
Krajowe laboratorium FAMO (KL FAMO)

Powstanie i działalność

Tomasz Dohnalik*

Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego

Józef Szudy**

Instytut Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika

Abstrakt. W artykule opisano okoliczności powstania koncepcji i utworzenia w Polsce Krajowego Laboratorium FAMO, zajmującego się badaniami w dziedzinach fizyki atomowej, molekularnej i optycznej, oraz rozwoju tej instytucji w okresie pierwszych dwóch dekad XXI wieku.

Słowa kluczowe: historia fizyki, fizyka atomowa, fizyka molekularna, fizyka optyczna, Krajowe Laboratorium FAMO, KL FAMO

Abstract. In the article the circumstances under which an idea of creation of the national laboratory in Poland dealing with researches in the fields of atomic, molecular and optical physics (FAMO in Polish) as well as its development during the first two decades of the 21st century are described.

Keywords: history of physics, atomic physics, molecular physics, optical physics, National Laboratory FAMO

1. Sekcja FAMO

Fizyka atomowa, molekularna i optyczna (FAMO) to trzy dominujące dziedziny badań fizyków polskich w okresie międzywojennym. Choć po II wojnie światowej, w związku z burzliwym rozwojem fizyki jądrowej, cząstek elementarnych i ciała stałego, utraciły swój dominujący charakter, to jednak stanowiły nadal podstawowe pole działalności znacznej części środowiska fizyków we wszystkich polskich ośrodkach. Szczególnie silny wzrost zainteresowania dziedzinami FAMO nastąpił po odkryciu laserów, które zapoczątkowało erę renesansu optyki skutkującą gwałtownym rozwojem badań naukowych w tych dziedzinach, a także ogromnym skokiem technologicznym. Rozwój badań doświadczalnych w dziedzinach FAMO w Polsce był utrudniony z powodu nieustannie trudnej sytuacji ekonomicznej kraju zarówno w końcowych latach PRL, jak i w pierwszej dekadzie III Rzeczypospolitej. Wprawdzie grono wybitnych polskich badaczy przyczyniało się do utrzymania wysokiej rangi Polski w środowisku międzynarodowym w dziedzinach FAMO, szczególnie w zakresie badań teoretycznych, to jednak istotny polski wkład do zaawansowanych prac eksperymentalnych był możliwy jedynie dzięki wyjazdom do zachodnich laboratoriów.

W latach 70. i w pierwszej połowie 80. XX w., ośrodki toruński (Stanisław Łęgowski) i gdański (Józef Heldt, Jan Fiutak) organizowały corocznie Szkoły Optyki Kwantowej. Cieszyły się one dużym powodzeniem i mocno wpłynęły na integrację środowiska. W tym czasie (i później też) fizyka FAMO rozwijała się wspaniale. Dużą część Nagród Nobla otrzymali fizycy pracujący w tych dziedzinach: Kastler (1966), Gabor (1971), Bloembergen-Schawlow (1981), Dehmelt, Paul, Ramsey (1989), Cohen-Tannoudji, Chu, Phillips (1997), Cornell, Wieman, Ketterle (2001), Glauber, Hall, Hansch (2005), Haroche, Wineland (2012), Strickland, Mourou, Ashkin (2018), Alain Aspect, John F. Clauser i Anton Zeilinger (2022). Brak istotnego udziału doświadczalnego w tak ważnej i perspektywicznej dziedzinie był bardzo bolesny dla naszego środowiska. Tym bardziej, że rzeczywiste koszty badań w fizyce FAMO były niewielkie w porównaniu do „drogich” dziedzin, wymagających ogromnych urządzeń.

Pod koniec roku 1996 na posiedzeniu Komitetu Fizyki PAN spotykają się wybrani przez swoje Rady Wydziałów: Krzysztof Ernst (UW) i Tomasz Dohnalik (UJ) oraz będący członkiem Komitetu Józef Szudy (UMK). Po krótkiej dyskusji postanawiamy założyć Sekcję Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej w ramach Komitetu Fizyki. Przewodniczący Komitetu Jan Stankowski popiera wniosek i 01.03.1997 na Wydziale Fizyki UW

*ORCID 0000-0002-9777-092X

**ORCID 0000-0001-7048-5435

organizujemy zebranie założycielskie Sekcji FAMO Komitetu Fizyki PAN. Reakcja środowiska jest bardzo pozytywna. W zebraniu założycielskim wzięło udział 25 osób, pracujących w Warszawie, Krakowie, Poznaniu, Gdańsku, Opolu, Bydgoszczy i Toruniu; wybrano Tomasza Dohnalika na przewodniczącego Sekcji FAMO, zobowiązując go jednocześnie do opracowania programu i form działalności oraz wewnętrznej struktury Sekcji. Po ożywionej dyskusji ustalono, że pierwszym podstawowym celem działalności Sekcji powinno być dążenie do integracji środowiska, czemu służyć będą coroczne spotkania FAMO [1].

Pierwsze odbywa się w Jaszowcu, przy okazji międzynarodowej konferencji optyki kwantowej Quantum Optics IV (17-24.06.1997), gdzie w dniach 25-26.06 organizujemy tzw. CKR (co, kto, robi) i sesję plakatową.

Sukces tego spotkania stymuluje organizację Spotkania Młodych Badaczy FAMO z okazji setnej rocznicy urodzin Aleksandra Jabłońskiego, które odbywa się w IF UMK w Toruniu (26.02.1998). Po wykładzie Wojciecha Gawlika o Noblu 1997 z fizyki ma miejsce sesja plakatowa (70 plakatów, 130 uczestników). Streszczenia wszystkich prac plakatowych zostały opublikowane w książce *Spotkania FAMO* [2]. Przez dwa kolejne dni odbywa się w Toruniu ogólnopolska konferencja Fizyka Polska u Progu Trzeciego Tysiąclecia. Wykład *Kondensaty Bosego–Einsteina* wygłasza Jan Mostowski (IF PAN), a w dyskusji Okrągłego Stołu występują Tomasz Dohnalik, Wojciech Gawlik, Stanisław Chwirot. [3] W roku 1998 spotykamy się ponownie w Toruniu przy okazji odbywającej się w dniach 23-27.07.1998 The Jabłoński Centennial Conference on Luminescence and Photophysics.

Rok później, znów w Toruniu¹, podczas 6. International Workshop on Atomic Interactions in Laser Fields odbywa się najważniejsze zebranie Sekcji FAMO Komitetu Fizyki PAN. Wydaje się, że dojrzeliliśmy do jeszcze bardziej zintegrowanej formy działania. Tomasz Dohnalik występuje z propozycją utworzenia ogólnopolskiego laboratorium, w którym skoncentrowana byłaby część środków przeznaczanych dotychczas na unowocześnianie aparatury rozproszonej w różnych uczelniach i instytutach. Chodziło o utworzenie w Polsce „centrum doskonałości” w słabo do tej pory wspieranych finansowo dziedzinach fizyki, które w skali światowej odgrywały fundamentalną rolę w rozwoju takich gałęzi nauki i techniki, jak optyka kwantowa, fotonika, informatyka i kryptografia kwantowa, fizyka zimnej materii. Zebrani są za



Ryc. 1. Zebranie Sekcji FAMO Komitetu Fizyki PAN C od którego rozpoczyna się historia Krajowego Laboratorium FAMO; zebranie prowadzi Tomasz Dohnalik; po prawej: Józef Szudy, Andrzej Kowalski, Stanisław Chwirot, Jan Mostowski, Włodzimierz Jaskólski, Katarzyna Chałasińska-Macukow; po przeciwnej stronie wśród widocznych od tyłu rozpoznano: pierwszy od lewej – Józef Kusz, trzeci od lewej – Jacek Karwowski [03.09.1999] (z archiwum KL FAMO)



Ryc. 2. Zebranie Sekcji FAMO Komitetu Fizyki PAN; rząd pod ścianą, od lewej: Czesław Szmytkowski, NN, Józef Musielok, Maria Kraińska-Miszczak, Bolesław Grabowski, Tadeusz Stacewicz, Mariusz Zubek, Jan Wasilewski; dalej zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara: Eugeniusz Czuchaj, Janusz Czub, NN, Włodzisław Duch, Józef Heldt, Aleksander Balter, Roman S. Dygdała, Jan Fiutak, NN [03.09.1999] (z archiwum KL FAMO)

i rozpoczynamy poważną dyskusję na temat koncepcji Krajowego Laboratorium FAMO. Dodatkowo mobilizuje nas realizacja kondensatu Bosego–Einsteina (1995) wzbudzająca ogromne zainteresowanie fizyków.

2. Grupa Inicjatywna KL FAMO

Począwszy od wielu spotkań w czasie XXXV Zjazdu Fizyków Polskich w Białymstoku przez kilka miesięcy dyskutujemy mailowo propozycje kształtu Laboratorium i form jego działalności. Wylania się grupa inicjatywna, początkowo 11 osobowa, powiększona później do 14 osób, tak by wszystkie ośrodki były odpowiednio reprezentowane. Byli to: Krzysztof Ernst i Czesław Radzewicz z Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego, Krzysztof Wódkiewicz z Instytutu Fizyki Teoretycznej UW, Maciej Kolwas i Jan Mostowski z Instytutu Fizyki PAN, Kazimierz Rzążewski z Centrum Fizyki Teoretycznej PAN, Ryszard Tanaś z Instytutu Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Ewa Stachowska z Wydziału Fizyki Technicznej Politechniki

1. Większość spotkań FAMO odbywa się w IF UMK w Toruniu. Są nie tylko świetnie zorganizowane przez naszych toruńskich kolegów, ale też charakteryzują się wspaniałą, integrującą, niepowtarzalną atmosferą. Niewątpliwie przyczyni się to później do wyboru lokalizacji Laboratorium.

