



Kraków, 9 stycznia 2020

Przypadek otwiera bramy do krainy attofotografii

Zniknęła jedna z ostatnich przeszkód utrudniających fotografowanie i filmowanie procesów zachodzących w skali attosekund, a więc miliardowych części miliardowej części sekundy. Klucz do jej usunięcia krył się w przypadkowej naturze procesów odpowiedzialnych za powstawanie rentgenowskich impulsów laserowych.

Na świecie działa obecnie zaledwie kilka laserów rentgenowskich. Te wyrafinowane urządzenia mogą być używane do rejestrowania nawet tak ekstremalnie szybkich procesów jak zmiany stanów elektronowych atomów. Impulsy generowane przez współczesne lasery rentgenowskie są już wystarczająco krótkie, by można było myśleć o wykonywaniu attozdjęć, a nawet attofilmów. Problemem pozostawała jednak sama optyka rentgenowska. Gdy ultrakrótki impuls promieniowania rentgenowskiego opuszcza laser, w którym powstał, może być nawet kilkunastokrotnie rozciągnięty w czasie. Międzynarodowa grupa fizyków pod kierunkiem dr. hab. Jakuba Szlachetko i dr. Joanny Czapli-Masztafiak z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie oraz dr. Yvesa Kaysera z Physikalisch-Technische Bundesanstalt w Berlinie (Niemcy) udowodniła na łamach czasopisma „*Nature Communications*”, że optyka rentgenowska nie powinna być dłużej przeszkodą. Publikacja to rezultat badań przeprowadzonych przy laserze rentgenowskim Linac Coherent Light Source (LCLS) w SLAC National Accelerator Laboratory w Menlo Park w Kalifornii.

„Najlepszą metodą na pozbycie się problemów z optyką rentgenowską okazało się... pozbycie się optyki rentgenowskiej”, śmieje się dr Szlachetko. „Zamiast rozwiązać problem, znaleźliśmy metodę jego obejścia. Ciekawy jest przy tym fakt, że optykę zastąpiliśmy... przypadkiem. Dosłownie! Pokazaliśmy bowiem, że znacznie lepsze od dotychczasowych parametry rentgenowskich impulsów laserowych można otrzymać poprzez umiejętne wykorzystanie procesów o naturze stochastycznej”.

Nie pierwszy to przypadek w historii laserów rentgenowskich, gdy na pomoc konstruktorom przychodzi sama fizyka. W klasycznych laserach elementem o kluczowym znaczeniu jest rezonator optyczny. Jest to układ zwierciadeł wzmacniający wyłącznie fotony o określonej długości fali, poruszające się w określonym kierunku. Lasery rentgenowskie przez długi czas uchodziły za niemożliwe do skonstruowania z uwagi na brak zwierciadeł zdolnych do odbijania promieniowania rentgenowskiego. Przeszkodę tę udało się wyeliminować gdy zauważono, że rezonator można zastąpić... samą fizyką relatywistyczną. Gdy rozpędzony do prędkości bliskich prędkości światła elektron przelatuje wzdłuż układu wielu naprzemiennie zorientowanych magnesów, nie porusza się po prostej, lecz się wokół niej zatacza, tracąc jednocześnie energię. Efekty relatywistyczne zmuszają wówczas elektron do emitowania wysokoenergetycznych fotonów nie w dowolnym kierunku, lecz właśnie wzdłuż pierwotnego biegu wiązki elektronów (stąd nazwa: laser na swobodnych elektronach, czyli Free-Electron Laser – FEL).

Wielkie nadzieje związane z laserami rentgenowskimi wynikają z faktu, że za ich pomocą można rejestrować przebiegi reakcji chemicznych. Każdy pojedynczy impuls laserowy może bowiem dostarczyć informacji o aktualnym stanie elektronowym obserwowanego układu (atomu lub cząsteczki). Energia impulsu jest przy tym tak duża, że tuż po zarejestrowaniu obrazu oświetlone obiekty przestają istnieć. Na szczęście proces obserwacji można wielokrotnie powtarzać. Zgromadzone w trakcie dłuższej sesji zdjęcia umożliwiają naukowcom dokładne zrekonstruowanie wszystkich etapów badanej reakcji chemicznej.

