

Rada Dyscypliny Nauki Fizyczne
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
ul. Gagarina 11, 87-100 Toruń
za pośrednictwem:
Rady Doskonałości Naukowej
pl. Defilad 1
00-901 Warszawa
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

Wnioskodawca: Przemysław Głowacki

Miejsce pracy:

Instytut Badań Materiałowych i Inżynierii Kwantowej
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

Wniosek

z dnia 7.04.2023 roku

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego
w dziedzinie **nauk ścisłych i przyrodniczych** w dyscyplinie¹ **nauki fizyczne**

Określenie osiągnięcia naukowego będącego podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego:

cykl powiązanych tematycznie opublikowanych artykułów naukowych o tytule

**„Badania struktury elektronowej wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań
w zegarach optycznych”.**

Wnioskuje – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 zm.) – aby komisja habilitacyjna podejmowała uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu **tajnym/jawnym**^{*2}

Zostałem poinformowany, że:

Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości Naukowej z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).

Kontakt za pośrednictwem e-mail: kancelaria@rdn.gov.pl, tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu.

Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c) Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz art.

¹ Klasyfikacja dziedzin i dyscyplin wg. rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).

² * Niepotrzebne skreślić.

232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu przeprowadzenie postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.

Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest na stronie www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html

.....
Głowacki P.
.....
(podpis wnioskodawcy)

Załączniki:

- 1) Dane wnioskodawcy (w języku polski i angielskim - pliki pdf podpisane **podpisem zaufanym** - tylko na nośniku danych – pendrive)
- 2) Autoreferat (w języku polski i angielskim – pliki pdf podpisane **podpisem zaufanym** - tylko na nośniku danych – pendrive)
- 3) Wykaz osiągnięć naukowych, stanowiących znaczny wkład w rozwój dyscypliny fizyka (w języku polskim i angielskim – pliki pdf podpisane **podpisem zaufanym** - tylko na nośniku danych – pendrive)
- 4) Poświadczona za zgodnością z oryginałem kopia dyplomu doktorskiego wraz z podpisem wnioskodawcy (tylko na nośniku danych – pendrive)
- 5) Kopie publikacji naukowych wchodzących w skład cyklu prac powiązanych tematycznie (tylko na nośniku danych – pendrive)
- 6) Kopie oświadczeń współautorów publikacji dotyczących ich udziału w pracach naukowych (tylko na nośniku danych – pendrive)
- 7) Kopie dokumentów poświadczające wybrane osiągnięcia (tylko na nośniku danych – pendrive)
- 8) Wersja elektroniczna wniosku (2 egzemplarze, każda na jednym nośniku danych pendrive)

Załącznik nr 2

**do wniosku dr inż. Przemysława Głowackiego
o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego**

**Autoreferat
(w języku polskim)**

**Instytut Badań Materiałowych i Inżynierii Kwantowej
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej
Politechnika Poznańska
Piotrowo 3, 60-965 Poznań**

Poznań 2023

Spis treści

1	Dane osobowe	1
2	Dyplomy, stopnie naukowe	1
3	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	1
4	Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)	2
4.1	Tytuł osiągnięcia naukowego	2
4.2	Wykaz prac stanowiących osiągnięcie naukowe [H1-H10]	2
4.3	Wstęp	4
4.4	Motywacja i cele badawcze	5
	<i>Kandydaci na Optyczne Zegary Atomowe (OZA)</i>	6
	Atom chromu Cr I	7
	Atom manganu Mn I	8
	<i>Kandydat na Optyczny Zegar Nuklearny (OZN)</i>	10
	Jonu toru Th II - Th V	10
4.5	Metodyka badań i układy eksperymentalne	13
4.6	Omówienie prac H1 - H10 stanowiących osiągnięcie naukowe	16
4.7	Podsumowanie	28
	1. <i>Badania atomu chromu</i>	28
	2. <i>Badania atomu manganu</i>	29
	3. <i>Badania jonu toru i badania pomocnicze</i>	30
4.8	Plany naukowe na przyszłość	32
5	Wykaz istotnej aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej instytucji naukowej	32
6	Wykaz osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę	34
6.1	Dydaktyka	34
	6.1.1 Zajęcia dydaktyczne	34
	6.1.2 Opieka naukowa nad studentami	35
	6.1.3 Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	36
6.2	Organizacja	36
6.3	Popularyzacja nauki	37
7	Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze	37
7.1	Podsumowanie dorobku naukowego	37
7.2	Przebieg pracy naukowej przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora	38
7.3	Przebieg pracy naukowej po uzyskaniu stopnia naukowego doktora	38
7.4	Prezentacja osiągnięcia naukowego na seminariach w krajowych instytucjach naukowych	40
	Literatura	40

1 Dane osobowe

Przemysław Głowacki

Web of Science: ResearchID: [F-1511-2013](#)

ORCID: [0000-0003-0899-9106](#)

Scopus AI: [ID 56708404500](#)

2 Dyplomy, stopnie naukowe

- **doktor nauk fizycznych** w zakresie **fizyki**
Wydział Fizyki Technicznej, Politechnika Poznańska, 29.10.2009
tytuł rozprawy doktorskiej: *Badanie struktury nadsubtelnej wybranych pierwiastków z otwartą podpowłoką nd metodami spektroskopii laserowej w katodzie wękowej i na strumieniu atomowym*
praca zrealizowana w Katedrze Inżynierii i Metrologii Kwantowej
promotor: prof. dr hab. Jerzy Dembczyński
- **magister inżynier** w zakresie **fizyki materiałów i nanotechnologii**
Wydział Fizyki Technicznej, Politechnika Poznańska, 22.06.2004
tytuł pracy magisterskiej: *Badanie obsadzeń stanów trypletowych barwników porfiryńowych*
praca zrealizowana w Zakładzie Fizyki Molekularnej, Instytutu Fizyki
promotor: prof. dr hab. Danuta Wróbel
ocena: bardzo dobra
dyplom ukończenia studiów z wyróżnieniem

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- od 01.09.2022 - obecnie - ekspert ds. badań i rozwoju w dziedzinie pierwotnych i optycznych wzorców częstotliwości (1/2 etatu)
Zakład Długości i Czasu, Główny Urząd Miar, Warszawa
- od 01.10.2019 - obecnie - adiunkt
Zakład Inżynierii i Metrologii Kwantowej, Instytut Badań Materiałowych i Inżynierii Kwantowej, Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej
- 12.01.2015 - 31.12.2017 - staż podoktorski (*asystent naukowy* - niem. *wissenschaftlicher Mitarbeiter*)
Zakład Czasu i Częstotliwości, Wydział Optyki
Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB Brunshwik, Niemcy - niemiecki Krajowy Instytut Metrologiczny
- 05.05.2014 - 30.12.2014 - staż podoktorski (*pracownik wizytujący* - *pracownik naukowy* - ang. *visiting worker* - *research associate*)
National Physical Laboratory NPL Teddington, Wielka Brytania - brytyjski Krajowy Instytut Metrologiczny
- 01.12.2009 - 30.09.2019 - asystent
Katedra Fizyki Atomowej, Wydział Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej
Laboratorium Inżynierii i Metrologii Kwantowej, Wydział Fizyki Technicznej Politechniki

Poznańskiej (po przekształceniu katedry w laboratorium, od 01.12.2012)
 Zakład Inżynierii i Metrologii Kwantowej, Instytut Badań Materiałowych i Inżynierii
 Kwantowej, Wydział Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej (po utworzeniu ww. instytutu
 i przekształceniu laboratorium w zakład w ramach instytutu, od 01.01.2016)

- 01.02.2007 - 30.11.2009 - starszy referent techniczny
 Katedra Fizyki Atomowej, Wydział Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej

4 Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) wskazuję cykl artykułów naukowych powiązanych tematycznie pod tytułem:

Badania struktury elektronowej wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w zegarach optycznych

4.2 Wykaz prac stanowiących osiągnięcie naukowe [H1-H10]

Przedstawiam do postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego 10 publikacji stanowiących cykl artykułów naukowych powiązanych tematycznie. Wszystkie publikacje zostały napisane po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora i opublikowane w czasopismach znajdujących się w wykazie czasopism naukowych i recenzowanych materiałów konferencyjnych z konferencji międzynarodowych Ministra Edukacji i Nauki (MEiN), podanym do publicznej wiadomości w komunikacie z dnia 1 grudnia 2021 roku. Przedstawiona liczba punktów MEiN została zaczerpnięta z wyżej wymienionego wykazu. Poza artykułem [H1], prace zostały opublikowane w czasopismach z bazy Institute for Scientific Information (ISI), tak zwanej „listy filadelfijskiej”. Praca [H1] ukazała się w branżowym polskim czasopiśmie Elektronika (KONSTRUKCJE, TECHNOLOGIE, ZASTOSOWANIA) wydawnictwa SIGMA-NOT (w numerze 6 prezentowane były między innymi zagadnienia związane z inżynierią i metrologią kwantową). Dla danego czasopisma podano „współczynnik wpływu” (*Impact Factor* - IF) w roku opublikowania artykułu, za wyjątkiem prac opublikowanych po roku 2021.

[H1]	A. Krzykowski, P. Głowacki <i>Experimental study of radio frequency power broadening in ABMR-LIRF method,</i> Elektronika 6 : 31-34 (2011) https://www.sigma-not.pl	IF: — MEiN: 20
[H2]	A. Krzykowski, P. Głowacki , A. Jarosz <i>Precise measurements of the hyperfine structure of the levels belonging to the terms $3d^5 4s^5 G$ and $5P$ in $Cr(I)$,</i> Acta Physica Polonica A 122 , p. 78-81 (2012) doi: 10.12693/APhysPolA.122.78	IF: 0,444 MEiN: 40
[H3]	P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz <i>Investigation of the hyperfine structure of electronic levels in chromium atom,</i> European Physical Journal: Special Topics 222 , 2345-2351 (2013) doi: 10.1140/epjst/e2013-02015-x	IF: 1,862 MEiN: 70

[H4]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Proposed clock transition in atomic chromium and the possible detection schemes,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 291 , 108331 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108331	IF: 2,342 MEiN: 100
[H5]	P. Głowacki , D. Stefańska, M. Elantkowska, J. Ruczkowski <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. I. Even-parity level system,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 249 , 107013 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107013	IF: 2,468 MEiN: 100
[H6]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. II. Odd-parity level system,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 253 , 107138 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107138	IF: 2,468 MEiN: 100
[H7]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Estimation of radiative parameters for atomic manganese from the point of view of possible clock transitions and laser cooling schemes,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 276 , 107898 (2021) doi: 10.1016/j.jqsrt.2021.107898	IF: 2,342 MEiN: 100
[H8]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, M. Chomski, B. Furmann <i>Hyperfine structure investigations of Mn I,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 287 , 108245 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108245	IF: 2,342 MEiN: 100
[H9]	J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf and E. Peik <i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> Nature 556 , 321-325 (2018) doi: 10.1038/s41586-018-0011-8	IF: 43,070 MEiN: 200
[H10]	P. Głowacki , E. Peik <i>Fluorescence properties of ions adsorbed from aqueous solutions on fused silica and CaF_2 - test cases of Eu^{3+} and Tb^{3+},</i> Journal of Luminescence 247 , 118865 (2022) doi: 10.1016/j.jlumin.2022.118865	IF: 4,171 MEiN: 100

Prace [H1-H10]: sumaryczny **IF** = **61,494**, ($\text{IF}_{5\text{years}} = 64,589$).

Prace [H1-H10]: sumaryczna liczba punktów **MEiN** = **930**.

W pracach [H1, H3-H8, H10] jestem autorem korespondencyjnym.

UWAGA

Kopie powyższych prac wraz z informacjami uzupełniającymi (*Supplementary Information - SI*) zostały przedstawione w załączniku nr 5 do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego. Wkład poszczególnych współautorów został przez nich opisany w oświadczeniach (załącznik nr 6).

W **Wykazie osiągnięć naukowych** (załącznik nr 3) przedstawiłem mój udział w przedmiotowych publikacjach, procentowy i merytoryczny. Natomiast w załączniku nr 7 przedstawiłem kopie dokumentów poświadczające wybrane osiągnięcia, wskazane zarówno w niniejszym **Autoreferacie** (załącznik nr 2), jak i w **Wykazie osiągnięć naukowych** (załącznik nr 3).

Cytowanie odnośników literaturowych w poniższym opisie osiągnięcia naukowego jest następujące: symbol **H** oznacza wybraną publikację z cyklu artykułów stanowiących osiągnięcie naukowe, symbol **A** - inną publikację, której jestem współautorem, wskazaną w **Wykazie osiągnięć naukowych** (załącznik nr 3), **K** - komunikat konferencyjny (załącznik nr 3), **[numer]** - inne źródło przedstawione w wykazie literatury.

4.3 Wstęp

Dokładne pomiary czasu odgrywają istotną rolę w naszym codziennym życiu. Pozwalają na niezawodną nawigację (GPS, Galileo), na przeprowadzanie niezwykle dokładnych eksperymentów i stanowią podstawę zsynchronizowanej światowej wymiany danych w sieciach teleinformatycznych (np. Internet). Wszystkie te aplikacje wymagają coraz to precyzyjniejszych zegarów. Mimo iż precyzja zegarów atomowych rośnie, a granica dokładności pomiaru czasu i częstotliwości przesuwa się w kierunku 18 cyfry znaczącej, ciągle udoskonalanie zegarów już istniejących i poszukiwania nowych rozwiązań wydają się koniecznością.

Od 1967 roku sekunda jest zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$ Hz częstotliwości przejścia między podpoziomami struktury nadsubtelnej (*hyperfine structure* - *hfs*) niezaburzonego stanu podstawowego atomu cezu 133, a cezowe zegary atomowe są nazywane *pierwotnymi wzorcami częstotliwości* (ang. *Primary Frequency Standards*). Definicja ta nie uległa zmianie nawet po dniu 20 maja 2019 roku, gdy jednostki układu SI zostały sformułowane w kategoriach stałych podstawowych będących najbardziej stabilnymi wielkościami w nauce. Międzynarodowe Biuro Miar i Wąg (BIPM - *Bureau International des Poids et Mesures*) rekomenduje również wiele wtórnych wzorców czasu i częstotliwości, opartych na istniejących optycznych zegarach atomowych. Jednak nadal poszukiwane są nowe, konkurencyjne w stosunku do już istniejących układy mogące w przyszłości pełnić taką rolę.

W Polsce zagadnieniami związanymi z zegarami atomowymi zajmuje się kilka grup badawczych. Dwa pierwotne zegary atomowe oparte na konstrukcji fontanny cezowej, o nazwach AOS-CsF1 i AOS-CsF2, znajdują się odpowiednio w Laboratorium Czasu i Częstotliwości w Obserwatorium Astrogeodynamicznym w Borówcu pod Poznaniem, należącym do Centrum Badań Kosmicznych (CBK) Polskiej Akademii Nauk (PAN), oraz w Poznańskim Centrum Sferkomputerowo-Sieciowym (PCSS). Z kolei w Krajowym Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej (FAMO), mającym swoją siedzibę na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, funkcjonują już dwa optyczne zegary atomowe na atomach strontu, a kolejny jest w budowie. W strukturę KL FAMO zaangażowane są również Pierwotne Węzłowe Laboratoria FAMO na Uniwersytecie Jagiellońskim i Uniwersytecie Warszawskim. Wymieniając krajowe instytucje zajmujące się tematyką zegarów atomowych, należy również wspomnieć o Zakładzie Czasu i Długości Głównego Urzędu Miar w Warszawie, który prowadzi prace w dziedzinie pomiarów czasu i częstotliwości w zakresie: atomowych wzorców czasu i częstotliwości, wyznaczania atomowych skal czasu, precyzyjnego transferu czasu i częstotliwości, a także wyznaczania i dystrybucji czasu urzędowego na obszarze Rzeczypospolitej Polskiej.

Artykuły [**H1-H10**], wchodzące w skład osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego, zostały opublikowane w latach 2011-2022, i są rezultatem pracy na Politechnice Poznańskiej, mojej macierzystej jednostce naukowej [**H1-H8**], jak również pracy w Zakładzie Czasu i Częstotliwości, PTB Brunzwik w Niemczech podczas mojego pobytu na stażach naukowych [**H9-H10**].

Tematyką badawczą związaną z **optycznymi zegarami atomowymi** oraz **optycznym zegarem nuklearnym** zainteresowałem się w roku 2010, krótko po uzyskaniu stopnia doktora, podczas mojego pierwszego stażu naukowego w PTB Brunzwik w grupie dr hab. Ekkeharda Peika,

prof. PTB. Ostatnie kilkanaście lat było dla mnie czasem wyężonej działalności naukowo-badawczej, zogniskowanej z jednej strony na poszukiwaniu nowych kandydatów do realizacji optycznych zegarów atomowych, a z drugiej strony na współudziale w pracach nad jedynym w swoim rodzaju optycznym zegarem nuklearnym.

Wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego prace [H1-H8], zrealizowane na Politechnice Poznańskiej, dotyczą badań pozwalających na uzyskanie możliwie pełnego opisu elektronowej struktury energetycznej atomów wybranych pierwiastków z grupy 3d (chromu i manganu). Poprawny opis struktury elektronowej stanowi podstawę do efektywnych poszukiwań układów poziomów elektronowych o własnościach niezbędnych do realizacji optycznych zegarów atomowych, a konkretnie przejść zegarowych, schematów chłodzenia laserowego oraz przejść detekcyjnych. Natomiast w przypadku badań wykonanych podczas stażów naukowych w PTB Brunzshwik zasadniczym celem była spektroskopowa charakteryzacja stanu izomerowego jądra izotopu ^{229}Th stanowiąca krok milowy w kierunku realizacji nuklearnego zegara optycznego w oparciu o spułapkowane jony (praca [H9]). Przeprowadzono również badania pomocnicze mające na celu przetestowanie metod związanych z możliwą implementacją w oparciu o kryształy domieszkowane jonami ^{229}Th (praca [H10]).

Cechą wspólną większości publikacji z cyklu są badania metodami spektroskopii laserowej pozwalające na uzyskanie informacji o strukturze elektronowej atomów lub jonów wybranych pierwiastków, w celu ich wykorzystania do konstrukcji ultraprecyzyjnych zegarów optycznych. Publikacje [H1-H3] koncentrowały się na bardzo precyzyjnych pomiarach wybranych poziomów atomu chromu (metodą podwójnego rezonansu optyczno-mikrofalowego), natomiast w publikacjach [H5, H6, H8] badano systematycznie poziomy atomu manganu (metodą laserowo indukowanej fluorescencji), dodatkowo wspierając analizę struktury elektronowej obliczeniami półempirycznymi. Publikacja [H7] nie zawiera nowych wyników eksperymentalnych, prezentuje natomiast koncepcję zegara optycznego na atomie manganu, w oparciu o wcześniejsze wyniki i analizę półempiryczną parametrów przejść radiacyjnych.

Prace [H4, H9] są związane z eksperymentalnym badaniem przejść detekcyjnych dla przejść zegarowych, odpowiednio w atomie chromu oraz jądrze jonu toru ($^{229}\text{Th}^{2+}$), co jest równie istotnym zagadnieniem w opracowaniu koncepcji zegara optycznego jak badanie samego przejścia zegarowego. Praca [H10] jest skoncentrowana na badaniach pomocniczych w konstrukcji nuklearnego zegara optycznego na kryształach domieszkowanych jonami ^{229}Th . W pracy tej, na przypadkach innych wybranych jonów, testowano szybką i tanią metodę domieszkowania powierzchniowego. Do charakteryzacji obiektu badań użyto metod spektroskopii, w której źródłem światła wzbudającego nie był laser, lecz diody LED wysokich mocy.

4.4 Motywacja i cele badawcze

Optyczne zegary atomowe opracowane w ciągu ostatnich dwóch dekad opierają się na wybranych przejściach elektronowych w obojętnych atomach i jonach różnych pierwiastków. Przejścia te zachodzą ze stanu podstawowego i są wzbronione przez kwantowe reguły wyboru.

Jednym z najistotniejszych parametrów charakteryzujących przejście zegarowe jest wysoki współczynnik dobroci przejścia optycznego Q , zlokalizowanego w obszarze widmowym od podczerwieni do nadfioletu próżniowego, dostępnym dla laserów o wysokiej stabilności. Współczynnik dobroci jest definiowany jako $Q = \nu/\Delta\nu$, gdzie ν to częstotliwość przejścia, $\Delta\nu$ - naturalna szerokość przejścia, określana jako szerokość połówkowa linii widmowej (FWHM, ang. *full width at half maximum*).

Innym podstawowym wymogiem jest możliwość optycznego schładzania atomów lub jonów do temperatury w zakresie pojedynczych mikrokKelwinów. Preferowane są schematy chłodzenia bezpośredniego, chociaż nie wyklucza się również zastosowania tzw. chłodzenia sympatycznego (współchłodzenia, ang. *sympathetic cooling*) przez inne rodzaje atomów lub jonów, pod warunkiem, że oba rodzaje mogą zostać uwięzione w tym samym potencjale pułapki, a transfer energii między nimi jest wydajny. Inne pożądane cechy to m.in. odporność częstotliwości przejścia zegarowego na różne czynniki zakłócające, np. zewnętrzne pola elektryczne lub magnetyczne.

Z drugiej strony niektóre przejścia zegarowe są szczególnie interesujące ze względu na ich stosunkowo dużą wrażliwość na potencjalne zmiany podstawowych stałych (np. stałej struktury subtelnej $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$), przewidywane przez niektóre teorie fundamentalnych oddziaływań w przyrodzie (tzw. teorie wszystkiego), gdyż stwarza to możliwości wykorzystania tych przejść w ultraprecyzyjnych testach.

Bardziej szczegółową dyskusję różnych aspektów zegarów optycznych można znaleźć m. in. w artykułach przeglądowych [1–4]. W pewnych warunkach możliwa jest budowa kompaktowych zegarów przenośnych, co ułatwia m. in. precyzyjne lokalne pomiary pola grawitacyjnego. Przegląd różnych implementacji przenośnych zegarów optycznych zawiera praca [5].

Zasadniczym celem naukowym realizowanym w ramach cyklu publikacji [H1-H10] było zbadanie struktury energetycznej atomów/jonów wybranych pierwiastków: chromu, manganu i toru, pod kątem zastosowań w optycznych zegarach atomowych i w optycznym zegarze nuklearnym.

Jednym z zadań było uzyskanie możliwie pełnego opisu elektronowej struktury energetycznej atomów wybranych pierwiastków z otwartą powłoką 3d - **chromu i manganu** [H1-H8]. Wyniki precyzyjnych pomiarów eksperymentalnych wraz z półempiryczną analizą struktury atomu złożonego pozwolą wskazać układy poziomów elektronowych o szczególnych własnościach interesujących z punktu widzenia zastosowań w dziedzinie kwantowej inżynierii i metrologii, a w szczególności zagadnień związanych z **optycznymi zegarami atomowymi**. Badaniami objęto układy poziomów elektronowych należących zarówno do konfiguracji parzystych, jak i nieparzystych; parzystość rozumiana jest tutaj w tradycyjnym sensie, jako własność symetrii funkcji falowej w domenie przestrzennej.

Pozostała część cyklu obejmuje prace [H9-H10] związane z pionierskim projektem **optycznego zegara nuklearnego** opartego na przejściu między stanem podstawowym i wzbudzonym (izomerem) **jądra izotopu 229 toru**. Prace te powstały w ramach współpracy z wiodącą w tej dziedzinie grupą badawczą prof. E. Peika kierownika Zakładu Czasu i Częstotliwości, PTB Brunzshwik w Niemczech - słynnego na cały świat niemieckiego Narodowego Instytutu Metrologicznego (ang. **NMI** - *National Metrological Institute*).

Kandydaci na Optyczne Zegary Atomowe (OZA)

W ramach szeregu pierwiastków z otwartą podpowłoką 3d, tzw. „metali przejściowych”, jako przedmiot badań przedstawionych w prezentowanym cyklu publikacji wybrałem chrom i mangan. Brane pod uwagę kryteria obejmowały przede wszystkim poważny niedobór w dostępnej literaturze wyników eksperymentalnych dotyczących struktury elektronowej. Stwarzało to możliwości uzyskania znaczącej poprawy opisu struktury energetycznej wybranych pierwiastków. Oba pierwiastki posiadają relatywnie wysoko położone najniższe poziomy metastabilne, co wstępnie daje dobre rokowania dla poszukiwania przejść zegarowych w dziedzinie optycznej. Momenty magnetyczne powłok elektronowych w stanie podstawowym są dla obu pierwiastków stosunkowo duże, co ułatwia uwięzienie w pułapkach magneto-optycznych (MOT); dla atomu chromu procedura pułapkowania jest już dobrze opanowana [6, 7]. Istotny był też fakt, że każdy z tych pierwiastków jest łatwo dostępny w postaci metalicznych próbek do badań.

Chrom i mangan sąsiadują w tablicy Mendelejewa, jednak wykazują pewne istotne różnice. Dotyczą one np. naturalnego składu izotopowego. Chrom posiada cztery stabilne izotopy, z czego jeden nieparzysty o liczbie masowej 53 (udział niespełna 10%), posiadający niezerowy spin jądrowy, natomiast mangan ma tylko jeden izotop stabilny - nieparzysty ^{55}Mn .

Dla atomów obu pierwiastków znane były bardzo precyzyjne wartości rozszczepień najniżej leżących poziomów, zwłaszcza należących do multipletów podstawowych, wyznaczone w latach 60-tych i 70-tych ubiegłego stulecia. Rezultaty te dla atomu chromu zostały uzyskane metodą rezonansu magnetycznego na strumieniu atomowym (*Atomic Beam Magnetic Resonance* - ABMR) przez Childsa i Goodmana [8] oraz Pendlebury’ego i Smitha [9]. Natomiast dla atomu manganu Davis i in. [10] wyznaczyli wartości stałych rozszczepień nadsubtelnych poziomu podstawowego $^6\text{S}_{5/2}$ w eksperymencie

przeprowadzonym metodą pompowania optycznego z wymianą spinów między atomami manganu i rubidu.

Informacje o poziomach energetycznych i liniach widmowych dla atomów chromu i manganu są dostępne między innymi w upubliczniczonych bazach danych, takich jak [11–14]. Poniżej przedstawiono skrótowo stan wiedzy dla obu wybranych pierwiastków w momencie podjęcia badań ujętych w prezentowanym cyklu publikacji, tj. w roku 2010 dla chromu i w roku 2018 dla manganu.

Atom chromu Cr I

Jak już wspomniano, w naturalnym składzie chrom posiada cztery stabilne izotopy o następujących udziałach procentowych: ^{50}Cr 4,345 %, ^{52}Cr 83,789 %, ^{53}Cr 9,501 %, ^{54}Cr 2,365 %. Tylko jeden z izotopów, ^{53}Cr , wykazuje strukturę nadsubtelną wynikającą z niezerowej wartości spinowej liczby kwantowej jądra $I = 3/2$. Stan podstawowy atomu chromu to $3d^5(^6\text{S})4s\ a^7\text{S}_3$. Magnetyczny moment dipolowy jądra ^{53}Cr wynosi $\mu_I = -0,47454(3)\mu_N$ [15], natomiast elektryczny moment kwadrupolowy $Q = -0,22(1)$ barnów [A25]. Z punktu widzenia możliwości reakcji strumienia atomowego istotne są: temperatura topnienia $T_t = 1907\text{ }^\circ\text{C}$ [16] i temperatura wrzenia $T_w = 2671\text{ }^\circ\text{C}$ [16]. Ze względu na umiarkowane wartości jądrowych momentów elektromagnetycznych (w szczególności Q) obserwowane widma struktury nadsubtelnej linii widmowych są dość zwarte, a z uwagi na stosunkowo niewielkie wartości przesunięć izotopowych ich składowe są często ukryte pod dominującym w widmie sygnałem z izotopu parzystego ^{52}Cr , i dlatego wymagają badania za pomocą wysokorozdzielczych metod spektroskopowych.

Pierwsze badania spektroskopowe linii widmowych chromu przeprowadzili Catalán i Sancho w latach 30-tych XX wieku [17]; przedstawili ponad 700 sklasyfikowanych linii widmowych. Dwie dekady później Kiess zarejestrował około 4400 linii w zakresie widmowym od 1899 do 11610 Å [18]. Praca ta stanowi ogromną bazę danych z informacjami o liniach widmowych atomowego chromu, w większości sklasyfikowanych. Energie poziomów elektronowych wyznaczono z dokładnością do $0,05\text{ cm}^{-1}$.

Precyzyjne pomiary struktury nadsubtelnej nieparzystego izotopu ^{53}Cr zapoczątkowali na początku lat 60-tych XX wieku Childs i Goodman [8]. Wykorzystali oni metodę rezonansu magnetycznego na strumieniu atomowym (ABMR) do zbadania poziomu podstawowego $3d^54s\ a^7\text{S}_3$. W 1964 roku podobne pomiary stanu podstawowego Cr I wykonali Pendlebury i Smith [9]. Dwa lata później Bucka i in. [19] przeprowadzili badania dla dwóch multipletów ^7P należących do konfiguracji $3d^54p$ i $3d^54s4p$. Użyli oni spektroskopii krzyżowania poziomów na strumieniu atomowym, aby określić stałe struktury nadsubtelnej A (związane z oddziaływaniem magnetycznym dipolowym) dla poziomów $3d^54p\ z^7\text{P}_{2,3,4}^o$ i $3d^54s4p\ y^7\text{P}_3^o$. Dla powyższych multipletów Becker i in. [20] powtórzyli pomiary tą samą metodą, uzyskując wartości stałych struktury nadsubtelnej zarówno A jak i B (stałych oddziaływania elektrycznego kwadrupolowego). Dodatkowo po raz pierwszy uzyskali oni wyniki dla poziomu $3d^54s4p\ y^7\text{P}_2^o$.

Ertmer i in. [21] wykorzystali spektroskopię podwójnego rezonansu optyczno-mikrofalowego na strumieniu atomowym (ABMR-LIRF, ang. *Atomic Beam Magnetic Resonance detected by Laser Induced Resonance Fluorescence*) do zbadania struktury nadsubtelnej poziomów $3d^44s^2\ a^5\text{D}_{1,2,3,4}$. Na podstawie dokładnych wyników stałych B obliczyli elektryczny moment kwadrupolowy Q dla izotopu ^{53}Cr . Dodatkowo metodą fluorescencji indukowanej laserem na strumieniu atomowym uzyskali wartości stałych A i B dla poziomów $3d^54p\ z^5\text{P}_{2,3,4}^o$. Badania linii widmowych odpowiadających przejściom z poziomu podstawowego $3d^54s\ a^7\text{S}_3$ do poziomów $3d^54p\ z^7\text{P}_{2,3,4}^o$ metodą laserowej spektroskopii nasyceniowej przeprowadzili Reinhard i in. [22]. Wyznaczyli znak stałej A dla poziomu podstawowego i potwierdzili znaki stałych A i B dla poziomów $z^7\text{P}_{2,3,4}^o$. W tej pracy przedstawione zostały również czasy życia stanów $3d^54p\ z^7\text{P}_{4,3,2}$, $z^5\text{P}_{3,2,1}$, $3d^44s4p\ z^5\text{F}_{5,4,3,2}$ i $y^5\text{P}_3$, $3d^54d\ e^7\text{D}_5$ oraz $3d^54s5s\ f^7\text{D}_{5,4,3,2,1}$, określone na podstawie badania zaniku fluorescencji po impulsowym wzbudzeniu laserem.

W naszej grupie badania struktury nadsubtelnej atomu chromu prowadzone są od połowy lat 90-tych dwudziestego wieku. Dla poziomów z konfiguracji $3d^54s$, $3d^54p$ oraz $3d^44s4p$ badania eksperymentalne, głównie metodą laserowo indukowanej fluorescencji na strumieniu atomowym,

przeprowadził w swojej pracy doktorskiej Jarosz [23]. Praca ta zawierała stałe struktury nadsubtelnej A i B dla 25 poziomów elektronowych, wyznaczone na podstawie badania 36 linii widmowych dla izotopu ^{53}Cr . Część z tych wyników, dotyczących poziomów należących do multipletów $3d^54s\ a^5G$ i $3d^54s\ a^5P$, została opublikowana w pracy [A25]. Natomiast dla poziomu $3d^54s\ a^5S_2$ zastosowano dokładniejszą metodę ABMR-LIRF, która umożliwiła wyznaczenie stałych struktury nadsubtelnej A , B i C (oddziaływania magnetycznego oktopolowego).

W pracach opublikowanych do roku 2010 dane dotyczące struktury nadsubtelnej były niezwykle ubogie, zawierały wartości stałych dla zaledwie 14 poziomów parzystych oraz 8 poziomów nieparzystych (nie wliczając 16 poziomów z nieopublikowanej pracy doktorskiej Jarosza [23]).

Chociaż wiadomo było, że atom chromu można wykorzystać w takich aplikacjach kwantowych jak pułapkowanie zimnych atomów w pułapkach magneto-optycznych (MOT) [6, 24], co w dalszej konsekwencji doprowadziło do wytworzenia kondensatu Bosego-Einsteina (BEC) dla izotopu ^{52}Cr [25–27] oraz zdegenerowanego gazu Fermiego dla izotopu ^{53}Cr [28], to jednak w żadnej z dotychczasowych prac nie zaproponowano wykorzystania atomowego chromu do realizacji optycznego zegara atomowego.

Atom manganu Mn I

Mangan (Mn) umiejscowiony jest bezpośrednio za chromem w tablicy Mendelejewa. W naturalnym składzie mangan ma tylko jeden stabilny izotop ^{55}Mn , który wykazuje strukturę nadsubtelną ze względu na niezerową spinową liczbę kwantową jądra $I = 5/2$. Stanem podstawowym atomu manganu jest $3d^54s^2$ a $^6S_{5/2}$, a elektromagnetyczne momenty jądrowe są następujące: magnetyczny dipolowy $\mu_I = 3,468716(2)\mu_N$ [29], elektryczny kwadrupolowy $Q = 0,33(1)$ barnów [30]. Temperatura topnienia manganu wynosi $T_t = 1244\text{ }^\circ\text{C}$ [31], a temperatura wrzenia $T_w = 2095\text{ }^\circ\text{C}$ [32]. Wartości jądrowych momentów elektromagnetycznych (zwłaszcza Q) są niezbyt duże, co skutkuje niewielkim rozszczepieniem struktury nadsubtelnej linii widmowych, dlatego podobnie jak w przypadku atomu chromu, w badaniach spektroskopowych preferowane są metody o wysokiej zdolności rozdzielczej.

Pierwsze pomiary struktury nadsubtelnej poziomów Mn I przeprowadzili w latach trzydziestych XX wieku White i Ritschl (1930) [33, 34] przy użyciu spektrografu z pryzmatem i etalonu Fabry’ego-Perota, Mohammad i Sharma (1934) [35] za pomocą łuku manganowego w próżni, oraz Fisher i Peck (1939) [36] za pomocą lampy z katodą wnąkową i interferometru Fabry’ego-Perota. W sumie zmierzono wartości stałych hfs A dla 31 poziomów (17 nieparzystych i 14 parzystych).

W późniejszym okresie kilku autorów przeprowadziło dalsze badania widm Mn I; byli to między innymi: Murakawa (1955) [37] w wyładowaniu z katodą wnąkową i z rejestracją za pomocą etalonu Fabry’ego-Perota, Woodgate i Martin (1957) [38] z wykorzystaniem strumienia atomowego, Rottmann (1958) [39] używając interferometru Fabry’ego-Perota. Walther (1962) [40] badał poziomy nieparzyste $3d^54s4p$ z $^6P_{5/2,7/2}^o$ stosując strumień atomowy i spektrometr Fabry’ego-Perota. Później Handrich i in. [41] zmierzili strukturę nadsubtelną kolejnych trzech poziomów $3d^54s4p$ z $^6P_{3/2,5/2,7/2}^o$ metodą spektroskopii krzyżowania poziomów na strumieniu atomowym.

W 1971 roku Davis i in. [10] zmierzili bardzo dokładnie rozszczepienie nadsubtelne poziomu podstawowego a $^6S_{5/2}$ należącego do konfiguracji parzystej $3d^54s^2$; wyznaczyli stałe struktury nadsubtelnej A , B , C , a także górne granice stałych oddziaływań wyższych rzędów: D i E .

Luc i Gerstenkorn (1972) [42, 43] zbadali między innymi pięć poziomów parzystych należących do konfiguracji $3d^54s4d$: $e^6D_{1/2-9/2}$, oraz kolejne trzy poziomy: $3d^54s4p\ y^6P_{3/2,5/2,7/2}^o$, za pomocą interferometru Fabry’ego-Perota i spektrometru Fouriera. Ponadto w pracy [43] przedstawiono analizę struktury nadsubtelnej poziomów należących do najniższej konfiguracji $3d^54s4p$.

Dembczyński i in. (1979) [30] przeprowadzili dokładne pomiary poziomów parzystych $3d^64s$ a $^6D_{1/2-9/2}$ metodą ABMR-LIRF. Z tych pomiarów wyznaczono stałe hfs A i B , skorygowane o zaburzenia hfs drugiego rzędu. Dembczyński (1980) w swojej późniejszej pracy [44] przedstawił

wyniki analizy struktury subtelnej wybranych pierwiastków z otwartą podpowłoką 3d, w tym atomu manganu.

W 1981 roku Johann [45] (praca niepublikowana), stosując metodę ABMR-LIRF, wyznaczył stałe hfs dla poziomów parzystych $3d^64s$ $a^4D_{7/2-3/2}$ oraz dla poziomów nieparzystych $3d^64p$ z $4F^o_{9/2-3/2}$ i $3d^64p$ z $4D^o_{7/2-3/2}$. Jego praca zawiera również skorygowane wartości stałych hfs , które uwzględniały dodatkowo współczynniki kątowe oddziaływań w pierwszym i drugim rzędzie rachunku zaburzeń dla elementów niediagonalnych względem liczby kwantowej J w bazie stanów $\Psi(konfiguracja, vSLJF)$. Johann i in. (1981) [46] przeprowadzili systematyczne badania struktury nadsubtelnej wysoko położonych stanów metastabilnych w atomach 3d i znaleźli dowody na niezwykle silny efekt mieszania dalekich konfiguracji na macierz pozadiagonalnych elementów międzykonfiguracyjnych. Podali oni skorygowane wartości stałych hfs A i B dla poziomów parzystych Mn I $3d^54s^2$ $a^4G_{5/2-11/2}$.

Kronfeldt i in. [47] (1985) zbadali poziomy nieparzyste $4d^54s4p$ z $4P^o_{5/2,3/2}$ przy użyciu metod spektroskopii laserowej na strumieniu atomowym. Brodzinski i in. (1987) [48], używając lampy z katodą wnąkową i ciśnieniowego interferometru Fabry'ego-Perota, przeprowadzili badania trzech poziomów parzystych $3d^54s5s$ $e^4S_{3/2}$, $f^6S_{5/2}$ i $e^8S_{7/2}$ oraz dwóch poziomów nieparzystych: $3d^54s4p$ z $4P^o_{1/2}$ i $z^8P^o_{9/2}$. W 2000 roku Jarosz [23] (praca nieopublikowana) przeprowadził badania struktury nadsubtelnej atomu manganu metodą LIF na strumieniu atomowym. Zbadał 8 linii widmowych wyznaczając stałe A i B dla jednego poziomu parzystego i pięciu poziomów nieparzystych.

Başar i in. (2003) [49], stosując optogalwaniczną spektroskopię laserową w lampie z katodą wnąkową, zbadali strukturę nadsubtelną siedmiu poziomów parzystych. W 2003 r. Blackwell-Whitehead [50] (praca niepublikowana) oraz Lefèbre i in. [51] badali poziomy parzyste i nieparzyste metodą spektroskopii Fouriera (FT) w lampie z katodą wnąkową z czystego manganu: w pracach tych po raz pierwszy wyznaczone zostały nowe stałe A odpowiednio dla 16 i 8 poziomów. W roku 2005 Blackwell-Whitehead i in. [52] podali nowe eksperymentalne stałe struktury nadsubtelnej dla 13 poziomów parzystych i 49 poziomów nieparzystych w neutralnym atomie manganu, oparte na pomiarach metodą spektroskopii Fouriera w wyładowaniu lampy z katodą wnąkową.

W roku 2013 Klose i in. [53] badali poziomy Mn I za pomocą kolinearnej spektroskopii laserowej na strumieniu atomowym, wyznaczając stałe A i B dla poziomu parzystego $3d^54s4d$ $8D_{11/2}$. W roku 2015 Liu i in. [54], wykorzystując wzbudzenie laserem tytanowo-szafirowym w źródle jonów z gorącą wnąką, zademonstrowali trójfotonową jonizację rezonansową atomowego manganu i określili wartość potencjału jonizacji Mn I na $59959,56 \pm 0,01 \text{ cm}^{-1}$.

Struktura poziomów elektronowych atomu manganu wydawała się znacznie lepiej zbadana niż w przypadku atomu chromu, jednakże większość danych eksperymentalnych dotyczących struktury nadsubtelnej wykazywała relatywnie małą dokładność, ponieważ uzyskano je na podstawie badań metodą spektroskopii fourierowskiej [50–52] (podstawy tej techniki spektroskopowej omówione zostały np. w artykule przeglądowym [55]). Analiza danych literaturowych wykazywała też pewne niespójności pomiędzy różnymi źródłami. W chwili rozpoczęcia prac badawczych nad strukturą atomu manganu ze znanych 131 poziomów konfiguracji parzystych (wyznaczone wartości energii i liczby kwantowej całkowitego momentu pędu powłoki elektronowej J) tylko 46 poziomów posiadało wyznaczone wartości stałych hfs A , a dla nielicznych poziomów znane były wartości stałych B . W przypadku znanych 189 poziomów należących do konfiguracji nieparzystych, w literaturze można było znaleźć wartości stałych hfs A dla 78 poziomów, oraz dla niektórych z nich również wartości stałych B .

W żadnej z dotychczas opublikowanych prac nie przedstawiono propozycji realizacji optycznego zegara atomowego z wykorzystaniem atomowego manganu. W przeciwieństwie do atomu chromu, dla manganu brak jest doniesień literaturowych na temat ewentualnych prób chłodzenia chłodzenia laserowego i pułapkowania w MOT. Eustice i in. [56] zaproponowali wprawdzie schemat chłodzenia tego pierwiastka z wykorzystaniem wysoko położonego poziomu metastabilnego, jednak wydaje się on bardzo problematyczny i nie był dotychczas realizowany.

Kandydat na Optyczny Zegar Nuklearny (OZN)

Jony toru Th II - Th V

A gdyby tak zamiast przejść optycznych w powłoce elektronowej atomu wykorzystać zmianę stanu energetycznego jądra atomowego? Wraz z tym pytaniem narodziła się koncepcja **optycznego zegara nuklearnego**. Fundamentalny problem, jaki występuje w tej koncepcji to znalezienie pierwiastka z jądrem atomowym, które ma pierwszy stan wzbudzony położony ekstremalnie nisko w skali energii. W większości przypadków energie stanów wzbudzonych jąder atomowych mieszczą się w przedziale od kiloelektronowoltów (keV) do megaelektronowoltów (MeV). Okazuje się jednak, że istnieje jeden niepowtarzalny w całej znanej tablicy nuklidów - izotop ^{229}Th , który posiada ekstremalnie niski energetycznie stan izomerowy jądra ^{229m}Th - poniżej 10 eV. Historię jego pośredniego odkrycia w badaniach z użyciem technik spektroskopowych fizyki jądrowej oraz poszukiwań wartości energii przedstawia tabela 1.

Tabela 1: Historia poszukiwań energii stanu izomerowego dla izotopu ^{229}Th

E_{IS} [eV]	rok	Metoda	Ref.
< 100	1976	γ^a	[57]
1 (4)	1990	γ^a	[58]
< 5	1990	(d,t) ^b	[59]
3,5 (1,0)	1994	γ^a	[60]
3,4 (1,8)	2003	γ^a	[61]
7,6 (0,5)	2007	γ^a	[62]
7,8 (0,5)	2009	γ^a	[63]
8,28(0,17)	2019	IC ^c e	[64]
8,30(0,92)	2019	γ^a	[65]

^a - spektrometria promieniowania gamma,

(d,t)^b - badanie reakcji $^{230}\text{Th}(d,t)^{229}\text{Th}$, tzw. spektroskopia cząstek (ang. *particles spectroscopy*),

^c - bezpośredni pomiar nadwyżki energii elektronu emitowanego po wewnętrznej konwersji (IC) (szczegóły w pracy [66]).

Na podstawie badań Helmera i in. [60], Ekkehard Peik i Christian Tamm z PTB Brunzwik w roku 2003 zapostulowali wykorzystanie stanu izomerowego ^{229m}Th do zastosowań w metrologii czasu i częstotliwości, czyli budowie optycznego zegara nuklearnego [67]. Zaproponowali oni wysokorozdzielczą spektroskopię laserową przejścia między stanem podstawowym i izomerowym w jądrze toru 229, o oczekiwanej wówczas energii 3.5 eV, w izolowanych atomach (lub jonach). Wzbudzenie jądra miało być zrealizowane za pomocą procesu transferu energii z powłoki elektronowej do jądra poprzez oddziaływanie nadsubtelne lub za pomocą mechanizmu odwróconego mostu elektronowego (ang. *inverse electron bridge mechanism* [68]). Detekcja takiego wzbudzenia jądrowego miałyby się odbywać za pomocą pomiaru struktury nadsubtelnej jednocześnie dla atomów znajdujących się w podstawowym i wzbudzonym stanie jądra atomowego. Każdy z tych stanów ma inną wartość spinu jądrowego I - dla stanu podstawowego ^{229}Th $I = 5/2$, natomiast dla stanu izomerowego ^{229m}Th $I = 3/2$; musi to znaleźć wyraz w postaci zupełnie innej struktury nadsubtelnej dla tych samych detekcyjnych przejść optycznych w powłoce elektronowej. Zasugerowano również, że optyczny zegar nuklearny może być potencjalnie realizowany zarówno na pojedynczych atomach (lub jonach) lub chmurze uwiezionych cząstek w pułapkach, jak i w transparentnych kryształach domieszkowanych torem, np. ThO_2 lub ThF_4 , czy też szklach domieszkowanych torem. Wskazano, że spułapkowane i schłodzone laserowo jony Th^{3+} posiadają najkorzystniejszy schemat poziomów elektronowych, który dodatkowo jest wysoce odporny na systematyczne zmiany częstotliwości, i może stanowić podstawę realizacji zegara optycznego o bardzo wysokiej dokładności.

Badano zatem zarówno procesy dezaktywacji jak i wzbudzenia stanu izomerowego. Najbardziej znanym procesem dezaktywacji energii jądra atomowego jest „konwersja wewnętrzna” (IC, ang. *Internal Conversion*). W procesie tym elektron na jednym z poziomów energetycznych o energii wiązania mniejszej niż energia wzbudzenia jądra, na skutek pobrania energii uwolnionej w czasie dezaktywacji jądra opuszcza macierzysty atom, co zostało opisane w pracy [69]. Jeśli zamiast tego wzbudzony elektron nie jest wyrzucany z atomu, ale przenoszony bezpośrednio na inny poziom energetyczny w atomie, proces ten nazywa się „związaną konwersją wewnętrzną” (BIC, ang. *Bound Internal Conversion*) lub podprogową konwersją wewnętrzną [70, 71].

Odwrócenie tych procesów może być wykorzystane do wzbudzenia jądra. Wzbudzenie jądrowe przez wychwytywanie elektronów (NEEC, ang. *Nuclear Excitation by Electron Capture*) jest odwróceniem procesu konwersji wewnętrznej (IC), co oznacza, że w procesie tym jon wychwytywa elektron, a różnica między jego energią początkową (w kontinuum) i końcową (w docelowym stanie energetycznym) jest przekazywana do jądra [72]. Jeśli elektron przechodząc ze wzbudzonego stanu energetycznego w atomie do stanu niższego powoduje wzbudzenie jądra, proces ten nazywa się wzbudzeniem jądrowym przez przejście elektronowe (NEET, ang. *Nuclear Excitation by Electron Transition*). Proces ten po raz pierwszy przewidział Morita w roku 1973 [73], a następnie zaobserwowano w roku 1984 [74]. Szczegółowe omówienie procesu NEET i jego prawdopodobieństw można znaleźć w pracy [75].

Pierwsze eksperymenty mające na celu dokładne określenie częstotliwości przejścia stanu izomerowego za pomocą spektroskopii UV fotonów wywołanych rozpadem źródeł uranowych (^{233}U i ^{232}U) rozpoczęły się w roku 1997 [76, 77] i nie przyniosły oczekiwanych rezultatów: luminescencja wywołana promieniowaniem α w molekułach azotu (N_2) została pierwotnie błędnie zinterpretowana jako fotony emitowane na skutek dezaktywacji stanu izomerowego [78, 79].

Pod koniec pierwszej dekady XXI wieku w pracy [62] pośrednio określono energię izomeru, mierząc energie kilku linii widmowych z wyższych stanów wzbudzonych za pomocą spektrometru γ o wysokiej rozdzielczości. Wyznaczono wówczas wartość energii stanu izomerowego $E_{IS} = (7,6 \pm 0,5)$ eV, którą dwa lata później poddano kolejnej ewaluacji, podając nową wartość $E_{IS} = (7,8 \pm 0,5)$ eV [63]. Wówczas stało się już jasne, że **pośrednie wzbudzenie stanu izomerowego można uzyskać wyłącznie w jonach toru**, ponieważ energia jonizacji neutralnego atomu toru wynosi $E = 6,3$ eV [80] i jest niższa od energii izomeru.

W roku 2015 Jeet i in. [81] podjęli próbę bezpośredniego wzbudzenia optycznego izomeru; autorzy poddali kryształ LiSrAlF_6 domieszkowany izotopem ^{229}Th działaniu przestrajalnego promieniowania synchrotronowego i zmierzili wynikową fluorescencję. Jednak nie ogłosili żadnych dowodów na wzbudzenie jądrowe dla analizowanego zakresu energii od 7,3 eV do 8,8 eV i czasu życia izomeru $(1-2) \text{ s} < \tau < (2000 - 5600) \text{ s}$.

Pierwsza bezpośrednia obserwacja rozpadu stanu izomerowego została odnotowana przez grupę prowadzącą badania toru, kierowaną przez prof. Petera Thirolfa z Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) w Monachium w roku 2016 [66]. W eksperymencie tym w wyniku rozpadu α jądra ^{233}U powstaje między innymi izotop ^{229}Th , którego 2% stanowią jądra atomowe w stanie izomerowym. Za pomocą komory wypełnionej gazem buforowym, hamującym produkty rozpadu ^{233}U , i kwadrupolowego separatora masy o częstotliwości radiowej (rf), utworzono monoizotopową wiązkę jonów ^{229}Th o stanach ładunku do 3+, po czym skierowano ją na płytkę mikrokanalikową (MCP ang. *micro-channel plate*). Na MCP jony zneutralizowały się, a następnie stan izomerowy uległ dezaktywacji w procesie konwersji wewnętrznej. Energia wzbudzenia izomeru jest zatem przenoszona na najbardziej zewnętrzny elektron, który jest wyrzucany z atomu. Emitowane elektrony są wykrywane przez MCP i pokryty fosforem ekran oraz kamerę CCD. Niemniej jednak energia izomeru nie mogła być dokładnie wyznaczona ze względu na ograniczenia metody eksperymentalnej, określono jedynie, że jej wartość zawiera się w przedziale od 6,3 do 18,3 eV.

Niedawno grupa z LMU zgłosiła korektę wartości energii izomeru [64]. Używając zmodyfikowanej wersji swojej aparatury badawczej autorzy pracy zmierzili nadwyżkę energii elektronu emitowanego po konwersji wewnętrznej. W tym celu jony neutralizowano w locie, przepuszczając je przez folię grafenową,

a następnie mierzono energie emitowanych elektronów za pomocą spektrometru z butelką magnetyczną, aby ustalić, że energia wzbudzenia izomeru wynosi 8,28(0,17) eV. Wynik ten został ostatnio potwierdzony przez japoński zespół badawczy [65] na podstawie pomiarów metodą spektroskopii γ rozpadu poziomu $5/2^+$ [631] (rysunek 1.2 w pracy [65]); energia izomeru wyznaczona w tej pracy wynosiła $E_{IS} = 8,30(0,92)$ eV.

Właściwości izotopu toru 229 można podzielić na dwie kategorie:

1. niekorzystne

- (a) izotop radioaktywny: $\tau_{1/2} = 7990$ lat, otrzymywany sztucznie, niedostępny komercyjnie
- (b) energia jonizacji dla atomu neutralnego i jonów na kolejnych stopniach jonizacji: 6,1 eV, 11,5 eV, 18,3 eV ...; do wykorzystania w optycznym zegarze nuklearnym tylko jony
- (c) mały przekrój czynny na zderzenia: szacowana wartość $\sigma \approx 10^{-21}$ cm² (dla porównania dla atomu Cs - $\sigma \approx 10^{-9}$ cm²)
- (d) problem z konstrukcją precyzyjnego oscylatora do wzbudzenia przejścia izomerowego: w przypadku energii 7,8 eV potrzebny laser (VUV) o długości fali ok. 165 nm [63], dla 8,28 eV - ok. 150 nm [64]

2. korzystne

- (a) czas połowicznego rozpadu (zaniku) stanu izomerowego $T_{1/2} \approx 3300$ s [82], zatem spodziewane wąskie przejście zegarowe (mHz – μ Hz) [62]
- (b) bardzo dobre ekranowanie przez powłokę elektronową
- (c) możliwość osadzenia jonów ²²⁹Th w/na kryształach [83–85]
- (d) wysoka czułość przejścia izomerowego na zmiany stałej struktury subtelnej α i bezwymiarowy parametr oddziaływań silnych m_q/Λ_{QCD} [86]
- (e) mniejsza wrażliwość przejścia izomerowego na zakłócenia zewnętrzne, takie jak zmiany częstotliwości spowodowane przez pola elektromagnetyczne, w porównaniu z przejściami w zegarach atomowych (np. dla jonu ²²⁹Th³⁺ [87])

Tor jest pierwiastkiem chemicznym z grupy aktynowców. W naturalnym składzie izotopowym występuje jedynie jako izotop ²³²Th o zerowym spinie jądrowym ($I = 0$). Występują również śladowe ilości izotopów 227, 228, 230, 231 i 234. Natomiast izotopy 229 i 233 otrzymywane są syntetycznie. ²²⁹Th wykazuje strukturę nadsubtelną, związaną ze spinową liczbą kwantową jądra $I = 5/2$; jak już wspomniano, w stanie izomerowym jądra ^{229m}Th spin jądrowy wynosi $I = 3/2$. Stan podstawowy jonu toru Th⁺ to $6d7s^2 \ ^2D_{3/2}$. Magnetyczny moment dipolowy dla jądra izotopu ²²⁹Th wynosi $\mu_I = 0,360(7)\mu_N$ [88, 89], natomiast elektryczny moment kwadrupolowy został wyznaczony w dwóch niezależnych eksperymentach, w których otrzymano: $Q = 3,15(3)$ barnów [90] i $Q = 3,11(6)$ barnów [88, 89]. Z punktu widzenia możliwości uwięzienia jonów w pułapce elektromagnetycznej istotne są: temperatura topnienia $T_t = 1750^\circ$ C [16] i temperatura wrzenia $T_w = 4788^\circ$ C [16].

W przeszłości optyczne pomiary przesunięć izotopowych dla jonów toru oraz badania struktury nadsubtelnej dla kilku poziomów elektronowych jonu ²²⁹Th⁺ przeprowadzono przy wykorzystaniu lampy wyładowczej z katodą wnątkową, metodą spektroskopii fourierowskiej lub z użyciem precyzyjnych spektrografów z siatką dyfrakcyjną. Tymi metodami wykonano między innymi pomiar przesunięć izotopowych między izotopami ²³⁰Th i ²³²Th [91–93] oraz ²²⁹Th i ²³²Th [94], zbadano także strukturę nadsubtelną dla izotopu ²²⁹Th dla kilku przejść optycznych [95, 96].

Struktura nadsubtelna kilku innych linii widmowych dla jonu ²²⁹Th⁺ została zbadana metodami spektroskopii laserowej w pracach [97–99]; w szczególności skupiono się na przejściu ze stanu podstawowego należącego do konfiguracji parzystej $6d7s^2 \ ^2D$ o wartości $J = 3/2$ do nieparzystego stanu wzbudzonego $6d7s(3D)7p \ ^o$ (nie określony term) $24873,984$ cm⁻¹ o wartości $J = 5/2$, określając

również jego przesunięcie izotopowe w stosunku do izotopu $^{232}\text{Th}^+$ [99]. Do wyznaczenia struktury nadsubtelnej zastosowano technikę nasyceniowej spektroskopii absorpcyjnej.

W przypadku dwukrotnie zjonizowanych atomów toru $^{229}\text{Th}^{2+}$ nie ma żadnych informacji w literaturze na temat struktury nadsubtelnej, natomiast można znaleźć prace poświęcone badaniu struktury nadsubtelnej jonów $^{229}\text{Th}^{3+}$. Ten stopień jonizacji izotopu ^{229}Th posiada pojedynczy elektron walencyjny; mimo że gęstość poziomów elektronowych w okolicy energii 8 eV jest mała, co może być niekorzystne z punktu widzenia możliwości pośredniego wzbudzania stanu izomerowego, to z drugiej strony możliwe jest bardzo efektywne chłodzenie laserowe oraz zastosowanie czulej wysokorozdzielczej spektroskopii, co pokazały prace Campbella i in. [87, 100].

W przedstawionym obszernym przeglądzie literatury dotyczącym koncepcji realizacji **optycznego zegara nuklearnego** nie pojawiła się ani jedna wzmianka o pomyślnym wzbudzeniu przejścia izomerowego w jądrze izotopu ^{229}Th . Żadna praca nie zawierała też wyników badań eksperymentalnych dotyczących własności stanu izomerowego, a w szczególności nikt nie dokonał charakteryzacji stanu izomerowego metodami spektroskopii laserowej. Jednakże pierwsza bezpośrednia obserwacja rozpadu stanu izomerowego odnotowana przez grupę z LMU w roku 2016 [66], stworzyła dużą motywację do wspólnej pracy szeregu grup badawczych, by wykonać kolejny milowy krok w kierunku realizacji **optycznego zegara nuklearnego**, czyli podjęcia próby laserowej charakteryzacji stanu izomerowego ^{229m}Th .

4.5 Metodyka badań i układy eksperymentalne

W grupie badawczej związanej obecnie z Zakładem Inżynierii i Metrologii Kwantowej od lat prowadzone są badania łączące prace eksperymentalne z półempirycznym opisem struktury energetycznej atomów wieloelektronowych. W bardzo skrótowym ujęciu ich założenia można przedstawić następująco: metoda półempiryczna polega na wyrażeniu odpowiednich własności poziomów, np. energii, w formie parametrycznej; parametrami są odpowiednie dla konkretnych oddziaływań w atomie całki radialne, a stosowne współczynniki rozwinięcia obliczane są ściśle, zgodnie z kwantowymi regułami dodawania momentu pędu. Wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów, wartości parametrów można wyznaczyć przez ich dopasowanie do dostępnych danych eksperymentalnych. Podstawy parametryzacji struktury subtelnej zostały opisane w pracy [101], natomiast szczegóły analizy struktury nadsubtelnej zostały przedstawione w pracy [102]. Obie metody zostały dalej znacząco rozwinięte w ramach cyklu prac składających się na osiągnięcie habilitacyjne dr hab. Magdaleny Elantkowskiej (2017) [101, 103–113].

Przeprowadzenie za pomocą metod półempirycznych możliwie pełnej analizy struktury energetycznej poziomów elektronowych w atomach wybranych pierwiastków, która uwzględniałaby wszystkie istotne oddziaływania w atomie, jest uwarunkowane dostępnością możliwie bogatej w zasoby i wiarygodnej bazy danych eksperymentalnych dotyczących energii poziomów elektronowych i rozszczepień nadsubtelnych. Badania eksperymentalne przeprowadzone w ramach prezentowanego cyklu prac koncentrowały się zatem na dostarczeniu możliwie jak największej ilości i jak najwyższej jakości danych. Przede wszystkim dotyczyły one struktury nadsubtelnej poziomów elektronowych obu parzystości o znanych uprzednio energiach dla atomów chromu i manganu, położonych w większości powyżej 20000 cm^{-1} , dla których wcześniejsze dane literaturowe były dalece niewystarczające.

We wszystkich badaniach spektroskopowych prowadzonych w laboratorium grupy badawczej na Politechnice Poznańskiej (prace [H1-H8]) zastosowano metody: fluorescencji wzbudzonej wiązką laserową (LIF) lub podwójnego rezonansu optyczno-mikrofalowego (ABMR-LIRF) w wykorzystywanych układach eksperymentalnych, w których źródła swobodnych atomów stanowią strumień atomowy oraz lampa wyladowcza z katodą wnękową. Każda z metod i każdy z układów eksperymentalnych posiada swoje wady i zalety.

W lampie wyladowczej z katodą wnękową można w zbliżonych warunkach badać swobodne atomy neutralne i jony. W wyladowaniu efektywnie obsadzone są poziomy elektronowe o bardzo zróżnicowanych stopniach wzbudzenia, również leżące wysoko w skali energii (w przypadku badań

prorowadzonych w pracy [H8] nawet ok. 43500 cm^{-1}), co daje możliwość badania górnych poziomów wzbudzanych przejść w neutralnych atomach tuż przy granicy jonizacji. Stosowany wariant metody LIF, z selekcją długości fali obserwowanego promieniowania dostarcza dodatkowych informacji o poziomach górnych badanych przejść. Precyzyjny monochromator z siatką dyfrakcyjną pozwala na jednoznaczny identyfikację następujących po absorpcji rezonansowego światła laserowego przejść emisyjnych, tzw. kanałów fluorescencji. Ponieważ przejścia fluorescencyjne są determinowane przez reguły wyboru, ich znajomość znacznie ułatwia identyfikację wzbudzonych poziomów górnych, a zatem i samych przejść wzbudzających.

Stanowisko pomiarowe do badań w lampie wyładowczej z katodą wnękową zostało już opisane w wielu publikacjach, między innymi w pracach wchodzących w skład osiągnięcia naukowego dr. hab. Bogusława Furmanna [105, 114–122]. Sam również skonstruowałem dwa układy eksperymentalne oparte na lampach wyładowczych z katodą wnękową: jeden na potrzeby laboratorium mojego Zakładu na Politechnice Poznańskiej [A28], drugi do badań prowadzonych podczas mojej pierwszej wizyty w PTB Brunzshwik [A21].

