

Rozwiązanie fundamentalnej rozbieżności obserwowanej w subdopplerowskich widmach molekularnego wodoru – rozwój nowych technologii metrologii optycznej do testowania teorii kwantowej dla molekuł

Cząsteczka wodoru i jej izotopologii stanowią kluczowy punkt odniesienia w precyzyjnych testach podstawowych praw fizyki. Jako najprostsza obojętna cząsteczka, wodór molekularny jest stosunkowo prosty do opisu teoretycznego i posiada długożyjące stany energetyczne, które można mierzyć z wyjątkową dokładnością. To połączenie prostoty teoretycznej i dostępności eksperymentalnej czyni cząsteczkę wodoru idealnym układem do testowania **elektrodynamiki kwantowej (QED)** dla molekuł z niespotykaną dotąd precyzją oraz do wykrywania subtelnych odchyłeń, które mogą wskazywać na **nową fizykę wykraczającą poza Model Standardowy**. Jednocześnie ultradokładne pomiary linii widmowych wodoru mogą potencjalnie pozwolić na doprecyzowanie fundamentalnych stałych fizycznych, takich jak stosunek masy protonu do elektronu, poprawiając tym samym dokładność podstawowych parametrów leżących u podstaw wielu praw fizyki.

Ostatnie postępy w spektroskopii laserowej i teorii kwantowej doprowadziły do osiągnięcia niezwyklej precyzji w pomiarach cząsteczki wodoru, zbliżając się do niepewności rzędu jednej części na dziesięć miliardów. Jednak dalsze zwiększanie tej precyzji napotyka istotne przeszkody eksperymentalne. Główną i wciąż nierozwiązaną barierą w poprawie dokładności częstotliwości w bezdopplerowskiej spektroskopii nasyceniowej dipu Lamba w molekularnym wodorze jest nieoczekiwane pojawianie się dyspersyjnych kształtów linii widmowych, które **przeczą wszystkim dotychczasowym przewidywaniom teoretycznym** i co istotne, nie występują w żadnym innym znanym układzie molekularnym. Jedne z najbardziej przekonujących hipotez przypisują te nieoczekiwane kształty mechanizmom ściśle związanym z obecnością fali stojącej we wnętrzu optycznej.

Aby sprostać tym wyzwaniom, projekt zakłada opracowanie zaawansowanego systemu optycznego do spektroskopii dostosowanego do badań cząsteczki wodoru. Centralnym elementem tego systemu będzie nowa wnęka optyczna o wysokiej dobroci, umożliwiająca przełączanie się między konfiguracjami fali stojącej i biegnącej w spektroskopii nasyceniowej. Ta funkcjonalność pozwoli przetestować wspomniane hipotezy i stworzy szansę na rozwiązanie zagadki kształtu dipu Lamba w cząsteczce wodoru — z dużym potencjałem poprawy precyzji pomiaru położenia linii widmowych wodoru **o jeden do dwóch rzędów wielkości**. Dodatkowo układ będzie wykorzystywał ultraprecyzyjną technikę spektroskopii strat we wnętrzu (CRDS), która oferuje wysoką czułość, rozdzielczość oraz znakomitą stabilność poziomu odniesienia. Wreszcie, aby zapewnić absolutną dokładność, wszystkie pomiary częstotliwości będą odniesione do grzebienia częstości optycznych oraz wzorca czasu pierwotnego.

Dzięki temu nowoczesnemu instrumentarium projekt umożliwi pomiar wybranych przejść ro-wibracyjnych w cząsteczce wodoru z niespotykaną dotąd precyzją. Porównanie tych pomiarów z najdokładniejszymi obliczeniami teoretycznymi pozwoli na przeprowadzenie rygorystycznego testu QED w układzie molekularnym. Każde odchylenie między wartościami eksperymentalnymi a przewidywaniami teoretycznymi mogłoby sygnalizować obecność nowej fizyki wykraczającej poza obecny Model Standardowy, natomiast ich zgodność wzmocniłaby zaufanie do poprawności QED w tej skali i zaostrzyłaby ograniczenia na istnienie nowych oddziaływań. W obu przypadkach uzyskane dane pozwolą na udoskonalenie wartości fundamentalnych stałych fizycznych i ustanowią nowy standard w dziedzinie precyzyjnej spektroskopii, z szerokimi implikacjami dla takich obszarów jak metrologia precyzyjna i astrofizyka.