



Kraków, 7 sierpnia 2024

## Europejski laser rentgenowski bada słabo poznany stan materii

*Właściwości ciepłej plazmy o gęstości ciała stałego do niedawna były znane w niewielkim stopniu. Teraz, dzięki użyciu laserów rentgenowskich, fizycy zdobywają coraz więcej informacji o tym równie ważnym, co zagadkowym stanie materii. Pierwsze kompleksowe obserwacje zachodzących w nim procesów jonizacji, wykonane za pomocą Europejskiego Lasera na Swobodnych Elektronach (European XFEL), właśnie zostały zaprezentowane na łamach jednego z najbardziej prestiżowych czasopism fizycznych.*

Stan materii o temperaturze rzędu kilku tysięcy stopni i dużej gęstości, bliskiej gęstości ciała stałego, występuje między innymi we wnętrzach małych gwiazd oraz planet gazowych. Choć powszechny we Wszechświecie, laboratoryjnie jest bardzo trudny do wytworzenia i analizowania. Nowa era w badaniach eksperymentalnych nad tą tzw. ciepłą gęstą materią (warm dense matter, WDM) zaczęła się zaledwie kilkanaście lat temu, gdy fizycy uruchomili pierwsze lasery rentgenowskie na swobodnych elektronach. Czołowe miejsce wśród urządzeń tego typu zajmuje europejski laser European XFEL o długości niemal 3.5 km. Seria doświadczeń, zrealizowana ostatnio na jego stanowiskach eksperymentalnych, pozwoliła po raz pierwszy zaobserwować, jak szybko metal przechodzi w egzotyczny stan zjonizowanej materii WDM, by na końcu procesu stać się przezroczysty (nieabsorbujący) dla promieniowania rentgenowskiego. Osiągnięcie międzynarodowego zespołu naukowców – w tym z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie – omówiono w artykule opublikowanym w czasopiśmie „Nature Physics”.

Lasery na swobodnych elektronach (X-Ray Free-Electron Laser, XFEL) służą do generowania impulsów promieniowania rentgenowskiego o dużej intensywności i czasach trwania liczonych w pojedynczych femtosekundach, czyli milionowych częściach miliardowej części sekundy. Za pomocą takich impulsów można w unikatowy sposób badać strukturę materii i śledzić zjawiska zachodzące w ekstremalnie krótkich skalach czasowych. Jednym z zaledwie kilkunastu takich urządzeń na świecie jest European XFEL w Hamburgu, wybudowany przy współpracy z ośrodkiem DESY.

„W trakcie naszych doświadczeń w European XFEL oświetlaliśmy próbki miedzi impulsami promieniowania rentgenowskiego o czasie trwania 15 femtosekund i różnych, stopniowo rosnących natężeniach”, przedstawia przebieg eksperymentów prof. dr hab. Beata Ziaja-Motyka (IFJ PAN, DESY). Pierwszy autor omawianego artykułu, dr Laurent Mercadier z ośrodka European XFEL, uzupełnia ten opis o szczegóły fizyczne: „Gdy pojedynczy rentgenowski impuls laserowy docierał do materiału, powodował jego silną jonizację. Uwalniane w jej trakcie elektrony charakteryzowały się wysoką temperaturą. W tych ekstremalnych warunkach miedź przechodziła w stan ciepłej gęstej materii. My skrupulatnie rejestrowaliśmy, ile promieniowania przez tę materię przechodzi i na tej podstawie wnioskowaliśmy o zmianach jonizacji w obserwowanym układzie”.

Przy interpretowaniu wyników pomiarów szczególnie pomocne okazały się symulacje wykonane za pomocą programu BOLTZMANN SOLVER, rozwijanego od 2004 roku w DESY przez prof. Ziaję-Motykę. Narzędzie to zostało użyte do symulowania zmian w obsadzeniu poszczególnych poziomów energetycznych w materii WDM przez elektrony w zależności od natężenia padającego na nią promieniowania laserowego.