Strumień atomowy daje możliwość znacznej redukcji efektu Dopplera dla obserwowanych sygnałów LIF w stosunku do układu lampy wyładowczej z katodą wnękową. Jednak jego zastosowanie limitowane jest do badań przejść optycznych z poziomów metastabilnych tej samej parzystości co poziom podstawowy w atomach neutralnych badanego pierwiastka. Obsadzenie poziomów metastabilnych we wszystkich badaniach prowadzonych z wykorzystaniem tego układu eksperymentalnego w ramach prezentowanego cyklu publikacji (prace [H1–H4] dla atomu chromu, prace [H5, H6] dla atomu manganu) realizowane było za pomocą elektrody wyładowania pomocniczego. Dawało to możliwość badania poziomów dolnych w przejściach optycznych o energiach do ok. 28600 cm^{-1} dla atomu chromu oraz do ok. 37400 cm^{-1} dla atomu manganu. Dodatkowo układ strumienia atomowego stwarza możliwość realizacji pomiarów metodą ABMR-LIRF, dzięki której udało się zbadać bardzo precyzyjnie strukturę nadsubtelny wybranych poziomów metastabilnych o energiach sięgających nawet do ok. 22000 cm^{-1} w atomie chromu. W posiadanym układzie strumienia atomowego nie dysponujemy możliwością precyzyjnej selekcji długości fali obserwowanych sygnałów fluorescencji, można jej dokonać jedynie zgrubnie wykorzystując do tego filtry optyczne.

Porównanie tej samej struktury nadsubtelnej linii widmowej atomu manganu badanej w pracy [H5], otrzymanej na obu układach eksperymentalnych metodą LIF, przedstawiono na rysunku 1. Wyraźnie widoczna jest niemal 40-krotna redukcja efektu Dopplera dla składowych struktury nadsubtelnej obserwowanych na strumieniu atomowym w stosunku do sygnału z lampy wyładowczej z katodą wnękową.

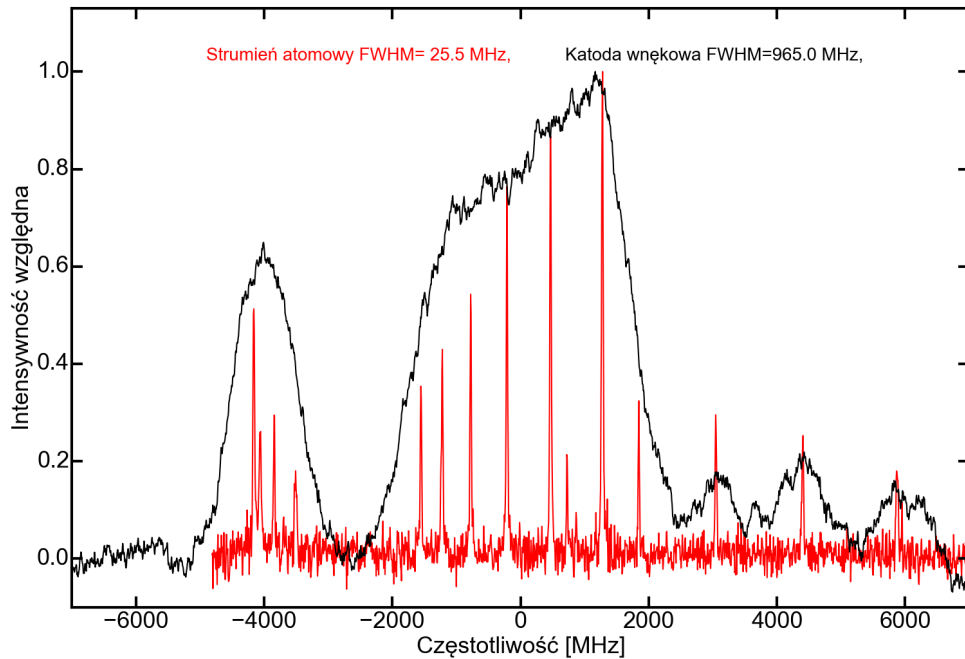
Należy nadmienić, że większość stałych *hfs* atomu manganu, które znajdują się w literaturze, zostało wyznaczonych metodą spektroskopii fourierowskiej przy użyciu lampy wyładowczej z katodą wnękową, dla której poszerzenie dopplerowskie sygnału było o 25-50% większe niż na prezentowanym wykresie (krzywa czarna). Tak ograniczona zdolność rozdzielcza powodowała znaczące nieścisłości w otrzymanych wynikach, które należało jednoznacznie rozstrzygnąć.

Układ eksperymentalny strumienia atomowego został dokładnie przedstawiony w publikacjach, których jestem współautorem [A25, A26, H1, H2].

Każdy ze wspomnianych układów eksperymentalnych obejmuje również moduł generacji i kontroli przestrajalnego promieniowania laserowego, który stanowi część wspólną wszystkich stanowisk badawczych w laboratorium. Sama metodyka badań nie odbiegała od dotychczas stosowanych w naszym laboratorium standardów. W badaniach eksperymentalnych opisanych w pracach [H1–H6, H8] jako źródła wzbudzającego promieniowania laserowego użyto w sumie 5 jednododowych przestrajalnych pierścieniowych laserów barwnikowych, pokrywających większość zakresu widzialnego dostępnych w naszym laboratorium. W tabeli 2 przedstawiono zastosowane barwniki wraz z zakresami generacji światła laserowego.

Ewaluacja obserwowanych widm została przeprowadzona za pomocą programu *Fitter*, opracowanego w grupie badawczej prof. G. Guthöhrleina na Uniwersytecie w Hamburgu i powszechnie stosowanego w wielu laboratoriach zajmujących się spektroskopią atomową.

Obliczenia półempiryczne i *ab initio* w ramach prezentowanego cyklu prac zostały wykonane przez współautorów.



Rysunek 1: Przykład rozszczepienia nadsubtelnej linii widmowej w atomie manganu o długości fali w powietrzu $\lambda = 6490,617 \text{ \AA}$ (badana linia 41 w Tabeli 1 w pracy [H5]: $34938,70 \text{ cm}^{-1}$, $J = 9/2 \rightarrow 50341,30 \text{ cm}^{-1}$, $J = 9/2$), zarejestrowanej na strumieniu atomowym (kolor czerwony) i w lampie z katodą wnękową (kolor czarny). Skrót FWHM oznacza szerokość połówkową linii widmowej, krzywa czerwona jest niemal 40-krotnie węższa niż czarna.

Tabela 2: Wykaz barwników laserowych użytych w badaniach w pracach [H1-H8] wraz z podanym przybliżonymi zakresami długości fal (λ) oraz liczb falowych (k) generowanego światła

Barwnik	λ [nm]		k [cm^{-1}]	
	min	max	min	max
DCM	615	680	14700	16260
Rodamina 6G	565	615	16260	17700
Mieszanina*	535	570	17540	18690
Kumaryna 498	481	540	18520	20790
Stilben 3**	408	480	20830	24510

* - dwuskładnikowa mieszanina barwników z przeniesieniem energii [123]: kumaryna 498 (donor) + pirometen 556 (akceptor), pompowana optycznie ($\lambda = 445 \text{ nm}$) przez wielomodowy laser diodowy,

** - dostępny do roku 2014.

Nieco inne metody i układy pomiarowe zostały użyte w pracach [H9-H0], które powstały w ramach **mojej działalności naukowej w zagranicznych jednostkach naukowych**, głównie w **PTB Brunshwik**, oraz dodatkowo, w ramach współpracy w międzynarodowym projekcie nuClock w **LMU Monachium w Niemczech**. Układy pomiarowe, linowe pułapki Paula, na

których prowadzono badania w ramach pracy [H9], są szczegółowo opisane w pracach doktorskich z PTB Brunzshwik [124–127] oraz z LMU Monachium [128, 129]. Główną różnicę stanowi sposób ładowania pułapek i rodzaje jonów w chmurze. W przypadku pułapki w PTB wprowadzenie jonów do pułapki odbywa się poprzez laserową ablację ze specjalnie przygotowanego filamentu, dzięki której otrzymujemy tylko jony izotopów ^{232}Th i ^{229}Th w stanie podstawowym jądra. Natomiast pułapka jonowa w LMU ładowana jest produktami rozpadu izotopu ^{233}U , zatem oprócz jonów ^{229}Th (z których ok. 2% jest w stanie izomerowym jądra [61]) występuje cały szereg jonów innych pierwiastków (tabela *Extended Data Table 2* w pracy [H9]). W pracy [H9] do badania jonów użyto jedno- i dwustopniowego wzbudzenia laserowego. Jednostopniowe wzbudzenie to standardowa metoda LIF, która w przypadku pułapkowanej chmury jonów daje widma o znaczącym poszerzeniu dopplerowskim: ok. 800 MHz dla pułapki w PTB i ok. 640 MHz dla pułapki w LMU. Aby uzyskać przynajmniej 10-krotną redukcję szerokości obserwowanego sygnału optycznego i rozseparować składowe struktury nadształtnej jonów pochodzące od jądra w stanie podstawowym i izomerowym, wykorzystano bezdopplerowską spektroskopię dwustopniowego wzbudzenia. Dzięki temu szerokość połówkowa obserwowanych optycznych rezonansów wyniosła odpowiednio: 70 MHz (pułapka w PTB) i 40 MHz (pułapka w LMU).

Ewaluacja obserwowanych widm została przeprowadzona za pomocą specjalnie stworzonych w środowiskach Python oraz Mathematica programów, których również byłem współautorem.

Układ pomiarowy, na którym przeprowadzono badania w pracy [H10] został przeze mnie zbudowany w PTB Brunzshwik, i pozwalał na rejestrację widm luminescencji badanych jonów oraz na pomiar obserwowanych czasów życia luminescencji. Źródłem światła wzbudzającego były tutaj jednak nie lasery, ale diody LED wysokich mocy. W tym przypadku również opracowałem program w środowisku programistycznym Python do analizy i ewaluacji otrzymanych widm emisyjnych i sygnałów zaniku luminescencji.

4.6 Omówienie prac H1 - H10 stanowiących osiągnięcie naukowe

H1: *Experimental study of radio frequency power broadening in ABMR-LIRF method*

W pracy zawarto rezultaty badań zależności poszerzenia nasyceniowego od mocy pola mikrofalowego w metodzie ABMR-LIRF, umożliwiającej wysoką precyzję pomiarów struktury nadształtnej swobodnych atomów na strumieniu atomowym.

Po pierwszej udanej próbie zastosowania metody ABMR-LIRF w naszym laboratorium w roku 2002 [130], w której określono strukturę nadształtną poziomu $3d^5 4s a^5 S_2$ atomu chromu, wprowadzono zmiany konstrukcyjne mające na celu redukcję pola magnetycznego w układzie eksperymentalnym i zbadano ich wpływ na obserwowany sygnał podwójnego rezonansu [A25] [131]. Jednak nadal brakowało optymalizacji sygnału pod kątem między innymi poszerzenia nasyceniowego pochodzącego od pola mikrofalowego. Zmierając do wykonania możliwie najdokładniejszych pomiarów struktury nadształtnej pozostałych, leżących wyżej w skali energii, poziomów metastabilnych atomu chromu, podjęto próbę zbadania tego mechanizmu w ramach omawianej pracy.

Wykonano zatem serię pomiarów sygnału podwójnego rezonansu optyczno-mikrofalowego w funkcji mocy pola mikrofalowego (od 0,03 mW do 100 mW). Zbadano interwał $F = 5/2 \rightarrow F = 7/2$ struktury nadształtnej poziomu konfiguracji parzystej $3d^5 4s a^5 S_2$ (rezonans mikrofalowy) z wykorzystaniem do detekcji linii widmowej o długości fali (w powietrzu) $\lambda = 449,685$ nm, odpowiadającej przejściu na górny poziom $3d^4(^5D)4s4p(^3P^o) y^5P_2^o$ konfiguracji nieparzystej (rezonans optyczny).

W pracy na rysunku 2 przedstawiono strukturę linii widmowej zastosowanej do rezonansu optycznego, zaznaczając składową wykorzystywaną do obserwacji rezonansu mikrofalowego (na tej składowej odbywał się proces pompowania optycznego). Na rysunku 3 przedstawiono przykłady obserwowanych sygnałów podwójnego rezonansu optyczno-mikrofalowego dla 4 wybranych wartości

mocy pola mikrofalowego. Rysunki 4 i 5 przedstawiają wykresy odpowiednio wartości szerokości połówkowej (FWHM) oraz stosunku sygnału do szumu (SNR) obserwowanych sygnałów w funkcji wzrastającej mocy mikrofal. Z analizy tych dwóch wykresów oraz wykresu $\sqrt{\text{SNR}}/(\text{FWHM})$ w funkcji mocy pola mikrofalowego (rys. 6) udało się ustalić optymalną wartość mocy mikrofal dla metody pomiarowej ABMR-LIRF. Wartość ta wynosi 0,5 mW; zapewnia ona wysoką wartość SNR, wynoszącą 18, przy niewielkiej wartości szerokości połówkowej sygnału, wynoszącej 130 kHz.

Wyznaczoną w omawianej pracy wartość mocy mikrofal zastosowano w pomiarach w następujących pracach [H2, H3], gdzie metodą ABMR-LIRF badano strukturę wyżej położonych metastabilnych poziomów elektronowych atomu chromu.

H2: Precise measurements of the hyperfine structure of the levels belonging to the terms $3d^5 4s^5 G$ and $5P$ in Cr(I)

W pracy tej przedstawiono badania metodą ABMR-LIRF struktury nadsubtelnej parzystych poziomów elektronowych należących do termów $5G$ i $5P$ z konfiguracji $3d^5 4s$ atomu chromu. Było to poważnym wyzwaniem eksperymentalnym, gdyż wcześniej nikt nie badał metodą ABMR-LIRF poziomów metastabilnych o energiach powyżej 8300 cm^{-1} w atomie chromu, a nieliczne prace przedstawiały badania poziomów powyżej 10000 cm^{-1} w przypadku pozostałych pierwiastków. Energie poziomów badanych w pracy [H2] przekraczały 20000 cm^{-1} ($20517 \text{ cm}^{-1} - 21857 \text{ cm}^{-1}$).

Przeprowadzono pomiary struktury nadsubtelnej dla 7 przejść optycznych w dostępnym wówczas obszarze widma, generowanym przez laser wzbudzający pracujący na barwniku stilben 3 (tab. 1). W rezultacie wyznaczono bardzo precyzyjnie interwały między podpoziomami struktury nadsubtelnej dla 7 poziomów (dokładność wyznaczenia interwału sięgała od 500 Hz do 4300 Hz - tab. 2). Wyznaczono wartości stałych struktury nadsubtelnej A i B z dokładnością do 10 Hz w najlepszym z przypadków, oraz oszacowano wartości stałej C (reprezentującej oddziaływanie magnetyczne oktopolowe) dla wszystkich sześciu poziomów parzystych z badanej konfiguracji $3d^5 4s$, w których takie oddziaływanie może teoretycznie występować (tab. 3).

W porównaniu do wcześniej otrzymanych metodą LIF wyników eksperymentalnych z pracy [A25], udało się wyznaczyć stałe A i B z precyzją o 3 rzędy wielkości lepszą, jak również po raz pierwszy oszacować eksperymentalnie wartości stałej C . Pozornie niewielki postęp w poszerzaniu eksperymentalnej bazy danych dotyczących struktury nadsubtelnej stanowił jednak, ze względu na skalę dokładności uzyskanych wyników, znaczącą motywację do kontynuacji badań struktury atomu chromu w pracy [H3].

H3: Investigation of the hyperfine structure of electronic levels in chromium atom

Praca stanowi kontynuację dwóch wcześniejszych prac [H1] i [H2], poświęconych wybranym poziomom należącym do konfiguracji parzystych ($3d^4 4s^2$ i $3d^5 4s$) oraz konfiguracji nieparzystych ($3d^4 4s 4p$ i $3d^5 4p$) w atomie chromu. Badania przeprowadzone w ramach obecnie omawianej pracy można podzielić na dwie części.

W pierwszej części metodą LIF zbadano wysoko położone w skali energii parzyste poziomy metastabilne ($23512 \text{ cm}^{-1} - 28637 \text{ cm}^{-1}$). Poziomy te obsadzono za pomocą elektronów z elektrody wyładowania pomocniczego. Energie nieparzystych poziomów górnych w badanych przejściach optycznych, dla których również określono strukturę nadsubtelną, przekraczały 50000 cm^{-1} (największa wartość 50264 cm^{-1} - tab. 1). W wyniku tych badań udało się po raz pierwszy wyznaczyć stałe struktury nadsubtelnej A i B dla 3 poziomów parzystych (dolnych) i 4 poziomów nieparzystych (górnych) (tab. 2).

W drugiej części podjęto się powtórzenia pomiarów poziomów metastabilnych należących do termu $3d^4 4s^2 a^5 D$ (tab. 3), które uprzednio przeprowadzili Ertmer i in. [21] metodą ABMR-LIRF. Badania zainicjowano w nadziei na uzyskanie wyższej precyzji wyznaczenia interwałów dzięki optymalizacji metody opisanej w pracy [H1], co z kolei powinno się przełożyć na dokładniejsze

wyznaczenie stałych struktury nadsubtelnej. W istocie, wartości interwałów struktury nadsubtelnej badanych poziomów wyznaczono o co najmniej rząd wielkości dokładniej (tab. 4) niż w pracy Ertmera i in. [21]. Uzyskano bardziej precyzyjne wartości stałych A i B zgodne z wartościami przedstawionymi w pracy [21], oraz oszacowano po raz pierwszy wartości stałych oddziaływania magnetycznego oktopolowego C (tab. 5).

H4: Proposed clock transition in atomic chromium and the possible detection schemes

Praca ta wykorzystuje wyniki badań poprzednich prac [H1-H3] oraz [A25]. W części teoretycznej wyznaczono metodami półempirycznymi parametry radiacyjne (moce oscylatorów i czasy życia) dla nisko położonych w skali energii poziomów metastabilnych Cr I. Wykorzystano w tym celu amplitudy wektorów własnych wyznaczonych we wcześniejszych pracach. Na podstawie wyników przeprowadzonych obliczeń zaproponowałem potencjalne przejście zegarowe w neutralnym atomie chromu.

Najbardziej oczywistym wyborem przejścia zegarowego w chromie atomowym jest przejście ze stanu podstawowego a^7S_3 do najniższego poziomu metastabilnego a^5S_2 o energii $7593,148 \text{ cm}^{-1}$, należącego do tej samej konfiguracji co stan podstawowy - $3d^54s$. Długość fali przejścia wynosi $1316,61669 \text{ nm}$ i wydaje się bardzo korzystna z praktycznego punktu widzenia. Mieści się ona w drugim „oknie telekomunikacyjnym”, zatem technologia materiałów półprzewodnikowych, stosowanych w przestrajanych laserach diodowych w tym rejonie widmowym, jest doskonale rozwinięta.

Zgodnie z naszą analizą półempiryczną jest to prawie czyste przejście magnetyczne dipolowe (M1), którego prawdopodobieństwo zostało obliczone na poziomie $2,09 \cdot 10^{-7}$ (tab. 1), a niewielką domieszkę składnika elektrycznego kwadrupolowego (E2) (prawdopodobieństwo $2,30 \cdot 10^{-10}$) można pominąć. Daje to szerokość widmową przejścia ok. 30 nHz i bardzo wysoką oczekiwaną wartość współczynnika dobroci $Q = 6,9 \cdot 10^{21}$. Baza danych Kurucza [132] przewiduje około 5-krotnie wyższe prawdopodobieństwo przejścia ($1,191 \cdot 10^{-6}$), co skutkuje szerokością widmową ok. 190 nHz i współczynnikiem dobroci ok. $1,2 \cdot 10^{21}$; nadal są to doskonale parametry dla przejścia zegarowego. W pracy [H4] przedstawiono symulowane rozszczepienie nadsubtelne proponowanego przejścia zegarowego dla nieparzystego izotopu chromu ^{53}Cr (rys. 1) z zaznaczeniem składowych korzystnych do realizacji optycznego zegara atomowego na tym izotopie. Zaproponowano dwie opcje: $F' = 3/2 \rightarrow F = 1/2$ lub $F' = 9/2 \rightarrow F = 7/2$, gdzie F' oznacza poziom nadsubtelny stanu podstawowego a^7S_3 , a F oznacza poziom nadsubtelny stanu metastabilnego a^5S_2 .

W pracy przeprowadzono również analizę przejść wzbronionych z poziomu podstawowego na poziomy należące do multipletu a^5D , dla których $J = 0 - 4$, o energiach w przedziale $7750-8300 \text{ cm}^{-1}$, pod kątem możliwości ich zastosowania jako potencjalnych przejść zegarowych. Parametry tych przejść wzbronionych okazały się jednak gorsze od proponowanego powyżej. Podstawę do ich określenia stanowiły obliczone prawdopodobieństwa przejść dla rozważanych poziomów, zamieszczone w tabeli 1, oraz przewidywane czasy życia, zamieszczone w tabeli 2.

Wnikliwie przedyskutowano ewentualne powiązania między schematami chłodzenia laserowego, rutynowo stosowanymi dla chromu, a proponowanym przejściem zegarowym. Z dostępnej literatury znane są przynajmniej dwa schematy chłodzenia atomów chromu w pułapce magneto-optycznej [6, 7].

Bell i in. [6] zaproponowali prosty schemat chłodzenia obejmujący repompowanie populacji poziomów metastabilnych (tylko $a^5D_{3,4}$) przez górny poziom przejścia chłodzącego, z wykorzystaniem słabych przejść interkombinacyjnych. Osiągnięto populację MOT rzędu 10^6 atomów pomimo małej wydajności repompowania. Natomiast Bismut i in. [7] zaproponowali schemat bardziej zaawansowany. W ich podejściu zamiast repompowania na liniach interkombinacyjnych stosowana jest inna strategia, a mianowicie wykorzystywane jest znacznie silniejsze przejście pompujące do wyższego poziomu z^7P_3 . Skutkuje to jednak obsadzeniem nie tylko poziomów metastabilnych $a^5D_{2,3,4}$ (z których dwa ostatnie są również obsadzone po wzbudzeniu samego przejścia chłodzącego), ale także poziomu a^5S_2 , czyli górnego poziomu proponowanego przez nas przejścia zegarowego. Ten schemat jest zatem mniej korzystny do realizacji zegara optycznego na atomie chromu, ale ciągle możliwy do wykorzystania. Oba schematy chłodzenia atomów chromu wraz z zaznaczonym przejściem zegarowym przedstawiono na rysunku 2.

W rozdziale 4 przedstawiono propozycje schematów detekcji dla sugerowanego przejścia zegarowego w atomie chromu, które w czytelny sposób zwizualizowano na rysunku 3. Zaproponowano 8 przejść detekcyjnych, które podzielono ze względu na właściwości na dwie grupy. Główne parametry przejść optycznych wykorzystywanych w proponowanych schematach detekcji zamieszczono w tabeli 3. Wszystkie przejścia detekcyjne zbadano eksperymentalnie metodą LIF na strumieniu atomowym (jedno z nich zarejestrowano już w ramach w pracy [A25]) i przedstawiono ich widma na rysunkach 4 i 5. Zaznaczono na nich składowe struktury nadsubtelnej mogące służyć do detekcji przejścia zegarowego, w zależności od wyboru składowej użytej do realizacji samego przejścia zegarowego dla ^{53}Cr . Porównanie wartości stałych struktury nadsubtelnej otrzymanych na podstawie badań 8 proponowanych przejść detekcyjnych z danymi literaturowymi przedstawiono w tabeli 4. Natomiast w tabeli 5 po raz pierwszy przedstawiono dokładne pozycje indywidualnych izotopów chromu w otrzymanych widmach wspomnianych przejść oraz wartości przesunięć izotopowych.

Praca [H4] jest zwieńczeniem długoletnich badań eksperymentalnych i półempirycznych dotyczących struktury atomu chromu. Zaproponowane przejście zegarowe w zakresie bliskiej podczerwieni ($\lambda = 1316,61669 \text{ nm}$) dla atomu chromu, wraz ze szczegółowo przebadanymi schematami detekcji, stanowi osiągnięcie jednego z wyznaczonych celów badawczych, jakie postawiłem sobie przed realizacją cyklu prac składających się na osiągnięcie habilitacyjne. Wskazane w pracy [H4] przejście zegarowe w atomie chromu porównano z innymi przejściami zegarowymi w istniejących optycznych zegarach atomowych bazujących na neutralnych atomach (w tabeli 5, w rozdziale 4.7 niniejszego załącznika). W wyniku przeprowadzonych badań można uznać atom chromu za dobrego kandydata na optyczny zegar atomowy; w moim przekonaniu w dalszej perspektywie warto podjąć prace nad jego realizacją.

H5: *Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom.*

I. *Even-parity level system*

Jest to pierwsza z serii prac [H5-H8] dotyczących atomu manganu. Przedstawia ona wyniki badań zarówno eksperymentalnych jak i teoretycznych struktury subtelnej i nadsubtelnej układu poziomów należących do konfiguracji parzystych tego pierwiastka. Badania eksperymentalne przeprowadzono na tej samej aparaturze do wytwarzania strumienia atomowego co w przypadku prac [H1-H4] dotyczących atomowego chromu. Z uwagi na wyższe niż w przypadku atomu chromu energie badanych parzystych poziomów metastabilnych, stosowano tutaj jednak tylko metodę LIF.

Zarejestrowano 47 linii widmowych, dla których poziomy z konfiguracji parzystych były poziomami dolnymi; łącznie zbadano 26 poziomów o energiach z zakresu $23500\text{-}37500 \text{ cm}^{-1}$; informacje o nich zawarto w tabeli 1. Dla trzech z nich wyznaczono stałe *hfs* *A* i *B* po raz pierwszy, dla kolejnych ośmiu wyznaczono po raz pierwszy wartości stałych *B*.

Dla najniżej położonych poziomów 1-8 (tabela 2), o energiach do ok. 25500 cm^{-1} , dokładne wartości stałych *hfs* *A* i *B* uzyskali wcześniej metodą ABMR-LIRF lub LIF na strumieniu atomowym inni autorzy, ale większość rezultatów znalazła się tylko w nieopublikowanych rozprawach doktorskich [45,133]. Częściowo rezultaty dotyczące tych poziomów opublikowano później w artykułach naukowych [46,52], jednakże dla kompletności wyników eksperymentalnych stanowiących w pracy [H5] podstawę obliczeń półempirycznych, uznałem za stosowne, aby wszystkie wartości stałych *A* i *B* potwierdzić niezależnie od nieopublikowanych wyników ABMR-LIRF. Dlatego poziomy 1-8 w tabeli 2 zostały dodatkowo oznaczone górnym indeksem „*R*” (od ang. *remeasured*, czyli „ponownie zmierzony”).

Kolejne siedem poziomów konfiguracji parzystych, których stałe *hfs* były już znane z literatury [49,52], również zostało ponownie zmierzonych w pracy [H5] w celu poprawy precyzji, ponieważ nasza metoda eksperymentalna (LIF na strumieniu atomowym) jest z pewnością bardziej dokładna niż metody stosowane we wcześniejszych cytowanych pracach (odpowiednio spektroskopia optyczna lub spektroskopia fourierowska w wyładowaniu w lampie z katodą węgłową). Poziomy te zostały oznaczone indeksem górnym „*R2*” („ponownie zmierzony 2”), i rzeczywiście uzyskano znacznie większą dokładność stałych *hfs* w stosunku do wcześniejszych danych literaturowych, co zostało zaprezentowane w tabeli 2.

Przykładowe zarejestrowane widma zaprezentowano na rysunkach 1 i 2. Na rysunku 1a przedstawiono strukturę linii widmowej z poziomem dolnym $37420,24 \text{ cm}^{-1}$, $J = 11/2$, dla którego po raz pierwszy wyznaczono stałe hfs , natomiast rysunek 1b prezentuje strukturę linii o liczbie falowej 18424.05 cm^{-1} , o poziomie dolnym ($E = 23719,52 \text{ cm}^{-1}$, $J = 3/2$), dla którego w literaturze odnotowano pewne rozbieżności dla wartości stałych hfs . Z kolei rysunek 2 przedstawia dwa specyficzne przypadki, gdzie różnice między eksperymentalnie obserwowanymi przez nas widmami a symulowaną strukturą nadsubtelną, obliczoną na podstawie dostępnych literaturowych wartości stałych A i B , były szczególnie drastyczne. W tekście pracy omówiono dokładnie oba przypadki: jeden dotyczył poziomu dolnego o energii $E = 34250,52 \text{ cm}^{-1}$, $J = 11/2$ (pozycja 18 w tabeli 2), a drugi poziomu dolnego o energii $E = 35165,05 \text{ cm}^{-1}$, $J = 3/2$ (pozycja 25 w tabeli 2).

Uzyskane w ramach pracy [H5] wyniki eksperymentalne zostały włączone do półempirycznej analizy struktury subtelnej a następnie nadsubtelnej układu poziomów parzystych. Podczas diagonalizacji macierzy energii opisującej oddziaływania subtelne w atomie manganu użyto 131 poziomów parzystych z wyznaczonymi eksperymentalnie wartościami energii. Rozważano układ 36 konfiguracji parzystych. Wartości parametrów radialnych struktury subtelnej wraz z ich błędami statystycznymi oraz odpowiednie wartości otrzymane za pomocą kodu Cowana [134–136] przedstawiono w tabelach 3 i 4. Następnie w oparciu o amplitudy wektorów własnych, uzyskane z analizy struktury subtelnej, przeprowadzono parametryzację struktury nadsubtelnej. Parametry radialne struktury nadsubtelnej wraz z ich błędami podano w tabeli 5. Połączone wyniki obliczeń struktury subtelnej i nadsubtelnej przedstawiono w tabeli 6. Porównano w niej wyniki eksperymentalnych i obliczonych wartości energii (cm^{-1}) oraz stałych hfs A i B (MHz); dla tych ostatnich uzyskano średnie odchylenia na poziomie odpowiednio 8,6 MHz i 2,2 MHz. W większości przypadków zgodność między eksperymentalnymi wartościami A i B a wartościami przewidywanymi w analizie półempirycznej jest dobra. Pragnę podkreślić, że ścisłe powiązanie prac eksperymentalnych z obliczeniami półempirycznymi przynosi nieocenione korzyści w badaniach struktury i widm atomów złożonych.

Analizując wyniki uzyskane w pracy [H5] można wyciągnąć wniosek, że atom manganu wydaje się interesujący nie tylko z punktu widzenia teorii budowy atomu; w systemie konfiguracji parzystych można rozważyć potencjalne przejścia zegarowe - np. przejście E2 ze stanu podstawowego $3d^5 4s^2$ a ${}^6S_{5/2}$ do stanu metastabilnego $3d^6 4s$ a ${}^6D_{9/2}$. Problemem do rozwiązania jest poszukiwanie możliwego schematu chłodzenia laserowego atomów Mn I, co niestety wydaje się być kwestią nietrywialną. Wnikliwa analiza struktury poziomów elektronowych atomu manganu należących do parzystych jak i nieparzystych konfiguracji może znacznie ułatwić znalezienie możliwego rozwiązania. Stanowiło to motywację do dalszych prac w tym kierunku.

H6: *Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. II. Odd-parity level system*

Praca ta stanowi kontynuację badań struktury atomu manganu podjętych w pracy [H5]. Tym razem skoncentrowano się na eksperymentalnych i półempirycznych badaniach poziomów należących do konfiguracji nieparzystych. Zbadano strukturę nadsubtelną 15 linii widmowych atomu manganu metodą fluorescencji indukowanej laserem (LIF) na strumieniu atomowym. Wyniki tych badań, uzupełnione wynikami uzyskanymi w pracy [H5], umożliwiły uzyskanie stałych struktury nadsubtelnej A i B dla łącznie 38 poziomów nieparzystych. Szczegółowe informacje o badanych liniach widmowych zawarto w tabeli 1.

Dla 11 poziomów po raz pierwszy podano wartości A i B , dla kolejnych 10 poziomów wyznaczono nowe stałe B , a dla pozostałych 17 poziomów poprawiono dokładność dotychczas dostępnych danych literaturowych; w ten sposób znacznie rozszerzono dostępną bazę danych stałych struktury nadsubtelnej atomu manganu. Wszystkie otrzymane wyniki zebrano w tabeli 2. Na rysunku 1 przedstawiono dwa wybrane przykłady zarejestrowanych rozszczepień nadsubtelnych, reprezentujące linie widmowe, dla których wartości stałych A i B odpowiednich górnych poziomów nieparzystych określono po raz pierwszy.

W pracy [H6] przeprowadzono również półempiryczną analizę struktury subtelnej i nadsubtelnej dla systemu poziomów nieparzystych atomowego manganu. Ograniczono się jednak do 189 poziomów z wyznaczonymi eksperymentalnie wartościami energii z zakresu od 18402 cm^{-1} (najniższy poziom nieparzysty) do około $59000 - 61000 \text{ cm}^{-1}$. Wzięto pod uwagę 35 konfiguracji nieparzystych. Wartości parametrów radialnych struktury subtelnej wraz z ich błędami statystycznymi oraz odpowiednie wartości otrzymane za pomocą kodu Cowana [134–136] przedstawiono w tabelach 3 i 4. Parametry radialne struktury nadsubtelnej wraz z ich błędami podano w tabeli 5. Połączone wyniki obliczeń struktury subtelnej i nadsubtelnej przedstawiono w tabeli 6. Porównano w niej wyniki eksperymentalnych i obliczonych wartości energii poziomów elektronowych (cm^{-1}) oraz stałych hfs A i B (MHz). Ogólnie stwierdzono dobrą zgodność między wartościami doświadczalnymi i przewidywanymi na podstawie analizy półempirycznej.

Analiza struktury poziomów nieparzystych atomu manganu stanowi istotny krok w kierunku propozycji schematów chłodzenia laserowego tego pierwiastka - poziomów górnych potencjalnych przejść chłodzących należy poszukiwać wśród poziomów o tej właśnie parzystości.

H7: Estimation of radiative parameters for atomic manganese from the point of view of possible clock transitions and laser cooling schemes

W artykule tym wyznaczono wartości parametrów radiacyjnych atomowego manganu własną metodą półempiryczną opracowaną przez współautorów pracy. Potrzebne do przeprowadzenia parametryzacji przejść elektrycznych dipolowych amplitudy wektorów własnych zostały wyznaczone we wcześniej opublikowanych pracach [H5, H6]. Opisano procedury użyte do parametryzacji mocy oscylatorów dla linii widmowych, jak również do wyznaczania czasów życia poziomów elektronowych atomu manganu, a także przedstawiono i omówiono rezultaty obliczeń. Całki radialne dla różnego typu przejść, uzyskane w procedurze dopasowania, przedstawiono w tabeli 1. Porównanie eksperymentalnych i obliczonych mocy oscylatorów, posortowanych według wartości J i energii poziomu górnego, zamieszczono w tabeli 2, natomiast w tabeli 3 porównano eksperymentalne i obliczone czasy życia dla poziomów elektronowych atomu manganu. W obu kwestiach wartości obliczone są w większości przypadków zgodne z danymi eksperymentalnymi. Wyniki porównano również z dostępnymi obliczeniami teoretycznymi *ab initio*.

Na podstawie uzyskanych wyników teoretycznych zaproponowano trzy potencjalne przejścia zegarowe oraz schematy chłodzenia laserowego dla atomu manganu. Wszystkie przejścia uczestniczące w proponowanych schematach zostały graficznie zaprezentowane na rysunkach 4 i 5 oraz umieszczone w tabeli 4. Wśród proponowanych przejść zegarowych są dwa przejścia E2 (elektryczne kwadrupolowe), które są zabronione nie tylko ze względu na warunek $\Delta L = \pm 1$ i jednakową parzystość, ale również nie spełniają reguły $\Delta J = \pm 1$. Są nimi przejścia z poziomu podstawowego $3d^5 4s^2$ a ${}^6S_{5/2}$ na poziomy należące do termu $3d^6({}^5D)4s$ a 6D , tj. na poziom 17052.29 cm^{-1} , $J = 9/2$ (przejście zegarowe 1 - $\lambda = 586.269 \text{ nm}$), i 17637.15 cm^{-1} , $J = 1/2$ (przejście zegarowe 2 - $\lambda = 566.828 \text{ nm}$). Trzecim przejściem zegarowym jest przejście na jeden z poziomów należących do termu $3d^6({}^5D)4s$ a 4D , konkretnie na poziom 23818.87 cm^{-1} , $J = 1/2$ (przejście zegarowe 3 - $\lambda = 419.717 \text{ nm}$). Dla każdego z tych postulowanych przejść zegarowych przeprowadzono symulację struktury nadsubtelnej linii, której wyniki przedstawiono odpowiednio na rysunkach od 1 do 3, wraz ze schematami struktury nadsubtelnej poziomów dolnego i górnego i wskazaniem składowych nadsubtelnych.

Przedstawiono wnikliwą dyskusję dotyczącą każdego z trzech przejść zegarowych i stwierdzono, iż optymalnym przejściem wydaje się być przejście nr 3. W porównaniu z dwoma pozostałymi przejściami, poziom górny w przejściu zegarowym 3 ma o ponad dwa rzędy wielkości dłuższy szacowany czas życia, według [132] wynoszący ok. 720 s, co daje naturalną szerokość widmową przejścia ok. 0,2 mHz i oczekiwany współczynnik dobroci rezonansu ok. $3 \cdot 10^{18}$. Wartość ta jest co prawda wyraźnie mniejsza niż dla skrajnego przypadku przejścia zegarowego E3 (elektrycznego oktopolowego) w jonie iterbu, dla którego Q wynosi $6,4 \cdot 10^{23}$ [137], ale z drugiej strony znacznie wyższa niż np. dla atomu wapnia: $Q = 5,5 \cdot 10^{11}$ [138]. Należy chyba wspomnieć, że dla większości obecnie rozważanych przejść w zegarach optycznych w różnych rodzajach atomów i jonów współczynniki dobroci wahają się od

10^{14} do 10^{16} [4]. Wskazane w pracy [H7] przejścia zegarowe w atomie manganu zestawiono z innymi przejściami zegarowymi w istniejących optycznych zegarach atomowych, bazujących na neutralnych atomach (tabela 5, rozdział 4.7 niniejszego załącznika).

W pracy [H7] bardzo szczegółowo przedyskutowano również aspekt potencjalnych schematów chłodzenia laserowego atomów manganu. Odniesiono się do ewentualnych problemów technicznych związanych z zaproponowanymi schematami chłodzenia (w tym konieczności zastosowania dwóch przejść repompujących w zakresie podczerwieni), a także szczegółowo przedstawiono porównanie proponowanych schematów między sobą, jak i z wcześniejszą propozycją literaturową [56]. Schematy chłodzenia dotyczące przejścia zegarowego 1 przedstawiono na rysunku 4, a dla przejść zegarowych 2 i 3 na rysunku 5. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono symulowane schematy struktury nadsubtelnej linii widmowych mających posłużyć jako pierwszy etap chłodzenia laserowego odpowiednio dla przejść zegarowych 2 i 3 oraz 1, każdorazowo oznaczając składową hfs wybraną jako przejście chłodzące. Po dogłębnej analizie stwierdzono, że wśród schematów chłodzenia laserowego ze stanu podstawowego ten dotyczący przejść zegarowych 2 i 3 jest z pewnością korzystniejszy niż ten odpowiadający przejściu zegarowemu 1. Natomiast proponowany w pracy [56] schemat chłodzenia z wysoko położonego poziomu metastabilnego można uznać za zbyt skomplikowany i niezbyt perspektywiczny.

H8: *Hyperfine structure investigations of Mn I*

Praca ta stanowi uzupełnienie badań struktury atomu manganu od strony eksperymentalnej oraz zawiera ponowną analizę obliczeń półempirycznych dla konfiguracji parzystych, która mogła być przeprowadzona dzięki wzbogaconej bazie wyników doświadczalnych. W pracy [H8] zbadano 30 linii widmowych za pomocą metody LIF w lampie wyładowczej z katodą wnękową. Choć w wcześniejszych pracach [H5-H6] uzyskano wiele ważnych wyników, wykorzystanie strumienia atomowego ograniczyło możliwość badania przejść optycznych do przypadków parzystych poziomów metastabilnych o energiach nieprzekraczających 37500 cm^{-1} jako poziomów dolnych. Lampa wyładowcza z katodą wnękową pozwala w wyniku zderzeń atomów manganu z gazem buforowym na znaczne obsadzenie poziomów obu parzystości o energiach co najmniej do 43500 cm^{-1} . Poziomy o tak wysokich energiach mogą zatem być użyte jako poziomy dolne, z których można przez wzbudzenie optyczne obsadzać dalsze poziomy elektronowe o energiach powyżej 62000 cm^{-1} (tabela 1).

W rezultacie wyznaczono stałe struktury nadsubtelnej A i B łącznie dla 12 poziomów z konfiguracji nieparzystych i 16 poziomów z konfiguracji parzystych. Dla 3 poziomów nieparzystych i 15 poziomów parzystych po raz pierwszy podano wartości obu stałych A i B , dla kolejnych 8 poziomów wyznaczono nowe stałe B , a dla pozostałych 8 poziomów poprawiono dokładność dotychczas dostępnych danych literaturowych. W niektórych przypadkach, gdzie zaobserwowano rozbieżności między wcześniejszymi wynikami eksperymentalnymi, uzyskanymi przez innych autorów, a przewidywaniami teoretycznymi, nowe dane umożliwiły jednoznaczne rozstrzygnięcie, które z dostępnych danych literaturowych są poprawne. Wyniki doświadczalne dotyczące struktury nadsubtelnej badanych poziomów zostały zaprezentowane w tabelach 2 i 3, z podziałem na parzystości konfiguracji. Przykładowe zarejestrowane widma przedstawiono na rysunku 1.

Przeprowadzono również ponowną analizę za pomocą wspomnianej w pracach [H5] i [H6]) własnej metody półempirycznej, uwzględniając 36 konfiguracji parzystych. W poszerzonej analizie struktury nadsubtelnej uwzględniono odpowiednio 67 stałych A (50 w [H5]) i 46 stałych B (32 w [H5]). Osiągnięto średnie odchylenia 15 MHz i 2,6 MHz odpowiednio dla stałych hfs A i B . Parametry radialne struktury nadsubtelnej wraz z ich błędami średnimi kwadratowymi podano w tabeli 4. Porównanie eksperymentalnych i obliczonych wartości energii w cm^{-1} oraz stałych hfs A i B w MHz przedstawiono w tabeli 5. Dotychczasowa dobra zgodność między wartościami stałych hfs eksperymentalnych i przewidywanych półempirycznie, uzyskana we wcześniejszej wersji obliczeń opublikowanych w pracy [H5], uległa znacznej poprawie, a w szczególności zostały usunięte dotychczasowe niespójności dla kilku poziomów.

H9: Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th

Jak już wspomniano, w roku 2016 grupa prof. Petera Thirolfa z LMU Monachium [66] po raz pierwszy zaobserwowała bezpośrednio rozpad stanu izomerowego ^{229m}Th . Udało się tego dokonać za pomocą unikatowej aparatury, tzw. „łapacza jonów”, i detekcji elektronu wyrzucanego z dezaktywowanego stanu izomerowego atomu toru w wyniku procesu konwersji wewnętrznej. Stworzyło to wielką motywację do wspólnych badań grupy prof. Ekkeharda Peika z PTB, w której skład wówczas wchodziłem, i grupy prof. Petera Thirolfa z LMU, ze wsparciem zespołu prof. Christopha Düllmanna z Johannes Gutenberg-Universität w Moguncji (JGU), zajmującego się pierwiastkami superciężkimi. W latach 2016 i 2017 przeprowadzono szereg badań, których wyniki były na tyle istotne dla rozwoju **fizyki**, że zostały opublikowane w prestiżowym periodyku **Nature** (praca [H9]).

W ramach tej pracy wykonano pierwsze pomiary magnetycznego momentu dipolowego i elektrycznego momentu kwadrupolowego jądra w stanie izomerowym, oraz wyznaczono średni promień kwadratowy rozkładu ładunku w jądrze izomeru. Wartości wspomnianych wielkości uzyskano na podstawie badań struktury nadsubtelnej dwukrotnie zjonizowanego toru 229 za pomocą metod spektroskopii laserowej.

Badania spułapkowanych jonów Th^{2+} zrealizowano w dwóch ośrodkach naukowych: w PTB Brunzwik oraz LMU Monachium. Wykorzystano w tym celu dwie niezależne liniowe pułapki jonowe. Pułapka zlokalizowana w PTB Brunzwik, opisana w pracach [124–127] oraz [A21], była ładowana przez ablację ze stałej próbki zawierającej izotopy ^{232}Th i ^{229}Th tylko w stanie podstawowym jądra. Trójfotonowa jonizacja spułapkowanych jonów Th^+ została wykorzystana do produkcji jonów Th^{2+} . Do drugiej pułapki, znajdującej się w LMU w Monachium [66, 128, 129], trafiały jony odrzutu ^{229}Th z rozpadu α izotopu ^{233}U , gdzie stan izomerowy ^{229m}Th jest obsadzony w ok. 2% z gałęzi rozpadu [61] (sekcja *Metody* w pracy [H9] - szczegółowe informacje na temat generowania wiązki jonów $^{229m}\text{Th}^{2+}$). W związku z tym uwięziona chmura jonowa stanowi mieszaninę jonów w podstawowym i izomerowym stanie jądrowym. Produkty pochodne łańcucha rozpadu ^{233}U są również uwięzione w pułapce, ale nie zakłócają one pomiaru spektroskopowego (szczegóły w sekcji *Metody* pracy [H9]).

Połączenie pomiarów w obu pułapkach pozwoliło jednoznacznie zidentyfikować składowe nadsubtelne ^{229m}Th , które pojawiają się tylko w badaniach uwięzionych jonów odrzutu (pułapka LMU), oraz zmierzyć przesunięcia izotopowe i izomerowe. Rysunek 1 w pracy [H9] przedstawia schematycznie obie pułapki oraz diagram poziomów elektronowych wykorzystanych do spektroskopii laserowej jonów ^{229}Th . Natomiast rysunek *Extended Data Fig. 2* przedstawia schemat układu optycznego użytego do badań.

Pierwotnie wykorzystano metodę LIF z pojedynczym wzbudzeniem o długości fali 459,1 nm do próby detekcji sygnału jonów w izomerowym stanie jądra. Nie uzyskano jednak żadnego pozytywnego wyniku, mimo iż stosunek sygnału do szumu w rejestrowanym widmie wynosił ponad 500 i skanowano obszar ± 15 GHz od środka ciężkości struktury jonów toru w stanie podstawowym jądra. Cała struktura nadsubtelna izomeru schowana była w strukturze nadsubtelnej jonów toru w stanie podstawowym. Ograniczona zdolność rozdzielcza metody LIF, związana z dużym poszerzeniem dopplerowskim (jak już wspomniano w rozdziale 4.5 - ok. 800 MHz dla pułapki w PTB i ok. 640 MHz dla pułapki w LMU), uniemożliwiła separację składowych nadsubtelnych dla jonów w obu stanach jądra atomowego. Przejście o długości fali 459,1 nm wykorzystano ostatecznie do detekcji ilości jonów $^{229}\text{Th}^{2+}$ w pułapce, celem normalizacji sygnałów fluorescencji dla różnych składowych struktury nadsubtelnej przy wzbudzeniu dwustopniowym.

Główną metodą badawczą, która przyniosła pożądany efekt, było wzbudzenie dwustopniowe z wykorzystaniem przejść 484,3 nm i 1164,3 nm (rys. 1 w pracy [H9]). Uzyskano szerokości połówkowe obserwowanych składowych *hfs* dwustopniowych rezonansów odpowiednio 70 MHz dla pułapki w PTB oraz 40 MHz dla pułapki w LMU. Wybór schematu poziomów elektronowych był następujący: przejście ze stanu elektronowego 63_2 do stanu 29300_0 przez stan pośredni 20711_1 (oznaczenia stanów zawierają energie w cm^{-1} i liczby kwantowe J jako indeksy dolne. Populacja stanu 63_2 jest w równowadze z elektronowym stanem podstawowym (0_4), w stosunku około 0,4, poprzez

zderzenia z gazem buforowym. Analiza izomerowej struktury nadsubtelnej jest prosta, ponieważ dwustopniowe wzbudzenie ze zmianą liczby J : $2 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ prowadzi do małej liczby składowych hfs . Obecnych jest dziewięć rezonansów nadsubtelnych dla jądrowego stanu podstawowego ($I = 5/2$) i oczekiwane jest osiem rezonansów nadsubtelnych [57] dla izomeru o spinie jądrowym $I = 3/2$ (rysunek *Extended Data Fig. 1* w pracy [H9]). Górny stan elektronowy wzbudzenia dwustopniowego ma $J = 0$, zatem nie wykazuje struktury nadsubtelnej. Kolejną zaletą takiego schematu wzbudzenia było to, że przejście fluorescencyjne z poziomu górnego 29300_0 na poziom 7921_1 o długości fali $\lambda = 467,7$ nm daje możliwość eliminacji rozproszonego światła laserowego za pomocą filtru interferencyjnego o transmisji w zakresie 445 ± 23 nm. Na rysunku 2 w pracy [H9] zaprezentowano przykładowe widmo wysokiej rozdzielczości otrzymane metodą dwustopniowego wzbudzenia w porównaniu do widma otrzymanego metodą LIF dla wzbudzenia jednostopniowego.

Rysunki 3 i 4 z pracy [H9] przedstawiają odpowiednio: porównanie widm dwustopniowego wzbudzenia dla pułapek jonowych z PTB i LMU, oraz sygnał rezonansów hfs dla jonów $^{229}\text{Th}^{2+}$ w stanie podstawowym i izomerowym jądra. W sumie zarejestrowano po 29 widm dla dwustopniowego wzbudzenia dwukrotnie dla dla dwóch wzajemnych geometrii prowadzenia wiązek laserowych 484,3 nm i 1164,3 nm: współbieżnej i przeciwbieżnej. Eksperyment ten wykonano niezależnie dla dwóch pułapek. Wszystkie widma są dostępne w informacjach uzupełniających do artykułu (*Supplementary Figs. 1–29* i *31–59*). Analiza zarejestrowanych widm pozwoliła na jednoznaczną identyfikację składowych struktury nadsubtelnej jonów w podstawowym stanie jądra (9 składowych) oraz w izomerowym stanie jądra; w drugim przypadku udało się zarejestrować 7 spośród 8 składowych hfs (obliczono, że amplituda ósmego, niezarejestrowanego rezonansu dla stanu izomerowego jest zbyt mała w odniesieniu do stosunku sygnału do szumu osiągniętego w eksperymencie).

Wartości stałych struktury nadsubtelnej dla badanych poziomów elektronowych przedstawiono w tabeli 1 artykułu [H9]. W niniejszym omówieniu tej pracy prezentuję te wyniki w tabeli 3 wraz z wartościami obliczonymi teoretycznie metodami *ab-initio* w ramach pracy [A14], której również jestem współautorem. Dla lepszej wizualizacji otrzymanych wyników, na rysunku 2 zilustrowałem znaczącą różnicę między widmami struktury nadsubtelnej otrzymanymi dla linii widmowych 484,3 nm i 1164,3 nm dla jonów $^{229}\text{Th}^{2+}$ w stanie podstawowym i izomerowym jądra.

Na podstawie analizy otrzymanych widm udało się określić właściwości izomeru, które zbiorczo przedstawiłem w tabeli 4, razem z odpowiednimi wielkościami dla stanu podstawowego jądra toru, na podstawie literatury.

Podsumowując wyniki pracy [H9] można wskazać, że niskoenergetyczne przejście między jądrowym stanem podstawowym a stanem izomerowym w izotopie ^{229}Th tworzy pomost między fizyką atomową i jądrową, i otwiera nowe perspektywy dla fundamentalnej fizyki, jak również dla postępu technologicznego w metrologii czasu i częstotliwości. W ramach pracy zmierzono momenty jądrowe ^{229m}Th i przesunięcia izomerowe dla dwóch linii widmowych w jonach $^{229m}\text{Th}^{2+}$. Wyznaczenie tych podstawowych właściwości jądrowych pozwala na określenie struktury nadsubtelnej izomeru ^{229m}Th dla dowolnego przejścia elektronowego, gdy znane są częstotliwości dla izotopu ^{229}Th i innego izotopu o znanym promieniu jądrowym [97]. Umożliwia to zastosowanie czulej detekcji podwójnego rezonansu elektronowo-jądrowego [67] dla izomeru, najpierw w poszukiwaniu wzbudzenia laserowego jądra, a następnie już w implementacji zegara nuklearnego na spułapkowanych jonach. Otrzymane wyniki pracy [H9] stanowią zatem ważny krok w kierunku stworzenia **optycznego zegara nuklearnego**.

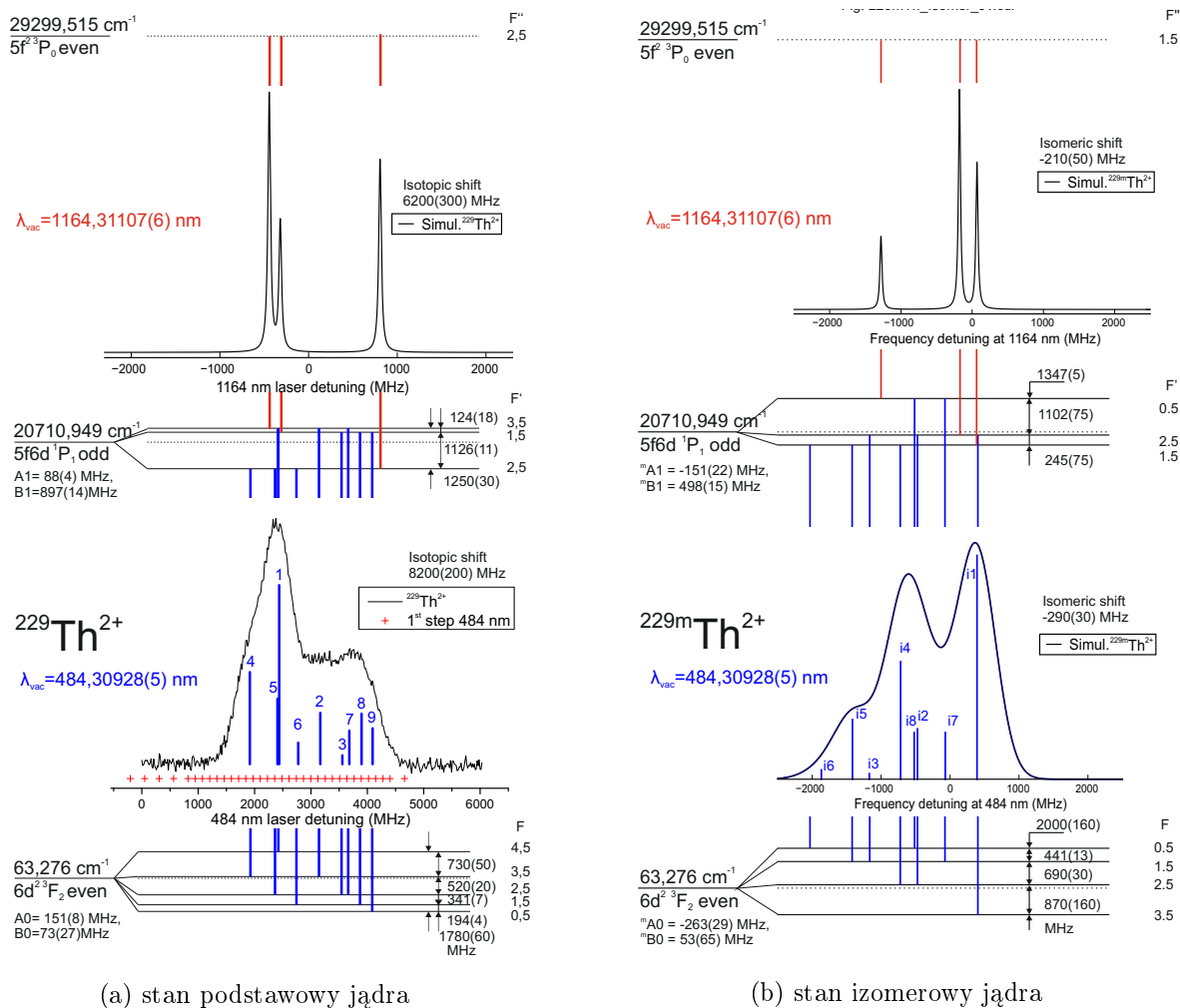
Tabela 3: Stałe struktury nadsubtelnej A i B dla $^{229}\text{Th}^{2+}$ i $^{229m}\text{Th}^{2+}$; eksperymentalne [H9] i obliczone teoretycznie *ab initio* [A14]

Energia [cm ⁻¹]	Opis spektroskopowy	$^{229}\text{Th}^{2+}$ (stan podstawowy jądra)		$^{229m}\text{Th}^{2+}$ (stan izomerowy jądra)		Ref.
		A [MHz]	B [MHz]	A^m [MHz]	B^m [MHz]	
0	5f6d $^3\text{H}_4$	81(4)	3008(260)			[A14]
63	6d ² $^3\text{F}_2$	151(8)	73(27)	-263(29)	53(65)	[H9]
		162(8)	71(7)	-263	-	[A14]
20711	5f6d $^1\text{P}_1$	88(4)	897(14)	-151(22)	498(15)	[H9]
		90(4)	689(110)	-151	515	[A14]

Tabela 4: Właściwości stanu podstawowego ($^{229}\text{Th}^{2+}$) i izomerowego ($^{229m}\text{Th}^{2+}$) jądra toru

Parametr	^{229}Th	^{229m}Th
μ^a	$\mu = 0,360(7)\mu_N$ [89]	$\mu^m = \mu A^m I^m / AI = -0,37(6)\mu_N$
Q_s^b	$Q_s = 3,15(3)$ eb [90] $Q_s = 3,11(6)$ eb [89]	
Q_0^c	$\bar{Q}_s = 3,14(3)$ eb $Q_0 = 8,8(1)$ eb	$Q_s^m = \bar{Q}_s B^m / B = 1,74(6)$ eb $Q_0^m = 8,7(3)$ eb
A^m/A		-1,73(25)
B^m/B^d		0,555(19)
μ^m/μ		-1,04(15)
Q_0^m/Q_0		0,99(4)
Przesunięcie:	izotopowe (IS ^{232,229})	izomerowe (IS ^m)
linia 484,3 nm	8,2(2) GHz	0,29(3) GHz
linia 1164,3 nm	6,2(3) GHz	0,21(5) GHz
IS ^m / IS ^{232,229}		0,035(4)
	$\langle r_{229}^2 \rangle \approx (5,76 \text{ fm})^2$	
	$\langle r_{232}^2 \rangle - \langle r_{229}^2 \rangle = 0,33(5) \text{ fm}^2$	$\langle r_{229m}^2 \rangle - \langle r_{229}^2 \rangle = 0,012(2) \text{ fm}^2$

^a - magnetyczny moment dipolowy, ^b - spektroskopowy elektryczny moment kwadrupolowy, ^c wewnętrzny elektryczny moment kwadrupolowy, ^d - tylko dla poziomu 20711₁, $\langle r^2 \rangle$ - średni promień kwadratowy rozkładu ładunku



Rysunek 2: Widma struktury nadsubtelnej dla jonów $^{229}\text{Th}^{2+}$ w stanie podstawowym i izomerowym jądra. Tylko widmo linii 484,3 nm dla stanu podstawowego jądra (lewa dolna część rysunku) jest eksperymentalnie zarejestrowaną strukturą [H9], pozostałe widma wysymulowano na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych w pracy [H9]

H10: Fluorescence properties of ions adsorbed from aqueous solutions on fused silica and CaF_2 - test cases of Eu^{3+} and Tb^{3+}

Praca ta obejmuje badania pomocnicze z punktu widzenia implementacji **optycznego zegara nuklearnego** na kryształach domieszkowanych jonami toru. W ramach pracy testowano koncepcję odmienną od standardowego domieszkowania w pełnej objętości, stosowanego np. w pracach [84, 139], a mianowicie domieszkowanie powierzchniowe, łatwą i szybką techniką adsorpcji z wodnych roztworów kwasu azotowego na powierzchni transparentnych amorficznych i krystalicznych podłoży [85].

W pracy [H10] w testach powyższej metody wykorzystano jony lantanowców wykazujących silną luminescencję w zakresie widzialnym (Eu^{3+} , Tb^{3+}). Próbkę można przygotować z minimalnej ilości substancji fluorescencyjnej w zakresie od nanogramów do pikogramów, co jest wymagane na przykład w eksperymentach z rzadkimi izotopami.

Metoda ta została już wcześniej zastosowana w eksperymencie z jonami ^{229}Th [140]. Do eksperymentu z próbkami stałymi zawierającymi ^{229}Th i odpowiednimi do wzbudzenia promieniowaniem synchrotronowym Yamaguchi i in. [85] opracowali technikę adsorpcji, która umożliwia osadzenie jonów $^{229}\text{Th}^{4+}$ w pokryciu submonowarstwowym na powierzchni CaF_2 z roztworu wodnego. Domieszkowana powierzchnia o gęstości powierzchniowej ok. $1 \times 10^{13} \text{ mm}^{-2}$ została wystawiona na intensywne promieniowanie undulatorowe w zakresie długości fali 130-320 nm, o którym

obecnie wiadomo, że zawiera przejście jądrowe o długości fali 149,7 nm [64, 141]. Nie zaobserwowano jednak związanego z nim sygnału fluorescencji [85]. Możliwe są różne przyczyny niepowodzenia: szybkość wzbudzenia jądrowego mogła być poniżej progu wykrywalności, rozpad bezpromienisty mógł uniemożliwić obserwację fluorescencji, preparatyka próbek mogła nie uwzględniać procesów zmieniających widmo absorpcji promieniowania wzbudzenia lub innych procesów wpływających na wygaszanie fluorescencji.

