

## Autoreferat

### 1. Imię i Nazwisko:

Daniel Lisak

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania:

1998 r. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, stopień magistra fizyki

2003 r. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych:

2002 – 2004 Asystent w Zakładzie Spektroskopii Fazy Gazowej Instytutu Fizyki UMK

2003 1.5-miesięczny wyjazd naukowy do Università di Napoli „Federico II”, Dipartimento di Scienze Fisiche (Neapol, Włochy), praca w grupie prof. Antonio Sasso

2004 – obecnie Adiunkt w Zakładzie Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej Instytutu Fizyki UMK

2005 – 2008 Staż podoktorski - trzy wyjazdy naukowe (łącznie 19 miesięcy) do National Institute of Standards and Technology – NIST, Process Measurements Division (Gaithersburg, MD, USA). Praca w grupie Dr Josepha T. Hodgesa

### 4. Wskazanie osiągnięcia\* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

Jako wskazane w myśl powyższej ustawy osiągnięcie naukowe wybrałem jednotematyczny cykl 6 publikacji na temat spektroskopii strat we wnęce (*Cavity Ring-Down Spectroscopy – CRDS*) zastosowanej do badania widm H<sub>2</sub>O w bliskiej podczerwieni. *Impact factor* czasopism z roku publikacji, liczbę cytowań (wg bazy *Web of Science*) i oszacowany przeze mnie mój udział procentowy w pracach podaję przy każdej z publikacji poniżej.

1. **D. Lisak**, J. T. Hodges, R. Ciuryło, "Comparison of semiclassical line-shape models to rovibrational  $H_2O$  spectra measured by frequency-stabilized cavity ring-down spectroscopy", Phys. Rev. A **73**, 012507 (2006)

impact factor 3.047, liczba cytowań 35, mój udział w pracy 70%

W pracy po raz pierwszy pokazano, że technika CRDS nadaje się do badania subtelných efektów wpływających na kształt linii widmowych. Zastosowano jednomodową spektroskopię strat we wnęce z aktywną stabilizacją częstotliwości (*Frequency-Stabilized Cavity Ring-Down Spectroscopy* – FS-CRDS) do systematycznych badań kształtów linii widmowych. Spektroskopia FS-CRDS opracowana przez Josepha T. Hodgesa polega na wykorzystaniu wnęki optycznej, której częstotliwości modów rezonansowych są aktywnie stabilizowane do referencyjnego lasera o stabilnej częstotliwości. Jako laser próbujący używa się wąskiego spektralnie lasera o pracy ciągłej, którego kształt wiązki i częstotliwość dopasowane są do pojedynczego modu  $TEM_{00}$  wnęki. Pozwala to na uzyskanie „czystego” eksponencjalnego zaniku sygnału z wnęki pod warunkiem odpowiednio szybkiego wyłączenia lasera próbującego. Ponadto grzebień modów podłużnych stabilizowanej wnęki, do których kolejno dowiązujemy laser próbujący, stanowi bardzo dokładną względną skalę częstotliwości badanego widma. Warto dodać, że w spektroskopii CRDS współczynnik absorpcji badanego gazu otrzymuje się bezpośrednio z pomiaru czasu zaniku światła, przez co fluktuacje mocy lasera próbującego nie mają wpływu na otrzymane widmo.

W ramach pracy zbudowany został spektrometr FS-CRDS i napisane oprogramowanie sterujące oraz analizujące dane doświadczalne. Zademonstrowano stosowalność tej metody do bardzo precyzyjnych pomiarów kształtów linii widmowych w gazie. Na przykładzie rotacyjno-wibracyjnych linii  $H_2O$  z zakresu bliskiej podczerwieni przetestowano stosowalność modelowych profili linii widmowych. Na przykładzie trzech gazów zaburzających He,  $N_2$  i  $SF_6$  zademonstrowano wpływ zderzeniowego zwiężenia linii widmowej oraz efektów zależności ciśnieniowego rozszerzenia i przesunięcia linii od prędkości cząsteczek absorbera, tzw. *speed-dependent effects*, na obserwowany kształt linii. Obydwa te efekty są często trudno rozróżnialne choć ich przyczyna fizyczna jest zupełnie różna. Dodatkowo efekty *speed-dependent* mogą powodować asymetrię linii. W pracy zademonstrowano, że przy odpowiednio wysokim stosunku sygnału do szumu widm doświadczalnych konieczne jest jednoczesne uwzględnienie wyżej wymienionych efektów aby można było uzyskać zgodność modelowych profili linii z wynikami pomiarów. Zademonstrowano również bardzo wysoką rozdzielczość spektralną rzędu 50 kHz i zgodność szerokości dopplerowskiej linii z wartością wynikającą z temperatury gazu na poziomie 0.2 %.

Mój udział w pracy: zaplanowanie eksperymentu, dobór warunków fizycznych, częściowo budowa aparatury (wspólnie z J. T. Hodgesem), napisanie około połowy oprogramowania sterującego procesem pomiarowym, dobór modeli fizycznych (poza modelem zderzeń *billiard-ball* zaproponowanym przez R. Ciuryło) wykonanie pomiarów zawartych w pracy, dobór metod analizy danych, napisanie oprogramowania do analizy danych, zebranie wyników i przygotowanie większości tekstu publikacji.

2. J. T. Hodges, **D. Lisak**, "Frequency-stabilized cavity ring-down spectrometer for high-sensitivity measurements of water vapor concentration", Appl. Phys. B **85**, 375-382 (2006)

impact factor 2.023, liczba cytowań 16, mój udział w pracy 50%

W ramach pracy zbudowano przenośny spektrometr FS-CRDS pracujący w zakresie widmowym 1.4  $\mu\text{m}$  i służący do detekcji śladowych ilości wody w gazach. Porównano spektroskopową i termodynamiczną metodę detekcji pary wodnej. Dokonano też porównania dokładności metody FS-CRDS z innymi metodami CRDS bazującymi na niestabilizowanych laserach lub wnękach optycznych. Uzyskano stosunek sygnału do szumu mierzonych widm na poziomie 2500:1. Wyznaczono limit detekcji absorpcji spektrometru na poziomie  $1.2 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$  oraz minimalne wykrywalne stężenie molowe  $\text{H}_2\text{O}$  wynoszące  $0.7 \times 10^{-9}$ . W przeciwieństwie do tradycyjnych higrometrów, z których najdokładniejsze bazują na optycznym pomiarze temperatury kondensacji pary wodnej, higrometr bazujący na spektroskopii CRDS nie wymaga okresowej kalibracji z wyjątkiem jednokrotnego pomiaru natężenia wykorzystywanej linii widmowej.

