

Profesor
Janusz Mroczka



Doktor Honoris Causa

Warszawa 2019

© Copyright by Wojskowa Akademia Techniczna.
Warszawa 2019

ISBN 978-83-7938-223-1

Opracowanie redakcyjne i korekta: *Jolanta Karas*
DTP: *Sławomir Dębski*
Projekt okładki: *Barbara Chruszczyk*

Wydawca: Wojskowa Akademia Techniczna

Druk: P.P.H. Remigraf, ul. Dźwigowa 61, 01-376 Warszawa

Warszawa 2019

Spis treści

Słowo wstępne	5
Gen. bryg. dr hab. inż. Tadeusz Szczurek, prof. WAT JM Rektor-Komendant Wojskowej Akademii Technicznej	
Postępowanie o nadanie tytułu doktora honoris causa	
Profesorowi Januszowi Mrocze	9
Laudacja	19
prof. dr hab. inż. Adam Kawalec – promotor Opinia o prof. dr. hab. inż. Januszu Mrocze, kandydacie do tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej	
Opinie recenzentów nt. kandydata do tytułu doktora honoris causa	27
Recenzenci:	
Senat Politechniki Warszawskiej	
Prof. dr hab. inż. Adam Bieńkowski	29
Senat Politechniki Gdańskiej	
Prof. dr hab. inż. Stanisław Szczepański	45
Senat Politechniki Białostockiej	
Prof. dr hab. inż. Andrzej Zajac	57
Uchwała Senatu Wojskowej Akademii Technicznej	73
W sprawie nadania prof. dr. hab. inż. Januszowi Mrocze, czł. koresp. PAN tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej	
Dyplom	77
Podziękowanie – dr h.c. prof. Janusz Mrocza	81
Wykład dr. h.c. prof. Janusza Mroczi	85

Słowo wstępne

**Gen. bryg. dr hab. inż. Tadeusz Szczurek, prof. WAT
JM Rektor-Komendant
Wojskowej Akademii Technicznej**

Gen. bryg. dr hab. inż. Tadeusz Szczurek, prof. WAT
JM REKTOR-KOMENDANT
WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ

*Labores pariunt honores
Trudy przynoszą zaszczyty*

Ludzkość od zarania dziejów stale poszukuje, dąży do zmian, nieprzerwanie tworzy. Zwykliśmy określać to postęmem. Motorem tego postępu są wybitne jednostki, ludzie oddani nauce, badacze, twórcy, nieprzeciętne umysły, ludzie o wielkich sercach. To im kolejne pokolenia zawdzięczają rozwój i poprawę poziomu życia. Najwyższą godnością, jaką środowisko akademickie obdarza takie osoby, jest *doktorat honoris causa*. Tą wyjątkową godnością pragniemy dzisiaj w Wojskowej Akademii Technicznej uhonorować Pana Profesora doktora habilitowanego inżyniera Janusza Mroczkę, członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk.

Profesor Janusz Mroczka należy do elitarnego grona najwybitniejszych polskich uczonych o międzynarodowym autorytecie w zakresie elektroniki, a w szczególności metrologii elektronicznej i fotonicznej, które wybrał na swoją specjalność i pasję naukową. Działalność naukowa Profesora jest szeroka i obejmuje również badania nad procesem poznawczym, metodologię badań naukowych, rozwiązywanie problemu odwrotnego, pomiary fotoniczne, a także rozwój deterministycznych i statystycznych metod przetwarzania danych pomiarowych. Laudacja, która zostanie wygłoszona podczas tej uroczystości, zawiera znacznie bardziej obszerną informację o niezwykle rozległym spektrum zainteresowań naukowych Doktora Honorowego, jego nieprzeciętnych dokonaniach w działalności naukowej i badawczej, a także zasługach dla rozwoju kadry i w obszarze aktywności organizacyjnej na rzecz krajowego i międzynarodowego środowiska metrologicznego.

Bardzo istotne dla nas jest również to, że Profesor Janusz Mroczka od wielu lat współpracuje z zespołami naukowymi Wojskowej Akademii Technicznej i jest jej prawdziwym przyjacielem. Pracownicy naszej Alma Mater wielokrotnie doświadczyli jego rady, pomocy i życzliwości. Wspierał

i wspiera naszą uczelnię w rozwoju kadry naukowej, w podejmowaniu tematów badawczych oraz w upowszechnianiu dorobku naukowego i kreowaniu wizerunku WAT jako znaczącej uczelni technicznej w kraju i za granicą.

Wybór osoby, którą honorujemy tym najwyższym akademickim laurem, niesie istotną informację także o samej Akademii, o najwyższych wartościach, którym hołduje nasza społeczność, o najlepszych cechach, na których jako uczelnia chcemy się wzorować, na których wzorować się mogą nasi wychowankowie. Dlatego *doktorat honoris causa* odbiera dzisiaj osoba wybitna ze względu na swoje dokonania naukowe, osiągnięcia w obszarze kształcenia kadry, zasługi dla środowiska naukowego, autorytet moralny, dobry człowiek, bez granic oddany naszej Uczelni.

Szanowny Panie Profesorze, Dostojny Doktorze Honorowy, bardzo gorąco witam Pana w gronie społeczności akademickiej Wojskowej Akademii Technicznej i życzę Panu wielu dalszych znaczących sukcesów naukowych.

Postępowanie o nadanie tytułu
doktora honoris causa
Profesorowi
Januszowi Mroczce



**Wojskowa
Akademia
Techniczna**

**Uchwała
Senatu Wojskowej Akademii Technicznej
im. Jarosława Dąbrowskiego**

nr 37/WAT/2018 z dnia 24 maja 2018 r.

**w sprawie wszczęcia postępowania o nadanie
prof. dr. hab. inż. Czł. Koresp. PAN Januszowi MROCZCE
tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej
im. Jarosława Dąbrowskiego**

Na podstawie § 9 ust. 5 Statutu WAT, stanowiącego załącznik do *uchwały nr 215/III/2012 Senatu WAT z dnia 29 marca 2012 r. w sprawie uchwalenia Statutu WAT* (t.j. obwieszczenie Rektora WAT nr 1/WAT/2017 z dnia 6 lipca 2017 r.), uchwała się, co następuje:


§ 1

1. Wszczytna się postępowanie w sprawie nadania prof. dr. hab. inż. Czł. Koresp. PAN Januszowi MROCZCE tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego.
2. Na promotora wyznacza się prof. dr. hab. inż. Adama KAWALCA.
3. Postanawia się zwrócić o opinie wspierające do:
 - 1) prof. dr. hab. inż. Adama BIENKOWSKIEGO i Senatu Politechniki Warszawskiej,
 - 2) prof. dr. hab. inż. Stanisława SZCZEPAŃSKIEGO i Senatu Politechniki Gdańskiej,
 - 3) prof. dr. hab. inż. Andrzeja ZAJĄCA i Senatu Politechniki Białostockiej.

§ 2

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Senatu


plk dr hab. inż. Tadeusz SZCZUREK

**PELNOBOWIĄZUJĄCY REKTOR-KOMENDANT
WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ
ds. ochrony informacji niejawnych**


mgr Jerzy ORYSIAK
23 STY. 2019

**ZA ZGODNOŚĆ
Z ORYGINAŁEM**

Uchwała nr 254/XLIX/2018
Senatu Politechniki Warszawskiej
z dnia 19 września 2018 r.

w sprawie poparcia inicjatywy nadania tytułu doktora honoris causa prof. Januszowi Mrocze przez Wojskową Akademię Techniczną im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie

Na podstawie § 45 ust. 1 pkt 7 Statutu PW, w związku z wystąpieniem Senatu Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, uchwała się, co następuje:

§ 1

Po zapoznaniu się z dorobkiem naukowym prof. Janusza Mroczi, Senat Politechniki Warszawskiej postanawia poprzeć inicjatywę nadania mu tytułu doktora honoris causa przez Wojskową Akademię Techniczną im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie.

§ 2

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Sekretarz Senatu



mgr Beata Dobrzeniecka

Rektor



prof. dr hab. inż. Jan Szmidt



Kierownik Biura Rektora



dr Agnieszka Kamińska



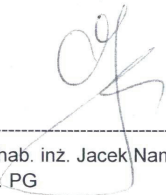
**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

**Uchwała Senatu PG
nr 192/2018/XXIV
z 4 lipca 2018 r.**

w sprawie: recenzji opracowanej przez prof. Stanisława Szczepańskiego w postępowaniu o nadanie prof. Januszowi Mrocze tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego.