Poznańskiej, Józef Musielok z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Opolskiego, Tomasz Dohnalik i Wojciech Gawlik z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, Marek Żukowski (zob. s. 47) z Instytutu Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki Uniwersytetu Gdańskiego oraz Stanisław Chwirot i Józef Szudy z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu.² Przewodniczącym Grupy Inicjatywnej został Tomasz Dohnalik.

14.01.2000 podczas spotkania Grupy Inicjatywnej w CFT PAN przedstawiamy tematy badawcze możliwe do realizacji. 16.02.2000 na spotkaniu w IF UJ w Krakowie uzgadniamy tematykę, która zostanie zgłoszona we wniosku o finansowanie. O lokalizacji Laboratorium zdecydowało tajne, mailowe głosowanie, w którym wygrała koncepcja usytuowania Laboratorium w Toruniu, na najniższej kondygnacji gmachu Instytutu Fizyki UMK przy ul. Grudziądzkiej 5. Tak się szczęśliwie złożyło, że wszystkie pomieszczenia na tej kondygnacji (poprzednio zajmowane przez warsztaty mechaniczne) były nieużywane, gdyż warsztaty zostały przeniesione do nowo wybudowanego pawilonu.

Na początku 2000 roku Grupa Inicjatywna postanowiła wystąpić do Komitetu Badań Naukowych z wnioskiem o grant inwestycyjny na zakup podstawowego wyposażenia dla KL FAMO, a na spotkaniu Grupy w Toruniu 10.06.2000 ostatecznie zatwierdzona została nazwa **Krajowe Laboratorium FAMO** w Toruniu. Zredagowano list intencyjny, który rozesłano do rad wydziałów fizyki szkół wyższych i rad naukowych instytutów badawczych zajmujących się tą tematyką, zwracając się z prośbą o poparcie projektu utworzenia KL FAMO jako ogólnopolskiej, międzyuczelnianej jednostki badawczej, zlokalizowanej w gmachu Instytutu Fizyki UMK w Toruniu, wraz z zaproszeniem do uczestnictwa w jego pracach. List uzyskał poparcie wszystkich Rad Wydziałów oraz Rady Naukowej IF PAN. Przygotowano więc wniosek do KBN o grant inwestycyjny na stworzenie KL FAMO.

3. Tymczasowa Rada Naukowa KL FAMO

Trzy miesiące później (22.09.2000), w ostatnim dniu zorganizowanej w Juracie przez Instytut Fizyki PAN konferencji Joint Polish-German Conference on Modern Optics 2000: Fundamental aspects of spectroscopy and environmental applications odbyło się kolejne spotkanie FAMO, w czasie którego podjęto decyzję o przekształceniu Grupy Inicjatywnej w Tymczasową Radę Naukową KL FAMO. Na przewodniczącego Tymczasowej Rady wybrano Wojciecha Gawlika, wiceprzewodniczącym zaś został Kazimierz Rzążewski. Obowiązki tymczasowego

dyrektora planowanego laboratorium powierzono Stanisławowi Chwirotowi, który – nie czekając na formalną decyzję o utworzeniu KL FAMO przy wsparciu Rady Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK, zwrócił się do rektora UMK Jana Kopcewicza z wnioskiem o sfinansowanie podstawowych prac remontowych w pomieszczeniach (o pow. ok. 300 m²) przeznaczonych dla Laboratorium. Przyznana kwota (ok. 280 tys. zł) umożliwiła zakończenie w grudniu 2000 pierwszego etapu remontu. W styczniu 2001 tymczasowy dyrektor KL FAMO i dyrektor IF UMK wspólnie wystąpili do Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej o dofinansowanie drugiego etapu remontu adaptacyjnego pomieszczeń przewidzianych dla planowanego laboratorium. Fundacja pozytywnie rozpatrzyła ten wniosek i przyznała dwie dotacje (łącznie ok. 200 tys. zł) w ramach programu MILAB.

Równolegle toczyły się rozmowy w KBN i Ministerstwie, gdzie pomysł utworzenia KL napotykał na wiele, czasem czysto formalnych trudności. Ogromnego i bardzo skutecznego poparcia udzielił prof. Łukasz Turski, członek KBN, gorący zwolennik utworzenia Laboratorium. 25.10.2000 jednomyślne poparcie w tajnym głosowaniu otrzymujemy od Komitetu Fizyki PAN. Podkreślamy tu fakt jednomyślności, bo przydzielenie pieniędzy na Laboratorium, zmniejszyło oczywiście kwotę do dyspozycji badaczy w innych dziedzinach fizyki. Mimo tego wszyscy są za. Takie wtedy były czasy!

Starania w KBN o zakup podstawowej aparatury w ramach dotacji inwestycyjnej kończą się sukcesem. 26.03.2001 zapadła decyzja o przeznaczeniu na ten cel środków w wysokości 6 milionów złotych. Dało to podstawę do wszczęcia procedury zamówień publicznych na zakup sprzętu. Jednocześnie Tymczasowa Rada Naukowa zwróciła się do Senatu UMK z prośbą o powołanie, w strukturze Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Krajowego Laboratorium FAMO jako jednostki ogólnopolskiej bez osobowości prawnej, formalnie podległej Rektorowi UMK. Takie rozwiązanie prawne zostało zaakceptowane podczas wcześniejszych pertraktacji z KBN.

4. Formalne utworzenie KL FAMO

24.04.2001 Senat UMK pozytywnie odniósł się do tej inicjatywy i podjął uchwałę nr 20, w której w §4 ust. 3 stwierdzono, że *w Instytucji Fizyki UMK tworzy się Krajowe Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej (FAMO)* [4]. Na podstawie tej uchwały rektor Kopcewicz powołał na pierwszą trzyletnią kadencję (do 30.04.2004) Radę Naukową KL FAMO w identycznym składzie osobowym jak Rada Tymczasowa, przy czym przewodniczącym Rady Naukowej został Wojciech Gawlik, jego zastępcą zaś Kazimierz Rzążewski. Pierwsze posiedzenie Rady odbyło się w Warszawie

2. Zwraca uwagę duży udział (5 na 14) fizyków teoretyków. Nie będąc zainteresowanymi konkretną aparaturą, zapewniali obiektywizm, bezstronność i wysoki poziom naukowy planowanych badań.

w siedzibie Zakładu Optyki UW 28.04.2001, na którym pozytywnie zaopiniowano wniosek przewodniczącego, aby na stanowisko dyrektora KL FAMO na trzyletnią kadencję 01.05.2001-30.04.2004 powołać Stanisława Chwirotą, wobec czego, na mocy zarządzenia Rektora UMK, został on pierwszym dyrektorem Laboratorium.

Na początku swej działalności Rada opracowała projekt *Nowoczesne metody fizyki zimnej materii i inżynierii kwantowej* i zgłosiła go do konkursu KBN na zamawiany projekt badawczy. Projekt został podzielony na trzy niezależne zadania, których realizację planowano w trzech pracowniach, wchodzących w skład struktury KL FAMO. Były to:

Zadanie 1: Inżynieria stanów kwantowych – sterowanie kwantowe i generacja stanów splątanych fotonów i atomów pod kierunkiem Czesława Radzewicza z IFD UW w ramach Pracowni Inżynierii Kwantowej.

Zadanie 2: Optyczne badania atomów i molekuł w zakresie nK - mK : stworzenie warunków do wytwarzania i badania kondensatów Bosego–Einsteina pod kierunkiem Wojciecha Gawlika z IF UJ w ramach Pracowni Ultrazimnej Materii.

Zadanie 3: Badania małych zespołów jonów w pułapkach oraz detekcja i spektroskopia pojedynczych atomów i molekuł pod kierunkiem Ewy Stachowskiej z Katedry Fizyki Atomowej Politechniki Poznańskiej w ramach Pracowni Jonów w Pułapce.

Ostatecznie 12.12.2001 KBN podjął decyzję o przyznaniu środków finansowych na realizację wszystkich trzech zadań w wysokości 2 465 000 zł, co umożliwiło w pierwszej połowie 2002 roku sfinalizowanie zakupów aparaturowych. KBN wyznaczyło też zewnętrznego kuratora programu – Katarzynę Chałasińską-Macukow, która bardzo skutecznie wspierała działania Laboratorium.

Wskutek tych działań Laboratorium stało się dysponentem zestawu urządzeń badawczych wysokiej klasy. Niektóre z nich, np. zestaw laserowy o ultrawysokiej rozdzielczości spektralnej, były unikatowe nawet w skali światowej. Taki stan rzeczy umożliwił rozpoczęcie regularnej działalności badawczej. Realizacja wszystkich zadań została zakończona w 2005 roku.

Udział Wojciecha Gawlika w realizacji grantu zamawianego spowodował jego rezygnację z przewodniczenia Radzie Naukowej Laboratorium z powodu konfliktu interesów. Nowym przewodniczącym Rady został Tomasz Dohnalik.

5. Otwarcie KL FAMO

Uroczyste, oficjalne otwarcie KL FAMO z udziałem JM Rektora UMK, przedstawicieli KBN i Wydziału III PAN oraz PTF nastąpiło 11.05.2002. W przeddzień tej uroczystości odbyła się sesja naukowa, w czasie której wy-



Ryc. 3. Oficjalne otwarcie KL FAMO; od lewej: Józef Musielok, Andrzej Woszczyk, Franciszek Rozpłoch, przedstawicielka KBN; wstęgę przecina Rektor UMK Jan Kopcewicz; dalej: Tomasz Dohnalik, Daniel Simson, Henryk Szymczak, Stanisław Chwirot [11.05.2002] (z archiwum KL FAMO)

głoszono 3 referaty poświęcone planowanym w Laboratorium projektom: Ewa Stachowska – *Badanie małych zespołów jonów w pułapkach*, Wojciech Gawlik – *Nasza droga do kondensatu*, Konrad Banaszek – *Optyczne implementacje kwantowych technologii informatycznych*.