Mój udział w pracy: częściowo budowa aparatury (wspólnie z J. T. Hodgesem), zaproponowanie metod analizy danych spektroskopowych i opracowanie oprogramowania do automatycznej analizy danych, wykonanie pomiarów zawartych w publikacji, zanalizowanie danych i przygotowanie wyników do publikacji, udział w końcowej redakcji tekstu pracy.

3. **D. Lisak**, J. T. Hodges, "High-resolution cavity ring-down spectroscopy measurements of blended  $\text{H}_2\text{O}$  transitions", Appl. Phys. B, **88**, 317-325 (2007)

impact factor 2.280, liczba cytowań 20, mój udział w pracy 70%

W pracy wykorzystano stabilność osi częstości i wysoką zdolność rozdzielczą spektrometru FS-CRDS do precyzyjnego wyznaczenia względnych położenia, natężeń i parametrów kształtu 4 słabo rozseparowanych linii  $\text{H}_2\text{O}$  rozszerzonych przez  $\text{N}_2$ . Stosując spektroskopię bezdopplerowską z rozdzielczością rzędu 50 kHz wyznaczono precyzyjnie względne położenia linii zastosowane następnie w analizie pełnego widma czterech rozszerzonych dopplerowsko i ciśnieniowo linii. Stosując to podejście w połączeniu z zaawansowanym modelem kształtu linii widmowej uzyskano niepewności mierzonych natężeń linii wynoszące 0.6 %. Scharakteryzowano systematyczne błędy wyznaczenia szerokości ciśnieniowej i natężenia linii w badanym układzie wynikające ze stosowania uproszczonych modeli kształtu linii, w szczególności profilu Voigta. Błędy te mogą sięgać kilku do nawet kilkunastu procent mierzonej wartości.

Mój udział w pracy: zaplanowanie eksperymentu, częściowo budowa aparatury (wspólnie z J. T. Hodgesem), dobór metod i analiza danych spektroskopowych, wykonanie pomiarów zawartych w publikacji, zanalizowanie danych i przygotowanie wyników do publikacji, napisanie większości tekstu publikacji.

4. **D. Lisak**, J. T. Hodges, "Low-uncertainty H<sub>2</sub>O line intensities for the 930-nm region", J. Molec. Spectrosc., **249**, 6–13 (2008)

impact factor 1.636, liczba cytowań 6, mój udział w pracy 70%

Metodę FS-CRDS wykorzystano do pomiaru natężeń ponad 70 linii widmowych H<sub>2</sub>O w bliskiej podczerwieni. Dla względnie silnych linii widmowych uzyskano zgodność z danymi z innych laboratoriów na poziomie 1 %, jednak w przypadku bardzo słabych linii otrzymane natężenia linii okazały się systematycznie większe o około 20% od powszechnie używanych danych. Należy zauważyć, że wcześniejsze dane uzyskane były metodą spektroskopii fourierowskiej (*Fourier Transform Spectroscopy* – FTS), która nie jest tak czułą techniką jak CRDS. Z tego względu natężenia mierzonych linii były na granicy limitu detekcji dla spektroskopii FTS, podczas gdy widma uzyskane metodą FS-CRDS osiągały stosunek sygnału do szumu rzędu 450:1. Najśłabsza zmierzona linia widmowa H<sub>2</sub>O charakteryzowała się natężeniem równym  $1.4 \times 10^{-27} \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-1} \text{ molekula}^{-1}$ .

Mój udział w pracy: częściowo zaplanowanie eksperymentu (wspólnie z J. T. Hodgesem), wykonanie niezbędnych modyfikacji układu doświadczalnego i oprogramowania do analizy danych, wykonanie pomiarów spektroskopowych i ich analiza, porównanie wyników z danymi literaturowymi, napisanie większości tekstu publikacji.

5. J.T. Hodges, **D. Lisak**, N. Lavrentieva, A. Bykov, L. Sinitza, J. Tennyson, R.J. Barber, R.N. Tolchenov, "Comparison between theoretical calculations and high-resolution measurements of pressure broadening for near-infrared water spectra", J. Molec. Spectrosc. **249**, 86–94 (2008)

impact factor 1.636, liczba cytowań 7, mój udział w pracy 50%

W ramach pracy zmierzono profile ponad 20 rotacyjno-wibracyjnych linii widmowych H<sub>2</sub>O, z rejonu długości fali ok. 935 nm, zaburzonych przez azot i przez powietrze. Wyznaczono współczynniki ciśnieniowego rozszerzenia linii i zanalizowano obserwowany efekt zwężenia linii widmowych. Interpretacje tego efektu jako zwężenia Dickego lub jako zależność ciśnieniowego rozszerzenia linii od prędkości cząsteczek wpływa istotnie na wyznaczone ciśnieniowe rozszerzenie linii, co należy uwzględnić porównując wartości eksperymentalne. Ponadto wykonano obliczenia teoretyczne współczynników ciśnieniowego rozszerzenia badanych linii H<sub>2</sub>O korzystając z najnowszych dostępnych danych dotyczących poziomów energetycznych i momentów dipolowych przejść. Uzyskano dobrą zgodność wyników teoretycznych z doświadczalnymi na poziomie ok. 4%.

Mój udział w pracy: częściowo zaplanowanie eksperymentu (wspólnie z J. T. Hodgesem), dostosowanie oprogramowania do analizy danych, wykonanie pomiarów spektroskopowych i ich analiza, porównanie wyników eksperymentalnych z teoretycznymi (obliczenia teoretyczne były wykonane przez pozostałych współautorów), napisanie około połowy tekstu publikacji.