Senat Politechniki Gdańskiej, na podstawie §15 ust. 1 pkt 9 Statutu PG, pozytywnie opiniuje recenzję przygotowaną przez prof. dr. hab. inż. Stanisława Szczepańskiego, prof. zw. PG w postępowaniu o nadanie prof. Januszowi Mrocze tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego.

Przewodniczący Senatu
Rektor PG



prof. dr hab. inż. Jacek Namieśnik,
prof. zw. PG

UCHWAŁA NR 296/XVII/XV/2018
Senatu Politechniki Białostockiej
z dnia 27 września 2018 roku

- w sprawie poparcia inicjatywy nadania tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego prof. dr. hab. inż. Januszowi Mrocze

Senat Politechniki Białostockiej, działając na podstawie art. 62 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 roku Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2017 r. poz. 2183, z późn. zm.) oraz § 48 ust. 1 pkt 26 Statutu Politechniki Białostockiej, postanawia:

§ 1

Opierając się na opracowanej przez prof. dr. hab. inż. Andrzeja Zająca opinii o dorobku naukowym oraz osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych prof. dr. hab. inż. Janusza Mroczi, Senat Politechniki Białostockiej wyraża poparcie dla inicjatywy nadania prof. dr. hab. inż. Januszowi Mrocze tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego.

§ 2

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

REKTOR

prof. dr. hab. inż. Lech Dzienis





Wojskowa
Akademia
Techniczna

Wydział
Elektroniki



**Uchwała
Rady Wydziału Elektroniki
Wojskowej Akademii Technicznej
im. Jarosława Dąbrowskiego**

nr 97/WEL/2017 z dnia 18 października 2017 r.

w sprawie poparcia wniosku o uruchomienie procedury związanej z nadaniem prof. dr. hab. inż. Czł. Koresp. PAN Januszowi MROCZCE tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego

Na podstawie § 26 ust. 1 pkt 14 Statutu WAT, stanowiącego załącznik do uchwały nr 215/III/2012 Senatu WAT z dnia 29 marca 2012 r. w sprawie uchwalenia Statutu WAT (t.j. obwieszczenie Rektora WAT nr 1/WAT/2017 z dnia 6 lipca 2017 r.), uchwała się, co następuje:

§ 1

Popiera się wniosek prof. dr. hab. inż. Andrzeja DOBROWOLSKIEGO o uruchomienie procedury związanej z nadaniem prof. dr. hab. inż. Czł. Koresp. PAN Januszowi MROCZCE tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego.

§ 2

Na kandydata na promotora wyznacza się prof. dr. hab. inż. Adama KAWALCA.

§ 3

Na kandydatów na recenzentów wyznacza się następujące osoby:

- 1) prof. dr. hab. inż. Adama BIENKOWSKIEGO i Senat Politechniki Warszawskiej,
- 2) prof. dr. hab. inż. Stanisława SZCZEPAŃSKIEGO i Senat Akademii Morskiej w Gdyni,
- 3) prof. dr. hab. inż. Andrzeja ZAJĄCA i Senat Politechniki Białostockiej.

§ 4

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Rady

prof. dr. hab. inż. Andrzej P. Dobrowolski



Wojskowa
Akademia
Techniczna

Instytut
Optoelektroniki 

**Uchwała
Rady Instytutu Optoelektroniki
Wojskowej Akademii Technicznej
im. Jarosława Dąbrowskiego**

Nr 54/IOE/2017 z dnia 20 grudnia 2017 r.

***w sprawie poparcia wniosku o nadanie tytułu doktora honoris causa
prof. dr. hab. inż. Czł. Koresp. PAN Januszowi MROCZCE***

Na podstawie Ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. Nr 164, poz. 1365, z późn. zm.) oraz Statutu WAT § 9 i 26 ust. 1 pkt 14 uchwała się, co następuje:

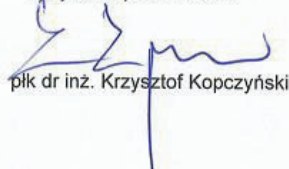
§1

Rada Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej popiera inicjatywę Wydziału Elektroniki WAT o nadanie prof. dr. hab. inż. Czł. Koresp. PAN Januszowi MROCZCE tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego.

§2

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Rady
Instytutu Optoelektroniki



plik dr inż. Krzysztof Kopczyński

Sporządził: - dr Aneta Bombalska
☎ tel. 261-837-514, e-mail: aneta.bombalska@wat.edu.pl



Wojskowa
Akademia
Techniczna

Wydział
Mechatroniki i Lotnictwa



**Uchwała
Rady Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa
Wojskowej Akademii Technicznej
im. Jarosława Dąbrowskiego**

nr 18/WML/2018 z dnia 28 marca 2018 r.

**w sprawie poparcia wniosku o nadanie tytułu doktora honoris causa WAT
prof. dr. hab. inż. Januszowi MROCZCE**

Na podstawie § 26 ust. 1 pkt 14 Statutu WAT stanowiącego załącznik do uchwały nr 215/III/2012 Senatu WAT z dnia 29 marca 2012 r. w sprawie uchwalenia Statutu WAT (t.j. obwieszczenie Rektora WAT nr 1/WAT/2017 z dnia 6 lipca 2017 r.) uchwała się, co następuje:

§ 1

Popiera się wniosek Wydziału Elektroniki WAT o nadanie tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej prof. dr. hab. inż. Januszowi MROCZCE.

§ 2

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący

dr hab. inż. Stanisław KACHEL

Laudacja

prof. dr hab. inż. Adam Kawalec – promotor

LAUDACJA

**z okazji nadania profesorowi Januszowi Mrocze
godności *doktora honoris causa*
Wojskowej Akademii Technicznej
wygłoszona przez prof. dr. hab. inż. Adama Kawalca**

**Magnificencjo Rektorze,
Wysoki Senacie,
Szanowny Doktorze Honorowy,
Dostojni Goście!**

Zaszczytny tytuł honorowy *doktora honoris causa* po raz pierwszy przyznany przez Uniwersytet w Oxfordzie w XV wieku to najwyższy tytuł honorowy nadawany przez uczelnie szczególnie zasłużonym osobom, związanym z nauką, ale również z kulturą czy też polityką, spełniającym bardzo wysokie wymagania w zakresie osiągnięć naukowych, o niekwestionowanym autorytecie oraz innych, istotnych zasługach dla środowiska akademickiego. Godność *doktora honoris causa* Wojskowej Akademii Technicznej nadawana jest osobom wybitnym, które przyczyniły się również do tworzenia znacznego postępu we współczesnym świecie w różnych dziedzinach. Senat Wojskowej Akademii Technicznej na wniosek Rad Wydziału Elektroniki oraz Instytutu Optoelektroniki na posiedzeniu w dniu 24 maja 2018 roku podjął Uchwałę o wszczęciu postępowania w sprawie nadania Panu Profesorowi dr. hab. inż. Januszowi Mrocze godności *doktora honoris causa* Wojskowej Akademii Technicznej. Z wielką satysfakcją przyjąłem informację o wyznaczeniu mnie na funkcję promotora w tym postępowaniu.

Profesor Janusz Mrocza, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk, profesor zwyczajny Politechniki Wrocławskiej, jest niewątpliwym autorytetem w dziedzinie metrologii, optoelektroniki i fotoniki w skali krajowej oraz międzynarodowej. W środowisku Wojskowej Akademii Technicznej jest znanym i cenionym nauczycielem akademickim, który przez wiele lat współpracował naukowo z Wydziałem Elektroniki oraz Instytutem Optoelektroniki. Jest dla mnie wielkim zaszczytem przedstawienie dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego w przewodzie *doktoratu honoris causa*, ze szczególnym uwypatnieniem rozlicznych zasług Pana Profesora

dla nauki krajowej i światowej, ale również w szczególności dla Wojskowej Akademii Technicznej.

Prezentację Jego sylwetki rozpocznę od najważniejszych informacji o charakterze biograficznym. Profesor Janusz Mroczka urodził się 27 kwietnia 1952 roku w Dębicy. Studia wyższe ukończył w 1976 roku na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, z którą związany jest zawodowo do dziś. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 1980 roku, a stopień doktora habilitowanego w roku 1991. Tytuł naukowy profesora otrzymał w roku 1996. Od 1999 roku jest zatrudniony na stanowisku profesora zwyczajnego Politechniki Wrocławskiej. W roku 2010 został wybrany na członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk. Od 2013 roku pełni z wyboru funkcję członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych. W latach 2001-2007 pełnił funkcję Wiceprzewodniczącego Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk, a w latach 2007-2015, przez dwie kadencje, funkcję Przewodniczącego tego Komitetu. Profesor bardzo aktywnie działa w organizacjach międzynarodowych. Od roku 1992 jest stałym członkiem SPIE – The International Society for Optical Engineering, od roku 1994 członkiem International Technical Working Group on Penetrating Radiation, USA, od roku 1986 należy do Polskiego Towarzystwa Fizycznego, w latach 1999-2005 był członkiem Senatu Politechniki Wrocławskiej. Profesor Mroczka jest *doktorem honoris causa* Politechniki Lubelskiej i Politechniki Opolskiej.