W celu oceny procesu przygotowania próbek, zgodnie z techniką opracowaną w ramach pracy [85], wybrano jako przypadki testowe jony lantanowców Eu^{3+} i Tb^{3+} , dobrze znane ze swojej silnej luminescencji [142–144]. Przebadano właściwości fluorescencyjne jonów w roztworach wodnych i domieszkowanych powierzchniowo próbkach stałych pod kątem ich zastosowań w laserach, wyświetlaczach czy sensorach. Ocena preparatyki próbek miała dać odpowiedź na pytanie, czy mogą być one zastosowane w optycznym zegarze nuklearnym

W pracy zarejestrowano widma luminescencji dla obu pierwiastków oraz zbadano wybrane właściwości optyczne. Dodatkowo obliczono radiacyjny czas życia (τ_R) wybranego poziomu elektronowego oraz kwantową wydajność luminescencji (Φ_{Ln}) jonów europu na podstawie obserwowanych czasów życia luminescencji (τ_{obs}) oraz skorygowanych widm emisyjnych, stosując metodę opisaną w pracy [145]. Otrzymane wyniki zostały dokładnie przedyskutowane.

W rozdziale 2.1 przedstawiono szczegółowo preparatykę próbek. Przygotowano wodne roztwory o stężeniach 1 mg/ml (roztwór o wysokim stężeniu - HC) i 0,01 mg/ml (roztwór o niskim stężeniu - LC) jonów lantanowców Ln^{3+} , w przedziale pH od 3,0 do 5,0, by uzyskać możliwie maksymalną adsorpcję jonów, ale także w celu utrzymania jonów w jednorodnym środowisku, czyli tylko w wodnych roztworach kwasu azotowego bez dodawania jakiegokolwiek zasady. Otrzymano w ten sposób warstwy na powierzchni transparentnych podłoży (szkło kwarcowe oraz CaF_2) o gęstości powierzchniowej ok. $30 \times 10^{14} \text{ mm}^{-2}$ (próbki HC) i ok. $2 \times 10^{14} \text{ mm}^{-2}$ (próbki LC). W rozdziale 2.2 opisano zbudowany w ramach tej pracy układ eksperymentalny do badania widma emisji jonów, wzbudzanego światłem ciągłym diod LED o wysokiej mocy, oraz układ do pomiarów czasów życia luminescencji, wykorzystujący diody LED w reżimie impulsowym (100 - 1000 ns). Diody zostały dobrane odpowiednio pod względem długości fali generowanego światła do wzbudzeń wybranych przejść w jonach Eu^{3+} (395 nm) i Tb^{3+} (375 nm).

Rozdział 3 pracy poświęcony jest przedstawieniu wyników i ich dyskusji. Na początku przedstawiono schematycznie fragment struktury elektronowej jonu Eu^{3+} (rysunek 1) i jonu Tb^{3+} (rysunek 2). Następnie zaprezentowano *skorygowane* widma emisji uzyskane dla badanych próbek zawierających jony Eu^{3+} (rysunek 3) i jony Tb^{3+} (rysunek 5). *Skorygowane* widma emisji powinny reprezentować względny widmowy strumień fotonów w funkcji długości fali. W opisanym eksperymencie uzyskuje się to poprzez rejestrację widm za pomocą fotopowielacza (ang. PMT) w trybie zliczania fotonów i korygowanie ich pod kątem zależności czułości PMT od długości fali. Przedstawiono również dla porównania *skorygowane* widmo emisji próbki CaF_2 domieszkowanej objętościowo jonami Eu^{3+} (rysunek 4), stosowanej jako materiał scyntylacyjny (Hellma Materials GmbH).

Wszelkie uzyskane wartości parametrów optycznych, takie jak: obserwowane położenie emisji (λ_{obs}), stosunki prawdopodobieństw przejść dla kanałów fluorescencji (tzw. *branching ratios* β_R), współczynniki asymetrii R (tylko dla Eu^{3+} - stosunek intensywności fluorescencji przejścia $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ do przejścia $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$) i obserwowane czasy zaniku luminescencji (τ_{obs}) próbek Eu^{3+} i Tb^{3+} o wysokim stężeniu dla roztworu prekursora pH=4,0 zostały zamieszczone w Tabeli 1. Względne niepewności β_R podano w *Materiałach dodatkowych* w tabelach 1 - 4.

W tabeli 2 przedstawiono względną intensywność luminescencji jonów europu i terbu dla próbek HC w funkcji pH roztworu prekursora. Natomiast w tabeli 3 podano obserwowany czas zaniku luminescencji τ_{obs} , radiacyjny czas życia τ_R i wydajność kwantową luminescencji Φ_{Ln} dla stanu $^5\text{D}_0$ w próbkach Eu^{3+} .

W rozdziale 3.2 opisano wyniki pomiarów czasów zaniku luminescencji badanych próbek. Przebiegi zaniku luminescencji przedstawiono na rysunkach 6 i 7 odpowiednio dla jonów Eu^{3+} i Tb^{3+} w badanych próbkach. Rozdział 3.3 poświęcono obliczeniom radiacyjnego czasu życia oraz kwantowej

wydajności emisji dla jonów Eu^{3+} . Otrzymane w tych dwóch rozdziałach wyniki umieszczono w tabelach 1 i 3. Na rysunku 8 przedstawiono graficznie porównanie radiacyjnych czasów życia i czasów zaniku luminescencji w funkcji $I_{\text{tot}}/I_{\text{MD}}$ (tj. stosunku intensywności całkowitej w widmie emisji do intensywności przejścia magnetyczno-dipolowego) dla jonów Eu^{3+} umieszczonych w różnych środowiskach: od roztworów wodnych, poprzez powierzchnie różnych podłoży, do wtrąceń w molekułach lub domieszek objętościowych w różnych matrycach. Aby uwzględnić wpływ otoczenia na jony Eu^{3+} wartości czasów życia zostały pomnożone przez współczynnik załamania światła do trzeciej potęgi, co wynika ze wzoru na τ_R (wzór 4 w pracy [H10]).

Podsumowując przedstawione wyniki badań, można stwierdzić, że pomyślnie przygotowano próbki ciał stałych domieszkowanych powierzchniowo przez przeniesienie jonów Ln^{3+} z roztworu wodnego w procesie adsorpcji. Jony na powierzchni podłoża są potrójnie zjonizowane i emitują światło luminescencji z wydajnością około pięciokrotnie wyższą niż w roztworze wodnym. Udało nam się udowodnić, że prosta technika adsorpcji rozwinięta w pracy Yamaguchi i in. [85], dotycząca preparatyki jonów ^{229}Th na powierzchni CaF_2 , może być ogólnie przydatna do badania właściwości optycznych niewielkich ilości jonów na powierzchniach stałych podłoży. Nasze obserwacje dla przypadków testowych jonów lantanowców Eu^{3+} i Tb^{3+} motywują do dalszej optymalizacji tej techniki dla jonów toru, gdzie dotychczas nie zaobserwowano fluorescencji. Stwierdzono również, że diody LED mogą być wykorzystywane jako wydajne źródła światła wzbudzającego w badaniach fluorescencji jonów domieszkowych, jako ekonomiczna alternatywa dla lamp lub diod laserowych w konwencjonalnych spektrometrach lub w spektroskopii czasowo-rozdzielczej.

4.7 Podsumowanie

W rozdziale 4.6 omówiono rezultaty uzyskane w pracach wchodzących do prezentowanego cyklu publikacji, dotyczących badania struktury elektronowej wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w zegarach optycznych (atomowych i nuklearnym). Cykl 10 prac powiązanych tematycznie [H1-H10] stanowi moje osiągnięcie naukowe, obejmujące zagadnienia z zakresu dyscypliny fizyka. Wyniki moich prac wskazują konkretne układy poziomów w atomach chromu i manganu do zastosowań w zagadnieniach metrologii kwantowej w dziedzinie pomiarów czasu i częstotliwości. Moja istotna aktywność naukowa poza macierzystą uczelnią pozwala mi aktywnie uczestniczyć od ponad 12 lat w bardzo ambitnym projekcie badań podstawowych nad realizacją optycznego zegara nuklearnego w grupie dr hab. Ekeharda Peika, prof. PTB, w PTB Brunshwik (Niemcy). Poniżej przedstawiam podsumowanie moich osiągnięć naukowych w trzech głównych nurtach badań.

1. *Badania atomu chromu*

- W pracy [H1] określono optymalną moc pola mikrofalowego w metodzie podwójnego rezonansu optyczno-mikrofalowego na strumieniu atomowym, pozwalającą na minimalizację efektu poszerzenia sygnału i jednocześnie jak największą dokładność określenia badanego interwału nadsubtelnego.
- W pracach [H2-H4] uzyskano nowe dane eksperymentalne dotyczące struktury nadsubtelnej oraz przesunięć izotopowych w atomie chromu. Zbadano łącznie 27 linii widmowych metodami spektroskopii laserowej. Wyznaczono po raz pierwszy stałe struktury nadsubtelnej A i B dla 3 poziomów parzystych i 4 poziomów nieparzystych. Zoptymalizowaną metodą podwójnego rezonansu optyczno-mikrofalowego na strumieniu atomowym zbadano 10 metastabilnych poziomów parzystych; dla 3 z nich udało się poprawić dokładność wyznaczenia interwałów nadsubtelnych o rząd wielkości, a dla 7 po raz pierwszy otrzymać wartości stałych nadsubtelnych A i B z dokładnością do setek Hz. Dla 8 z badanych poziomów oszacowano po raz pierwszy znak i wartość stałej struktury nadsubtelnej C . Wprawdzie otrzymane rezultaty stanowią stosunkowo niewielkie poszerzenie dotychczasowej eksperymentalnej bazy danych w sensie ilościowym, ale w kwestii jakości (precyzji) osiągnięto znaczący postęp.

- Przeprowadzone badania eksperymentalne, uzupełnione o wyniki literaturowe, stanowiły podstawę do realizacji w ramach pracy [H4] półempirycznej analizy struktury nadsubtelnej układu konfiguracji parzystych.
- Na podstawie zebranych danych (eksperymentalnych i teoretycznych) w pracy [H4] zaproponowano przejście zegarowe w atomie chromu:
 - przejście zegarowe:
 $3d^5 4s a^7 S_3 0,000 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 3d^5 4s a^5 S_2 7593,148 \text{ cm}^{-1}$.
 - * długość fali $\lambda = 1316,61669 \text{ nm}$,
 - * współczynnik dobroci $Q = 6,9 \cdot 10^{21}$ (tabela 5, rozdział 4.7),
 - * szerokość widmowa FWHM $\approx 30 \text{ nHz}$;
- Zaproponowano schematy detekcji przejścia zegarowego: 8 przejść detekcyjnych, które zbadano eksperymentalnie i przedstawiono ich strukturę, wraz z podaniem dokładnych położenia każdego z izotopów chromu oraz obliczonych przesunięć izotopowych.

2. Badania atomu manganu

- W pracach [H5, H6] i [H8] zbadano łącznie 92 linie widmowe należące do atomu manganu. Wyznaczono stałe struktury nadsubtelnej A i B po raz pierwszy dla 18 poziomów parzystych i 14 poziomów nieparzystych, dla 27 poziomów wyznaczono po raz pierwszy stałe B , a dla kolejnych 25 poziomów poprawiono dokładność jednej ze stałych. Łącznie zbadano strukturę nadsubtelną 92 poziomów elektronowych, co stanowi wzbogacenie dotychczasowych baz danych o około 68%.
- Zrealizowane badania eksperymentalne, uzupełnione o wyniki literaturowe, stanowiły podstawę do przeprowadzenia półempirycznej analizy struktury nadsubtelnej układu konfiguracji parzystych [H5, H8] oraz nieparzystych [H6].
- Na podstawie uzyskanych danych (eksperymentalnych i teoretycznych) zaproponowano trzy przejścia zegarowe w atomie manganu [H7]:
 - przejście zegarowe 1:
 $3d^5 4s^2 a^6 S_{5/2} 0,00 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 3d^6 (^5D) 4s a^6 D_{9/2} 17052,29 \text{ cm}^{-1}$.
 - * długość fali $\lambda = 586,269 \text{ nm}$,
 - * współczynnik dobroci $Q = 8 \cdot 10^{15}$ (tabela 5, rozdział 4.7),
 - * szerokość widmowa FWHM $\approx 100 \text{ mHz}$.
 - przejście zegarowe 2:
 $3d^5 4s^2 a^6 S_{5/2} 0,00 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 3d^6 (^5D) 4s a^6 D_{1/2} 17637,15 \text{ cm}^{-1}$.
 - * długość fali $\lambda = 566,828 \text{ nm}$,
 - * współczynnik dobroci $Q = 7 \cdot 10^{15}$ (tabela 5, rozdział 4.7),
 - * szerokość widmowa FWHM $\approx 120 \text{ mHz}$.
 - przejście zegarowe 3:
 $3d^5 4s^2 a^6 S_{5/2} 0,00 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 3d^6 (^5D) 4s a^4 D_{1/2} 17637,15 \text{ cm}^{-1}$.
 - * długość fali $\lambda = 419,717 \text{ nm}$,
 - * współczynnik dobroci $Q = 5 \cdot 10^{20}$ (tabela 5, rozdział 4.7),
 - * szerokość widmowa FWHM $\approx 0,0015 \text{ mHz}$.
- Zaproponowano schematy laserowego chłodzenia atomów manganu dla każdego z przejść zegarowych.

3. Badania jonu toru i badania pomocnicze

- W pracy [H9] scharakteryzowano stan izomerowy jądra izotopu 229 toru. Przeprowadzono badania jonów $^{229}\text{Th}^{2+}$ metodami spektroskopii laserowej w dwóch różnych instytucjach (PTB i LMU w Niemczech), na dwóch różnych układach eksperymentalnych do pułapkowania jonów. Otrzymano wartości następujących parametrów stanu izomerowego ^{229m}Th (tabela 4):
 - stałe A i B struktury nadsubtelnej dla dwóch poziomów elektronowych (tabela 3)
 - magnetyczny moment dipolowy: $\mu^m = -0,37(6)\mu_N$
 - spektroskopowy elektryczny moment kwadrupolowy: $Q_s^m = 1,74(6)$ eb
 - wewnętrzny elektryczny moment kwadrupolowy: $Q_0^m = 8,7(3)$ eb
 - różnica średniego promienia kwadratowego rozkładu ładunku w jądrze:
 $\langle r_{229m}^2 \rangle - \langle r_{229}^2 \rangle = 0,012(2)$ fm²
 - przesunięcie izomerowe (IS^m) dla linii widmowych 484,3 nm i 1164,3 nm
 - stosunek przesunięcia izomerowego (IS^m) do izotopowego ($IS^{232,229}$):
 $IS^m/IS^{232,229} = 0,035(4)$
- Wyniki pracy [H9] stanowią ważny krok w kierunku stworzenia **optycznego zegara nuklearnego**. Umożliwiają zastosowanie czulej detekcji podwójnego rezonansu elektronowo-jądrowego [67] izomeru w poszukiwaniu wzbudzenia jądra laserem. W konsekwencji może to doprowadzić do implementacji zegara nuklearnego na uwieczonych jonach. Wskazują również, że niskoenergetyczne przejście między jądrowym stanem podstawowym a stanem izomerowym w ^{229}Th usytuowane jest w niezwykle ciekawym rejonie z pogranicza fizyki atomowej i jądrowej. Otwiera ono nowe perspektywy dla fundamentalnej fizyki oraz dla postępu technologicznego w metrologii czasu i częstotliwości.
- Praca [H10] stanowi opis badań pomocniczych w kontekście realizacji **optycznego zegara nuklearnego** wykorzystującego kryształy (np. CaF_2) powierzchniowo domieszkowane jonami ^{229}Th .
- W pracy [H10] uzyskano następujące wyniki:
 - preparatyka próbek została przetestowana pozytywnie, zarówno do wykorzystania w **optycznym zegarze nuklearnym**, jak i w innych zastosowaniach (wyświetlacze, sensory itp.),
 - stwierdzono korzystne własności fluorescencyjne jonów osadzonych na powierzchni w porównaniu z roztworami wodnymi,
 - jony nie zmieniają stopnia jonizacji po osadzeniu na powierzchni substratów,
 - z sukcesem można wykorzystać diody LED do pomiarów fluorescencji i czasowo-rozdzielczej spektroskopii próbek zawierających nano- czy pikogramy badanej substancji.

Tabela 5: Zestawienie parametrów wybranych zegarów mikrofalowych i optycznych na neutralnych atomach

Typ zegara	Częstotliwość [Hz]	λ [nm]	Q	Odchylenie Allana	
				(dla $\tau = 1s$)	(RSU* lub FFU**)
^1H	1 420 405 751,76 ^a	rf	$1,4 \times 10^{12}$	10^{-12} [146]	10^{-14*} [147]
^{87}Rb	6 834 682 610,90 ^b	rf	$6,8 \times 10^9$	10^{-12}	$3,4 \times 10^{-16*}$ [148]
$^{133}\text{Cs}^T$	9 192 631 770 [149]	rf	$9,2 \times 10^9$	10^{-12} [149]	10^{-14*} [149]
$^{133}\text{Cs}^F$	9 192 631 770 [149]	rf	$9,2 \times 10^9$	10^{-14} [149]	10^{-16*} [149]
^{53}Cr	227 699 063 584 930 [H4]	1316,6	1×10^{21} [H4]		
^{169}Tm	262 954 938 269 213(30) [150]	1140,1	2×10^{14}	$1,1 \times 10^{-13}$ [150]	$\sim 10^{-17*}$ [150]
^{87}Sr	429 228 004 229 873,4(1,0) [151]	698,4	4×10^{16} [152]	$3,1 \times 10^{-18}$ [152]	$7,6 \times 10^{-21**}$ [152]
^{88}Sr	429 228 066 418 008,3(1,9) [153]	698,4	5×10^{13} [154]	$\sim 10^{-14}$ [153]	$7 \times 10^{-17**}$ [153]
^{55}Mn	511 214 793 362 882 [H7]	586,3	8×10^{15} [H7]		
^{171}Yb	518 295 836 590 865,2(7) [155]	578,4	1×10^{14} [155]	2×10^{-15} [155]	$3,4 \times 10^{-16**}$ [155]
^{174}Yb	518 294 025 309 217,8(9) [156]	578,4	$5,2 \times 10^{13}$ [156]	$5,5 \times 10^{-15}$ [156]	$1,5 \times 10^{-15**}$ [156]
^{55}Mn	528 748 455 061 470 [H7]	566,8	7×10^{15} [H7]		
^{55}Mn	714 071 758 408 246 [H7]	419,7	5×10^{20} [H7]		
^{199}Hg	1 128 575 290 808 162(6,4) [157]	265,6	$1,1 \times 10^{16}$ [157]		$5,7 \times 10^{-15**}$ [157]

^a - ... 751,7667(9) [146,147], ^b - ... 610,9043126(34) [148]

$^{133}\text{Cs}^T$ - zegar cezowy z termiczną wiązką atomów, $^{133}\text{Cs}^F$ - fontanna cezowa,

* - RSU (ang. *relative standard uncertainty*) - względna niepewność standardowa

** - FFU (ang. *fractional frequency uncertainty*) - ułamkowa niepewność częstotliwości

Tabela 6: Zestawienie wybranych zegarów optycznych na jonach

Typ zegara	Częstotliwość [Hz]	λ [nm]	Q	Odchylenie Allana	
				(dla $\tau = 1s$)	(RSU* lub FFU**)
$^{40}\text{Ca}^+$	411 042 129 776 393,2(1,0) [158]	729,3	3×10^{15} [159]	$2,9 \times 10^{-13}$ [158]	$2,4 \times 10^{-15*}$ [158]
$^{88}\text{Sr}^+$	444 779 044 095 485,5(9) [160]	674,0	1×10^{15} [161]	1×10^{-14} [160]	$2 \times 10^{-17**}$ [160]
$^{171}\text{Yb}^+(\text{E3})$	642 121 496 772 645,36(25) [137]	466,9	2×10^{23} [162]	5×10^{-15} [163]	$1,1 \times 10^{-18**}$ [163]
$^{171}\text{Yb}^+(\text{E2})$	688 358 979 309 307,82(36) [164]	435,5	2×10^{14} [165]	$4,1 \times 10^{-14}$ [164]	$5,9 \times 10^{-16*}$ [164]
$^{199}\text{Hg}^+$	1 064 721 609 899 144,94(97) [166]	281,6	$1,5 \times 10^{14}$ [167]	$3,3 \times 10^{-13}$ [166]	$1,9 \times 10^{-17**}$ [166]
$^{27}\text{Al}^+$	1 121 015 393 207 857,4(7) [168]	267,4	$1,5 \times 10^{17}$ [169]	$3,9 \times 10^{-15}$ [168]	$2,3 \times 10^{-17**}$ [168]
$^{115}\text{In}^+$	1 267 402 452 901 049,9(6,9) [170]	236,5	$1,6 \times 10^{15}$ [170]		$5 \times 10^{-15**}$ [170]
$^{229m}\text{Th}^{3+}$	2 002 600 000 000 000 [64]	149,7	$1,2 \times 10^{19}$ [87]		

(E2) - przejście elektryczne kwadrupolowe, (E3) - przejście elektryczne oktopolowe

* - RSU (ang. *relative standard uncertainty*) - względna niepewność standardowa

** - FFU (ang. *fractional frequency uncertainty*) - ułamkowa niepewność częstotliwości

4.8 Plany naukowe na przyszłość

W najbliższym czasie mam zamiar uczestniczyć w badaniach eksperymentalnych atomów i jonów pierwiastków ziem rzadkich z wykorzystaniem układu eksperymentalnego lampy wyładowczej z katodą wnątkową. Wspólnie z dr. hab. Bogusławem Furmannem, prof. PP planujemy uzyskanie widma fourierowskiego rozważanych do badań pierwiastków w kooperacji z prof. Rafałem Hakallą (Uniwersytet Rzeszowski) lub z zagranicznymi grupami badawczymi (prof. Sophie Kröger - Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin, Niemcy, oraz prof. Gönül Başar - Istanbul University, Turcja). Ułatwiłoby to znacznie dalsze badania eksperymentalne metodami spektroskopii laserowej.

Niezależnie zamierzam nadal rozwijać tematykę badawczą zapoczątkowaną w ramach prezentowanego osiągnięcia habilitacyjnego. W szczególności chciałbym kontynuować badania związane z koncepcją optycznych zegarów atomowych na atomach wybranych pierwiastków z otwartą powłoką 3d - manganu i chromu.

W bieżącym roku kalendarzowym planuję również przeprowadzić dalsze pomiary struktury atomu manganu i chromu na strumieniu atomowym przy wykorzystaniu lasera tytanowo-szafirowego (wypożyczonego od prof. Uwe Sterra i prof. Ekkeharda Peika z PTB Brunzwik w Niemczech); laser ten generuje promieniowanie w zakresie spektralnym ok. 750 - 850 nm, który do tej pory nie był dostępny w laboratorium mojego zakładu na Politechnice Poznańskiej.

Następnie mam zamiar przeprowadzić próbę pomiarów dwustopniowego wzbudzenia laserem na strumieniu atomowym, by przetestować potencjalne możliwości badania przejść wzbronionych w atomach manganu i chromu. W dalszej przyszłości planuję przeprowadzić pomiary zaproponowanych w ramach osiągnięcia habilitacyjnego przejść zegarowych, w pierwszej kolejności dla atomu manganu. Zamierzam również zbadać eksperymentalnie przejścia chłodzące w schematach chłodzenia laserowego atomu manganu zaproponowanych przeze mnie w pracy [H7].

Moje dalsze plany uwzględniają aktywność w pozyskiwaniu środków finansowych ze źródeł zewnętrznych (krajowych, jak np. NCN, FNP, NCBiR, oraz zagranicznych) na realizację badań zmierzających do konstrukcji optycznych zegarów atomowych na atomach chromu i manganu, w tym budowę systemu pułapek magneto-optycznych i zakup odpowiedniej aparatury.

Odnosząc się do dotychczasowej współpracy z grupą prof. Ekkeharda Peika z PTB Brunzwik, mam nadzieję na ponowną możliwość pracy tamtejszym laboratorium, obecnie wzbogaconym o trzeci układ z liniową pułapką jonową. Nowa pułapka ładowana jest podobnie jak w LMU, produktami rozpadu α źródła uranowego ^{233}U ; dodatkowo układ ten posiada możliwość pośredniego chłodzenia jonów toru za pomocą chłodzonych bezpośrednio jonów strontu. Obecnie trwają też testy skomplikowanego systemu laserowego do generacji promieniowania w zakresie ultrafioletu próżniowego, o długości fali ok. 150 nm odpowiadającej energii potrzebnej do wzbudzenia przejścia izomerowego w jonach ^{229}Th . Zależy mi na możliwości dalszego udziału w rozwoju potencjalnej implementacji unikatowego optycznego zegara nuklearnego na izotopie toru ^{229}Th .

5 Wykaz istotnej aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej instytucji naukowej

Poniższe zestawienie pokazuje moją międzynarodową mobilność i istotną aktywność naukową realizowaną w zagranicznych instytucjach naukowych przed oraz po uzyskaniu stopnia doktora. Wykaz został uszeregowany według instytucji, w kolejności od najdłuższego do najkrótszego łącznego czasu pobytu. Szczegółowy opis zakresu realizowanych zadań badawczych przedstawiłem częściowo w rozdziałach 7.2 i 7.3 niniejszego dokumentu oraz w załączniku nr 3 **Wykaz osiągnięć naukowych**, w rozdziale II. 6. „*Staż naukowe*”.

Aktywność po doktoracie

Termin	Informacje o instytucji naukowej, mentorze i efektach stażu
01/2015 - 12/2017	<p>PTB Brunzswik, Niemcy (PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt) Zakład Czasu i Częstotliwości Wydział Optyki Mentor: dr hab. Ekkehard Peik, prof. PTB (h-index = 32) (staż podoktorski) Wymiernym efektem naukowym stażu są artykuły [H9, H10, A11, A13, A14] oraz doniesienia konferencyjne [K2-K4, K6-K13].</p>
07/2013	<p>(staż podoktorski) Przygotowanie wniosku o Stypendium wewnątrz europejskie Marie Curie (IEF), konkurs FP7-PEOPLE-IEF-2013 nr SEP-210111460: "Nuclear Optical Clock with Th-229".</p>
07/2011	<p>(staż podoktorski) Wymiernym efektem naukowym stażu jest artykuł [A21].</p>
07/2010 - 10/2010	<p>(staż podoktorski) Wymiernym efektem naukowym stażu jest artykuł [A21].</p>
05/2014 - 12/2014	<p>NPL Teddington, Wielka Brytania (NPL National Physical Laboratory) Zakład Czasu i Częstotliwości Wydział Czasu, Kwantów i Elektromagnetyzmu Mentor: dr hab. Krzysztof Szymaniec (h-index = 14) (staż podoktorski) Wymiernym efektem naukowym stażu są artykuł [A16] oraz doniesienia konferencyjne [K14-K16].</p>
07/2012 - 08/2012	<p>Uniwersytet Techniczny w Grazu, Austria Instytut Fizyki Eksperymentalnej Mentor: dr hab. Laurentius Windholz, prof. TU Graz (h-index = 22) (staż podoktorski) w ramach <i>Programu „Kształcenie ustawiczne” – Erasmus</i> Mobilność szkoleniowa personelu. Program Unii Europejskiej Wymiernym efektem naukowym stażu są artykuły [A17,A18] oraz doniesienia konferencyjne [K18-K19].</p>

Aktywność przed doktoratem

10/2008 - 11/2008	<p>Uniwersytet Techniczny w Grazu, Austria Instytut Fizyki Eksperymentalnej Mentor: dr hab. Laurentius Windholz, prof. TU Graz (h-index = 22) (staż) w ramach <i>Programu „Kształcenie ustawiczne” – Erasmus</i> Mobilność kadry dydaktycznej. Program Unii Europejskiej Wymiernym efektem naukowym stażu jest artykuł [A24].</p>
04/2008 - 07/2008	<p>realizacja projektu międzynarodowego: Współpraca naukowo-techniczna Austria-Polska WTZ PL07/2007 Wymiernym efektem naukowym stażu są artykuły [A24, A27] oraz doniesienia konferencyjne [K33,K34].</p>

Termin	Informacje o instytucji naukowej, mentorze i efektach stażu
03/2003 - 07/2003	Uniwersytet Techniczny Nauk Stosowanych, Wildau, Niemcy Mentor: prof. dr hab. Astra Richter (h-index = 21) (staż) wymiana studencka <i>Socrates/Erasmus</i> uczestnictwo w kursach IQN – International Quality Network (półprzewodniki, biomateriały, nanotechnologie) Program Unii Europejskiej

6 Wykaz osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

6.1 Dydaktyka

6.1.1 Zajęcia dydaktyczne

Wykłady:

- **Fizyka**

kierunek Mechatronika (Wydział Inżynierii Mechanicznej PP), studia niestacjonarne inżynierskie, semestr 2, 12 godzin, od r.a. 2017/2018

kierunek Mechatronika (Wydział Inżynierii Mechanicznej PP), studia stacjonarne inżynierskie, semestr 1, 30 godzin, od r.a. 2018/2019

kierunek Inżynieria Farmaceutyczna (Wydział Technologii Chemicznej PP oraz Wydział Farmacji Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu), studia stacjonarne inżynierskie, semestr 2, 45 godzin, od r.a. 2018/2019

- **Fizyka Techniczna**

kierunek Zarządzanie i Inżynieria Produkcji (Wydział Inżynierii Mechanicznej PP), studia niestacjonarne inżynierskie, semestr 1, 20 godzin, od r.a. 2019/2020

- **Fizyka Kwantowa**

kierunek Energetyka (Wydział Elektryczny PP - obecnie Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki PP), studia stacjonarne magisterskie, semestr 1, 15 godzin, od r.a. 2012/2013 do 2013/2014 oraz od 2018/2019 do 2020/2021

Ćwiczenia rachunkowe:

- **Fizyka**

kierunek Mechanika i Budowa Maszyn (Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania PP, obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej PP), studia stacjonarne inżynierskie, semestr 1, 15 godzin, r.a. 2011/2012 i 2012/2013

kierunek Inżynieria Biomedyczna (Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania PP, obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej PP), studia stacjonarne inżynierskie, semestr 1, 15 godzin, r.a. 2012/2013

kierunek Inżynieria Materiałowa (Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania PP, obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej PP), studia stacjonarne inżynierskie, semestr 1, 15 godzin, r.a. 2012/2013

kierunek Inżynieria Lotnicza (Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki PP), studia stacjonarne inżynierskie, semestr 1, 15 godzin, r.a. 2020/2021 i 2021/2022

- **Fizyka Techniczna**

kierunek Zarządzanie i Inżynieria Produkcji (Wydział Inżynierii Mechanicznej PP), studia niestacjonarne inżynierskie, semestr 1, 10 godzin, od r.a. 2019/2020

Ćwiczenia laboratoryjne i projektowe:

- **Pracownia Fizyczna I**

różne kierunki, studia stacjonarne/niestacjonarne, semestr 1/2 - od początku studiów doktoranckich (r.a. 2004/2005)

- **Physics Laboratory** (zajęcia w języku angielskim)

kierunek Automatic Control and Robotics (Wydział Automatyki Robotyki i Elektrotechniki PP), studia stacjonarne inżynierskie, semestr 3, 30 godzin

kierunek Chemical Technology (Wydział Technologii Chemicznej PP), studia stacjonarne inżynierskie, semestr 2, 45 godzin

- **Zaawansowane Laboratorium Specjalistyczne**

zajęcia w ramach jednego z 4 bloków ćwiczeń, prowadzone wspólnie z dr. Gustawem Szawiolą, doc. PP (również z dr. Andrzejem Krzykowskim)

przygotowanie 2 ćwiczeń: budowa stanowisk, opracowanie instrukcji (we współpracy z dr. Andrzejem Jaroszem i dr. Andrzejem Krzykowskim)

kierunek Fizyka Techniczna (Wydział Fizyki Technicznej PP, obecnie Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej PP), studia stacjonarne magisterskie, semestr I, 22,5 godziny - od r.a. 2011/2012 do 2013/2014 oraz od r.a. 2018/2019 do chwili obecnej

- **Pracownia specjalistyczna i dyplomowa**

kierunek Fizyka Techniczna (Wydział Fizyki Technicznej PP, obecnie Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej PP): magisterska - od r.a. 2010/2011, inżynierska - od r.a. 2009/2010

kierunek Edukacja Techniczno-Informatyczna (Wydział Fizyki Technicznej PP, obecnie Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej PP): magisterska - od r.a. 2019/2020, inżynierska - od r.a. 2017/2018

6.1.2 Opieka naukowa nad studentami

Opieka naukowa w trakcie realizacji prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich (Wydział Fizyki Technicznej PP, obecnie Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej PP):

w charakterze promotora

prace magisterskie:

1. Bartosz Pawałowski, *Badanie obsadzeń stanów metastabilnych atomów w układzie eksperymentalnym do otrzymywania strumienia atomowego*, 2011
2. Michał Szumann, *Budowa układu do automatycznej kompensacji pola magnetycznego w pułapce Paula*, 2012
3. Anna Dychalska, *Modyfikacja układu eksperymentalnego z pułapką Paula*, 2013
4. Mateusz Nowicki, *Program do symulacji struktury nadsubtelnej i przesunięć izotopowych*, 2020
5. Mateusz Ewiak, *Program do sterowania stanowiskiem eksperymentalnym z pułapką Paula napisany w środowisku LabVIEW*, 2021

prace inżynierskie:

1. Michał Szumann, *Modyfikacja układu kompensacji pola magnetycznego w układzie eksperymentalnym z pułapką Paula*, 2011
2. Anna Dychalska, *Budowa układu chłodzenia pompy turbomolekularnej dla stanowiska ultra wysokiej próżni pułapki Paula*, 2012
3. Jerzy Marczak, *Budowa stanowiska do wytwarzania próbek dla układu eksperymentalnego z pułapką Paula*, 2013
4. Patryk Nowaczyk, *Budowa stanowiska eksperymentalnego lampy z katodą węglową do badań spektroskopowych*, 2014
5. Jacek Jastrzembski, *Opracowanie bazy danych linii widmowych i poziomów energetycznych atomu i jonu toru*, 2019
6. Mateusz Nowicki, *Opracowanie oprogramowania do przeglądania i obróbki danych eksperymentalnych*, 2019
7. Krzysztof Więckiewicz, *Pakiet programów w środowisku LabVIEW do sterowania urządzeniami laboratoryjnymi*, 2020
8. Jakub Okraska, *Baza danych linii widmowych i poziomów elektronowych atomu (Ti I) i jonu (Ti II) tytanu*, 2021
9. Dawid Balicki, *Baza danych linii widmowych i poziomów elektronowych atomu manganu*, 2022

6.1.3 Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego

brak

6.2 Organizacja

- | | |
|-------------|--|
| 2020 - 2024 | Członek Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej PP (przedstawiciel niesamodzielnych pracowników naukowo-dydaktycznych) |
| 2008 - 2012 | Członek Wydziałowej Komisji Wyborczej Wydziału Fizyki Technicznej PP |
| 07/2022 | Współpraca z dr. Jerzym Nawrockim i mgr. inż. Piotrem Dunstem z Obserwatorium Astrogeodynamicznego w Borówcu (koło Poznania) należącego do Centrum Badań Kosmicznych (CBK), Polskiej Akademii Nauk (PAN) w zakresie wspólnych badań nad ewaluacją pierwotnych wzorców częstotliwości opartych na konstrukcji cezowej fontanny atomowej (AOS-CsF1 i AOS-CsF2), doprowadzenie do podpisania umowy nr (PP) RU00021856 między CBK PAN a Politechniką Poznańską na użyczenie generatora mikrofal Giga-Tronics GS9000S do badań parametrów wspomnianych fontann cezowych |
| 09/2022 | W ramach współpracy z grupą dr. hab. Ekkeharda Peika, prof. PTB (PTB Brunzswik, Niemcy) doprowadzenie do podpisania umowy nr (PP)RU00022727 między PTB Brunzswik a Politechniką Poznańską na wypożyczenie lasera tytanowo-szafirowego firmy TekhnoScan do laboratorium Zakładu Inżynierii i Metrologii Kwantowej na okres 11 miesięcy z możliwością przedłużenia |
| 10/2022 | W ramach współpracy z grupą dr. hab. Ekkeharda Peika, prof. PTB (PTB Brunzswik, Niemcy) doprowadzenie do podpisania umowy nr (PP)RU00023433 między PTB Brunzswik a Politechniką Poznańską na wypożyczenie lasera pompującego Coherent Verdi V-10 do laboratorium Zakładu Inżynierii i Metrologii Kwantowej na okres 10 miesięcy z możliwością przedłużenia |

6.3 Popularyzacja nauki

- Wykład popularnonaukowy z cyklu *Sekrety Fizyki i Inżynierii*, pod tytułem "Co tyka w zegarze atomowym", kierowany do uczniów szkół ponadpodstawowych, wygłoszony w salach dydaktycznych Politechniki Poznańskiej (01.12.2022)
- Udział w audycji radiowej *Z innej planety: czasomierz dokładniejszy od zegara* stacji Radio Dla Ciebie (RDC); emisja audycji na żywo dnia 17 lipca 2018 roku, między godziną 21.00 a 22.00 ze studia Radio Poznań (dawniej Radio Merkury), prowadzący redaktor RDC Łukasz Badowski, audycja dostępna w podcast *Z innej planety* RDC pod linkiem <https://www.rdc.pl/podcast/>
- Krótki wywiad z redaktor Sandrą Soluk (dziennikarka Radio Poznań) i emisja wiadomości w wiadomościach Radia Poznań dnia 26 maja 2018 roku
- Wywiad z redaktor Ludwiką Tomalą (PAP) i autoryzacja artykułu pt. *Badacze TORują drogę do najdokładniejszego na świecie zegara*, dostępnego na stronie internetowej <http://naukawpolsce.pl>
- Wywiad z redaktorem portalu tech.wp.pl Bolesławem Breczko i autoryzacja artykułu pt. *Polak buduje najdokładniejszy zegar na świecie*, dostępnego na stronie internetowej <https://tech.wp.pl/>
- Artykuł popularno-naukowy (w języku polskim i angielskim) pt. *Przełom w pracach nad optycznym nuklearnym zegarem*, Głos Politechniki, Rok XXVII NR 03 (201) • ISSN 1233-5444, strony 39-43 (2018)
- Wielokrotny udział w prezentacji laboratoriów naukowych jednostki dla zaproszonych gości wydziału i/lub jednostki, a także dla kandydatów na studia (w ramach tzw. *Drzwi Otwartych*) oraz młodzieży szkolnej uczestniczącej w wykładach otwartych z cyklu *Piękno Fizyki i Sekrety Fizyki* (obecnie *Sekrety Fizyki i Inżynierii*), a także ostatnio studentów zagranicznych z Uniwersytetu Europejskiego EUNICE (European University for Customised Education), którego liderem jest Politechnika Poznańska

7 Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

7.1 Podsumowanie dorobku naukowego

Dane bibliometryczne na dzień 7 kwietnia 2023 r. zgodnie z bazami Web of Science, Scopus i Google Scholar.

	Web of Science	Scopus	Google Scholar
Publikacje	21	23	41
Liczba cytowań	213	225	309
(bez autocytowań)	185	194	—
Liczba artykułów cytujących	165	176	—
(bez autocytowań)	151	161	—
h-index	8	8	9

Sumaryczny *Impact Factor* opublikowanych artykułów wynosi **98,624** (dla roku opublikowania pracy za wyjątkiem prac opublikowanych po roku 2021), a 5-letni *Impact Factor* - **101,619**.

Suma punktów MEiN (wykaz z dnia 1 grudnia 2021 roku) wszystkich opublikowanych artykułów wynosi **2240**.

Szczegółowe dane bibliometryczne zostały przedstawione w załączniku nr 3 **Wykaz osiągnięć naukowych**.

7.2 Przebieg pracy naukowej przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

Po ukończeniu studiów na kierunku Fizyka Techniczna (specjalność: fizyka materiałów i nanotechnologie) na Wydziale Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej, w dniu 01.10.2004 roku rozpocząłem studia doktoranckie na kierunku „Technologia Chemiczna i Aparatura Badawcza” prowadzonym wspólnie na Wydziale Technologii Chemicznej i Wydziale Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej. Swoje badania prowadziłem po opieką prof. dr. hab. Jerzego Dembczyńskiego w Katedrze Fizyki Atomowej na Wydziale Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej.

W zespole prowadzono badania struktury elektronowej, w szczególności struktury nadsubtelnej oraz przesunięć izotopowych, dla swobodnych atomów i jonów różnych pierwiastków. W ciągu pierwszych trzech lat realizacji pracy doktorskiej zapoznałem się gruntownie z metodami spektroskopii laserowej na stanowisku eksperymentalnym ze strumieniem atomowym. Moim wkładem do stosowanego układu eksperymentalnego były przede wszystkim konstrukcja, zamontowanie i przetestowanie ekranu pola magnetycznego w strefie oddziaływania pola mikrofalowego ze swobodnymi atomami; uczestniczyłem również aktywnie w pomiarach metodą podwójnego rezonansu optyczno mikrofalowego struktury nadsubtelnej poziomu $3d^5 4s a^5S_2$ atomu chromu ([A25, A26, K35, K36], załącznik 3).

W kolejnych latach skonstruowałem układ eksperymentalny lampy wyładowczej z katodą wnątkową [A28, K34] w celu prowadzenia badań struktury atomowego tantalu, oraz udałem się na staż do Instytutu Eksperymentalnej Fizyki na Uniwersytecie Technicznym w Grazu w Austrii do grupy dr hab. Laurentiusa Windholza, prof. TU Graz, która specjalizowała się w pomiarach struktury tego pierwiastka [A24, A27, K31-K33].

W październiku 2009 roku, na podstawie rozprawy pt. *Badanie struktury nadsubtelnej wybranych pierwiastków z otwartą podpówłoką nd metodami spektroskopii laserowej w katodzie wnątkowej i na strumieniu atomowym*, uzyskałem na Wydziale Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej stopień naukowy doktora nauk przyrodniczych w zakresie fizyki. Wyniki badań uzyskane podczas realizacji pracy doktorskiej były prezentowane wielokrotnie w postaci referatów i komunikatów konferencyjnych [K31-K36] oraz w publikacjach [A24-A28].

7.3 Przebieg pracy naukowej po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora podjąłem (wraz z Kolegami z macierzystej grupy badawczej) intensywne badania struktury atomu chromu na układzie eksperymentalnym ze strumieniem atomowym, wykorzystując zmodyfikowaną wersję (tzn. z uwzględnieniem ekranowania pola magnetycznego) pod kątem zastosowania metody ABMR-LIRF do wysoce precyzyjnych pomiarów. Zbierałem materiał do prac wchodzących do osiągnięcia habilitacyjnego [H1-H3], jednocześnie prezentując osobiście lub jako współautor cząstkowe wyniki badań na konferencjach [K20, K25-K30, załącznik 3].

Po uzyskaniu stopnia doktora moje wizyty w zagranicznych ośrodkach naukowych związane były głównie z zagadnieniami wzorców czasu i częstotliwości. Instytucje, w których odbywałem staże, w większości zaliczane były do grupy narodowych instytutów metrologicznych (ang. *National Metrology Institute* - NMI), tzn. instytucji wyznaczonych decyzją właściwego organu państwowego do zapewnienia jednolitości miar w danym państwie.

W roku 2010 w okresie od lipca do października wyjechałem na krótkoterminowy staż naukowy do PTB Brunshwik w Niemczech (niemiecki NMI) do grupy dr hab. Ekkeharda Peika, prof. PTB. Zbudowałem tam układ eksperymentalny lampy wyładowczej z katodą wnątkową, która zawierała blaszkę wykonaną z izotopu ^{232}Th . Celem był pomiar zaniku kanałów fluorescencji z poziomu z konfiguracji nieparzystej $6d7s(^3D)7p$ jonu $^{232}\text{Th}^+$ o energii 24874 cm^{-1} , $J = 5/2$, obsadzanego przez wzbudzenie światłem laserowym o długości fali 402 nm z poziomu podstawowego. Cel mojej wizyty dotyczył również badania wysokoenergetycznych poziomów jonu $^{232}\text{Th}^+$, o energiach w przedziale $58900 - 69000 \text{ cm}^{-1}$. Poziomy te były obsadzone przez wzbudzenie trzecią harmoniczną (THG) pikosekundowego lasera tytanowo-szafirowego o długości fali fundamentalnej w przedziale 750-950 nm

(co dla THG odpowiada 227-294 nm) ze wspomnianego poziomu o energii 24874 cm^{-1} , $J = 5/2$. Był to mój pierwszy etap prac związanych z pionierskim projektem realizacji **optycznego zegara nuklearnego** w oparciu o stan izomerowy izotopu toru 229.

Rok później spędziłem kolejny miesiąc (lipiec 2011) w grupie prof. Ekkeharda Peika, gdzie w ramach projektu COST, finansowanego przez UE (akcja IOP1001 „Pułapka jonowa do przyszłych zastosowań”), uczestniczyłem w badaniach jonów $^{232}\text{Th}^+$ uwięzionych w pułapce liniowej. Wymiernym efektem wspomnianych dwóch staży była praca [A21].

Następną wizytę w PTB Brunzshwik odbyłem w roku 2013 (lipiec). W trakcie pobytu uczestniczyłem w bieżących badaniach jonów Th^+ w pułapce liniowej oraz zapoznałem się z aktualnym stanem układu eksperymentalnego. Przygotowałem również wniosek o Stypendium wewnątrz europejskie Marie Curie (IEF), który złożyłem na konkurs FP7-PEOPLE-IEF-2013 o numerze SEP-210111460 i tytule „Nuclear Optical Clock with Th-229”.

Aktywnie współpracowałem również z grupą prof. Laurentiusa Windholza na TU Graz w Austrii, gdzie latem roku 2012 (w lipcu i sierpniu), w ramach programu europejskiego „Uczenie się przez całe życie” - ERASMUS, uczestniczyłem w szkoleniu dotyczącym budowy i działania systemu lasera tytanowo-szafirowego oraz jego zastosowania do badań struktury atomowego lantanu metodami spektroskopii laserowej. Wymiernym efektem mojej wizyty były dwa artykuły naukowe [A17, A18] oraz doniesienia konferencyjne [K18, K19, załącznik 3].

W roku 2014 otrzymałem zaproszenie na długoterminowy staż podoktorski od dr hab. Krzysztofa Szymańca, który prowadził grupę badawczą zajmującą się pierwotnymi wzorcami czasu i częstotliwości - fontannami cezowymi w Zakładzie Czasu i Częstotliwości, Wydział Czasu, Kwantów i Elektromagnetyzmu w National Physical Laboratory (NPL) w Teddington w Wielkiej Brytanii (brytyjskim NMI). Od maja do grudnia 2014 roku uczestniczyłem w obsłudze fontanny cezowej NPL-CsF2 oraz brałem udział w ewaluacji nowej generacji standardu częstotliwości - fontanny cezowej NPL-CsF3. Wymiernym efektem naukowym stażu jest artykuł [A16] oraz doniesienia konferencyjne [K14-K16].

W latach 2015 - 2017 przebywałem na stażu długoterminowym w PTB Brunzshwik w grupie prof. Ekkeharda Peika, ponownie zajmując się tematyką **optycznego zegara nuklearnego**. Brałem udział w pionierskich badaniach zarówno dotyczących potencjalnej implementacji na jonach Th^+ , Th^{2+} , Th^{3+} uwięzionych w pułapkach liniowych, jak i koncepcji realizacji zegara w oparciu o kryształy domieszkowane objętościowo jonami Th^{4+} (np. $\text{CaF}_2:\text{Th}^{4+}$), lub w prostszej wersji - kryształy domieszkowane powierzchniowo [H10]. Jako wykonawca brałem udział w projekcie nuClock 664732, finansowanym w ramach Programu Horizon 2020 Unii Europejskiej. W ramach tego europejskiego projektu, razem z Kolegami z grupy kierowanej przez prof. dr hab. Petera Thirolfa na Wydziale Fizyki LMU w Monachium przeprowadziliśmy w laboratorium Maier-Leibnitz-Laboratorium w Garching pod Monachium wspólne badania eksperymentalne, których wyniki porównaliśmy z badaniami wcześniej wykonanymi w PTB Brunzshwik. Te wspólne badania zaowocowały publikacją [H9]. Dodatkowo wymiernym efektem naukowym stażu są artykuły [A11, A13, A14] oraz doniesienia konferencyjne [K2-K4, K6-K13].

Bezpośrednio po powrocie do kraju w roku 2018 w macierzystej jednostce uczestniczyłem w prowadzonych przez zespół badaniach struktury nadsubtelnej atomów holmu w lampie wyładowczej z katodą wnątkową (A10, K5). Rozpocząłem również badania struktury elektronowej atomu manganu metodą LIF na układzie eksperymentalnym ze strumieniem atomowym. Udało mi się pozyskać środki z Narodowego Centrum Nauki w Krakowie na realizację tematu „Wstępne badania struktury nadsubtelnej w atomie manganu pod kątem zastosowań w kwantowej metrologii i inżynierii” w ramach konkursu Miniatura-3, projekt badawczy nr 2019/03/X/ST2/01119. Jako kierownik projektu przeprowadziłem badania, których wyniki zaowocowały w sumie czterema publikacjami [H5-H8] dotyczącymi struktury energetycznej atomu manganu i potencjalnego wykorzystania układów poziomów elektronowych o szczególnych własnościach w optycznych zegarach atomowych (proponując przejść zegarowych oraz schematów chłodzenia laserowego w pułapkach magnetoptycznych).

W roku 2022 powróciłem do pomiarów struktury nadsubtelnej atomu chromu metodą LIF na strumieniu atomowym, realizując badania możliwych schematów detekcji dla postulowanego przejścia zegarowego [H4]. Propozycję tę można było sformułować dzięki wcześniejszym badaniom eksperymentalnym wykonanym w pracach [H1-H3], jak również dzięki analizie półempirycznej parametrów radiacyjnych (wartości mocy oscylatorów i czasów życia dla niskoenergetycznych poziomów metastabilnych) dla atomu chromu, przeprowadzonej przez dr hab. Magdalenę Elantkowską, prof. PP oraz dr hab. Jarosława Ruczkowskiego, prof. PP.

7.4 Prezentacja osiągnięcia naukowego na seminariach w krajowych instytucjach naukowych

Swój dorobek habilitacyjny wielokrotnie prezentowałem w ramach seminariów w różnych krajowych instytucjach naukowych. Wystąpienia wymieniono w kolejności chronologicznej.

- Referat pt. "Badania struktury wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w optycznych zegarach atomowych i nuklearnych", wygłoszony w ramach Czwartkowego Kolokwium Fizycznego w Instytucie Fizyki na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu w dniu 26.05.2022 r.
- Referat pt. "Badania struktury wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w zegarach optycznych", wygłoszony w ramach Seminarium Wydziałowego na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej w dniu 13.10.2022 r.
- Referat pt. "Badania struktury wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w zegarach optycznych", wygłoszony w ramach Seminarium Wydziałowego na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego w dniu 27.10.2022 r.
- Referat pt. "Investigations of the electronic structure of selected elements in terms of applications in optical clocks", wygłoszony w ramach Seminarium Optycznego na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w dniu 01.12.2022 r.
- Referat pt. "Badania struktury wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w zegarach optycznych", wygłoszony w ramach Seminarium Awansowego na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w dniu 02.12.2022 r.
- Referat pt. "Investigations of the electronic structure of selected elements in terms of applications in optical clocks", wygłoszony w ramach Seminarium Zakładu Fotoniki na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie w dniu 05.12.2022 r.
- Referat pt. "Investigations of the electronic structure of selected elements in terms of applications in optical clocks", wygłoszony w ramach Seminarium Modern Trends in Physics Research na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w dniu 11.01.2023 r.

Literatura

- [1] P. Gill, "Optical frequency standards," *Metrologia* **42**, S125–S137 (2005).
- [2] A. Derevianko and H. Katori, "Colloquium: Physics of optical lattice clocks," *Rev. Mod. Phys.* **83**, 331–347 (2011).
- [3] N. Poli, C. W. Oates, P. Gill, and G. M. Tino, "Colloquium: Physics of optical lattice clocks," *Riv. Nuovo Climento* **36**, 555 – 624 (2013).

- [4] A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, and P. O. Schmidt, “Optical atomic clocks,” *Reviews of Modern Physics* **87**, 637 – 701 (2015).
- [5] M. Gellesch, J. Jones, R. Barron, A. Singh, Q. Sun, K. Bongs, and Y. Singh, “Transportable optical atomic clocks for use in out-of-the-lab environments,” *Advanced Optical Technologies* **9**, 313 – 325 (2020).
- [6] A. S. Bell, J. Stuhler, S. Locher, S. Hensler, J. Mlynek, and T. Pfau, “A magneto-optical trap for chromium with population repumping via intercombination lines,” *Europhys Lett* **45**, 156–161 (1999).
- [7] G. Bismut, B. Pasquiou, D. Ciampini, B. Laburthe-Tolra, E. Maréchal, L. Vernac, and O. Gorceix, “Optimized loading of an optical dipole trap for the production of chromium BECs,” *Appl Phys B* **102**, 1–9 (2011).
- [8] W. J. Childs, L. S. Goodman, and D. von Ehrenstein, “Magnetic Hyperfine interaction of Cr^{53} ,” *Phys Rev* **132**, 2128–2135 (1963).
- [9] J. M. Pendlebury and K. F. Smith, “Hyperfine structure measurements in ^{75}As , ^{31}P and ^{53}Cr ,” *Proc Phys Soc* **84**, 849–856 (1964).
- [10] S. Davis, J. Wright, and L. Balling, “Hyperfine structure of the ground state of Mn^{55} ,” *Phys. Rev. A* **3**, 1220–1223 (1971).
- [11] J. Sugar and C. Corliss, “Atomic Energy levels of the Iron-Period Elements: Potassium through Nickel,” *Journal of Physical and Chemical Reference Data* **14** (1985).
- [12] R. L. Kurucz and B. Bell, “1995 Atomic Line Data. Kurucz CD-ROM No. 23,” [Online]. Available: <https://www.cfa.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html>.
- [13] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, and NIST ASD Team, NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.7.1), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2020]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. (2020).
- [14] E. B. Saloman, “Energy Levels and Observed Spectral Lines of Neutral and Singly Ionized Chromium, Cr I and Cr II,” *J Phys Chem Ref Data* **41**, 043 103 (2012).
- [15] P. Raghavan, “Table of nuclear moments,” *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **42**, 189–291 (1989).
- [16] W. M. Haynes, D. R. Lide, and T. J. Bruno, *Handbook of chemistry and physics - 95th edition* (CRC Press LLC, New York, 2014).
- [17] A. M. Catalán and P. M. Sancho, *An R Soc Esp Fis Quim* **29**, 327 (1931).
- [18] C. C. Kiess, “Description and Analysis of the First Spectrum of Chromium, CrI,” *J Res Natl Bur Stand* **51**, 247 (1953).
- [19] H. Bucka, B. Budick, R. J. Goshen, and S. Marcus, “Lifetimes and g_J Factors in Excited States of Chromium. Hyperfine Structure of Cr^{53} ,” *Phys Rev* **144**, 96–102 (1966).
- [20] U. Becker, U. Teppner, and U. Wüsthof, “Hyperfine structure of the 7P states in the configurations $3d^54p$ and $3d^44s4p$ of ^{53}Cr ,” *J Phys B* **11**, 2435–2448 (1978).
- [21] W. Ertmer, U. Johann, and R. Mosmann, “Measurement of the Nuclear Quadrupole Moment of ^{53}Cr by Laser-Rf Double Resonance,” *Z Phys A* **309**, 1–4 (1982).

- [22] T. Reinhardt, J. Maichel, M. Baumann, and J. Krueger, “Hyperfine structure of the resonance lines of ^{53}Cr and lifetimes of some excited states of the Cr I spectrum,” *Z Phys D* **34**, 87–90 (1995).
- [23] A. Jarosz, *Badanie efektów oddziaływania konfiguracji w strukturze nadsubtelnej atomów chromu i manganu*, Ph.D. thesis, Poznan University of Technology, Poznan (2000).
- [24] P. O. Schmidt, S. Hensler, J. Werner, T. Binhammer, A. Görlitz, and T. Pfau, “Doppler cooling of an optically dense cloud of magnetically trapped atoms,” *J Opt Soc Am B* **20**, 960–967 (2003).
- [25] K. Góral, K. Rzażewski, and T. Pfau, “Bose-Einstein condensation with magnetic dipole-dipole forces,” *Phys Rev A* **61**, 051 601 (2000).
- [26] A. Griesmaier, J. Werner, S. Hensler, J. Stuhler, and T. Pfau, “Bose-Einstein Condensation of Chromium,” *Phys Rev Lett* **94**, 160 401 (2005).
- [27] Q. Beaufiles, R. Chicireanu, T. Zanon, B. Laburthe-Tolra, E. Maréchal, L. Vernac, J.-C. Keller, and O. Gorceix, “All-optical production of chromium Bose-Einstein condensates,” *Phys Rev A* **77**, 061 601 (2008).
- [28] R. Chicireanu, A. Pouderos, R. Barbé, B. Laburthe-Tolra, E. Maréchal, L. Vernac, J.-C. Keller, and O. Gorceix, “Simultaneous magneto-optical trapping of bosonic and fermionic chromium atoms,” *Phys Rev A* **73**, 053 406 (2006).
- [29] C. M. Lederer and V. S. Shirley, *Tables of Isotopes – 7th ed.* (Wiley, New York, 1978).
- [30] J. Dembczyński, W. Ertmer, U. Johann, S. Penselin, and P. Stinner, “Laser-Rf double-resonance studies of the hyperfine structure of metastable atomic states of ^{55}Mn ,” *Z Phys. A* **291**, 207 (1979).
- [31] D. R. Lide, *Handbook of chemistry and physics* (CRC Press LLC, New York, 2000).
- [32] M. J. O’Neil, P. E. Heckelman, C. B. Koch, K. Roman, and C. Kenny, *The Merck Index 14th ed. Whitehouse Station* (Merck & Co. Inc., New York, 2006).
- [33] H. E. White and R. Ritschl, “Hyperfine Structure in the Spectra of Neutral Manganese,” *Phys. Rev.* **35**, 208–208 (1930).
- [34] H. E. White and R. Ritschl, “Hyperfine Structure in Neutral Manganese, Mn I.” *Phys. Rev.* **35**, 1146–1160 (1930).
- [35] W. Mohammad and P. N. Sharma, “C III. Hyperfine-structure of spectrum lines of manganese arc in vacuum. Part I,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **18**, 1144–1149 (1934).
- [36] R. A. Fisher and E. R. Peck, “Hyperfine Structure of Manganese I and Nuclear Magnetic Moment,” *Phys. Rev.* **55**, 270–276 (1939).
- [37] M. Kiyoshi, “Hyperfine Structure of the Spectrum of Mn I,” *Journal of the Physical Society of Japan* **10**, 336–338 (1955).
- [38] G. K. Woodgate and J. S. Martin, “Hyperfine Structure in Manganese ^{55}Mn ,” *Proceedings of the Physical Society. Section A* **70**, 485–488 (1957).
- [39] H. R. Rottmann, “Das Kernquadrupolmoment des Mn^{55} ,” *Zeitschrift für Physik* **153**, 158–163 (1958).
- [40] H. Walther, “Das Kernquadrupolmoment des Mn^{55} ,” *Z. Phys* **170**, 507–525 (1962).

- [41] E. Handrich, A. Steudel, and H. Walther, “The hyperfine splitting of the $3d^54s4p$ levels of Mn I and the quadrupole moment of ^{55}Mn ,” *Phys. Lett. A* **29**, 486–488 (1969).
- [42] P. Luc and S. Gerstenkorn, “Hyperfine structure of multiplet lines e 6D - y 6P of Manganese I,” *Astron. Astrophys.* **18**, 209–214 (1972).
- [43] P. Luc, “Interpretation théorique de la structure hyperfine dipolaire magnétique des termes z8P, z6P, y6P de la configuration $3d^54s4p$ du manganèse I,” *Physica* **62**, 239 – 248 (1972).
- [44] J. Dembczyński, “Fine structure interactions in the first spectrum of the Ti, V, Mn and Fe atoms,” *Physica B+C* **100**, 105–123 (1980).
- [45] U. Johann, *Konfigurationswechselwirkung in der Hyperfeinstruktur freier Atome mit offener 3d-Schale - Messungen mit Hilfe einer Laser-Hochfrequenz Dopplerresonanztechnik und Interpretation*, Ph.D. thesis, Universität Bonn (1981).
- [46] U. Johann, J. Dembczyński, and W. Ertmer, “Experimental evidence for far configuration mixing effects on off-diagonal hfs interaction between the $(3d+4s)^{N+2}$ configurations of free atoms,” *Z. Phys. A* **303**, 7–12 (1981).
- [47] H. D. Kronfeldt, J. R. Kropp, A. Subaric, and R. Winkler, “Hyperfine structure and lifetime of the Mn I levels $3d^54s4p z^4P_{3/2,5/2}$ with laser-atomic-beam-spectroscopy,” *Z Phys. A* **322**, 349–350 (1985).
- [48] T. Brodzinski, H. D. Kronfeldt, J. R. Kropp, and R. Winkler, “Hyperfine structure-investigations in the manganese I configurations $3d^54s4p$ and $3d^54s5s$,” *Z Phys. D* **7**, 161–164 (1987).
- [49] G. Başar, G. Başar, G. Acar, I. K. Öztürk, and S. Kröger, “Hyperfine Structure Investigations of Mn I Part I: Experimental and Theoretical Studies of the Hyperfine Structure in the Even Configurations,” *Phys. Scr.* **67**, 476–484 (2003).
- [50] R. J. Blackwell-Whitehead, *High Resolution Fourier Transform Spectrometry of the Spectrum of Neutral Manganese*, Ph.D. thesis, Imperial College, London (2003).
- [51] P. H. Lefèbvre, H. P. Garnir, and E. Biémont, “Hyperfine structure for neutral manganese lines of astrophysical interest,” *Astron. Astrophys.* **404**, 1153–1158 (2003).
- [52] R. Blackwell-Whitehead, J. Pickering, and O. Pearse, “Hyperfine structure measurements of neutral manganese with Fourier transform spectroscopy,” *Astrophys. J. Sup. Ser.* **157**, 402–409 (2005).
- [53] A. Klose, K. Minamisono, and P. F. Mantica, “Collinear laser spectroscopy on the ground state and an excited state in neutral ^{55}Mn ,” *Phys. Rev. A* **88**, 042 701 (2013).
- [54] Y. Liu, T. Gottwald, C. Mattolat, and K. Wendt, “Three-photon resonance ionization of atomic Mn in a hot-cavity laser ion source using Ti:sapphire lasers,” *J. Phys. B. At Mol. Opt. Phys.* **48**, 115 006 (2015).
- [55] J. Bates, “Fourier transform spectroscopy,” *Computers and Mathematics with Applications* **4**, 73–84 (1978).
- [56] S. Eustice, K. Cassella, and D. Stamper-Kurn, “Laser cooling of transition-metal atoms,” *Physical Review A* **102**, 053 327 (2020).
- [57] L. Kroger and C. Reich, “Features of the low-energy level scheme of ^{229}Th as observed in the α -decay of ^{233}U ,” *Nuclear Physics A* **259**, 29–60 (1976).

