



Atomowy detektor podbija nowy zakres widmowy

Zespół z Wydziału Fizyki oraz Centrum Optycznych Technologii Kwantowych przy Centrum Nowych Technologii UW opracował nową metodę pomiaru trudnych do uchwycenia sygnałów terahercowych przy pomocy „kwantowej anteny”. Autorzy pracy wykorzystując nowatorski układ do detekcji fal radiowych przy pomocy atomów rydbergowskich, byli w stanie nie tylko wykryć, ale i precyzyjnie skalibrować tzw. grzebień częstości w paśmie terahercowym. Pasma to do niedawna stanowiło białą plamę w widmie elektromagnetycznym, a opisane na łamach prestiżowego czasopisma „Optica” rozwiązanie otwiera drogę do ultraczułej spektroskopii i nowej generacji czujników kwantowych działających w temperaturze pokojowej..

Promieniowanie terahercowe (THz), będące częścią spektrum elektromagnetycznego, znajduje się na styku elektroniki i optyki, pomiędzy mikrofalami (używany np. w Wi-Fi) a promieniowaniem podczerwonym. Choć ma ogromny potencjał, od prześwietlania przesyłek bez szkodliwego promieniowania rentgenowskiego, przez superszybką komunikację 6G po spektroskopię i obrazowanie związków organicznych, jego praktyczne użycie do precyzyjnych i czułych pomiarów pozostaje dużym wyzwaniem technicznym. Ostatnie lata przyniosły ogromne postępy zarówno w obszarze detekcji jak i generacji takiego promieniowania, jednak jak dotąd nie udało się dokonać precyzyjnego pomiaru grzebienia częstości.

Dlaczego jest to tak istotne? Grzebień częstości, za które w 2005 roku przyznano Nagrodę Nobla, najłatwiej wyobrazić sobie jako niezwykle precyzyjną linijkę, tyle że stworzoną ze światła lub fal radiowych. Zamiast podziałki oznaczającej milimetry, mamy tu serię równomiernie rozstawionych linii („zębów”) o ściśle określonych częstotliwościach. Taka „elektromagnetyczna podziałka” pozwala fizykom mierzyć częstotliwość nieznanego sygnału z ogromną dokładnością: po prostu sprawdzając, do którego „zęba” na linijce pasuje ten sygnał. Dzięki temu grzebienie stanowią wzorzec pozwalający na kalibrację i strojenie innych urządzeń w bardzo szerokim zakresie. W zależności od tego, gdzie w spektrum elektromagnetycznym taka linijka się znajduje, mówimy o optycznych, radiowych lub terahercowych grzebieniach częstości.

Terahercowe grzebienie częstości są szczególnie interesujące, ponieważ umożliwiłyby kalibrację, a co za tym idzie, bardziej precyzyjne pomiary w dziedzinie częstotliwości znacznie wyższej (szybciej oscylującej) niż fale radiowe, a jednocześnie niższej niż fale optyczne, czyli mówiąc wprost, światło. Tego typu grzebień trudno jest jednak precyzyjnie zmierzyć, jest zbyt szybki dla współczesnej elektroniki, a równocześnie nie da się go zarejestrować metodami optycznymi. Chociaż da się wyznaczyć rozstawienie zębów takiego grzebienia, a także zmierzyć, ile mocy emituje w całym spektrum, trudno ustalić, jaki jest w tej mocy udział pojedynczego zęba.

Naukowcom z Wydziału Fizyki oraz Centrum Optycznych Technologii Kwantowych przy Centrum Nowych Technologii UW udało się przewyżnić to ograniczenie i po raz pierwszy zmierzyć sygnał emitowany przez pojedynczy ząb grzebienia terahercowego. W tym celu wykorzystali gaz atomów rubidu w stanie rydbergowskim. Atom w stanie rydbergowskim to atom, w którym jeden elektron pod wpływem oświetlenia odpowiednio dostrojonymi laserami zostaje wzbudzony na bardzo wysoką orbitę. Taki „napuchnięty” atom staje się kwantową anteną, niezwykle czułą na zewnętrzne pola elektryczne. Co więcej, przy pomocy przestrajalnych laserów można go następnie dostroić do jednej konkretnej częstotliwości takiego pola, w zakresie sięgającym aż do fal terahercowych.