Profesor dr hab. inż. Janusz Mroczka w latach 1991-1996 pełnił funkcję Dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej. W roku 1998 był inicjatorem i założycielem Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej, którą kieruje do dziś.

Za działalność naukową, dydaktyczną i organizacyjną profesor Janusz Mroczka został wyróżniony wieloma nagrodami i wyróżnieniami, do których należą m.in.: Nagroda II stopnia MEN (1989 r.), Nagroda Wydziału IV PAN (1993 r.), subsydlum profesorskie FNP za 2005 r., Nagroda Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za Wybitne Osiągnięcia w Opiece Naukowej i Dydaktycznej w 2014 r., Nagroda Prezesa Polskiej Akademii Nauk za 2015 r., Nagroda Naukowa im. prof. M. Suskiego, Nagroda Professor Opoliensis w 2014 r. Kandydat jest laureatem ponad 30 Nagród JM Rektora Politechniki Wrocławskiej. Został odznaczony m.in.: Krzyżem Oficerskim OOP, Krzyżem Kawalerskim OOP, Złotym, Srebrnym i Brązowym Krzyżem Zasługi, Medalem Komisji Edukacji Narodowej, Złotą Odznaką Politechniki Wrocławskiej z Brylantem, Medalem im. prof. Kazimierza Idaszewskiego oraz Medalem im. prof. Włodzimierza Krukowskiego.

Zainteresowania naukowe profesora Janusza Mroczi dotyczą metodologii procesu poznawczego, algorytmizacji problemu odwrotnego, pomiarów pośrednich źle uwarunkowanych numerycznie, analizy spektralnej i polaryzacyjnej promieniowania rozproszonego, metodologii łączenia danych pomiarowych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod przetwarzania, wykorzystania reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnałów w przetwarzaniu danych pomiarowych, opracowania metody momentów w analizie układów dyspersyjnych.

Tematyka prac badawczych prowadzonych przez profesora Janusza Mroczkę jest bardzo obszerna i obejmuje:

- metodologię obserwacji i eksperymentu,
- algorytmizację problemu odwrotnego,
- modelowanie matematyczne pól fizycznych i ich praktyczną realizację metodami tomografii optycznej i impedancyjnej,
- kompleksowe modelowanie dynamicznych obiektów technicznych i biomedycznych z uwzględnieniem parametrów skupionych i rozłożonych,
- analizę spektralną i polaryzacyjną promieniowania rozproszonego w układach dyspersyjnych i ich praktyczne wykorzystanie w ocenie właściwości materiałów kompozytowych,
- metody obrazowania optycznego i przetwarzania danych pomiarowych w trójwymiarowej przestrzeni i ich fuzję na potrzeby bezstratnego kodowania obrazów,
- wieloczułnikową fuzję danych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod ich przetwarzania na rekonstrukcję o wyższej jakości,
- wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowej do przetwarzania danych pomiarowych i ich praktyczną realizację za pomocą procesorów sygnałowych,
- metody identyfikacji parametrycznej statycznych i dynamicznych modeli złożonych obiektów wraz z ich praktycznym zastosowaniem w pomiarach właściwości układu oddechowego i krwionośnego człowieka,
- wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do pozyskiwania informacji ilościowych i jakościowych z danych pomiarowych,
- projektowanie, opracowywanie i optymalizację komputerowych systemów pomiarowych i informacyjnych do badań naukowych oraz procesów technologicznych,

- projektowanie i wykonywanie inteligentnych przyrządów pomiarowych z wykorzystaniem techniki mikroprocesorowej,
- opracowywanie systemów telemedycznych współpracujących z inteligentnym domem, nadzorujących bezpieczeństwo i stan zdrowia mieszkańców.

Profesor Janusz Mroczka jest autorem bądź współautorem 415 publikacji, wśród nich 115 z listy filadelfijskiej, 131 artykułów w czasopismach, czterech monografi i książek, 13 rozdziałów w monografiach i książkach, 145 referatów konferencyjnych, w tym 64 na konferencjach międzynarodowych, ośmiu patentów i zgłoszeń patentowych, 23 recenzji artykułów z listy filadelfijskiej, 6 recenzji monografi i książek. Liczba cytowań Jego prac wynosi 1150, indeks Hirscha $h = 22$ wg bazy WoS (wg bazy Scopus 1310, $h = 23$, wg bazy Google Scholar 1787, $h = 26$). Profesor opracował trzy recenzje *doktoratów honoris causa* (prof. A. Barella z Barcelony, prof. Z. Hotra ze Lwowa, prof. W. Woliński, WAT, Warszawa), 54 recenzje wniosków profesorskich, jedną recenzję wniosku profesorskiego zagranicznego (Preston, Anglia), 52 recenzje przewodów habilitacyjnych oraz 20 recenzji rozpraw doktorskich. Profesor Janusz Mroczka do chwili obecnej był promotorem 24 prac doktorskich oraz opiekunem ośmiu habilitacji. Zrealizował 27 projektów badawczych, którymi kierował bądź był głównym wykonawcą. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że wyniki badań czterech projektów zostały wdrożone do praktycznego zastosowania.

Profesor Mroczka otacza szczególną opieką uzdolnionych młodych uczonych, co umożliwiło mu zbudowanie zespołu badawczego zaangażowanego we współpracę z różnymi ośrodkami zagranicznymi i krajowymi. Profesor posiada niezwykłą umiejętność poszukiwania ambitnych zadań naukowych na światowym poziomie dla młodych adeptów nauki, między innymi poprzez prowadzone wspólnie z ośrodkami francuskimi doktoraty *cotutelle*. Taka realizacja doktoratów ma zasadniczą korzyść dla doktorantów ze względu na wymagane staże krótkoterminowe we Francji i możliwość prowadzenia zaawansowanych badań w środowisku międzynarodowym. Na uwagę zasługuje fakt, że wszystkie prace doktorskie i habilitacyjne były powiązane z problemami badawczymi niezbędnymi do rozwiązania w ramach realizowanych grantów.

Profesor zawsze bardzo dba o dorobek naukowy młodych naukowców, zachęcając ich do publikowania wyników badań w czasopismach o światowej randze. Również znacznie przyczynił się do wprowadzenia na tzw. listę filadelfijską krajowego czasopisma „Metrology and Measurement Systems”.

Bardzo ważnym osiągnięciem w zakresie działalności dydaktycznej prof. Mroczi było utworzenie na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej specjalności aparatura elektroniczna, która jest systematycznie rozwijana i modernizowana przez Profesora z uwzględnieniem aktualnych potrzeb rynku pracy.

Zespół prof. J. Mroczi realizuje badania naukowe we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Należą do nich ośrodki naukowe z Francji, Wielkiej Brytanii, Włoch, Stanów Zjednoczonych, Belgii oraz Nowej Zelandii.

Profesor Janusz Mrocza od wielu lat współpracuje z naukowcami z Wojskowej Akademii Technicznej. Początkowo od roku 1996 współpracował z przedstawicielami Wydziału Elektroniki, a następnie kilka lat później Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej - zarówno w obszarze rozwoju kadry naukowej, jak również badań naukowych.

Recenzował wiele rozpraw doktorskich, habilitacyjnych oraz przewodniczył komisjom habilitacyjnym. Opiniował także wnioski o nadanie tytułu profesora pracownikom naukowym Wojskowej Akademii Technicznej oraz o uzyskanie uprawnień do nadawania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika Instytutowi Optoelektroniki WAT. Profesor Janusz Mrocza, realizując z Wojskową Akademią Techniczną projekty badawcze oraz konferencje naukowe, zasłużył się znacznie dla rozwoju szerokiej współpracy między zespołami naukowymi naszej uczelni.

W swoim wystąpieniu przedstawiłem niewielki fragment z bardzo bogatego życia Profesora Mroczi. Jestem przekonany, że osiągnięcia w działalności naukowej, dydaktycznej, osiągnięcia organizacyjne, autorytet w środowisku akademickim i uznanie, jakie Profesor Janusz Mrocza osiągnął w roli członka społeczności akademickiej nie tylko w kraju, lecz także za granicą, w pełni uzasadniają podjęcie działań Senatu Wojskowej Akademii Technicznej o nadanie Mu godności *doktora honoris causa* Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego.