- [58] C. W. Reich and R. G. Helmer, “Energy separation of the doublet of intrinsic states at the ground state of ^{229}Th ,” *Phys. Rev. Lett.* **64**, 271–273 (1990).
- [59] D. G. Burke, P. E. Garrett, T. Qu, and R. A. Naumann, “Additional evidence for the proposed excited state at ≤ 5 eV in ^{229}Th ,” *Phys. Rev. C* **42**, R499–R501 (1990).
- [60] R. G. Helmer and C. W. Reich, “An excited state of ^{229}Th at 3.5 eV,” *Phys. Rev. C* **49**, 1845–1858 (1994).
- [61] V. Barci, G. Ardisson, G. Barci-Funel, B. Weiss, O. El Samad, and R. K. Sheline, “Nuclear structure of ^{229}Th from γ -ray spectroscopy study of ^{233}U α -particle decay,” *Phys. Rev. C* **68**, 034329 (2003).
- [62] B. R. Beck, J. A. Becker, P. Beiersdorfer, G. V. Brown, K. J. Moody, J. B. Wilhelmy, F. S. Porter, C. A. Kilbourne, and R. L. Kelley, “Energy Splitting of the Ground-State Doublet in the Nucleus ^{229}Th ,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 142501 (2007).
- [63] B. R. Beck, C. Wu, P. Beiersdorfer, G. V. Brown, J. A. Becker, K. J. Moody, J. B. Wilhelmy, F. S. Porter, C. A. Kilbourne, and R. L. Kelley, “Improved Value for the Energy Splitting of the Ground-State Doublet in the Nucleus ^{229m}Th ,” (2009).
- [64] B. Seiferle, L. von der Wense, P. V. Bilous, I. Amersdorffer, C. Lemell, F. Libisch, S. Stellmer, T. Schumm, C. E. Düllmann, A. Pálffy, and P. G. Thirolf, “Energy of the ^{229}Th nuclear clock transition,” *Nature* **573**, 243–246 (2019).
- [65] A. Yamaguchi, H. Muramatsu, T. Hayashi, N. Yuasa, K. Nakamura, M. Takimoto, H. Haba, K. Konashi, M. Watanabe, H. Kikunaga, K. Maehata, N. Y. Yamasaki, and K. Mitsuda, “Energy of the ^{229}Th Nuclear Clock Isomer Determined by Absolute γ -ray Energy Difference,” *Phys. Rev. Lett.* **123**, 222501 (2019).
- [66] L. von der Wense, B. Seiferle, M. Laatiaoui, J. B. Neumayr, H.-J. Maier, H.-F. Wirth, C. Mokry, J. Runke, K. Eberhardt, C. E. Düllmann, N. G. Trautmann, and P. G. Thirolf, “Direct detection of the ^{229}Th nuclear clock transition,” *Nature* **533**, 47–51 (2016).
- [67] E. Peik and C. Tamm, “Nuclear laser spectroscopy of the 3.5 eV transition in Th-229,” *Europhysics Letters (EPL)* **61**, 181–186 (2003).
- [68] S. Matinyan, “Lasers as a bridge between atomic and nuclear physics,” *Physics Reports* **298**, 199–249 (1998).
- [69] N. Tralli and G. Goertzel, “The Theory of Internal Conversion,” *Phys. Rev.* **83**, 399–404 (1951).
- [70] C. Rösel, F. F. Karpeshin, P. David, H. Hänscheid, J. Konijn, C. T. A. M. de Laat, H. Paganetti, F. Risse, B. Sabirov, L. A. Schaller, L. Schellenberg, W. Schrieder, and A. Taal, “Experimental evidence for muonic X-rays from fission fragments,” *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei* **345**, 425 – 426 (1993).
- [71] F. F. Karpeshin and M. B. Trzhaskovskaya, “Bound internal conversion versus nuclear excitation by electron transition: Revision of the theory of optical pumping of the ^{229m}Th isomer,” *Phys. Rev. C* **95**, 034310 (2017).
- [72] A. Pálffy, J. Evers, and C. H. Keitel, “Isomer Triggering via Nuclear Excitation by Electron Capture,” *Phys. Rev. Lett.* **99**, 172502 (2007).
- [73] M. Morita, “Nuclear Excitation by Electron Transition and Its Application to Uranium 235 Separation,” *Progress of Theoretical Physics* **49**, 1574–1586 (1973).

- [74] H. Fujioka, K. Ura, A. Shinohara, T. Saito, and K. Otozai, “Observation of nuclear excitation by electron transition (NEET) in ^{197}Au ,” *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei* **315**, 121–122 (1984).
- [75] E. Tkalya, “Probability for radiationless excitation of nuclei with electron transition in an atomic shell,” *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **102**, 379–396 (1992).
- [76] G. M. Irwin and K. H. Kim, “Observation of Electromagnetic Radiation from Deexcitation of the ^{229}Th Isomer,” *Phys. Rev. Lett.* **79**, 990–993 (1997).
- [77] D. S. Richardson, D. M. Benton, D. E. Evans, J. A. R. Griffith, and G. Tugate, “Ultraviolet Photon Emission Observed in the Search for the Decay of the ^{229}Th Isomer,” *Phys. Rev. Lett.* **80**, 3206–3208 (1998).
- [78] S. B. Utter, P. Beiersdorfer, A. Barnes, R. W. Lougheed, J. R. Crespo López-Urrutia, J. A. Becker, and M. S. Weiss, “Reexamination of the Optical Gamma Ray Decay in ^{229}Th ,” *Phys. Rev. Lett.* **82**, 505–508 (1999).
- [79] R. W. Shaw, J. P. Young, S. P. Cooper, and O. F. Webb, “Spontaneous Ultraviolet Emission from $^{233}\text{Uranium}/^{229}\text{Thorium}$ Samples,” *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1109–1111 (1999).
- [80] S. Köhler, R. D. Enberger, K. Eberhardt, N. Erdmann, G. Herrmann, G. Huber, J. Kratz, M. Nunnemann, G. Passler, P. Rao, J. Riegel, N. Trautmann, and K. Wendt, “Determination of the first ionization potential of actinide elements by resonance ionization mass spectroscopy,” *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **52**, 717–726 (1997).
- [81] J. Jeet, C. Schneider, S. T. Sullivan, W. G. Rellergert, S. Mirzadeh, A. Cassanho, H. P. Jensen, E. V. Tkalya, and E. R. Hudson, “Results of a Direct Search Using Synchrotron Radiation for the Low-Energy ^{229}Th Nuclear Isomeric Transition,” *Phys. Rev. Lett.* **114**, 253 001 (2015).
- [82] E. Ruchowska, W. A. Płóciennik, J. Żylicz, H. Mach, J. Kvasil, A. Algora, N. Amzal, T. Bäck, M. G. Borge, R. Boutami, P. A. Butler, J. Cederkäll, B. Cederwall, B. Fogelberg, L. M. Fraile, H. O. U. Fynbo, E. Hagebø, P. Hoff, H. Gausemel, A. Jungclaus, R. Kaczarowski, A. Kerek, W. Kurcewicz, K. Lagergren, E. Nacher, B. Rubio, A. Syntfeld, O. Tengblad, A. A. Wasilewski, and L. Weissman, “Nuclear structure of ^{229}Th ,” *Phys. Rev. C* **73**, 044 326 (2006).
- [83] W. G. Rellergert, D. DeMille, R. R. Greco, M. P. Hehlen, J. R. Torgerson, and E. R. Hudson, “Constraining the Evolution of the Fundamental Constants with a Solid-State Optical Frequency Reference Based on the ^{229}Th Nucleus,” *Phys. Rev. Lett.* **104**, 200 802 (2010).
- [84] G. A. Kazakov, A. N. Litvinov, V. I. Romanenko, L. P. Yatsenko, A. V. Romanenko, M. Schreitl, G. Winkler, and T. Schumm, “Performance of a $^{229}\text{Thorium}$ solid-state nuclear clock,” *New Journal of Physics* **14**, 083 019 (2012).
- [85] A. Yamaguchi, M. Kolbe, H. Kaser, T. Reichel, A. Gottwald, and E. Peik, “Experimental search for the low-energy nuclear transition in ^{229}Th with undulator radiation,” *New Journal of Physics* **17**, 053 053 (2015).
- [86] V. V. Flambaum, “Enhanced Effect of Temporal Variation of the Fine Structure Constant and the Strong Interaction in ^{229}Th ,” *Phys. Rev. Lett.* **97**, 092 502 (2006).
- [87] C. J. Campbell, A. G. Radnaev, A. Kuzmich, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, and A. Derevianko, “Single-Ion Nuclear Clock for Metrology at the 19th Decimal Place,” *Phys. Rev. Lett.* **108**, 120 802 (2012).
- [88] C. J. Campbell, A. G. Radnaev, and A. Kuzmich, “Wigner Crystals of ^{229}Th for Optical Excitation of the Nuclear Isomer,” *Phys. Rev. Lett.* **106**, 223 001 (2011).

- [89] M. S. Safronova, U. I. Safronova, A. G. Radnaev, C. J. Campbell, and A. Kuzmich, “Magnetic dipole and electric quadrupole moments of the ^{229}Th nucleus,” *Phys. Rev. A* **88**, 060 501 (2013).
- [90] C. E. Bemis, F. K. McGowan, J. L. C. F. Jr, W. T. Milner, R. L. Robinson, P. H. Stelson, G. A. Leander, and C. W. Reich, “Coulomb excitation of states in ^{229}Th ,” *Physica Scripta* **38**, 657–663 (1988).
- [91] G. L. Stukenbroeker and J. R. McNally, “Isotope Shifts in Thorium – Th 230 and Th 232*,” *J. Opt. Soc. Am.* **43**, 36–41 (1953).
- [92] R. Engleman and B. A. Palmer, “Precision isotope shifts for the heavy elements. II. Neutral thorium,” *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 694–701 (1983).
- [93] R. Engleman and B. A. Palmer, “Precision isotope shifts for the heavy elements. III. Singly ionized thorium (Th II),” *J. Opt. Soc. Am. B* **1**, 782–787 (1984).
- [94] E. A. Vernyi and V. N. Egorov, “The isotopes effect in the spectrum of thorium,” *Opt. Spectrosc.* p. 367 (1960).
- [95] V. N. Egorov, “Hyperfine Structure of the Atomic Spectrum and Nuclear Moments of the Thorium Isotope ^{229}Th ,” *Opt. Spectrosc.* p. 301 (1964).
- [96] Gerstenkorn, S., Luc, P., Verges, J., Englekemeir, D.W., Gindler, J.E., and Tomkins, F.S., “Hyperfine structure, magnetic and quadrupole moments of the thorium 229 isotope,” *J. Phys. France* **35**, 483–495 (1974).
- [97] W. Kälber, J. Rink, K. Bekk, W. Faubel, S. Göring, G. Meisel, H. Rebel, and R. C. Thompson, “Nuclear radii of thorium isotopes from laser spectroscopy of stored ions,” *Zeitschrift für Physik A Atomic Nuclei* **334**, 103–108 (1989).
- [98] W. Kälber, G. Meisel, J. Rink, and R. Thompson, “Two-step Optical Excitation for Doppler Linewidth Reduction and Motion Study of Ions Stored in a Paul Trap,” *Journal of Modern Optics* **39**, 335–347 (1992).
- [99] M. V. Okhupkin, D. M. Meier, E. Peik, M. S. Safronova, M. G. Kozlov, and S. G. Porsev, “Observation of an unexpected negative isotope shift in $^{229}\text{Th}^+$ and its theoretical explanation,” *Phys. Rev. A* **92**, 020 503 (2015).
- [100] C. J. Campbell, A. V. Steele, L. R. Churchill, M. V. DePalatis, D. E. Naylor, D. N. Matsukevich, A. Kuzmich, and M. S. Chapman, “Multiply Charged Thorium Crystals for Nuclear Laser Spectroscopy,” *Phys. Rev. Lett.* **102**, 233 004 (2009).
- [101] J. Dembczyński, G. Szawiola, M. Elantkowska, E. Stachowska, and J. Ruczkowski, “Construction of energy matrix for complex atoms in space of $(nd+n's)^{N+2+\sum_{i,j}nd^{N+2-w_i-w_j}n_i l_i^{w_i}n_j l_j^{w_j}}$ (where $w_i + w_j \leq 2$) configurations,” *Phys Scr* **54**, 444–457 (1996).
- [102] J. Dembczyński, W. Ertmer, U. Johann, and P. Unkel, “A new parametrization method for hyperfine interactions. Determination of nuclear quadrupole moments almost free of Sternheimer corrections,” *Z Phys A At Nucl* **321**, 1–13 (1985).
- [103] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of Energy Matrix for Complex Atoms. Part 2,” *Phys Scr* **59**, 49–51 (1999).
- [104] J. Dembczyński, M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and D. Stefańska, “Semi-empirical predictions of even atomic energy levels and their hyperfine structure for the scandium atom,” *At Data Nucl Data Tables* **93**, 149–165 (2007).

- [105] J. Dembczyński, M. Elantkowska, B. Furmann, J. Ruczkowski, and D. Stefańska, “Critical analysis of the methods of interpretation in the hyperfine structure of free atoms and ions: case of the model space $(5d+6s)^3$ of the lanthanum atom,” *J Phys B: At Mol Opt Phys* **43**, 065 001 (2010).
- [106] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part I: General remarks,” *Eur Phys J Plus* **130**, 14 (2015).
- [107] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part II: Explicit formulae for inter-configuration interactions,” *Eur Phys J Plus* **130**, 15 (2015).
- [108] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part III: Excitation of two equivalent electrons from a closed shell into an open shell or an empty shell,” *Eur Phys J Plus* **130**, 83 (2015).
- [109] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part IV: Excitation of one electron from a closed shell into an open shell,” *Eur Phys J Plus* **130**, 170 (2015).
- [110] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part V: Electrostatically correlated spin-orbit and electrostatically correlated hyperfine interactions,” *Eur Phys J Plus* **131**, 47 (2016).
- [111] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part VI: Core polarization effects,” *Eur Phys J Plus* **131**, 429 (2016).
- [112] J. Dembczyński, M. Elantkowska, and J. Ruczkowski, “Method for detecting the isomeric state $I = (3/2)^+$ in ^{229}Th with laser-induced fluorescence,” *Phys Rev A* **92**, 012 519 (2015).
- [113] D. Stefańska, M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and B. Furmann, “Fine- and hyperfine structure investigations of even configuration system of atomic terbium,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **189**, 441–456 (2017).
- [114] B. Furmann, D. Stefańska, J. Dembczyński, and E. Stachowska, “New electron levels and classified lines in Pr II from hyperfine structure measurements,” *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **93**, 127–137 (2007).
- [115] B. Furmann, D. Stefańska, and J. Dembczyński, “Hyperfine structure analysis odd configurations levels in neutral lanthanum: I. Experimental,” *Physica Scripta* **76**, 264 (2007).
- [116] B. Furmann, J. Ruczkowski, D. Stefańska, M. Elantkowska, and J. Dembczyński, “Hyperfine structure in La II odd configuration levels,” *J Phys B: At Mol Opt Phys* **41**, 215 004 (2008).
- [117] B. Furmann, M. Elantkowska, D. Stefańska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Hyperfine structure in La II even configuration levels,” *J Phys B: At Mol Opt Phys* **41**, 235 002 (2008).
- [118] B. Furmann, D. Stefańska, and J. Dembczyński, “Experimental investigations of the hyperfine structure in neutral La: II. Even parity levels,” *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **43**, 015 001 (2009).
- [119] B. Furmann, D. Stefańska, and J. Dembczyński, “Experimental investigations of the hyperfine structure in neutral La: I. Odd parity levels,” *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **42**, 175 005 (2009).

- [120] B. Furmann and D. Stefańska, “Isotope shift and hyperfine structure in even configurations of neutral europium,” *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **44**, 225 005 (2011).
<https://doi.org/10.1088/0953-4075/44/22/225005>
- [121] B. Furmann and D. Stefańska, “Experimental determination of core relaxation and screening effects on the wavefunction at a nucleus for stable isotopes of $^{151,153}\text{Eu II}$,” *The European Physical Journal Special Topics* **222**, 2279 – 2284 (2013).
- [122] B. Furmann and D. Stefańska, “Hyperfine Structure and Isotope Shift Measurements of Unclassified Lines in Eu II and New Determination of the Partition Function,” *J Phys B: At Mol Opt Phys* **46**, 235 005 (2013).
- [123] D. Stefańska, M. Suski, A. Zygmunt, J. Stachera, and B. Furmann, “Tunable single-mode cw energy-transfer dye laser directly optically pumped by a diode laser,” *Optics & Laser Technology* **120**, 105 673 (2019).
- [124] K. Zimmermann, *Experiments Towards Optical Nuclear Spectroscopy With Thorium-229*, Ph.D. thesis, Leibniz Universität Hannover (2010).
- [125] O.-A. Herrera-Sancho, *Laser excitation of 8-eV electronic states in Th^+ : a first pillar of the electronic bridge toward excitation of the Th-229 nucleus*, Ph.D. thesis, Leibniz Universität Hannover (2012).
- [126] D.-M. Meier, *Electronic level structure investigations in Th^+ in the energy range of the ^{229}Th isomer*, Ph.D. thesis, Leibniz Universität Hannover (2019).
- [127] J. Thielking, *Hyperfine studies of Th-229 in its nuclear ground and isomeric state*, PTB bericht Opt-88 (PTB Braunschweig und Berlin, 2020).
- [128] L. V. der Wense, *On the Direct Detection of ^{229m}Th* , Springer Theses (Springer Nature, 2018).
- [129] B. Seiferle, *Characterization of the ^{229}Th nuclear clock transition*, Ph.D. thesis, LMU München (2019).
- [130] A. Buczek, *Badanie struktury nadsubtelnej atomów Cr i Pr oraz poziomów metatrwałych jonu ^{141}Pr na strumieniu atomowym i w pułapce Paula*, Ph.D. thesis, Katedra Fizyki Atomowej, Politechnika Poznańska, Poznań (2002).
- [131] P. Głowacki, *Badanie struktury nadsubtelnej wybranych pierwiastków z otwartą podpowłoką nd metodami spektroskopii laserowej w katodzie wnekowej i na strumieniu atomowym*, Ph.D. thesis, Katedra Inżynierii i Metrologii Kwantowej, Politechnika Poznańska, Poznań (2009).
- [132] R. L. Kurucz, [Online]. Available: <http://kurucz.harvard.edu/atoms>.
- [133] A. Jarosz, *Badanie efektów oddziaływania konfiguracji w strukturze nadsubtelnej atomów chromu i manganu*, Ph.D. thesis, Poznan University of Technology (2000).
- [134] R. D. Cowan, *The Theory of Atomic Structure and Spectra* (Berkeley University of California Press, Berkeley, 1981).
- [135] R. D. Cowan, “Robert D. Cowan’s Atomic Structure Code,” [Online]. Available:<https://www.tcd.ie/Physics/people/Cormac.McGuinness/Cowan/>.
- [136] A. Kramida, “A Suite of Atomic Structure Codes Originally Developed by RD Cowan Adapted for Windows-Based Personal Computers,” National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA (2018).

- [137] N. Huntemann, B. Lipphardt, C. Tamm, V. Gerginov, S. Weyers, and E. Peik, “Improved Limit on a Temporal Variation of m_p/m_e from Comparisons of Yb⁺ and Cs Atomic Clocks,” *Phys. Rev. Lett.* **113**, 210 802 (2014).
- [138] C. Degenhardt, H. Stoehr, C. Lisdat, G. Wilpers, H. Schnatz, B. Lipphardt, T. Nazarova, P.-E. Pottie, U. Sterr, J. Helmcke, and F. Riehle, “Calcium optical frequency standard with ultracold atoms: Approaching 10^{-15} relative uncertainty,” *Phys. Rev. A* **72**, 062 111 (2005).
- [139] P. Dessoic, P. Mohn, R. A. Jackson, G. Winkler, M. Schreitl, G. Kazakov, and T. Schumm, “²²⁹Thorium-doped calcium fluoride for nuclear laser spectroscopy,” *Journal of Physics: Condensed Matter* **26**, 105 402 (2014).
- [140] E. Peik and M. Okhapkin, “Nuclear clocks based on resonant excitation of γ -transitions,” *Comptes Rendus Physique* **16**, 516–523 (2015).
- [141] T. Sikorsky, J. Geist, D. Hengstler, S. Kempf, L. Gastaldo, C. Enss, C. Mokry, J. Runke, C. E. Düllmann, P. Wobrauschek, K. Beeks, V. Rosecker, J. H. Sterba, G. Kazakov, T. Schumm, and A. Fleischmann, “Measurement of the ²²⁹Th Isomer Energy with a Magnetic Microcalorimeter,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 142 503 (2020).
- [142] H. Mack, R. Reisfeld, and D. Avnir, “Fluorescence of rare earth ions adsorbed on porous vycor glass,” *Chemical Physics Letters* **99**, 238–239 (1983).
- [143] K. Binnemans and C. Görller-Walrand, “On the color of the trivalent lanthanide ions,” *Chemical Physics Letters* **235**, 163–174 (1995).
- [144] K. Binnemans, “Interpretation of europium(III) spectra,” *Coordination Chemistry Reviews* **295**, 1–45 (2015).
- [145] M. H. V. Werts, R. T. F. Jukes, and J. W. Verhoeven, “The emission spectrum and the radiative lifetime of Eu³⁺ in luminescent lanthanide complexes,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **4**, 1542–1548 (2002).
- [146] L. Essen, R. W. Donaldson, E. G. Hope, and M. J. Bangham, “Hydrogen Maser Work at the National Physical Laboratory,” *Metrologia* **9**, 128–137 (1973).
- [147] A. Dupays, A. Beswick, B. Lepetit, C. Rizzo, and D. Bakalov, “Proton Zemach radius from measurements of the hyperfine splitting of hydrogen and muonic hydrogen,” *Phys. Rev. A* **68**, 052 503 (2003).
- [148] BIMP, [Online]. Available: <https://www.bipm.org> STANDARD FREQUENCY [SRS] 6.835 GHz – ⁸⁷Rb (update 2021).
- [149] BIMP, [Online]. Available: <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>.
- [150] A. Golovizin, E. Fedorova, D. Tregubov, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, and N. Kolachevsky, “Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift,” *Nature Communications* **10**, 1724 (8pp.) (2019).
- [151] BIMP, [Online]. Available: <https://www.bipm.org> STANDARD FREQUENCY [SRS] 429 THz – ⁸⁷Sr.
- [152] T. Bothwell, C. J. Kennedy, A. Aeppli, D. Kedar, J. M. Robinson, E. Oelker, A. Staron, and J. Ye, “Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample,” *Nature* **602**, 420–424 (2022).

- [153] P. Morzyński, M. Bober, D. Bartoszek-Bober, J. Nawrocki, P. Krehlik, L. Śliwczyński, M. Lipiński, P. Masłowski, A. Cygan, P. Dunst, M. Garus, D. Lisak, J. Zachorowski, W. Gawlik, C. Radzewicz, R. Ciuryło, and M. Zawada, “Absolute measurement of the $^1S_0 - ^3P_0$ clock transition in neutral ^{88}Sr over the 330 km-long stabilized fibre optic link,” *Sci Rep* **5**, 17495 (2015).
- [154] N. Poli, M. Schioppo, S. Vogt, S. Falke, U. Sterr, C. Lisdat, and G. M. Tino, “A transportable strontium optical lattice clock,” *Applied Physics B* **117**, 1107 – 1116 (2014).
- [155] N. D. Lemke, A. D. Ludlow, Z. W. Barber, T. M. Fortier, S. A. Diddams, Y. Jiang, S. R. Jefferts, T. P. Heavner, T. E. Parker, and C. W. Oates, “Spin-1/2 Optical Lattice Clock,” *Phys. Rev. Lett.* **103**, 063 001 (2009).
- [156] N. Poli, Z. W. Barber, N. D. Lemke, C. W. Oates, L. S. Ma, J. E. Stalnaker, T. M. Fortier, S. A. Diddams, L. Hollberg, J. C. Bergquist, A. Bruschi, S. Jefferts, T. Heavner, and T. Parker, “Frequency evaluation of the doubly forbidden $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ transition in bosonic ^{174}Yb ,” *Phys Rev A* **77**, 050 501 (2008).
- [157] J. J. McFerran, L. Yi, S. Mejri, S. Di Manno, W. Zhang, J. Guéna, Y. Le Coq, and S. Bize, “Neutral Atom Frequency Reference in the Deep Ultraviolet with Fractional Uncertainty = 5.7×10^{-15} ,” *Phys. Rev. Lett.* **108**, 183 004 (2012).
- [158] M. Chwalla, J. Benhelm, K. Kim, G. Kirchmair, T. Monz, M. Riebe, P. Schindler, A. S. Villar, W. Hänsel, C. F. Roos, R. Blatt, M. Abgrall, G. Santarelli, G. D. Rovera, and P. Laurent, “Absolute Frequency Measurement of the $^{40}\text{Ca}^+ 4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$ Clock Transition,” *Phys. Rev. Lett.* **102**, 023 002 (2009).
- [159] P. A. Barton, C. J. S. Donald, D. M. Lucas, D. A. Stevens, A. M. Steane, and D. N. Stacey, “Measurement of the lifetime of the $3d^2D_{5/2}$ state in $^{40}\text{Ca}^+$,” *Phys. Rev. A* **62**, 032 503 (2000).
- [160] A. A. Madej, P. Dubé, Z. Zhou, J. E. Bernard, and M. Gertsch, “ $^{88}\text{Sr}^+$ 445-THz Single-Ion Reference at the 10^{-17} Level via Control and Cancellation of Systematic Uncertainties and Its Measurement against the SI Second,” *Phys. Rev. Lett.* **109**, 203 002 (2012).
- [161] A. A. Madej and J. D. Sankey, “Single, trapped Sr^+ atom: laser cooling and quantum jumps by means of the $4d^2D_{5/2} - 5s^2S_{1/2}$ transition,” *Opt. Lett.* **15**, 634–635 (1990).
- [162] R. Lange, A. A. Peshkov, N. Huntemann, C. Tamm, A. Surzhykov, and E. Peik, “Lifetime of the $^2F_{7/2}$ Level in Yb^+ for Spontaneous Emission of Electric Octupole Radiation,” *Phys. Rev. Lett.* **127**, 213 001 (2021).
- [163] N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, C. Tamm, and E. Peik, “Single-Ion Atomic Clock with 3×10^{-18} Systematic Uncertainty,” *Phys. Rev. Lett.* **116**, 063 001 (2016).
- [164] C. Tamm, N. Huntemann, B. Lipphardt, V. Gerginov, N. Nemitz, M. Kazda, S. Weyers, and E. Peik, “Cs-based optical frequency measurement using cross-linked optical and microwave oscillators,” *Phys. Rev. A* **89**, 023 820 (2014).
- [165] N. Yu and L. Maleki, “Lifetime measurements of the $4f^{14}5d$ metastable states in single ytterbium ions,” *Phys. Rev. A* **61**, 022 507 (2000).
- [166] W. H. Oskay, S. A. Diddams, E. A. Donley, T. M. Fortier, T. P. Heavner, L. Hollberg, W. M. Itano, S. R. Jefferts, M. J. Delaney, K. Kim, F. Levi, T. E. Parker, and J. C. Bergquist, “Single-Atom Optical Clock with High Accuracy,” *Phys. Rev. Lett.* **97**, 020 801 (2006).

- [167] S. A. Diddams, T. Udem, J. C. Bergquist, E. A. Curtis, R. E. Drullinger, L. Hollberg, W. M. Itano, W. D. Lee, C. W. Oates, K. R. Vogel, and D. J. Wineland, “An Optical Clock Based on a Single Trapped $^{199}\text{Hg}^+$ Ion,” *Science* **293**, 825–828 (2001).
- [168] T. Rosenband, D. B. Hume, P. O. Schmidt, C. W. Chou, A. Brusch, L. Lorini, W. H. Oskay, R. E. Drullinger, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker, S. A. Diddams, W. C. Swann, N. R. Newbury, W. M. Itano, D. J. Wineland, and J. C. Bergquist, “Frequency Ratio of Al^+ and Hg^+ Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place,” *Science* **319**, 1808 – 1812 (2008).
- [169] T. Rosenband, P. O. Schmidt, D. B. Hume, W. M. Itano, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker, K. Kim, S. A. Diddams, J. C. J. Koelemeij, J. C. Bergquist, and D. J. Wineland, “Observation of the $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ Clock Transition in $^{27}\text{Al}^+$,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 220 801 (2007).
- [170] N. Ohtsubo, Y. Li, K. Matsubara, T. Ido, and K. Hayasaka, “Frequency measurement of the clock transition of an indium ion sympathetically-cooled in a linear trap,” *Opt. Express* **25**, 11 725–11 735 (2017).

Załącznik nr 3

**do wniosku dr inż. Przemysława Głowackiego
o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego**

**Wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład
w rozwój dyscypliny nauki fizyczne
(w języku polskim)**

**Instytut Badań Materiałowych i Inżynierii Kwantowej
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej
Politechnika Poznańska
Piotrowo 3, 60-965 Poznań**

Poznań 2023

Spis treści

I. OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT 2 USTAWY PSWiN	2
II. AKTYWNOŚĆ NAUKOWA	8
1. Opublikowane artykuły w czasopismach naukowych	8
2. Wystąpienia na konferencjach naukowych	11
3. Informacja o udziale w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych	15
4. Zrealizowane projekty badawcze	16
5. Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych	17
6. Staże naukowe	17
7. Członkostwo w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	19
8. Informacja o recenzowanych pracach naukowych	19
9. Uczestnictwo w programach europejskich lub innych programach międzynarodowych	20
10. Uczestnictwo w zespołach oceniających wnioski	20
11. Zdobyte nagrody	21
12. Szkolenia, warsztaty, kursy (samodoskonalenie)	21
III. WSPÓŁPRACA Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM	22
1. Wykaz dorobku technologicznego	22
2. Współpraca z sektorem gospodarczym	22
3. Uzyskane prawa własności przemysłowej	22
4. Wdrożone technologie	22
5. Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	22
6. Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	22
IV. INFORMACJE NAUKOMETRYCZNE	23

I. OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE, O KTÓRYM MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY Z DNIA 20 LIPCA 2018 R. PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE (DZ. U. Z 2021 R. POZ. 478 Z PÓŹN. ZM.)

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) wskazuję cykl publikacji (od H1 do H10) powiązanych tematycznie pod tytułem:

Badania struktury elektronowej wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w zegarach optycznych

Przy poszczególnych publikacjach podałem *Impact Factor* czasopism dla roku opublikowania pracy, za wyjątkiem prac opublikowanych po 2021, oraz liczbę punktów MEiN (Ministerstwa Edukacji i Nauki) zgodną z wykazem czasopism naukowych i recenzowanych materiałów konferencyjnych z konferencji międzynarodowych Ministra Edukacji i Nauki, opublikowanym w komunikacie z dnia 1 grudnia 2021 roku (w nawiasie * oznacza punkty z lat wcześniejszych, w skali punktowej 0-50). Zamieściłem informacje o liczbie cytowań (według bazy Scopus) na dzień 7 kwietnia 2023 r. Dla każdej wymienionej publikacji wskazałem oszacowany przeze mnie procentowy udział własny oraz szczegółowe informacje dotyczące udziału twórczego.

H1	A. Krzykowski, P. Głowacki , <i>Experimental study of radio frequency power broadening in ABMR-LIRF method</i> , Elektronika 6 , 31-34, (2011) https://www.sigma-not.pl	IF: - MEiN: 20(8*) cyt.: 0 (0)
udział 50%	<ol style="list-style-type: none">1. Sformułowanie problemu i celu badawczego2. Wykonanie części pomiarów samodzielnie i współudział w pozostałych pomiarach3. Opracowanie wyników eksperymentalnych, analiza niepewności eksperymentalnych4. Istotny udział w dyskusji otrzymanych wyników5. Redakcja ostatecznej wersji manuskryptu, udział w korekcie manuskryptu (korespondencja z recenzentami)6. Autor korespondencyjny	

H2	<p>A. Krzykowski, P. Głowacki, A. Jarosz, <i>Precise measurements of the hyperfine structure of the levels belonging to the terms $3d^5 4s^5 G$ and $5P$ in $Cr(I)$,</i> Acta Physica Polonica A 122, p. 78-81 (2012) doi: 10.12693/APhysPolA.122.78</p>	<p>IF: 0,444 MEiN: 40(15*) cyt.: 2 (0)</p>
udział 40%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sformułowanie problemu i celu badawczego: <ul style="list-style-type: none"> • Wybór poziomów i przejść do wzbudzenia za pomocą lasera oraz do wykorzystania jako kanały fluorescencji w metodzie laserowo indukowanej fluorescencji (LIF - ang. Laser Induced Fluorescence) na strumieniu atomowym • Wybór składowych struktury nadsubtelnej do obserwacji sygnałów metodą podwójnego rezonansu optyczno-mikrofalowego (ABMR-LIRF - ang. AtomBeam Magnetic Resonance - observed in Laser Induced Resonance Fluorescence) 2. Wykonanie części pomiarów samodzielnie i współudział w pozostałych pomiarach 3. Opracowanie wyników eksperymentalnych, analiza niepewności eksperymentalnych 4. Istotny udział w dyskusji otrzymanych wyników 5. Redakcja ostatecznej wersji manuskryptu, udział w korekcie manuskryptu (komunikacja z recenzentami poprzez autora korespondencyjnego) 	
H3	<p>P. Głowacki, A. Krzykowski, A. Jarosz, <i>Investigation of the hyperfine structure of electronic levels in chromium atom,</i> European Physical Journal: Special Topics 222, 2345-2351 (2013) doi: 10.1140/epjst/e2013-02015-x</p>	<p>IF: 1,862 MEiN: 70(30*) cyt.: 2 (1)</p>
udział 65%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sformułowanie problemu i celu badawczego: <ul style="list-style-type: none"> • Określenie na podstawie danych literaturowych dotyczących parzystych poziomów elektronowych atomu chromu, dla których z nich brak jest wyników eksperymentalnych dla stałych A i B lub wyniki uzyskane przez różnych autorów są niezgodne w granicach niepewności pomiarowych • Wybór poziomów i przejść do wzbudzenia za pomocą lasera oraz do wykorzystania jako kanały fluorescencji w metodzie LIF na strumieniu atomowym • Wybór składowych struktury nadsubtelnej do obserwacji sygnałów metodą podwójnego rezonansu optyczno-mikrofalowego 2. Wykonanie części pomiarów samodzielnie i współudział w pozostałych pomiarach 3. Opracowanie wyników eksperymentalnych – obliczenie stałych A i B struktury nadsubtelnej dla poziomów dolnych (parzystych) i górnych (nieparzystych) poszczególnych linii badanych metodą LIF, określenie wartości stałych A i B poziomów dolnych otrzymanych metodą ABMR-LIRF, analiza niepewności eksperymentalnych 4. Istotny udział w dyskusji otrzymanych wyników 5. Redakcja ostatecznej wersji manuskryptu, udział w korekcie manuskryptu 6. Autor korespondencyjny 	

H4	<p>P. Głowacki, D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, <i>Proposed clock transition in atomic chromium and the possible detection schemes</i>, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 291, 108331 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108331</p>	<p>IF: 2,342 MEiN: 100 cyt.: 0 (0)</p>
udział 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Koordynacja prac związanych z powstaniem artykułu 2. Współudział w opracowaniu propozycji przejścia zegarowego w atomie chromu i schematów jego detekcji 3. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych wspólnie ze współautorami (obsługa stanowiska eksperymentalnego ze strumieniem atomowym) 4. Analiza wyników eksperymentalnych oraz teoretycznych 5. Opracowanie oprogramowania do wizualizacji otrzymanych widm 6. Wizualizacja otrzymanych wyników (wykonanie rysunków schematów detekcji oraz otrzymanych widm przejść detekcyjnych) 7. Dyskusja otrzymanych wyników 8. Redakcja manuskryptu, korekta manuskryptu 9. Autor korespondencyjny 	
H5	<p>P. Głowacki, D. Stefańska, M. Elantkowska, J. Ruczkowski, <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. I. Even-parity level system</i>, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 249, 107013 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107013</p>	<p>IF: 2,468 MEiN: 100 cyt.: 5 (0)</p>
udział 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Koordynacja prac związanych z powstaniem artykułu 2. Sformułowanie problemu i celu badawczego: <ul style="list-style-type: none"> • Określenie na podstawie danych literaturowych, dla których parzystych poziomów elektronowych atomu manganu brak wyników eksperymentalnych dla stałych A i B lub wyniki uzyskane przez różnych autorów są niezgodne w granicach niepewności pomiarowych • Wybór poziomów i przejść do wzbudzania za pomocą lasera oraz do wykorzystania jako kanały fluorescencji w metodzie LIF na strumieniu atomowym 3. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych wspólnie ze współautorami (obsługa stanowiska eksperymentalnego ze strumieniem atomowym) 4. Analiza wyników eksperymentalnych 5. Istotny udział w dyskusji otrzymanych wyników 6. Redakcja manuskryptu, korekta manuskryptu 7. Pozyskanie finansowania (NCN grant nr 2019/03/X/ST2/01119) 8. Autor korespondencyjny 	

H6	<p>P. Głowacki, D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. II. Odd-parity level system,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 253, 107138 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107138</p>	<p>IF: 2,468 MEiN: 100 cyt.: 4 (0)</p>
udział 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Koordynacja prac związanych z powstaniem artykułu 2. Sformułowanie problemu i celu badawczego: <ul style="list-style-type: none"> • Określenie na podstawie danych literaturowych, dla których nieparzystych poziomów elektronowych atomu manganu brak wyników eksperymentalnych dla stałych A i B lub wyniki uzyskane przez różnych autorów są niezgodne w granicach niepewności pomiarowych • Wybór poziomów i przejść do wzbudzenia za pomocą lasera oraz do wykorzystania jako kanały fluorescencji w metodzie LIF na strumieniu atomowym 3. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych wspólnie ze współautorami (obsługa stanowiska eksperymentalnego ze strumieniem atomowym) 4. Analiza wyników eksperymentalnych 5. Istotny udział w dyskusji otrzymanych wyników 6. Redakcja manuskryptu, korekta manuskryptu 7. Pozyskiwanie finansowania (NCN grant nr 2019/03/X/ST2/01119) 8. Autor korespondencyjny 	
H7	<p>P. Głowacki, D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, <i>Estimation of radiative parameters for atomic manganese from the point of view of possible clock transitions and laser cooling schemes,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 276, 107898 (2021) doi: 10.1016/j.jqsrt.2021.107898</p>	<p>IF: 2,342 MEiN: 100 cyt.: 2 (0)</p>
udział 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Koordynacja prac związanych z powstaniem artykułu 2. Współudział w opracowaniu propozycji przejść zegarowych w atomie manganu oraz schematów chłodzenia laserowego 3. Opracowanie oprogramowania do wizualizacji struktury nadsubtelnej przejść wzbronionych oraz przejść chłodzących 4. Wizualizacja otrzymanych wyników (wykonanie rysunków schematów chłodzenia oraz symulacja przejść zegarowych i chłodzących) 5. Dyskusja otrzymanych wyników 6. Redakcja manuskryptu, korekta manuskryptu 7. Pozyskanie finansowania (NCN grant nr 2019/03/X/ST2/01119) 8. Autor korespondencyjny 	

H8	<p>P. Głowacki, D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, M. Chomski, B. Furmann, <i>Hyperfine structure investigations of Mn I</i>, <i>Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer</i> 287, 108245 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108245</p>	IF: 2,342 MEiN: 100 cyt.: 2 (1)
udział 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Koordynacja prac związanych z powstaniem artykułu 2. Sformułowanie problemu i celu badawczego: <ul style="list-style-type: none"> • Określenie na podstawie danych literaturowych, dla których poziomów elektronowych w atomie manganu brak wyników eksperymentalnych dla stałych <i>A</i> i <i>B</i> lub wyniki uzyskane przez różnych autorów są niezgodne w granicach niepewności pomiarowych • Wybór poziomów i przejść do wzbudzania za pomocą lasera oraz do wykorzystania jako kanały fluorescencji w metodzie LIF w wyładowaniu lampy z katodą wnąkową 3. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych wspólnie ze współautorami 4. Analiza wyników eksperymentalnych 5. Istotny udział w dyskusji otrzymanych wyników 6. Redakcja manuskryptu, korekta manuskryptu 7. Pozyskanie finansowania (NCN grant nr 2019/03/X/ST2/01119) 8. Autor korespondencyjny 	
H9	<p>J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik, <i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th</i>, <i>Nature</i> 556, 321-325 (2018) doi: 10.1038/s41586-018-0011-8</p>	IF 43,070 MEiN: 200(50*) cyt.: 78 (76)
udział 20%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modyfikacja stanowiska pomiarowego w laboratorium Maier - Leibnitz należącego do LMU w Monachium pod kątem badań spektroskopowych (projekt elementów próżniowych - przepustów elektrycznych, optyczno-mechanicznych przepustów dla fotopowielaczy, projekt uchwytów fotopowielaczy, projekt konstrukcji platform opto-mechanicznych, dobór odpowiednich okien próżniowych z odpowiednimi warstwami anty-refleksyjnymi) 2. Współudział w konstrukcji układu do stabilizacji miernika długości fali w oparciu o linię absorpcyjną atomu rubidu $\lambda = 780$ nm (tzw. komórkę rubidową) 3. Współudział w przeprowadzeniu pomiarów (zarówno w laboratorium PTB Brunshwik jak i LMU Monachium) 4. Udział w opracowaniu wyników, przeprowadzenie analizy otrzymanych widm alternatywną metodą w stosunku do metody zastosowanej przez Johanna Thielkinga, dającą wyniki w pełnej zgodności z tą pierwszą; wyznaczono: stałe struktury nadsubtelnej dla badanych poziomów elektronowych jonów toru w stanie podstawowym i wzbudzonym jądra atomowego, przesunięcia izotopowe oraz izomerowe - dodatkowo przeprowadzono ilościowe oszacowanie produkcji jonów toru w stanie izomerowym (2,1(5)%) w procesie rozpadu izotopu uranu 233 5. Istotny udział w dyskusji otrzymanych wyników 6. Udział w redakcji manuskryptu, korekta manuskryptu (komunikacja z recenzentami poprzez autora korespondencyjnego) 	

H10	<p>P. Głowacki, E. Peik, <i>Fluorescence properties of ions adsorbed from aqueous solutions on fused silica and CaF₂ - test cases of Eu³⁺ and Tb³⁺</i>, Journal of Luminescence 247, 118865 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108331</p>	IF 4,171 MEiN: 100 cyt.: 0 (0)
udział 75%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sformułowanie problemu i celu badawczego <ul style="list-style-type: none"> • Wybór pierwiastków do testowania metody nanoszenia cienkich warstw na powierzchnie krystaliczne • Wybór źródeł światła do wzbudzenia przejść w jonach badanych pierwiastków (odpowiednie diody LED wysokiej mocy) 2. Skonstruowanie aparatury pomiarowej (do rejestracji widm fluorescencyjnych oraz pomiarów czasów zaniku fluorescencji) 3. Przygotowanie próbek do badań 4. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych 5. Analiza wyników eksperymentalnych (opracowanie programu do analizy krzywych zaniku fluorescencji oraz programu do wizualizacji danych w środowisku programistycznym Python) 6. Istotny udział w dyskusji otrzymanych wyników 7. Redakcja manuskryptu, korekta manuskryptu 8. Autor korespondencyjny 	

Podsumowanie

Autor korespondencyjny [H1, H3-H8, H10], pierwszy autor [H3-H8, H10].

Sumaryczny *Impact Factor* publikacji H1-H10: **IF = 61,494** (IF_{5letni} = 64,589).

Sumaryczna liczba punktów MEiN publikacji H1-H10: **930** (103*¹).

Liczba cytowań (bez autocytowań) wg bazy Scopus: 95 (78).

¹prace H1-H3, H9 opublikowane do roku 2018 - punktacja według odpowiedniego wykazu MNiSW, skala 0 - 50 punktów.

II. AKTYWNOŚĆ NAUKOWA

1. Opublikowane artykuły w czasopismach naukowych

Przy poszczególnych publikacjach podałem *Impact Factor* czasopism dla roku opublikowania pracy, za wyjątkiem prac opublikowanych po 2021, oraz liczbę punktów MEiN zgodną z wykazem czasopism naukowych i recenzowanych materiałów konferencyjnych z konferencji międzynarodowych Ministra Edukacji i Nauki opublikowanym w komunikacie z dnia 1 grudnia 2021 roku (w nawiasie * oznacza punkty z lat wcześniejszych, w skali punktowej 0-50). Zamieściłem również informacje o liczbie cytowań (bez autocytowań) **według bazy Scopus** na dzień 7 kwietnia 2023 r.

Publikacje po doktoracie		\sum IF: 94,792 \sum MEiN: 2110(*353) \sum cyt.: 207 (181)
1. [A1]	M. Suski, B. Furmann, M. Chomski, S. Mieloch, P. Głowacki , D. Stefańska and <i>Hyperfine structure investigations of the odd-parity electronic levels of the terbium atom</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 298 , 108492 (2023) doi: 10.1016/j.jqsrt.2023.108492	IF: 2,342 MEiN: 100 cyt.: 0 (0)
2. [A2]	M. Chomski, B. Furmann, M. Suski, P. Głowacki , D. Stefańska and S. Mieloch <i>Determination of the energies of new electronic levels of the holmium atom and investigation of their hyperfine structure</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 297 , 108480 (2023) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108480	IF: 2,342 MEiN: 100 cyt.: 0 (0)
3. [A3]	M. Elantkowska, J. Ruczkowski, P. Głowacki , D. Stefańska <i>Semi-empirical studies on odd parity levels system of manganese atom in multiconfiguration approximation</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 292 , 108347 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108347	IF: 2,342 MEiN: 100 cyt.: 0 (0)
4. [H4]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Proposed clock transition in atomic chromium and the possible detection schemes</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 291 , 108331 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108331	IF: 2,342 MEiN: 100 cyt.: 0 (0)
5. [H10]	P. Głowacki , E. Peik <i>Fluorescence properties of ions adsorbed from aqueous solutions on fused silica and CaF₂ - test cases of Eu³⁺ and Tb³⁺</i> , Journal of Luminescence 247 , 118865 (2022) doi: 10.1016/j.jlumin.2022.118865	IF: 4,171 MEiN: 100 cyt.: 0 (0)
6. [H8]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, M. Chomski, B. Furmann <i>Hyperfine structure investigations of Mn I</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 287 , 108245 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108245	IF: 2,342 MEiN: 100 cyt.: 2 (1)
7. [H7]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Estimation of radiative parameters for atomic manganese from the point of view of possible clock transitions and laser cooling schemes</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 276 , 107898 (2021) doi: 10.1016/j.jqsrt.2021.107898	IF: 2,342 MEiN: 100 cyt.: 2 (0)

8. [H6]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. II. Odd-parity level system,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 253 , 107138 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107138	IF: 2,468 MEiN: 100 cyt.: 4 (0)
9. [H5]	P. Głowacki , D. Stefańska, M. Elantkowska, J. Ruczkowski <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. I. Even-parity level system,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 249 , 107013 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107013	IF: 2,468 MEiN: 100 cyt.: 5 (0)
10. [A10]	D. Stefańska, B. Furmann, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, P. Głowacki , M. Chomski, M. Suski, S. Wilman <i>Investigations of the possible second-stage laser cooling transitions for the holmium atom magneto-optical trap,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 246 , 106915 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.106915	IF: 2,468 MEiN: 100 cyt.: 3 (2)
11. [A11]	D.-M. Meier, J. Thielking, P. Głowacki , M. V. Okhapkin, R. A. Müller, A. Surzhykov, and E. Peik <i>Electronic level structure of Th^+ in the range of the ^{229m}Th isomer energy,</i> Physical Review A 99 , 052514 (2019) doi: 10.1103/PhysRevA.99.052514	IF: 2,777 MEiN: 100(*35) cyt.: 6 (6)
12. [H9]	J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf and E. Peik <i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> Nature 556 , 321-325 (2018) doi: 10.1038/s41586-018-0011-8	IF: 43,070 MEiN: 200(*50) cyt.: 78 (76)
13. [A13]	M. S. Safronova, S. G. Porsev, M. G. Kozlov, J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, E. Peik <i>Electronic level structure of Th^+ in the range of the ^{229m}Th isomer energy,</i> Physical Review Letters 121 , 213001 (2018) doi: 10.1103/PhysRevLett.121.213001	IF: 9,277 MEiN: 200(*45) cyt.: 11 (11)
14. [A14]	R. A. Müller, A. V. Maiorova, S. Fritzsche, A. V. Volotka, R. Beerwerth, P. Głowacki , J. Thielking, D-M Meier, M. Okhapkin, E. Peik, and A. Surzhykov <i>Hyperfine interaction with the ^{229}Th nucleus and its low-lying isomeric state,</i> Physical Review A 98 , 020503(R) (2018) doi: 10.1103/PhysRevA.98.020503	IF: 2,907 MEiN: 100(*35) cyt.: 10 (9)
15. [A15]	D. Stefańska, B. Furmann and P. Głowacki <i>Possibilities of investigations of the temporal variation of the α constant in the holmium atom,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 213 159-168 (2018) doi: 10.1016/j.jqsrt.2018.04.017	IF: 2,600 MEiN: 100(*35) cyt.: 10 (9)
16. [A16]	K. Szymaniec, S. N. Lea, K. Gibble, S. E. Park, K. Liu and P. Głowacki <i>NPL Cs fountain frequency standards and the quest for the ultimate accuracy,</i> Journal of Physics: Conference Series 723 , 012003 (2016) doi: 10.1088/1742-6596/723/1/012003	IF: — MEiN: 40(*0) cyt.: 20 (20)

17. [A17]	B. Gamper, P. Głowacki , I. Siddiqui, J. Dembczyński, L. Windholz <i>New even-parity fine structure levels of the Lanthanum atom discovered by means of optogalvanic spectroscopy</i> , Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 47 , 165001(13pp), (2014) doi: 10.1088/0953-4075/47/16/165001	IF: 1,792 MEiN: 70(*30) cyt.: 18 (18)
18. [A18]	L. Windholz, B. Gamper, P. Głowacki , J. Dembczyński <i>The Puzzle of the La I Lines 6520.644 Å and 6519.869 Å</i> , Spectral Analysis Reviews, 2 , 10-18, (2014) doi: 10.4236/sar.2014.23024	IF: — MEiN: — cyt.: 0 (0)
19. [H3]	P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz <i>Investigation of the hyperfine structure of electronic levels in chromium atom</i> , European Physical Journal: Special Topics 222 , 2345-2351 (2013) doi: 10.1140/epjst/e2013-02015-x	IF: 1,862 MEiN: 70(*30) cyt.: 2 (1)
20. [A20]	B. Arcimowicz, J. Dembczyński, P. Głowacki , J. Ruczkowski, M. Elantkowska, G. H. Guthöhrlein, L. Windholz <i>Progress in the analysis of the even parity configurations of tantalum atom</i> , European Physical Journal: Special Topics 222 , 2085-2102 (2013) doi: 10.1140/epjst/e2013-01988-6	IF: 1,862 MEiN: 70(*30) cyt.: 8 (8)
21. [A21]	O. A. Herrera-Sancho, M. V. Okhapkin, K. Zimmermann, Chr. Tamm, E. Peik, A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, P. Głowacki <i>Two-photon laser excitation of trapped $^{232}\text{Th}^+$ ions via the 402-nm resonance line</i> , Physical Review A 85 : 033402 (2012) doi: 10.1103/PhysRevA.85.033402	IF: 3,042 MEiN: 100(*40) cyt.: 26 (22)
22. [H2]	A. Krzykowski, P. Głowacki , A. Jarosz <i>Precise measurements of the hyperfine structure of the levels belonging to the terms $3d^5 4s^5 G$ and $5P$ in Cr(I)</i> , Acta Physica Polonica A 122 , p. 78-81 (2012) doi: 10.12693/APhysPolA.122.78	IF: 0,444 MEiN: 40(*15) cyt.: 2 (0)
23. [H1]	A. Krzykowski, P. Głowacki <i>Experimental study of radio frequency power broadening in ABMR-LIRF method</i> , Elektronika 6 : 31-34 (2011) https://www.sigma-not.pl	IF: — MEiN: 20(*8) cyt.: 0 (0)
Publikacje przed doktoratem		\sum IF: 3,832 \sum MEiN: 130(*63) \sum cyt.: 18 (13)
24. [A24]	P. Głowacki , Z. Uddin, G. H. Guthöhrlein, L. Windholz, J. Dembczyński <i>Study of the hyperfine structure of Ta I lines based on Fourier transform spectra and laser-induced fluorescence</i> , Physica Scripta 80 : 025301-025310 (2009) doi: 10.1088/0031-8949/80/02/025301	IF: 1,204 MEiN: 40(*25) cyt.: 5 (4)
25. [A25]	A. Jarosz, D. Stefańska, M. Elantkowska, J. Ruczkowski, A. Buczek, B. Furmann, P. Głowacki , A. Krzykowski, Ł. Piątkowski, E. Stachowska, J. Dembczyński <i>High precision investigations of the hyperfine structure of metastable levels in chromium atom</i> , Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 40 : 2785-2797 (2007) doi: 10.1088/0953-4075/40/13/019	IF: 1,875 MEiN: 70(*30) cyt.: 13 (9)

26. [A26]	A. Jarosz, A. Buczek, B. Furmann, D. Stefańska, P. Głowacki , Ł. Piątkowski, J. Dembczyński <i>Physical aspects of precision of the measurements with the method of optical-rf double resonance on an atomic beam</i> , Elektronika 5: 30-33 (2006) https://www.sigma-not.pl	IF: — MEiN: 20(*8) cyt.: 0 (0)
Wszystkie publikacje		\sum IF: 98,624 \sum MEiN: 2240(*416) \sum cyt.: 225 (194)

Pozostałą część mojego dorobku publikacyjnego stanowią recenzowane publikacje pokonferencyjne, które zamieszczam poniżej, kontynuując numerację prac. Na poniższej liście znajdują się wyłącznie prace opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora.

27. [A27]	P. Głowacki , A. Krzykowski, L. Windholz <i>The determination a new energy level of the neutral tantalum atom by the LIF method</i> , II International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists - Proceedings, (2009) p. 360-366	
28. [A28]	P. Głowacki , A. Krzykowski <i>Construction and optimization of the tantalum hollow cathode lamp for investigation of the hyperfine structure by laser spectroscopy methods</i> , I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists - Proceedings, (2008) p. 34-39	

2. Wystąpienia na konferencjach naukowych

Poniżej przedstawiam wykaz moich prac prezentowanych na konferencjach naukowych. Na liście współautorów podkreślono nazwisko autora prezentującego pracę (dla przejrzystości pozycje, które prezentowałem osobiście, zaznaczyłem szarym tłem). Pozycje K1 do K30 to komunikaty konferencyjne po doktoracie, K31 do K36 przed doktoratem.