W dniu otwarcia Kazimierz Rzążewski wygłosił referat *Fizyka kwantowa na przełomie tysiącleci*. Po ceremonii przecięcia wstęgi odbyła się prezentacja pomieszczeń i aktualnej aparatury KL FAMO, a na zakończenie ognisko w Obserwatorium Astronomicznym w Piwnicach pod Toruniem [4].



Ryc. 4. Zwiedzanie Laboratorium po jego oficjalnym otwarciu; od lewej: Stanisław Chwirot, Łukasz A. Turski, przedstawicielki KBN, Henryk Szymczak, Jan Mostowski, Katarzyna Chałasińska-Macukow, Wojciech Gawlik [11.05.2002] (z archiwum KL FAMO)

6. Dalsza działalność Rady Naukowej i KL FAMO

Po oficjalnym otwarciu Rada skupiała się na nadzorowaniu i wspieraniu realizacji grantu.

Pierwsza kadencja Rady Naukowej upływała 30.04.2004, zatem Rektor UMK powołał nową Radę na kadencję 01.05.2004-30.04.2007, a następnie, na kolejną do roku 2010. Przewodniczącym Rady pozostał Tomasz Dohnalik, zaś jego zastępcą Kazimierz Rzążewski. Jedyną zmianą osobową w składzie Rady polegała na tym, że na miejsce zmarłego 02.01.2003 Krzysztofa Ernsta został powołany Tadeusz Stacewicz z Zakładu



Ryc. 5. Ostatnie w roku 2002 posiedzenie Rady KL FAMO i ostatnie w obecności Krzysztofa Ernsta (zdjęcie wykonane na jego prośbę); od lewej: Wojciech Gawlik, Maciej Kolwas, Jan Mostowski, Krzysztof Ernst, Katarzyna Chałasińska-Macukow, Marek Żukowski, Czesław Radzewicz, Tomasz Dohnalik, Kazimierz Rządowski, Józef Szudy, Stanisław Chwirot, Ewa Stachowska, Ryszard Tanaś, Józef Musielok (z archiwum KL FAMO)

Optyki UW. Na stanowisko dyrektora ponownie został powołany Stanisław Chwirot.

Śmierć Krzysztofa Ernsta pogrążyła w żałobie całe środowisko optyków polskich, a w szczególności tych związanych bezpośrednio z KL FAMO, gdyż był on jednym z gorących zwolenników utworzenia Laboratorium i „dobrym duchem” naszej Rady.

Posiedzenia Rady Naukowej odbywały się trzy razy do roku. Zgodnie z przyjętym zwyczajem posiedzenia jesienne i styczniowe odbywały się w Warszawie, w siedzibie Zakładu Optyki UW, natomiast na początku maja miały miejsce dwudniowe posiedzenia w Toruniu w pomieszczeniach KL FAMO.

Po udanym zakończeniu pierwszego, Rada wystąpiła do KBN o następny grant zamawiany *Ultraprecyzyjne pomiary metodami optyki i fizyki kwantowej*, który został przyznany. Miał on stworzyć podstawy do realizacji bardzo dużego projektu zaproponowanego przez Czesława Radzewicza – budowy polskiego optycznego zegara atomowego (POZA). Temat świetnie łączył kompetencje grup pracujących w Laboratorium, tj. perfekcyjne opanowanie najbardziej zaawansowanych technik fizyki atomowej i optyki kwantowej z celem bardzo praktycznym, ale też umożliwiającym w przyszłości pomiary o najwyższej osiągalnej dokładności.

W roku 2007 do Laboratorium zaprosiliśmy wiceministra ds. nauki w MEN Krzysztofa Kurzydłowskiego, znanego fizyka ciała stałego. Mimo ewidentnego braku czasu Minister odpowiedział na zaproszenie. Ku naszemu zdziwieniu wyznaczył termin na niedzielne przedpołudnie, w godzinach 10-12 i w tych godzinach zjawił się w KL FAMO. Na spotkanie z Ministrem przyjechali wszyscy członkowie Rady! Minister zwiedził siedzibę KL FAMO, po czym odbyła się poważna, merytoryczna

dyskusja o przyszłości Laboratorium, w wyniku której gremium poparło projekt zegara. Wzmocniło to motywację do starań o duży grant inwestycyjny na budowę zegara, który w roku 2008 otrzymało konsorcjum 3 zespołów uczelnianych (UMK, UJ, UW) wchodzących w skład KL FAMO. Poszczególne elementy były budowane w macierzystych uczelniach, a następnie złożone razem w KL FAMO. Zbudowano 2 zegary, żeby móc określić ich dokładność, która wynosi poniżej 7×10^{-17} . Jednocześnie Laboratorium powiększono o 4 dodatkowe, wyremontowane pomieszczenia, w których umieszczono nową aparaturę zegara. Do Laboratorium włączono też nową Pracownię Spektroskopii Wysokiej Zdolności Rozdzielczej, którą prowadzi Daniel Lisak.

Wielką stratą dla całego środowiska FAMO była śmierć drugiego członka Rady Naukowej Krzysztofa Wódkiewicza (14.11.2008). Po jego śmierci oraz zrzeczeniu się członkostwa przez Jana Mostowskiego, Macieja Kolwasa i Józefa Szudego zaszła potrzeba uformowania nowego składu tej Rady. W grudniu 2010 została powołana nowa Rada Naukowa na kadencję 2011-2013. Na opróżnione miejsca zostali powołani: Marek Trippenbach i Konrad Banaszek z Katedry Optyki Kwantowej i Fizyki Atomowej IFT UW, Mariusz Gajda i Włodzimierz Jastrzębski z IF PAN oraz Roman Ciuryło z IF UMK. Do Rady dokooptowano też Andrzeja Kowalskiego z Uniwersytetu Gdańskiego i Waława Urbańczyka z Politechniki Wrocławskiej, tak żeby wszystkie polskie ośrodki dziedziny FAMO były reprezentowane. Jednocześnie Jastrzębski został wybrany na przewodniczącego Rady, zaś Konrad Banaszek – jego zastępcą. Natomiast Roman Ciuryło został dyrektorem KL FAMO, po rezygnacji Stanisława Chwirota znakomicie kierującego Laboratorium od początku jego istnienia. Ważnym aspektem działalności Rady i Laboratorium były prawie corocznie organizowane warsztaty dla badaczy – studentów i doktorantów początkujących w dziedzinie FAMO.

16.09.2011 obchodziliśmy w Toruniu 10 rocznicę utworzenia KL FAMO. Z tej okazji zorganizowana została uroczysta sesja naukowa. Wykłady wygłosili: Kazimierz Rządowski – *FAMO, czyli o przewagach fizyki atomowej, molekularnej i optycznej* i Wojciech Gawlik – *Zegary optyczne tykają najszybciej – perspektywy metrologii optycznej*.

Po zwiedzaniu laboratoriów przez Gości odbył się koncert muzyki kameralnej w Pałacu Dąbskich. Następnego dnia odbyły się sesje: naukowa i plakatowa, które dotyczyły dyscyplin uprawianych w ramach KL FAMO.

W ostatniej kadencji Rady (2014-2018) wiceprzewodniczącym Rady został ponownie Konrad Banaszek, później, po jego rezygnacji z powodu innych zobowiązań, Marek Trippenbach. W trakcie tej kadencji Rada została uzupełniona o badaczy pełniących ważne role w pracach

„zegarowych”: Jerzego Zachorowskiego z IF UJ i Marcina Lipińskiego z AGH.

7. Zmiana zasad działania. Powstanie Konsorcjum FAMO

W drugim dziesięcioleciu bardzo poprawiła się sytuacja finansowa bogatszych zespołów pracujących w KL FAMO. Niedogodności związane z przyjazdami do Torunia przestały być kompensowane unikalną aparaturą, na którą coraz częściej było już stać pojedyncze zespoły. W roku 2018, po bardzo trudnej dyskusji, podjęta została decyzja o zmianie struktury i zasad działania KL FAMO. Zmieniono je na Konsorcjum laboratoriów dziedziny FAMO, w którym wskazano trzy laboratoria węzłowe, zlokalizowane na Uniwersytecie Jagiellońskim, Uniwersytecie Warszawskim i Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. To ostatnie zachowało nazwę KL FAMO. Powstała nowa Rada Naukowa i Rada Dyrektorów laboratoriów węzłowych. Ustalono zasady przyjmowania nowych członków do Konsorcjum i reguły współpracy.

Jednak to już jest inna struktura, dlatego opowiedziawszy historię powstania i działalności Krajowego Laboratorium FAMO w Toruniu, w tym miejscu ten opis kończymy. W dalszej części przedstawimy skrótowo działalność naukową poszczególnych Pracowni KL FAMO.

8. Pracownia Inżynierii Kwantowej

Kierowana przez Czesława Radzewicza Pracownia Inżynierii Kwantowej KL FAMO wystartowała najszybciej i pierwsza uzyskała wartościowe wyniki. Dotyczyły one podstawowych problemów optyki i inżynierii kwantowej ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień związanych z zastosowaniami splątanych fotonów w informatyce i kryptografii kwantowej. Z wielkim entuzjazmem w nurt tych badań w KL FAMO włączyli się także najmłodsi współpracownicy Radzewicza z IFD UW: Piotr Wasylczyk i Wojciech Wasilewski. Za sukces Pracowni Inżynierii Kwantowej należy uznać eksperyment, w którym dokonano doniosłego pomiaru widma łącznego par fotonów [5, 11]. Warto zauważyć, że oprócz Wasilewskiego, Wasylczyka, Banaszka i Radzewicza w gronie wykonawców tego eksperymentu znalazł się także Piotr Kolenderski, ówczesny student UMK, który odtąd związał swoje losy z KL FAMO.