Konfrontacja danych eksperymentalnych z symulacjami pozwoliła ustalić, że gdy natężenie promieniowania rentgenowskiego staje się odpowiednio duże, atomy materii WDM stają się silnie zjonizowane. Wskutek tego zjawiska pojawiają się nowe stany energetyczne możliwe do obsadzenia przez wzbudzone elektrony. Stany te były już obserwowane wcześniej za pomocą laserów optycznych, których ograniczenia energetyczne nie pozwoliły jednak na ich dokładniejsze zbadanie. Teraz, dzięki laserowi rentgenowskiemu European XFEL, udało się je dokładnie scharakteryzować w zależności od natężenia impulsów z tego lasera. Zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi dla widm pochłaniania promieniowania rentgenowskiego, przygotowanymi pod kierunkiem dr. Joshua Kasy (University of Washington, USA) i dr. Andrieja Benediktovitcha (DESY, Hamburg), zaobserwowano ponadto, że ciepła gęsta materia w pewnym momencie stawała się przezroczysta dla impulsu laserowego.

„Pojawienie się 'przezroczystości' – czyli braku absorpcji – w materii WDM to konsekwencja wysokiego zjonizowania jej atomów, występującego od pewnych wartości natężeń impulsów laserowych. Energia fotonów promieniowania rentgenowskiego dostępna w eksperymencie staje się wtedy zbyt mała, aby wzbudzić kolejne elektrony. W efekcie fotony te w ogóle przestają być pochłaniane przez ciepłą gęstą materię”, wyjaśnia prof. Ziaja-Motyka.

Wiedza o właściwościach ciepłej gęstej materii i zachodzących w niej procesach ma znaczenie nie tylko astrofizyczne, ale także praktyczne, inżynierskie. Materia w tym stanie odgrywa bowiem ważną rolę w niektórych rodzajach kontrolowanej fuzji jądrowej (ICF – Inertial Confinement Fusion), pojawia się także w trakcie ablacji metalowych osłon termicznych statków kosmicznych powracających z orbity na Ziemię.

Zespół fizyków przy europejskim laserze rentgenowskim European XFEL, kierowany przez prof. dr Ninę Rohringer (DESY, Universität Hamburg), zamierza kontynuować badania nad procesami elektronowymi i jonizacyjnymi zachodzącymi w materii WDM i ich dynamiką. Po stronie polskiej prace są współfinansowane przez Instytut 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 klasyfikacji 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 FEL Science, DESY  
tel.: +48 12 6628209  
email: [ziaja@mail.desy.de](mailto:ziaja@mail.desy.de)

#### **PUBLIKACJE NAUKOWE:**

„Transient Absorption of Warm Dense Matter Created by an X-Ray Free-Electron Laser”  
L. Mercadier, A. Benediktovitch, S. Krusic, J. J. Kas, J. Schlappa, M. Agaker, R. Carley, G. Fazio, N. Gerasimova, Y. Y. Kim, L. Le Guyader, G. Mercurio, S. Parchenko, J. J. Rehr, J.-E. Rubensson, S. Serkez, M. Stransky, M. Teichmann, Z. Yin, M. Zitnik, A. Scherz, B. Ziaja-Motyka, N. Rohringer  
*Nature Physics* 2024  
DOI: [10.1038/s41567-024-02587-w](https://doi.org/10.1038/s41567-024-02587-w)

#### **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:**

**IFJ240807b\_fot01s.jpg**

**HR:** [http://press.ifj.edu.pl/news/2024/08/07/IFJ240807b\\_fot01.jpg](http://press.ifj.edu.pl/news/2024/08/07/IFJ240807b_fot01.jpg)

Ciepła gęsta materia występuje w środku planet-olbrzymów typu Jowisza (gdzie jako metaliczna ciecz o temperaturze wielu tysięcy kelwinów otula skaliste jądro) oraz wewnątrz małych gwiazd – brązowych karłów. (Źródło: IFJ PAN / NASA)