Tradycyjnie w elektrometrii rydbergowskiej do pomiaru pola elektrycznego wykorzystuje się zjawisko tzw. rozszczepienia Autlera-Townesa. Jego ogromną zaletą jest fakt, że wynik pomiaru zależy wyłącznie od fundamentalnych stałych atomowych, co daje nam odczyt absolutnie skalibrowany. W przeciwieństwie do klasycznych anten, które wymagają żmudnego wzorcowania w specjalistycznych laboratoriach radiowych, układ oparty na atomach jest w pewnym sensie wzorcem samym w sobie. Co więcej, dzięki bogactwu stanów energetycznych w atomie, taki czujnik można przestajać w sposób niemal ciągły w olbrzymim zakresie – od sygnału stałego (DC) aż po wspomniane teraherce. Metoda ta ma jednak swoje ograniczenie: sama w sobie nie jest wystarczająco czuła, by zarejestrować bardzo słabe sygnały terahercowe. Aby temu zaradzić, zespół badaczy dodatkowo zastosował wynalezione na UW technikę konwersji fal radiowych na światło i zaadaptował ją do potrzeb promieniowania terahercowego. W tym procesie słaby sygnał terahercowy jest przemieniany w fotony optyczne, które następnie można wykryć z olbrzymią czułością przy użyciu liczników pojedynczych fotonów. To hybrydowe podejście jest kluczem do sukcesu: łączy ekstremalną czułość detekcji fotonowej z możliwością „odzyskania” zdolności kalibracyjnych metody Autlera-Townesa nawet dla najsłabszych sygnałów.

Wykorzystany czujnik oparty na atomach rydbergowskich ma wszystkie cechy potrzebne do przeprowadzenia precyzyjnej kalibracji grzebienia częstości: można go dostroić do pojedynczego zęba grzebienia, a następnie przestroić do kolejnego i kolejnego. Naukowcom udało się zaobserwować w ten sposób kilkadziesiąt zębów w bardzo szerokim zakresie częstotliwości. Dodatkowo, dzięki znajomości fundamentalnych własności atomów, grzebień ten udało się bezpośrednio wykalibrować, precyzyjnie określając jego natężenie.

Wyniki uzyskane przez fizyków z UW: Wiktora Krokosza, Jana Nowosielskiego, Bartosza Kaszę, Sebastiana Borówkę, Mateusza Mazelanika, Wojciecha Wasilewskiego i Michała Parniaka to coś więcej niż kolejny czuły detektor – to podwaliny pod nową gałąź metrologii. Dzięki zaletom atomów rydbergowskich, przełomowe zastosowania optycznych grzebieni częstości, będą teraz mogły zostać przeniesione do trudnej jak dotąd dziedziny terahercowej. Co kluczowe, w przeciwieństwie do wielu technologii kwantowych wymagających skrajnie niskich temperatur, opracowany układ działa w temperaturze pokojowej, co drastycznie obniża koszty i ułatwia przyszłą komercjalizację. Otwiera to drogę do stworzenia referencyjnych standardów pomiarowych dla nadchodzącej ery technologii terahercowych.

Projekt "Optyczne Technologie Kwantowe" (FENG.02.01-IP.05-0017/23) jest realizowany w ramach działania 2.1 Międzynarodowe Agendy Badawcze Fundacji na rzecz Nauki Polskiej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków 2. Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG). Badania są też

jednym z wyników projektów SONATA17 oraz PRELUDIUM23 finansowanych ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Fizyka i astronomia na Uniwersytecie Warszawskim pojawiły się w 1816 roku w ramach ówczesnego Wydziału Filozofii. W roku 1825 powstało Obserwatorium Astronomiczne. Obecnie w skład Wydziału Fizyki UW wchodzi Instytuty: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki, Katedra Metod Matematycznych Fizyki. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ponad 250 nauczycieli akademickich. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ponad 1350 studentów i ok. 150 doktorantów. Uniwersytet Warszawski w rankingu szanghajskim dla poszczególnych dziedzin (Shanghai's Global Ranking of Academic Subjects) znajduje się wśród 200 najlepszych na świecie jednostek, kształcących w dziedzinie fizyki.

PUBLIKACJA NAUKOWA:

W. Krokosz, J. Nowosielski, B. Kasza, S. Borówka, M. Mazelanik, W. Wasilewski, M. Parniak
Electric-field metrology of a terahertz frequency comb using Rydberg atoms, Optica Vol. 12, Issue 11, pp. 1854-1864 (2025)
<https://doi.org/10.1364/OPTICA.578051>

KONTAKT:

dr hab. Michał Parniak
Centrum Optycznych Technologii Kwantowych, Centrum Nowych Technologii, Uniwersytet Warszawski
tel. +48 225543786
email: m.parniak@cent.uw.edu.pl

POWIAZANE STRONY WWW:

<https://www.fuw.edu.pl>
Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
<https://www.fuw.edu.pl/informacje-prasowe.html>
Serwis prasowy Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
<http://qot.cent.uw.edu.pl/>
Strona Centrum Optycznych Technologii Kwantowych QOT UW

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW251205b_fot01
https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2025/FUW251205b_fot01.png
Grzebień częstości konwertowany na światło przez komórkę z atomami rubidu. (Wizualizacja: Mateusz Mazelanik Uniwersytet Warszawski, Wiktor Krokosz Uniwersytet Warszawski).

FUW251205b_fot02
https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2025/FUW251205b_fot02.jpg
Zdjęcie przedstawiające autorów pracy. Kolejno od lewej: Jan Nowosielski, Mateusz Mazelanik, Bartosz Kasza, Wiktor Krokosz, Michał Parniak, Sebastian Borówka, Wojciech Wasilewski. (Źródło: Tomasz Prokop Uniwersytet Warszawski)