Szczególną rolę w działalności tej pracowni odegrał też Konrad Banaszek, który obronił pracę doktorską *Pomiar stanu kwantowego w przestrzeni fazowej* (2000) pod kierunkiem Wódkiewicza, po czym wyjechał na staż postdoktorski najpierw na uniwersytecie w Rochester (USA), a potem w Oxfordzie. Po powrocie do kraju został zatrudniony w Instytucie Fizyki UMK w Toruniu, gdzie pro-



Ryc. 6. Czesław Radzewicz, kierownik Pracowni Inżynierii Kwantowej, pomysłodawca i lider budowy polskiego atomowego zegara optycznego [2014] (z archiwum KL FAMO)

wadził zajęcia dydaktyczne (wykłady, ćwiczenia i seminarium) z zakresu optyki kwantowej oraz fundamentalnych problemów mechaniki kwantowej przejawiających się w układach optycznych, przede wszystkim zaś kwantowej teorii informacji, jej zastosowań oraz możliwych realizacji w układach optycznych. Program tych zajęć był związany z programem badawczym KL FAMO. Konrad Banaszek habilitował się na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK, na podstawie rozprawy *Wierność w operacjach kwantowych* (2006). W latach 2007-2008 lat pełnił funkcję zastępcy dyrektora Instytutu Fizyki UMK. Odegrał wówczas kluczową rolę w zaprojektowaniu i budowie Centrum Optyki Kwantowej UMK.

Pod kierunkiem Banaszka, w KL FAMO Wojciech Wasilewski wykonał pracę doktorską *Źródła fotonów w łączności kwantowej* (2007), wykorzystującą jego badania teoretyczne podjęte w celu znalezienia kanonicznej postaci stanów generowanych w rzeczywistych optycznych wzmacniaczach parametrycznych [6] oraz opracowania metod ich przekształcania i wykorzystania w przesyłaniu informacji kwantowej [7]. Po doktoracie Wasilewski powrócił do Warszawy i został zatrudniony (2008) na stanowisku adiunkta w Zakładzie Optyki UW, jednak nadal brał udział w pracach Pracowni Inżynierii Kwantowej KL FAMO, w szczególności w kilku projektach dotyczących wzmacniaczy parametrycznych ultrakrótkich impulsów światła i problemu występującego w nich szumu pochodzenia kwantowego [8]. W badaniach tych uczestniczył także wspomniany wcześniej Piotr Kolenderski oraz Robert Frankowski, inny student UMK współpracujący z grupą Radzewicza [9, 10]. Istotną rolę w tej grupie ciągle odgrywał Konrad Banaszek, który wraz z resztą zespołu skierował swoją uwagę na zagadnienia kwantowej informacji i splątanych fotonów. Doniosłym osiągnięciem eksperymentalnym Radzewicza dokonany w KL FAMO wspólnie z teoretykami: Ludmiłą Praxmeyer z uniwersytetu w Sofii oraz Krzysztofem Wód-

kiewiczem, a także z Piotrem Wasylczykiem z Zakładu Optyki UW było wykazanie możliwości istnienia struktur subplanckowych w przestrzeni fazowej [12]. Szereg prac zespołu Radzewicza wykonanych w ciągu pierwszej dekady XXI w. dotyczyło procesów nieliniowych i ich zastosowań w doświadczalnej optyce kwantowej, nowych źródeł impulsów femtosekundowych (wykorzystujących światłowody i kryształy) oraz techniki pomiaru takich impulsów, a także fizyki i technologii wzmacniaczy laserowych dużej mocy [13]. Ważnym kierunkiem jego badań stała się metrologia czasu i częstości, obejmująca prace nad konstrukcją grzebieni częstości w celu ich zastosowania w optycznych zegarach atomowych.

9. Pierwszy w Polsce kondensat Bosego–Einsteina

Zasadniczym celem prac prowadzonych pod kierunkiem Wojciecha Gawlika w Pracowni Ultrazimnej Materii KL FAMO było doprowadzenie do wytworzenia kondensatu Bosego–Einsteina (BE) atomów rubidu ^{87}Rb . Prace te miały swoje korzenie w badaniach, rozpoczętych 10 lat wcześniej w zespole Gawlika w Instytucie Fizyki UJ w Krakowie. W roku 1998 uruchomiono tam pierwszą polską pułapkę magnetoopieczną, w której osiągnięto temperaturę rzędu $100\ \mu\text{K}$ [14, 15]. Pułapka ta została następnie wykorzystana do realizacji prac stanowiących część programu badawczego KL FAMO dotyczącego fizyki zimnych atomów

Chcąc uzyskać kondensat BE zespół Gawlika rozszerzył zakres prac krakowskich na znacznie niższe temperatury, czyli takie, w których jest możliwa kondensacja. Do jego grupy dołączyli następnie badacze z innych ośrodków, w tym Włodzimierz Jastrzębski z IF PAN oraz Marcin Witkowski z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Opolskiego i Jacek Szczepkowski z Akademii Pomorskiej w Słupsku. Pierwszy etap prac był realizowany nadal w Krakowie i obejmował budowę aparatury próżniowej oraz uruchomienie dwóch pułapek magnetoopiecznych. Istotną rolę w tych pracach odegrali Jerzy Zachorowski, Andrzej Noga i Michał Zawada z IF UJ. W tym samym czasie, w zespole Jastrzębskiego w IF PAN w Warszawie trwały prace nad budową pułapki magnetycznej, w Toruniu zaś organizowano pomieszczenie bezpyłowe przeznaczone dla aparatury budowanej w Krakowie i Warszawie. Właściwe prace nad kondensatem rozpoczęły się na jesieni 2004 roku, gdy cała aparatura została przetransportowana do KL FAMO. Czynnikiem opóźniającym był dorywczy charakter pracy zespołu dojeżdżającego z odległych od Torunia miejscowości (Kraków, Warszawa, Opole, Słupsk). Na szczęście na początku 2006 roku dwaj członkowie zespołu Gawlika (Andrzej Noga i Michał Zawada) osiedlili się czasowo w Toruniu, co wpłynęło pozytywnie na dalszy przebieg prac. Parę miesięcy później

Zawada przeprowadził się na stałe do Torunia i został zatrudniony w IF UMK.

Ostatecznie, po kilku miesiącach systematycznej pracy zespołu Wojciecha Gawlika, 02.03.2007 wysiłki zostały uwieńczone sukcesem. Wtedy to uzyskano pierwsze dane doświadczalne świadczące niezbicie, że uzyskano kondensat Bosego–Einsteina atomów ^{87}Rb [16]. Stwierdzono, że kondensat ma około 100 000 atomów i powstaje przy temperaturze 250 nK, to znaczy w tej temperaturze zachodziło przejście fazowe. W niższych temperaturach obserwowano już czysty kondensat Bosego–Einsteina.



Ryc. 7. Twórcy kondensatu Bosego–Einsteina w KL FAMO; z przodu od lewej: Michał Zawada, Jacek Szczepkowski, Wojciech Gawlik (lider Zespołu), Włodzimierz Jastrzębski; z tyłu od lewej: Marcin Witkowski, Jerzy Zachorowski, Andrzej Noga, Franciszek Bylicki [03.09.2007] (z archiwum KL FAMO)

Pierwsze prowadzone w KL FAMO badania nad kondensatem BE dotyczyły jego własności hydrodynamicznych w pułapce magnetycznej i zostały opisane w pracy ośmiu autorów, z których trzech (Wojciech Gawlik, Andrzej Noga, Jerzy Zachorowski) było pracownikami UJ, dwóch (Franciszek Bylicki, Michał Zawada) – UMK, Włodzimierz Jastrzębski – IF PAN, Marcin Witkowski – Uniwersytetu Opolskiego i Jacek Szczepkowski – Akademii Pomorskiej w Słupsku [17]. Taki skład autorów świadczył, że dzięki uzyskaniu kondensatu BE Krajowe Laboratorium FAMO zaznaczyło swoje istnienie i stało się atrakcyjnym miejscem dla młodych fizyków w Polsce. Wskazuje na to zespół autorów drugiej pracy grupy Gawlika wykonanej w Pracowni Ultrazimnej Materii KL FAMO, która zawierała wyniki eksperymentu nad swobodnym spadkiem chmury termicznej atomów pochodzących z kondensatu [18]. Oprócz dotychczasowych badaczy pojawili się tu magistranci i doktoranci z Uniwersytetu Wrocławskiego (Łukasz Tracewski), z UMK (Romaric Abdoul, Rafał Gartman) oraz Jan Chwedeńczuk, adiunkt z Instytutu Fizyki Teoretycznej UW. Można mniemać, że publikacje te uświadomiły krajowej i międzynarodowej społeczności fizyków, iż rozpoczęła się nowa epoka,

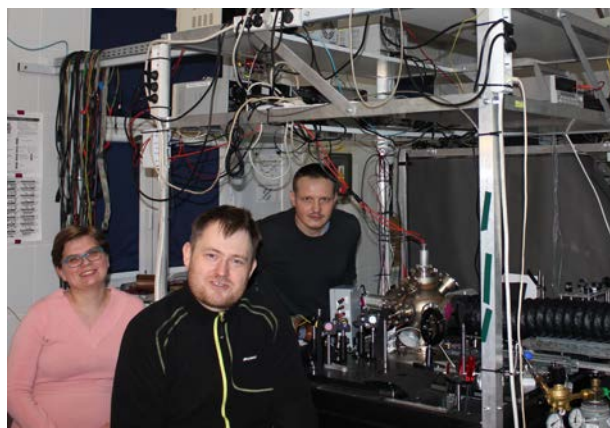
w której stało się w Polsce możliwe prowadzenie badań doświadczalnych na światowym poziomie w niezwykle atrakcyjnej dziedzinie, jaką jest fizyka zimnych atomów i kondensatów BE. W kolejnych latach w zespole Gawlika przeprowadzono szereg eksperymentów dotyczących dynamiki kondensatów BE w temperaturach niezerowych [19, 20]. Prowadzono także badania spinorowych kondensatów BE [21]. Godne podkreślenia jest to, że w tym zespole rozpoczęto także prace nad konstrukcją spowalnicza Zeemana w celu użycia go do otrzymania gazu ultrazimnych atomów, z myślą o budowie w przyszłości w KL FAMO optycznego zegara atomowego [22].