6. **D. Lisak**, D. K. Havey and J. T. Hodges “*Spectroscopic line parameters of water vapor for rotation-vibration transitions near 7180 cm<sup>-1</sup>”*, Phys. Rev. A **79**, 052507 (2009)  
impact factor 2.866, liczba cytowań 14, mój udział w pracy 70%

Celem pracy było wyznaczenie natężeń linii widmowych oraz parametrów kształtu 15 linii H<sub>2</sub>O z rejonu 1.39 μm mogących posłużyć jako dane referencyjne w higrometrii optycznej. W roli źródła gazu o dobrze znanym stężeniu molowym H<sub>2</sub>O wykorzystano znajdujący się w NIST główny standard wilgotności (*primary standard humidity generator*) co zapewniło najniższą możliwą na świecie niepewność zawartości H<sub>2</sub>O w próbce. Stosując spektroskopię FS-CRDS oraz ulepszoną procedurę analizy danych polegającą na jednoczesnym dopasowywaniu widm odpowiadających różnym ciśnieniom gazu (*multi-spectrum fit*) uzyskano niepewności natężeń linii widmowych poniżej 0.4 %. Analiza danych metodą *multi-spectrum fit* pozwoliła rozróżnić efekty zwężenia linii spowodowane zderzeniami zmieniającymi prędkość (zwężenie Dickego) i zależnością szerokości ciśnieniowej od prędkości cząsteczek stosując tzw. zależny od prędkości profil Neklina-Ghataka (*Speed-Dependent Nelkin-Ghatak Profile – SDNGP*). Przedyskutowano błędy systematyczne wyznaczanych natężeń linii spowodowane uproszczonym modelem kształtu linii jak również zakresem zmierzonego widma w stosunku do szerokości linii widmowej.

Mój udział w pracy: częściowo zaplanowanie eksperymentu (wspólnie z J. T. Hodgesem), częściowo budowa aparatury (wspólnie z J. T. Hodgesem), napisanie większości oprogramowania sterującego procesem pomiarowym i całości oprogramowania do analizy danych metodą *multi-spectrum fit*, dobór modeli fizycznych do analizy danych, wykonanie pomiarów zawartych w pracy, zebranie wyników i przygotowanie większości tekstu publikacji.

Opisany powyżej cykl publikacji stanowi pierwsze zastosowanie spektroskopii strat we wnęce optycznej ze stabilizacją częstotliwości modów wnęki (*Frequency-Stabilized Cavity Ring-Down Spectroscopy – FS-CRDS*) do systematycznych badań kształtów linii widmowych. Po raz pierwszy wykonano wiarygodne pomiary i analizę kształtów linii widmowych z uwzględnieniem subtelnych efektów za pomocą spektroskopii CRDS. Prace te udowodniły, że CRDS może być nie tylko bardzo czułą metodą spektroskopową ale również precyzyjną i dokładną. Zademonstrowana doskonała liniowość osi częstotliwości, wyznaczonej przez grzebień modów rezonansowych stabilizowanej wnęki, połączona z bardzo wysoką rozdzielczością spektralną wynikającą ze wzbudzenia jednego modu TEM wnęki i niezależnością czasu zaniku światła od mocy lasera próbkującego uczyniła FS-CRDS idealną techniką do badania słabych widm molekularnych. Uzyskane widma linii widmowych H<sub>2</sub>O charakteryzowały się bardzo wysokim stosunkiem sygnału do szumu dochodzącym do 2500:1 oraz sub-megahercową rozdzielczością spektralną przy szerokości Dopplerowskiej linii rzędu 1 GHz. Dzięki temu możliwe stały się badania subtelnych efektów kształtu linii takich jak zderzeniowe zwężenie linii i efekty zależne od prędkości dla linii widmowych o bardzo małych natężeniach.

Precyzyjne pomiary ilościowe widm pary wodnej należą do dość trudnych, zwłaszcza w przypadku małych koncentracji cząsteczek H<sub>2</sub>O. Wynika to z niestabilnej zawartości H<sub>2</sub>O w komórce absorpcyjnej ze względu na ciągły proces absorpcji i desorpcji wody ze ścianek komórki. W przypadku metod *cavity enhanced* dodatkową trudność stanowi kondensacja wody na zwierciadłach wnęki rezonansowej. Z tego powodu eksperyment musi być prowadzony w warunkach ciągłego przepływu gazu o znanej zawartości molowej cząsteczek H<sub>2</sub>O oraz stabilnym ciśnieniu i temperaturze. Do generacji strumienia gazu wykorzystano saturator oraz precyzyjny higrometr oparty na pomiarze punktu kondensacji pary wodnej skalibrowany w laboratorium higrometrycznym NIST, a w kolejnych pomiarach natężeń i kształtów linii widmowych H<sub>2</sub>O jako źródło badanego gazu użyto bezpośrednio głównego standardu wilgotności działającego w NIST (*NIST primary standard humidity generator*). Dzięki temu uzyskano zestaw danych spektroskopowych charakteryzujących się dokładnością nieosiągalną w innych laboratoriach na świecie, które mogą służyć jako dane referencyjne zarówno w badaniach podstawowych jak i stosowanych, w szczególności w precyzyjnej higrometrii optycznej. Uzyskane parametry natężenia i kształtu linii widmowych były m.in. wykorzystane w grupie prof. J. Tennysona (UCL Londyn) do testowania teoretycznych metod obliczeniowych jak również do weryfikacji parametrów spektroskopowych bazy danych ESA uzyskanych metodą spektroskopii fourierowskiej.

Potencjał spektroskopii FS-CRDS i zaawansowanych metod analizy kształtów linii widmowych opracowanych w trakcie realizacji wymienionych prac zostały wykorzystane przez grupy zajmujące się satelitarnymi pomiarami składu atmosfery ziemskiej z NASA-JPL oraz California Institute of Technology, z którymi współpracuję. Korzystając z technologii i metod analizy danych opracowanych w trakcie pomiarów widm H<sub>2</sub>O wykonano serię badań linii widmowych tlenu i dwutlenku węgla mające służyć jako dane referencyjne w analizie widm satelitarnych. Spektroskopia FS-CRDS jest obecnie rozwijana w NIST (grupa dr J. T. Hodgesa), w Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu (grupa w której pracuję) oraz w California Institute of Technology (grupa prof. M. Okumury). Ponadto do budowy podobnego urządzenia przygotowuje się grupa dr H. Abe z National Metrology Institute of Japan, gdzie spektrometr ma być używany do detekcji śladowych ilości pary wodnej w gazach technicznych wykorzystywanych w przemyśle półprzewodnikowym.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).**

Moje zainteresowania naukowe skupione są wokół trzech zasadniczych tematyk:

- Metody eksperymentalnej spektroskopii (konstrukcja spektrometrów, automatyzacja pomiarów)
- Analiza danych doświadczalnych (wielowymiarowe dopasowania, metody obliczania profili linii widmowych)

- Atomowe i cząsteczkowe kształty linii widmowych (wpływ efektów zderzeniowych na kształty linii widmowych w różnych układach, dostarczanie precyzyjnych parametrów do spektroskopowych baz danych, zastosowania analizy kształtów linii widmowych w metrologii i detekcji gazów)

Zagadnienia te wzajemnie się uzupełniają, a rozwój metod eksperymentalnych i analizy danych stanowią środki do realizacji trzeciego z wymienionych punktów.

