pojedyncze wirusy.

*„Obecnie wyzwaniem są zwłaszcza czasy wykonywania symulacji komputerowych. Brak symetrii w próbkach o znaczeniu biologicznym zmusza nas do modelowania dużych układów. Obliczenia potrafią wtedy trwać wiele miesięcy. Pracujemy nad tym, żeby zredukować te czasy do pojedynczych godzin, co przyspieszyłoby prowadzenie badań i ułatwiło ich zastosowania praktyczne”,* zauważa prof. Ziaja-Motyka.

Udział polskich fizyków w raportowanych badaniach był możliwy dzięki grantowi Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej oraz porozumieniu o współpracy zawartemu między Instytutem Fizyki Jądrowej PAN a ośrodkiem European XFEL w Hamburgu, organizacją zarządzającą europejskim laserem na swobodnych elektronach.

*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 MNIŚW Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.*

#### **KONTAKT:**

prof. dr hab. **Beata Ziaja-Motyka**  
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk  
Center for FEL Science, DESY  
tel.: +48 12 6628209  
email: [ziaja@mail.desy.de](mailto:ziaja@mail.desy.de)

### **PUBLIKACJE NAUKOWE:**

„Delayed Onset and Directionality of X-Ray-Induced Atomic Displacements Observed on Subatomic Length Scales”  
I. Inoue, V. Tkachenko, K. J. Kapcia, V. Lipp, B. Ziaja, Y. Inubushi, T. Hara, M. Yabashi, E. Nishibori  
*Physical Review Letters* 128, 223203 (2022)  
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.223203>

### **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:**

IFJ220714b\_fot01s.jpg

HR: [http://press.ifj.edu.pl/news/2022/07/14/IFJ220714b\\_fot01.jpg](http://press.ifj.edu.pl/news/2022/07/14/IFJ220714b_fot01.jpg)

Ichiro Inoue w sterowni japońskiego lasera na swobodnych elektronach SACLA, gdzie kontroluje parametry podwójnych impulsów promieniowania rentgenowskiego. W ręce trzyma element optyczny służący do ogniskowania wiązki promieniowania rentgenowskiego w obszarze o rozmiarach mikrona. (Źródło: SACLA / IFJ PAN)