10. Pułapki jonowe

W ramach realizacji 3. zadania grantu przyznanego w 2001 roku przez KBN, grupa pod kierunkiem Ewy Stachowskiej z Politechniki Poznańskiej planowała prowadzenie badań małych zespołów jonów w pułapkach jonowych typu Paula. Był to ambitny zamiar, gdyż pułapki jonowe stanowią narzędzie służące do realizacji różnych doświadczeń dotyczących fundamentalnych problemów współczesnego przyrodoznawstwa, takich jak fizyka i chemia pojedynczych atomów i cząsteczek, zimna materia czy weryfikacja poprawności Modelu Standardowego. Badania takie mają ponadto ważne znaczenie aplikacyjne w informatyce kwantowej, gdyż zaproponowano, by jony uwięzione w pułapce Paula zostały wykorzystane do konstrukcji komputera kwantowego.

Na początku badania te dotyczyły metod wytwarzania jonów i koncentrowały się na fundamentalnych procesach prowadzących do jonizacji, a także na metodach chłodzenia otrzymanych jonów. Przyznane przez KBN w grudniu 2001 środki okazały się jednak niewystarczające, co powodowało znaczne opóźnienia prac. 04.03.2005 KBN przyznał KL FAMO dotację celową na dofinansowanie kosztów realizacji inwestycji aparaturowej pod nazwą *Układy aktywnej stabilizacji do laserów półprzewodnikowych*. Dzięki temu rozbudowany został system laserów w aparaturze do badań niewielkich zespołów jonów zamrożonych w pułapce Paula, ale wciąż było to niewystarczające, co spowodowało problemy dojeżdżających z Poznania badaczy, którzy przy braku konkretnych wyników nie mogli nadal godzić pracy w Laboratorium w Toruniu z zadaniami na Politechnice Poznańskiej. W tej sytuacji, przy aktywnym udziale Ewy Stachowskiej i Rady Laboratorium, Pracownię stopniowo przejmował Łukasz Kłosowski, adiunkt w IF UMK.

W proces znalezienia przyczyny występujących trudności eksperymentalnych zaangażował się jeden ze światowych liderów takich badań – Rainer Blatt z Innsbrucka. Po jego wizycie w Toruniu cała aparatura została przewieziona do Innsbrucka, żeby w końcu skutecznie rozwiązać występujące problemy.



Ryc. 8. Zespół Pracowni Pułapek Jonowych; do lewej: Katarzyna Pleskacz, Łukasz Kłosowski, Mariusz Piwiński [2020] (z archiwum KL FAMO)

Łukasz Kłosowski w latach 2011-2012 przebywał na stażu podoktorskim w grupie Michaela Drewsena na uniwersytecie w Aarhus w Danii. Zajmował się tam badaniami zimnych jonów molekularnych MgH^+ oraz tzw. kryształami coulombowskimi w pułapkach Paula [23,24]. Po powrocie do Torunia rozpoczął wraz z Mariuszem Piwińskim i Katarzyną Pleskacz, przy wsparciu Daniela Lisaka i Szymona Wójtewicza, prace nad budową układu do optycznego chłodzenia w systemie dopplerowskim jonów atomowych wapnia Ca^+ w pułapce [25]. W układzie tym zastosowano liniową pułapkę Paula wraz z impulsowym działem elektronowym, laserowym systemem chłodzenia dopplerowskiego i układem detekcji optycznej. Badania realizowane przez zespół skupiony wokół Kłosowskiego i Piwińskiego dotyczą nieliniowych zjawisk rezonansowych, które mogą znaleźć zastosowania w spektroskopii masowej [26]. Oprócz tego prowadzone są pomiary całkowitych przekrojów czynnych na zderzenia jonizujące przy użyciu impulsowego działu elektronowego [27], a także badania zderzeń sprężystych i niesprężystych elektronów z jonami uwięzionymi w pułapce [28]. Warto jeszcze dodać, że w roku 2021 grupa Kłosowskiego-Piwińskiego nawiązała współpracę z CERN, w ramach której zostanie zbudowane źródło jonów ujemnych wykorzystujące liniową pułapkę Paula.

11. Pierwszy polski optyczny zegar atomowy

Jak wspominaliśmy w opisie działań Rady Naukowej, prace nad atomowym zegarem optycznym rozpoczęły się po otrzymaniu grantu *Ultraprecyzyjne pomiary metodami optyki i fizyki atomowej* (2008), którego głównym celem było opanowanie i rozwój technologii niezbędnych do konstrukcji dwóch prototypów nowego wzorca czasu i częstości, wykorzystującego przejście optyczne w atomie strontu, roboczo nazwanego polskim optycznym zegarem atomowym (POZA). Projekt ten obejmował trzy duże zadania badawcze realizowane przez grupy

badawcze z trzech ośrodków naukowych. I tak w Zakładzie Fotoniki UJ w Krakowie zespół Wojciecha Gawlika podjął się konstrukcji atomowego wzorca częstości wykorzystującego ultrazimne atomy strontu. Z kolei w Zakładzie Optyki UW zespół Czesława Radzewicza był odpowiedzialny za zbudowanie optycznego grzebienia częstości, na UMK w Toruniu zaś przystąpiono do konstrukcji drugiego wzorca atomowego i ultrastabilnego lasera.

Decyzją Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 15.03.2012 przyznana została dotacja celowa na utrzymanie Specjalnego Urządzenia Badawczego – optycznego zegara atomowego. Wysokość tej dotacji wynosiła 20,5 mln zł i podzielona została między członków konsorcjum POZA w sposób następujący: zespół UJ – 5 mln zł, zespół UW – 8 mln zł, zespół UMK – 7,5 mln zł.

Godny podkreślenia jest fakt, że realizując ten projekt wszystkie trzy grupy badawcze opanowały nowoczesne technologie niedostępne dotąd w Polsce [29]. Okazało się, że środowisko FAMO zdołało wypracować skuteczne metody współdziałania poszczególnych zespołów w różnych polskich instytucjach naukowych, co się przyczyniło do znacznego zwiększenia jego innowacyjności; niewątpliwie zaistnienie takiego stanu rzeczy w polskich warunkach stanowi wartościowe osiągnięcie.

W listopadzie 2014 w pomieszczeniach KL FAMO w Toruniu połączono wszystkie podzespoły i skonstruowano nie jeden, a dwa optyczne zegary, co dodatkowo umożliwiło przeprowadzenie testów i sprawdzenie poprawności ich działania. Ostatecznie w grudniu 2014 w KL FAMO został uruchomiony pierwszy w Polsce optyczny zegar atomowy, składający się z dwóch optycznych zegarów wykorzystujących bozony – atomy strontu ^{88}Sr . Atomy te były laserowo chłodzone, spowalniane i pułapkowane w jednowymiarowej sieci optycznej, a następnie częstość lasera wzorcowego była dostrajana do częstości przejścia $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$. Zmierzona względna stabilność dwóch zegarów była poniżej 7×10^{-17} , przy czasie uśredniania 1000 s. Bezwzględna częstość przejścia zegarowego w atomach strontu została wyznaczona z dokładnością około 1 Hz [30].

Skonstruowanie tego zegara stanowiło przedsięwzięcie pionierskie w skali kraju, gdyż stało się początkiem badań spektroskopowych ultrawysokiej rozdzielczości. W wyniku realizacji tego projektu powstała w KL FAMO nowoczesna baza aparaturowa, która równolegle z pracami nad nowymi wzorcami czasu i częstości umożliwiła badania nad wykorzystaniem efektów interferencji kwantowej i splątania kwantowego do zwiększenia precyzji pomiarów atomowych i optycznych. Sukces tego projektu dowodzi, że przyjęta na przełomie XX i XXI w. formuła działania KL FAMO dobrze zniosła próbę czasu i pozwoliła na prowadzenie pionierskich doświadczeń z zakresu

technologii wspomaganych kwantowo [31, 32]. Warto dodać, że optyczny zegar atomowy zlokalizowany w KL FAMO służy za wzorec częstości dla 32-metrowego radioteleskopu w Obserwatorium Astronomicznym UMK w Piwnicach używanego do obserwacji radioastronomicznych prowadzonych w ramach sieci VLBI. Aby to była możliwe, wykorzystano łącze światłowodowe (15 km) do transmisji sygnałów czasu ze stabilizacją częstości opracowaną przez Marcina Lipińskiego i jego zespół z AGH. Pierwsze wyniki prac przeprowadzonych w tym zakresie zostały już opublikowane w prestiżowym czasopiśmie *Astronomy and Astrophysics* [33]. Trzeba jeszcze dodać, że optyczne zegary atomowe w KL FAMO zostały połączone za pomocą światłowodu z Obserwatorium Astrogeodynamicznym Centrum Badań Kosmicznych PAN w Borowcu, które dysponuje najlepszą w Polsce doświadczalną realizacją sekundy uniwersalnego czasu koordynowanego UTC [34].