„Sytuację można porównać do prób fotografowania zdarzeń tego samego typu za pomocą aparatu z lampą błyskową. Gdy zrobimy dostatecznie dużo zdjęć dostatecznej liczby takich samych zdarzeń, możemy zbudować z nich film z dużą dokładnością przedstawiający to, co się dzieje w czasie pojedynczego zdarzenia”, tłumaczy dr Czapla-Masztafiak i precyzuje: „Problem w tym, że impulsy generowane w laserach rentgenowskich powstają w procesie spontanicznej samowzmacniającej się emisji wymuszonej i nie można ich w pełni kontrolować”.

Spontaniczna natura impulsów powoduje, że w laserach rentgenowskich parametry kolejnych impulsów nie są dokładnie takie same. Impulsy pojawiają się raz wcześniej, raz nieco później, różnią się też nieznacznie energią fotonów i ich liczbą. W przedstawionej analogii odpowiadałoby to sytuacji, gdy kolejne zdjęcia są wykonywane różnymi lampami błyskowymi, na dodatek uruchamianymi w przypadkowych chwilach.

Nieunikniona przypadkowość impulsów rentgenowskich zmuszała fizyków do montowania w laserach FEL dodatkowej, optycznej aparatury diagnostycznej. W efekcie nawet jeśli laser generował pierwotny impuls o czasie trwania attosekund, był on poszerzany przez optykę rentgenowską do femtosekund. Teraz się okazuje, że do rejestrowania stanów elektronowych atomów czy cząsteczek w sposób umożliwiający rekonstrukcję przebiegu reakcji chemicznych wcale nie potrzeba impulsów o precyzyjnie kontrolowanych parametrach.

„Usunięcie optyki rentgenowskiej pozwoliło ponadto na użycie impulsów o wyjątkowo dużych energiach do badania efektów nieliniowych. Powodują one, że atomy zaczynają być w pewnym momencie przezroczyste dla promieniowania rentgenowskiego, z czym z kolei wiąże się wzrost absorpcji w innym zakresie promieniowania”, wyjaśnia dr Szlachetko.

Opracowana przez zespół metoda zostanie wprowadzona przy współpracy z IFJ PAN w eksperymentach realizowanych przy dwóch obecnie działających w Europie laserach rentgenowskich: European XFEL pod Hamburgiem (Niemcy) i SwissFEL w Villigen w Szwajcarii. Prace związane z testowaniem nowej techniki w kontekście badań chemicznych zrealizowano w ścisłej współpracy z dr. hab. Jacinto Sá z Instytutu Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk w Warszawie i Uniwersytetu w Uppsali.

W kontekście zaproponowanej techniki warto podkreślić, że w przypadku zwykłej optyki istnieją pewne czysto fizyczne ograniczenia związane z rozdzielczością przyrządów optycznych, na przykład słynny limit dyfrakcyjny. W nowej metodzie nie ma fizycznych ograniczeń – bo nie ma optyki. Jeśli więc pojawią się lasery rentgenowskie o jeszcze krótszych impulsach niż te generowane obecnie, nową technikę będzie można w nich z powodzeniem stosować.

Instytut Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) w Krakowie zajmuje się strukturą materii i własnościami oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po wnętrza cząstek elementarnych. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fazy skondensowanej materii, fizykę medycyną, 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 czasopismach naukowych. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość” o statusie Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) na lata 2012-2017. Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. W klasyfikacji MNiSW Instytut został zaliczony do kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.

KONTAKT:

dr hab. **Jakub Szlachetko**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628223
email: jakub.szlachetko@ifj.edu.pl

dr **Joanna Czapla-Masztafiak**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628223
email: joanna.czapla@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Core-level nonlinear spectroscopy triggered by stochastic X-ray pulses”
Y. Kayser, Ch. Milne, P. Juranić, L. Sala, J. Czapla-Masztafiak, R. Follath, M. Kavčič, G. Knopp, J. Rehanek, W. Błachucki,
M. G. Delcey, M. Lundberg, K. Tyrała, D. Zhu, R. Alonso-Mori, R. Abela, J. Sá, J. Szlachetko
Nature Communications 10, 4761 (2019)
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12717-1>

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:

IFJ200109b_fot01s.jpg **HR:** http://press.ifj.edu.pl/news/2020/01/09/IFJ200109b_fot01.jpg
Usunięcie optyki rentgenowskiej likwiduje jedną z ostatnich przeszkód utrudniających obserwacje ultra-szybkich przemian stanów elektronowych atomów i cząsteczek. (Źródło: IFJ PAN / Anna Wach)