### Metody eksperymentalnej spektroskopii

W celu badania wpływu efektów zderzeniowych na kształty interkombinacyjnej linii widmowej kadmu w 1999 r. zbudowano spektrometr umożliwiający precyzyjne pomiary metodą laserowo indukowanej fluorescencji (*laser-induced fluorescence* – LIF) z wysoką rozdzielczością, rzędu 1 MHz, w zakresie ultrafioletu (długość fali 326.1 nm). Widmo fluorescencji wzbudzone było laserem pierścieniowym z wewnątrzprzewodowym podwajaczem częstotliwości, a detekcja za pomocą fotopowielacza pracującego w trybie zliczania fotonów zapewniała wysoką czułość spektrometru. Absolutna oś częstotliwości mierzonych widm była kalibrowana względem dobrze znanych linii cząsteczki jodu I<sub>2</sub>. Spektrometr umożliwiał w pełni automatyczne pomiary widm ze stosunkiem sygnału do szumu dochodzącym do 300:1 i był stosowany w badaniach subtelnych efektów kształtu linii <sup>114</sup>Cd i <sup>113</sup>Cd opisanych w dalszej części autoreferatu. Temperatura komórki fluorescencyjnej regulowana była w kilku punktach co umożliwiało optymalny dobór koncentracji atomów Cd niezależnie od temperatury badanego gazu. Spektrometr został opisany w pracy [3] (*numeracja zgodna z załącznikiem 3 – Wykaz publikacji, część A – publikacje w czasopiśmie z listy JCR*). W 2008 r. dokonano modyfikacji spektrometru zapewniającej lepszą liniowość i stabilność osi częstotliwości kontrolowanej względem referencyjnego, stabilizowanego lasera HeNe. Szczegóły konstrukcji zmodernizowanej wersji spektrometru zostały opublikowane w pracy [24].

W ramach współpracy z grupą prof. A. Sasso z *Universiteta di Napoli "Federico II"*, (Neapol, Włochy) zaplanowano badania wpływu zderzeń optycznych na kształty linii widmowych H<sub>2</sub>O oraz C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> w rejonie długości fali ok. 3 μm. W tym celu zbudowano absorpcyjny laserowy spektrometr DFG (*Difference Frequency Generation*) o wysokiej rozdzielczości spektralnej. Wąskie spektralnie promieniowanie w podczerwieni było uzyskiwane za pomocą nieliniowego efektu generacji różnicy częstotliwości fal dwóch laserów (Nd-YAG i przestrajalny laser diodowy) pracujących w zakresie bliskiej podczerwieni na kryształach PPLN (*periodically poled LiNbO<sub>3</sub>*). Układ dwóch komórek absorpcyjnych o stałym i zmiennym ciśnieniu gazu pozwalał na precyzyjne pomiary ciśnieniowego przesunięcia linii widmowych, a oś częstotliwości widma kalibrowana była względem stabilnego interferometru Fabry-Perota (IFP) oraz interferometru Michelsona wyznaczającego absolutną długość fali. Spektrometr został opisany w pracy [15].

W ramach stażu doktorskiego w grupie dr J. T. Hodgesa w National Institute of Standards and Technology – NIST (Gaithersburg, MD, USA) zająłem się wykorzystaniem spektroskopii strat we wnęce (*Cavity Ring-Down Spectroscopy* – CRDS) do precyzyjnych

ilościowych pomiarów widm molekularnych. Zbudowano spektrometr CRDS z aktywną stabilizacją częstotliwości modów wnęki optycznej do laserowego wzorca częstotliwości (*Frequency-Stabilized* CRDS – FS-CRDS). Jest to jedna z najbardziej precyzyjnych i dokładnych metod spektroskopowych charakteryzująca się również bardzo wysoką czułością. Badania dotyczące cząsteczek H<sub>2</sub>O, opisane w 6 publikacjach z listy JCR wybrałem jako wyodrębnione osiągnięcie naukowe do habilitacji, dlatego były opisane we wcześniejszym punkcie autoreferatu. Wykorzystując tę technikę wykonano szereg innych precyzyjnych badań widm molekularnych mających różnorodne zastosowania, które będą opisane w dalszej części referatu.

Idea metody FS-CRDS<sup>1,2</sup> polega na wykorzystaniu grzebienia modów TEM<sub>00</sub> wnęki optycznej do osiągnięcia bardzo wysokiej rozdzielczości spektralnej oraz doskonałej liniowości osi częstotliwości mierzonego widma. Aby wyeliminować dryf częstotliwości modów wnęki, spowodowany np. zmianą temperatury wnęki lub ciśnienia gazu wewnątrz, długość drogi optycznej pomiędzy zwierciadłami tworzącymi wnękę jest aktywnie stabilizowana do zewnętrznego stabilnego wzorca optycznego – w tym przypadku do stabilizowanego lasera HeNe. Rozwiązanie to pozwala jednocześnie przesuwając cały grzebień modów wnęki optycznej poprzez przestrajanie lasera wzorcowego co umożliwia zagęszczanie punktów pomiarowych widma w stosunku do wartości wyznaczonej przez przedział dyspersji wnęki. W praktyce zademonstrowano rozdzielczość rzędu 50 kHz [19]. Ponadto poprzez dopasowanie modowe profilu wiązki i dociążanie częstotliwości lasera wzbudzającego do modu TEM<sub>00</sub> wnęki uzyskuje się bardzo „czysty” jedno-eksponencjalny zanik światła na wyjściu z wnęki, co przekłada się na dokładność wyznaczanych współczynników absorpcji światła. W ramach współpracy z NIST zbudowano 4 spektrometry FS-CRDS (3 w NIST i jeden na UMK w Toruniu), w tym jeden mobilny, stosowane w zakresie długości fali od 0.69 μm do 1.65 μm zarówno do badań podstawowych dotyczących subtelnych efektów kształtu linii, czy testowania metod teoretycznych fizyki molekularnej jak i badań stosowanych, w szczególności metrologii i detekcji śladowych ilości gazów.