Nr	Miasto / kraj	Nazwa konferencji	Tytuł prezentacji / autorzy	Data
K1	Poznań Polska	II webinarium Polskiego Towarzystwa Próżniowego	<i>Vacuum techniques in the service of quantum time and frequency standards</i> , referat na zaproszenie P. Głowacki	15.10.2021
K2	Zielona Góra Polska	WCPP'19	<i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th</i> , referat J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik	14.10.2019 — 17.10.2019

K3	Kraków Polska	45 ZFP	<i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> referat J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik	13.09.2019 — 18.09.2019
K4	Rostok Niemcy	83 rd DPG Spring Meeting 2019 (SAMOP)	<i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> poster J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik	10.03.2019 — 15.03.2019
K5	Kraków Polska	50 th EGAS	<i>Possibilities of investigations of the temporal variation of the constant α in atomic holmium,</i> poster D. Stefańska, B. Furmann, P. Głowacki	09.07.2018 — 13.07.2018
K6	Bad Honnef Niemcy	676. WE-Heraeus-Seminar “Novel optical clocks in atoms and nuclei”	<i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> poster J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik	09.07.2018 — 12.07.2018
K7	Bad Honnef Niemcy	676. WE-Heraeus-Seminar “Novel optical clocks in atoms and nuclei”	<i>Luminescence study of Ln(III) ions adsorbed on a CaF_2 surface as supplementary investigation for searching the isomeric transition in ^{229}Th solid samples,</i> poster P. Głowacki , E. Peik	09.07.2018 — 12.07.2018
K8	Turyn Włochy	32 nd EFTF	<i>Towards laser excitation of the Th-229 nuclear clock isomer,</i> referat na zaproszenie D. M. Meier, J. Thielking, P. Głowacki , M. V. Okhapkin, E. Peik	10.04.2018 — 12.04.2018
K9	Erlangen Niemcy	82 nd DPG Spring Meeting 2018 (SAMOP)	<i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> poster J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D-M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik	04.03.2018 — 09.03.2018
K10	Erlangen Niemcy	82 nd DPG Spring Meeting 2018 (SAMOP)	<i>Electronic level structure investigations in Th^+ and nuclear properties of ^{229m}Th,</i> poster D-M. Meier, J. Thielking, P. Głowacki , M. V. Okhapkin, E. Peik	04.03.2018 — 09.03.2018
K11	Montreal Kanada	32 nd URSI GASS	<i>Search for laser excitation of the low-energy isomer in ^{229}Th and the nuclear optical clock,</i> referat na zaproszenie E. Peik, D-M. Meier, J. Thielking, P. Głowacki , M. V. Okhapkin	19.08.2017 — 26.08.2017

K12	Mainz Niemcy	81 st DPG Spring Meeting 2017 (SAMOP)	<i>Laser spectroscopic investigation of singly and doubly charged thorium ions,</i> poster J. Thielking, D-M. Meier, P. Głowacki , M. V. Okhapkin, E. Peik	06.03.2017 — 10.03.2017
K13	Poznań Polska	X International Workshop LASER2016	<i>Laser spectroscopic investigations of singly and doubly charged thorium ions,</i> poster J. Thielking, D-M. Meier, P. Głowacki , M. V. Okhapkin, E. Peik	16.05.2016 — 19.05.2016
K14	Poczdami Niemcy	8 th Symposium FSM	<i>NPL Cs fountain frequency standards - reaching the ultimate accuracy,</i> referat K. Szymaniec, S. N. Lea, K. Gibble, S. E. Park, K. Liu, P. Głowacki	12.10.2015 — 16.10.2015
K15	Denver USA	IFCS-EFTF Conference	<i>Primary frequency standard NPL-CsF3: first results,</i> poster S. N. Lea, P. Głowacki , A. Acharya, K. Liu, G. Marra, L. A. M. Johnson, S. Kyriacou, S. A. King, R. A. Williams, H. S. Margolis, K. Gibble, K. Szymaniec	12.04.2015 — 16.04.2015
K16	Denver USA	IFCS-EFTF Conference	<i>GPS-based frequency comparison of ¹⁷¹Yb⁺ ion optical clocks at PTB and NPL,</i> poster N. Huntemann, B. Lipphardt, Chr. Tamm, R. M. Godun, J. M. Jones, S. A. King, H. S. Margolis, P. B. R. Nisbet-Jones, V. Gerginov, S. Weyers, P. Głowacki , S. N. Lea, K. Szymaniec, J. Leute, P. Whibberley, A. Wallin, M. Merimaa, P. Gill, E. Peik	12.04.2015 — 16.04.2015
K17	Poznań Polska	3 rd QUEINO 2013 at UAM	<i>Spectroscopic investigations of the atomic structure in support of quantum engineering and metrology,</i> referat na zaproszenie P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz, O. A. Herrera-Sancho, M. V. Okhapkin, E. Peik	15.10.2013 — 17.10.2013
K18	Mons Belgia	11 th ASOS	<i>Investigation of the hyperfine-resolved spectrum of Lanthanum by Fourier-transform and laser spectroscopy,</i> poster B. Gamper, P. Głowacki , I. Siddiqui, F. Güzelcimen, Gö. Basar, M. Tamanis, A. Kruzins, R. Ferber, J. Dembczyński, S. Kröger, L. Windholz	05.08.2013 — 09.08.2013
K19	Hanower Niemcy	77 th DPG Spring Meeting 2013 (SAMOP)	<i>The puzzle of the La line 6520.77 Å,</i> referat L. Windholz, B. Gamper, P. Głowacki , J. Dembczyński	18.03.2013 — 22.03.2013
K20	Jurata Polska	VII th Workshop on Atomic and Molecular Physics	<i>Investigation of the hyperfine structure of electron levels in chromium atom,</i> poster P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz	10.09.2012 — 14.09.2012

K21	Jurata Polska	VII th Workshop on Atomic and Molecular Physics	<i>The hyperfine structure measurements of the odd electron levels in scandium atom,</i> poster <u>A. Krzykowski</u> , P. Głowacki	10.09.2012 — 14.09.2012
K22	Göteborg Szwecja	44 th EGAS	<i>Critical analysis of the methods of interpretation in the hyperfine structure for the chromium atom,</i> poster P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, J. Dembczyński	09.07.2012 — 13.07.2012
K23	Stuttgart Niemcy	76 th DPG Spring Meeting 2012 (SAMOP)	<i>Parametrization of the transition probabilities in Th II,</i> poster P. Głowacki , J. Dembczyński, M. Elantkowska, J. Ruczkowski	12.03.2012 — 16.03.2012
K24	Fribourg Szwajcaria	43 th EGAS	<i>Analysis of the odd parity configurations of tantalum atom - revisited,</i> poster B. Arcimowicz, <u>J. Dembczyński</u> , P. Głowacki , M. Elantkowska, J. Ruczkowski, G. H. Guthöhrlein, L. Windholz	28.06.2011 — 02.07.2011
K25	Fribourg Szwajcaria	43 th EGAS	<i>High resolution spectroscopy of chromium atom,</i> poster <u>A. Krzykowski</u> , P. Głowacki , J. Dembczyński	28.06.2011 — 02.07.2011
K26	Poznań Polska	International Conference on Quantum Metrology 2011	<i>Experimental study of the radio frequency power broadening in ABMR-LIRF method,</i> poster A. Krzykowski, P. Głowacki	11.05.2011 — 13.05.2011
K27	Drezno Niemcy	75 th DPG Spring Meeting 2011 (SAMOP)	<i>Investigation of the hfs splittings in chromium atom by LIF and ABMR-LIRF methods,</i> poster A. Krzykowski, P. Głowacki , A. Jarosz, J. Dembczyński	13.03.2011 — 18.03.2011
K28	Salamanka Hiszpania	ECAMP X	<i>Investigation of the hyperfine structure of elements with open 3d shell,</i> poster <u>A. Krzykowski</u> , P. Głowacki , D. Stefańska, J. Dembczyński	04.07.2010 — 10.07.2010
K29	Toruń Polska	VIII Congress Societas Humboldtiana Polonorum	<i>Study of the hyperfine structure of the atoms of 3d elements by ABMR-LIRF method,</i> poster P. Głowacki	27.06.2010 — 30.06.2010
K30	Hanower Niemcy	74 th DPG Spring Meeting 2010 (SAMOP)	<i>Systematic study of the hfs splittings for 3d elements by ABMR-LIRF method,</i> referat P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz, D. Stefańska, J. Dembczyński	08.03.2010 — 12.03.2010

K31	Gdańsk Polska	41 st EGAS	<i>Investigation of the hyperfine structure of Ta I-lines by laser-induced fluorescence,</i> poster P. Głowacki , J. Dembczyński, L. Windholz	08.07.2009 — 11.07.2009
K32	Poznań Polska	II International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists	<i>The determination a new energy level of the neutral tantalum atom by the LIF method,</i> referat P. Głowacki , A. Krzykowski, L. Windholz	20.05.2009 — 22.05.2009
K33	Graz Austria	40 th EGAS	<i>Investigation of the hyperfine structure of Ta I-lines,</i> poster P. Głowacki , L. Windholz, J. Dembczyński	02.07.2008 — 05.07.2008
K34	Poznań Polska	I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists	<i>Construction and optimization of the tantalum hollow cathode lamp for investigation of the hyperfine structure by laser spectroscopy methods,</i> referat P. Głowacki , A. Krzykowski	17.04.2008 — 18.04.2008
K35	Neapol Włochy	38 th EGAS	<i>Investigations of the hyperfine structure of metastable levels in chromium atom,</i> poster A. Jarosz, A. Buczek, <u>B. Furmann</u> , P. Głowacki , M. Elantkowska, J. Ruczkowski, E. Stachowska, D. Stefańska, Ł. Piątkowski, J. Dembczyński	07.06.2006 — 10.06.2006
K36	Poznań Polska	International Conference on Quantum Metrology 2006	<i>Investigations of the hyperfine structure of metastable levels in chromium atom,</i> poster <u>A. Jarosz</u> , A. Buczek, B. Furmann, D. Stefańska, P. Głowacki , Ł. Piątkowski, J. Dembczyński	09.05.2006 — 10.05.2006

3. Informacja o udziale w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych

brak

4. Zrealizowane projekty badawcze

Projekty badawcze po doktoracie

Kraj	Instytucja nadzorująca projekt	Tytuł / numer / instytucja	Rok realizacji / funkcja w projekcie
Polska	Politechnika Poznańska	<i>Wstępne badania struktury nadsubtelnej w atomie manganu pod kątem zastosowań w kwantowej metrologii i inżynierii</i> 2019/03/X/ST2/01119 konkurs Miniatura-3 Narodowe Centrum Nauki w Krakowie projekt krajowy	2019 -2020 kierownik projektu
Niemcy Austria Finlandia	Uniwersytet Techniczny w Wiedniu PTB Brunzswik LMU Monachium RKU Heidelberg Jyvaskylan Yliopisto MPIK Heidelberg MPQ Garching TOPTICA Photonics AG	<i>Towards a nuclear clock with Thorium-229</i> nuClock 664732 European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme H2020-EU.1.2. - EXCELLENT SCIENCE - Future and Emerging Technologies (FET) projekt międzynarodowy współfinansowany z funduszy Unii Europejskiej	2015 -2019 wykonawca (2015-2017)
Polska	Politechnika Poznańska	<i>Procedura komputerowego projektowania nuklearnego wzorca częstotliwości</i> N N519 650740 Narodowe Centrum Nauki w Krakowie projekt krajowy	2011 -2014 wykonawca pomocniczy
Polska Niemcy	Politechnika Poznańska PTB Brunzswik	<i>The measurement of the multilevel dynamics in laser excitation of trapped Th^+</i> COST-STSM-ECOST-STSM-MP1001-040711-007320 Projekt COST, akcja IOP1001 - Pułapka jonowa do przyszłych zastosowań Europejska Współpraca Naukowo-Techniczna dla Programów Ramowych UE projekt międzynarodowy współfinansowany z funduszy Unii Europejskiej	2011 kierownik projektu

Projekty badawcze przed doktoratem

Polska	Politechnika Poznańska	<i>Kompletny pakiet programów do opisu struktury atomów złożonych oraz określenie jej atrybutów na podstawie baz danych doświadczalnych</i> N519 033 32/4065 Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego projekt krajowy	2007 -2010 wykonawca pomocniczy
Polska Austria	Politechnika Poznańska Uniwersytet Techniczny Graz	Współpraca naukowo-techniczna Austria-Polska WTZ PL07/2007 projekt międzynarodowy	2008 wykonawca

5. Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych

brak

6. Staże naukowe

Staże po doktoracie

Termin	Informacje o stażu
01/2015 - 12/2017	<p>PTB Brunzwik, Niemcy Zakład Czasu i Częstotliwości Wydział Optyki Mentor: dr hab. Ekkehard Peik, prof. PTB (h-index = 32) (staż podoktorski) <u>Cel wyjazdu:</u> Udział w pionierskich badaniach nad realizacją optycznego zegara nuklearnego, zarówno w badaniach nad spułapkowanymi jonami Th^+, Th^{2+}, Th^{3+} w pułapkach liniowych, jak i nad koncepcją jego realizacji w oparciu o kryształ domieszkowany objętościowo jonami Th^{4+} np. $(\text{CaF}_2:\text{Th}^{4+})$, lub w prostszej wersji - kryształ domieszkowany powierzchniowo. Udział w projekcie nuClock 664732 finansowanym w ramach Programu Horizon 2020 Unii Europejskiej. Wymiernym efektem naukowym stażu są artykuły [H9, H10, A11, A13, A14] oraz doniesienia konferencyjne [K2-K4, K6-K13].</p>
05/2014 - 12/2014	<p>NPL Teddington, Wielka Brytania Zakład Czasu i Częstotliwości Wydział Czasu, Kwantów i Elektromagnetyzmu Mentor: dr hab Krzysztof Szymaniec (h-index = 14) (staż podoktorski) <u>Cel wyjazdu:</u> Udział w pracach związanych z pierwotnym wzorcem częstotliwości - fontanną cezową NPL-CsF2 (obsługa i ewaluacja wzorca), udział w pracach nad nowym standardem częstotliwości fontanną cezową NPL-CsF3. Wymiernym efektem naukowym stażu są artykuł [A16] oraz doniesienia konferencyjne [K14-K16].</p>
07/2013	<p>PTB Brunzwik, Niemcy Zakład Czasu i Częstotliwości Wydział Optyki Mentor: dr hab. Ekkehard Peik, prof. PTB (h-index = 32) (staż podoktorski) <u>Cel wyjazdu:</u> Udział w aktualnych badaniach jonów Th^+ uwięzionych w pułapce liniowej, zaznajomienie się z aktualnym stanem układu eksperymentalnego, przygotowanie wniosku Stypendia wewnątrz europejskie Marie Curie (IEF), konkurs FP7-PEOPLE-IEF-2013 o numerze SEP-210111460 i tytule "Nuclear Optical Clock with Th-229".</p>

07/2012 08/2012	<p>- Uniwersytet Techniczny w Grazu, Austria Instytut Fizyki Eksperymentalnej Mentor: dr hab. Laurientus Windholz, prof. TU Graz (h-index = 22) (staż podoktorski) Cel wyjazdu: Program „<i>Uczenie się przez całe życie</i>” – <i>Erasmus</i> Mobilność szkoleniowa personelu Program Unii Europejskiej Celem szkolenia było zapoznanie się z budową i działaniem systemu lasera tytanowo-szafirowego oraz jego zastosowaniem w eksperymentach spektroskopii laserowej. Dodatkowo szkolenie obejmowało zdobycie wiedzy na temat konstrukcji i budowy nowego typu uchwytu dla zwierciadła do rezonatora lasera pierścieniowego: barwnikowego lub tytanowo-szafirowego. Wymiernym efektem naukowym stażu są artykuł [A17,A18] oraz doniesienia konferencyjne [K18-K19].</p>
07/2011	<p>PTB Brunzswik, Niemcy Zakład Czasu i Częstotliwości Wydział Optyki Mentor: dr hab. Ekkehard Peik, prof. PTB (h-index = 32) (staż podoktorski) Cel wyjazdu: Projekt COST, akcja IOP1001 - Pułapka jonowa dla przyszłych zastosowań (eng. <i>Ion Trap for Tomorrow's Application</i>) Europejska Współpraca Naukowo-Techniczna dla Programów Ramowych UE badania jonów Th^+ uwięzionych w pułapce liniowej w ramach projektu. Wymiernym efektem naukowym stażu jest artykuł [A21].</p>
07/2010 10/2010	<p>- PTB Brunzswik, Niemcy Zakład Czasu i Częstotliwości Wydział Optyki Mentor: dr hab. Ekkehard Peik, prof. PTB (h-index = 32) (staż podoktorski) Cel wyjazdu: konstrukcja układu eksperymentalnego lampy z katodą wnąkową do badań jonów Th^+, udział w badaniach jonów Th^+ uwięzionych w pułapce liniowej. Wymiernym efektem naukowym stażu jest artykuł [A21].</p>

Staze przed doktoratem

10/2008 11/2008	<p>- Uniwersytet Techniczny w Grazu, Austria Instytut Fizyki Eksperymentalnej Mentor: dr hab. Laurientus Windholz, prof. TU Graz (h-index = 22) (staż) Cel wyjazdu: Program „<i>Uczenie się przez całe życie</i>” – <i>Erasmus</i> Mobilność kadry dydaktycznej Program Unii Europejskiej Wygłoszenie wykładów dla studentów III stopnia (doktorantów) pt. <i>Laser spectroscopy - selected problems</i>, wykonywanie pomiarów linii widmowych atomu tantalu na układzie eksperymentalnym lampy z katodą wnąkową. Wymiernym efektem naukowym stażu jest artykuł [A24].</p>
--------------------	--

04/2008 07/2008	-	Uniwersytet Techniczny w Grazu, Austria Instytut Fizyki Eksperymentalnej Mentor: dr hab. Laurientus Windholz, prof. TU Graz (h-index = 22) (staż) <u>Cel wyjazdu:</u> realizacja projektu międzynarodowego Współpraca naukowo-techniczna Austria-Polska (niem. <i>Wissenschaftlich-Technische Zusammenarbeit Österreich-Polen</i>) WTZ PL07/2007 Wykonywanie pomiarów linii widmowych atomu tantalu na układzie eksperymentalnym lampy z katodą węgłową. Wymiernym efektem naukowym stażu są artykuły [A24, A27] oraz doniesienie konferencyjne [K33,K34].
03/2003 07/2003	-	Uniwersytet Techniczny Nauk Stosowanych, Wildau, Niemcy Mentor: prof. dr hab. Astra Richter (h-index = 21) (staż) <u>Cel wyjazdu:</u> wymiana studencka <i>Socrates/Erasmus</i> uczestnictwo w kursach IQN – International Quality Network (półprzewodniki, biomateriały, nanotechnologie) Program Unii Europejskiej
Podsumowanie		W sumie prawie 5 lat doświadczenia zawodowego zdobytego podczas zagranicznych staży naukowych

7. Członkostwo w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism

brak

8. Informacja o recenzowanych pracach naukowych

Poniżej przedstawiam wykaz czasopism, dla których recenzowałem prace naukowe, *Impact Factor* (5-letni), punktację MEiN (zgodną z wykazem czasopism naukowych i recenzowanych materiałów konferencyjnych z konferencji międzynarodowych Ministra Edukacji i Nauki (MEiN) opublikowanym w komunikacie z dnia 1 grudnia 2021 roku) oraz liczbę recenzji. Wszystkie czasopisma są wykazane w bazie Web of Science (WoS) i Journal Citation Reports (JCR), jedno nie posiada jeszcze wskaźnika *Impact Factor*, gdyż jest indeksowane dopiero od roku 2021. Wszystkie recenzje opracowałem po uzyskaniu stopnia doktora. Informacje o recenzjach można znaleźć na moim profilu: Web of Science ResearcherID: [F-1511-2013](#).

Wydawnictwo	Tytuł czasopisma	Impact Factor (5-letni)	Punktacja MEiN	Liczba recenzji
MDPI	Materials	4,042	140	5
MDPI	Applied Science	2,921	100	3
MDPI	Sensors	4,050	100	2
MDPI	Photonics	2,302	70	1
MDPI	Journal of Imaging	—	20	1
CANADIAN SCIENCE PUBLISHING	Canadian Journal of Physics	1,197	40	1

9. Uczestnictwo w programach europejskich lub innych programach międzynarodowych

Po doktoracie

Kraj	Instytucja nadzorująca program	Tytuł / numer / instytucja	Rok realizacji
Polska	Politechnika Poznańska	<i>Podniesienie kompetencji kadry akademickiej i potencjału instytucji w przyjmowaniu osób z zagranicy - Welcome to Poland</i> POWR.03.03.00-00-PN14/18 Europejski Fundusz Społeczny Program Operacyjny Wiedza Edukacja Rozwój NAWA	2019
Austria	Uniwersytet Techniczny Graz	Program „ <i>Kształcenie ustawiczne</i> ” – <i>Erasmus</i> Mobilność szkoleniowa personelu Program Unii Europejskiej	2012
Polska	Politechnika Poznańska	Program Operacyjny Kapitał Ludzki „ <i>Era Inżyniera. Rozbudowa potencjału rozwojowego Politechniki Poznańskiej</i> ” Kapitał Ludzki Narodowa Strategia Spójności Europejski Fundusz Społeczny	2012 2011

Przed doktoratem

Austria	Uniwersytet Techniczny Graz	Program „ <i>Kształcenie ustawiczne</i> ” – <i>Erasmus</i> Mobilność kadry dydaktycznej Program Unii Europejskiej	2008
Austria	Uniwersytet Techniczny Graz	<i>Współpraca naukowo-techniczna Austria-Polska</i> WTZ PL07/2007 projekt międzynarodowy	2008
Niemcy	Uniwersytet Techniczny Nauk Stosowanych, Wildau	wymiana studencka <i>Socrates/Erasmus</i> uczestnictwo w kursach IQN – International Quality Network (półprzewodniki, biomateriały, nanotechnologie) Program Unii Europejskiej	2003

10. Uczestnictwo w zespołach oceniających wnioski o finansowanie badań, wnioski o przyznanie nagród naukowych, wnioski w innych konkursach mających charakter naukowy lub dydaktyczny

2012-2013 Członek Wydziałowej Komisji ds. ustalenia kryteriów dotyczących nagród naukowych i dydaktycznych dla pracowników naukowo-dydaktycznych na Wydziale Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej

11. Zdobyte nagrody

- nagroda zespołowa II stopnia JM Rektora PP za osiągnięcia naukowe w roku akademickim 2018/2019
- nagroda indywidualna III stopnia JM Rektora PP za osiągnięcia naukowe w roku akademickim 2012/2013
- nagroda zespołowa II stopnia JM Rektora PP za osiągnięcia naukowe w roku akademickim 2011/2012
- nagroda zespołowa II stopnia JM Rektora PP za osiągnięcia naukowe w roku akademickim 2009/2010
- nagroda absolutoryjna Dziekana Wydziału Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej za ukończenie z wyróżnieniem studiów na kierunku Fizyka Techniczna w 2004 roku

12. Szkolenia, warsztaty, kursy (samodoskonalenie)

Poniżej przedstawiłem listę szkoleń, warsztatów naukowych, kursów oraz seminariów, których celem było moje samodoskonalenie i zdobycie dodatkowego doświadczenia poprzez udział m.in. w zajęciach praktycznych. Udział w wymienionych poniżej szkoleniach pozwolił mi na podniesienie kwalifikacji zawodowych - naukowych i dydaktycznych.

Po doktoracie			
Miejsce	Organizator	Cel	Data
Polska	Stowarzyszenie Elektryków Polskich SEP Oddział Poznański	<i>Kurs przygotowawczy do egzaminu kwalifikacyjnego</i> Zdobyte uprawnienia elektryczne kategorii E (nr E/301/171/23) oraz kategorii D (nr D/302/171/23)	13-20.02.2023
Polska	NLPQT Workshop, UMK Toruń	<i>Optical reference frequencies: generation, distribution and applications</i>	20-12.01.2023
Polska	KL FAMO, UMK Toruń	<i>School on Time Metrology in Experiments</i>	24-25.11.2022
Polska	Politechnika Poznańska	Szkolenie w zakresie <i>Part-147</i> certyfikat ukończenia kursu	17.09.2020
Polska	Politechnika Poznańska	Szkolenie w zakresie <i>Part-66</i> certyfikat ukończenia kursu	16.09.2020
Polska	Politechnika Poznańska	<i>Communication in intercultural setting</i> certyfikat ukończenia kursu	03-07.06.2019
Polska	Stowarzyszenie Elektryków Polskich SEP Oddział Poznański	<i>Kurs przygotowawczy do egzaminu kwalifikacyjnego</i> Zdobyte uprawnienia elektryczne kategorii E (nr E/434/170/18) oraz kategorii D (nr D/435/170/18)	12-19.02.2018
Anglia	NPL Teddington, Wielka Brytania	tygodniowy kurs programowania w środowisku LabVIEW prowadzony przez eksperta z National Instruments (NI)	2014
Polska	Stowarzyszenie Elektryków Polskich SEP Oddział Poznański	<i>Kurs przygotowawczy do egzaminu kwalifikacyjnego</i> Zdobyte uprawnienia elektryczne kategorii E (nr 1401/2011)	06-13.06.2011

Przed doktoratem

Polska	Politechnika Poznańska	<i>Strengthening the protection of intellectual and industrial property rights in Poland</i> kurs dotyczący Ochrony Praw Własności Intelektualnej	13-14.02.2007
Polska	Politechnika Poznańska	<i>Cisco Networking Academy</i> CCNA kurs dotyczący sieci komputerowych	01.04.2007 07.06.2007
Polska	Stowarzyszenie Elektryków Polskich SEP Oddział Poznański	Kurs przygotowawczy do egzaminu kwalifikacyjnego Zdobyte uprawnienia elektryczne kategorii E (nr 1608/2006)	28.08.2006 04.09.2006
Niemcy	Uniwersytet Techniczny Nauk Stosowanych, Wildau	uczestnictwo w kursach IQN – International Quality Network (półprzewodniki, biomateriały, nanotechnologie) Program Unii Europejskiej	04.-07.2003

III. WSPÓŁPRACA Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM

1. Wykaz dorobku technologicznego

brak

2. Współpraca z sektorem gospodarczym

2015 - 2017 współpraca z firmą TOPTICA Photonics AG (Lochhamer Schlag 19, 82166 Graefelfing (Monachium), Niemcy) w ramach projektu UE Horizon-2020 nuClock

2012 współpraca z firmą Radiant Dyes Laser & Accessoires GmbH (Friedrichstr. 58, 42929 Wermelskirchen, Niemcy) wraz z dr hab. L. Windholzem, prof. TU Graz w Austrii przy testowaniu nowego typu uchwytu dla zwierciadła do rezonatora lasera pierścieniowego - sporządzenie uwag konstruktorskich dotyczących budowy uchwytu

3. Uzyskane prawa własności przemysłowej

brak

4. Wdrożone technologie

brak

5. Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie

brak

6. Udział w zespołach eksperckich i konkursowych

brak

IV. INFORMACJE NAUKOMETRYCZNE

Dane bibliometryczne na dzień 7 kwietnia 2023 r. zgodnie z bazami Web of Science, Scopus i Google Scholar. Przedstawiam również moje konta w bazach naukowych:

Web of Science: [ResearcherID F-1511-2013](#)

ORCID: [0000-0003-0899-9106](#)

Scopus: [ID 56708404500](#)

Google Scholar: [A0TF1Q8AAAAJ](#)

	Web of Science	Scopus	Google Scholar
Publikacje	21	23	41
Liczba cytowań	213	225	309
(bez autocytowań)	185	194	—
Liczba artykułów cytujących	165	176	—
(bez autocytowań)	151	161	—
h-index	8	8	9

Sumaryczny *Impact Factor* opublikowanych artykułów wynosi **98,624** (dla roku opublikowania pracy za wyjątkiem prac opublikowanych po roku 2021), a 5-letni *Impact Factor* wynosi **101,619**. Suma punktów MEiN (wykaz z dnia 1 grudnia 2021 roku) wszystkich opublikowanych artykułów **2240** (*416²). Wyszukiwarka Scopus podaje liczbę 47 współautorów, z którymi opublikowałem 23 prace naukowe. Współpracowałem z naukowcami, którzy posiadali afiliacje z następujących krajów: Niemcy(16), Polska (15), Rosja (5), USA (3), Austria (2), Wielka Brytania (2), Pakistan (2), Korea Południowa (1), Chiny(1).

²* oznacza punkty z lat wcześniejszych, w skali punktowej 0-50, dotyczy prac od A11 do A26 wykazanych w rozdziale II. 1

Attachment No 2

**to the application of Dr. Eng. Przemysław Głowacki
for conducting the procedure qualifying for associate professorship**

**Self-report
(in English)**

**Institute of Materials Research and Quantum Engineering
Faculty of Materials Engineering and Technical Physics
Poznan University of Technology
Piotrowo 3, 60-965 Poznań**

Poznań 2023

Contents

1	Personal data	1
2	Diplomas, research degrees	1
3	Information on hitherto employment in research institutions	1
4	Discussion of the achievements referred to in Article 219, paragraph 1 p.2 of the Act of 20th July 2018 Law on higher education and science (Journal of Laws of 2021 item 478 with further amendments).	2
4.1	Title of scientific achievement	2
4.2	List of works constituting the scientific achievement [H1-H10]	2
4.3	Introduction	4
4.4	Motivation and research objectives	5
	<i>Candidates for Optical Atomic Clocks (Polish: Optyczne Zegary Atomowe - OZA)</i>	6
	The chromium atom Cr I	7
	The manganese atom Mn I	8
	<i>Candidate for an optical nuclear clock (Polish: Optyczny Zegar Nuklearny - OZN)</i>	10
	Thorium ions Th II - Th V	10
4.5	Research methodology and experimental setups	13
4.6	Discussion of the works H1 - H10, constituting the scientific achievement	16
4.7	Summary	28
	1. <i>Investigations of the chromium atom</i>	28
	2. <i>Investigations of the manganese atom</i>	29
	3. <i>Investigations of the thorium ion and auxiliary research</i>	30
4.8	Scientific plans for the future	32
5	Compilation of significant scientific activity realized in more than one scientific institution	32
6	List of teaching, organization and science popularizing achievements	34
6.1	Teaching	34
	6.1.1 Classes	34
	6.1.2 Scientific supervision of students	35
	6.1.3 Scientific supervisions of doctoral students as a scientific supervisor or assistant supervisor	36
6.2	Organization activities	37
6.3	Science popularization	37
7	Other research achievements	38
7.1	Summary of academic achievements	38
7.2	Course of scientific work before obtaining the doctoral scientific degree	38
7.3	Course of scientific work after obtaining the doctoral scientific degree	39
7.4	Presentation of scientific achievement at seminars in domestic scientific institutions	40
	References	41

1 Personal data

Przemysław Głowacki

Web of Science: ResearchID: [F-1511-2013](#)

ORCID: [0000-0003-0899-9106](#)

Scopus AI: [ID 56708404500](#)

2 Diplomas, research degrees

- **Ph.D - doctor of physical sciences** in the field of **physics**
Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology, 29.10.2009
title of Ph. D. dissertation: *Investigation of the hyperfine structure of selected elements with an open nd subshell by laser spectroscopy methods in a hollow cathode and on an atomic beam*
(Polish: *Badanie struktury nadsubtelnej wybranych pierwiastków z otwartą podpowłoką nd metodami spektroskopii laserowej w katodzie wnękowej i na strumieniu atomowym*)
thesis realized in Chair of Quantum Engineering and Metrology
supervisor: Prof. Dr. hab. Jerzy Dembczyński
- **M.Sc. Eng.** in the field of **physics of materials and nanotechnology**
Faculty of Technical Physics, Faculty of Technical Physics, 22.06.2004
title of Master's thesis: *(Investigation of the population of triplet states in porphyrine dyes*
(Polish: *Badanie obsadzeń stanów trypletowych barwników porfiryńowych*)
thesis realized in Division of Molecular Physics, Institute of Physics
supervisor: Prof. Dr. hab. Danuta Wróbel
note: very good
diploma of graduation with honours

3 Information on hitherto employment in research institutions

- since 01.09.2022 to the present moment - expert on research and development in the field of primary and optical frequency standards (half-time)
Time and Length Department, Central Office of Measures, Warsaw
- since 01.10.2019 to the present moment - assistant professor
Division of Quantum Engineering and Metrology, Institute of Materials Research and Quantum Engineering, Faculty of Materials Engineering and Technical Physics, Poznan University of Technology
- 12.01.2015 - 31.12.2017 - postdoctoral fellowship (*research assistant* - German: *wissenschaftlicher Mitarbeiter*)
Time and Frequency Department, Faculty of Optics
Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB Braunschweig, Germany - German National Metrological Institute
- 05.05.2014 - 30.12.2014 - postdoctoral fellowship (*visiting worker - research associate*)
National Physical Laboratory NPL Teddington, Great Britain - British National Metrological Institute

- 01.12.2009 - 30.09.2019 - assistant
Chair of Quantum Engineering and Metrology, Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology
Laboratory of Quantum Engineering and Metrology, Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology (after transformation of the chair into a laboratory, since 01.12.2012)
Division of Quantum Engineering and Metrology, Institute of Materials Research and Quantum Engineering, Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology (after creation of the institute mentioned above and transformation of the laboratory into a division within the institute, since 01.01.2016)
- 01.02.2007 - 30.11.2009 - senior technical officer
Chair of Atomic Physics, Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology
Chair of Engineering and Quantum Metrology, Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology (after renaming, since 2006)

4 Discussion of the achievements referred to in Article 219, paragraph 1 p.2 of the Act of 20th July 2018 Law on higher education and science (Journal of Laws of 2021 item 478 with further amendments).

4.1 Title of scientific achievement

As a scientific achievement corresponding to Article 219, paragraph 1 p.2 of the Act of 20th July 2018 Law on higher education and science (Journal of Laws of 2021 item 478 with further amendments) I hereby indicate a thematically related series of research articles entitled:

Investigations of the electronic structure of selected elements in terms of applications in optical clocks

4.2 List of works constituting the scientific achievement [H1-H10]

For the procedure on conferring the degree of associate professor I hereby declare 10 publications. All of them were written after I received the doctor's degree, and were published in journals included in the list of scientific journals and reviewed conference materials from international conferences issued by the Minister of Education and Science (Polish abbreviation: MEiN - *Ministerstwo Edukacji i Nauki*), made public in communication of December 1st 2021. The number of MEiN points presented was taken from the aforementioned list. Except for the article [H1], all the works were published in the journals from the Institute for Scientific Information (ISI) database, the so called „Philadelphia list". Work [H1] appeared in print in Polish industry magazine Electronics (CONSTRUCTIONS, TECHNOLOGIES, APPLICATIONS) - Polish: *Elektronika (KOSTRUKCJE, TECHNOLOGIE, ZASTOSOWANIA)* - issued by SIGMA-NOT publishing house (in No 6, among other topics, problems related to quantum engineering and metrology were presented). For individual journals Impact Factors are quoted for the publication year, except for the works published after 2021.

[H1]	A. Krzykowski, P. Głowacki <i>Experimental study of radio frequency power broadening in ABMR-LIRF method,</i> Elektronika 6 : 31-34 (2011) https://www.sigma-not.pl	IF: — MEiN: 20
------	---	-------------------

[H2]	A. Krzykowski, P. Głowacki , A. Jarosz <i>Precise measurements of the hyperfine structure of the levels belonging to the terms $3d^54s\ ^5G$ and 5P in Cr(I),</i> Acta Physica Polonica A 122 , p. 78-81 (2012) doi: 10.12693/APhysPolA.122.78	IF: 0.444 MEiN: 40
[H3]	P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz <i>Investigation of the hyperfine structure of electronic levels in chromium atom,</i> European Physical Journal: Special Topics 222 , 2345-2351 (2013) doi: 10.1140/epjst/e2013-02015-x	IF: 1.862 MEiN: 70
[H4]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Proposed clock transition in atomic chromium and the possible detection schemes,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 291 , 108331 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108331	IF: 2.342 MEiN: 100
[H5]	P. Głowacki , D. Stefańska, M. Elantkowska, J. Ruczkowski <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. I. Even-parity level system,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 249 , 107013 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107013	IF: 2.468 MEiN: 100
[H6]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. II. Odd-parity level system,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 253 , 107138 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107138	IF: 2.468 MEiN: 100
[H7]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Estimation of radiative parameters for atomic manganese from the point of view of possible clock transitions and laser cooling schemes,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 276 , 107898 (2021) doi: 10.1016/j.jqsrt.2021.107898	IF: 2.342 MEiN: 100
[H8]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, M. Chomski, B. Furmann <i>Hyperfine structure investigations of Mn I,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 287 , 108245 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108245	IF: 2.342 MEiN: 100
[H9]	J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf and E. Peik <i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> Nature 556 , 321-325 (2018) doi: 10.1038/s41586-018-0011-8	IF: 43.070 MEiN: 200

[H10]	P. Głowacki , E. Peik <i>Fluorescence properties of ions adsorbed from aqueous solutions on fused silica and CaF₂ - test cases of Eu³⁺ and Tb³⁺,</i> Journal of Luminescence 247 , 118865 (2022) doi: 10.1016/j.jlumin.2022.118865	IF: 4.171 MEiN: 100
-------	---	------------------------

Works [H1-H10]: cumulative **IF** = **61.494**, ($IF_{5years} = 64.589$).

Works [H1-H10]: cumulative number of **MEiN** points - **930**.

In the works [**H1**, **H3-H8**, **H10**] I was the corresponding author.

NOTE:

Copies of the aforementioned works, including Supplementary Information (SI) were included in attachment No 5 to the application for conducting the procedure qualifying for associate professorship. Contributions of individual co-authors were described by them in the authors' statements (attachment No 6). In **List of scientific achievements** (attachment No 3) I presented my contribution to the publications in question, both percentage and content. Whereas in attachment No 7 I presented copies of the documents confirming the selected achievements, indicated both in the current **Self-report** (attachment No 2) and in **List of scientific achievements** (attachment No 3).

Citation of literature references in the below description of the scientific achievement is as follows: symbol **H** denotes a selected item from the series of articles constituting the scientific achievement, symbol **A** - another publication which I co-authored, indicated in the **List of scientific achievements** (attachment No 3), **K** - a conference contribution (attachment No 3), **[number]** - another literature source presented in bibliography list.

4.3 Introduction

Precise time measurements play an important role in our daily life. They allow reliable navigation (GPS, Galileo), enable conducting of extremely accurate experiments and constitute the basis of synchronized worldwide exchange of data in ICT networks (e.g. Internet). All of these applications require more and more precise clocks. Although the clocks' precision increases, and the accuracy limit of time and frequency measurements gradually shifts towards 18th significant digit, continuous improvement of the hitherto existing clocks and the search for new solutions seem a necessity.

Since 1967 the second is defined by assumption of a fixed value $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$ Hz of the frequency of transition between the hyperfine structure (*hfs*) sublevels of the unperturbed ground state of the 133 caesium atom, and the caesium atomic clocks are referred to as the *Primary Frequency Standards*. This definition was not altered even after May 20th 2019, when the SI units become formulated in terms of the fundamental constants, which are the most stable quantities in nature. International Bureau of Weights and Measures (BIPM - *Bureau International des Poids et Mesures*) recommends also a number of secondary time and frequency standards, based on the existing optical atomic clocks. However, new systems, competitive with the existing ones, which might play this role in the future, are still searched for.

In Poland the topics related to atomic clocks are investigated by several research groups. Two primary atomic clocks based on the caesium fountain construction, named AOS-CsF1 and AOS-CsF2, are located, respectively, in Laboratory of Time and Frequency in Astrogeodynamical Observatory in Borówiec near Poznań, belonging to Space Research Center (Polish: *Centrum Badań Kosmicznych - CBK*) of Polish Academy of Sciences, and in Poznan Supercomputer and Networking Center (Polish: *Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe - PCS*). On the other hand, in National Laboratory of Atomic, Molecular and Optical Physics (Polish: *Krajowe Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej - KL FAMO*), with headquarters at Nicolaus Copernicus University in Toruń, already two optical atomic clocks on strontium atoms are operative, and the next one is under

construction. In the structure of KL FAMO also Primary Nodal FAMO Laboratories are involved - at Jagiellonian University and University of Warsaw.

When referring to the national institutions dealing with the topic of atomic clocks, also Length and Time Department of Central Office of Measures in Warsaw should be mentioned, which carries out work in the field of time and frequency measurements concerning: atomic time and frequency standards, determination of atomic time scales, precise time and frequency transfer, as well as determination and distribution of official time at the territory of the Republic of Poland.

Articles [H1-H10], included in scientific achievement constituting the basis of the application for conducting the procedure qualifying for associate professorship, were published in the years 2011-2022, and are the result of my work in Poznan University of Technology - my home research unit [H1-H8], as well as in Time and Frequency Department in PTB Braunschweig, Germany, during my stays on scientific internships [H9-H10].

I became interested in the field of **optical atomic clocks** and the **optical nuclear clock** in 2010, shortly after receiving my doctor's degree, during my first scientific internship in PTB in the group of Dr. Sci Ekkeherd Peik, Prof. PTB. The last dozen of years were for me the period of strenuous research activity, focused on one side on the search of new candidates for realization of optical atomic clocks, and on the other side - on participation in the work on the unique optical nuclear clock.

Works [H1-H8], included in the habilitation achievement, realized i Poznan University of Technology, concern investigations allowing to obtain a possibly complete description of the electronic energy structure for the atoms of selected elements from 3d group (chromium and manganese). A correct description of the electronic structure constitutes the basis of efficient search for electronic level systems with properties essential for realization of optical atomic clocks, namely clock transitions, laser cooling schemes and detection transitions. On the other hand, in the case of my research realized during scientific internships in PTB Braunschweig, the main objective was spectroscopic characterization of the isomeric state of the nucleus of the isotope ^{229}Th , constituting a milestone towards realization of the nuclear optical clock based on stored ions (work [H9]). Also auxiliary research was conducted, aimed at testing of the methods concerned with a possible implementation based on crystals doped with ^{229}Th ions (work [H10]).

The common feature of most of the publications in the series are investigations with the use of laser spectroscopic methods, which allow obtaining information on the electronic structure of atoms or ions of selected elements, for their application in construction of ultraprecise optical clocks. Publications [H1-H3] were focused on very precise measurements of selected levels in the chromium atom (with the method of optical-microwave double resonance), while in publications [H5, H6, H8] systematic investigations of the levels of the manganese atoms were performed (with the method of laser induced fluorescence), where the analysis of the electronic structure was additionally supported by semi-empirical calculations. Publication [H7] does not contain new experimental results; on the other hand, it presents the concept of an optical clock on the manganese atom, which was based on earlier results and a semi-empirical analysis of the radiative transitions' parameters.

Works [H4, H9] are concerned with experimental investigations of detection transitions for the clock transitions, in the chromium atom and in the thorium ion ($^{229}\text{Th}^{2+}$), respectively; this topic is equally important in the development of the concept of an optical clock, as investigation of the clock transition itself. Work [H10] is focused on auxiliary research for construction of the nuclear optical clock based on crystals doped with ^{229}Th ions. In that work, on the cases of other selected ions, a fast and inexpensive method of surface doping was tested. For characterization of the research object spectroscopic methods were applied, where the source of the exciting light was not a laser, but high power LEDs.

4.4 Motivation and research objectives

Optical atomic clocks developed in the last two decades are based on selected electronic transitions in neutral atoms and ions of various elements. These transitions occur from the ground

state and are forbidden by quantum selection rules.

One of the most important parameters characterizing the clock transition is a high quality factor Q of the optical transition localized in the spectral region from infrared to vacuum ultraviolet, accessible for high stability lasers. The quality factor is defined as $Q = \nu/\Delta\nu$, where ν is the transition frequency, $\Delta\nu$ - natural transition linewidth, defined as the halfwidth (FWHM - *full width at half maximum*) of the spectral line.

Another fundamental requirement is the possibility of optical cooling of atoms or ions to the temperatures in the range of a few microkelvins. Direct cooling schemes are preferred, although application of the so called *sympathetic cooling* by other atomic or ionic species is also not excluded, provided both kinds of particles can be confined in the same trap potential, and the energy transfer between them is efficient. Other desired features include in particular the robustness of the clock transition frequency against various disturbing factors, e.g. external electric or magnetic fields.

On the other hand, some clock transitions are particularly interesting because of their relatively high sensitivity to the possible changes of fundamental constants (e.g. fine structure constant α), predicted by some theories of fundamental interactions in nature (the so called theories of everything), since it makes it possible to apply such transitions in ultraprecise tests.

A more detailed discussion of various aspects of optical clocks can be found, among the others, in review articles [1–4].

Under some circumstances it is possible to construct compact portable clocks, which facilitates, among other things, precise local measurements of gravitational field. A review of various implementations of portable optical clocks is included in the work [5].

The main goal realized in the publication series [H1-H10] was to examine the energy structure of atoms/ions of selected elements: chromium, manganese and thorium, in terms of their application in optical atomic clocks and the optical nuclear clock.

One of the tasks was to obtain a possibly complete description of the electronic energy structure of selected atoms with an open 3d shell - **chromium and manganese** [H1-H8]. Results of precise experimental measurements, along with the semi-empirical analysis of the complex atom structure should allow to indicate electronic level systems with particular properties, interesting from the point of view of quantum engineering and metrology, in particular the problems related to **optical atomic clocks**. The research covered electronic level systems belonging both to even-parity and odd-parity configurations; parity is understood in the traditional sense, as the symmetry property of the wavefunction in the spatial domain.

The remaining part of the series includes works [H9-H10], concerned with the pioneering project of the **optical nuclear clock**, based on the transition between the ground and the excited (isomeric) state of the **nucleus of the thorium 229 isotope**. These were created in collaboration with the research group leading in this field, led by Prof. E. Peik, the head of the Time and Frequency Department in PTB Braunschweig in Germany - the German National Metrological Institute (**NMI**), famous all over the world.

Candidates for Optical Atomic Clocks (Polish: Optyczne Zegary Atomowe - OZA)

In the series of elements with an open 3d subshell, the so called „transition metals”, I selected chromium and manganese as the subject of research presented in the series of publications. The criteria taken into account included first of all a severe shortage of experimental results concerning the electronic structure in the available literature. This yielded the possibilities of achievement of significant improvement in description of the energy structure of selected elements. Both the elements have relatively high-lying lowest metastable levels, which gives good prognosis for the search of clock transitions in the optical domain. Magnetic moments of the electronic shells in the ground state are for both elements relatively high, which facilitates the confinement in magneto-optical traps (MOTs); for

chromium trapping in MOT is an already well-established procedure [6, 7]. An important circumstance was also easy accessibility of both elements in the form of metallic samples.

Chromium and manganese are neighbors in Mendeleev's table, however they exhibit some important differences. These concern e.g. the natural isotopic abundance. Chromium possesses four stable isotopes, including one odd isotope with the atomic mass 53 (abundance less than 10%), with a non-zero nuclear spin, while manganese has only one stable isotope - an odd isotope ^{55}Mn .

For the atoms of both elements very precise values of splittings for the lowest-lying levels, in particular those belonging to the ground multiplets, were known; these were determined in 60-ties and 70-ties of the previous century. For chromium these results were obtained with the method of atomic beam magnetic resonance (ABMR) by Childs and Goodman [8], as well as Pendlebury and Smith [9]. For the manganese atom Davis *et al.* [10] determined the values of the constants for the hyperfine splitting of the ground level $^6\text{S}_{5/2}$ in an experiment performed with the method of optical pumping with spin exchange between the atoms of manganese and rubidium.

Information on the energy levels and spectral lines for the chromium and manganese atoms are available in public databases, such as [11–14]. Below a brief survey of the state of knowledge for both the selected elements is presented, for the moment of undertaking the research covered in presented series of publications, i.e. in 2010 for chromium and in 2018 for manganese.

The chromium atom Cr I

As already mentioned, in natural composition chromium has four stable isotopes: ^{50}Cr 4,345 %, ^{52}Cr 83,789 %, ^{53}Cr 9.501 %, ^{54}Cr 2,365 %. Only one of the isotopes, ^{53}Cr , exhibits a hyperfine structure resulting from the non-zero nuclear spin quantum number $I = 3/2$. The ground state of the chromium atom is $3d^5(^6\text{S})4s\ a^7\text{S}_3$. Magnetic dipole moment of ^{53}Cr nucleus amounts to $\mu_I = -0,47454(3)\mu_N$ [15], while its electric quadrupole moment $Q = -0,22(1)$ barn [A25]. From the point of view of the possibility of atomic beam creation the important properties are: the melting point $T_t = 1907$ °C [16] and the boiling point $T_w = 2671$ °C [16]. Because of moderate values of the nuclear electromagnetic moments (in particular Q) observed hyperfine structure patterns of spectral lines are rather compact, and because of relatively low values of isotope shifts their components are often hidden under the signal from the even isotope ^{52}Cr , which dominates the spectrum, and thus they require examination by high-resolution spectroscopic methods.

First spectroscopic investigations of the chromium spectral lines were presented by Catalána and Sancho in the 30's of the 20th century [17], they presented more than 700 classified spectral lines. Two decades later Kiess registered around 4400 lines in the spectral range from 1899 to 11610 Å [18]. This work constitutes an enormous database with information about the spectral lines of Cr, most of them were classified. The energies of the electronic levels were determined with an accuracy of 0,05 cm⁻¹.

High-precision measurements of the hyperfine structure of the odd isotope ^{53}Cr were initiated at the beginning of the 60's of the 20th century by Childs and Goodman [8]. They used the method of magnetic resonance on an atomic beam (ABMR) to investigate the ground level $3d^54s\ a^7\text{S}_3$. In 1964 similar measurements of the ground state of Cr I were performed by Pendlebury and Smith [9]. Two years later Bucka *et al.* [19] realized investigations for two ^7P multiplets belonging to the configurations $3d^54p$ and $3d^54s4p$. They used level-crossing spectroscopy on an atomic beam to determine the hyperfine structure A constants (related to the magnetic dipole interaction) for the levels $3d^54p\ z^7\text{P}_{2,3,4}^o$ and $3d^54s4p\ y^7\text{P}_3$. For the above multiplets Becker *et al.* [20] repeated the measurements with the same method, obtaining the values for both the hyperfine structure constants A and B (electric quadrupole interaction constants). Additionally, they obtained results for the level $3d^54s4p\ y^7\text{P}_2$ for the first time.

Ertmer *et al.* [21] used the laser-rf double resonance spectroscopy on an atomic beam (ABMR-LIRF) to investigate the levels $3d^44s^2\ a^5\text{D}_{1,2,3,4}$. Based on precise results of the hyperfine structure they calculated the electric quadrupole moment Q for ^{53}Cr . Additionally, with the method

of laser induced fluorescence on an atomic beam, they obtained the values of A and B constants for the levels $3d^5 4p z^5 P_{2,3,4}^o$. Investigations of spectral lines corresponding to transitions from the ground level $3d^5 4s a^7 S_3$ to the levels $3d^5 4p z^7 P_{2,3,4}^o$ with the method of laser saturation spectroscopy were conducted by Reinhard *et al.* [22]. They determined the sign of the A constant for the ground level and confirmed the signs of A and B constants for the levels $z^7 P_{2,3,4}^o$. In this work they also presented the lifetimes of the states $3d^5 4p z^7 P_{4,3,2}$ and $z^5 P_{3,2,1}$, $3d^4 4s 4p z^5 F_{5,4,3,2}$ and $y^5 P_3$, $3d^5 4d e^7 D_5$ and $3d^5 4s 5s f^7 D_{5,4,3,2,1}$, determined from fluorescence decay after pulsed laser excitation.

In our research group investigations of the hyperfine structure of the chromium atom have been conducted since mid-90-ties of XX century. Experimental studies for the levels of configurations $3d^5 4s$, $3d^5 4p$ and $3d^4 4s 4p$, mainly with the method of laser induced fluorescence on an atomic beam, were performed by Jarosz in his Ph.D. thesis [23]. This work contained hyperfine structure constants A and B for 25 electronic levels, determined on the basis of investigation of 36 spectral lines for the isotope ^{53}Cr . Part of the results, concerning the levels belonging to the multiplets $3d^5 4s a^5 G$ and $3d^5 4s a^5 P$, was published in the work [A25]. On the other hand, for the level $3d^5 4s a^5 S_2$ a more accurate ABMR-LIRF method was used, which enabled determination of the constants A , B and C (magnetic octupole interaction constant).

In the works published until 2010 data concerning the hyperfine structure were extremely scarce, they covered the constants' values for merely 14 even-parity levels and 8 odd-parity levels (apart from 16 levels in the unpublished Ph.D. thesis by Jarosz [23]).

Although it was known that the chromium atom can be used in such quantum applications as cold atom confinement in magneto-optical traps (MOTs) [6, 24], which consequently led to creation of a Bose-Einstein condensate (BEC) for the isotope ^{52}Cr [25–27] and a degenerate Fermi gas for the isotope ^{53}Cr [28], in neither of the hitherto existing works the application of atomic chromium for realization of an optical atomic clock was proposed.

The manganese atom Mn I

Manganese (Mn) is located directly after chromium in the Mendeleev's table. In its natural abundance manganese possesses only one stable isotope ^{55}Mn , exhibiting the hyperfine structure because if the non-zero spin quantum number of the nucleus $I = 5/2$. The ground state of the manganese atom is $3d^5 4s^2 a^6 S_{5/2}$, and the electromagnetic nuclear moments are as follows: magnetic dipole $\mu_I = 3,468716(2)\mu_N$ [29], electric quadrupole $Q = 0,33(1)$ barn [30]. Melting point of manganese amounts to $T_t = 1244$ °C [31], and its boiling point is $T_w = 2095$ °C [32]. The values of the nuclear electromagnetic moments (in particular Q) are not too large, which results in small hyperfine structure splitting of the spectral lines; thus -like in the case of the chromium atom - high-resolution methods are preferred in spectroscopic research.

The first measurements of the hyperfine structure of Mn I levels were performed in 30-ties of the XX century by White & Ritschl (1930) [33,34], with the use of a prism spectrograph and a Fabry-Perot etalon, by Mohammad & Sharma (1934) [35] with the use of a manganese arc in vacuum, and by Fisher & Peck (1939) [36] with a hollow cathode lamp and a Fabry-Perot interferometer. Altogether, the values of the *hfs* A constants for 31 levels (17 odd-parity and 14 even-parity ones) were measured.

Later several authors performed further investigations of Mn I spectra; among them there were: Murakawa (1955) [37] in a hollow cathode discharge and a Fabry-Perot etalon, Woodgate & Martin (1957) [38] with the use of an atomic beam, Rottmann (1958) [39] using a Fabry-Perot interferometer. Walther (1962) [40] investigated odd-parity levels $3d^5 4s 4p z^6 P_{5/2,7/2}^o$ using an atomic-beam and a Fabry-Perot spectrometer. Further Handrich *et al.* [41] measured the hyperfine structure for the next three levels $3d^5 4s 4p z^6 P_{3/2,5/2,7/2}^o$ with the method of level-crossing spectroscopy on an atomic beam.

In 1971 Davis *et al.* [10] measured very precisely the hyperfine splitting of the ground level $a^6 S_{5/2}$ belonging to the even-parity configuration $3d^5 4s^2$; they determined the hyperfine structure constants A , B , C , as well as the upper limits of the higher-orders interaction constants: D and E .

Luc and Gerstenkorn (1972) [42,43] examined, among others, five even-parity levels belonging to the configuration $3d^5 4s 4d \ ^6D_{1/2-9/2}$, and next three levels: $3d^5 4s 4p \ ^6P_{3/2,5/2,7/2}^o$, using a Fabry-Perot interferometer and a Fourier spectrometer. Moreover, in the work [43] an analysis of the hyperfine structure for the levels belonging to the lowest-lying configuration $3d^5 4s 4p$ were presented.

Dembczyński *et al.* (1979) [30] carried out precise measurements of the even-parity levels $3d^6 4s \ ^6D_{1/2-9/2}$ using the ABMR-LIRF method. The *hfs* constants A and B , corrected for the second order *hfs* perturbations, were derived from these measurements. Dembczyński (1980) in his later work [44] presented the results of the analysis of the fine structure for selected elements with open 3d-subshell, including the manganese atom.

In 1981 Johann [45] (unpublished), using the ABMR-LIRF method, determined the *hfs* constants for even-parity levels $3d^6 4s \ ^4D_{7/2-3/2}$, as well as for odd-parity levels $3d^6 4p \ z \ ^4F_{9/2-3/2}^o$ and $3d^6 4p \ z \ ^4D_{7/2-3/2}^o$. His work also contains the corrected constants' values, which additionally accounted for the angular coefficients of the interactions in the first- and second-order perturbation theory for the elements J -off-diagonal in the basis of the states $\Psi(\textit{configuration}, vSLJF)$. Johann *et al.* (1981) [46] performed systematic investigations of the hyperfine structure of high-lying metastable states in 3d atoms and found the evidence for an extraordinary strong far configuration mixing effect on the matrix of off-diagonal elements between configurations. They reported the corrected values for the *hfs* constants A and B for Mn I even-parity levels $3d^5 4s^2 \ ^4G_{5/2-11/2}$.

Kronfeldt *et al.* [47] investigated the levels $4d^5 4s 4p \ z^4P_{5/2,3/2}^o$ with the methods of laser spectroscopy on an atomic beam. Brodzinski *et al.* (1987) [48], using a hollow cathode lamp and a pressure Fabry-Perot interferometer, carried out investigations of three even-parity levels $3d^5 4s 5s \ e^4S_{3/2}$, $f^6S_{5/2}$ and $e^8S_{7/2}$, as well as two odd-parity levels $3d^5 4s 4p \ z^4P_{1/2}^o$ and $z^8P_{9/2}^o$. In 2000 Jarosz [23] (unpublished) performed investigations of the manganese atom with the LIF method on an atomic beam. He studied 8 spectral lines and determined the A and B constants for one even-parity level and five odd-parity levels.

Başar *et al.* (2003) [49], using optogalvanic laser spectroscopy in a hollow cathode lamp, investigated the *hfs* for seven even-parity levels. In 2003 Blackwell-Whitehead [50] (unpublished) and Lefèbre *et al.* [51] investigated even-parity levels with the method of Fourier-transform (FT) spectroscopy in a pure manganese hollow-cathode lamp as the light source; in those works new A constants were determined for the first time for 16 and 8 levels, respectively. In 2005 Blackwell-Whitehead *et al.* [52] reported new experimental hyperfine structure constants for 13 even-parity levels and 49 odd-parity levels in the neutral manganese atom, based on Fourier-transform spectroscopic measurements in a hollow cathode discharge.

In 2013 Klose *et al.* [53] investigated the Mn I levels using collinear laser spectroscopy on an atomic beam, and determined the A and B constants for the even-parity level $3d^5 4s 4d \ ^8D_{11/2}$. In 2015 Liu *et al.* [54], using a Ti:sapphire laser excitation in a hot-cavity ion source, demonstrated three-photon resonance ionization of atomic manganese and determined the ionization potential of Mn I to be $59959.56 \pm 0.01 \text{ cm}^{-1}$.

The structure of the electronic levels of the manganese atom seems to be much better explored than in the case of the chromium atom; however, most of the experimental data concerning the hyperfine structure exhibited relatively low accuracy, since they were obtained on the basis of investigations with the Fourier transform spectroscopy method [50–52] (the basics of this spectroscopic method were discussed e.g. in a review article [55]). Analysis of the literature data showed also some inconsistencies between various sources. At the start of research work on the structure of the manganese atom, out of the known 131 levels belonging to the even-parity configurations (determined energy values and the total electronic shell angular momentum quantum numbers J) only 46 levels possessed determined *hfs* A constants' values, and only for the few the B constants' values were known. In the case of known 189 levels belonging to the odd-parity configurations, in the literature the values of *hfs* A constants for 78 levels could be found, and for some of them - also of the B constants.

In neither of the hitherto published works any proposal of realization of an optical atomic clock with the use of atomic manganese was presented. On the contrary to the chromium atom, for manganese no literature reports on the possible attempts of laser cooling or MOT confinement are available. Eustice *et al.* [56] admittedly proposed a cooling scheme for this element involving a high-lying metastable level, however, it seems very problematic and has not been realized so far.

Candidate for an optical nuclear clock (Polish: Optyczny Zegar Nuklearny - OZN)

Thorium ions Th II - Th V

What if instead of optical transitions in electronic shell of an atom we exploited the change of energy state of atomic nucleus? Along with this question a concept of a **nuclear optical clock** was born. A fundamental issue, concerned with this idea, is to find an element with an atomic nucleus with the first excited state positioned extremely low in the energy scale. In most cases the energies of excited states of atomic nuclei range between kiloelectronvolts (keV) and megaelectronvolts (MeV). It proves, however, that there exists one unique case in the whole known table of nuclides - the isotope ^{229}Th , which possesses an extremely low-lying isomeric state of the nucleus ^{229m}Th - below 10 eV. The history of its indirect discovery in research with the use of nuclear physics spectroscopic techniques, and the search for its energy value, is presented in Table 1.

Table 1: History of the search for the energy of an isomeric state of the isotope ^{229}Th

E_{IS} [eV]	Year	Method	Ref.
< 100	1976	γ^a	[57]
1 (4)	1990	γ^a	[58]
< 5	1990	(d,t) ^b	[59]
3,5 (1,0)	1994	γ^a	[60]
3,4 (1,8)	2003	γ^a	[61]
7,6 (0,5)	2007	γ^a	[62]
7,8 (0,5)	2009	γ^a	[63]
8,28(0,17)	2019	IC ^c e	[64]
8,30(0,92)	2019	γ^a	[65]

^a - gamma radiation spectroscopy,

(d,t)^b - study of reaction $^{230}\text{Th}(d,t)^{229}\text{Th}$, the so called *particles spectroscopy*,

^c - direct measurement of the excess energy of an electron emitted in internal conversion (IC) process (details in the work [66]).

On the basis of research by Helmer *et al.* [60], Ekkehard Peik and Christian Tamm from PTB Braunschweig proposed to exploit an isomeric state ^{229m}Th for applications in time and frequency metrology, i.e. the construction of an optical nuclear clock [67]. They suggested high-resolution laser spectroscopy of the transition between the ground and the isomeric state in the nucleus of thorium 229, with an energy of 3.5 eV expected at the time, in isolated atoms (or ions). Excitation of the nucleus was to be realized by an energy transfer from the electronic shell to the nucleus via hyperfine interaction or the *inverse electron bridge mechanism* [68]). Detection of such a nuclear excitation was to be accomplished through the measurement of the hyperfine structure simultaneously for the atoms at both the ground and the excited state of the atomic nucleus. Each of these states has a different nuclear spin value I - for the ground state of ^{229}Th $I = 5/2$, while for the isomeric state ^{229m}Th $I = 3/2$; this has to manifest itself by a totally different hyperfine structure for the same detection optical transitions in the electronic shell. It was also suggested, that the optical nuclear clock can possibly be realized both on single atoms (or ions) or the particle cloud confined in particle traps,

and in transparent crystals doped with thorium, e.g. ThO₂ or ThF₄, or in thorium-doped glasses. It was indicated, that confined and laser-cooled Th³⁺ ions possess the most favourable electronic levels' scheme, which moreover is very robust against systematic frequency changes, and can constitute the basis of realization of an optical clock with a very high accuracy.

Thus both deactivation and excitation of the isomeric state were investigated. The most known process of deactivation of the energy of an atomic nucleus is *Internal Conversion* (IC). In this process an electron at one of the energy levels with binding energy lower than the excitation energy of a nucleus, as a result of absorption of the energy released during deactivation of the nucleus, leaves its mother atom which was described in the work [69]. If instead the excited electron is not ejected out of the atom but transferred to another energy state of the atom, this process is referred to as *Bound Internal Conversion* (BIC), or subliminal internal conversion [70, 71].

Reversal of those processes can be exploited for excitation of the nucleus. *Nuclear Excitation by Electron Capture* (NEEC) is a reversal of internal conversion process (IC), which means that in this process an ion captures the electron, and the difference between the initial energy (in continuum) and the final energy (in the target energy state) is transferred to the nucleus [72]. If the electron, upon its transition from an excited energy state in the atom to a lower-lying state causes the excitation of the nucleus, this process is referred to as *Nuclear Excitation by Electron Transition* (NEET). This process was first predicted by Morita in 1973 [73], and later observed in 1984 [74]. A detailed description of the NEET effect and its probabilities can be found in the work [75].

First experiments aimed at precise determination of the frequency of the isomeric state with the use of UV spectroscopy of the photons caused by decay of the uranium sources (²³³U and ²³²U) were initiated in 1997 [76, 77], and they did not yield the expected results: luminescence caused by α radiation in nitrogen molecules (N₂) was originally erroneously interpreted as the photons emitted as a result of deactivation of the isomeric state [78, 79].

At the end of the first decade of XXI century the energy of the isomer was indirectly evaluated in the work [62], by the measurement of several spectral lines from higher-lying excited states with the use of a high-resolution γ spectrometer. The energy of the isomeric state was then estimated at $E_{IS} = (7,6 \pm 0,5)$ eV, which was subjected to another evaluation two years later, and a new value was announced $E_{IS} = (7,8 \pm 0,5)$ eV [63]. Then it became clear that an **indirect excitation of the isomeric state can be achieved exclusively in thorium ions**, since the ionization limit of the neutral atom amounts to $E = 6,3$ eV [80] and is lower than the energy of the isomer.

In 2005 Jeet *et al.* [81] undertook an attempt of a direct optical excitation of the isomer; the authors exposed a LiSrAlF₆ crystal doped with the isotope ²²⁹Th to the tunable synchrotron radiation and measured the resultant fluorescence. However, they did not announce any evidence on the nuclear excitation for the analysed range of energies from 7,3 eV to 8,8 eV, and the isomer lifetime $(1-2) \text{ s} < \tau < (2000 - 5600) \text{ s}$.

The first direct observation of isomeric state decay was noted by the group conducting the research on thorium, led by Prof. Peter Thirolf from Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) in Munich in 2016 [66]. In that experiment, as a result of α decay of the ²³³U nucleus, among others also the isotope ²²⁹Th is created, for which 2% are the atomic nuclei in the isomeric state. With the use of a chamber filled with a buffer gas, which slows down the decay products of ²³³U, and a radio-frequency (rf) quadrupole mass separator, a monoisotopic beam of ²²⁹Th was created with the charge states up to 3+, whereupon it was directed to a micro-channel plate (MCP). At MCP the ions were neutralized, and subsequently the isomeric state was deactivated in internal conversion process. The isomer excitation energy is thus transferred to the outermost electron, which is ejected out of the atom. Emitted electrons are detected by MCP and a screen covered with phosphorus, as well as by a CCD camera. Nevertheless, the isomer energy could not be precisely determined due to the limitations of the experimental method - it was only stated, that its value is included in the range from 6.3 eV to 18.3 eV.

Recently the LMU group reported a correction of the isomer energy [64]. With the use of a modified version of their research apparatus, the authors of the work measured the energy excess of

the electron emitted in internal conversion. For this purpose the ions were neutralized in flight, while they were passed through the graphene foil, and subsequently the energies of the emitted electrons were measured with the use of a magnetic bottle spectrometer, in order to establish the excitation energy of the isomer at 8.8(0,17) eV. This result was recently confirmed by a Japanese research team [65] on the basis of measurements with the method of γ spectroscopy of the $5/2+[631]$ level decay (Figure 1.2 in the work [65]); the isomer energy determined in this work amounted to $E_{IS} = 8,30(0,92)$ eV.

Properties of thorium isotope 229 can be divided into two categories:

1. unfavorable

- (a) radioactive isotope: $\tau_{1/2} = 7990$ years, obtained artificially, commercially unavailable
- (b) ionization limit for the neutral atom and the ions at the subsequent ionization stages: 6.1 eV, 11.5 eV, 18.3 eV ...; only ions can be used in the optical nuclear clock
- (c) small collisional cross-section: estimated value $\sigma \approx 10^{-21}$ cm² (for comparison: for Cs atom - $\sigma \approx 10^{-9}$ cm²)
- (d) problem with construction of a precise oscillator for excitation of the isomeric transition: in the case of the energy of 7.8 eV a VUV laser with the wavelength of ca. 165 nm necessary, for 8,28 eV - ca. 150 nm [64]

2. favorable

- (a) decay half-life of the isomeric state $T_{1/2} \approx 3300$ s [82], thus a narrow clock transition expected (mHz – μ Hz) [62]
- (b) very good screening by the electronic shell
- (c) possibility of deposition of ²²⁹Th in/on a crystal [83–85]
- (d) high sensitivity of the isomeric transition to the variations of the fine structure constant $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$ and dimensionless strong interaction parameter m_q/Λ_{QCD} [86]
- (e) lower sensitivity of the isomeric transitions to external perturbation, such as frequency changes caused by electromagnetic fields, compared to the transition in atomic clocks (e.g. for ²²⁹Th³⁺ ion [87])

Thorium is a chemical element belonging to the group of actinides. In its natural isotopic abundance it occurs only as the isotope ²³²Th with a zero nuclear spin ($I = 0$). There are also trace amounts of the isotopes 227, 228, 230, 231 and 234. On the other hand, the isotopes 229 and 233 are obtained synthetically. ²²⁹Th exhibits hyperfine structure, related to the spin quantum number of the nucleus $I = 5/2$; as already mentioned, in the isomeric state of the nucleus the nuclear spin amounts to $I = 3/2$. The ground state of the thorium ion Th⁺ is 6d7s² ²D_{3/2}. Magnetic dipole moment for the nucleus of the isotope ²²⁹Th amounts to $\mu_I = 0,360(7)\mu_N$ [88,89], while the electric quadrupole moment was determined in two independent experiments, where the following values were obtained: $Q = 3,15(3)$ barn [90] and $Q = 3,11(6)$ barn [88,89]. From the point of view of the possibility of confinement of the ions in an electromagnetic trap, its melting point $T_t = 1750$ °C [16] and boiling point $T_w = 4788$ °C [16] are important.