To wyróżnienie jest wyrazem głębokiego uznania naszej społeczności akademickiej dla wybitnych osiągnięć Profesora Janusza Mroczi, zarówno naukowych, postawy moralnej, otwartości, kreatywności, dużego poczucia humoru, jak i zasług dla rozwoju kadry naukowej naszej Uczelni.



**Opinie recenzentów
nt. kandydata do tytułu
*doktora honoris causa***

Recenzenci:

Senat Politechniki Warszawskiej

Prof. dr hab. inż. Adam Bieńkowski

Senat Politechniki Gdańskiej

Prof. dr hab. inż. Stanisław Szczepański

Senat Politechniki Białostockiej

Prof. dr hab. inż. Andrzej Zając

OPINIA
o dorobku naukowym, osiągnięciach i zasługach
prof. dr. hab. inż. Janusza Mroczy, członka korespondenta PAN,
kandydata do tytułu i godności *doktora honoris causa*
Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego

Wprowadzenie

Tytuł *doktora honoris causa* to najwyższy tytuł honorowy ustanowiony w XV wieku przez Uniwersytet w Oxfordzie. Wyróżnia się nim wybitnych przedstawicieli nauki, kultury i życia publicznego cieszących się powszechnym szacunkiem, autorytetem naukowym oraz nienaganną postawą moralną i etyczną. Są to osoby godne naśladowania, znane i cenione nie tylko w swoim środowisku, a efekty ich działalności przynoszą trwały pożytek szerszej społeczności. Jestem głęboko przekonany, że Profesor Janusz Mroczy, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk, profesor zwyczajny Politechniki Wrocławskiej, *doktor honoris causa* Politechniki Lubelskiej i Opolskiej, trwale wpisuje się w ten obraz, skupiając w swojej osobowości wszystkie te wartości.

Decyzja o przyznaniu godności *doktora honoris causa* poprzedzona jest zawsze bardzo wnikliwą analizą osiągnięć i sylwetki moralno-etycznej zgłoszonego Kandydata, zarówno przez Senat uczelni nadającej tytuł, jak również przez Senaty prestiżowych uczelni akademickich prezentujących zbliżone obszary nauk, z których wywodzą się wskazani recenzenci.

Wnioskodawcą przyznania Profesorowi Januszowi Mroczy godności *doktora honoris causa* był Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej oraz Instytut Optoelektroniki tej uczelni. Wkład wniesiony przez Profesora w ramach współpracy naukowej, w tym w rozwój kadry naukowej tej Uczelni, w pełni uzasadnia uhonorowanie Go tytułem *doktora*

honoris causa. Jest dla mnie wyróżnieniem, że mogę być w tym postępowaniu opiniodawcą wniosku Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego o nadanie profesorowi Januszowi Mroczce tytułu *doktora honoris causa* tej Uczelni.

Sylwetka kandydata

Profesor doktor habilitowany inżynier Janusz Mroczka urodził się 27 kwietnia 1952 r. w Dębicy. Studia wyższe ukończył w roku 1976 na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, uzyskując tytuł zawodowy magistra inżyniera elektronika. Stopień doktora nauk technicznych otrzymał w 1980 r., a stopień doktora habilitowanego w roku 1991 na podstawie monografii pt. *Metrologiczne wykorzystywanie światła rozproszonego do badań rozkładu wielkości cząstek w roztworach dyspersyjnych*. Już po pięciu latach, w roku 1996, otrzymał tytuł naukowy profesora nauk technicznych, a w 1999 r. stanowisko profesora zwyczajnego Politechniki Wrocławskiej. W roku 1991 został wybrany na dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej i pełnił tę funkcję do roku 1996. W roku 1998, z inicjatywy prof. J. Mroczki, powstała na Wydziale Elektroniki Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej, którą kieruje do dziś.

Syntetyczny wykaz najważniejszych zaszczytów, pełnionych funkcji i wyróżnień będących udziałem Profesora obejmuje: *doktor honoris causa* Politechniki Lubelskiej (2014 r.) i Opolskiej (2016 r.), członek korespondent PAN z wyboru (od 2010 r.), członek Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych (od 2013 r.), wiceprzewodniczący (w latach 2001-2007), a w latach 2007-2015 (dwie kadencje) przewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN.

Ponadto Profesor jest stałym członkiem: SPIE – The International Society for Optical Engineering (od 1992 r.), International Technical Working Group on Penetrating Radiation, USA (od 1994 r.), Polskiego Towarzystwa Fizycznego (od 1986 r.) oraz wielu komisji na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, był także członkiem Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego KBN (10 konkursów), przewodniczącym Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego KBN (5 konkursów), członkiem Senatu Politechniki Wrocławskiej (1999-2005).

Profesor Janusz Mroczka za działalność naukowo-badawczą i dydaktyczną otrzymał wiele wyróżnień i prestiżowych nagród, między innymi ponad trzydzieści nagród JM Rektora Politechniki Wrocławskiej. Otrzymał również Nagrodę Indywidualną II stopnia MEN (1989 r.), Nagrodę Wydziału IV PAN (1993 r.). Wyróżniony był Nagrodą Professor Opoliensis (2014 r.),

Nagrodą Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia w opiece naukowej i dydaktycznej (2014 r.) oraz Nagrodą Prezesa PAN za stworzenie szkoły naukowej w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej wraz z cykliczną serią wydawniczą *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej* (od 2008 r.) oraz czasopismem specjalistycznym indeksowanym w JCR „Metrology and Measurement Systems” (2015 r.). Otrzymał również Nagrodę Naukową im. prof. Mariana Suskiego, Złotą Odznakę Politechniki Wrocławskiej z Brylantem, Medal im. prof. Kazimierza Idaszewskiego oraz Medal im. prof. Włodzimierza Krukowskiego.

Profesor Janusz Mroczka jest również Oficerem i Kawalerem Orderu Odrodzenia Polski, został odznaczony Złotym, Srebrnym i Brązowym Krzyżem Zasługi oraz Medalem Komisji Edukacji Narodowej

Profesor Janusz Mroczka należy do ludzi o wybitnej osobowości, odwadze i zacięciu humanistycznym. Cechuje go błyskotliwość umysłu, rzadko spotykana pracowitość, spostrzegawczość i skłonność do rozważania zagadek i paradoksów tego świata. Refleksyjna natura, jasność i precyzyjność Jego toku myślenia, a także świadomość istnienia ludzkich niedoskonałości i ograniczeń pozwoliły Mu zjednać do wspólnego działania zarówno starsze, jak i młodsze pokolenia. Obcując z Profesorem, można było znaleźć pocieszenie i panaceum na codzienne problemy, a nade wszystko zastanowić się nad znaczeniem przesłania, które w postaci licznych cytatów sław nauki i kultury wypowiadał podczas niezwykle ciekawych, emocjonalnych wykładów. Często prezentowane bezpośrednio zagadnienia (myśli, przemyślenia) wskazywały na głęboko ukryte treści, których celem jest ukazanie odbiorcy sposobu różnego rozumienia i interpretacji, a tym samym przeniesienie i zasugerowanie głębszego poziomu znaczenia wypowiedzianych przez niego sentencji. Ta forma przekazu jest widoczna w Jego wykładach, rozmowach, jak również w wygłoszonym na Politechnice Opolskiej wykładzie pt. *Proces poznawczy w metrologii* podczas ceremonii nadania Mu *doktoratu honoris causa* Politechniki Opolskiej.

Symbolika stała się dla Niego narzędziem oddziaływania na innych. Widocznym przykładem tego jest umieszczona przez Niego osobiście w 1998 r. tablica z myślą Platona *Deligere veritatem omnem et in omnibus* (miłować prawdę całą i we wszystkim) nad drzwiami wejściowymi do Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej, którą jako pierwszą po roku 1968 w tamtej rzeczywistości założył na Politechnice Wrocławskiej.

Osiągnięcia w pracy naukowo-badawczej

Obszar zainteresowań oraz wiedza profesora Janusza Mroczi związane są z takimi dziedzinami i specjalnościami jak: elektronika, optoelektronika, metrologia, fizyka, w tym fizyka ciała stałego, matematyka, w tym równania całkowe, procesy stochastyczne, metody analizy sygnałów, wybrane działy bioinżynierii, filozofia. Ta doskonale opanowana wiedza pozwala Mu na realizację badań naukowych, również w ramach zespołów, które tworzy.

Zainteresowania naukowe profesora Janusza Mroczi to: metodologia procesu poznawczego, algorytmizacja problemu odwrotnego, pomiary pośrednie źle uwarunkowane numerycznie, metodologia łączenia danych pomiarowych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod przetwarzania, wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnałów w przetwarzaniu danych pomiarowych, opracowanie metody momentów w analizie układów dyspersyjnych.