Opracowano precyzyjną metodę pomiaru ciśnieniowego przesunięcia słabych linii molekularnych. Metoda bazuje na spektroskopii FS-CRDS i nie wymaga wzorca częstotliwości optycznej bliskiej częstotliwości badanych linii widmowych, a jedynie korzysta ze stabilności modów wnęki optycznej i znajomości dyspersji modów wnęki w funkcji ciśnienia. Metodę opisano i zastosowano do widm O<sub>2</sub> w pracy [20].

Szczegółowy opis spektrometru zbudowanego na UMK w Toruniu, w wersji stosowanej do roku 2010 można znaleźć w pracy [27]. W 2010 r. dokonano znaczącej modyfikacji spektrometru FS-CRDS polegającej na dociążeniu lasera próbującego do modu wnęki rezonansowej szybką metodą Pounda-Drevera-Halla (PDH). Pozwoliło to zawęzić szerokość spektralną lasera próbującego do wartości poniżej szerokości modu TEM<sub>00</sub> wnęki (ok. 20 kHz). Spowodowało to ogromny wzrost szybkości rejestracji zaników światła, ze względu na eliminację przypadkowego

---

<sup>1</sup> J. T. Hodges, H. P. Layer, W. W. Miller, and G. E. Scace, *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 849 (2004)

<sup>2</sup> J. T. Hodges and R. Ciuryło, *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 023112 (2005)



charakteru dopasowania częstotliwości fali lasera do wąskiego modu wnęki, a tym samym wzrost szybkości pomiaru widma. Co więcej nowa metoda umożliwiła znaczący wzrost stosunku sygnału do szumu mierzonych widm ze względu na większą moc światła dopasowanego do modu wnęki oraz możliwość szybkiego uśredniania dużej liczby zaników. Praktyczne pomiary tą metodą wymagały rozwiązania problemu precyzyjnej korekcji sygnału błędu metody PDH ze względu na trudne do wyeliminowania sygnały stałe związane z niewielką modulacją amplitudy fali świetlnej przez modulator fazy oraz niedoskonałości elektroniki w pętli sprzężenia zwrotnego sterującego przestrajaniem prądu diody laserowej. Uzyskiwane widma  $O_2$  charakteryzują się stosunkiem sygnału do szumu rzędu 8000:1. Nowy układ opisano w pracach [31,34]. Ostatnio w wyniku uśredniania 3000 widm uzyskano doświadczalny kształt linii widmowej ze stosunkiem sygnału do szumu przekraczającym 200000:1, co jest najwyższą wartością osiągniętą w spektroskopii optycznej i otwiera nowe możliwości badawcze w metrologii. Wyniki te zostały wysłane do publikacji w Phys. Rev. A w 2011 r.

W 2011 r. spektrometr FS-CRDS został sprzężony z optycznym femtosekundowym grzebieniem częstotliwości w celu uzyskania dokładnego pomiaru absolutnej częstotliwości lasera próbkującego z sub-megahercową dokładnością w każdym punkcie mierzonego widma. Jest on jedynym na świecie tak precyzyjnym spektrometrem umożliwiającym pomiary częstotliwości przejść, natężenia i parametry kształtu linii bardzo słabych widm molekularnych. Uzyskiwane dane mogą stanowić referencje dla innych metod pomiarowych i obliczeniowych. Wyniki zostały wysłane do publikacji w J. Chem. Phys. W 2011 r.

W 2009 r. rozpoczęto w laboratorium KL-FAMO w Toruniu budowę optycznego zegara atomowego opartego na atomie Sr. W ramach projektu zaprojektowano i zbudowano przestrajalny układ laserowy o ultra wąskiej szerokości widmowej, poniżej 10 Hz, służący jako lokalny oscylator zegara opartego na przejściu optycznym Sr. Zbudowano dwa identyczne układy laserowe, co pozwoliło wyznaczyć ich szerokość spektralną. Każdy z nich składa się z lasera diodowego dowiązanego metodą PDH do ultrastabilnej wnęki optycznej o wysokim *finesse*, rzędu 70000, odizolowanej mechanicznie, akustycznie i termicznie od otoczenia. Ponadto zbudowano układ przestrajalny, w którym zastosowano dowiązanie fazowe dwóch laserów za pomocą sygnału dudnień optycznych. Otrzymano względną szerokość spektralną laserów rzędu 150 mHz przy odstrojeniu względnym laserów o kilkanaście GHz. Układ laserowy sprzężony ze strontową pułapką atomową i optycznym grzebieniem częstotliwości stanowić będzie tzw. zegar optyczny. Wyniki badań są przygotowywane do publikacji.

### **Analiza danych doświadczalnych**

Precyzyjna analiza danych spektroskopowych o wysokiej rozdzielczości i wysokim stosunku sygnału do szumu wymaga rozważenia wielu efektów fizycznych, które w różnym stopniu wpływają na obserwowany profil linii widmowej. W celu analizy danych uzyskiwanych za pomocą wyżej opisanych spektrometrów, jak również innych urządzeń, w których budowie nie

uczestniczyłem, napisałem oprogramowanie do dopasowywania teoretycznych modeli kształtów linii widmowych do danych doświadczalnych. Oprogramowanie to jest systematycznie rozwijane od rozpoczęcia mojej pracy nad pracą magisterską aż do chwili obecnej. Umożliwia ono uwzględnienie w analizie kształtu linii wielu efektów fizycznych. Rozszerzenie dopplerowskie linii oraz rozszerzenie i przesunięcie ciśnieniowe linii opisuje dobrze znany profil Voigta. Zakłada on statystyczną niezależność między dopplerowskim i ciśnieniowym rozszerzeniem linii. Uwzględnienie zależności ciśnieniowego rozszerzenia i przesunięcia linii od prędkości absorbera (lub emitera) prowadzi do tzw. zależnego od prędkości profilu Voigta (*Speed-Dependent Voigt Profile*)<sup>3</sup>. Kolejny efekt fizyczny jaki należało wziąć pod uwagę w analizie wielu badanych widm to zderzenia cząsteczkowe zmieniające prędkość prowadzące do tzw. zwężenia Dickego. Analizowane było ono zarówno w tzw. przybliżeniu miękkich jak i twardych zderzeń, prowadzących odpowiednio do profilu Galatryego<sup>4</sup> i profilu Nelkina-Ghataka<sup>5</sup>, zwanym również w literaturze profilem Rautiana. Ponadto zaimplementowano bardziej realistyczne przybliżenie tzw. zderzeń kul bilardowych prowadzące do profilu *Billiard-Ball*<sup>6</sup>. Dodatkowym efektem wpływającym na kształt analizowanych linii widmowych są korelacje między zderzeniami zmieniającymi stan i zderzeniami zmieniającymi prędkość cząsteczek. Może on prowadzić do asymetrii linii jak również do trudności w zanalizowaniu zderzeniowego zwężenia linii. Efekty te można uwzględnić w analizie używając tzw. skorelowanych profili, np. skorelowany profil Galatryego (*Correlated Galatry Profile*) lub skorelowany profil Nelkina-Ghataka (*Correlated Nelkin Ghatak Profile*). Innymi czynnikami mogącymi powodować asymetrię linii widmowej jest skończony czas trwania zderzenia absorber – zaburzacz, tzw. asymetria zderzeniowa oraz efekt mieszania linii (*line mixing*). Tzw. asymetryczne modele kształtu linii pozwalają uwzględnić tego typu efekty<sup>7</sup>.