In the past optical measurements of isotope shifts for thorium ions and hyperfine structure investigations for a few electronic levels of ²²⁹Th⁺ ion were performed in a hollow cathode discharge lamp, with the method of Fourier spectroscopy or with the use of precision diffraction grating spectrographs. These methods were used, among others, in the measurements of isotope shifts between the isotopes ²³⁰Th and ²³²Th [91–93], as well as ²²⁹Th i ²³²Th [94]; hyperfine structure for the isotope ²²⁹Th for several optical transitions was also investigated [95,96].

Hyperfine structure of some other spectral lines for ²²⁹Th⁺ ion was studied by laser spectroscopic methods in the works [97–99]; in particular the focus was on the transition from the ground state

belonging to the even-parity configuration $6d7s^2 \ ^2D$ with $J = 3/2$ to an odd-parity excited state $6d7s(3D)7p \ ^o$ (term not determined) at $24873,984 \text{ cm}^{-1}$ with $J = 5/2$, and its isotope shift relative to the isotope $^{232}\text{Th}^+$ was also determined [99]. For evaluation of the hyperfine structure a saturation absorption technique was applied.

In the case of doubly-ionized thorium atoms $^{229}\text{Th}^{2+}$ no information on the hyperfine structure is available in the literature, while works devoted to investigations of the hyperfine structure of $^{229}\text{Th}^{3+}$ can be found. This ionization stage for the isotope ^{229}Th possesses a single valence electron; although the electronic level density in the vicinity of 8 eV is low, which may be unfavourable from the point of view of the possibility of indirect excitation of the isomeric state, on the other hand very efficient laser cooling and application of sensitive high-resolution spectroscopy are possible, which was proved in the works by Campbell *et al.* [87,100].

In the presented extensive literature overview concerning the concept of realization of **optical nuclear clock** no single mention on a successful excitation of the isomeric state in the nucleus of the ^{229}Th isotope appeared. Neither of the works contained also any experimental results concerning the properties of the isomeric state, and in particular nobody performed characterization of the isomeric state with laser spectroscopy methods. However, the first direct observation of decay of the isomeric state, noted by the LMU group in 2016 [66], created a high motivation for a common work of a number of research groups, in order to reach a milestone towards realization of the **optical nuclear clock**, i.e. for undertaking an attempt of laser characterization of the isomeric state ^{229m}Th .

4.5 Research methodology and experimental setups

In research group currently related to Division of Quantum Engineering and Metrology for many years research is conducted which combines experimental works with semi-empirical description of the energy structure of multi-electron atoms. Its assumptions can be very briefly presented as follows: The semi-empirical method consists in the expression of certain properties of the levels, e.g. their energies, in a parametric form; the parameters are radial integrals, adequate for particular interactions in an atom, and the respective expansion coefficients are calculated strictly, in accordance to quantum rules of angular momentum addition. With the use of the least-squares method, the parameters' values can be determined by their fit to the experimental data. Basics of parametrization of the fine structure were described in the work [101], while the details of the analysis of the hyperfine structure were presented in the work [102]. Both methods were further significantly extended in the frame of the series of works constituting the habilitation achievement of Dr.Sci. Magdalena Elantkowska (2017) [101,103–113].

Performing of a possibly complete semi-empirical analysis of the energy structure of electronic levels in the atoms of selected elements, which would take into account all the important interactions in the atom, is conditioned by the availability of a possibly rich in resources and reliable experimental database, concerning the levels' energies and their hyperfine splittings. Experimental research carried out within the presented series of works was thus focused on delivery of possibly the largest amount of the highest quality data. First of all these concerned the hyperfine structure of the electronic levels of both parities with previously known energies for the chromium and manganese atoms, positioned mostly above 20000 cm^{-1} , for which the earlier literature data were far from sufficient.

In all spectroscopic investigations performed in the laboratory of the research group at Poznan University of Technology (works [H1-H8]) the following methods were applied: fluorescence excited by a laser beam (LIF) or optical-microwave double resonance (ABMR-LIRF) in the applied experimental setups, where the sources of free atoms are an atomic beam and a hollow cathode discharge lamp. Each method and each of the experimental setups has its advantages and disadvantages.

In the hollow cathode discharge lamp it is possible to investigate free neutral atoms and ions under similar conditions. In the discharge electronic levels with very differential excitation degrees are efficiently excited, also high-lying in the energy scale (in the case if studies performed in the work [H8] even up to ca. 43500 cm^{-1}), which renders the possibility of examining of the upper levels in the transitions excited in neutral atoms, positioned next to the ionization limit. The variation

of the LIF method applied, with selection of the wavelengths of the observed radiation, provides additional information on the upper levels of the investigated transitions. A precision diffraction grating monochromator allows an unequivocal identification of the emission transitions, following the absorption of resonance laser light, the so called fluorescence channels. Since the fluorescence transitions are determined by selection rules, their knowledge greatly facilitates identification of the excited upper levels, and thus also the exciting transitions themselves.

The experimental setup for studies in the hollow cathode discharge lamp was already described in numerous publications, among others in the works included in the habilitation achievement of Dr. Sci. Bogusław Furmann [105, 114–122]. I myself also constructed two experimental systems based on hollow cathode discharge lamps: one of them for the needs of the laboratory of my division at Poznan University of Technology [A28], and the second one for investigations performed during my first visit to PTB Braunschweig [A21].

Atomic beam gives an opportunity of significant reduction of Doppler effect for the observed LIF signals, with respect to the hollow cathode discharge lamp system. However, its application is limited to investigations of the optical transitions from metastable levels of the same parity as the ground state in neutral atoms of the element under study. Population of metastable levels in all the studies performed with the use of this experimental setup within the presented publication series (works [H1-H4] for the chromium atom, works [H5,H6] for the manganese atom) was realized with the use of an auxiliary discharge electrode. It yielded the possibility of examination of the lower levels involved in the optical transitions at the energies up to ca. 28600 cm⁻¹ for the chromium atom and up to ca. 37400 cm⁻¹ for the manganese atom. Moreover, the atomic beam system yields the possibility of realization of the measurement with ABMR-LIRF method, which enabled very precise investigations of the hyperfine structure of selected metastable levels with energies reaching up to ca. 22000 cm⁻¹ in the chromium atom. In the possessed atomic beam system we do not have the possibility of precise wavelength selection for the observed fluorescence signals, it can only be made roughly with the use of optical filters.

Comparison of the same hyperfine structure of the spectral line of the manganese atom investigated in the work [H5], obtained in both experimental setups with the LIF method, was presented in Figure 1. Almost 40 times reduction of the Doppler effect for the hyperfine structure components observed on an atomic beam with respect to the hollow cathode discharge signal is clearly visible.

It should be mentioned that most of the *hfs* constants for the manganese atom, which are present in the literature, were determined with the use of Fourier spectroscopy method in a hollow cathode discharge lamp, for which the Doppler broadening of the signal was by 25-50% larger than in the plot presented (black curve). Such a limited resolution caused significant inconsistencies in the results obtained, which should be unequivocally resolved.

The atomic beam experimental system was presented in detail in publications, which I co-author [A25, A26, H1, H2].

Each of the experimental setups mentioned includes also the module of generation and control of tunable laser radiation, which constitutes the common part of all the research setups in the laboratory. Research methodology did not differ from the standards hitherto applied in our laboratory. In experimental investigations described in the works [H1-H6, H8] as the sources of exciting laser radiation altogether 5 single-mode tunable ring dye lasers were used, covering most of the visible region, available in our laboratory. In Table 2 the applied dyes are presented, along with the laser light generation ranges.

Evaluation of the observed spectra was performed with the use of program *Fitter*, developed in research group of Prof. G. Guthöhrlein at the University of Hamburg, and commonly used in many laboratories dealing with atomic spectroscopy.

Semi-empirical and *ab initio* calculations within the presented series of works were performed by co-authors.

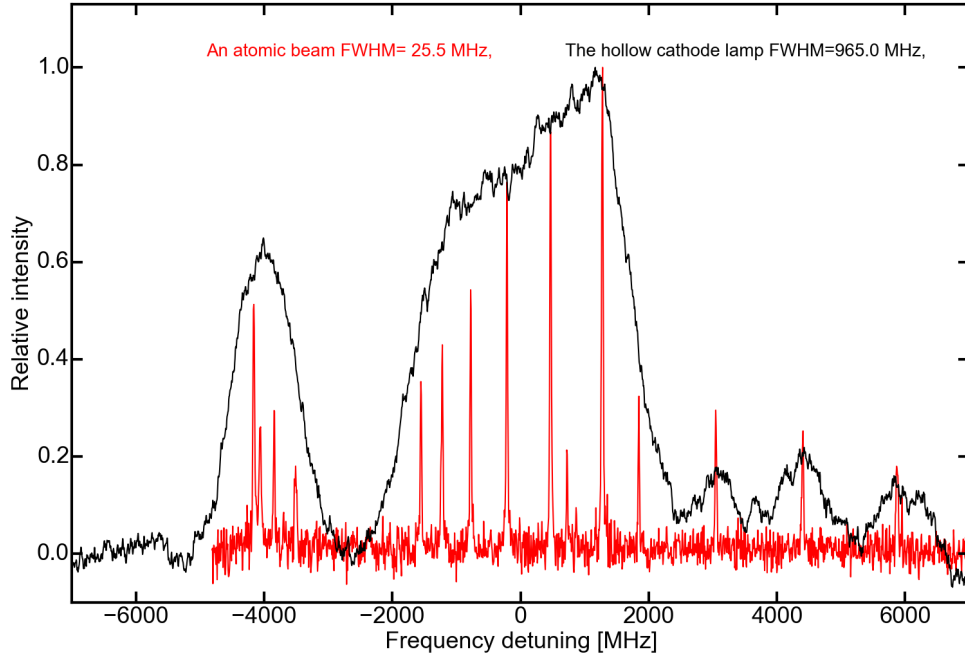


Figure 1: Example of the hyperfine splitting of the spectral line in the manganese atom with air wavelength $\lambda = 6490, 617 \text{ \AA}$ (investigated line 41 in Table 1 in the work [H5]: 34938.70 cm^{-1} , $J = 9/2 \rightarrow 50341.30 \text{ cm}^{-1}$, $J = 9/2$), recorded on an atomic beam (red) and in a hollow cathode discharge lamp (black). Abbreviation FWHM denotes the half-width of the spectral line; the red curve is almost 40 times narrower than the black one

Table 2: List of laser dyes used in research in the works [H1-H8], along with approximate wavelength (λ) and wavenumber (k) ranges of the generated light

Barwnik	λ [nm]		k [cm^{-1}]	
	min	max	min	max
DCM	615	680	14700	16260
Rhodamine 6G	565	615	16260	17700
Mixture*	535	570	17540	18690
Coumarin 498	481	540	18520	20790
Stilbene 3**	408	480	20830	24510

* - binary dye mixture with energy transfer [123]: Coumarin 498 (donor) + Pyrromethene 556 (acceptor), optically pumped at ($\lambda = 445 \text{ nm}$) by a multimode diode laser,

** - available until 2014.

Somewhat other methods and measurement systems were used in the works [H9-H0], which emerged within the frame of **my research activity in foreign scientific institutions**, mainly in **PTB Braunschweig**, and additionally, within collaboration in the international project nuClock in **LMU Munich in Germany**. Measurement setups, the linear Paul traps, where the research within the work [H9] was carried out, are described in detail in Ph.D. theses from PTB Braunschweig [124–127], as well as from LMU Munich [128, 129]. The main difference consists in the loading procedure and the ion species in the cloud. In the case of PTB trap introduction of the ions to the trap takes place by laser ablation from a dedicated filament, which allows obtaining only ions of the isotopes ^{232}Th and

^{229}Th in the ground state of the nucleus. On the other hand, the ion trap in LMU is loaded by decay products of the isotope ^{233}U , thus apart from ^{229}Th ions (out of which ca. 2% are in the isomeric state of the nucleus [61]) there is a series of other ^{233}U decay products (*Extended Data Table 2* in the work [H9]).

In the work [H9] for examination of the ions one- and two-step laser excitation was used. One-step excitation is the standard LIF method, which in the case of a stored cloud of ions yields the spectra with significant Doppler broadening: ca. 800 MHz for PTB trap and ca. 640 MHz for LMU trap. In order to obtain at least 10 times reduction of the width of observed optical signal and separate the hyperfine structure components of the ions in the ground and the isomeric state of the nucleus, a Doppler-free two-step excitation spectroscopy was applied. Thanks to that the half-width of the optical resonances observed amounted to 70 MHz (PTB trap) and 40 MHz (LMU trap).

Evaluation of the spectra observed was performed with dedicated programs, created in Python and Mathematica environments, which I also co-authored.

The measurement setup, where the research within the work [H10] was carried out, was constructed by myself in PTB Braunschweig; it allowed recording of luminescence spectra of the investigated ions, as well as the measurement of luminescence lifetimes. The source of exciting light were, however, not the lasers, but high-power LED diodes. In this case I also developed a program in Python environment, dedicated for analysis and evaluation of the obtained emission spectra and luminescence decay signals.

4.6 Discussion of the works H1 - H10, constituting the scientific achievement

H1: *Experimental study of radio frequency power broadening in ABMR-LIRF method*

In this work results of investigations were presented, concerning the dependence of saturation broadening on the microwave field power in ABMR-LIRF method, allowing a high precision of the hyperfine structure measurements for free atoms on an atomic beam.

After the first successful attempt of application of ABMR-LIRF method in our laboratory in 2002 [130], where the hyperfine structure of the level $3d^5 4s a^5 S_2$ in the chromium atom was determined, some construction modifications were introduced, aiming at reduction of magnetic field in the experimental setup, and their influence on the observed double resonance signal was studied [A25] [131]. However, still optimization of the signal, among others in terms of saturation broadening from the microwave field, was missing. Aiming at performing of possibly the most precise measurements of the hyperfine structure of the remaining metastable levels in the chromium atom, positioned higher in the energy scale, an attempt of examination of this mechanism was undertaken within this work.

Thus a series of measurements of the optical-microwave double resonance signal vs. the microwave field power (from 0.03 mW to 100 mW) was performed. The hyperfine structure interval $F = 5/2 \rightarrow F = 7/2$ of the even-parity configuration level $3d^5 4s a^5 S_2$ was examined (a microwave resonance) with the use of detection spectral line with air wavelength $\lambda = 449,685$ nm, corresponding to the transition to the upper odd-parity configuration level $3d^4(^5D)4s4p(^3P^o) y^5 P_2^o$ (optical resonance).

In the work in Figure 2 the structure of the spectral line used for the optical resonance was presented; the component applied for observation of the microwave resonance was marked (optical pumping process was accomplished at this component). In Figure 3 examples of the observed optical-microwave double resonance signals were depicted for 4 selected power values of the microwave field. Figures 4 and 5 present the plots of the half-widths' values (FWHM) and the signal-to-noise ratios (SNR) of the observed signals vs. increasing microwave power. From the analysis of those plots, as well as the plot of $\sqrt{\text{SNR}}/(\text{FWHM})$ vs. microwave field power (Figure 6) it was possible to establish the optimum value of the microwave power for ABMR-LIRF measurement method. This value amounts to

0.5 mW; it provides a high SNR value of 18, at a small value of the signal half-width, which amounts to 130 kHz.

The value of the microwave power, determined in the work discussed, was applied in subsequent works [H2, H3], where the structure of higher-lying metastable electronic levels of the chromium atom was investigated.

H2: Precise measurements of the hyperfine structure of the levels belonging to the terms $3d^54s\ ^5G$ and 5P in Cr(I)

In this work ABMR-LIRF investigations of the hyperfine structure of the even-parity electronic levels belonging to the terms 5G i 5P from the configuration $3d^54s$ of the chromium atom were presented. It constituted a severe experimental challenge, since earlier nobody examined metastable levels with energies above 8300 cm^{-1} in the chromium atom with ABMR-LIRF method, and only few works presented investigations of levels above 10000 cm^{-1} in the cases of other elements. Energies of the levels investigated in the work [H2] exceeded 20000 cm^{-1} ($20517\text{ cm}^{-1} - 21857\text{ cm}^{-1}$).

Hyperfine structure measurements for 7 optical transitions in the spectral region available at that time, generated by the exciting laser operated on the dye Stilbene 3 (Table 1), were performed. As a result, the intervals between the hyperfine structure sublevels for 7 levels were determined (the precision of determination of the intervals reached from 500 Hz to 4300 Hz - Table 2). Values of hyperfine structure constants A and B were determined with precision of 10 Hz in the best case, and the values of constant C (representing the magnetic octupole interaction) were estimated for all six levels from the configuration studied $3d^54s$, where such interaction can theoretically be present (Table 3).

In comparison to the experimental results obtained earlier with LIF method in the work [A25], it was possible to determine the constants A and B with precision by 3 orders of magnitude better, as well as to estimate experimentally the values of constants C for the first time. This seemingly insignificant progress in extension of the experimental database concerning the hyperfine structure, nevertheless - because of the accuracy scale for the obtained results - constituted a significant motivation for continuation of research on the structure of the chromium atom in the work [H3].

H3: Investigation of the hyperfine structure of electronic levels in chromium atom

This work constitutes a continuation of two earlier works [H1] and [H2], devoted to selected levels belonging to even-parity configurations ($3d^44s^2$ and $3d^54s$), as well as odd-parity configurations ($3d^44s4p$ and $3d^54p$) in the chromium atom. Investigations performed within the currently discussed work can be divided into two parts.

In the first part even-parity metastable levels, high-lying in the energy scale ($23512\text{ cm}^{-1} - 28637\text{ cm}^{-1}$), were studied with LIF method. These levels were populated by electrons from an auxiliary discharge electrode. Energies of the odd-parity upper levels in the investigated optical transitions, for which the hyperfine structure was also evaluated, exceeded 50000 cm^{-1} (the highest value 50264 cm^{-1} - Table 1). As a result of those studies it was possible to determine the hyperfine structure constants A and B for the first time for 3 even-parity (lower) levels and 4 odd-parity (upper) levels (Table 2).

In the second part a remeasurement for the metastable levels belonging to the term $3d^44s^2\ a^5D$ (Table 3), which were previously studied by Ertmer *et al.* [21] with ABMR-LIRF method, was undertaken. These investigations were initiated in the hope for achieving higher precision of determination of the intervals, due to optimization of the method described in the work [H1], which should lead to a more precise determination of the hyperfine structure constants. Indeed, the values of the hyperfine structure intervals for the levels under study were determined at least one order of magnitude more precise (Table 4) than in the work by Ertmer *et al.* [21]. More precise values of the constants A and B , consistent with the values presented in the work [21], were obtained, and for the first time the values of magnetic octupole interaction constants C were estimated (Table 5).

H4: Proposed clock transition in atomic chromium and the possible detection schemes

This work exploits the results of the previous works [H1-H3] oraz [A25]. In theoretical part radiative parameters (oscillator strengths and lifetimes) were determined with the use of semi-empirical methods for metastable levels in Cr I, low-lying in the energy scale. For this purpose eigenvectors' amplitudes, determined in the earlier works. On the basis of results of the performed calculations I proposed a possible clock transition in the neutral chromium atom.

The most obvious choice of a clock transition in the atomic chromium is the one from the ground state a^7S_3 to the lowest-lying metastable level a^5S_2 at 7593.148 cm^{-1} (belonging to the same configuration as the ground state - $3d^54s$). The transition wavelength amounts to 1316.61669 nm , and seems very favourable from the practical point of view. It is included in the second telecommunication window, thus the technology of semiconductor materials, used in tunable diode lasers in this spectral region, is excellently developed.

According to our semi-empirical fit, this is an almost purely magnetic dipole (M1) transition, whose probability was calculated to be $2.09 \cdot 10^{-7}$ (Table 1); the minor admixture of an electric quadrupole (E2) component (probability of $2.30 \cdot 10^{-10}$) can be neglected. This yields the spectral width of the transition of ca. 30 nHz and a very high expected value of the quality factor $Q = 6.9 \cdot 10^{21}$. The Kurucz database [132] predicts a factor of 5 higher transition probability ($1.191 \cdot 10^{-6}$), which results in the spectral width of ca. 190 nHz and the quality factor of ca. $1.2 \cdot 10^{21}$; these are still excellent parameters for a clock transition. In the work [H4] simulated hyperfine splitting of the proposed clock transition for the odd chromium isotope ^{53}Cr are presented (Figure 1), with marked components suitable for realization of an optical atomic clock on this isotope. Two options were proposed: $F' = 3/2 \rightarrow F = 1/2$ or $F' = 9/2 \rightarrow F = 7/2$, where F' denotes the hyperfine structure sublevel of the ground state a^7S_3 , and F denotes the hyperfine structure sublevel of the metastable level a^5S_2 .

In the work also an analysis was performed for forbidden transitions from the ground level to the levels belonging to the multiplet a^5D , for which $J = 0 - 4$, and the energies in the range $7750-8300 \text{ cm}^{-1}$, in terms of the possibility of their application as possible clock transitions. Parameters of these forbidden transitions proved, however, worse than in the aforementioned case. The basis for their determination were the calculated transition probabilities for the levels considered, listed in Table 1, as well as predicted lifetimes, included in Table 2.

Possible coupling between the laser cooling schemes, routinely applied for chromium, and the proposed clock transition were thoroughly discussed. At least two cooling schemes for the chromium atom in a magneto-optical trap are known from the available literature [6, 7].

Bell *et al.* [6] proposed a simple cooling scheme including repumping of the population of metastable states (only $a^5D_{3,4}$) through the upper level of the cooling transition, with the use of weak intercombination transitions. The achieved MOT population was of the order of 10^6 atoms in spite of low repumping efficiency. On the other hand, Bismut *et al.* [7] proposed a more advanced scheme. In their approach, instead of repumping at intercombination lines, another strategy was adopted, namely a more stronger repumping transition to the higher-lying level z^7P_3 is applied. However, this results in population not only of the metastable levels $a^5D_{2,3,4}$ (out of which the two latter ones are also populated upon excitation of the cooling transition alone), but also of the level a^5S_2 , i.e. the upper level of the clock transition proposed by us. This scheme is thus less favourable for realization of an optical clock on the chromium atom, but still possible for application. Both cooling schemes for the chromium atoms, with the clock transition marked, are presented in Figure 2.

In Section 4 proposals of detection schemes for the suggested clock transition in the chromium atom are presented; they were clearly visualized in Figure 3. 8 detection transitions were proposed, divided into two groups by their properties. Main parameters of the optical transitions applied in the proposed detection schemes were collected in Table 3. All detection transitions were experimentally investigated with LIF method on an atomic beam (one of them was already recorded in the work [A25]), and their spectra were depicted in Figures 4 and 5. The hyperfine structure components,

which might be applied for detection of the clock transition, are marked, dependent on the selection of the component used for realization of the clock transition for ^{53}Cr itself. Comparison of the values of the hyperfine structure constants, obtained on the basis of investigations of 8 proposed detection transitions, with the literature data is presented in Table 4. On the other hand, in Table 5 precise positions of individual chromium isotopes in the spectra of the aforementioned transitions, as well as the isotope shift values, were reported for the first time.

The work [H4] is a culmination of long-term experimental and semi-empirical research concerning the structure of the chromium atom. Proposed clock transition in near infrared region ($\lambda = 1316.61669$ nm for the chromium atom, along with detection schemes examined in detail, constitutes the achievement of one of the research objectives, which I set before realization of the series of works included in the habilitation achievement. The clock transition indicated in the work [H4] was compared with other clock transitions in the existing atomic clocks based on neutral atoms (in Table 5, in section 4.7 of the present attachment). As a result of the research conducted the chromium atom can be considered a good candidate for an optical atomic clock; in my opinion in further perspective it is worthwhile to undertake the work on its implementation.

H5: *Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. I. Even-parity level system*

This is the first of the series of works [H5-H8] concerning the manganese atom. It presents the results of both experimental and theoretical investigations of the fine and the hyperfine structure for the system of levels belonging to the even-parity configurations of this element. Experimental investigations were carried out at the same atomic beam apparatus as in the case of the works [H1-H4], concerning atomic chromium. However, because of higher energies of the even-parity metastable levels examined, only LIF method was applied.

47 spectral lines were recorded, for which the levels from the even-parity configurations were the lower levels; altogether 26 levels with energies in the range $23500\text{-}37500$ cm^{-1} were investigated; the relevant information was included in Table 1. For three of them the *hfs* *A* and *B* constants were determined for the first time, for next eight ones the values of constants *B* were evaluated for the first time.

For the lowest-lying levels 1-8 (Table 2), with energies up to ca. 25500 cm^{-1} , precise values of the *hfs* constants *A* and *B* were obtained before by other authors with ABMR-LIRF or LIF method on an atomic beam, but most of the results were included only in Ph.D. theses [45, 133]. Part of the results concerning these levels were later published in scientific articles [46, 52], however, for the sake of completeness of experimental results, which in work constituted the basis for semi-empirical calculations, I considered appropriate to confirm all the values of *A* and *B* constants, independent of the unpublished ABMR-LIRF results. Therefore the levels 1-8 were additionally marked in Table 2 with a superscript „*R*” (*remeasured*).

Another seven levels of the even-parity configurations, whose *hfs* constants were already known from the literature [49, 52], were also remeasured in the work [H5] with the aim of improving the precision, since our experimental method (LIF on an atomic beam) is certainly more precise than the methods used in the earlier works cited (optogalvanic spectroscopy or Fourier spectroscopy, respectively, in a hollow cathode discharge lamp). These levels were marked with superscript "R2" ("remeasured 2"), and indeed, a considerably higher accuracy of the *hfs* constants was achieved with respect to the earlier literature data, which was presented in Table 2.

Examples of the recorded spectra were depicted in Figures 1 and 2. In Figure 1a the structure of the spectral line involving the lower level 37420.24 cm^{-1} , $J = 11/2$, for which the *hfs* constants were determined for the first time, was presented, while Figure 2 depicts the structure of the line with wavenumber 18424.05 cm^{-1} , involving the lower level ($E = 23719.52$ cm^{-1} , $J = 3/2$), for which certain discrepancies for the *hfs* constants values were noted in the literature. On the other hand, Figure 2 presents two peculiar cases, where the differences between the experimental spectra observed by us

and the simulated hyperfine structure, calculated on the basis of the available literature values of the constants A and B were particularly drastic. In the text of the work both cases were discussed in detail: one of them concerned the lower level with the energy $E = 34250.52 \text{ cm}^{-1}$, $J = 11/2$ (item 18 in Table 2), and the second one - the level with energy $E = 35165.05 \text{ cm}^{-1}$, $J = 3/2$ (item 25 in Table 2).

The experimental results obtained within the work [H5] were included in the semi-empirical analysis of the fine- and then the hyperfine structure in the even-parity level system. In most cases the agreement between the experimental A and B values and the ones predicted in the fit is quite good. We would like to stress that a close coupling between the experimental work and the semi-empirical calculations is very beneficial for the investigation of structure and spectra of complex atoms. During diagonalization of the energy matrix describing the fine-structure interactions in the manganese atom 131 even-parity levels with experimentally determined energy values were used. The space of 36 even-parity configurations was considered. The values of radial fine structure parameters, along with their statistical errors, as well as the respective values obtained with the Cowan's code [134–136], were presented in Tables 3 and 4. Subsequently, based on the eigenvectors amplitudes obtained from the analysis of the fine structure, parametrization of the hyperfine structure was performed. Hyperfine structure radial parameters, along with their uncertainties, were given in Table 5. Cumulative results of calculations for the fine- and the hyperfine structure were presented in Table 6. There the results of experimental and calculated energy values (cm^{-1}), as well as the *hfs* A and B (MHz) constants, were compared; for the latter mean deviations at the level of 8.6 MHz and 2.2 MHz were achieved, respectively. In most cases consistency between the experimental A and B values and the values predicted in the semi-empirical analysis is good. I wish to emphasize, that close connection between the experimental works and the semi-empirical calculations brings invaluable benefits in research on the structure and spectra of complex atoms.

When analyzing the results obtained in the work [H5], a conclusion can be drawn, that the manganese atom seems interesting not only from the point of view of the atomic structure theory; in the even-parity configuration system possible clock transitions can be considered, e.g. transition E2 from the ground state $3d^5 4s^2$ a ${}^6S_{5/2}$ to the metastable level $3d^6 4s$ a ${}^6D_{9/2}$. The problem to be solved is the search for a possible laser cooling scheme for Mn I atoms, which, however, seems to be a nontrivial issue. A detailed analysis of the electronic levels' structure of the manganese atom, belonging to both even-parity and odd-parity configurations, may greatly facilitate finding a possible solution. This constituted the motivation for further efforts in this direction.

H6: *Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. II. Odd-parity level system*

This work constitutes a continuation of investigations of the structure of the manganese atom undertaken in the work [H5]. In the present work the focus was on experimental and semi-empirical studies of the levels belonging to the odd-parity configurations. The hyperfine structure of 15 spectral lines of the manganese atom were investigated with laser induced fluorescence (LIF) on an atomic beam. Results of this research, supplemented by those obtained in the work [H5], allowed to achieve the hyperfine structure constants A and B for altogether 38 odd-parity levels. Detailed information on the spectral lines investigated was included in Table 1.

For 11 levels the A and B values were reported for the first time, for subsequent 10 levels new B constants were determined, and for the remaining 17 levels the accuracy of the hitherto available literature data was improved; in this way the available database, concerning the hyperfine structure constants for the manganese atom, was significantly extended. All the obtained results were collected in Table 2. In Figure 1 two selected examples of the recorded hyperfine splittings were depicted, representing the spectral lines, for which the values of A and B constants of the respective upper odd-parity levels were evaluated for the first time.

In the work [H6] also a semi-empirical analysis of the fine and the hyperfine structure for the odd-parity level system in atomic manganese was performed. However, it was limited to 189

levels with experimentally determined energy values in the range from 18402 cm^{-1} (the lowest-lying odd-parity level) to ca. $59000\text{-}61000 \text{ cm}^{-1}$. 35 odd-parity configurations were taken into account. Values of radial fine structure parameters along with their statistical errors, as well as the respective values obtained with the Cowan's code [134–136], were presented in Tables 3 and 4. Radial hyperfine structure parameters along with their errors were given in Table 5. Cumulative results of calculations for the fine and the hyperfine structure were presented in Table 6. There the experimental results and the calculated values were compared for the electronic levels' energies (cm^{-1}), as well as the *hfs* A and B constants (MHz). Generally good consistency between the experimental values and those predicted on the basis of semi-empirical analysis was found.

Analysis of the structure of the odd-parity levels for the manganese atom constitutes an important step towards the proposal of laser cooling of this element - the upper levels of possible cooling transitions should be searched among the levels with this parity.

H7: Estimation of radiative parameters for atomic manganese from the point of view of possible clock transitions and laser cooling schemes

In this article the values of radiative parameters for atomic manganese were determined with own semi-empirical method developed by co-authors of this work. The eigenvectors' amplitudes necessary for performing the parametrization for electric dipole transitions were determined in the earlier published works [H5, H6]. Procedures applied for parametrization of the oscillators' strengths of the spectral lines, as well as for determination of the electronic levels' lifetimes for the manganese atom, were described, and the results of the calculations were presented and discussed. Radial integrals for various types of transitions, obtained in the fit procedure, were presented in Table 1. Comparison between experimental and calculated oscillators' strengths, sorted by J values and energies of the upper levels, were listed in Table 2, while in Table 3 experimental and calculated lifetimes for the electronic levels of the manganese atom were compared. In both respects the calculated values are in most cases consistent with experimental data. Results were also compared with available theoretical *ab initio* calculations.

On the basis of obtained theoretical results three possible clock transitions were proposed, as well as laser cooling schemes for the manganese atom. All the transitions involved in the proposed schemes were graphically depicted in Figures 4 and 5, and listed in Table 4. Among the proposed clock transitions two E2 (electric quadrupole) transitions are present, which are forbidden not only by the condition $\Delta L = \pm 1$ and the equal parities, but also do not obey the rule $\Delta J = \pm 1$. These are transitions from the ground state $3d^5 4s^2 \text{ a } ^6\text{S}_{5/2}$ to the levels belonging to the term $3d^6(^5\text{D})4s \text{ a } ^6\text{D}$, i.e. the level 17052.29 cm^{-1} , $J = 9/2$ (clock transition 1 - $\lambda = 586.269 \text{ nm}$), and 17637.15 cm^{-1} , $J = 1/2$ (clock transition 2 - $\lambda = 566.828 \text{ nm}$). The third clock transition terminates at one of the levels belonging to the term $3d^6(^5\text{D})4s \text{ a } ^4\text{D}$, namely the level 23818.87 cm^{-1} , $J = 1/2$ (clock transition 3 - $\lambda = 419.717 \text{ nm}$). For each of the postulated clock transitions simulation of the hyperfine structure of the line was performed, whose results were presented in Figures 1-3, respectively, along with the hyperfine structure diagrams for the lower and the upper levels, and indication of the hyperfine structure components.

A detailed discussion concerning each of the three clock transitions was carried out, and it was found that transition 3 seems to be the optimum one. Compared to the other two transitions, the upper level in the clock transition 3 has the estimated lifetime longer by over two orders of magnitude, according to [132] equal to ca. 720 s, which yields the natural transition linewidth of ca. 0.2 mHz and the expected resonance quality factor ca. $3 \cdot 10^{18}$. This value is admittedly considerably lower than for the extreme case of E3 (electric octupole) clock transition in the ytterbium ion, for which Q amounts to $6.4 \cdot 10^{23}$ [137], but on the other hand much higher than e.g. for the calcium atom: $Q = 5.5 \cdot 10^{11}$ [138]. It should perhaps be mentioned, that for most of the currently considered transitions on optical clocks in various kind of atoms and ions the quality factors fluctuate from 10^{14} to 10^{16} [4]. Clock transitions in the manganese atom, indicated in the work [H7], were compiled along with other clock transitions in the existing optical atomic clocks based on neutral atoms (Table 5, section 4.7 of this attachment).

In the work [H7] the aspect of possible laser cooling schemes for the manganese atom was also thoroughly discussed. The possible technical issues related to the proposed cooling schemes were referred to (including the necessity of application of two repumping transitions in IR region); a comparison of the proposed schemes mutually, as well as with an earlier literature proposal [56], was also presented in detail. The cooling scheme related to clock transition 1 was presented in Figure 1, while those related with clock transitions 2 and 3 - in Figure 5. In figures 6 and 7 simulated schemes of the hyperfine structure were presented for spectral lines, which may serve as first-stage cooling transitions for clock transitions 2 and 3, as well as 1, respectively; in each case the *hfs* component selected as cooling transition was marked. After in-depth analysis a conclusion was drawn, that among the laser cooling transitions from the ground state the one concerning clock transitions 2 and 3 is certainly more favourable than that related to clock transition 1. On the other hand, the cooling scheme proposed in the work [56], from a high-lying metastable level, can be considered excessively complicated and not very prospective.

H8: *Hyperfine structure investigations of Mn I*

This work constitutes a supplement of the research on the atomic structure of the manganese atom from the experimental side, and it contains a reanalysis of semi-empirical calculations for even-parity configurations, which could be performed owing to the enriched database of experimental results. In the work [H8] 30 spectral lines were investigated with the LIF method in a hollow cathode discharge lamp. Although in earlier works [H5-H6] numerous important results were achieved, the use of the atomic beam limited the possibility of study of the optical transitions to the cases of even-parity metastable levels with energies not exceeding 37500 cm^{-1} as the lower levels. Hollow cathode discharge lamp allows, as a result of collisions of the manganese atoms with the buffer gas, a significant population of the levels of both parities with energies at least up to 43500 cm^{-1} . The levels with such high energies can thus be used as the lower levels, from which further electronic levels with energies above 62000 cm^{-1} can be populated by optical excitation (Table 1).

As a result, the hyperfine structure constants A and B for altogether 12 levels from odd-parity configurations and 16 levels from even-parity configurations were determined. For 3 odd-parity and 15 even-parity levels the A and B values were reported for the first time, for another 8 levels new constants B were evaluated, and for the remaining 8 levels the accuracy of the hitherto available literature data was improved. In some cases, where discrepancies between the earlier experimental results, obtained by other authors, and the theoretical predictions were observed, the new data allowed an unequivocal verification, which of the available literature data are correct. Experimental results concerning the hyperfine structure of the investigated levels were presented in Tables 2 and 3, divided according to the configuration parities. Examples of the recorded spectra were depicted in Figure 1.

A reanalysis with the use of the own semi-empirical method mentioned in the works [H5] and [H6]), was also performed, taking into account 36 even-parity configurations. In the extended analysis of the hyperfine structure 67 A constants (50 in [H5]) and 46 B constants (32 in [H5]) were included. Mean deviations of 15 MHz and 2.6 MHz were achieved for the *hfs* constants A and B , respectively. Radial hyperfine structure parameters along with their mean square errors were given in Table 4. A comparison of the experimental and the calculated energy values in cm^{-1} , as well as the *hfs* A and B constants, was presented in Table 5. The hitherto good agreement between the experimental and the semi-empirically predicted values of the *hfs* constants, achieved in the earlier version of the calculations published in the work [H5], was significantly improved, and in particular the previous inconsistencies for several levels were removed.

H9: *Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th*

As already mentioned, in 2016 the group of Prof. Peter Thirolf from LMU Munich [66] for the first time directly observed the decay of the isomeric state ^{229m}Th . It was possible to do it with

the use of a unique apparatus, the so called „ion catcher“, and detection of the electron ejected out of the deactivated isomeric state of the thorium atom as a result of internal conversion process. It created a great motivation for common research of the group of Prof. Ekkehard Peik from PTB, whose member I was at that time, and the group of Prof. Peter Thirolf from LMU, with the support of the team of Prof. Christoph Düllmann from Johannes Gutenberg-Universität in Mainz (JGU), dealing with super-heavy elements. In the years 2016 and 2017 a series of investigations was performed, whose results were that important for the development of **physics** that they were published in the prestigious periodical **Nature** (the work [H9]).

Within that work first measurements of the magnetic dipole and electric quadrupole moments of the nucleus in the isomeric state were performed, as well as the mean square charge radius of the isomer nucleus was determined. The values of the quantities mentioned were obtained on the basis of the hyperfine structure investigations of doubly ionized thorium 229 with laser spectroscopic methods.

Investigations of confined Th^{2+} ions were realized in two research centers: in PTB Braunschweig and in LMU Munich. For this purpose two independent linear ion traps were applied. The trap located in PTB Braunschweig, described in the works [124–127] and [A21], was loaded by ablation from the solid sample containing isotopes ^{232}Th and ^{229}Th exclusively in the ground state of the nucleus. Three-photon ionization of the stored Th^+ ions was applied for production of Th^{2+} ions. Into the second trap, located in LMU Munich [66, 128, 129], entered recoil ions ^{229}Th from α decay of the isotope ^{233}U , where the isomeric state ^{229m}Th is populated in ca. 2% through a decay branch [61] (section *Methods* in the work [H9] - detailed information on generation of $^{229m}\text{Th}^{2+}$ ion beam). Thus the confined ion cloud constitutes a mixture of the ions in the ground and the isomeric nuclear state. The daughter products in the decay chain of ^{233}U are also stored in the trap, but they do not disturb the spectroscopic measurement (details in section *Methods* in the work [H9]).

Combination of the measurements in both traps allowed to clearly identify the hyperfine structure components of ^{229m}Th , which occur only in investigations of the stored recoil ions (LMU trap), as well as to measure isotope and isomer shifts. Figure 1 in the work [H9] schematically presents both traps and the diagram of the electronic levels applied for laser spectroscopy of ^{229}Th ions. On the other hand, Figure *Extended Data Fig. 2* presents the scheme of the optical setup used in research.

Initially LIF method with one-step excitation at the wavelength 459.1 nm was used in an attempt of detection of the ions in isomeric state of the nucleus. However, no positive result was achieved, although the signal to noise ratio in the spectrum recorded amounted to over 500, and the range of ± 15 GHz from the center of gravity of the structure for the ions in the ground state of the nucleus was scanned. The whole hyperfine structure of the isomer was hidden in the hyperfine structure of the thorium ions in the ground state. Limited resolutions of the LIF method, related to the large Doppler broadening (as already mentioned in section 4.5 - ca. 800 MHz for PTB trap and ca. 640 MHz for LMU trap) made it impossible to separate the hyperfine structure components of the ions in both states of the atomic nucleus. Transition at 459.1 nm was eventually applied for detection of the amount of $^{229}\text{Th}^{2+}$ ions in the trap, by normalization of the fluorescence signals for various hyperfine structure components in two-step excitation.

The main research method, which brought the desired effect, was two-step excitation with the use of the transitions 484.3 nm and 1164.3 nm (Figure 1 in the work [H9]). Halfwidths of the observed *hfs* components of two-step resonances respectively of 70 MHz for PTB trap and 40 MHz for LMU trap were achieved. Selection of the electronic levels' scheme was as follows: transition for the electronic state 63_2 to the state 29300_0 via the intermediate state 20711_1 (designations of the states include energies in cm^{-1} and J quantum numbers as subscripts). Population of the state 63_2 is in equilibrium with the ground state (0_4), in the ratio of ca. 0.4, through collisions with the buffer gas. Analysis of the isomeric hyperfine structure is simple, since two-step excitation with the change of J number: $2 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ yields a small number of *hfs* components. There are nine hyperfine resonances for the nuclear ground state ($I = 5/2$) and eight hyperfine resonances [57] for the isomer with the nuclear spin $I = 3/2$ are expected (Figure *Extended Data Fig. 1* in the work [H9]). The upper electronic state of two-step excitation has

$J = 0$, thus it does not exhibit hyperfine structure. The next advantage of such excitation scheme was the fact, that fluorescence transition from the upper level 29300_0 to the level 7921_1 at the wavelength $\lambda = 467.7$ nm allows to eliminate stray laser light with an interference filter of transmission in the range 445 ± 23 nm. In Figure 2 in the work [H9] an example of high-resolution spectrum, obtained with the method of two-step excitation, is presented in comparison with the spectrum obtained with LIF method, for one-step excitation.

Figures 3 and 4 from the work [H9] depict, respectively: comparison of two-step excitation spectra for PTB and LMU ion traps, as well as the signal of *hfs* resonance for $^{229}\text{Th}^{2+}$ ions in the ground and the isomeric state of the nucleus. Altogether 29 spectra were recorded for each of the propagation geometries of the laser beams 484.3 nm and 1164.3 nm: co-propagating and counter-propagating. This experiment was realized for two traps independently. All the spectra are available in supplementary materials for the article (*Supplementary Figs. 1–29 and 31–59*). Analysis of the recorded spectra allowed an unequivocal identification of the hyperfine structure components for the ions in the ground state of the nucleus (9 components) and in the isomeric state; in the latter case it was possible to record 7 out of 8 *hfs* components (it was calculated that the amplitude of the eighth resonance for the isomeric state was too small in relation to the signal-to-noise ratio achieved in the experiment).

The values of the hyperfine structure components for the electronic levels under study were presented in Table 1 of the article [H9]. In the present discussion of that work I present these results in Table 3, along with the values theoretically calculated with *ab-initio* methods in the work [A14], which I also co-author. For the sake of a better visualization of the results obtained, in Figure 2 I illustrated significant difference between the hyperfine structure spectra obtained for the spectral lines 484.3 nm and 1164.3 nm for $^{229}\text{Th}^{2+}$ ions in the ground and the isomeric state of the nucleus.

On the basis of the analysis of the obtained spectra it was possible to evaluate the properties of the isomer, which I presented collectively in Table 4, along with the respective quantities for the ground state of the thorium nucleus, based on the literature.

Summarizing the results of the work [H9] it can be indicated, that the low-energy transition between the nuclear ground state and the isomeric state in the isotope ^{229}Th creates a bridge between atomic and nuclear physics, and opens new perspectives for the fundamental physics, as well as the technological progress in time and frequency metrology. Within the work nuclear moments for ^{229m}Th and isomer shifts for two spectral lines in $^{229m}\text{Th}^{2+}$ ions were measured. Determination of these fundamental nuclear properties allows to predict the hyperfine structure of the isomer ^{229m}Th for an arbitrary electronic transition, if the frequencies are known for the isotope ^{229}Th and another isotope with the known nuclear radius [97]. This makes possible to apply sensitive electronic-nuclear double resonance detection [67] for the isomer, first in the search for laser excitation of the nucleus, and then in implementation of a nuclear clock on stored ions. Thus the results obtained in the work [H9] constitute an import step towards the construction of the **optical nuclear clock**.

Table 3: Hyperfine structure constants A and B for $^{229}\text{Th}^{2+}$ i $^{229m}\text{Th}^{2+}$: experimental [H9] and calculated theoretically *ab initio* [A14]

Energy [cm ⁻¹]	Spectroscopic description	$^{229}\text{Th}^{2+}$ (nuclear ground state)		$^{229m}\text{Th}^{2+}$ (nuclear isomeric state)		Ref.
		A [MHz]	B [MHz]	A^m [MHz]	B^m [MHz]	
0	5f6d $^3\text{H}_4$	81(4)	3008(260)			[A14]
63	6d ² $^3\text{F}_2$	151(8)	73(27)	-263(29)	53(65)	[H9]
		162(8)	71(7)	-263	-	[A14]
20711	5f6d $^1\text{P}_1$	88(4)	897(14)	-151(22)	498(15)	[H9]
		90(4)	689(110)	-151	515	[A14]

Table 4: Properties of the ground state ($^{229}\text{Th}^{2+}$) and the isomeric state ($^{229m}\text{Th}^{2+}$) of the thorium nucleus

Parameter	^{229}Th	^{229m}Th
μ^a	$\mu = 0.360(7)\mu_N$ [89]	$\mu^m = \mu A^m I^m / AI = -0.37(6)\mu_N$
Q_s^b	$Q_s = 3.15(3)$ eb [90]	
	$Q_s = 3.11(6)$ eb [89]	
Q_0^c	$\bar{Q}_s = 3.14(3)$ eb	$Q_s^m = \bar{Q}_s B^m / B = 1.74(6)$ eb
	$Q_0 = 8.8(1)$ eb	$Q_0^m = 8.7(3)$ eb
A^m / A		-1.73(25)
B^m / B^d		0.555(19)
μ^m / μ		-1.04(15)
Q_0^m / Q_0		0.99(4)
	isotope shift($\text{IS}^{232,229}$)	isomer shift(IS^m)
line 484.3 nm	8.2(2) GHz	0.29(3) GHz
line 1164.3 nm	6.2(3) GHz	0.21(5) GHz
$\text{IS}^m / \text{IS}^{232,229}$		0.035(4)
	$\langle r_{229}^2 \rangle \approx (5.76 \text{ fm})^2$	
	$\langle r_{232}^2 \rangle - \langle r_{229}^2 \rangle = 0.33(5) \text{ fm}^2$	$\langle r_{229m}^2 \rangle - \langle r_{229}^2 \rangle = 0.012(2) \text{ fm}^2$

^a - magnetic dipole moment, ^b - spectroscopic electric quadrupole moment, ^c intrinsic electric quadrupole moment, ^d - only for the level 20711₁, $\langle r^2 \rangle$ - mean square charge radius

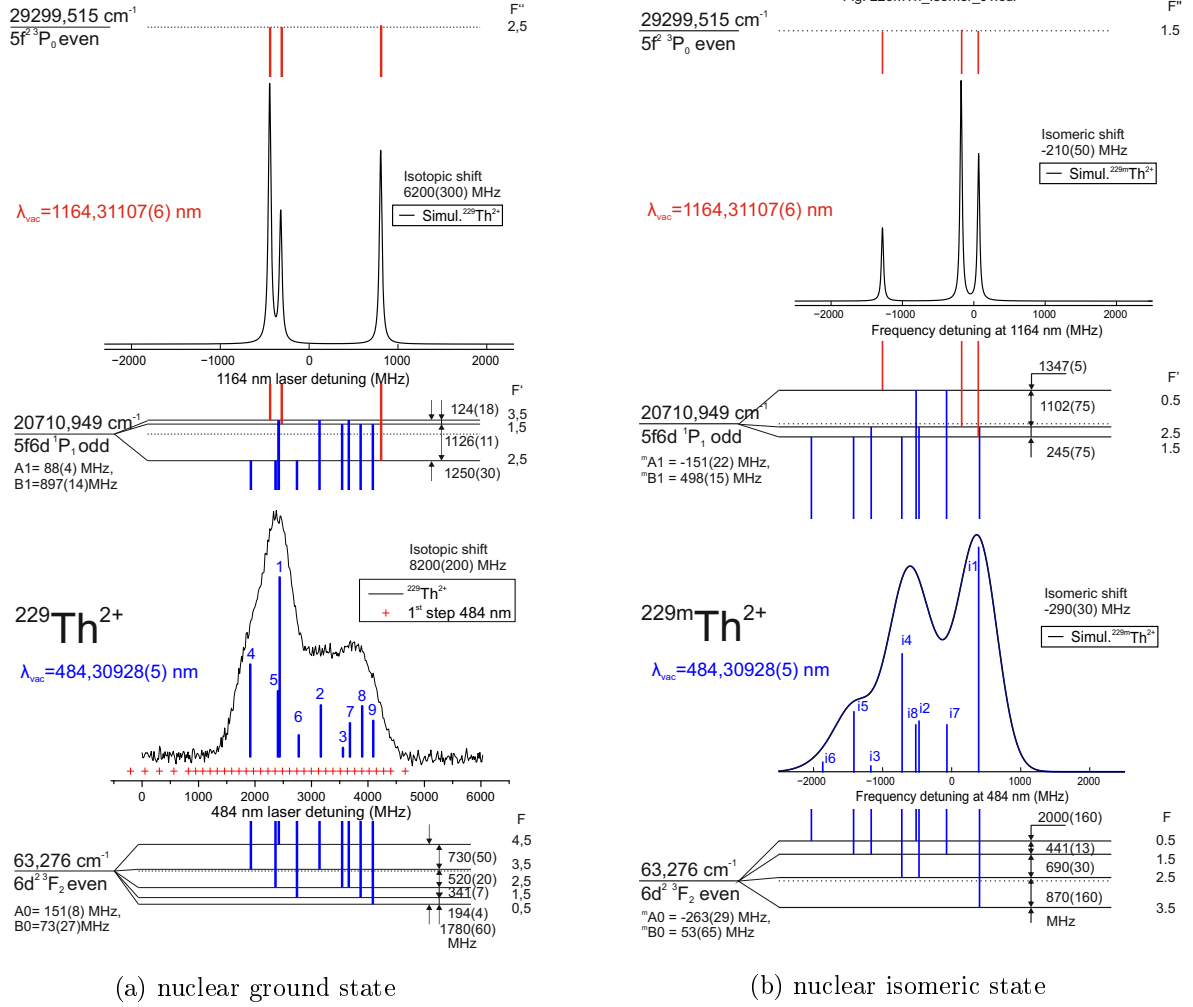


Figure 2: Hyperfine structure spectra for $^{229}\text{Th}^{2+}$ ions in the ground and the isomeric state of the nucleus. Only the spectrum for the line 484.3 nm for the nuclear ground state (bottom left part of the Figure) is the experimentally recorded structure [H9], the remaining spectra were simulated on the basis of the experimental data obtained in the work [H9]

H10: Fluorescence properties of ions adsorbed from aqueous solutions on fused silica and CaF_2 - test cases of Eu^{3+} and Tb^{3+}

This work covers auxiliary research from the point of view of implementation **optical nuclear clock** on the crystals doped with thorium ions. Within the work a concept was tested, different from the common bulk doping, applied e.g. in the works [84, 139], namely the surface doping with an easy and simple adsorption technique from aqueous solutions of nitric acid on the surfaces of transparent amorphous or crystalline substrates [85].

In the work [H10] in tests of the aforementioned method lanthanide ions were exploited, which exhibit strong luminescence in the visible region (Eu^{3+} , Tb^{3+}). The samples can be prepared of minimum amounts of fluorescence substance, in the range of nanograms to picograms, which is required e.g. in experiments with rare isotopes.

This method was already earlier applied in the experiment with ^{229}Th ions [140]. For the experiment with solid samples containing ^{229}Th , and suitable for synchrotron radiation excitation, Yamaguchi *et al.* [85] developed an adsorption technique, which allows deposition of $^{229}\text{Th}^{4+}$ ions in a monolayer cover of the CaF_2 surface from aqueous solution. The doped surface with a areal density of $1 \times 10^{13} \text{ mm}^{-2}$ was exposed to an intense undulator radiation in the wavelength range 130-320 nm, which is currently known to include the nuclear transition at the wavelength 149,7 nm [64, 141].

However, no fluorescence signal related to that excitation was observed [85]. There are various reasons of the failure possible: the nuclear excitation rate could be below the detectability limit, nonradiative decay could prevent from fluorescence observation, and the sample preparation could may not have taken into account the processes altering the absorption spectrum of the exciting radiation or other processes influencing fluorescence quenching.

In order to test the process of samples preparation, following the technique developed by Yamaguchi et al. [85], the lanthanide ions Eu^{3+} and Tb^{3+} , well known for their strong luminescence [142–144], were selected as the test cases. Fluorescence properties of the ions in aqueous solutions and surface-doped solid samples in terms of their applications in lasers, displays or sensors. Assessment of preparation of the samples was expected to answer the question, whether they can be applied in the optical nuclear clock.

In the work the luminescence spectra for both elements were recorded and the selected optical properties were investigated. Additionally, the radiative lifetime (τ_R) of the selected electronic level, as well as the luminescence quantum efficiency (Φ_{Ln}) of europium ions, based on the information from observed luminescence lifetimes (τ_{obs}) and the corrected emission spectra, were calculated following the method described in [145]. The results obtained were thoroughly discussed.

In section 2.1 sample preparation was presented in detail. Aqueous solutions with concentrations 1 mg/ml (high concentration solution - HC) and 0.01 mg/ml (low concentration solution - LC) of the lanthanides Ln^{3+} ions, in pH range from 3.0 to 5.0, were prepared, in order to achieve maximum adsorption of the ions, as well as in order to keep the ions in a homogenous environment, i.e. only in nitric acid solutions, without addition of any base. In this way layers on the surfaces of transparent substrates (fused silica and CaF_2) were obtained, with areal densities of ca. $30 \times 10^{14} \text{ mm}^{-2}$ (HC samples) and ca. $2 \times 10^{14} \text{ mm}^{-2}$ (LC samples). In section 2.2 the following experimental setups, constructed within that work, were described: the one concerning investigation of the ions' emission spectra, excited with CW light of high-power LEDs, as well as another one, for the measurement of luminescence lifetimes, exploiting LED diodes in the pulsed regime (100 - 1000 ns). The diodes were adequately selected according to the generation wavelength for excitation of selected transitions in Eu^{3+} (395 nm) and Tb^{3+} (375 nm) ions.

Section 3 of the work is devoted to presentation of the results and their discussion. At the beginning an excerpt of the electronic structure of Eu^{3+} ion (Figure 1) and Tb^{3+} ion (Figure 2) was schematically presented. Then *corrected* emission spectra, obtained for the samples investigated, containing Eu^{3+} (Figure 3) and Tb^{3+} (Figure 5) ions were presented. *Corrected* emission spectra should represent the relative spectral photon flux versus wavelength. In the experiment described this is obtained by recording the spectra using a photomultiplier (PMT) in the photon counting mode, and correcting them for the wavelength dependence of the PMT sensitivity. For comparison also the *corrected* spectrum of a CaF_2 sample, bulk-doped with Eu^{3+} ions (Figure 4), applied as a scintillation material (Hellma Materials GmbH), was presented.

All the obtained values of the optical parameters, such as: observed luminescence position (λ_{obs}), probability ratios for fluorescence channels (so called *branching ratios* β_R), asymmetry coefficients R (only for Eu^{3+} - the ratio of fluorescence intensities for the transitions ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ and ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$), as well as observed luminescence decay times (τ_{obs}) for the high concentration samples of Eu^{3+} and Tb^{3+} for the precursor solution pH=4.0, were listed in Table 1. Relative uncertainties of β_R are given in *Supplementary Materials* in Tables 1 - 4.

In Table 2 relative luminescence intensities for europium and terbium ions in HC samples in dependence on pH of precursor solution are presented. On the other hand, in Table 3 the observed luminescence decay time τ_{obs} , radiative lifetime τ_R , and luminescence quantum yield Φ_{Ln} for the state ${}^5\text{D}_0$ in Eu^{3+} samples are given.

In section 3.2 results of the measurements of luminescence decay lifetimes of the samples under study are described. Luminescence decay curves were presented in Figures 6 and 7 for Eu^{3+} and Tb^{3+} ions in the investigated samples, respectively. Section 3.3 was devoted to calculation of the radiative

lifetime, as well as emission quantum yield for Eu^{3+} ions. The results obtained in those two sections were listed in Tables 1 and 3. In Figure 8 a graphical comparison is presented between radiative lifetimes and luminescence decay times in dependence on I_{tot}/I_{MD} (i.e. the ratio of the total emission spectrum intensity to the intensity of magnetic dipole transition) for Eu^{3+} ions placed in various environments: from aqueous solutions, through the surfaces of various substrates to inclusions in molecules or bulk dopants in various matrices. In order to account for the influence of the environment on Eu^{3+} ions, the lifetime values were multiplied by third power of the refractive index, which results from equation for τ_R calculation (equation 4 in the work [H10]).

Summarizing the presented results of research, it can be stated that the solid state samples, surface-doped by deposition of Ln^{3+} ions by adsorption process from aqueous solutions, were prepared successfully. The ions on the substrate surface are triply ionized and emit luminescence light with efficiency ca. 5 times higher than in aqueous solutions. We were able to prove that the simple adsorption technique, developed in the work by Yamaguchi *et al.* [85], concerning preparation of ^{229}Th ions on CaF_2 surface, can be generally useful for examination of optical properties of small amounts of ions on the solid substrates surfaces. Our observations for the test cases of lanthanide ions Eu^{3+} and Tb^{3+} motivate us for further optimization of this technique for the thorium ions, where so far no fluorescence was observed. It was also stated that LED diodes can be exploited as efficient exciting light sources in investigations of fluorescence of dopant ions, as an economical alternative for the lamps or laser diodes in conventional spectrometers, or in time-resolution spectroscopy.

4.7 Summary

In section 4.6 results obtained in the works included in the presented publication series, concerning investigations of the electronic structure of selected elements in terms of applications in optical clocks (atomic and nuclear), were discussed. The series of 10 thematically related works [H1-H10] constitutes my scientific achievement, covering the topics within the discipline physics. Results of my works indicate specific level systems in the chromium and manganese atoms for applications in quantum metrology topics in the field of time and frequency measurements. My essential scientific activity outside my home university enables me to participate actively for over 12 years in a very ambitious fundamental research project concerning realization of the optical nuclear clock in the group of Dr. Sci. Ekkehard Peik, Prof. PTB, in PTB Braunschweig (Germany). Below I present the summary of my scientific achievements in three main research lines.

1. *Investigations of the chromium atom*

- In the work [H1] an optimum power of the microwave field in the method of optical-microwave double resonance on an atomic beam was determined, allowing minimalization of the effect of signal broadening, and simultaneously the possibly highest precision of determination of the hyperfine structure interval under study.
- In the works [H2-H4] new data concerning the hyperfine structure and the isotope shifts in the chromium atom was obtained. Altogether 27 spectral lines were investigated with laser spectroscopy methods. Hyperfine structure constants A and B for 3 even-parity levels and 4 odd-parity levels were determined for the first time. 10 metastable even-parity levels were investigated with the optimized method of optical-microwave double resonance on an atomic beam; for 3 of them it was possible to improve the precision of determination of the hyperfine structure intervals by an order of magnitude, and for 7 of them results of the hyperfine structure constants A and B were determined for the first time with precision of the hundreds of Hz. For 8 of the investigated levels the signs and values of the hyperfine structure constant C were estimated for the first time. Although the results obtained constitute relatively minor extension

of the hitherto existing experimental database in the literal sense, a significant progress was achieved in terms of quality (precision).

- Experimental investigations performed, supplemented with literature results, constituted the basis for realization of a semi-empirical analysis of the hyperfine structure for the even-parity configuration system with the work [H4].
- On the basis of the collected experimental and theoretical data, in the work [H4] a clock transition in the chromium atom was proposed:
 - clock transition:
 $3d^5 4s a^7 S_3 0.000 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 3d^5 4s a^5 S_2 7593.148 \text{ cm}^{-1}$.
 - * wavelength $\lambda = 1316.61669 \text{ nm}$,
 - * quality factor $Q = 6.9 \cdot 10^{21}$ (Table 5, section 4.7),
 - * spectral linewidth FWHM $\approx 30 \text{ nHz}$;
- Detection schemes for the clock transition were proposed: 8 detection transitions, which were experimentally investigated, and their structure was presented, with precise positions of each of the isotopes, as well as calculated isotope shifts.