Aktualnie profesor J. Mrocza prowadzi badania naukowe w pięciu zasadniczych obszarach:

1. Uwarunkowania metrologiczne modeli fraktalnych fazy rozproszonej w analizie właściwości cząstek układów dyspersyjnych z wykorzystaniem światła rozproszonego.
2. Analiza właściwości włókien światłowodowych z wykorzystaniem światła rozproszonego.
3. Estymacja parametrów sygnału wieloczęstotliwościowego w zastosowaniu do sygnału sieci energetycznej w systemach energii odnawialnej.
4. Analiza niejednorodności płuc w warunkach sztucznej wentylacji pacjenta.
5. Maksymalizacja mocy pozyskiwanej z paneli fotowoltaicznych w systemach autonomicznych.

Powyższe obszary naukowe łączy szeroka nadbudowa teoretyczna opracowana przez prof. J. Mroczkę, wnosząca istotny wkład do nauk podstawowych, a dotycząca algorytmizacji problemu odwrotnego źle uwarunkowanych zadań w złożonych pomiarach pośrednich.

Profesor Janusz Mrocza w 2000 roku, z dwoma wychowankami, którzy zatrudnili się na Politechnice Opolskiej, a wcześniej studiowali na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, założył na Politechnice Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki grupę naukową zajmującą się cyfrowym przetwarzaniem sygnałów. Do Zespołu w 2002 r. dołączył kolejny

wychowanek Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, a w roku 2006 magistrantka Profesora – absolwentka Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Prace prowadzone w zespole zaowocowały obroną czterech doktoratów oraz dwóch habilitacji. Tematyka badawcza stworzonego przez prof. Janusza Mroczkę zespołu obejmuje cztery zasadnicze obszary:

- zastosowanie analiz czasowych, częstotliwościowych oraz czasowo-częstotliwościowych w badaniach jakości energii elektrycznej oraz zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych,
- pomiary zakłóceń oraz jakości energii elektrycznej,
- konstrukcja wbudowanego sprzętu pomiarowego opartego o nowoczesne jednostki obliczeniowe typu procesory aplikacyjne, procesory sygnałowe, układy FPGA oraz mikrokontrolery,
- zastosowanie zaawansowanych analiz cyfrowego sygnału do badania sygnałów biomedycznych.

Głównym zagadnieniem badawczym zespołu było zastosowanie analiz cyfrowego przetwarzania sygnałów w badaniach przebiegu elektroenergetycznego. Prace koncentrowały się wokół poszukiwania zaawansowanych analiz cyfrowego przetwarzania, które często ze względu na swoją złożoność obliczeniową nie były stosowane w tym obszarze naukowym. Wyróżnić można trzy zasadnicze kierunki badań: zastosowanie analiz częstotliwościowych, czasowo-częstotliwościowych oraz innych.

Zespół, w ramach działalności, w ciągu kilkunastu lat swojego istnienia podejmował wiele inicjatyw naukowo-organizacyjnych.

Opublikowano liczne artykuły w czasopismach o zasięgu międzynarodowym i krajowym, m.in. „IEEE Transactions on Power Delivery”, „Metrology and Measurement Systems”, „Energy Spectrum”. Wyniki badań prezentowano na prestiżowych międzynarodowych konferencjach, m.in. International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, International Conference on Harmonics and Quality of Power, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, International Scientific Conference – Electric Power Engineering.

Istotną częścią prac prowadzonych w zespole była współpraca z partnerami przemysłowymi. Obejmowała ona prace w zakresie konstrukcji sprzętu elektronicznego, implementacji algorytmów przetwarzania sygnałów w branży elektroenergetycznej oraz medycznej. Zaowocowała wykonaniem ośmiu ekspertyz dla przemysłu oraz opracowaniem trzydziestu zgłoszeń patentowych. Realizowano programy stażowe w przemyśle – łącznie osiem. Członkowie zespołu uczestniczą ponadto w pracach Komitetu Metrologii

i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk oraz Komitetu Elektroniki i Telekomunikacji Polskiej Akademii Nauk.

Obecnie w zespole rozwija się kolejne pokolenie naukowców, zgromadzone wokół tematyki zainspirowanej przez profesora Mroczkę, poszerzając ją o zagadnienia informatyczne w systemach wbudowanych oraz automatyki trakcji kolejowej.

Profesor Janusz Mroczka jest autorem/współautorem **415** publikacji, wśród nich **115** z listy filadelfijskiej, **131** artykułów w czasopismach, **4** monografii i książek, **13** rozdziałów w monografiach i książkach, **145** referatów konferencyjnych, w tym **64** na konferencjach międzynarodowych, **8** patentów i zgłoszeń patentowych, **23** recenzji artykułów z listy filadelfijskiej, **6** recenzji monografii i książek. Liczba cytowań, będąca wskaźnikiem odbioru na świecie prac publikowanych przez profesora J. Mroczkę, wynosi **1103** wg bazy WoS, **1267** wg bazy Scopus i **1743** wg bazy Google Scholar, natomiast indeks Hirscha: $h = 21$ dla WoS, $h = 22$ dla Scopus, $h = 27$ dla Google Scholar.

Profesor opracował **3** recenzje *doktoratów honoris causa* (prof. A. Barella z Barcelony, prof. Z. Hotra ze Lwowa, prof. W. Woliński, WAT, Warszawa), **54** recenzje wniosków profesorskich, **1** recenzję wniosku profesorskiego za granicą (Preston, Anglia), **52** recenzje przewodów habilitacyjnych oraz **20** recenzji doktoratów.

Uczestniczył w realizacji **27** projektów badawczych, w tym zrealizował: **9** projektów badawczych własnych, **2** projekty celowe, **1** projekt rozwojowy, **8** projektów promotorskich i **7** projektów międzynarodowych. W **4** projektach badawczych brał udział jako główny wykonawca, a wyniki badań z **4** projektów zostały wdrożone do praktycznego stosowania.

Za osiągnięcia naukowe dwóch wychowanków profesora Janusza Mroczki otrzymało stypendium Fundacji Nauki Polskiej „Nobel dla młodych”, jeden został wyróżniony nagrodą Wydziału IV PAN, a trzynastu obroniło z wyróżnieniem prace doktorskie. Ośmiu z nich jest już samodzielnymi pracownikami.

Zespół profesora J. Mroczki realizuje liczne przedsięwzięcia naukowe we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Owocem tych badań są wspólne publikacje oraz staże naukowe doktorantów i studentów. Zrealizowane w zespole prof. J. Mroczki badania naukowe pozwalają uznać, że Profesor jest twórcą liczącej się w kraju i za granicą szkoły naukowej w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej.

Profesor Janusz Mroczka to ciekawa osobowość i wielki dar dla metrologii, której zdobycze i piękno ukazał poprzez swoje działanie, a swoją organiczną pracą nadal rozwija.

To On w 2008 r. zapoczątkował wydawanie cyklu książek pt. **Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej**, który systematycznie pod jego redakcją ukazuje się każdego roku. Ten cykl pokazuje najnowsze osiągnięcia polskich uczonych. Jest to zbiór obszernych, pięćdziesięcio- i więcej stronicowych opracowań naukowych, których autorami są znane autorytety w tej dziedzinie w Polsce, cieszy się dużym uznaniem za granicą. Tak przyjęta forma pozwala pokazać i propagować w szerokim gremium naukowym najlepsze prace na stopień doktora i doktora habilitowanego, dając tym samym wykładnię poziomu i sposobu prowadzenia badań naukowych. Ta seria ukazała się dotychczas w ośmiu tomach i stanowi bestseller w środowisku naukowym, w którym doskonali się sposób kształcenia młodych ludzi.

Uznanie, jakim cieszy się za granicą, pozwoliło profesorowi J. Mroczce wprowadzić czasopismo „Metrology and Measurement Systems” na listę filadelfijską (*impact factor* 1,63), co w naukach technicznych jest dużym sukcesem. Kierowany przez Niego Komitet Metrologii i Aparatury Pomiarowej PAN (w którym pełnił, z wyboru, funkcję przewodniczącego przez dwie kadencje, tzn. od 2007 do 2015 r.) w ostatniej ocenie zajął pierwsze miejsce jako najlepszy Komitet w Polskiej Akademii Nauk.

Dorobek naukowy prof. J. Mroczki jest wyjątkowo bogaty, a jego aktywność w ostatnich dwudziestu latach, obejmująca większość tego dorobku, jest bardzo imponująca.