W trakcie analiz linii widmowych o wysokim stosunku sygnału do szumu często zachodzi konieczność uwzględnienia w analizie danych wielu z powyższych efektów fizycznych jednocześnie. Parametry je opisujące często są ze sobą silnie skorelowane. Zaprogramowano i zastosowano w kilku pracach [27,32,33] analizę danych polegającą na jednoczesnym dopasowywaniu modelowego profilu linii widmowych do widm otrzymanych dla różnych ciśnień gazu zaburzającego (tzw. *multi-spectrum fit*). Metoda ta pozwala poradzić sobie z problemem numerycznej korelacji między parametrami dopasowywanego profilu linii. Np. parametr zwężenia Dickego oraz parametr opisujący zależność ciśnieniowego rozszerzenia linii od prędkości cząsteczek w modelu zależnego od prędkości profilu Nelkina-Ghataka (*Speed-Dependent Nelkin*

---

<sup>3</sup> P. R. Berman, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **12**, 1331 (1972)

<sup>4</sup> L. Galatry, Phys. Rev. **122**, 1218 (1961)

<sup>5</sup> M. Nelkin, A. Ghatak, Phys. Rev. **135**, A4 (1964)

<sup>6</sup> R. Blackmore, J. Chem. Phys. **87**, 791 (1987)

<sup>7</sup> R. Ciuryło, J. Szudy, R. S. Trawiński, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **57**, 551 (1997).

*Ghatak Profile*<sup>8</sup>), mimo że opisują różne efekty fizyczne to jednak mają podobny wpływ na obserwowany kształt linii widmowej w danym ciśnieniu. Jednak ciśnieniowe zależności tych parametrów są zupełnie różne. Metoda *multi-spectrum fit* pozwala uchwycić te różnice w trakcie analizy danych i uzyskać dane na temat udziału każdego z efektów w obserwowanym zwięźeniu linii widmowej.

Metody analizy danych mają kluczowe znaczenie dla eliminacji błędów systematycznych podczas wyznaczania danych spektroskopowych otrzymywanych z dużą precyzją, w tym stałych fizycznych. W pracy [28] zanalizowano problem wpływu efektów kształtu linii widmowej na błąd systematyczny w optycznej metodzie pomiaru stałej Boltzmanna z szerokości dopplerowskiej linii widmowej. Ze względu na wymaganą precyzję takiej analizy przystosowano numeryczne metody obliczeniowe zaawansowanych profili linii widmowych do osiągania dokładności względnej rzędu  $10^{-10}$ . Na przykładzie linii cząsteczkowego tlenu o długości fali 687 nm zanalizowano wpływ efektów zależnych od prędkości cząsteczek oraz zderzeniowego zwięźenia linii na szerokość dopplerowską wyznaczoną z dopasowania modelowego profilu linii.

### **Atomowe i cząsteczkowe kształty linii widmowych**

W okresie przygotowywania pracy magisterskiej zająłem się badaniami doświadczalnymi dotyczącymi wpływu zależności ciśnieniowego rozszerzenia i przesunięcia linii widmowych od prędkości cząsteczek na obserwowany profil linii widmowych na przykładzie linii argonu i neonu w warunkach wyładowania jarzeniowego w gazie. Badany był również udział procesów wzbudzenia atomów, w szczególności dysocjacji rekombinacyjnej w tworzeniu się profilu emisyjnego badanych linii widmowych. Wykazano, że w niskim ciśnieniu gazu dysocjacja rekombinacyjna prowadząca do nie termicznego rozkładu prędkości atomów jest głównym czynnikiem powodującym odstępstwa obserwowanego kształtu linii od profilu Voigta. W badaniach korzystano z ciśnieniowo przestrajanego interferometru Fabry-Perota. Wyniki tych badań zostały opublikowane w dwóch artykułach [1,2]. Kontynuując również po doktoracie badania podstawowe na temat wpływu efektów optyczno-zderzeniowych na profile emisyjne atomowych linii widmowych wykonano pomiary linii neonu 748.8 nm w lampie z wyładowaniem jarzeniowym. Szczególną uwagę zwrócono na zależności temperaturowe (zakres temperatur ok. 150 K – 650 K) efektów ciśnieniowego rozszerzenia i przesunięcia linii, a także asymetrii zderzeniowej i dysocjacji rekombinacyjnej. Wyniki opublikowano w pracach [26,29,30].

Głównym tematem badań w okresie studiów doktoranckich, kontynuowanych też po doktoracie, była wysokorozdzielcza spektroskopia atomów kadmu metodą laserowo indukowanej fluorescencji (LIF). Badania doświadczalne obejmowały pomiary wpływu efektów zderzeniowych na profile linii widmowych. Zanalizowano wpływ takich efektów jak zwięźenie Dickego, zależność parametrów kształtu linii od prędkości emitera (*speed-dependent effects*) oraz zaobserwowano