Jako spektakularne osiągnięcie, uzyskane dzięki wykorzystaniu optycznego zegara atomowego, można wymienić eksperyment przeprowadzony w KL FAMO dotyczący poszukiwania hipotetycznej ciemnej materii. Był to eksperyment o charakterze pionierskim, gdyż – w odróżnieniu od wcześniejszych prób dokonanych w skali galaktycznej – był przeprowadzony w warunkach laboratoryjnych. Wyniki tego eksperymentu zostały opisane w pracy opublikowanej w pierwszym numerze nowego czasopisma *Nature Astronomy* [35]. Praca ta spotkała się ze znacznym zainteresowaniem międzynarodowej społeczności i wkrótce po jej opublikowaniu została szczegółowo omówiona w popularnym i cieszącym się dużym prestiżem miesięczniku *Scientific American* [36]. Jej pierwszym autorem i zarazem pomysłodawcą tego zupełnie innowacyjnego sposobu badania ciemnej materii był Piotr Wcisło,³ który po magisterium uzyskanym na UJ w Krakowie (2010) przeprowadził się do Torunia i został zatrudniony na UMK włączając się z wielką energią w działalność badawczą KL FAMO.

Substancją, z którą w KL FAMO przeprowadzono większość doświadczeń nad zimną materią były zimne, spułapkowane atomy strontu. Jednakże w wielu ośrodkach na świecie były już prowadzone prace nad pułapkowaniem innych atomów m.in. rtęci. Idąc w tym kierunku również w KL FAMO, wykorzystując optyczny grzebień częstości, przeprowadzono dokładne pomiary częstości przejść $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ oraz przesunięć izotopowych dla ato-

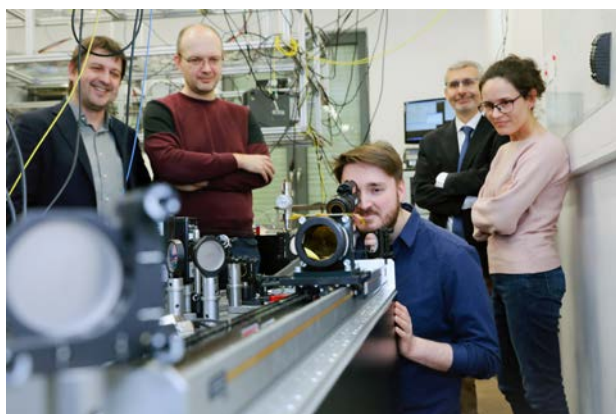
3. Piotr Wcisło otrzymał Nagrodę Narodowego Centrum Nauki (2022) w kategorii nauk ścisłych i technicznych za opracowanie nowej metody poszukiwania ciemnej materii, która wykorzystuje optyczne zegary atomowe, oraz za wykorzystanie ultradokładnej spektroskopii laserowej do testowania elektrodynamiki kwantowej i poszukiwania nowej fizyki.

mów rtęci, w tym czterech izotopów bozonowych (^{198}Hg , ^{200}Hg , ^{202}Hg , ^{204}Hg) i jednego izotopu fermionowego (^{199}Hg) [37].

12. Pracownia Spektroskopii Wysokiej Zdolności Rozdzielczej

Znaczącym wydarzeniem w historii KL FAMO było zbudowanie spektrometru strat we wnęce CRDS (*Cavity Ring-Down Spectroscopy*) dokonane przez zespół, który tworzyli: Agata Cygan, Daniel Lisak, Piotr Masłowski, Katarzyna Bielska, Szymon Wójtewicz, Jolanta Domyśławska, Ryszard S. Trawiński i Roman Ciuryło w ramach współpracy z laboratorium Josepha T. Hodgesa w National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA i laboratorium Hisashi Abe w National Metrology Institute of Japan, Tsukuba [38]. Ważną cechą tego spektrometru jest to, że charakteryzuje go jeden z najwyższych na świecie stosunek sygnału do szumu, dzięki czemu daje możliwość przeprowadzania niezwykle precyzyjnych pomiarów natężeń i kształtów słabych linii widmowych, takich jak te występujące w paśmie absorpcyjnym tlenu w otoczeniu długości fali $\lambda = 687 \text{ nm}$, co ma duże znaczenie w fizyce atmosfery ziemskiej [39]. Może on być wykorzystywany w licznych zastosowaniach, w szczególności pozwala na wyznaczanie stałej Boltzmanna na podstawie zmierzonych wartości szerokości dopplerowskiej linii atomowych lub molekularnych [40]. Nieco później w KL FAMO dokonano istotnego postępu w zakresie technik pomiarowych polegającego na dowiązaniu spektrometru CRDS do optycznego zegara atomowego, co umożliwiło wykonanie dokładnych pomiarów częstości przejść kwadrupolowych S(3) i S(4) w paśmie 2–0 cząsteczki deuteru D_2 [41]. Te badania odbywały się w ramach współpracy z grupą włoską z Politecnico di Milano i francuską z Université Rennes.

Kolejnym ważnym osiągnięciem KL FAMO było wdrożenie (2013) nowej techniki eksperymentalnej, czyli spektroskopii modów wnęki CMWS (ang. *cavity mode-*



Ryc. 9. W Pracowni Spektroskopii Wysokiej Zdolności Rozdzielczej; od lewej: Piotr Masłowski, Daniel Lisak, Dominik Charczun, Roman Ciuryło, Agata Cygan [2019] (z archiwum KL FAMO)

width spectroscopy), która stanowi alternatywę i uzupełnienie techniki CRDS dla tych przypadków, gdy ta ostatnia zawodzi. Dokonał tego zespół w składzie: Agata Cygan, Daniel Lisak, Piotr Morzyński, Marcin Bober, Michał Zawada, Eugeniusz Pazderski z Obserwatorium Astronomicznego UMK i Roman Ciuryło [42]. Dalsze prace tego zespołu doprowadziły do opracowania nowej techniki wykorzystującej spektroskopię dyspersyjną modów wnęki CMDS (ang. *cavity mode-dispersion spectroscopy*) wykazując, że może ona być niezwykle pomocna w wielu zastosowaniach, przede wszystkim w metrologii gazowej oraz monitoringu środowiska naturalnego [43]. Na szczególne podkreślenie zasługuje nieustanne dążenie wszystkich badaczy związanych z Pracownią Wysokiej Zdolności Rozdzielczej do udoskonalania stosowanych metod, czego dowodem jest zbudowanie unikatowego zestawu aparaturowego, podłączonego do optycznego zegara atomowego, który umożliwia dokonywanie pomiarów przy użyciu wszystkich trzech wyżej wspomnianych technik, tj. CRDS, CMWS oraz CMDS [44]. Innym niesłychanie ważnym osiągnięciem dokonanym w 2016 roku stało się wdrożenie szerokopasmowej spektrometrii modów wnęki z wykorzystaniem optycznego grzebienia częstości oraz spektrografu VIPA (ang. *virtually imaged phased-array*) [45]. Ostatnio pokazano, że stosując tę technikę można prowadzić pomiary spektroskopowe z dokładnością do kilku Hz [46]. Najnowszym osiągnięciem Pracowni Wysokiej Zdolności Rozdzielczej jest opracowanie w 2021 roku nowej techniki spektroskopowej zwanej w j. ang. *dual-comb cavity ring-down spectroscopy*, łączącej zalety powszechnie stosowanej spektroskopii CRDS z szerokopasmowym pomiarem o wysokiej rozdzielczości, za pomocą dwóch grzebieni optycznych (ang. *dual-comb spectroscopy*) [47].

Spoglądając na listę autorów omówionych wyżej publikacji warto zauważyć, że w miarę upływu czasu do grona pierwszych pionierów (Roman Ciuryło, Michał Zawada, Daniel Lisak, Ryszard S. Trawiński, Piotr Masłowski, Jolanta Domyśławska) stopniowo dołączali badacze z młodszego pokolenia (Piotr Wcisło, Agata Cygan, Marcin Bober, Marcin Witkowski, Piotr Morzyński, Katarzyna Bielska, Szymon Wójtewicz, Grzegorz Kowzan, Piotr Ablewski, Mateusz Borkowski i in.), którzy w sposób istotny przyczynili się do tego, że KL FAMO zyskało międzynarodowe uznanie jako jeden z wiodących ośrodków w dziedzinie spektroskopii ultrawysokiej zdolności rozdzielczej i fizyki zimnej materii.

13. Pracownia Splątanych Fotonów

Z chwilą powrotu do Warszawy Konrada Banaszka Pracownię Inżynierii Kwantowej przejmował sukcesywnie pracujący w niej, a zatrudniony w IF UMK, Piotr Kolen-derski. W wyniku tych zmian jednostka zmieniła nazwę



Ryc. 10. W Pracowni Splątanych Fotonów; do lewej: Piotr Kolenderski, Mikołaj Lasota, Dobrosława Bartoszek-Bober [2020] (z archiwum KL FAMO)

na Single Photon Application Laboratory (SPALab). Piotr Kolenderski, który swoją działalność naukową w KL FAMO rozpoczynał jeszcze jako student pod kierunkiem Konrada Banaszka, w latach 2010-2013 odbył staż doktorski w Institute for Quantum Computing na uniwersytecie w Waterloo w Kanadzie. Po powrocie do kraju został zatrudniony jako adiunkt naukowy w IF UMK i jednocześnie w KL FAMO. Szybko skupił wokół siebie grono młodych badaczy (Mikołaj Lasota, Artur Czerwiński, Kaushik Joarder, Dobrosława Bartoszek-Bober) oraz doktorantów (Karolina Sędziak-Kacprowicz, Marta Miściak, Maria Gieysztor, Andrzej Gajewski, Anuradha Anarthe, Jakub Szlachetka) tworząc grupę, zajmującą się zastosowaniami splątanych fotonów w informatyce i kryptografii kwantowej. Przedmiotem badań tej grupy są zagadnienia dotyczące źródeł pojedynczych fotonów, ich czasowo-rozdzielczej detekcji oraz aplikacji w technologiach kwantowych, przede wszystkim w kryptografii kwantowej [48-50]. W tych badaniach kładzie się duży nacisk na eksperymentalne implementacje kwantowego przetwarzania informacji [51]. Jeden z celów prac grupy, to opracowanie metody dalekodystansowej, poufnej komunikacji kwantowej z wykorzystaniem odbiornika satelitarnego i istniejących sieci światłowodowych. W ramach współpracy z zespołem Wojciecha Gawlika, w Instytucie Fizyki UJ prowadzone są także prace nad oddziaływaniem pojedynczych fotonów z centrami barwnymi typu azot-wakancja (NV) w diamencie [52]. W pracach tych uczestniczyli też badacze z uniwersytetów w Waterloo (Kanada) i Ulm (Niemcy).