Zasługi w zakresie opieki naukowej i dydaktycznej

Profesor Janusz Mroczka często powtarzał, że rozwój uczelni zależy przede wszystkim od ludzi. Jeżeli odpowiedni ludzie się pojawią, trzeba im wszelkimi siłami pomagać, ale jednocześnie ustawiać możliwie wysoko poprzeczkę wymagań. Twierdzi, że rozwój polskiej nauki rodzi się na jej najniższych szczeblach organizacyjnych – w katedrach. To On w 1998 r. założył pierwszą po 1968 roku na Politechnice Wrocławskiej Katedrę, którą kieruje do dziś, ukazując możliwość zmiany organizacyjnej uczelni opartej wówczas na jedynie możliwych instytutach. W tym okresie w istotny sposób rozwinął zaplecze i bazę aparaturową, a także wiele wątków badawczych. W Katedrze odbywają się stałe cotygodniowe seminaria naukowe, na których prezentowane są prace naukowe młodych pracowników, doktorantów i wyróżniających się studentów, którzy podczas studiów zgłaszają chęć realizacji pracy doktorskiej w Katedrze.

W latach 1991-1996 profesor J. Mroczka był dyrektorem Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, gdzie założył specjalność

dydaktyczną aparaturą elektroniczną, która do dziś jest najbardziej popularną wśród studentów na kierunku elektronika, a dla pracodawców stanowi kuźnię młodych talentów poszukiwanych na rynku pracy w całym kraju.

Profesor Janusz Mroczka, zatrudniony od roku 1997 na Politechnice Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki, w początkowym okresie swojej działalności dydaktycznej prowadził wykłady z zakresu cyfrowego przetwarzania sygnałów, kładąc podwaliny samodzielnej grupy naukowej o tematyce badawczej w zakresie zastosowania zaawansowanych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów. W następnych latach prowadził autorskie wykłady dla studentów na kierunkach: informatyka (*komputerowa analiza sygnałów i systemów*), elektronika i telekomunikacja (*systemy mikroprocesorowe i komputerowe, elektroniczne systemy pomiarowe, podstawy i algorytmy przetwarzania sygnałów*), automatyka i robotyka (*przetwarzanie sygnałów, przetworniki i układy pomiarowe, cyfrowe przetwarzanie sygnałów*) oraz wypromował 41 dyplomantów.

Ta systematyczna wieloletnia praca Profesora z młodymi ludźmi pozwoliła na zbudowanie zespołu badawczego z nowoczesną tematyką, a tym samym umożliwiła młodym uczonym współpracę z różnymi ośrodkami zagranicznymi i krajowymi na zasadach partnerskich. Owocem tak zapoczątkowanej pracy stały się doktoraty *cotutelle* prowadzone wspólnie z ośrodkami francuskimi. Istotne jest, że prof. J. Mroczka był jednym z prekursorów zapoczątkowanych w latach 90. ubiegłego wieku doktoratów *cotutelle*. Wypromowanie w tej formule przez prof. J. Mroczkę czterech doktorów, wszystkich z wyróżnieniem (ostatni z nich otrzymał nagrodę Marii Skłodowskiej-Curie za najlepszy doktorat w Europie w danej dyscyplinie i w danym roku), świadczy o umiejętności poszukiwania warsztatu naukowego dla młodych na światowym poziomie, a w szczególności o konsekwentnej pracy u podstaw z młodymi ludźmi, których przygotowywał do tego typu doktoratów już od pierwszych lat.

W swojej działalności dydaktycznej i wychowawczej Profesor na pierwszym miejscu stawia rozwój naukowy młodych pracowników i traktuje to jako kluczową przesłankę rozwoju nauki. Jego aktywność na tym polu została zauważona i nagrodzona przez Fundację Nauki Polskiej w 2005 roku subsydium profesorskim „Mistrz”. Profesor wypromował łącznie 24 doktorów (w tym cztery doktoraty *cotutelle* we Francji), sprawował opiekę naukową nad ośmioma habilitantami.

W swojej aktywności zawodowej pokazuje, że zawód nauczyciela akademickiego zobowiązuje do realizacji wzniosłych norm moralnych. Swoją pracę traktuje jako misję, którą spełnia wobec niezależności polskiej kultury.

Dbalnością o te ideały i stanowczością głoszonych tez, obowiązkowością, systematycznością, gorliwością kształtuje osobowości tych, z którymi współpracuje.

Życiem wypełnionym czynem Profesor tworzy surową szkołę moralną, a Jego szlachetność, inteligencja, odwaga uczą nas pokory i poszanowania dla pracy i drugiego człowieka. Profesor uwielbia wyzwania i dobrze się czuje, stając w ich obliczu. Nie rezygnuje nawet wtedy, gdy jest bardzo ciężko. Dzięki temu udaje mu się osiągnąć o wiele więcej, niż można by sądzić po ocenie bieżącej sytuacji.

Do najważniejszych osiągnięć prof. J. Mroczi w działalności dydaktycznej należy utworzenie na Wydziale Elektroniki specjalności aparatura elektroniczna i konsekwentna jej modernizacja przez wiele lat – aktualizacja potrzeb potencjalnych absolwentów do rynku pracy, a w szczególności danie młodym ludziom szansy dalszego rozwoju poprzez nowoczesne przedmioty, w większości powstałe z inspiracji prof. J. Mroczi, w dużej mierze będące jego autorskimi koncepcjami. Pochłonięty współpracą z młodymi stara się ich, od pierwszych lat studiów, zainteresować pracą naukową, a po ich deklaracji o kontynuacji współpracy na studiach doktoranckich konsekwentnie z nimi współpracować.

Tak zarysowane wątki pracy dydaktycznej pozwalają zauważyć, że perfekcyjna dbałość o sam proces dydaktyczny połączona jest z troską o wychowanie młodych ludzi. Wychowany w surowej szkole etycznej pragnie tak zaszczerpione wartości przekazywać swoim wychowankom. Przykładem jest wykład „Mistrz i uczeń”, znany w wielu ośrodkach akademickich w kraju, pokazujący wizję prof. J. Mroczi i paradygmat, jakim w procesie dydaktycznym się posługuje. Wykład ten, wygłoszony po raz pierwszy w Sali Senatu Politechniki Wrocławskiej, zdobył rozgłos w środowisku akademickim jako ten element, który mógłby odegrać istotną rolę w coraz bardziej skomercjalizowanych uwarunkowaniach, w których dane jest młodym pokoleniom dorastać. Wykład ten został wygłoszony na zaproszenie m.in. w: Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, w Instytucie Immunologii i Terapii Doświadczalnej PAN im. L. Hirszfelda we Wrocławiu i w wielu innych środowiskach akademickich, w których został entuzjastycznie przyjęty zarówno przez starsze pokolenia, jak i w szczególności przez młode. Możliwe to było dzięki umiejętnościom docierania do ludzi i entuzjazmowi, który emanuje podczas Jego prezentacji.

Zapytany w jednym z wywiadów, na czym polega relacja mistrz–uczeń, profesor Janusz Mrocza powiedział:

„To relacja opierająca się na otwartości, wzajemnym zaufaniu i dobrowoli.

Mistrz musi respektować godność, podmiotowość i autonomię ucznia, szanować jego prawo do swobodnej opinii na tematy naukowe.

Zasada otwartości dotyczy w równej mierze ucznia, który także powinien umieć się przyznać do tego, że czegoś nie wie, i uzyskiwać odpowiedź w dyskusji.

Mam świadomość, że dziś wielu osobom trudno w to uwierzyć, ale wystarczy spróbować i zobaczyć, jak szybko pojawią się owoce takiej postawy.

Starszy nie powinien myśleć tylko o swoich sukcesach, ale powinien zauważyć, że jeśli podzieli się z młodszym, to łatwiej będzie mu przejść ten trudny, a czekający go nieuchronnie okres, kiedy nie będzie już miał tyle sił i twórczego zapału. Dzięki młodemu będzie mógł być wciąż aktywny i cieszyć się z ich sukcesów, wiedząc, że to on dał tym sukcesom początek.

Sposobem na motywację drugiego człowieka jest przede wszystkim otwartość. To na niej buduje się więź i wzajemne zaufanie pomiędzy starszym (a więc tym, który ma stać się mistrzem) a młodszym (a więc jego uczniem)”.

W jednym z udzielonych wywiadów mówi też: „...pracownik nauki powinien wykazywać entuzjazm w podejmowaniu tematyki naukowej, pasję w jej wykonywaniu – bezwzględną uczciwość w poszukiwaniu prawdy, odwagę w jej głoszeniu – bezinteresowność, duże poczucie obowiązku – otwartość i cierpliwość. Człowiek nauki powinien również godzić dumę z przynależności do wyższej uczelni z pokorą wobec celów, jakim służy – ambicję z autokrytycyzmem – instynkt rywalizacji z umiejętnością współpracy – zazdrość z podziwem dla cudzych osiągnięć”.

