

## **Spektroskopia układów kwantowych za pomocą dokładnej i szybkiej lokalizacji rezonansów wnęki optycznej**

W wielu współczesnych badaniach, m.in. z zakresu dokładnej optycznej metrologii śladowych ilości gazów, precyzyjnego monitoringu atmosfery Ziemi, chemii kwantowej, astrochemii czy testowania obliczeń elektrodynamicznych i poszukiwania fizyki wykraczającej poza Model Standardowy w najprostszych układach molekularnych, ważny jest dokładny pomiar kształtu linii widmowej. Za niebywały postęp w tych dziedzinach uważa się rejestrację profilu linii z dokładnością względną  $10^{-3}$  i choć jest to wielkość ponad 8 rzędów wielkości większa od dokładności towarzyszącej aktualnym pomiarom energii przejść molekularnych, dla większości grup eksperymentalnych stanowi poważne wyzwanie. Problem stanowi pomiar natężenia światła obecny prawie we wszystkich technikach spektroskopowych, ale niestety bardzo podatny na systematyczne zniekształcenia ze strony układu detekcyjnego. Jego rozwiązanie stanowi albo profesjonalna kalibracja liniowości detektora, wymagająca jednak współpracy z najlepszymi instytutami metrologicznymi na świecie, albo poszukiwanie alternatywnych metod spektroskopowych, z definicji niezależnych od pomiaru natężenia światła. W naszym zespole od 2015 r. rozwijana jest technika spektroskopowa CMDS (*cavity mode-dispersion spectroscopy*) polegająca na wyznaczeniu widma molekularnego z czysto częstotliwościowego pomiaru rezonansów wnęki optycznej. Jej ogromny potencjał wynika z faktu, że częstotliwość jest wielkością, którą umiemy mierzyć nawet z dokładnością względną rzędu  $10^{-18}$ . Daje to również łatwą możliwość dowiązania obu osi widma molekularnego do atomowego standardu częstości. W 2019 r. technika CMDS razem z kalibrowaną w NIST metodą absorpcyjną ustaliła nowy rekord dokładności pomiarów spektroskopowych natężenia linii na poziomie  $10^{-4}$ . Niestety metoda CMDS, w porównaniu do innych metod wspomaganých wnęką optyczną, nie jest aż tak szybka przez co jest bardziej podatna na różne dryfy wielkości fizycznych. Nie jest też przydatna w badaniach bardzo szybkich procesów.

Celem niniejszego projektu jest rozwój częstotliwościowych metod CBS (*cavity buildup spectroscopy*), polegających na nowatorskiej idei dokładnej i szybkiej lokalizacji rezonansu wnęki na podstawie pomiaru częstotliwości sygnału dudnień między nierezonansowym polem laserowym wzbudzającym mod wnęki a rezonansowym polem budowanym we wnęcie. Podejście takie dostarczy wielu nowych korzyści dla eksperymentalnej spektroskopii. Umożliwi ono uzyskanie fundamentalnego limitu szybkości pomiaru widma, dotychczas nieosiągalnego dla metod CMDS, a związanego z czasem życia fotonu we wnęcie. Zastosowane do szerokopasmowej spektroskopii z użyciem podwójnego grzebienia częstotliwości optycznych pozwoli na przeprowadzenie pierwszych na świecie pomiarów w czasie rzeczywistym z dokładnością gwarantowaną przez najlepsze standardy częstości. System taki będzie również obiecującą alternatywą, wyróżniającą się wysoką rozdzielczością, dla obecnych szerokopasmowych systemów CRDS opartych na grzebieniach częstotliwości optycznych i charakteryzujących się niską rozdzielczością oraz dla wzmocnionej wnęką spektroskopii z podwójnym grzebieniem częstotliwości, opartej na pomiarach natężenia światła. Niestacjonarne warunki pola we wnęcie, towarzyszące rejestracji sygnału dudnień w metodzie CBS, dadzą ponadto możliwość badania szybkich procesów związanych z dynamicznymi zmianami absorpcji we wnęcie optycznej występującymi w skali czasu dużo krótszej niż czas życia fotonu we wnęcie. Dynamiczna technika CBS rozwijana w ramach projektu może dostarczyć rozdzielczości czasowej i czułości pomiarowej wyższej niż w przypadku innych aktualnie stosowanych technik. Metoda CBS posłuży również do wspierania rozwoju standardu metrologii ciśnienia nowej generacji, opartego na właściwościach optycznych cząsteczek.

W ramach projektu planowane są dokładne pomiary kształtu linii widmowych molekuł CO i CO<sub>2</sub>, ważnych z punktu widzenia atmosferycznych badań Ziemi i innych planet, jak również molekuły D<sub>2</sub>, odgrywającej ważną rolę w badaniach z zakresu fizyki podstawowej. Jednoczesny pomiar widma absorpcyjnego i dyspersyjnego możliwy w metodzie CBS umożliwi opracowanie wysoce dokładnej spektroskopii zespolonego współczynnika załamania światła posiadającej wiele potencjalnych zastosowań, w tym m.in. dokładne testowanie teorii zderzeń molekularnych.