---

<sup>8</sup> B. Lance, G. Blanquet, J. Walrand, and J.-P. Bouanich, J. Molec. Spectrosc. **185**, 262 (1997)

subtelny efekt asymetrii zderzeniowej (*collision-time asymmetry*) linii. Wykonano systematyczne pomiary zależności kształtów linii interkombinacyjnej  $^3P_1 - ^1S_0$  izotopu  $^{114}\text{Cd}$  od ciśnienia dla gazów zaburzających, atomowych Xe, Kr, Ar, Ne, He [4-7,10] oraz molekularnych  $\text{H}_2$ ,  $\text{D}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  [3,9]. Uzyskane wyniki doświadczalne dotyczące ciśnieniowego rozszerzenia, przesunięcia i asymetrii zderzeniowej linii porównywano z wynikami obliczeń półklasycznych zakładających analityczne jak i liczone numerycznie potencjały oddziaływań emiter – zaburzacz. Zademonstrowano między innymi, że w przypadku układu Cd – Xe tylko jednoczesne uwzględnienie efektów zależnych od prędkości oraz asymetrii zderzeniowej pozwala na poprawną interpretację danych doświadczalnych [4]. Ponadto dla układu Cd – Xe zanalizowano możliwość obserwacji efektu zwężenia Dickego linii atomowej w optycznym zakresie widma [11]. Analiza danych z wykorzystaniem bardziej zaawansowanego teoretycznego profilu linii widmowej, uwzględniającego jednoczesne występowanie efektów zależnych od prędkości, asymetrii zderzeniowej linii oraz zderzeń zmieniających prędkość atomów, wykazała brak zwężenia Dickego. Wynik ten wyjaśniono występowaniem korelacji między zderzeniami zmieniającymi fazę i prędkość atomów. Wykonano również obliczenia w ramach nieadiabaticznej teorii zderzeniowej parametrów ciśnieniowego rozszerzenia, przesunięcia i asymetrii zderzeniowej linii  $^{114}\text{Cd}$  zaburzonej przez wszystkie gazy szlachetne i porównano je z otrzymanymi wynikami doświadczalnymi. Wyniki opublikowano w artykule [12].

W kolejnej serii eksperymentów [14,29] zbadano kształt układu dwóch składowych nadsubtelnych linii interkombinacyjnej parzysto-nieparzystego izotopu  $^{113}\text{Cd}$ , zaburzonej przez argon. Głównym celem badań było poszukiwanie efektu mieszania linii (*line mixing*) w układzie atomowym. Zaobserwowano asymetrię obydwu składowych linii nie dającą się wytłumaczyć samą asymetrią zderzeniową. Dalsze precyzyjne badania doprowadziły do dokładniejszego wyznaczenia struktury izotopowej i nadsubtelnej tej linii. Wykazały też, że obserwowaną asymetrię linii można wytłumaczyć jednoczesnym występowaniem zależności ciśnieniowego przesunięcia linii od prędkości emitera i asymetrii zderzeniowej.

Kolejnym zagadnieniem w którego badaniach uczestniczyłem było badanie wysoko wzbudzonych stanów atomów Ca z wykorzystaniem trójfotonowej jonizacji. W ramach pracy przedyskutowano dynamikę wzbudzenia wielofotonowego oraz wyznaczono parametry linii autojonizacyjnych, opisanych profilem Fano. Wyznaczono czasy życia stanów autojonizacyjnych Ca. Wyniki opublikowano w pracy [13].

W ramach współpracy z grupą prof. A. Sasso z *Universiteta di Napoli "Federico II"*, (Neapol, Włochy) przeprowadzono badania wpływu zderzeń optycznych na kształty linii widmowych  $\text{H}_2\text{O}$  oraz  $\text{C}_2\text{H}_2$  dla długości fali ok. 3  $\mu\text{m}$  rozszerzonych przez Xe. Wybór ciężkiego gazu zaburzającego pozwolił na badanie silnych efektów zależnych od prędkości cząsteczek (*speed-dependent effects*). Zbudowano laserowy spektrometr DFG (*Difference Frequency Generation*). Z analizy kształtów linii widmowych uzyskano informacje na temat zderzeniowego rozszerzenia i przesunięcia linii oraz ich zależności od prędkości cząsteczek, a także zwężenia Dickego i korelacji między zderzeniami zmieniającymi fazę i prędkość cząsteczek. Zbadano wpływ wyboru

modelowego profilu linii widmowej na systematyczne błędy wyznaczanych parametrów kształtu badanych linii. Wyniki opublikowano w pracach [15,16].

Korzystając z aparatury i metod analizy danych opracowanych podczas badań widm H<sub>2</sub>O metodą FS-CRDS, w ramach współpracy z NIST, California Institute of Technology i Jet Propulsion Laboratory – JPL (Pasadena, CA, USA), zmierzono względne pozycje linii tlenu <sup>16</sup>O<sub>2</sub> z pasma A z dokładnością do 70 kHz. Uzyskano pięciokrotnie większą dokładność pomiarów współczynników ciśnieniowego przesunięcia w stosunku do wcześniej dostępnych danych. Stosując wyżej wspomniany układ pomiarowy wykonano systematyczne badania linii widmowych O<sub>2</sub> z pasma A oraz linii CO<sub>2</sub> w rejonie bliskiej podczerwieni. Wyznaczono parametry kształtu i natężenia tych linii widmowych. Znacznie poprawiono dokładność parametrów dostępnych w bazie danych HITRAN. Badania motywowane były m.in. wysokimi wymaganiami dotyczącymi precyzji i dokładności parametrów linii tlenu w satelitarnych pomiarach składu atmosfery ziemskiej, w szczególności projektem NASA *Orbiting Carbon Observatory* – OCO. Wyniki badań opublikowano w pracach [20,21,32].

W roku 2009 rozpocząłem badania widm molekularnych metodą FS-CRDS na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. Wykonane zostały badania słabych widm tlenu z pasma tlenu cząsteczkowego  $b^1\Sigma_g^+ (v=1) \leftarrow X^3\Sigma_g^- (v=0)$ , tzw. pasmo B (długość fali ok. 687 nm). Uzyskano bardzo wysoki stosunek sygnału do szumu mierzonych widm, rzędu kilku tysięcy, co pozwoliło wyznaczyć natężenia i parametry kształtu linii widmowych O<sub>2</sub> z dokładnością przewyższającą nawet o dwa rzędy dostępne dotychczas dane. Stosując wspomnianą wcześniej metodę *multi-spectrum fit* zinterpretowano obserwowane efekty zwężenia linii widmowych wyjaśniając je jednoczesnym występowaniem silnych efektów zależnych od prędkości oraz zwężeniem Dickego. Korzystając z modelu zależnego od prędkości profilu Nelkina-Ghataka wyznaczono wpływ obydwu efektów zwężenia linii na obserwowany kształt linii widmowych O<sub>2</sub>. Ponadto zaobserwowano systematyczną różnicę między zmierzonymi natężeniami linii widmowych z pasma B tlenu w stosunku do danych z bazy HITRAN, wynikającymi prawdopodobnie z błędów systematycznych danych w tej bazie. Wyniki opublikowano w pracach [27,33].