W swojej aktywności zawodowej profesor Janusz Mrocza daje wyraz przeświadczeniu, że zawód nauczyciela akademickiego zobowiązuje do realizacji wzniosłych norm moralnych.

Wszystko, co osiągnął, wypracował sam. Współpracownicy i znajomi często powtarzają, że okres od 2008 do września 2016 roku miał „pod górkę”, bowiem ówczesni przełożeni jego Uczelni niczego mu nie ułatwiali. Swoim zachowaniem, bezkompromisową postawą przeciwstawiał się knajackiemu stylowi ówczesnych władz, broniąc wypracowanej przez poprzednie pokolenia podmiotowości w życiu akademickim.

Zasługi dla Wojskowej Akademii Technicznej i środowiska naukowego

Profesor Janusz Mrocza rozpoczął swoją współpracę z Wydziałem Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 1996 roku. Zasługi Profe-

sora na rzecz Wojskowej Akademii Technicznej koncentrują się zarówno w obszarze rozwoju kadry naukowej, jak i badań naukowych.

Profesor J. Mroczka, współpracując od wielu lat z zespołami naukowymi Wojskowej Akademii Technicznej, opracował liczne recenzje rozpraw doktorskich i habilitacyjnych oraz wnioski o nadanie tytułu profesora pracownikom naukowym WAT, a także wniosek o uzyskanie uprawnień do nadawania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika przez Instytut Optoelektroniki WAT.

Zachęcał środowisko naukowe WAT do aktywnego angażowania się w działalność na rzecz komitetów naukowych, czego wynikiem jest, między innymi, liczna reprezentacja tego grona w Komitecie Metrologii i Aparatury Naukowej PAN (sześć osób z WAT). Poprzez wspólne projekty badawcze, konferencje i seminaria rozwinął szeroką i owocną współpracę Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej i Wojskowej Akademii Technicznej. Wspierał i nadal wspiera Wojskową Akademię Techniczną w rozwoju kadry naukowej, w podejmowaniu tematów badawczych oraz w upowszechnianiu dorobku naukowego i kreowaniu wizerunku WAT jako znaczącej uczelni technicznej.

Profesor J. Mroczka przyczynił się w znacznym stopniu do rozwoju kadry naukowej w Wojskowej Akademii Technicznej, a Jego wkład opisują pod względem liczbowym następujące dane:

1. Recenzja dotycząca uprawnień do nadawania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika przez Instytut Optoelektroniki WAT.
2. Recenzje wniosków profesorskich procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej:
 - dr hab. inż. Krzysztof Chrzanowski (2002),
 - dr hab. inż. Ryszard Pełka (2004),
 - dr hab. inż. Tadeusz Pustelny (2006),
 - dr hab. inż. Waldemar Żendzian (2016),
 - dr hab. inż. Krzysztof Józwiowski (2018).
3. Recenzje wniosków habilitacyjnych procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej:
 - dr inż. Krzysztof Chrzanowski (1996),
 - dr inż. Ryszard Pełka (1997),
 - dr inż. Michał Pawłowski (2008),
 - dr inż. Ryszard Szplet (2013),
 - dr inż. Jacek Świdorski (2015),
 - dr inż. Jacek Wojtas (2015).

4. Recenzje rozpraw doktorskich procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej:
 - mgr inż. Krzysztof Kwiatos (2000),
 - mgr inż. Anna Kurzych (2018).
5. Przewodniczący komisji habilitacyjnych przewodów procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej:
 - dr inż. Piotr Martyniuk (2015),
 - dr inż. Andrzej Bartnik (2016),
 - dr inż. Norbert Pałka (2016),
 - dr inż. Jacek Kwiatkowski (2016),
 - dr inż. Marcin Kochanowicz (2017),
 - dr inż. Małgorzata Kopytko (2018).
6. Rzecznik opinujący w Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów wniosków profesorskich procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej:
 - dr hab. inż. Henryk Madura (2015),
 - dr hab. inż. Andrzej Dobrowolski (2016),
 - dr hab. inż. Tadeusz Dąbrowski (2018).

Profesor Janusz Mroczka realizuje wiele badań naukowych we współpracy z zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Owocem osobistych kontaktów Profesora i badań prowadzonych w zespołach międzynarodowych są wspólne publikacje oraz odbyte staże naukowe przez doktorantów i studentów. Współpraca ta dotyczy następujących ośrodków zagranicznych:

- Institut National des Sciences Appliquées, Rouen, CNRS unite 6614 DS10, Francja;
- Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, Preston, Wielka Brytania;
- Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels, Marsylia, UMR CNRS 6595, Francja;
- Department of Biomedical Engineering, Boston University, Boston, USA;
- Biomedical Physics Laboratory, Université Libre de Bruxelles, Bruksela, Belgia;
- Auckland Bioengineering Institute, The University of Auckland, Auckland, Nowa Zelandia;
- Department of Electrical Engineering, Systems and Automation, Ghent University, Gandawa, Belgia;
- Dipartimento di Ingegneria Dell' Innovazione, University of Salento, Lecce, Włochy,

oraz utrzymuje kontakty naukowe z:

- Centre for Modelling and Information in Medicine, City University, Londyn, Wielka Brytania;
- Dipartimento de Elettronica e Informatica, University of Padova, Padwa, Włochy;
- Royal Brompton National Heart and Lung Hospital, Londyn, Wielka Brytania;
- Physiologie Respiratoire et Sportive, Hopital Charles-Nicolle, Rouen, Francja.

Profesor Janusz Mroczka, wraz z grupą swoich wychowanków i doktorantów, aktywnie uczestniczy w organizacji konferencji naukowych, w tym Kongresu Metrologii odbywającego się w cyklu trzyletnim, konferencji Metrologia Wspierana Komputerowo odbywającej się w cyklu dwuletnim, sympozjum *Modelowanie i Pomiary w Medycynie* – także w cyklu dwuletnim.

Profesor Janusz Mroczka od roku 2013 pełni z wyboru funkcję Członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych, a od roku 1996, w którym otrzymał tytuł naukowy profesora, był często powoływany na superrecenzenta Centralnej Komisji. Zapytany o to, czym jest dla Niego Centralna Komisja, odpowiedział: „...to miejsce szczególne, gdzie zrozumiałem, na czym polega krytycyzm chroniący nas od ślepego ulegania autorytetowi; jasność i ścisłość w naukowej argumentacji; bezwzględne dążenie do prawdy na różnych polach ludzkich dociekań”. Pytany z kolei, dlaczego tyle czasu i serca wkłada w opracowanie tak misternych opinii, odpowiedział: „...dobra recenzja jest dziełem sztuki niczym Szekspirowski dramat”, a gdy pytano dalej, skąd tu Szekspir, w odpowiedzi przytoczył słowa Jakuba w idyllicznej komedii *Jak wam się podoba*: „Świat jest teatrem, aktorami ludzie”. W odniesieniu do roli recenzenta, na pytanie, kim jest recenzent, odpowiedź brzmiała: „...to osoba mająca przywilej, że może być jednocześnie widzem ludzkiego dramatu, zaufanym Kandydata i współautorem, ponieważ towarzyszy Kandydatowi przez cały czas trwania procesu postępowania kwalifikacyjnego, pomagając Mu zmierzyć się z »piątym aktem jego tragedii, epilogiem jego powieści, rozwiązaniem akcji jego scenariusza«”. Myślę, że przytoczone tu wypowiedzi, mimo ukrytej, charakterystycznej dla Niego symboliki, jednoznacznie pokazują jego rolę, zrozumienie i pozycję jako opiniującego wnioski awansowe.

Wniosek końcowy

Profesor Janusz Mroczka to uczony wielkiego formatu, obdarzony niewątpliwym talentem i zdolnościami, wybitny autorytet i specjalista w za-

kresie metrologii elektronicznej i fotonicznej. W pracy naukowo-badawczej potrafi z wytrwałością i konsekwencją dążyć do postanowionego celu, a napotykanne trudności i przeciwności nie zniechęcają Go, a wręcz mobilizują do zwiększonego wysiłku.

Znany w środowisku z przestrzegania wysokich norm etycznych, nie schodzi z tak obranej drogi zarówno w działalności naukowej, jak również w życiu osobistym.