2. Investigations of the manganese atom

- In the works [H5, H6] and [H8] altogether 92 spectral lines belonging to the manganese atom were investigated. Hyperfine structure constants A and B were determined for the first time for even-parity levels and 14 odd-parity levels, for 27 levels constants B were evaluated for the first time, and for the subsequent 25 levels the precision of one of the constants was improved. Altogether the hyperfine structure of 92 electronic levels was examined, which constitutes enrichment of the hitherto existing databases by ca. 68%.
- Realized experimental investigations, supplemented with literature results, constituted the basis for performing of a semi-empirical analysis of the hyperfine structure of the even-parity [H5, H8] and odd-parity [H6] configuration systems.
- On the basis of the obtained data (experimental and theoretical) three clock transitions in the manganese atom were proposed [H7]:
 - clock transition 1:
 $3d^5 4s^2 a^6 S_{5/2} 0.00 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 3d^6(^5D)4s a^6 D_{9/2} 17052.29 \text{ cm}^{-1}$.
 - * wavelength $\lambda = 586.269 \text{ nm}$,
 - * quality factor $Q = 8 \cdot 10^{15}$ (Table 5, section 4.7),
 - * spectral linewidth FWHM $\approx 100 \text{ mHz}$.
 - clock transition 2:
 $3d^5 4s^2 a^6 S_{5/2} 0.00 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 3d^6(^5D)4s a^6 D_{1/2} 17637.15 \text{ cm}^{-1}$.
 - * wavelength $\lambda = 566.828 \text{ nm}$,
 - * quality factor $Q = 7 \cdot 10^{15}$ (Table 5, section 4.7),
 - * spectral linewidth FWHM $\approx 120 \text{ mHz}$.
 - clock transition 3:
 $3d^5 4s^2 a^6 S_{5/2} 0.00 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 3d^6(^5D)4s a^4 D_{1/2} 17637.15 \text{ cm}^{-1}$.
 - * wavelength $\lambda = 419.717 \text{ nm}$,
 - * quality factor $Q = 5 \cdot 10^{20}$ (Table 5, section 4.7),
 - * spectral linewidth FWHM $\approx 0.0015 \text{ mHz}$.
- Laser cooling schemes in the manganese atoms for each of the clock transitions were proposed.

3. Investigations of the thorium ion and auxiliary research

- In the work [H9] the isomeric state of the nucleus of the thorium isotope 229 was characterized. Investigations of $^{229}\text{Th}^{2+}$ ions were performed with laser spectroscopy methods in two different institutions (PTB and LMU in Germany, in two different experimental setups for ion trapping. Values of the following parameters of the isomeric state ^{229m}Th were obtained (Table 4):
 - hyperfine structure constants A and B for two electronic levels (Table 3)
 - magnetic dipole moment: $\mu^m = -0.37(6)\mu_N$
 - spectroscopic electric quadrupole moment: $Q_s^m = 1.74(6)$ eb
 - intrinsic electric quadrupole moment: $Q_0^m = 8.7(3)$ eb
 - difference of the nuclear mean square charge radius:
 $\langle r_{229m}^2 \rangle - \langle r_{229}^2 \rangle = 0.012(2)$ fm²
 - isomer shift (IS^m) for the spectral lines 484.3 nm and 1164.3 nm
 - ratio of the isomer shift (IS^m) to the isotope shift ($\text{IS}^{232,229}$):
 $\text{IS}^m / \text{IS}^{232,229} = 0.035(4)$
- Results of the work [H9] constitute an important step towards creation of the **optical nuclear clock**. They allow application of the sensitive detection of electronic-nuclear double resonance [67] of the isomer in the search for excitation of the nucleus with a laser. In consequence this can lead to implementation of the nuclear clock on stored ions. They also indicate, that the low-energy transition between the nuclear ground state and the isomeric state in ^{229}Th is situated in an extraordinarily interesting region at the border between the atomic and nuclear physics. It opens new perspectives for fundamental physics, as well as for technological progress in time and frequency metrology.
- The work [H10] constitutes the description of auxiliary research in the context of realization of the **optical nuclear clock** exploiting crystals (e.g. CaF_2) surface-doped with ^{229}Th ions.
- In the work [H10] the following results were obtained:
 - preparation of the samples was positively tested, both for application in the **optical nuclear clock**, and in other applications (displays, sensors, etc.),
 - favourable fluorescence properties of the ions deposited on the surfaces in comparison with aqueous solutions were stated,
 - ions do not change their ionization stage after being deposited on the substrates' surfaces,
 - LEDs can be successfully applied for the measurements of fluorescence and time-resolved spectroscopy of the samples containing nano- or picograms of the substance under study.

Table 5: List of the parameters of selected microwave and optical clocks on neutral atoms

Clock type	Frequency [Hz]	λ [nm]	Q	Allan deviation	
				(for $\tau = 1s$)	(RSU* or FFU**)
^1H	1 420 405 751.76 ^a	rf	1.4×10^{12}	10^{-12} [146]	10^{-14} * [147]
^{87}Rb	6 834 682 610.90 ^b	rf	6.8×10^9	10^{-12}	3.4×10^{-16} * [148]
$^{133}\text{Cs}^T$	9 192 631 770 [149]	rf	9.2×10^9	10^{-12} [149]	10^{-14} * [149]
$^{133}\text{Cs}^F$	9 192 631 770 [149]	rf	9.2×10^9	10^{-14} [149]	10^{-16} * [149]
^{53}Cr	227 699 063 584 930 [H4]	1316.6	1×10^{21} [H4]		
^{169}Tm	262 954 938 269 213(30) [150]	1140.1	2×10^{14}	1.1×10^{-13} [150]	$\sim 10^{-17}$ * [150]
^{87}Sr	429 228 004 229 873.4(1,0) [151]	698.4	4×10^{16} [152]	3.1×10^{-18} [152]	$7, 6 \times 10^{-21}$ ** [152]
^{88}Sr	429 228 066 418 008.3(1.9) [153]	698.4	5×10^{13} [154]	$\sim 10^{-14}$ [153]	7×10^{-17} ** [153]
^{55}Mn	511 214 793 362 882 [H7]	586.3	8×10^{15} [H7]		
^{171}Yb	518 295 836 590 865.2(7) [155]	578.4	1×10^{14} [155]	2×10^{-15} [155]	3.4×10^{-16} ** [155]
^{174}Yb	518 294 025 309 217.8(9) [156]	578.4	5.2×10^{13} [156]	5.5×10^{-15} [156]	1.5×10^{-15} ** [156]
^{55}Mn	528 748 455 061 470 [H7]	566.8	7×10^{15} [H7]		
^{55}Mn	714 071 758 408 246 [H7]	419.7	5×10^{20} [H7]		
^{199}Hg	1 128 575 290 808 162(6.4) [157]	265.6	1.1×10^{16} [157]		5.7×10^{-15} ** [157]

^a - ... 751,7667(9) [146,147], ^b - ... 610,9043126(34) [148]

$^{133}\text{Cs}^T$ - caesium clock on a thermal atomic beam, $^{133}\text{Cs}^F$ - caesium fountain,

* - RSU - relative standard uncertainty

** - FFU - fractional frequency uncertainty

Table 6: List of selected optical clocks on ions

Clock type	Frequency [Hz]	λ [nm]	Q	Allan deviation	
				(for $\tau = 1s$)	(RSU* or FFU**)
$^{40}\text{Ca}^+$	411 042 129 776 393.2(1.0) [158]	729,3	3×10^{15} [159]	2.9×10^{-13} [158]	2.4×10^{-15} * [158]
$^{88}\text{Sr}^+$	444 779 044 095 485.5(9) [160]	674.0	1×10^{15} [161]	1×10^{-14} [160]	2×10^{-17} ** [160]
$^{171}\text{Yb}^+(\text{E3})$	642 121 496 772 645.36(25) [137]	466.9	2×10^{23} [162]	5×10^{-15} [163]	$1, 1 \times 10^{-18}$ ** [163]
$^{171}\text{Yb}^+(\text{E2})$	688 358 979 309 307.82(36) [164]	435.5	2×10^{14} [165]	4.1×10^{-14} [164]	5.9×10^{-16} * [164]
$^{199}\text{Hg}^+$	1 064 721 609 899 144.94(97) [166]	281.6	1.5×10^{14} [167]	3.3×10^{-13} [166]	1.9×10^{-17} ** [166]
$^{27}\text{Al}^+$	1 121 015 393 207 857.4(7) [168]	267.4	1.5×10^{17} [169]	3.9×10^{-15} [168]	2.3×10^{-17} ** [168]
$^{115}\text{In}^+$	1 267 402 452 901 049.9(6.9) [170]	236.5	1.6×10^{15} [170]		5×10^{-15} ** [170]
$^{229m}\text{Th}^{3+}$	2 002 600 000 000 000 [64]	149.7	1.2×10^{19} [87]		

(E2) - electric quadrupole transition, (E3) - electric octupole transition

* - RSU - relative standard uncertainty

** - FFU - fractional frequency uncertainty

4.8 Scientific plans for the future

In the nearest future I intend to participate in experimental investigations of rare-earth atoms and ions with the use of the experimental setup with the hollow cathode discharge lamp. Together with Dr. Sci. Bogusław Furmann, Prof. PP I plan to obtain a Fourier spectrum of the elements considered for research, in collaboration with Prof. Rafał Hakalla (University of Rzeszów) or with foreign research groups (Prof. Sophie Kröger - Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin, Germany, as well as Prof. Gönül Başar - Istanbul University, Turkey). It would greatly facilitate further experimental research with laser spectroscopy methods.

Independently, I intend to further develop the research topics initiated within the presented habilitation achievement. In particular I would like to continue the investigations related to the concept of optical atomic clocks on the atoms of selected elements with an open 3d shell - manganese and chromium.

In the current calendar year I plan also to perform further measurements of the structure of the manganese and chromium atoms on an atomic beam with the use of the titanium-sapphire laser (borrowed from Prof. Uwe Sterr and Prof. Ekkehard Peik from PTB Braunschweig in Germany); this laser generates radiation in the spectral range ca. 750 - 850 nm, which has not been hitherto available in the laboratory of my division at Poznan University of Technology.

Further I intend to perform an attempt of two-step excitation measurements on an atomic beam, in order to test the possibilities of investigation of forbidden transitions in the manganese and chromium atoms. In further future I plan to perform measurements of the clock transitions proposed within my scientific achievement, first for the manganese atom. I also intend to investigate experimentally the cooling transitions in the laser cooling schemes for the manganese atoms, which I proposed in the work [H7].

My further plans include activity in acquisition of financial support from external sources (domestic, as e.g. NCN, FNP, NCBiR, as well as foreign) for realization of research aiming at construction of optical atomic clocks on the chromium and manganese atoms, including the setup of magneto-optical traps, and purchase of the relevant apparatus.

In reference to my hitherto collaboration with the group of Prof. Ekkehard Peik in PTB Braunschweig, I hope for the next opportunity of the work in that laboratory, currently enriched with the third linear ion trap system. The new ion trap is loaded in a similar way as the one in LMU, i.e. with α decay products of the uranium sources ^{233}U ; additionally this system possesses the possibility of indirect cooling of the thorium ions through the directly cooled strontium ions. Currently also tests of a complex laser system are in progress, intended for generation of radiation in vacuum ultraviolet region, at the wavelength of ca. 150 nm, corresponding to the energy necessary for excitation of the isomeric transition in ^{229}Th ions. I am interested in further participation in development of the possible implementation of the unique optical nuclear clock on the thorium isotope ^{229}Th .

5 Compilation of significant scientific activity realized in more than one scientific institution

The list below shows my international mobility and significant scientific activity realized in foreign scientific institutions before and after receiving the doctoral degree. The list was lined up according to the institutions, in order from the longest to the shortest total time of stay. I presented the detailed description of the scope of realized research tasks partially in sections 7.2 and 7.3 of this document, as well as in attachment No 3 **List of scientific achievements**, in section II.6 „*Scientific internships*”.

Activity after Ph.D.

Date	Information on the scientific institution, mentor and the outcome of the internship
01/2015 - 12/2017	<p>PTB Braunschweig, Germany (PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt) Time and Frequency Department Faculty of Optics Mentor: Dr. Sci. Ekkehard Peik, Prof. PTB (h-index = 32) (post-doctoral internship) The measurable outcome of the internship are the articles [H9, H10, A11, A13, A14], as well as conference contributions [K2-K4, K6-K13].</p>
07/2013	<p>(post-doctoral internship) Preparation of the application for Marie Curie Intra-European Fellowship (IEF), competition FP7-PEOPLE-IEF-2013 No SEP-210111460: "Nuclear Optical Clock with Th-229".</p>
07/2011	<p>(post-doctoral internship) The measurable outcome of the internship is the article [A21].</p>
07/2010 - 10/2010	<p>(post-doctoral internship) The measurable outcome of the internship is the article [A21].</p>
05/2014 - 12/2014	<p>NPL Teddington, Great Britain (NPL National Physical Laboratory) Time and Frequency Group of the Time, Quantum and Electromagnetics (TQEM) Division Mentor: Dr. Sci. Krzysztof Szymaniec (h-index = 14) (post-doctoral internship) The measurable outcome of the internship is the article [A16], as well as conference contributions [K14-K16].</p>
07/2012 - 08/2012	<p>Technical University of Graz, Austria Institute of Experimental Physics Mentor: Dr. Sci. Laurentius Windholz, Prof. TU Graz (h-index = 22) (post-doctoral internship) within „<i>Lifelong Learning Program</i>” – <i>Erasmus</i> Staff Training Mobility. Program of European Union The measurable outcome of the internship are the articles [A17,A18], as well as conference contributions [K18-K19].</p>

Activity before Ph.D.

10/2008 - 11/2008	<p>Technical University of Graz, Austria Institute of Experimental Physics Mentor: Dr. Sci. Laurentius Windholz, Prof. TU Graz (h-index = 22) (internship) within „<i>Lifelong Learning Program</i>” – <i>Erasmus</i> Teaching Staff Mobility. Program of European Union The measurable outcome of the internship is the article [A24].</p>
04/2008 - 07/2008	<p>realization of international project: Research-Technical Collaboration Austria-Poland WTZ PL07/2007 The measurable outcome of the internship are the articles [A24, A27], as well as conference contributions [K33,K34].</p>

Date	Information on the scientific institution, mentor and the outcome of the internship
03/2003 - 07/2003	Technical University of applied Sciences, Wildau, Germany Mentor: Prof. Dr. hab. Astra Richter (h-index = 21) (internship) students exchange <i>Socrates/Erasmus</i> participation in IQN (International Quality Network - semiconductors, biomaterials, nanotechnologies) courses Program of European Union

6 List of teaching, organization and science popularizing achievements

6.1 Teaching

6.1.1 Classes

Lectures:

- **Physics**
course of study Mechatronics (Faculty of Mechanical Engineering, PUT), Engineer's part-time studies, semester 2, 12 h, since academic year 2017/2018
course of study Mechatronics (Faculty of Mechanical Engineering, PUT), Engineer's full-time studies, semester 1, 30 h, since academic year 2018/2019
course of study Pharmaceutical Engineering (Faculty of Chemical Technology PUT and Faculty of Pharmacy, University of Medical Sciences, Poznan), Engineer's full-time studies, semester 2, 45 h, since academic year 2018/2019
- **Technical Physics**
course of study Management and Production Engineering (Faculty of Mechanical Engineering, PUT), Engineer's part-time studies, semester 1, 20 h, since academic year 2019/2020
- **Quantum Physics**
course of study Power Engineering (Faculty of Electrical Engineering, PUT - currently Faculty of Control, Robotics, and Electrical Engineering, PUT), Master's full-time studies, semester 1, 15 h, since academic year 2012/2013 to 2013/2014, as well as since 2018/2019 to 2020/2021

Tutorials:

- **Physics**
course of study Mechanics and Machine Construction (Faculty of Machine Construction and Management, PUT, currently Faculty of Mechanical Engineering, PUT), Engineer's full-time studies, semester 1, 15 h, academic year 2011/2012 and 2012/2013
course of study Biomedical Engineering (Faculty of Machine Construction and Management, PUT, currently Faculty of Mechanical Engineering, PUT), Engineer's full-time studies, semester 1, 15 h, academic year 2012/2013
course of study Materials Engineering (Faculty of Machine Construction and Management, PUT, currently Faculty of Mechanical Engineering, PUT), Engineer's full-time studies, semester 1, 15 h, academic year 2012/2013
course of study Aeronautical Engineering (Faculty of Environmental Engineering and Energy,

PUT), Engineer's full-time studies, semester 1, 15 h, academic year 2020/2021 and 2021/2022

- **Technical Physics**

course of study Management and Production Engineering (Faculty of Mechanical Engineering, PUT), Engineer's full-time studies, semester 1, 10 h, since academic year 2019/2020

Laboratory and project classes:

- **Ist Physical Laboratory**

various courses of study, full-time/part-time studies, semester 1/2 - since the beginning of doctoral studies (academic year 2004/2005)

- **Physics Laboratory** (classes in English)

course of study Automatic Control and Robotics (Faculty of Control, Robotics, and Electrical Engineering, PUT), Engineer's full-time studies, semester 3, 30 h

kierunek Chemical Technology (Faculty of Chemical Technology), Engineer's full-time studies, semester 2, 45 h

- **Advanced Specialistic Laboratory**

classes within 1 out of 4 exercise modules, conducted in collaboration with Dr. Gustaw Szawiola, associate Prof. PUT (also with Dr. Andrzej Krzykowski)

preparation of 2 exercises: development of the setups, preparation of manuals (in collaboration Dr. Andrzej Jarosz and Dr. Andrzej Krzykowski)

course of study Technical Physics (Faculty of Technical Physics, PUT, currently Faculty of Materials Engineering and Technical Physics, PUT), Master's full-time studies, semester I, 22,5 h - since academic year 2011/2012 to 2013/2014 and since academic year 2018/2019 until now

- **Specialistic and Diploma Laboratory**

course of study Technical Physics (Faculty of Technical Physics, PUT, currently Faculty of Materials Engineering and Technical Physics, PUT): Master's degree - since academic year 2010/2011, Engineer's degree - since academic year 2009/2010

course of study Technical and Informatics Education (Faculty of Technical Physics, PUT, currently Faculty of Materials Engineering and Technical Physics, PUT): Master's degree - since academic year 2019/2020, Engineer's degree - since academic year 2017/2018

6.1.2 Scientific supervision of students

Scientific supervision during realization of diploma Master's and Engineer's theses (Faculty of Technical Physics PUT, currently Faculty of Materials Engineering and Technical Physics PUT):

as a supervisor

Master's theses:

1. Bartosz Pawałowski, *Study of populations of metastable states of atoms in an experimental setup for obtaining atomic beam* (Polish: *Badanie obsadzeń stanów metastabilnych atomów w układzie eksperymentalnym do otrzymywania strumienia atomowego*, 2011)
2. Michał Szumann, *Construction of the automatic compensation of the magnetic field system in the Paul trap* (Polish: *Budowa układu do automatycznej kompensacji pola magnetycznego w pułapce Paula*, 2012)
3. Anna Dychalska, *Modification of the Paul trap experimental setup* (Polish: *Modyfikacja układu eksperymentalnego z pułapką Paula*, 2013)

4. Mateusz Nowicki, *Program for simulation of hyperfine structure and isotope shifts* (Polish: *Program do symulacji struktury nadsubtelnej i przesunięć izotopowych*, 2020)
5. Mateusz Ewiak, *Program for controlling the experimental setup with Paul trap created in the LabVIEW environment* (Polish: *Program do sterowania stanowiskiem eksperymentalnym z pułapką Paula napisany w środowisku LabVIEW*, 2021)

Engineer's theses:

1. Michał Szumann, *Modification of the magnetic field compensation system in the experimental setup with a Paul trap* (Polish: *Modyfikacja układu kompensacji pola magnetycznego w układzie eksperymentalnym z pułapką Paula*, 2011)
2. Anna Dychalska, *Construction of the cooling system for the turbomolecular pump for ultra high vacuum system of the Paul trap* (Polish: *Budowa układu chłodzenia pompy turbomolekularnej dla stanowiska ultra wysokiej próżni pułapki Paula*, 2012)
3. Jerzy Marczak, *The construction of the workstation for sample preparation for the experimental setup with the Paul trap* (Polish: *Budowa stanowiska do wytwarzania próbek dla układu eksperymentalnego z pułapką Paula*, 2013)
4. Patryk Nowaczyk, *Construction of the hollow cathode lamp experimental setup for spectroscopic measurements* (Polish: *Budowa stanowiska eksperymentalnego lampy z katodą wnękową do badań spektroskopowych*, 2014)
5. Jacek Jastrzembski, *Development of spectral lines and energy levels database of thorium atom and ion* (Polish: *Opracowanie bazy danych linii widmowych i poziomów energetycznych atomu i jonu toru*, 2019)
6. Mateusz Nowicki, *Development of software for viewing and processing of experimental data* (Polish: *Opracowanie oprogramowania do przeglądania i obróbki danych eksperymentalnych*, 2019)
7. Krzysztof Więckiewicz, *A package of programs in the LabView environment to control laboratory devices* (Polish: *Pakiet programów w środowisku LabVIEW do sterowania urządzeniami laboratoryjnymi*, 2020)
8. Jakub Okraska, *Database of spectral lines and electron levels for titanium atom (Ti I) and ion (Ti II)* (Polish: *Baza danych linii widmowych i poziomów elektronowych atomu (Ti I) i jonu (Ti II) tytanu*, 2021)
9. Dawid Balicki, *Database of spectral lines and electron levels for manganese atom* (Polish: *Baza danych linii widmowych i poziomów elektronowych atomu manganu*, 2022)

6.1.3 Scientific supervisions of doctoral students as a scientific supervisor or assistant supervisor

none

6.2 Organization activities

2020 - 2024	Membership of the Faculty Council at the Faculty of Materials Engineering and Technical Physics, PUT (representative of non-referential academic teachers)
2008 - 2012	Membership of the Faculty Electoral Commission at the Faculty of Technical Physics, PUT
07/2022	Collaboration with Dr. Jerzy Nawrocki and M. Sc. Eng. Piotr Dunst from Astrogeodynamical Observatory in Borowiec (near Poznan) belonging to Space Research Center (CBK) of the Polish Academy of Sciences (PAN) in the field of joint research on evaluation of primary frequency standards based on construction of the caesium atomic fountain (AOS-CsF1 and AOS-CsF2), leading to the signing of the loan agreement No (PP)RU00021856 between CBK PAN and Poznan University of Technology concerning the loan of a microwave generator Giga-Tronics GS9000S, for investigations of the parameters of the aforementioned caesium fountains
09/2022	Within collaboration with the group of Dr. Sci. Ekkehard Peik, Prof. PTB (PTB Braunschweig, Germany) leading to the signing of the rental agreement No (PP)RU00022727 between PTB Braunschweig and Poznan University of Technology, concerning the rental of a titanium-sapphire laser (TekhnoScan) to the laboratory of Division of Quantum Engineering and Metrology for the time span of 11 months, with the option to extend the contract
10/2022	Within collaboration with the group of Dr. Sci. Ekkehard Peik, Prof. PTB (PTB Braunschweig, Germany) leading to the signing of the rental agreement No (PP)RU00023433 between PTB Braunschweig and Poznan University of Technology, concerning the rental of a pump laser Coherent Verdi V-10 to the laboratory of Division of Quantum Engineering and Metrology for the time span of 10 months, with the option to extend the contract

6.3 Science popularization

- Popular science lecture within the open lectures series *Secrets of Physics and Engineering*, entitled "What ticks in an atomic clock" (Polish: "Co tyka w zegarze atomowym"), aimed at high school students, delivered in university classrooms of Poznan University of Technology (01.12.2022)
- Participation in radio broadcast *From another planet: a timepiece more precise than a clock* (Polish: *Z innej planety: czasomierz dokładniejszy od zegara*) of the radio station Radio for You (RDC); live broadcasting on July 17th 2018, 21.00-22.00 from the studio of Radio Poznan (formerly Radio Merkury), leading RDC editor Łukasz Badowski, broadcast available in the podcast *From another planet* (Polish: *Z innej planety*) of RDC under the link <https://www.rdc.pl/podcast/>
- Short interview with editor Sandra Soluk (Radio Poznan reporter), emission of the message in Radio Poznan news on Mai 26th 2018
- Interview with editor Ludwika Tomala (PAP) and authorization of the article entitled *Researchers pave the way to the most precise clock in the world* (Polish: *Badacze TORują drogę do najdokładniejszego na świecie zegara*), available on the website <http://naukawpolsce.pl>
- Interview with tech.wp.pl portal editor Bolesław Breczko and authorization of the article entitled *The Pole constructs the most precise clock in the world* (Polish: *Polak buduje najdokładniejszy zegar na świecie*), available on the website <https://tech.wp.pl/>
- Popular science article (in Polish and English) entitled *A breakthrough in the work on the optical nuclear clock* (Polish: *Przełom w pracach nad optycznym nuklearnym zegarem*), *Głos Politechniki*, Year XXVII No 03 (201) • ISSN 1233-5444, pp. 39-43 (2018)

- Multiple participation in the presentation of research laboratories of the group for invited visitors of the faculty or the group, as well as for the candidates for studies (within the program *Doors Open*) and the school youth participating in the open lectures of the series *Beauty of Physics* and *Secrets of Physics* (currently *Secrets of Physics and Engineering*), and recently also foreign students from the European University for Customised Education (EUNICE), whose leader is Poznan University of Technology

7 Other research achievements

7.1 Summary of academic achievements

Bibliometric data on April 7th 2023, according to the databases Web of Science, Scopus and Google Scholar.

	Web of Science	Scopus	Google Scholar
Publications	21	23	41
Number of citations	213	225	309
(no self-citations)	185	194	—
Number of citing articles	165	176	—
(no self-citations)	151	161	—
h-index	8	8	9

Cumulative *Impact Factor* of the published articles amounts to **98.624** (for the year of publication, except for the works published after 2021), and the 5-year *Impact Factor* - **101.619**. The sum of MEiN points (list of December 1st 2021) of all published articles amounts to **2240**. Detailed bibliometric data is presented in attachment No 3 **List of scientific achievements**.

7.2 Course of scientific work before obtaining the doctoral scientific degree

After graduating from the course of study Technical Physics (specialization: physics of materials and nanotechnologies) at Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology, on 01.10.2004 I began my doctoral studies at the field of study „Chemical Technology and Research Apparatus”, conducted jointly by Faculty of Chemical Technology and Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology. I carried out my research under supervision of Prof. Jerzy Dembczyński in Chair of Atomic Physics at Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology.

In the team investigations of the electronic structure, in particular the hyperfine structure and the isotope shifts, for free atoms and ions of various elements were performed. During first three years of realization of my doctoral thesis I got thoroughly acquainted with the methods of laser spectroscopy in the atomic beam experimental setup. My contribution to the applied experimental setup was first of all the construction, assembly and tests of a magnetic field shield in the interaction zone of microwave field with free atoms; I also actively participated in measurements of the hyperfine structure of the level $3d^5 4s a^5S_2$ in the chromium atom with the method of optical-microwave double resonance ([**A25**, **A26**, **K35**, **K36**], attachment No 3).

In subsequent years I constructed an experimental setup with a hollow cathode discharge lamp [**A28**, **K34**] with the aim of performing of research on the structure of atomic tantalum, and I went on research internship to the Institute of Experimental Physics at the Technical University of Graz in Austria, to the group of Dr. Sci. Laurentius Windholz, Prof. TU Graz, specialized in measurements of the structure of this element [**A24**, **A27**, **K31-K33**].

In October 2009, on the basis of the thesis entitled *Investigation of the hyperfine structure of selected elements with an open nd subshell by laser spectroscopy methods in a hollow cathode and on an atomic beam* (Polish: *Badanie struktury nadsubtelnej wybranych pierwiastków z otwartą podpowłoką*

nd metodami spektroskopii laserowej w katodzie wnekowej i na strumieniu atomowym), I received at Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology, the scientific degree of doctor of natural sciences in the field of physics. Results of research, obtained during realization of the doctoral thesis, were repeatedly presented in the form of conference oral and poster contributions, as well as in publications [A24-A28].

7.3 Course of scientific work after obtaining the doctoral scientific degree

After receiving the doctoral degree (together with my colleagues from the home research group) I undertook intensive research of the structure of the chromium atom on an experimental setup with an atomic beam, using the modified version (i.e. including the magnetic field shielding) in terms of application of ABMR-LIRF method for highly precise measurements. I was collecting the materials for the works included in my habilitation achievement [H1-H3], simultaneously presenting partial results at conferences - personally or as a co-author [K20, K25-K30, attachment No 3].

After obtaining my Ph.D., my visits in foreign research centers were related mainly to the topic of time and frequency standards. Institutions in which I did my internships, in majority were included in the group of *National Metrology Institutes* (NMI), i.e. the institutions dedicated for ensuring uniformity of measures in the particular country, on the basis of a decision of the competent state authority.

In 2010 from July until October I went on a short-term research internship to PTB Braunschweig in Germany (German NMI) to the group of Dr. Sci. Ekkehard Peik, Prof. PTB. I constructed there an experimental setup with the hollow cathode lamp, which contained a plate made of the isotope ^{232}Th . The aim was to measure decay of fluorescence channels from the level of the odd-parity configuration $6d7s(^3D)7p$ of $^{232}\text{Th}^+$ ion, with energy 24874 cm^{-1} , $J = 5/2$, which was populated by excitation with the laser light at the wavelength 402 nm from the ground level. The objective of my visit was also concerned with studies of high-energy levels of $^{232}\text{Th}^+$ ion, with energies in the range $58900 - 69000\text{ cm}^{-1}$. Those levels were populated by excitation with the third harmonic (THG) of a picosecond titanium-sapphire laser with the fundamental wavelength in the range 750-950 nm (which corresponds to 227-294 nm for TH) with the mentioned level with energy 24874 cm^{-1} , $J = 5/2$. It was my first stage of the work concerned with the pioneering project of realization of the **optical nuclear clock** based on the isomeric state of the thorium isotope 229.

A year later I spent another month (July 2011) in the group of Prof. Ekkehard Peik, where I participated in investigations of $^{232}\text{Th}^+$ ions confined in a linear trap, within the frame of the project COST, financially supported by European Union (action IOP1001 „Ion trap for future applications”). The measurable outcome of the two internships mentioned was the work [A21].

I made my next visit to PTB Braunschweig in 2013 (July). During my stay I participated in current research on Th^+ ions in a linear trap, as well as I got acquainted with the current state of the experimental system. I also prepared an application for Marie Curie Intra-European Fellowship (IEF), which I submitted for the competition FP7-PEOPLE-IEF-2013 with the number SEP-210111460, entitled “Nuclear Optical Clock with Th-229”.

I actively collaborated also with the group of Prof. Laurentius Windholz at TU Graz, where in summer of 2012 (in July and August), within the frame of European „Lifelong Learning Programme” - ERASMUS, I participated in the training concerning construction and operation of the titanium-sapphire laser system, as well as its application for research on the structure of the lanthanum atom with the methods of laser spectroscopy. The measurable outcome of my visit were two research articles [A17, A18], as well as conference contributions [K18, K19, attachment No 3].

In I received an invitation for a long-term post-doctoral internship from Dr. Sci. Krzysztof Szymaniec, who led a research group dealing with primary time and frequency standards - caesium fountains, in Time and Frequency Group of the Time, Quantum and Electromagnetics (TQEM) Division in National Physical Laboratory (NPL) in Teddington, Great Britain (British NMI). Since Mai till December 2014 I participated in service of the caesium fountain NPL-CsF2, as well as took part

in evaluation of the new generation frequency standard - caesium fountain NPL-Cs-F3. The measurable scientific outcome of the internship is the article [A16], as well as conference contributions [K14-K16].

In the years 2015-2017 I was on a long-term internship in PTB Braunschweig in the group of Prof. Ekkehard Peik, dealing again with the topic of the **optical nuclear clock**. I participated in pioneering research both concerned with the possible implementation on Th^+ , Th^{2+} and Th^{3+} ions confined in linear traps, and with the concept of realization of the clock based on crystals bulk-doped with Th^{4+} ions (e.g. $\text{CaF}_2:\text{Th}^{4+}$), or, in a simpler version - surface-doped crystals [H10]. I took part, as a co-investigator, in the project nuClock 664732, financially supported within the Program Horizon 2020 of European Union. Within this European project, together with colleagues from the group led by Prof. Peter Thirolf at the Faculty of Physics of LMU Munich, we performed common experimental research in Maier-Leibnitz-Laboratorium in Garching near Munich, whose results were compared with investigations performed earlier in PTB Braunschweig. Those common research resulted in publication [H9]. Additionally, the measurable scientific outcome of the internship are the articles [A11, A13, A14], as well as conference contributions [K2-K4, K6-K13].

Directly after my return to my home country in 2018, in my home institution I participated in investigations of the hyperfine structure of the holmium atoms in a hollow cathode discharge lamp, performed in my research team (A10, K5). I also began investigations of the electronic structure of the manganese atom on the experimental setup with an atomic beam. I managed to obtain funding from the National Science Center in Cracow for realization of the topic „*Preliminary research of the hyperfine structure in the manganese atom in terms of applications in quantum metrology and engineering*” (Polish: „*Wstępne badania struktury nadsubtelnej w atomie manganu pod kątem zastosowań w kwantowej metrologii i inżynierii*”) within the competition Miniatura-3, research project No 2019/03/X/ST2/01119. As the principal investigator I carried out investigations, which resulted in altogether four publications [H5-H8] concerning the energy structure of the manganese atom and the possible application of the level systems with particular properties in optical atomic clocks (proposals of clock transitions, as well as laser cooling schemes for magneto-optical traps).

In 2022 I returned to measurements of the hyperfine structure of the chromium atom with LIF method on an atomic beam, to realize investigations of possible detection schemes for the postulated clock transition [H4]. This proposal could be formulated owing to the earlier experimental research performed in the works [H1-H3], as well as due to the semi-empirical analysis of radiative parameters (values of oscillator strengths and lifetimes for low-energy metastable levels) for the chromium atom, performed by Dr. Sci. Magdalena Elantkowska, Prof. PUT, and Dr. Sci. Jarosław Ruczkowski, Prof. PUT.

7.4 Presentation of scientific achievement at seminars in domestic scientific institutions

I presented my habilitation achievement repeatedly within the frame of seminars in various domestic scientific institutions. The talks were listed in chronological order.

- Talk entitled “Investigations of the structure of selected elements in terms of applications in optical atomic and nuclear clocks”(Polish: “Badania struktury wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w optycznych zegarach atomowych i nuklearnych”) delivered within Thursday Physical Colloquium in Institute of Physics, Faculty of Physics, Astronomy and Informatics, Nicolaus Copernicus University in Toruń, on 26.05.2022
- Talk entitled “Investigations of the structure of selected elements in terms of applications in optical clocks”(Polish: “Badania struktury wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w zegarach optycznych”) delivered within Faculty Seminar of Faculty of Materials Engineering and Technical Physics, Poznan University of Technology, on 13.10.2022

- Talk entitled "Investigations of the structure of selected elements in terms of applications in optical clocks"(Polish: "Badania struktury wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w zegarach optycznych") delivered within Faculty Seminar of Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, University of Gdansk, on 27.10.2022
- Talk entitled "Investigations of the electronic structure of selected elements in terms of applications in optical clocks", delivered within Optical Seminar of Faculty of Physics, University of Warsaw, on 01.12.2022
- Talk entitled "Investigations of the structure of selected elements in terms of applications in optical clocks"(Polish: "Badania struktury wybranych pierwiastków pod kątem zastosowań w zegarach optycznych") delivered within Promotion Seminar of the Faculty of Physics, Adam Mickiewicz University in Poznan, on 02.12.2022
- Talk entitled "Investigations of the electronic structure of selected elements in terms of applications in optical clocks", delivered within Seminar of Photonics Division, Faculty of Physics, Astronomy and Applied Computer Science, Jagiellonian University in Cracow, on 05.12.2022
- Talk entitled "Investigations of the electronic structure of selected elements in terms of applications in optical clocks", delivered within the seminar Modern Trends in Physics Research at the Faculty of Physics, Adam Mickiewicz University in Poznan, on 11.01.2023

Literatura

- [1] P. Gill, "Optical frequency standards," *Metrologia* **42**, S125–S137 (2005).
- [2] A. Derevianko and H. Katori, "Colloquium: Physics of optical lattice clocks," *Rev. Mod. Phys.* **83**, 331–347 (2011).
- [3] N. Poli, C. W. Oates, P. Gill, and G. M. Tino, "Colloquium: Physics of optical lattice clocks," *Riv. Nuovo Climento* **36**, 555 – 624 (2013).
- [4] A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, and P. O. Schmidt, "Optical atomic clocks," *Reviews of Modern Physics* **87**, 637 – 701 (2015).
- [5] M. Gellesch, J. Jones, R. Barron, A. Singh, Q. Sun, K. Bongs, and Y. Singh, "Transportable optical atomic clocks for use in out-of-the-lab environments," *Advanced Optical Technologies* **9**, 313 – 325 (2020).
- [6] A. S. Bell, J. Stuhler, S. Locher, S. Hensler, J. Mlynek, and T. Pfau, "A magneto-optical trap for chromium with population repumping via intercombination lines," *Europhys Lett* **45**, 156–161 (1999).
- [7] G. Bismut, B. Pasquiou, D. Ciampini, B. Laburthe-Tolra, E. Maréchal, L. Vernac, and O. Gorceix, "Optimized loading of an optical dipole trap for the production of chromium BECs," *Appl Phys B* **102**, 1–9 (2011).
- [8] W. J. Childs, L. S. Goodman, and D. von Ehrenstein, "Magnetic Hyperfine interaction of Cr⁵³," *Phys Rev* **132**, 2128–2135 (1963).
- [9] J. M. Pendlebury and K. F. Smith, "Hyperfine structure measurements in ⁷⁵As, ³¹P and ⁵³Cr," *Proc Phys Soc* **84**, 849–856 (1964).
- [10] S. Davis, J. Wright, and L. Balling, "Hyperfine structure of the ground state of Mn⁵⁵," *Phys. Rev. A* **3**, 1220–1223 (1971).

- [11] J. Sugar and C. Corliss, “Atomic Energy levels of the Iron-Period Elements: Potassium through Nickel,” *Journal of Physical and Chemical Reference Data* **14** (1985).
- [12] R. L. Kurucz and B. Bell, “1995 Atomic Line Data. Kurucz CD-ROM No. 23,” [Online]. Available: <https://www.cfa.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html>.
- [13] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, and NIST ASD Team, NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.7.1), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2020]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. (2020).
- [14] E. B. Saloman, “Energy Levels and Observed Spectral Lines of Neutral and Singly Ionized Chromium, Cr I and Cr II,” *J Phys Chem Ref Data* **41**, 043 103 (2012).
- [15] P. Raghavan, “Table of nuclear moments,” *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **42**, 189–291 (1989).
- [16] W. M. Haynes, D. R. Lide, and T. J. Bruno, *Handbook of chemistry and physics - 95th edition* (CRC Press LLC, New York, 2014).
- [17] A. M. Catalán and P. M. Sancho, *An R Soc Esp Fis Quim* **29**, 327 (1931).
- [18] C. C. Kiess, “Description and Analysis of the First Spectrum of Chromium, CrI,” *J Res Natl Bur Stand* **51**, 247 (1953).
- [19] H. Bucka, B. Budick, R. J. Goshen, and S. Marcus, “Lifetimes and g_J Factors in Excited States of Chromium. Hyperfine Structure of Cr⁵³,” *Phys Rev* **144**, 96–102 (1966).
- [20] U. Becker, U. Teppner, and U. Wüsthof, “Hyperfine structure of the 7P states in the configurations $3d^54p$ and $3d^44s4p$ of ⁵³Cr,” *J Phys B* **11**, 2435–2448 (1978).
- [21] W. Ertmer, U. Johann, and R. Mosmann, “Measurement of the Nuclear Quadrupole Moment of ⁵³Cr by Laser-Rf Double Resonance,” *Z Phys A* **309**, 1–4 (1982).
- [22] T. Reinhardt, J. Maichel, M. Baumann, and J. Krueger, “Hyperfine structure of the resonance lines of ⁵³Cr and lifetimes of some excited states of the Cr I spectrum,” *Z Phys D* **34**, 87–90 (1995).
- [23] A. Jarosz, *Badanie efektów oddziaływania konfiguracji w strukturze nadsubtelnej atomów chromu i manganu*, Ph.D. thesis, Poznan University of Technology, Poznan (2000).
- [24] P. O. Schmidt, S. Hensler, J. Werner, T. Binhammer, A. Görlitz, and T. Pfau, “Doppler cooling of an optically dense cloud of magnetically trapped atoms,” *J Opt Soc Am B* **20**, 960–967 (2003).
- [25] K. Góral, K. Rzażewski, and T. Pfau, “Bose-Einstein condensation with magnetic dipole-dipole forces,” *Phys Rev A* **61**, 051 601 (2000).
- [26] A. Griesmaier, J. Werner, S. Hensler, J. Stuhler, and T. Pfau, “Bose-Einstein Condensation of Chromium,” *Phys Rev Lett* **94**, 160 401 (2005).
- [27] Q. Beaufiles, R. Chicireanu, T. Zanon, B. Laburthe-Tolra, E. Maréchal, L. Vernac, J.-C. Keller, and O. Gorceix, “All-optical production of chromium Bose-Einstein condensates,” *Phys Rev A* **77**, 061 601 (2008).
- [28] R. Chicireanu, A. Pouderos, R. Barbé, B. Laburthe-Tolra, E. Maréchal, L. Vernac, J.-C. Keller, and O. Gorceix, “Simultaneous magneto-optical trapping of bosonic and fermionic chromium atoms,” *Phys Rev A* **73**, 053 406 (2006).
- [29] C. M. Lederer and V. S. Shirley, *Tables of Isotopes - 7th ed.* (Wiley, New York, 1978).

- [30] J. Dembczyński, W. Ertmer, U. Johann, S. Penselin, and P. Stinner, “Laser-Rf double-resonance studies of the hyperfine structure of metastable atomic states of ^{55}Mn ,” *Z Phys. A* **291**, 207 (1979).
- [31] D. R. Lide, *Handbook of chemistry and physics* (CRC Press LLC, New York, 2000).
- [32] M. J. O’Neil, P. E. Heckelman, C. B. Koch, K. Roman, and C. Kenny, *The Merck Index 14th ed. Whitehouse Station* (Merck & Co. Inc., New York, 2006).
- [33] H. E. White and R. Ritschl, “Hyperfine Structure in the Spectra of Neutral Manganese,” *Phys. Rev.* **35**, 208–208 (1930).
- [34] H. E. White and R. Ritschl, “Hyperfine Structure in Neutral Manganese, Mn I.” *Phys. Rev.* **35**, 1146–1160 (1930).
- [35] W. Mohammad and P. N. Sharma, “C III. Hyperfine-structure of spectrum lines of manganese arc in vacuum. Part I,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **18**, 1144–1149 (1934).
- [36] R. A. Fisher and E. R. Peck, “Hyperfine Structure of Manganese I and Nuclear Magnetic Moment,” *Phys. Rev.* **55**, 270–276 (1939).
- [37] M. Kiyoshi, “Hyperfine Structure of the Spectrum of Mn I,” *Journal of the Physical Society of Japan* **10**, 336–338 (1955).
- [38] G. K. Woodgate and J. S. Martin, “Hyperfine Structure in Manganese ^{55}Mn ,” *Proceedings of the Physical Society. Section A* **70**, 485–488 (1957).
- [39] H. R. Rottmann, “Das Kernquadrupolmoment des Mn^{55} ,” *Zeitschrift für Physik* **153**, 158–163 (1958).
- [40] H. Walther, “Das Kernquadrupolmoment des Mn^{55} ,” *Z. Phys* **170**, 507–525 (1962).
- [41] E. Handrich, A. Steudel, and H. Walther, “The hyperfine splitting of the $3d^54s4p$ levels of Mn I and the quadrupole moment of ^{55}Mn ,” *Phys. Lett. A* **29**, 486–488 (1969).
- [42] P. Luc and S. Gerstenkorn, “Hyperfine structure of multiplet lines e $^6\text{D} - \gamma ^6\text{P}$ of Manganese I,” *Astron. Astrophys.* **18**, 209–214 (1972).
- [43] P. Luc, “Interpretation théorique de la structure hyperfine dipolaire magnétique des termes $z8\text{P}$, $z6\text{P}$, $y6\text{P}$ de la configuration $3d^54s4p$ du manganèse I,” *Physica* **62**, 239 – 248 (1972).
- [44] J. Dembczyński, “Fine structure interactions in the first spectrum of the Ti, V, Mn and Fe atoms,” *Physica B+C* **100**, 105–123 (1980).
- [45] U. Johann, *Konfigurationswechselwirkung in der Hyperfeinstruktur freier Atome mit offener 3d-Schale - Messungen mit Hilfe einer Laser-Hochfrequenz Dopplerresonanztechnik und Interpretation*, Ph.D. thesis, Universität Bonn (1981).
- [46] U. Johann, J. Dembczyński, and W. Ertmer, “Experimental evidence for far configuration mixing effects on off-diagonal hfs interaction between the $(3d+4s)^{N+2}$ configurations of free atoms,” *Z. Phys. A* **303**, 7–12 (1981).
- [47] H. D. Kronfeldt, J. R. Kropp, A. Subaric, and R. Winkler, “Hyperfine structure and lifetime of the Mn I levels $3d^54s4p z^4\text{P}_{3/2,5/2}$ with laser-atomic-beam-spectroscopy,” *Z Phys. A* **322**, 349–350 (1985).

- [48] T. Brodzinski, H. D. Kronfeldt, J. R. Kropp, and R. Winkler, “Hyperfine structure investigations in the manganese I configurations $3d^5 4s 4p$ and $3d^5 4s 5s$,” *Z Phys. D* **7**, 161–164 (1987).
- [49] G. Başar, G. Başar, G. Acar, I. K. Öztürk, and S. Kröger, “Hyperfine Structure Investigations of Mn I Part I: Experimental and Theoretical Studies of the Hyperfine Structure in the Even Configurations,” *Phys. Scr.* **67**, 476–484 (2003).
- [50] R. J. Blackwell-Whitehead, *High Resolution Fourier Transform Spectrometry of the Spectrum of Neutral Manganese*, Ph.D. thesis, Imperial College, London (2003).
- [51] P. H. Lefèbvre, H. P. Garnir, and E. Biémont, “Hyperfine structure for neutral manganese lines of astrophysical interest,” *Astron. Astrophys.* **404**, 1153–1158 (2003).
- [52] R. Blackwell-Whitehead, J. Pickering, and O. Pearse, “Hyperfine structure measurements of neutral manganese with Fourier transform spectroscopy,” *Astrophys. J. Sup. Ser.* **157**, 402–409 (2005).
- [53] A. Klose, K. Minamisono, and P. F. Mantica, “Collinear laser spectroscopy on the ground state and an excited state in neutral ^{55}Mn ,” *Phys. Rev. A* **88**, 042 701 (2013).
- [54] Y. Liu, T. Gottwald, C. Mattolat, and K. Wendt, “Three-photon resonance ionization of atomic Mn in a hot-cavity laser ion source using Ti:sapphire lasers,” *J. Phys. B. At Mol. Opt. Phys.* **48**, 115 006 (2015).
- [55] J. Bates, “Fourier transform spectroscopy,” *Computers and Mathematics with Applications* **4**, 73–84 (1978).
- [56] S. Eustice, K. Cassella, and D. Stamper-Kurn, “Laser cooling of transition-metal atoms,” *Physical Review A* **102**, 053 327 (2020).
- [57] L. Kroger and C. Reich, “Features of the low-energy level scheme of ^{229}Th as observed in the α -decay of ^{233}U ,” *Nuclear Physics A* **259**, 29–60 (1976).
- [58] C. W. Reich and R. G. Helmer, “Energy separation of the doublet of intrinsic states at the ground state of ^{229}Th ,” *Phys. Rev. Lett.* **64**, 271–273 (1990).
- [59] D. G. Burke, P. E. Garrett, T. Qu, and R. A. Naumann, “Additional evidence for the proposed excited state at ≤ 5 eV in ^{229}Th ,” *Phys. Rev. C* **42**, R499–R501 (1990).
- [60] R. G. Helmer and C. W. Reich, “An excited state of ^{229}Th at 3.5 eV,” *Phys. Rev. C* **49**, 1845–1858 (1994).
- [61] V. Barci, G. Ardisson, G. Barci-Funel, B. Weiss, O. El Samad, and R. K. Sheline, “Nuclear structure of ^{229}Th from γ -ray spectroscopy study of ^{233}U α -particle decay,” *Phys. Rev. C* **68**, 034 329 (2003).
- [62] B. R. Beck, J. A. Becker, P. Beiersdorfer, G. V. Brown, K. J. Moody, J. B. Wilhelmy, F. S. Porter, C. A. Kilbourne, and R. L. Kelley, “Energy Splitting of the Ground-State Doublet in the Nucleus ^{229}Th ,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 142 501 (2007).
- [63] B. R. Beck, C. Wu, P. Beiersdorfer, G. V. Brown, J. A. Becker, K. J. Moody, J. B. Wilhelmy, F. S. Porter, C. A. Kilbourne, and R. L. Kelley, “Improved Value for the Energy Splitting of the Ground-State Doublet in the Nucleus ^{229m}Th ,” (2009).
- [64] B. Seiferle, L. von der Wense, P. V. Bilous, I. Amersdorffer, C. Lemell, F. Libisch, S. Stellmer, T. Schumm, C. E. Düllmann, A. Pálffy, and P. G. Thirolf, “Energy of the ^{229}Th nuclear clock transition,” *Nature* **573**, 243–246 (2019).

- [65] A. Yamaguchi, H. Muramatsu, T. Hayashi, N. Yuasa, K. Nakamura, M. Takimoto, H. Haba, K. Konashi, M. Watanabe, H. Kikunaga, K. Maehata, N. Y. Yamasaki, and K. Mitsuda, “Energy of the ^{229}Th Nuclear Clock Isomer Determined by Absolute γ -ray Energy Difference,” *Phys. Rev. Lett.* **123**, 222 501 (2019).
- [66] L. von der Wense, B. Seiferle, M. Laatiaoui, J. B. Neumayr, H.-J. Maier, H.-F. Wirth, C. Mokry, J. Runke, K. Eberhardt, C. E. Düllmann, N. G. Trautmann, and P. G. Thirolf, “Direct detection of the ^{229}Th nuclear clock transition,” *Nature* **533**, 47–51 (2016).
- [67] E. Peik and C. Tamm, “Nuclear laser spectroscopy of the 3.5 eV transition in Th-229,” *Europhysics Letters (EPL)* **61**, 181–186 (2003).
- [68] S. Matinyan, “Lasers as a bridge between atomic and nuclear physics,” *Physics Reports* **298**, 199–249 (1998).
- [69] N. Tralli and G. Goertzel, “The Theory of Internal Conversion,” *Phys. Rev.* **83**, 399–404 (1951).
- [70] C. Rösel, F. F. Karpeshin, P. David, H. Hänscheid, J. Konijn, C. T. A. M. de Laat, H. Paganetti, F. Risse, B. Sabirov, L. A. Schaller, L. Schellenberg, W. Schrieder, and A. Taal, “Experimental evidence for muonic X-rays from fission fragments,” *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei* **345**, 425 – 426 (1993).
- [71] F. F. Karpeshin and M. B. Trzhaskovskaya, “Bound internal conversion versus nuclear excitation by electron transition: Revision of the theory of optical pumping of the ^{229m}Th isomer,” *Phys. Rev. C* **95**, 034 310 (2017).
- [72] A. Pálffy, J. Evers, and C. H. Keitel, “Isomer Triggering via Nuclear Excitation by Electron Capture,” *Phys. Rev. Lett.* **99**, 172 502 (2007).
- [73] M. Morita, “Nuclear Excitation by Electron Transition and Its Application to Uranium 235 Separation,” *Progress of Theoretical Physics* **49**, 1574–1586 (1973).
- [74] H. Fujioka, K. Ura, A. Shinohara, T. Saito, and K. Otozai, “Observation of nuclear excitation by electron transition (NEET) in ^{197}Au ,” *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei* **315**, 121–122 (1984).
- [75] E. Tkalya, “Probability for radiationless excitation of nuclei with electron transition in an atomic shell,” *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **102**, 379–396 (1992).
- [76] G. M. Irwin and K. H. Kim, “Observation of Electromagnetic Radiation from Deexcitation of the ^{229}Th Isomer,” *Phys. Rev. Lett.* **79**, 990–993 (1997).
- [77] D. S. Richardson, D. M. Benton, D. E. Evans, J. A. R. Griffith, and G. Tungeate, “Ultraviolet Photon Emission Observed in the Search for the Decay of the ^{229}Th Isomer,” *Phys. Rev. Lett.* **80**, 3206–3208 (1998).
- [78] S. B. Utter, P. Beiersdorfer, A. Barnes, R. W. Lougheed, J. R. Crespo López-Urrutia, J. A. Becker, and M. S. Weiss, “Reexamination of the Optical Gamma Ray Decay in ^{229}Th ,” *Phys. Rev. Lett.* **82**, 505–508 (1999).
- [79] R. W. Shaw, J. P. Young, S. P. Cooper, and O. F. Webb, “Spontaneous Ultraviolet Emission from $^{233}\text{Uranium}/^{229}\text{Thorium}$ Samples,” *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1109–1111 (1999).
- [80] S. Köhler, R. D. enberger, K. Eberhardt, N. Erdmann, G. Herrmann, G. Huber, J. Kratz, M. Nunnemann, G. Passler, P. Rao, J. Riegel, N. Trautmann, and K. Wendt, “Determination of the first ionization potential of actinide elements by resonance ionization mass spectroscopy,” *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **52**, 717–726 (1997).

- [81] J. Jeet, C. Schneider, S. T. Sullivan, W. G. Rellergert, S. Mirzadeh, A. Cassanho, H. P. Jenssen, E. V. Tkalya, and E. R. Hudson, “Results of a Direct Search Using Synchrotron Radiation for the Low-Energy ^{229}Th Nuclear Isomeric Transition,” *Phys. Rev. Lett.* **114**, 253 001 (2015).
- [82] E. Ruchowska, W. A. Płóciennik, J. Żylicz, H. Mach, J. Kvasil, A. Algora, N. Amzal, T. Bäck, M. G. Borge, R. Boutami, P. A. Butler, J. Cederkäll, B. Cederwall, B. Fogelberg, L. M. Fraile, H. O. U. Fynbo, E. Hagebø, P. Hoff, H. Gausemel, A. Jungclaus, R. Kaczarowski, A. Kerek, W. Kurcewicz, K. Lagergren, E. Nacher, B. Rubio, A. Syntfeld, O. Tengblad, A. A. Wasilewski, and L. Weissman, “Nuclear structure of ^{229}Th ,” *Phys. Rev. C* **73**, 044 326 (2006).
- [83] W. G. Rellergert, D. DeMille, R. R. Greco, M. P. Hehlen, J. R. Torgerson, and E. R. Hudson, “Constraining the Evolution of the Fundamental Constants with a Solid-State Optical Frequency Reference Based on the ^{229}Th Nucleus,” *Phys. Rev. Lett.* **104**, 200 802 (2010).
- [84] G. A. Kazakov, A. N. Litvinov, V. I. Romanenko, L. P. Yatsenko, A. V. Romanenko, M. Schreitl, G. Winkler, and T. Schumm, “Performance of a ^{229}Th solid-state nuclear clock,” *New Journal of Physics* **14**, 083 019 (2012).
- [85] A. Yamaguchi, M. Kolbe, H. Kaser, T. Reichel, A. Gottwald, and E. Peik, “Experimental search for the low-energy nuclear transition in ^{229}Th with undulator radiation,” *New Journal of Physics* **17**, 053 053 (2015).
- [86] V. V. Flambaum, “Enhanced Effect of Temporal Variation of the Fine Structure Constant and the Strong Interaction in ^{229}Th ,” *Phys. Rev. Lett.* **97**, 092 502 (2006).
- [87] C. J. Campbell, A. G. Radnaev, A. Kuzmich, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, and A. Derevianko, “Single-Ion Nuclear Clock for Metrology at the 19th Decimal Place,” *Phys. Rev. Lett.* **108**, 120 802 (2012).
- [88] C. J. Campbell, A. G. Radnaev, and A. Kuzmich, “Wigner Crystals of ^{229}Th for Optical Excitation of the Nuclear Isomer,” *Phys. Rev. Lett.* **106**, 223 001 (2011).
- [89] M. S. Safronova, U. I. Safronova, A. G. Radnaev, C. J. Campbell, and A. Kuzmich, “Magnetic dipole and electric quadrupole moments of the ^{229}Th nucleus,” *Phys. Rev. A* **88**, 060 501 (2013).
- [90] C. E. Bemis, F. K. McGowan, J. L. C. F. Jr, W. T. Milner, R. L. Robinson, P. H. Stelson, G. A. Leander, and C. W. Reich, “Coulomb excitation of states in ^{229}Th ,” *Physica Scripta* **38**, 657–663 (1988).
- [91] G. L. Stukenbroeker and J. R. McNally, “Isotope Shifts in Thorium – Th 230 and Th 232*,” *J. Opt. Soc. Am.* **43**, 36–41 (1953).
- [92] R. Engleman and B. A. Palmer, “Precision isotope shifts for the heavy elements. II. Neutral thorium,” *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 694–701 (1983).
- [93] R. Engleman and B. A. Palmer, “Precision isotope shifts for the heavy elements. III. Singly ionized thorium (Th II),” *J. Opt. Soc. Am. B* **1**, 782–787 (1984).
- [94] E. A. Vernyi and V. N. Egorov, “The isotopes effect in the spectrum of thorium,” *Opt. Spectrosc.* p. 367 (1960).
- [95] V. N. Egorov, “Hyperfine Structure of the Atomic Spectrum and Nuclear Moments of the Thorium Isotope ^{229}Th ,” *Opt. Spectrosc.* p. 301 (1964).
- [96] Gerstenkorn, S., Luc, P., Verges, J., Englekemeir, D.W., Gindler, J.E., and Tomkins, F.S., “Hyperfine structure, magnetic and quadrupole moments of the thorium 229 isotope,” *J. Phys. France* **35**, 483–495 (1974).

- [97] W. Kälber, J. Rink, K. Bekk, W. Faubel, S. Göring, G. Meisel, H. Rebel, and R. C. Thompson, “Nuclear radii of thorium isotopes from laser spectroscopy of stored ions,” *Zeitschrift für Physik A Atomic Nuclei* **334**, 103–108 (1989).
- [98] W. Kälber, G. Meisel, J. Rink, and R. Thompson, “Two-step Optical Excitation for Doppler Linewidth Reduction and Motion Study of Ions Stored in a Paul Trap,” *Journal of Modern Optics* **39**, 335–347 (1992).
- [99] M. V. Okhapkin, D. M. Meier, E. Peik, M. S. Safronova, M. G. Kozlov, and S. G. Porsev, “Observation of an unexpected negative isotope shift in $^{229}\text{Th}^+$ and its theoretical explanation,” *Phys. Rev. A* **92**, 020 503 (2015).
- [100] C. J. Campbell, A. V. Steele, L. R. Churchill, M. V. DePalatis, D. E. Naylor, D. N. Matsukevich, A. Kuzmich, and M. S. Chapman, “Multiply Charged Thorium Crystals for Nuclear Laser Spectroscopy,” *Phys. Rev. Lett.* **102**, 233 004 (2009).
- [101] J. Dembczyński, G. Szawiola, M. Elantkowska, E. Stachowska, and J. Ruczkowski, “Construction of energy matrix for complex atoms in space of $(nd+n's)^{N+2} + \sum_{i,j} nd^{N+2-w_i-w_j} n_i l_i^{w_i} n_j l_j^{w_j}$ (where $w_i + w_j \leq 2$) configurations,” *Phys Scr* **54**, 444–457 (1996).
- [102] J. Dembczyński, W. Ertmer, U. Johann, and P. Unkel, “A new parametrization method for hyperfine interactions. Determination of nuclear quadrupole moments almost free of Sternheimer corrections,” *Z Phys A At Nucl* **321**, 1–13 (1985).
- [103] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of Energy Matrix for Complex Atoms. Part 2,” *Phys Scr* **59**, 49–51 (1999).
- [104] J. Dembczyński, M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and D. Stefańska, “Semi-empirical predictions of even atomic energy levels and their hyperfine structure for the scandium atom,” *At Data Nucl Data Tables* **93**, 149–165 (2007).
- [105] J. Dembczyński, M. Elantkowska, B. Furmann, J. Ruczkowski, and D. Stefańska, “Critical analysis of the methods of interpretation in the hyperfine structure of free atoms and ions: case of the model space $(5d+6s)^3$ of the lanthanum atom,” *J Phys B: At Mol Opt Phys* **43**, 065 001 (2010).
- [106] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part I: General remarks,” *Eur Phys J Plus* **130**, 14 (2015).
- [107] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part II: Explicit formulae for inter-configuration interactions,” *Eur Phys J Plus* **130**, 15 (2015).
- [108] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part III: Excitation of two equivalent electrons from a closed shell into an open shell or an empty shell,” *Eur Phys J Plus* **130**, 83 (2015).
- [109] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part IV: Excitation of one electron from a closed shell into an open shell,” *Eur Phys J Plus* **130**, 170 (2015).
- [110] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part V: Electrostatically correlated spin-orbit and electrostatically correlated hyperfine interactions,” *Eur Phys J Plus* **131**, 47 (2016).
- [111] M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Construction of the energy matrix for complex atoms Part VI: Core polarization effects,” *Eur Phys J Plus* **131**, 429 (2016).

- [112] J. Dembczyński, M. Elantkowska, and J. Ruczkowski, “Method for detecting the isomeric state $I = (3/2)^+$ in ^{229}Th with laser-induced fluorescence,” *Phys Rev A* **92**, 012519 (2015).
- [113] D. Stefańska, M. Elantkowska, J. Ruczkowski, and B. Furmann, “Fine- and hyperfine structure investigations of even configuration system of atomic terbium,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **189**, 441–456 (2017).
- [114] B. Furmann, D. Stefańska, J. Dembczyński, and E. Stachowska, “New electron levels and classified lines in Pr II from hyperfine structure measurements,” *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **93**, 127–137 (2007).
- [115] B. Furmann, D. Stefańska, and J. Dembczyński, “Hyperfine structure analysis odd configurations levels in neutral lanthanum: I. Experimental,” *Physica Scripta* **76**, 264 (2007).
- [116] B. Furmann, J. Ruczkowski, D. Stefańska, M. Elantkowska, and J. Dembczyński, “Hyperfine structure in La II odd configuration levels,” *J Phys B: At Mol Opt Phys* **41**, 215004 (2008).
- [117] B. Furmann, M. Elantkowska, D. Stefańska, J. Ruczkowski, and J. Dembczyński, “Hyperfine structure in La II even configuration levels,” *J Phys B: At Mol Opt Phys* **41**, 235002 (2008).
- [118] B. Furmann, D. Stefańska, and J. Dembczyński, “Experimental investigations of the hyperfine structure in neutral La: II. Even parity levels,” *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **43**, 015001 (2009).
- [119] B. Furmann, D. Stefańska, and J. Dembczyński, “Experimental investigations of the hyperfine structure in neutral La: I. Odd parity levels,” *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **42**, 175005 (2009).
- [120] B. Furmann and D. Stefańska, “Isotope shift and hyperfine structure in even configurations of neutral europium,” *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **44**, 225005 (2011).
<https://doi.org/10.1088/0953-4075/44/22/225005>
- [121] B. Furmann and D. Stefańska, “Experimental determination of core relaxation and screening effects on the wavefunction at a nucleus for stable isotopes of $^{151,153}\text{Eu}$ II,” *The European Physical Journal Special Topics* **222**, 2279 – 2284 (2013).
- [122] B. Furmann and D. Stefańska, “Hyperfine Structure and Isotope Shift Measurements of Unclassified Lines in Eu II and New Determination of the Partition Function,” *J Phys B: At Mol Opt Phys* **46**, 235005 (2013).
- [123] D. Stefańska, M. Suski, A. Zygmunt, J. Stachera, and B. Furmann, “Tunable single-mode cw energy-transfer dye laser directly optically pumped by a diode laser,” *Optics & Laser Technology* **120**, 105673 (2019).
- [124] K. Zimmermann, *Experiments Towards Optical Nuclear Spectroscopy With Thorium-229*, Ph.D. thesis, Leibniz Universität Hannover (2010).
- [125] O.-A. Herrera-Sancho, *Laser excitation of 8-eV electronic states in Th^+ : a first pillar of the electronic bridge toward excitation of the Th-229 nucleus*, Ph.D. thesis, Leibniz Universität Hannover (2012).
- [126] D.-M. Meier, *Electronic level structure investigations in Th^+ in the energy range of the ^{229}Th isomer*, Ph.D. thesis, Leibniz Universität Hannover (2019).
- [127] J. Thielking, *Hyperfine studies of Th-229 in its nuclear ground and isomeric state*, PTB bericht Opt-88 (PTB Braunschweig und Berlin, 2020).