Korzystając z techniki FS-CRDS zmierzono ciśnienie pary nasyconej H<sub>2</sub>O w szerokim zakresie temperatur, od -70 do 0 °C. Do generacji strumienia pary nasyconej wykorzystano bardzo precyzyjny saturator służący do kalibracji higrometrów w NIST (*NIST Primary Standard Humidity Generator*). Metoda nie wymaga znajomości natężeń używanych linii widmowych, a wyniki doświadczalne ciśnienia pary nasyconej H<sub>2</sub>O dowiązane są do bardzo dobrze znanej wartości w temperaturze punktu potrójnego wody. Uzyskano pierwsze dane doświadczalne o dokładności względnej ok. 0.5%, umożliwiającej weryfikację najdokładniejszych wyników obliczeń termodynamicznych używanych np. w badaniach atmosfery ziemskiej. Wyniki opublikowano w pracy [35] (przyjętej do druku).

## Kierowanie i udział w projektach badawczych

- Grant KBN: "Wpływ efektów optyczno-zderzeniowych na kształt linii widmowych" nr: 1 P03B 065 29 (Umowa Nr 0382/P03/2005/29), realizacja w Instytucie Fizyki UMK, Toruń, wykonawca,
- Grant UMK: „Analiza kształtów linii widmowych cząsteczki  $C_2H_2$  zaburzonej przez ksenon”, kierownik projektu,
- Dotacja na inwestycję aparaturową „Zakup elementów do budowy spektrometru CRDS (cavity ring-down spectroscopy) w Instytucie Fizyki UMK w Toruniu.” (decyzja Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego Nr 104/03/E-337/S/2006-4), realizacja Instytucie Fizyki UMK w Toruniu, członek zespołu wnioskującego
- Grant UMK: „Efekty nasyceniowe w precyzyjnej spektroskopii strat we wnęce optycznej”, kierownik projektu,
- Grant MNiSW „Ultraprecyzyjne pomiary metodami optyki i fizyki atomowej” nr: N N202 1489 33 (Umowa Nr 1489/B/H03/2007/33), realizacja w laboratorium KL FAMO w UMK w Toruniu, wykonawca,
- Grant UMK: „Budowa układu aktywnej stabilizacji i przestrajania wnęki optycznej”, kierownik projektu
- Grant MNiSW „Ultradługa spektroskopia cząsteczek tlenu metodą CRDS (cavity ring-down spectroscopy)”, nr: 1255/B/H03/2008/35 N N202 125535, realizacja Instytucie Fizyki UMK w Toruniu, główny wykonawca,
- Grant UMK: „Precyzyjna spektroskopia widm  $H_2O$  w rejonie 1.39  $\mu m$  metodą CRDS”, kierownik projektu,
- Grant NCN: „Spektroskopia strat we wnęce ze stabilizacją częstotliwości (FS-CRDS) nowym narzędziem w ultra precyzyjnych badaniach układów gazowych” nr: UMO-2011/01/B/ST2/00491, realizacja Instytucie Fizyki UMK w Toruniu, kierownik projektu.

## Konferencje i referaty

Organizacja konferencji:

- XXXVI Zjazd Fizyków Polskich, Toruń 2001, sekretarz komitetu organizacyjnego
- II Warsztaty Naukowe Krajowego Laboratorium FAMO, Toruń 2006, członek komitetu organizacyjnego

Udział w konferencjach

- 15th International Conference on Spectral Line Shapes, Berlin, Germany 2000, plakat – *Pressure broadening and shift of the 326.1 nm Cd line perturbed by  $H_2$  and  $D_2$*
- 35th European Group on Atomic Systems Conference, Brussels, Belgium 2003 – plakat *Reduction of Dicke narrowing of cadmium line perturbed by Xe*

- High Resolution Molecular Spectroscopy 19th Colloquium, Salamanca, Spain 2005 – plakat *Cavity Ring-Down Lineshape Study of Water Lines Near 936 nm*
- 38th European Group on Atomic Systems Conference, Ischia, Italy 2006 – plakat *Precise line intensity and line shape measurements using single-mode frequency-stabilized cavity ring-down spectroscopy*
- International School of Physics „Enrico Fermi”, Course CVXVIII „Atom Optics and Space Physics”, Varenna, Włochy 2007
- Dzień Informacyjny Programu IDEAS 7-go Programu Ramowego UE, Warszawa 2007
- 21st Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Castellamare di Stabia, Italy 2009 - plakat *Frequency-stabilized cavity ring-down spectroscopy of water transitions near 1.39  $\mu\text{m}$*
- Cavity enhanced spectroscopy - Recent developments and new challenges, Leiden, Holandia 2009 – referat *Cavity ring down measurements of the line parameters of water rotation-vibration transitions*
- 41st European Group on Atomic Systems Conference, Gdańsk 2009 – plakat *Cavity ring-down measurements of the line parameters of water rotation-vibration transitions near 1.39  $\mu\text{m}$*
- 20th International Conference on Spectral Line Shapes, St. John's, Kanada 2010 – referat *CRDS investigation of line shapes and intensities of the oxygen B-band transitions at low pressures*
- Warsztaty NLTK: Nowoczesne Techniki Spektroskopowe i Optyczne, Toruń 2010 – referat zaproszony *Zastosowanie spektroskopii "cavity ring-down" w metrologii  $\text{H}_2\text{O}$*
- 22nd Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Dijon, France 2011 – plakat *Measurement of the saturation vapor pressure of ice using cavity ring-down spectroscopy*
- Polska Konferencja Optyczna, Międzyzdroje 2011
- International Symposium - Quantum Metrology with Photons and Atoms, Toruń 2011 – plakat *High signal-to-noise ratio line-shape measurements by PDH-locked FS-CRDS technique*

Referaty w innych ośrodkach:

- Zakład Optyki, Instytut Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Warszawski, Warszawa 7.12.2006 – referat *Spektroskopia strat we wnętrzu ze stabilizacją częstotliwości*
- Zakład Fotoniki, Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński, Kraków 15.6.2011 – referat *Stabilizacja częstotliwości laserów diodowych*

  
Daniel Lisak