14. Posłowie

Dwie dekady, które minęły od chwili powstania KL FAMO, cechowały się znacznym wzrostem aktywności i innowacyjności polskich fizyków atomowych, molekularnych i optycznych, co zaowocowało licznymi publikacjami w renomowanych czasopismach międzynarodo-

wych. Unikatowość laboratoriów skupionych w strukturze KL FAMO polega przede wszystkim na koncentracji zaawansowanej aparatury umożliwiającej prowadzenie w Polsce prac badawczych na poziomie światowym. Wyjątkowość tej struktury polega też na tym, że powstała ona na przełomie dwóch tysiącleci jako oddolna i dobrowolna inicjatywa środowiska związanego z tematyką FAMO, które było świadome tego, że osiągnięcie takiego poziomu badań, jak w najlepszych naukowych centrach światowych, wymaga połączenia wysiłków najlepszych polskich laboratoriów. Nie było to łatwe także z psychologicznego punktu widzenia, gdyż w początkowym okresie działalność KL FAMO wiązała się z koniecznością rezygnacji z indywidualnych ambicji – również finansowych – uczestników tego przedsięwzięcia. Minione dwadzieścia lat wykazało jednak, że taka droga postępowania w pełni się sprawdziła; poszczególne ośrodki związane z KL FAMO współpracują ze sobą wymieniając personel i doświadczenia. Różnorodność posiadanej w laboratoriach FAMO infrastruktury badawczej oraz jej komplementarność pozwala na swobodne łączenie różnych technik eksperymentalnych i prowadzenie takich ambitnych prac badawczych, które w obecnych warunkach nie byłyby możliwe do wykonania przez pojedyncze polskie ośrodki. Jako przykład mogą tu służyć dwa doniosłe sukcesy:

- wytworzenie kondensatu Bosego–Einsteina w układzie zimnych atomów rubidu ^{87}Rb ,
- konstrukcja optycznego zegara atomowego wykorzystującego zimne atomy strontu.

Oba te sukcesy osiągnięto dzięki wspólnemu wysiłkowi trzech partnerów: Uniwersytetu Jagiellońskiego, Uniwersytetu Warszawskiego i Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, przy wsparciu badaczy z Instytutu Fizyki PAN, Uniwersytetu Opolskiego oraz Akademii Pomorskiej w Słupsku.

Na zakończenie tego artykułu powinniśmy wspomnieć o tych spośród współtwórców KL FAMO, którzy wnieśli istotny wkład w powodzenie tego przedsięwzięcia, a których już nie ma wśród nas. Byli to: Krzysztof Ernst (1940-2003), Krzysztof Wódkiewicz (1949-2008), Stanisław Chwirot (1950-2020) oraz Jerzy Zachorowski (1955-2017), który odegrał istotną rolę w budowie pałeczek magnetoptycznych i zegara.

Literatura

- [1] B. Grzegorzewski, *Protokół z Zebrania Założycielskiego Sekcji FAMO Komitetu Fizyki PAN*, [w:] Spotkania FAMO, Wydawnictwo UMK, Toruń 1998, s. 129.
- [2] D. Bielińska-Wąż, J. Szudy, red., *Abstrakty Sesji Plakatywnej Sekcji FAMO*, [w:] Spotkania FAMO, Wydawnictwo UMK, Toruń 1998, ss. 11-128.

- [3] J. Szudy, red., *Fizyka polska u progu Trzeciego Tysiąclecia, Ogólnopolska Sesja Naukowa z okazji Stulecia Urodzin Aleksandra Jabłońskiego*, Wydawnictwo UMK, Toruń 1998.
- [4] J. Turło, *Krajowe Laboratorium FAMO w Toruniu*, *Postępy Fizyki*, **53**, 255 (2002).
- [5] W. Wasilewski, P. Wasylczyk, P. Kolenderski, K. Banaszek, C. Radzewicz, *Joint spectrum of photon pairs measured by coincidence Fourier spectroscopy*, *Optics Letters*, **31**, 1130 (2006).
- [6] A. Lvovsky, W. Wasilewski, K. Banaszek, *Decomposing a pulsed optical parametric amplifier into independent squeezers*, *Journal of Modern Optics*, **54**, 721 (2007); W. Wasilewski, A. Lvovsky, K. Banaszek, C. Radzewicz, *Pulsed squeezed light: simultaneous squeezing of multiple modes*, *Phys. Rev. A*, **73**, 063819 (2006).
- [7] W. Wasilewski, K. Banaszek, *Protecting an optical qubit against photon loss*, *Phys. Rev. A*, **75**, 042316 (2007).
- [8] J. Chwedeńczuk, W. Wasilewski, *Intensity of parametric fluorescence pumped by ultrashort pulses*, *Phys. Rev. A*, t. 78, s. 063823 (2008).
- [9] W. Wasilewski, P. Kolenderski, R. Frankowski, *Spectral density matrix of a single photon measured*, *Phys. Rev. Letters*, **99**, 123601 (2007); P. Kolenderski, W. Wasilewski, *Derivation of the density matrix of a single photon produced in parametric down-conversion*, *Phys. Rev. A*, **80**, 015801 (2009).
- [10] W. Wasilewski, C. Radzewicz, R. Frankowski, K. Banaszek, *Statistics of multiphoton events in spontaneous parametric down-conversion*, *Phys. Rev. A*, **78**, 033831 (2008); P. Kolenderski, W. Wasilewski, K. Banaszek, *Modelling and optimization of photon pair sources based on spontaneous parametric down-conversion*, *Phys. Rev. A*, **80**, 013811 (2009).
- [11] K. Banaszek, A. Dragan, W. Wasilewski, C. Radzewicz, *Experimental demonstration of entanglement-enhanced classical communication over a quantum channel with correlated noise*, *Phys. Rev. Lett.*, t. 92, s. 257901 (2004).
- [12] L. Praxmeyer, P. Wasylczyk, C. Radzewicz, K. Wódkiewicz, *Time-frequency domain analogues of phase sub-Planck structures*, *Phys. Rev. Lett.*, t. 98, s. 063901 (2007).
- [13] M. Karpiński, K. Banaszek, C. Radzewicz, *Fiber-optic realization of anisotropic depolarizing quantum channels*, *Journal of the Optical Society of America B*, t. 24, s. 668 (2008); W. Wasilewski, C. Radzewicz, R. Frankowski, K. Banaszek, *Statistics of multiphoton events in spontaneous parametric down-conversion*, *Phys. Rev. A*, t. 78, s. 033831 (2008); K. Banaszek, R. Demkowicz-Dobrzański, M. Karpiński, P. Migdał, C. Radzewicz, *Quantum and semiclassical polarization correlations*, *Opt. Comm.*, t. 283, s. 713 (2010); M. Karpiński, C. Radzewicz, K. Banaszek, *Dispersion-based control of modal characteristics for parametric down-conversion in multi-mode waveguide*, *Optics Letters*, t. 37, s. 878 (2012); M. Lasota, C. Radzewicz, K. Banaszek, R. Thew, *Linear optics schemes for entanglement distribution with realistic single-photon sources*, *Phys. Rev. A*, t. 90, s. 033836 (2014).
- [14] J. Zachorowski, T. Pałasz, W. Gawlik, *Magneto-optical trap for rubidium atoms*, *Optica Applicata*, **28**, 239 (1998)
- [15] J. Zachorowski, T. Pałasz, W. Gawlik, *Krakowska pułapka magnetoptyczna*, *Postępy Fizyki*, **49**, 338 (1998).
- [16] W. Gawlik, W. Jastrzębski, A. Noga, J. Zachorowski, M. Zawada, *Pierwszy polski kondensat Bosego-Einsteina*, *Postępy Fizyki*, **58**, 156 (2007).
- [17] F. Bylicki, W. Gawlik, W. Jastrzębski, A. Noga, J. Szczepkowski, J. Zachorowski, J. Witkowski, M. Zawada, *Studies of the hydrodynamic properties of Bose-Einstein condensate of ^{87}Rb atoms in a magnetic trap*, *Acta Phys. Polon.*, **113**, 691 (2008).
- [18] M. Zawada, R. Abdoul, J. Chwedeńczuk, R. Gartman, J. Szczepkowski, Ł. Tracewski, M. Witkowski, W. Gawlik, *Free-fall expansion of finite-temperature Bose-Einstein condensed gas in the non-Thomas-Fermi regime*, *Journal of Physics B*, **41**, 241001 (2008).
- [19] W. Gawlik, W. Jastrzębski, K. Szczepkowski, M. Witkowski, J. Zachorowski, *Experiments on the dynamics of the Bose-Einstein condensate at finite temperature*, *Physica Scripta*, **135**, 014028 (2009).
- [20] J. Szczepkowski, R. Gartman, M. Witkowski, Ł. Tracewski, M. Zawada, W. Gawlik, *Analysis and calibration of absorptive images of Bose-Einstein condensate at nonzero temperatures*, *Review of Scientific Instruments*, **80**, 053103 (2009).
- [21] R. Gartman, M. Piotrowski, J. Szczepkowski, M. Witkowski, M. Zawada, W. Gawlik, *Production of spinor condensates of ^{87}Rb released from a magnetic trap*, *Optica Applicata*, **40**, 565 (2020).
- [22] M. Bober, J. Zachorowski, W. Gawlik, *Designing Zeeman slower for strontium atoms – towards optical clock*, *Optica Applicata*, **40**, 547 (2010).
- [23] O. O. Versolato, M. Schwarz, A. Hansen A. Gingell, A. Windberger, Ł. Kłosowaki, J. Ulrich, F. Jensen, J. R. Crespo Lopez-Urrutia, M. Drewsen, *Decay measurement of the first vibrationally excited state of MgH^+ in a cryogenic Paul trap*, *Phys. Rev. Letters*, **111**, 053002 (2013).