- [128] L. V. der Wense, *On the Direct Detection of ^{229m}Th* , Springer Theses (Springer Nature, 2018).
- [129] B. Seiferle, *Characterization of the ^{229}Th nuclear clock transition*, Ph.D. thesis, LMU München (2019).
- [130] A. Buczek, *Badanie struktury nadsubtelnej atomów Cr i Pr oraz poziomów metatrwałych jonu ^{141}Pr na strumieniu atomowym i w pułapce Paula*, Ph.D. thesis, Katedra Fizyki Atomowej, Politechnika Poznańska, Poznań (2002).
- [131] P. Głowacki, *Badanie struktury nadsubtelnej wybranych pierwiastków z otwartą podpowłoką nd metodami spektroskopii laserowej w katodzie węglowej i na strumieniu atomowym*, Ph.D. thesis, Katedra Inżynierii i Metrologii Kwantowej, Politechnika Poznańska, Poznań (2009).
- [132] R. L. Kurucz, [Online]. Available: <http://kurucz.harvard.edu/atoms>.
- [133] A. Jarosz, *Badanie efektów oddziaływania konfiguracji w strukturze nadsubtelnej atomów chromu i manganu*, Ph.D. thesis, Poznan University of Technology (2000).
- [134] R. D. Cowan, *The Theory of Atomic Structure and Spectra* (Berkeley University of California Press, Berkeley, 1981).
- [135] R. D. Cowan, “Robert D. Cowan’s Atomic Structure Code,” [Online]. Available: <https://www.tcd.ie/Physics/people/Cormac.McGuinness/Cowan/>.
- [136] A. Kramida, “A Suite of Atomic Structure Codes Originally Developed by RD Cowan Adapted for Windows-Based Personal Computers,” National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA (2018).
- [137] N. Huntemann, B. Lipphardt, C. Tamm, V. Gerginov, S. Weyers, and E. Peik, “Improved Limit on a Temporal Variation of m_p/m_e from Comparisons of Yb^+ and Cs Atomic Clocks,” *Phys. Rev. Lett.* **113**, 210 802 (2014).
- [138] C. Degenhardt, H. Stoehr, C. Lisdat, G. Wilpers, H. Schnatz, B. Lipphardt, T. Nazarova, P.-E. Pottie, U. Sterr, J. Helmcke, and F. Riehle, “Calcium optical frequency standard with ultracold atoms: Approaching 10^{-15} relative uncertainty,” *Phys. Rev. A* **72**, 062 111 (2005).
- [139] P. Dessoic, P. Mohn, R. A. Jackson, G. Winkler, M. Schreitl, G. Kazakov, and T. Schumm, “ ^{229}Th -doped calcium fluoride for nuclear laser spectroscopy,” *Journal of Physics: Condensed Matter* **26**, 105 402 (2014).
- [140] E. Peik and M. Okhapkin, “Nuclear clocks based on resonant excitation of γ -transitions,” *Comptes Rendus Physique* **16**, 516–523 (2015).
- [141] T. Sikorsky, J. Geist, D. Hengstler, S. Kempf, L. Gastaldo, C. Enss, C. Mokry, J. Runke, C. E. Düllmann, P. Wobrauschek, K. Beeks, V. Rosecker, J. H. Sterba, G. Kazakov, T. Schumm, and A. Fleischmann, “Measurement of the ^{229}Th Isomer Energy with a Magnetic Microcalorimeter,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 142 503 (2020).
- [142] H. Mack, R. Reisfeld, and D. Avnir, “Fluorescence of rare earth ions adsorbed on porous vycor glass,” *Chemical Physics Letters* **99**, 238–239 (1983).
- [143] K. Binnemans and C. Görller-Walrand, “On the color of the trivalent lanthanide ions,” *Chemical Physics Letters* **235**, 163–174 (1995).
- [144] K. Binnemans, “Interpretation of europium(III) spectra,” *Coordination Chemistry Reviews* **295**, 1–45 (2015).

- [145] M. H. V. Werts, R. T. F. Jukes, and J. W. Verhoeven, “The emission spectrum and the radiative lifetime of Eu^{3+} in luminescent lanthanide complexes,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **4**, 1542–1548 (2002).
- [146] L. Essen, R. W. Donaldson, E. G. Hope, and M. J. Bangham, “Hydrogen Maser Work at the National Physical Laboratory,” *Metrologia* **9**, 128–137 (1973).
- [147] A. Dupays, A. Beswick, B. Lepetit, C. Rizzo, and D. Bakalov, “Proton Zemach radius from measurements of the hyperfine splitting of hydrogen and muonic hydrogen,” *Phys. Rev. A* **68**, 052 503 (2003).
- [148] BIMP, [Online]. Available: <https://www.bipm.org> STANDARD FREQUENCY [SRS] 6.835 GHz – ^{87}Rb (update 2021).
- [149] BIMP, [Online]. Available: <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>.
- [150] A. Golovizin, E. Fedorova, D. Tregubov, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, and N. Kolachevsky, “Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift,” *Nature Communications* **10**, 1724 (8pp.) (2019).
- [151] BIMP, [Online]. Available: <https://www.bipm.org> STANDARD FREQUENCY [SRS] 429 THz – ^{87}Sr .
- [152] T. Bothwell, C. J. Kennedy, A. Aeppli, D. Kedar, J. M. Robinson, E. Oelker, A. Staron, and J. Ye, “Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample,” *Nature* **602**, 420–424 (2022).
- [153] P. Morzyński, M. Bober, D. Bartoszek-Bober, J. Nawrocki, P. Krehlik, L. Śliwczynski, M. Lipiński, P. Masłowski, A. Cygan, P. Dunst, M. Garus, D. Lisak, J. Zachorowski, W. Gawlik, C. Radzewicz, R. Ciuryło, and 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,” *Sci Rep* **5**, 17495 (2015).
- [154] N. Poli, M. Schioppo, S. Vogt, S. Falke, U. Sterr, C. Lisdat, and G. M. Tino, “A transportable strontium optical lattice clock,” *Applied Physics B* **117**, 1107 – 1116 (2014).
- [155] N. D. Lemke, A. D. Ludlow, Z. W. Barber, T. M. Fortier, S. A. Diddams, Y. Jiang, S. R. Jefferts, T. P. Heavner, T. E. Parker, and C. W. Oates, “Spin-1/2 Optical Lattice Clock,” *Phys. Rev. Lett.* **103**, 063 001 (2009).
- [156] N. Poli, Z. W. Barber, N. D. Lemke, C. W. Oates, L. S. Ma, J. E. Stalnaker, T. M. Fortier, S. A. Diddams, L. Hollberg, J. C. Bergquist, A. Bruschi, S. Jefferts, T. Heavner, and T. Parker, “Frequency evaluation of the doubly forbidden $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ transition in bosonic ^{174}Yb ,” *Phys Rev A* **77**, 050 501 (2008).
- [157] J. J. McFerran, L. Yi, S. Mejri, S. Di Manno, W. Zhang, J. Guéna, Y. Le Coq, and S. Bize, “Neutral Atom Frequency Reference in the Deep Ultraviolet with Fractional Uncertainty = 5.7×10^{-15} ,” *Phys. Rev. Lett.* **108**, 183 004 (2012).
- [158] M. Chwalla, J. Benhelm, K. Kim, G. Kirchmair, T. Monz, M. Riebe, P. Schindler, A. S. Villar, W. Hänsel, C. F. Roos, R. Blatt, M. Abgrall, G. Santarelli, G. D. Rovera, and P. Laurent, “Absolute Frequency Measurement of the $^{40}\text{Ca}^+ 4s\ ^2\text{S}_{1/2} - 3d\ ^2\text{D}_{5/2}$ Clock Transition,” *Phys. Rev. Lett.* **102**, 023 002 (2009).
- [159] P. A. Barton, C. J. S. Donald, D. M. Lucas, D. A. Stevens, A. M. Steane, and D. N. Stacey, “Measurement of the lifetime of the $3d^2\text{D}_{5/2}$ state in $^{40}\text{Ca}^+$,” *Phys. Rev. A* **62**, 032 503 (2000).

- [160] A. A. Madej, P. Dubé, Z. Zhou, J. E. Bernard, and M. Gertszov, “ $^{88}\text{Sr}^+$ 445-THz Single-Ion Reference at the 10^{-17} Level via Control and Cancellation of Systematic Uncertainties and Its Measurement against the SI Second,” *Phys. Rev. Lett.* **109**, 203 002 (2012).
- [161] A. A. Madej and J. D. Sankey, “Single, trapped Sr^+ atom: laser cooling and quantum jumps by means of the $4d^2D_{5/2} - 5s^2S_{1/2}$ transition,” *Opt. Lett.* **15**, 634–635 (1990).
- [162] R. Lange, A. A. Peshkov, N. Huntemann, C. Tamm, A. Surzhykov, and E. Peik, “Lifetime of the $^2F_{7/2}$ Level in Yb^+ for Spontaneous Emission of Electric Octupole Radiation,” *Phys. Rev. Lett.* **127**, 213 001 (2021).
- [163] N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, C. Tamm, and E. Peik, “Single-Ion Atomic Clock with 3×10^{-18} Systematic Uncertainty,” *Phys. Rev. Lett.* **116**, 063 001 (2016).
- [164] C. Tamm, N. Huntemann, B. Lipphardt, V. Gerginov, N. Nemitz, M. Kazda, S. Weyers, and E. Peik, “Cs-based optical frequency measurement using cross-linked optical and microwave oscillators,” *Phys. Rev. A* **89**, 023 820 (2014).
- [165] N. Yu and L. Maleki, “Lifetime measurements of the $4f^{14}5d$ metastable states in single ytterbium ions,” *Phys. Rev. A* **61**, 022 507 (2000).
- [166] W. H. Oskay, S. A. Diddams, E. A. Donley, T. M. Fortier, T. P. Heavner, L. Hollberg, W. M. Itano, S. R. Jefferts, M. J. Delaney, K. Kim, F. Levi, T. E. Parker, and J. C. Bergquist, “Single-Atom Optical Clock with High Accuracy,” *Phys. Rev. Lett.* **97**, 020 801 (2006).
- [167] S. A. Diddams, T. Udem, J. C. Bergquist, E. A. Curtis, R. E. Drullinger, L. Hollberg, W. M. Itano, W. D. Lee, C. W. Oates, K. R. Vogel, and D. J. Wineland, “An Optical Clock Based on a Single Trapped $^{199}\text{Hg}^+$ Ion,” *Science* **293**, 825–828 (2001).
- [168] T. Rosenband, D. B. Hume, P. O. Schmidt, C. W. Chou, A. Brusch, L. Lorini, W. H. Oskay, R. E. Drullinger, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker, S. A. Diddams, W. C. Swann, N. R. Newbury, W. M. Itano, D. J. Wineland, and J. C. Bergquist, “Frequency Ratio of Al^+ and Hg^+ Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17^{th} Decimal Place,” *Science* **319**, 1808 – 1812 (2008).
- [169] T. Rosenband, P. O. Schmidt, D. B. Hume, W. M. Itano, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker, K. Kim, S. A. Diddams, J. C. J. Koelemeij, J. C. Bergquist, and D. J. Wineland, “Observation of the $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ Clock Transition in $^{27}\text{Al}^+$,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 220 801 (2007).
- [170] N. Ohtsubo, Y. Li, K. Matsubara, T. Ido, and K. Hayasaka, “Frequency measurement of the clock transition of an indium ion sympathetically-cooled in a linear trap,” *Opt. Express* **25**, 11 725–11 735 (2017).

Attachment No 3

**to the application of Dr. Eng. Przemysław Głowacki
for conducting the procedure qualifying for associate professorship**

**List of scientific achievements constituting a significant contribution
to the development of the discipline physical sciences
(in English)**

**Institute of Materials Research and Quantum Engineering
Faculty of Materials Engineering and Technical Physics
Poznan University of Technology
Piotrowo 3, 60-965 Poznań**

Poznań 2023

Contents

I. ACHIEVEMENTS REFERRED TO IN ARTICLE 219, PARAGRAPH 1 P.2 OF THE ACT OF 20TH JULY 2018 LAW ON HIGHER EDUCATION AND SCIENCE	2
II. SCIENTIFIC ACTIVITY	8
1. Articles published in scientific journals	8
2. Scientific conference contributions	11
3. Information on participation on organizing and scientific committees of domestic or foreign conferences	15
4. Realized research projects	16
5. Membership in international or domestic research organizations and societies	17
6. Research internships	17
7. Membership in editorial committees and scientific councils of journals	20
8. Information on the reviewed research works	20
9. Participation in European programmes or other international programmes	21
10. Participation in application evaluation teams	21
11. Obtained awards	22
12. Training, workshops, courses (self-improvement)	22
III. COOPERATION WITH THE SOCIAL AND ECONOMIC ENVIRONMENT	23
1. List of technological achievements	23
2. Cooperation with the economic sector	23
3. Obtained industrial property rights	23
4. Implemented technologies	23
5. Prepared expert opinions or other studies on request	23
6. Participation in expert and competition teams	23
IV. SCIENTIFIC INFORMATION	24

I. ACHIEVEMENTS REFERRED TO IN ARTICLE 219, PARAGRAPH 1 P.2 OF THE ACT OF 20TH JULY 2018 LAW ON HIGHER EDUCATION AND SCIENCE (JOURNAL OF LAWS OF 2021 ITEM 478 WITH FURTHER AMENDMENTS)

As a scientific achievement corresponding to Article 219, paragraph 1 p.2 of the Act of 20th July 2018 Law on higher education and science (Journal of Laws of 2021 item 478 with further amendments) I hereby indicate a thematically related series of research articles (**H1 - H10**) entitled:

Investigations of the electronic structure of selected elements in terms of applications in optical clocks

For individual publications I quoted the *Impact Factors* of the journals for the publication year, except for the works published after 2021, as well as the number of MEiN (Polish: *Ministerstwo Edukacji i Nauki*) points according to the list of scientific journals and reviewed conference materials from international conferences issued by the Minister of Education and Science, made public in communication of December 1st 2021 (designation * in parenthesis denotes the points from the previous years, in the scale 0-50). I provided information of the number of citations (according to Scopus database) on April 7th 2023. For each publication mentioned I indicated my self-estimated percentage contribution, as well as detailed information concerning my creative participation.

H1	A. Krzykowski, P. Głowacki , <i>Experimental study of radio frequency power broadening in ABMR-LIRF method</i> , Elektronika 6 , 31-34, (2011) https://www.sigma-not.pl	IF: - MEiN: 20(8*) cyt.: 0 (0)
contrib. 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formulation of the problem and research objective 2. Performing of part of the measurements independently, participation in the remaining measurements 3. Evaluation of experimental results, analysis of experimental uncertainties 4. Essential participation in discussion of the results obtained 5. Preparation of the final version of the manuscript, participation in the manuscript correction (correspondence with reviewers) 6. Corresponding author 	

H2	A. Krzykowski, P. Głowacki , A. Jarosz, <i>Precise measurements of the hyperfine structure of the levels belonging to the terms $3d^5 4s^5 G$ and $5P$ in $Cr(I)$,</i> Acta Physica Polonica A 122 , p. 78-81 (2012) doi: 10.12693/APhysPolA.122.78	IF: 0.444 MEiN: 40(15*) cit.: 2 (0)
contrib. 40%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formulation of the problem and research objective: <ul style="list-style-type: none"> • Selection of the levels and transitions for excitation with laser and for the use as fluorescence channels in the method of Laser Induced Fluorescence (LIF) on an atomic beam • Selection of the hyperfine structure components for observation of the signals with the method of optical-microwave double resonance (ABMR-LIRF - Atomic Beam Magnetic Resonance - observed in Laser Induced Resonance Fluorescence) 2. Performing of part of the measurements independently, participation in the remaining measurements 3. Evaluation of experimental results, analysis of experimental uncertainties 4. Essential participation in discussion of the results obtained 5. Preparation of the final version of the manuscript, participation in the manuscript correction (correspondence with reviewers via the corresponding author) 	
H3	P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz, <i>Investigation of the hyperfine structure of electronic levels in chromium atom,</i> European Physical Journal: Special Topics 222 , 2345-2351 (2013) doi: 10.1140/epjst/e2013-02015-x	IF: 1.862 MEiN: 70(30*) cit.: 2 (1)
contrib. 65%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formulation of the problem and research objective: <ul style="list-style-type: none"> • Determination, based on the literature data, for which even-parity electronic levels in the chromium atom the experimental results concerning the constants A and B are lacking, or the results obtained by various authors are inconsistent within the limits of the measurement uncertainties • Selection of the levels and transitions for excitation with laser and for the use as fluorescence channels in the LIF method on an atomic beam • Selection of the hyperfine structure components for observation of the signals with the method of optical-microwave double resonance 2. Performing of part of the measurements independently, participation in the remaining measurements 3. Evaluation of experimental results - calculation of the hyperfine structure constants A and B for the lower (even-parity) and the upper (odd-parity) levels involved in individual lines investigated with LIF method, determination of A and B constants obtained with ABMR-LIRF method, analysis of experimental uncertainties 4. Essential participation in discussion of the results obtained 5. Preparation of the final version of the manuscript, participation in the manuscript correction 6. Corresponding author 	

H4	<p>P. Głowacki, D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, <i>Proposed clock transition in atomic chromium and the possible detection schemes</i>, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 291, 108331 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108331</p>	<p>IF: 2.342 MEiN: 100 cit.: 0 (0)</p>
contrib. 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coordination of the tasks related with the article creation 2. Participation in the development of proposal of a clock transition in the chromium atom and its detection schemes 3. Performing of the experimental investigations jointly with co-authors (service of the atomic beam experimental setup) 4. Analysis of the experimental, as well as theoretical, results 5. Development of the software for visualization of the spectra obtained 6. Visualization of the results obtained (preparation of figures: diagrams of detection schemes, as well as spectra of detection transitions) 7. Discussion of the results obtained 8. Manuscript preparation and correction 9. Corresponding author 	
H5	<p>P. Głowacki, D. Stefańska, M. Elantkowska, J. Ruczkowski, <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. I. Even-parity level system</i>, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 249, 107013 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107013</p>	<p>IF: 2.468 MEiN: 100 cit.: 5 (0)</p>
contrib. 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coordination of the tasks related with the article creation 2. Formulation of the problem and research objective: <ul style="list-style-type: none"> • Determination, based on the literature data, for which even-parity electronic levels in the manganese atom the experimental results concerning the constants A and B are lacking, or the results obtained by various authors are inconsistent within the limits of the measurement uncertainties • Selection of the levels and transitions for excitation with laser and for the use as fluorescence channels in the LIF method on an atomic beam 3. Performing of the experimental investigations jointly with co-authors (service of the atomic beam experimental setup) 4. Analysis of experimental results 5. Essential participation in discussion of the results obtained 6. Manuscript preparation and correction 7. Fund-raising (NCN project No 2019/03/X/ST2/01119) 8. Corresponding author 	

H6	<p>P. Głowacki, D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. II. Odd-parity level system,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 253, 107138 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107138</p>	<p>IF: 2.468 MEiN: 100 cit.: 4 (0)</p>
contrib. 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coordination of the tasks related with the article creation 2. Formulation of the problem and research objective: <ul style="list-style-type: none"> • Determination, based on the literature data, for which odd-parity electronic levels in the manganese atom the experimental results concerning the constants A and B are lacking, or the results obtained by various authors are inconsistent within the limits of the measurement uncertainties • Selection of the levels and transitions for excitation with laser and for the use as fluorescence channels in the LIF method on an atomic beam 3. Performing of the experimental investigations jointly with co-authors (service of the atomic beam experimental setup) 4. Analysis of experimental results 5. Essential participation in discussion of the results obtained 6. Manuscript preparation and correction 7. Fund-raising (NCN project No 2019/03/X/ST2/01119) 8. Corresponding author 	
H7	<p>P. Głowacki, D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, <i>Estimation of radiative parameters for atomic manganese from the point of view of possible clock transitions and laser cooling schemes,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 276, 107898 (2021) doi: 10.1016/j.jqsrt.2021.107898</p>	<p>IF: 2.342 MEiN: 100 cit.: 2 (0)</p>
contrib. 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coordination of the tasks related with the article creation 2. Participation in the development of proposals of clock transitions in the manganese atom, as well as laser cooling schemes 3. Development of the software for visualization of the hyperfine structure of forbidden transitions, as well as cooling transitions 4. Visualization of the results obtained (preparation of figures: laser cooling schemes, as well as simulation of the diagrams for clock transitions and cooling transitions) 5. Discussion of the results obtained 6. Manuscript preparation and correction 7. Fund-raising (NCN project No 2019/03/X/ST2/01119) 8. Corresponding author 	

H8	<p>P. Głowacki, D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, M. Chomski, B. Furmann, <i>Hyperfine structure investigations of Mn I</i>, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 287, 108245 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108245</p>	<p>IF: 2.342 MEiN: 100 cit.: 2 (0)</p>
contrib. 50%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coordination of the tasks related with the article creation 2. Formulation of the problem and research objective: <ul style="list-style-type: none"> • Determination, based on the literature data, for which odd-parity electronic levels in the manganese atom the experimental results concerning the constants A and B are lacking, or the results obtained by various authors are inconsistent within the limits of the measurement uncertainties • Selection of the levels and transitions for excitation with laser and for the use as fluorescence channels in the LIF method in a hollow cathode discharge lamp 3. Performing of experimental investigations jointly with co-authors 4. Analysis of experimental results 5. Essential participation in discussion of the results obtained 6. Manuscript preparation and correction 7. Fund-raising (NCN project No 2019/03/X/ST2/01119) 8. Corresponding author 	
H9	<p>J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik, <i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th</i>, Nature 556, 321-325 (2018) doi: 10.1038/s41586-018-0011-8</p>	<p>IF 43.070 MEiN: 200(50*) cit.: 76 (74)</p>
contrib. 20%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modification of the measurement setup in Maier-Leibnitz Laboratorium belonging to LMU in Munich, in terms of spectroscopic investigations (design of vacuum components - electrical feedthroughs, optical-mechanical feedthroughs for photomultipliers, design of photomultiplier holders, design of construction of opto-mechanical platforms, selection of adequate vacuum windows with appropriate anti-reflection coatings) 2. Participation in construction of the stabilization system for the wavemeter, based on absorption line of the rubidium atom $\lambda = 780$ nm (so called rubidium cell) 3. Participation in performing of the measurements (both in the laboratory of PTB Braunschweig, as well as LMU Munich) 4. Participation in evaluation of the results, performing of the spectra analysis with a method alternative as compared to the one applied by Johannes Thielking, yielding results in full agreement with that method; determination of the hyperfine structure constants for investigated electronic levels of the thorium ion in the ground and the excited state of the nucleus, isotope and isomer shifts; additionally a quantitative estimation of production of thorium ions in the isomeric state (2,1(5)%) in the process of decay of uranium isotope ^{233}U was performed 5. Essential participation in discussion of the results obtained 6. Participation in manuscript preparation, manuscript correction (correspondence with reviewers via the corresponding author) 	

H10	<p>P. Głowacki, E. Peik, <i>Fluorescence properties of ions adsorbed from aqueous solutions on fused silica and CaF₂ - test cases of Eu³⁺ and Tb³⁺</i>, Journal of Luminescence 247, 118865 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108331</p>	<p>IF 4.171 MEiN: 100 cit.: 0 (0)</p>
<p>contrib. 75%</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formulation of the problem and research objective <ul style="list-style-type: none"> • Selection of the elements for tests of the method of thin layer deposition on crystalline surfaces • Selection of light sources for excitation of transitions in the ions of selected elements (relevant high-power LEDs) 2. Construction of the measurement apparatus (for recording of fluorescence spectra, as well as measurements of fluorescence decay times) 3. Preparation of samples for investigations 4. Performing of experimental investigations 5. Analysis of experimental results (development of the program for analysis of fluorescence decay curves, as well as the program for data visualization, in Python programming environment) 6. Essential participation in discussion of the results obtained 7. Manuscript preparation and correction 8. Corresponding author 	

Summary

Corresponding author [H1, H3-H8, H10], first author [H3-H8, H10].

Cumulative *Impact Factor* of the publications H1-H10: **IF = 61.494** ($IF_{5year} = 64.589$).

Cumulative number of MEiN points for the publications H1-H10: **930** (103*¹).

Number of citations (no self-citations) according to Scopus database: 95 (78).

¹the works H1-H3, H9 published until 2018 - number of points according to the relevant MNiSW list, scale 0 - 50 p.

II. SCIENTIFIC ACTIVITY

1. Articles published in scientific journals

For individual publications I quoted the *Impact Factors* of the journals for the publication year, except for the works published after 2021, as well as the number of MEiN (Polish: *Ministerstwo Edukacji i Nauki*) points according to the list of scientific journals and reviewed conference materials from international conferences issued by the Minister of Education and Science, made public in communication of December 1st 2021 (designation * in parenthesis denotes the points from the previous years, in the scale 0-50). I provided information of the number of citations (according to Scopus database) on April 7th 2023.

Post-doctoral publications		\sum IF: 94.792 \sum MEiN: 2110(*353) \sum cit.: 207 (181)
1. [A1]	M. Suski, B. Furmann, M. Chomski, S. Mieloch, P. Głowacki , D. Stefańska and <i>Hyperfine structure investigations of the odd-parity electronic levels of the terbium atom</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 298 , 108492 (2023) doi: 10.1016/j.jqsrt.2023.108492	IF: 2.342 MEiN: 100 cyt.: 0 (0)
2. [A2]	M. Chomski, B. Furmann, M. Suski, P. Głowacki , D. Stefańska and S. Mieloch <i>Determination of the energies of new electronic levels of the holmium atom and investigation of their hyperfine structure</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 297 , 108480 (2023) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108480	IF: 2.342 MEiN: 100 cit.: 0 (0)
3. [A3]	M. Elantkowska, J. Ruczkowski, P. Głowacki , D. Stefańska <i>Semi-empirical studies on odd parity levels system of manganese atom in multiconfiguration approximation</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 292 , 108347 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108347	IF: 2.342 MEiN: 100 cit.: 0 (0)
4. [H4]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Proposed clock transition in atomic chromium and the possible detection schemes</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 291 , 108331 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108331	IF: 2.342 MEiN: 100 cit.: 0 (0)
5. [H10]	P. Głowacki , E. Peik <i>Fluorescence properties of ions adsorbed from aqueous solutions on fused silica and CaF₂ - test cases of Eu³⁺ and Tb³⁺</i> , Journal of Luminescence 247 , 118865 (2022) doi: 10.1016/j.jlum.2022.118865	IF: 4.171 MEiN: 100 cit.: 0 (0)
6. [H8]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, M. Chomski, B. Furmann <i>Hyperfine structure investigations of Mn I</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 287 , 108245 (2022) doi: 10.1016/j.jqsrt.2022.108245	IF: 2.342 MEiN: 100 cit.: 2 (1)
7. [H7]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Estimation of radiative parameters for atomic manganese from the point of view of possible clock transitions and laser cooling schemes</i> , Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 276 , 107898 (2021) doi: 10.1016/j.jqsrt.2021.107898	IF: 2.342 MEiN: 100 cit.: 2 (0)

8. [H6]	P. Głowacki , D. Stefańska, J. Ruczkowski, M. Elantkowska <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. II. Odd-parity level system,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 253 , 107138 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107138	IF: 2.468 MEiN: 100 cit.: 4 (0)
9. [H5]	P. Głowacki , D. Stefańska, M. Elantkowska, J. Ruczkowski <i>Hyperfine structure studies of the electronic levels of the manganese atom. I. Even-parity level system,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 249 , 107013 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.107013	IF: 2.468 MEiN: 100 cit.: 5 (0)
10. [A10]	D. Stefańska, B. Furmann, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, P. Głowacki , M. Chomski, M. Suski, S. Wilman <i>Investigations of the possible second-stage laser cooling transitions for the holmium atom magneto-optical trap,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 246 , 106915 (2020) doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.106915	IF: 2.468 MEiN: 100 cit.: 3 (2)
11. [A11]	D.-M. Meier, J. Thielking, P. Głowacki , M. V. Okhapkin, R. A. Müller, A. Surzhykov, and E. Peik <i>Electronic level structure of Th^+ in the range of the ^{229m}Th isomer energy,</i> Physical Review A 99 , 052514 (2019) doi: 10.1103/PhysRevA.99.052514	IF: 2.777 MEiN: 100(*35) cit.: 6 (6)
12. [H9]	J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf and E. Peik <i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> Nature 556 , 321-325 (2018) doi: 10.1038/s41586-018-0011-8	IF: 43.070 MEiN: 200(*50) cit.: 78 (76)
13. [A13]	M. S. Safronova, S. G. Porsev, M. G. Kozlov, J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, E. Peik <i>Electronic level structure of Th^+ in the range of the ^{229m}Th isomer energy,</i> Physical Review Letters 121 , 213001 (2018) doi: 10.1103/PhysRevLett.121.213001	IF: 9.277 MEiN: 200(*45) cit.: 11 (11)
14. [A14]	R. A. Müller, A. V. Maiorova, S. Fritzsche, A. V. Volotka, R. Beerwerth, P. Głowacki , J. Thielking, D-M Meier, M. Okhapkin, E. Peik, and A. Surzhykov <i>Hyperfine interaction with the ^{229}Th nucleus and its low-lying isomeric state,</i> Physical Review A 98 , 020503(R) (2018) doi: 10.1103/PhysRevA.98.020503	IF: 2.907 MEiN: 100(*35) cit.: 10 (9)
15. [A15]	D. Stefańska, B. Furmann and P. Głowacki <i>Possibilities of investigations of the temporal variation of the α constant in the holmium atom,</i> Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 213 159-168 (2018) doi: 10.1016/j.jqsrt.2018.04.017	IF: 2.600 MEiN: 100(*35) cyt.: 10 (9)
16. [A16]	K. Szymaniec, S. N. Lea, K. Gibble, S. E. Park, K. Liu and P. Głowacki <i>NPL Cs fountain frequency standards and the quest for the ultimate accuracy,</i> Journal of Physics: Conference Series 723 , 012003 (2016) doi: 10.1088/1742-6596/723/1/012003	IF: — MEiN: 40(*0) cit.: 20 (20)

17. [A17]	B. Gamper, P. Głowacki , I. Siddiqui, J. Dembczyński, L. Windholz <i>New even-parity fine structure levels of the Lanthanum atom discovered by means of optogalvanic spectroscopy</i> , Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 47 , 165001(13pp), (2014) doi: 10.1088/0953-4075/47/16/165001	IF: 1.792 MEiN: 70(*30) cit.: 18 (18)
18. [A18]	L. Windholz, B. Gamper, P. Głowacki , J. Dembczyński <i>The Puzzle of the La I Lines 6520.644 Å and 6519.869 Å</i> , Spectral Analysis Reviews, 2 , 10-18, (2014) doi: 10.4236/sar.2014.23024	IF: — MEiN: — cit.: 0 (0)
19. [H3]	P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz <i>Investigation of the hyperfine structure of electronic levels in chromium atom</i> , European Physical Journal: Special Topics 222 , 2345-2351 (2013) doi: 10.1140/epjst/e2013-02015-x	IF: 1.862 MEiN: 70(*30) cit.: 2 (1)
20. [A20]	B. Arcimowicz, J. Dembczyński, P. Głowacki , J. Ruczkowski, M. Elantkowska, G. H. Guthöhrlein, L. Windholz <i>Progress in the analysis of the even parity configurations of tantalum atom</i> , European Physical Journal: Special Topics 222 , 2085-2102 (2013) doi: 10.1140/epjst/e2013-01988-6	IF: 1.862 MEiN: 70(*30) cit.: 8 (8)
21. [A21]	O. A. Herrera-Sancho, M. V. Okhapkin, K. Zimmermann, Chr. Tamm, E. Peik, A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, P. Głowacki <i>Two-photon laser excitation of trapped $^{232}\text{Th}^+$ ions via the 402-nm resonance line</i> , Physical Review A 85 : 033402 (2012) doi: 10.1103/PhysRevA.85.033402	IF: 3.042 MEiN: 100(*40) cit.: 26 (22)
22. [H2]	A. Krzykowski, P. Głowacki , A. Jarosz <i>Precise measurements of the hyperfine structure of the levels belonging to the terms $3d^5 4s^5 G$ and $5P$ in $\text{Cr}(I)$</i> , Acta Physica Polonica A 122 , p. 78-81 (2012) doi: 10.12693/APhysPolA.122.78	IF: 0.444 MEiN: 40(*15) cit.: 2 (0)
23. [H1]	A. Krzykowski, P. Głowacki <i>Experimental study of radio frequency power broadening in ABMR-LIRF method</i> , Elektronika 6 : 31-34 (2011) https://www.sigma-not.pl	IF: — MEiN: 20(*8) cit.: 0 (0)
Publications before the doctorate		\sum IF: 3.832 \sum MEiN: 130(*63) \sum cit.: 18 (13)
24. [A24]	P. Głowacki , Z. Uddin, G. H. Guthöhrlein, L. Windholz, J. Dembczyński <i>Study of the hyperfine structure of Ta I lines based on Fourier transform spectra and laser-induced fluorescence</i> , Physica Scripta 80 : 025301-025310 (2009) doi: 10.1088/0031-8949/80/02/025301	IF: 1.204 MEiN: 40(*25) cit.: 5 (4)
25. [A25]	A. Jarosz, D. Stefańska, M. Elantkowska, J. Ruczkowski, A. Buczek, B. Furmann, P. Głowacki , A. Krzykowski, Ł. Piątkowski, E. Stachowska, J. Dembczyński <i>High precision investigations of the hyperfine structure of metastable levels in chromium atom</i> , Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 40 : 2785-2797 (2007) doi: 10.1088/0953-4075/40/13/019	IF: 1.875 MEiN: 70(*30) cit.: 13 (9)

26. [A26]	A. Jarosz, A. Buczek, B. Furmann, D. Stefańska, P. Głowacki , Ł. Piątkowski, J. Dembczyński <i>Physical aspects of precision of the measurements with the method of optical-rf double resonance on an atomic beam</i> , Elektronika 5: 30-33 (2006) https://www.sigma-not.pl	IF: — MEiN: 20(*8) cit.: 0 (0)
All publications		\sum IF: 98.624 \sum MEiN: 2240(*416) \sum cit.: 225 (194)

The remaining part of my publication achievements are reviewed post-conference publications, which I list below, with continued numbering of the works. This list includes only works published before obtaining the doctoral degree.

27. [A27]	P. Głowacki , A. Krzykowski, L. Windholz <i>The determination a new energy level of the neutral tantalum atom by the LIF method</i> , II International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists - Proceedings, (2009) p. 360-366	
28. [A28]	P. Głowacki , A. Krzykowski <i>Construction and optimization of the tantalum hollow cathode lamp for investigation of the hyperfine structure by laser spectroscopy methods</i> , I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists - Proceedings, (2008) p. 34-39	

2. Scientific conference contributions

Below I present the list of my works presented at scientific conferences. At the co-authors' lists the names of the presenting authors are underlined (for clarity I marked the positioned, which I presented personally, with gray background). Positions K1 to K30 are the post-doctoral conference communications, K31 to K36 - before the doctorate.

No	City / country	Name of the conference	Title of presentation / authors	Date
K1	Poznań Poland	II webinar of Polish Vacuum Society	<i>Vacuum techniques in the service of quantum time and frequency standards</i> , invited talk <u>P. Głowacki</u>	15.10.2021
K2	Zielona Góra Poland	WCPP'19	<i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th</i> , oral presentation J. Thielking, M. V. Okhapkin, <u>P. Głowacki</u> , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik	14.10.2019 — 17.10.2019

K3	Cracow Poland	45 ZFP	<i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> oral presentation J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik	13.09.2019 — 18.09.2019
K4	Rostock Germany	83 rd DPG Spring Meeting 2019 (SAMOP)	<i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> poster J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik	10.03.2019 — 15.03.2019
K5	Cracow Poland	50 th EGAS	<i>Possibilities of investigations of the temporal variation of the constant α in atomic holmium,</i> poster D. Stefańska, B. Furmann, P. Głowacki	09.07.2018 — 13.07.2018
K6	Bad Honnef Germany	676. WE-Heraeus-Seminar “Novel optical clocks in atoms and nuclei”	<i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> poster J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D. M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik	09.07.2018 — 12.07.2018
K7	Bad Honnef Germany	676. WE-Heraeus-Seminar “Novel optical clocks in atoms and nuclei”	<i>Luminescence study of Ln(III) ions adsorbed on a CaF_2 surface as supplementary investigation for searching the isomeric transition in ^{229}Th solid samples,</i> poster P. Głowacki , E. Peik	09.07.2018 — 12.07.2018
K8	Turin Italy	32 nd EFTF	<i>Towards laser excitation of the Th-229 nuclear clock isomer,</i> invited talk D. M. Meier, J. Thielking, P. Głowacki , M. V. Okhapkin, E. Peik	10.04.2018 — 12.04.2018
K9	Erlangen Germany	82 nd DPG Spring Meeting 2018 (SAMOP)	<i>Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer ^{229m}Th,</i> poster J. Thielking, M. V. Okhapkin, P. Głowacki , D-M. Meier, L. von der Wense, B. Seiferle, Ch. E. Düllmann, P. G. Thirolf, E. Peik	04.03.2018 — 09.03.2018
K10	Erlangen Germany	82 nd DPG Spring Meeting 2018 (SAMOP)	<i>Electronic level structure investigations in Th^+ and nuclear properties of ^{229m}Th,</i> poster D-M. Meier, J. Thielking, P. Głowacki , M. V. Okhapkin, E. Peik	04.03.2018 — 09.03.2018
K11	Montreal Canada	32 nd URSI GASS	<i>Search for laser excitation of the low-energy isomer in ^{229}Th and the nuclear optical clock,</i> invited talk E. Peik, D-M. Meier, J. Thielking, P. Głowacki , M. V. Okhapkin	19.08.2017 — 26.08.2017

K12	Mainz Germany	81 st DPG Spring Meeting 2017 (SAMOP)	<i>Laser spectroscopic investigation of singly and doubly charged thorium ions,</i> poster J. Thielking, D-M. Meier, P. Głowacki , M. V. Okhapkin, E. Peik	06.03.2017 — 10.03.2017
K13	Poznań Poland	X International Workshop LASER2016	<i>Laser spectroscopic investigations of singly and doubly charged thorium ions,</i> poster J. Thielking, D-M. Meier, P. Głowacki , M. V. Okhapkin, E. Peik	16.05.2016 — 19.05.2016
K14	Potsdam Germany	8 th Symposium FSM	<i>NPL Cs fountain frequency standards - reaching the ultimate accuracy,</i> oral presentation K. Szymaniec, S. N. Lea, K. Gibble, S. E. Park, K. Liu, P. Głowacki	12.10.2015 — 16.10.2015
K15	Denver USA	IFCS-EFTF Conference	<i>Primary frequency standard NPL-CsF3: first results,</i> poster S. N. Lea, P. Głowacki , A. Acharya, K. Liu, G. Marra, L. A. M. Johnson, S. Kyriacou, S. A. King, R. A. Williams, H. S. Margolis, K. Gibble, K. Szymaniec	12.04.2015 — 16.04.2015
K16	Denver USA	IFCS-EFTF Conference	<i>GPS-based frequency comparison of ¹⁷¹Yb⁺ ion optical clocks at PTB and NPL,</i> poster N. Huntemann, B. Lipphardt, Chr. Tamm, R. M. Godun, J. M. Jones, S. A. King, H. S. Margolis, P. B. R. Nisbet-Jones, V. Gerginov, S. Weyers, P. Głowacki , S. N. Lea, K. Szymaniec, J. Leute, P. Whibberley, A. Wallin, M. Merimaa, P. Gill, E. Peik	12.04.2015 — 16.04.2015
K17	Poznań Poland	3 rd QUEINO 2013 at UAM	<i>Spectroscopic investigations of the atomic structure in support of quantum engineering and metrology,</i> invited talk P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz, O. A. Herrera-Sancho, M. V. Okhapkin, E. Peik	15.10.2013 — 17.10.2013
K18	Mons Belgium	11 th ASOS	<i>Investigation of the hyperfine-resolved spectrum of Lanthanum by Fourier-transform and laser spectroscopy,</i> poster B. Gamper, P. Głowacki , I. Siddiqui, F. Güzelcimen, Gö. Basar, M. Tamanis, A. Kruzins, R. Ferber, J. Dembczyński, S. Kröger, L. Windholz	05.08.2013 — 09.08.2013
K19	Hannover Germany	77 th DPG Spring Meeting 2013 (SAMOP)	<i>The puzzle of the La line 6520.77 Å,</i> oral presentation L. Windholz, B. Gamper, P. Głowacki , J. Dembczyński	18.03.2013 — 22.03.2013
K20	Jurata Poland	VII th Workshop on Atomic and Molecular Physics	<i>Investigation of the hyperfine structure of electron levels in chromium atom,</i> poster P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz	10.09.2012 — 14.09.2012

K21	Jurata Poland	VII th Workshop on Atomic and Molecular Physics	<i>The hyperfine structure measurements of the odd electron levels in scandium atom,</i> poster <u>A. Krzykowski</u> , P. Głowacki	10.09.2012 — 14.09.2012
K22	Göteborg Sveden	44 th EGAS	<i>Critical analysis of the methods of interpretation in the hyperfine structure for the chromium atom,</i> poster P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz, J. Ruczkowski, M. Elantkowska, J. Dembczyński	09.07.2012 — 13.07.2012
K23	Stuttgart Germany	76 th DPG Spring Meeting 2012 (SAMOP)	<i>Parametrization of the transition probabilities in Th II,</i> poster P. Głowacki , J. Dembczyński, M. Elantkowska, J. Ruczkowski	12.03.2012 — 16.03.2012
K24	Fribourg Switzerland	43 th EGAS	<i>Analysis of the odd parity configurations of tantalum atom - revisited,</i> poster B. Arcimowicz, <u>J. Dembczyński</u> , P. Głowacki , M. Elantkowska, J. Ruczkowski, G. H. Guthöhrlein, L. Windholz	28.06.2011 — 02.07.2011
K25	Fribourg Switzerland	43 th EGAS	<i>High resolution spectroscopy of chromium atom,</i> poster <u>A. Krzykowski</u> , P. Głowacki , J. Dembczyński	28.06.2011 — 02.07.2011
K26	Poznań Poland	International Conference on Quantum Metrology 2011	<i>Experimental study of the radio frequency power broadening in ABMR-LIRF method,</i> poster A. Krzykowski, P. Głowacki	11.05.2011 — 13.05.2011
K27	Dresden Germany	75 th DPG Spring Meeting 2011 (SAMOP)	<i>Investigation of the hfs splittings in chromium atom by LIF and ABMR-LIRF methods,</i> poster A. Krzykowski, P. Głowacki , A. Jarosz, J. Dembczyński	13.03.2011 — 18.03.2011
K28	Salamanca Spain	ECAMP X	<i>Investigation of the hyperfine structure of elements with open 3d shell,</i> poster <u>A. Krzykowski</u> , P. Głowacki , D. Stefańska, J. Dembczyński	04.07.2010 — 10.07.2010
K29	Toruń Poland	VIII Congress Societas Humboldtiana Polonorum	<i>Study of the hyperfine structure of the atoms of 3d elements by ABMR-LIRF method,</i> poster P. Głowacki	27.06.2010 — 30.06.2010
K30	Hannover Germany	74 th DPG Spring Meeting 2010 (SAMOP)	<i>Systematic study of the hfs splittings for 3d elements by ABMR-LIRF method,</i> oral presentation P. Głowacki , A. Krzykowski, A. Jarosz, D. Stefańska, J. Dembczyński	08.03.2010 — 12.03.2010

K31	Gdańsk Poland	41 st EGAS	<i>Investigation of the hyperfine structure of Ta I-lines by laser-induced fluorescence,</i> poster P. Głowacki , J. Dembczyński, L. Windholz	08.07.2009 — 11.07.2009
K32	Poznań Poland	II International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists	<i>The determination a new energy level of the neutral tantalum atom by the LIF method,</i> oral presentation P. Głowacki , A. Krzykowski, L. Windholz	20.05.2009 — 22.05.2009
K33	Graz Austria	40 th EGAS	<i>Investigation of the hyperfine structure of Ta I-lines,</i> poster P. Głowacki , L. Windholz, J. Dembczyński	02.07.2008 — 05.07.2008
K34	Poznań Poland	I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists	<i>Construction and optimization of the tantalum hollow cathode lamp for investigation of the hyperfine structure by laser spectroscopy methods,</i> oral presentation P. Głowacki , A. Krzykowski	17.04.2008 — 18.04.2008
K35	Naples Italy	38 th EGAS	<i>Investigations of the hyperfine structure of metastable levels in chromium atom,</i> poster A. Jarosz, A. Buczek, B. Furmann, P. Głowacki , M. Elantkowska, J. Ruczkowski, E. Stachowska, D. Stefańska, Ł. Piątkowski, J. Dembczyński	07.06.2006 — 10.06.2006
K36	Poznań Poland	International Conference on Quantum Metrology 2006	<i>Investigations of the hyperfine structure of metastable levels in chromium atom,</i> poster A. Jarosz, A. Buczek, B. Furmann, D. Stefańska, P. Głowacki , Ł. Piątkowski, J. Dembczyński	09.05.2006 — 10.05.2006

3. Information on participation on organizing and scientific committees of domestic or foreign conferences

none

4. Realized research projects

Post-doctoral research projects

Country	Institution supervising the project	Title / Number / Institution	Realization year / role in the project
Poland	Poznan University of Technology	„Preliminary research of the hyperfine structure in the manganese atom in terms of applications in quantum metrology and engineering” (Polish: <i>Wstępne badania struktury nadsubtelnej w atomie manganu pod kątem zastosowań w kwantowej metrologii i inżynierii</i>) 2019/03/X/ST2/01119 competition Miniatura-3 National Science Center in Cracow domestic project	2019 -2020 principal investigator
Germany Austria Finland	Technical University in Wien PTB Braunschweig LMU Munich RKU Heidelberg Jyvaskylan Yliopisto MPIK Heidelberg MPQ Garching TOPTICA Photonics AG	<i>Towards a nuclear clock with Thorium-229</i> nuClock 664732 European Union’s Horizon 2020 Research and Innovation Programme H2020-EU.1.2. - EXCELLENT SCIENCE - Future and Emerging Technologies (FET) international project co-financed by funds of European Union	2015 -2019 co-investigator (2015-2017)
Poland	Poznan University of Technology	<i>Procedure of computer design of the nuclear frequency standard</i> (Polish: <i>Procedura komputerowego projektowania nuklearnego wzorca częstotliwości</i>) N N519 650740 National Science Center in Cracow domestic project	2011 -2014 auxiliary co-investigator
Poland Germany	Poznan University of Technology PTB Braunschweig	<i>The measurement of the multilevel dynamics in laser excitation of trapped Th⁺</i> COST-STSM-ECOST-STSM-MP1001-040711-007320 COST project, action IOP1001 - Ion Trap for Tomorrow’s Applications (Polish: <i>Pułapka jonowa do przyszłych zastosowań</i>) European Cooperation in Science and Technology for UE Framework Programmes international project co-financed by funds of European Union	2011 principal investigator

Research projects before the doctorate

Poland	Poznan University of Technology	<i>A complete package of programs for description of the structure of complex atoms, as well as determination of its attributes on the basis of experimental databases (Polish: Kompletny pakiet programów do opisu struktury atomów złożonych oraz określenie jej atrybutów na podstawie baz danych doświadczalnych)</i> N519 033 32/4065 Ministry of Science and Higher Education domestic project	2007 -2010 auxiliary co-investigator
Poland Austria	Poznan University of Technology Technical University Graz	Cooperation in Science and Technology Austria-Poland WTZ PL07/2007 international project	2008 co-investigator

5. Membership in international or domestic research organizations and societies

none

6. Research internships

Post-doctoral research internships

Date	Internships information
01/2015 - 12/2017	<p>PTB Braunschweig, Germany (PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt) Time and Frequency Department Faculty of Optics Mentor: Dr. Sci. Ekkehard Peik, Prof. PTB (h-index = 32) (post-doctoral internship) <u>The aim of internship:</u> Participation in pioneering research on the implementation of optical nuclear clock, both in research on trapped ions Th^+, Th^{2+}, Th^{3+} in linear traps, as well as on the concept of its implementation based on a crystal bulk-doped with Th^{4+} ions, eg. $(\text{CaF}_2:\text{Th}^{4+})$, or in a simpler version - a surface-doped crystal. Participation in the nuClock 664732 project financed under the Horizon 2020 Program of the European Union The measurable outcome of the internship are the articles [H9, H10, A11, A13, A14] , as well as conference contributions [K2-K4, K6-K13].</p>

05/2014 - 12/2014	<p>NPL Teddington, Great Britain (NPL National Physical Laboratory) Time and Frequency Group of the Time, Quantum and Electromagnetics (TQEM) Division Mentor: Dr. Sci. Krzysztof Szymaniec (h-index = 14) (post-doctoral internship) <u>The aim of internship:</u> Participation in works related to the original frequency standard - NPL-CsF2 caesium fountain (maintenance and evaluation of the standard), participation in works on the new frequency standard - NPL-CsF3 caesium fountain. The measurable outcome of the internship is the article [A16], as well as conference contributions [K14-K16].</p>
07/2013	<p>PTB Braunschweig, Germany (PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt) Time and Frequency Department Faculty of Optics Mentor: Dr. Sci. Ekkehard Peik, Prof. PTB (h-index = 32) (post-doctoral internship) <u>The aim of internship:</u> Participation in current studies of Th⁺ trapped ions in a linear trap, becoming familiar with the current state of the experimental setup, preparing an application Marie Curie Intra-European Fellowships for Career Development (IEF), competition FP7-PEOPLE-IEF-2013 No SEP-210111460: "Nuclear Optical Clock with Th-229".</p>
07/2012 - 08/2012	<p>Technical University of Graz, Austria Institute of Experimental Physics Mentor: Dr. Sci. Laurentius Windholz, Prof. TU Graz (h-index = 22) (post-doctoral internship) <u>The aim of internship:</u> „<i>Lifelong Learning Program</i>” – <i>Erasmus</i> Staff Training Mobility. Program of European Union The aim of the training was to familiarize with the construction and operation of the titanium-sapphire laser system and its application in laser spectroscopy experiments. In addition, the training included gaining knowledge about the design and construction of a new type of mirror holder for the ring laser resonator: dye or titanium-sapphire. The measurable outcome of the internship are the articles [A17,A18], as well as conference contributions [K18-K19].</p>
07/2011	<p>PTB Braunschweig, Germany (PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt) Time and Frequency Department Faculty of Optics Mentor: Dr. Sci. Ekkehard Peik, Prof. PTB (h-index = 32) (post-doctoral internship) <u>The aim of internship:</u> Project COST, action IOP1001 - <i>Ion Trap for Tomorrow's Application</i> European Scientific and Technical Cooperation for the EU Framework Programmes research on Th⁺ ions trapped in a line trap as part of the project. The measurable outcome of the internship is the article [A21].</p>

07/2010 10/2010	-	<p>PTB Braunschweig, Germany (PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt) Time and Frequency Department Faculty of Optics Mentor: Dr. Sci. Ekkehard Peik, Prof. PTB (h-index = 32) (post-doctoral internship) <u>The aim of internship:</u> construction of the experimental setup of a hollow cathode discharge lamp for the study of Th⁺ ions, participation in the study of Th⁺ ions trapped in a linear trap. The measurable outcome of the internship is the article [A21].</p>
--------------------	---	--

Research internships before the doctorate

10/2008 11/2008	-	<p>Technical University of Graz, Austria Institute of Experimental Physics Mentor: Dr. Sci. Laurentius Windholz, Prof. TU Graz (h-index = 22) (post-doctoral internship) <u>The aim of internship:</u> „<i>Lifelong Learning Program</i>” – <i>Erasmus</i> Staff Training Mobility. Program of European Union Presentation of lectures for 3rd degree students (PhD students) entitled <i>Laser spectroscopy - selected problems</i>, performing measurements of tantalum atom spectral lines on the experimental setup of a hollow cathode discharge lamp. The measurable outcome of the internship is the article [A24].</p>
04/2008 07/2008	-	<p>Technical University of Graz, Austria Institute of Experimental Physics Mentor: Dr. Sci. Laurentius Windholz, Prof. TU Graz (h-index = 22) (post-doctoral internship) <u>The aim of internship:</u> realization of international project: Research-Technical Collaboration Austria-Poland (German: <i>Wissenschaftlich-Technische Zusammenarbeit Österreich-Polen</i>) WTZ PL07/2007 Performing measurements of tantalum atom spectral lines on the experimental setup of a hollow cathode discharge lamp. The measurable outcome of the internship are the articles [A24, A27], as well as conference contributions [K33,K34].</p>
03/2003 07/2003	-	<p>Technical University of applied Sciences, Wildau, Germany Mentor: Prof. Dr. hab. Astra Richter (h-index = 21) (internship) students exchange <i>Socrates/Erasmus</i> participation in IQN (International Quality Network - semiconductors, biomaterials, nanotechnologies) courses Program of European Union</p>
Summary		In total, almost 5 years of professional experience gained during scientific internships abroad

7. Membership in editorial committees and scientific councils of journals

none

8. Information on the reviewed research works

Below I present the list of journals, for which I reviewed research works, 5-year *Impact Factor*, MEiN points (according to the list of scientific journals and reviewed conference materials from international conferences issued by the Minister of Education and Science, made public in communication of December 1st 2021), as well as the number of reviews. All the journals are indexed in Web of Science (WoS) and Journal Citation Reports (JCR) databases, one of them does not yet possess an assigned *Impact Factor*, as it is indexed only since 2021. I prepared all reviews after receiving my doctoral degree. Information on the reviews can be found on my profile: Web of Science ResearcherID: [F-1511-2013](#).

Publisher	Journal title	5-year Impact Factor	MEiN points	Number of reviews
MDPI	Materials	4,042	140	4
MDPI	Applied Science	2,921	100	3
MDPI	Sensors	4,050	100	2
MDPI	Photonics	2,302	70	1
MDPI	Journal of Imaging	—	20	1
CANADIAN SCIENCE PUBLISHING	Canadian Journal of Physics	1,197	40	1

9. Participation in European programmes or other international programmes

Post-doctoral			
Country	Institution supervising the programme	Title / number / institution	year of realization
Poland	Poznan University of Technology	<i>Raising competences of academic staff and institution potential to host people from abroad - Welcome to Poland</i> Polish: <i>Podniesienie kompetencji kadry akademickiej i potencjału instytucji w przyjmowaniu osób z zagranicy - Welcome to Poland</i> POWR.03.03.00-00-PN14/18 European Social Fund Operational Programme Knowledge Education Development NAWA	2019
Austria	Technical University Graz	<i>Lifelong Learning Programme - Erasmus</i> Staff Training Mobility Programme of European Union	2012
Poland	Poznan University of Technology	Human Capital Operational Programme „ <i>Engineer’s Era. Extension of development potential of Poznan University of Technology</i> ”(Polish: „ <i>Era Inżyniera. Rozbudowa potencjału rozwojowego Politechniki Poznańskiej</i> ”) Human Capital National Cohesion Strategy European Social Fund	2012 2011

Before the doctorate

Austria	Technical University Graz	<i>Lifelong Learning Programme - Erasmus</i> Teaching Staff Mobility European Union Programme	2008
Austria	Technical University Graz	<i>Cooperation in Science and Technology Austria-Poland</i> WTZ PL07/2007 international programme	2008
Germany	Technical University of Applied Sciences, Wildau	students’ exchange <i>Socrates/Erasmus</i> participation in IQN (International Quality Network) courses (semiconductors, biomaterials, nanotechnologies) European Union Programme	2003

10. Participation in evaluation teams of applications for financial support of research, applications for granting of scientific awards, applications in other scientific or didactic competitions

2012-2013 Member of Faculty Committee for for establishing criteria for scientific and teaching awards for research and teaching staff at the Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology

11. Obtained awards

- II degree group award of the Rector of PUT (Poznan University of Technology) for scientific achievements in the academic year 2018/2019
- III degree individual award of the Rector of PUT (Poznan University of Technology) for scientific achievements in the academic year 201/2013
- II degree group award of the Rector of PUT (Poznan University of Technology) for scientific achievements in the academic year 2011/2012
- II degree group award of the Rector of PUT (Poznan University of Technology) for scientific achievements in the academic year 2009/2010
- absolutorium award of the Dean of Faculty of Technical Physics, Poznan University of Technology for graduating with honors from the course of study Technical Physics in 2004

12. Training, workshops, courses (self-improvement)

Below I presented the list of trainings, research workshops, courses and seminars, whose aim was my self-improvement and gaining of additional experience, through participation, among others, in practicals. Participation in the trainings listed allowed raising my research and teaching competences.

Post-doctoral

Place	Organizer	Objective	Date
Poland	Association of Polish Electricians SEP Poznań branch	<i>Preparatory course for the qualifying exam</i> obtained electrical qualifications of category E (No E/301/171/23), as well as category D (No D/302/171/23)	13-20.02.2023
Poland	NLPQT Workshop, UMK Toruń	Optical reference frequencies: generation, distribution and applications	20-12.01.2023
Poland	KL FAMO, UMK Toruń	School on Time Metrology in Experiments	24-25.11.2022
Poland	Poznan University of Technology	Training in the scope <i>Part-147</i> course completion certificate	17.09.2020
Poland	Poznan University of Technology	Training in the scope <i>Part-66</i> course completion certificate	16.09.2020
Poland	Poznan University of Technology	<i>Communication in intercultural setting</i> course completion certificate	03-07.06.2019
Poland	Association of Polish Electricians SEP Poznań branch	<i>Preparatory course for the qualifying exam</i> obtained electrical qualifications of category E (No E/434/170/18), as well as category D (No D/435/170/18)	12-19.02.2018
England	NPL Teddington, Great Britain	a one-week course of programming in LabView environment, conducted by an expert from National Instruments (NI)	2014
Poland	Association of Polish Electricians SEP Poznań branch	<i>Preparatory course for the qualifying exam</i> obtained electrical qualifications of category E (No 1401/2011)	06-13.06.2011

Before the doctorate

Poland	Poznan University of Technology	<i>Strengthening the protection of intellectual and industrial property rights in Poland</i> course concerning kurs dotyczący Protection of Intellectual Property Rights	13-14.02.2007
Poland	Poznan University of Technology	<i>Cisco Networking Academy CCNA</i> course concerning computer networks	01.04.2007 07.06.2007
Poland	Association of Polish Electricians SEP Poznań branch	<i>Preparatory course for the qualifying exam</i> obtained electrical qualifications of category E (No 1608/2006)	28.08.2006 04.09.2006
Germany	Technical University of Applied Sciences, Wildau	participation in IQN (International Quality Network) courses (semiconductors, biomaterials, nanotechnologies) European Union Programme	04.-07.2003

III. COOPERATION WITH THE SOCIAL AND ECONOMIC ENVIRONMENT

1. List of technological achievements

none

2. Cooperation with the economic sector

2015 - 2017 collaboration with TOPTICA Photonics AG (Lochhamer Schlag 19, 82166 Graefelfing (Munich), Germany) within the EU Programme Horizon-2020 nuClock

2012 collaboration with Radiant Dyes Laser & Accessoires GmbH (Friedrichstr. 58, 42929 Wermelskirchen, Germany), together with Dr. Sci. L. Windholz, Prof. TU Graz, Austria, at testing of a new type of mirror holder for a ring laser resonator - preparation of design notes regarding the construction of the holder

3. Obtained industrial property rights

none

4. Implemented technologies

none

5. Prepared expert opinions or other studies on request

none

6. Participation in expert and competition teams

none

IV. SCIENTIFIC INFORMATION

Bibliometric data on April 7th 2023, according to databases: Web of Science, Scopus and Google Scholar

I present also my accounts in scientific databases:

Web of Science: [ResearcherID F-1511-2013](#)

ORCID: [0000-0003-0899-9106](#)

Scopus: [ID 56708404500](#)

Google Scholar: [A0TF1Q8AAAAJ](#)

	Web of Science	Scopus	Google Scholar
Publications	21	23	41
Number of citations	210	223	309
(no self-citations)	191	193	—
Number of citing articles	163	174	—
(no self-citations)	151	161	—
h-index	8	8	9

Cumulative *Impact Factor* of the articles published amounts to **98.624** (for the year of publication, except for the works published after 2021), and 5-year *Impact Factor* amounts to **101.619**.

The sum of MEiN points (list of December 1st 2021) of all published articles **2240** (*416²).

Scopus browser gives the number of 47 co-authors, with whom I published 23 research works. I collaborated with researchers, who had affiliations from the following countries: Germany (16), Poland (15), Russia (5), USA (3), Austria (2), Great Britain (2), Pakistan (2), South Korea (1), China (1).

²* denotes the points from the previous years, in the scale 0-50, applies to works from A11 to A26 listed in the chapter II. 1