- [24] A. K. Hansen, O.O. Versolato, Ł. Kłosowski, S. B. Kristensen, A. Gingell, M. Schwarz, A. Windberger, J. Ullrich, J.P. Crespo Lopez-Urrutia, M. Drewsen, *Efficient rotational cooling of Coulomb-crystallized molecular ions by a helium buffer gas*, *Nature*, **508**, 76 (2014).
- [25] Ł. Kłosowski, K. Pleskacz, S. Wójtewicz, D. Lisak, M. Piwiński, *Optical system for Doppler cooling of trapped calcium ions*, *Photonics Lett. Poland*, **9**, 119 (2017).
- [26] Ł. Kłosowski, M. Piwiński, K. Pleskacz, S. Wójtewicz, D. Lisak, *Nonlinear resonances in linear segmented Paul trap of short central segment*, *Journal of Mass Spectrometry*, **53**, 541 (2018).
- [27] Ł. Kłosowski, M. Piwiński, S. Wójtewicz, D. Lisak, *Measurement of electron-calcium ionization integral cross section using an ion trap with a low-energy, pulsed electron gun*, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, **228**, 13 (2018).
- [28] Ł. Kłosowski, M. Piwiński, *Energy transfer in elastic collisions between electrons and trapped ions*, *Physics of Plasmas*, **25**, 102114 (2018); *Attraction between trapped ions and beams of electrons*, *AIP Advances*, **10**, 015028 (2020).
- [29] M. Bober, J. Zachorowski, W. Gawlik, P. Morzyński, M. Zawada, D. Lisak, A. Cygan, K. Bielska, M. Piwiński, R. S. Trawiński, R. Ciuryło, F. Ozimek, C. Radzewicz, *Precision spectroscopy of cold strontium atoms: Towards optical atomic clock*, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, **60**, 4 (2012).
- [30] M. Bober, P. Morzyński, A. Cygan, D. Lisak, P. Masłowski, M. Prymaczek, P. Wcisło, P. Ablewski, M. Piwiński, S. Wójtewicz, K. Bielska, D. Bartoszek-Bober, R. S. Trawiński, M. Zawada, R. Ciuryło, J. Zachorowski, M. Piotrowski, W. Gawlik, F. Ozimek, C. Radzewicz, *Strontium optical lattice clocks for practical realization of the metre and secondary representation of the second*, *Measurement Science & Technology*, **26**, 075201 (2015);
- [31] C. Radzewicz, M. Bober, P. Morzyński, A. Cygan, D. Lisak, D. Bartoszek-Bober, P. Masłowski, P. Ablewski, J. Zachorowski, W. Gawlik, R. Ciuryło, M. Zawada, *Accuracy budget of the ^{88}Sr optical atomic clocks at KL FAMO*, *Physica Scripta*, **91**, 84003 (2016).
- [32] M. Zawada, P. Ablewski, W. Gawlik, R. Gartman, P. Masłowski, P. Morzyński, B. Nagórny, F. Ozimek, C. Radzewicz, P. Wcisło, M. Witkowski, R. Ciuryło, *Testing optical lock calibration procedures: Absolute frequency measurements of rubidium 5S-7S transition*, 2013 IFCS-EFTF Proceedings, 402 (2013).
- [33] P. Krehlik, L. Buczek, J. Kołodziej, M. Lipiński, L. Śliwczyński, J. Nawrocki, P. Nogaś, A. Marecki, E. Pazderski, P. Ablewski, M. Bober, R. Ciuryło, A. Cygan, D. Lisak, P. Masłowski, P. Morzyński, M. Zawada, R. M. Campbell, J. Pieczerak, A. Biniewicz, K. Turza, *Fibre-optic delivery of time and frequency to VLBI station*, *Astronomy and Astrophysics*, **603**, A48 (2017).
- [34] P. Morzyński, M. Bober, D. Bartoszek-Bober, J. Nawrocki, P. Krehlik, Ł. Śliwczyński, M. Lipiński, P. Masłowski, A. Cygan, P. Dunst, M. Garuś, D. Lisak, J. Zachorowski, W. Gawlik, C. Radzewicz, R. Ciuryło, M. Zawada, *Absolute measurement of the $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$ clock transition in neutral ^{88}Sr over the 330 km-long stabilized fibre optic link*, *Scientific Reports*, **5**, 17495 (2015).
- [35] P. Wcisło, P. Morzyński, M. Bober, A. Cygan, D. Lisak, R. Ciuryło, M. Zawada, *Experimental constraint on dark matter detection with optical clocks*, *Nature Astronomy*, **1**, 0009 (2016).
- [36] Ch. Q. Choi, *Hunting dark matter between the ticks of an atomic clock*, *Scientific American*, **12**, 2016.
- [37] M. Witkowski, G. Kowzan, R. Munoz-Rodriguez, R. Ciuryło, P. S. Żuchowski, P. Masłowski, M. Zawada, *Absolute frequency and isotope shift measurements of mercury $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ transition*, *Optics Express*, **27**, 11069 (2019).
- [38] A. Cygan, D. Lisak, P. Masłowski, K. Bielska, S. Wójtewicz, J. Domysławska, R. S. Trawiński, R. Ciuryło, H. Abe, J. T. Hodges, *Pound-Drever-Hall-locked, frequency-stabilized cavity ring-down spectrometer*, *Review of Scientific Instruments*, **82**, 063107 (2011).
- [39] D. Lisak, P. Masłowski, A. Cygan, K. Bielska, S. Wójtewicz, M. Piwiński, J. T. Hodges, R. S. Trawiński, R. Ciuryło, *Line shapes and intensities of self-broadened $\text{O}_2 b^1\Sigma_g^+ (v = 1) \leftarrow X^3\Sigma_g^- (v = 0)$ band transitions measured by cavity ring-down spectroscopy*, *Phys. Rev. A*, **81**, 042504 (2010).
- [40] A. Cygan, D. Lisak, R. S. Trawiński, R. Ciuryło, *Influence of the line-shape model on the spectroscopic determination of the Boltzmann constant*, *Phys. Rev. A*, **82**, 032515 (2010).
- [41] S. Wójtewicz, R. Gotti, D. Gatti, M. Lamperti, P. Laporta, H. Józwiak, F. Thibault, P. Wcisło, M. Marangoni, *Accurate deuterium spectroscopy and comparison with ab initio calculations*, *Phys. Rev. A*, **101**, 052504 (2020).
- [42] A. Cygan, D. Lisak, P. Masłowski, M. Bober, M. Zawada, E. Pazderski, R. Ciuryło, *Cavity mode-width spectroscopy with widely tunable ultra narrow laser*, *Optics Express*, **21**, 29744 (2013).
- [43] A. Cygan, P. Wcisło, S. Wójtewicz, P. Masłowski, J.T. Hedges, R. Ciuryło, D. Lisak, *One-dimensional*

- frequency-based spectroscopy*, Optics Express, **23**, 14472 (2015).
- [44] D. Lisak, A. Cygan, S. Wójtewicz, P. Wcisło, M. Zaborowski, G. Kowzan, P. Masłowski, R. Ciuryło, *Spectral line-shape study by cavity-enhanced complex refractive index spectroscopy*, Journal of Physics: Conf. Series, **810**, 012007 (2017).
- [45] G. Kowzan, K. F. Lee, M. Paradowska, M. Borkowski, P. Ablewski, S. Wójtewicz, K. Stec, D. Lisak, M. E. Fermann, R. S. Trawiński, P. Masłowski, *Self-referenced, accurate and sensitive optical frequency comb spectroscopy with a virtually imaged phased array spectrometer*, Optics Letters, **41**, 974 (2016).
- [46] G. Kowzan, D. Charczun, A. Cygan, R. S. Trawiński, D. Lisak, P. Masłowski, *Broadband optical cavity mode measurements at Hz-level precision with a comb-based VIPA spectrometer*, Scientific Reports, **9**, 8206 (2019).
- [47] D. Lisak, D. Charczun, A. Nishiyama, T. Voumard, T. Wildi, G. Kowzan, V. Brasch, T. Herr, A. J. Fleisher, J. T. Hodges, R. Ciuryło, A. Cygan, P. Masłowski, *Dual-comb cavity ring-down spectroscopy*, Scientific Reports, **12**, 2377 (2022).
- [48] K. Sędziak, M. Lasota, P. Kolenderski, *Reducing detection noise of a proton pair in a dispersive medium by controlling its spectra entanglement*, Optica, **4**, 84 (2017).
- [49] A. Divochiy, M. Misiaszek, Y. Vakhtomin, P. Morozov, K. Smirnov, P. Zolotov, P. Kolenderski, *Single photon detection system for visible and infrared spectrum range*, Optics Letters, **43**, 6085 (2018).
- [50] K. Sędziak-Kacprowicz, A. Czerwiński, P. Kolenderski, *Tomography of time-bin quantum states using time-resolved detection*, Phys. Rev. A, **102**, 052420 (2020).
- [51] K. Sędziak-Kacprowicz, M. Lasota, P. Kolenderski, *Remote temporal wavepacket narrowing*, Scientific Reports, **9**, 1 (2019).
- [52] M. Gieysztor, M. Misiaszek, J. van der Veen, W. Gawlik, F. Jelezko, P. Kolenderski, *Interaction of a heralded single photon with nitrogen-vacancy centers in a diamond*, Optics Express, **29**, 564 (2021).