Wrażliwy na wymiar etyczny, cierpiał, kiedy musiał poznawać, jako członek Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów Naukowych, słabości ludzkiego działania w postępowaniach kwalifikacyjnych na stopień czy tytuł naukowy. Swoją pryncypialnością, wiedzą poraża, zasiewając u swoich oponentów niepewność i lęk. Mimo tego jest przez ogół szanowany i podziwiany. Obdarowywany uznaniem i wielkim szacunkiem. Jest otwarty, z dużym poczuciem humoru i dystansem do siebie. Każdy chciałby się z nim zaprzyjaźnić, ale w obawie, czy dotrzyma mu kroku w tej drodze, niewielu potrafi się do niego zbliżyć. Współpraca z Nim nie jest łatwa, ponieważ trudno Mu dorównać.

Obdarowany osobliwą kreatywnością, pełen entuzjazmu, poszukujący zawsze nowych dróg realizacji siebie, reagujący szybko ripostą – tzw. *bon mot* (zręczny zwrot, trafny żart) stał się elementem jego wizerunku. To sprawiło, że ma też licznych oponentów, którzy nie ułatwiają mu życia do dzisiaj. Jest to cena za odwagę i za to, że żartem uchylał kurtynę, ukazując pustkę i nicość w nadętych wielkościach.

W życiu Profesora i Jego sposobie bycia odnajdujemy cały klimat polskiego świata nauki, emocjonalnych wykładów okraszonych ciekawymi dykteryjkami, trudnych filozoficznych rozważań, niespotykanej erudycji. Dane mi było poznać Profesora bliżej, dzięki licznym spotkaniom w komisjach postępowań habilitacyjnych i wspólnym dyskusjom. Zauważalna w nich jest olbrzymia moc Jego analitycznego myślenia, łatwość rezygnacji z zewnętrznych uwarunkowań, czynienia możliwego z niemożliwego, ale też widoczna zamierzona zagadkowość.

Jego wewnętrzną przestrzeń intelektualną określa lotność myślenia, niebywała zdolność ujawniania paradoksów, łatwość dostawania się do ludzkich wnętrz, krusząc tym samym najtwardsze elementy ludzkiego ego.

Profesor znany jest też z kwitowania rzeczywistości cytataми klasyków. Swoim wychowankom pisze dedykacje zawierające myśli filozofów czy pisarzy. W większości wszelkie przedmowy zaczyna cytataми. Jest człowiekiem wrażliwym, refleksyjnym, solidnym, wiernym, o niespotykanej aktywności

intelektualnej. Znany jest z tego, że potrafił zrezygnować z zaszczytów na rzecz dobra wspólnego.

Zapytany o rodzinę, mówi, że to jej poświęcenie było i jest dla niego nieustającym natchnieniem do dalszego działania, to dzięki Ich oddaniu może żyć nauką.

Profesor Janusz Mroczka znany jest też z wykwintnej elegancji, jako arbiter dobrego smaku. Charakteryzują Go eleganckie garnitury i dyskretne barwy koszul z białymi zaokrąglonymi kołnierzykami i mankietami, uzupełnione perfekcyjnie dobranymi spinkami, muszkami, krawatami i poszetkami. Profesor to *sienkiewiczowski Petroniusz* naszych czasów – *arbiter elegantiarum* w środowisku naukowym.

Jestem głęboko przekonany, że pozycja i uznanie, jakie profesor Janusz Mroczka osiągnął w środowisku naukowym w kraju i za granicą, imponujące osiągnięcia w działalności naukowej, dydaktyczno-wychowawczej, a nade wszystko Jego walory etyczne, w pełni uzasadniają intencję Senatu Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego wyróżnienia Go godnością *doktora honoris causa* tej Uczelni.





**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI



Katedra Systemów Mikroelektronicznych

Prof. dr hab. inż. Stanisław Szczepański, prof. zw. PG

Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki

Politechnika Gdańska

OPINIA

o dorobku naukowym i osiągnięciach prof. dr. hab. inż. Janusza Mroczi, członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk, doktora *Honoris Causa* Politechniki Lubelskiej i Politechniki Opolskiej, w związku ze wszczęciem postępowania o nadanie tytułu i godności doktora *Honoris Causa* Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie.

Wprowadzenie

Zgodnie z wielowiekową tradycją akademicką, tytuł doktora *Honoris Causa* jest nadawany osobom w dowód uznania ich szczególnych zasług w dziedzinie nauki, kultury i działalności społecznej. Osoby proponowane do tej godności powinny wykazywać się wybitnymi osiągnięciami oraz wyróżniać się niekwestionowanym autorytetem i nienaganną postawą moralną nie tylko w swoim środowisku, ale również poza granicami krajów pochodzenia. Stąd wysoka międzynarodowa ranga i prestiż tego tytułu.

Decyzja o wyróżnieniu tym tytułem jest zawsze poprzedzona szczegółową analizą wagi i znaczenia zasług kandydata, jak również jego walorów etycznych. Pozytywna decyzja Senatu uczelni jest podejmowana tylko w przypadkach nie budzących żadnych wątpliwości.

POLITECHNIKA GDAŃSKA
Wydział Elektroniki,
Telekomunikacji i Informatyki
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
www.eti.pg.gda.pl

Sekretariat katedry:
tel.: +48 58 347 18 45
fax: +48 58 347 23 78
e-mail: ksmi@ue.eti.pg.gda.pl

Sylwetka Kandydata

Profesor Janusz Mrocza, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk urodził się 27 kwietnia 1952 roku w Dębicy. Studia wyższe ukończył w roku 1976 na Politechnice Wrocławskiej i od tego czasu metrologia elektroniczna i fotoniczna stała się Jego główną specjalnością naukową, którą zawodowo uprawia do dnia dzisiejszego. W roku 1980 na tej samej uczelni doktoryzował się w dyscyplinie elektroniki, a w 1991 roku otrzymał stopień naukowy doktora habilitowanego, również w zakresie elektroniki, na podstawie monografii pt. *"Metrologiczne wykorzystywania światła rozproszonego do badań rozkładu wielkości cząstek w roztworach dyspersyjnych"*. Po pięciu latach, w 1996 roku otrzymał tytuł profesora nauk technicznych, a w 1999 roku stanowisko profesora zwyczajnego.

Profesor Janusz Mrocza jest uznanym autorytetem naukowym, wybitnym specjalistą w zakresie współczesnej elektroniki i fotoniki. Jego obszerny dorobek publikacyjny oraz osiągnięcia badawcze są znane i cenione w kraju i za granicą. Środowisko akademickie z dużym uznaniem patrzy na stworzoną przez Niego szkołę naukową, znaną także na arenie międzynarodowej. Uznaniem budzą też osiągnięcia dydaktyczne Profesora Mroczki. Perfekcyjną dbałość o proces dydaktyczny zawsze łączy z dużą troską o wychowanie młodych ludzi. Sam, jak podkreśla w danych biograficznych, wychowany w surowej szkole etycznej, pragnie tak zaszczerpieone wartości przekazać swoim wychowankom. Jego wyjątkowe uzdolnienia w wielu dziedzinach, lotność myślenia i duża otwartość w kontaktach cenione są szczególnie przez młode pokolenie. Doktoranci oraz młodzi pracownicy nauki, mogąc zawsze liczyć na pomoc Profesora, obdarzają Go pełnym zaufaniem jako swojego Mistrza.

Postawę Profesora Janusza Mroczki jako naukowca dobitnie charakteryzują treści z udzielonego wywiadu gdzie mówi On, że *pracownik nauki powinien wykazywać entuzjazm w podejmowaniu tematyki naukowej, pasję w jej wykonywaniu – bezwzględną uczciwość w poszukiwaniu prawdy, odwagę w jej głoszeniu – bezinteresowność, duże poczucie obowiązku – otwartość i ciepłowość. Człowiek nauki powinien również godzić dumę z przynależności do wyższej uczelni z pokorą wobec celów, jakim służy – ambicję z autokrytycyzmem – instynkt*

rywalizacji z umiejętnością współpracy – zazdrość z podziwem dla cudzych osiągnięć. W swojej pracy naukowej i dydaktyczno – wychowawczej Profesor pozostaje wierny myślom Matki Teresy z Kalkuty, które przy różnych ważnych okazjach dedykuje drugim, bliskim Mu osobom. Profesor Mrocza ma znaczący wkład w rozwój młodej kadry naukowej w skali kraju, jest wychowawcą wielu cieszących się uznaniem w środowisku elektroników metrologów.

Osiągnięcia w pracy naukowo-badawczej

Profesor Janusz Mrocza jest profesorem zwyczajnym na Politechnice Wrocławskiej, członkiem Polskiej Akademii Nauk, doktorem *Honoris Causa* Politechniki Lubelskiej i Politechniki Opolskiej. Od początku swojej pracy zawodowej na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej wyróżnia się niezwykłą aktywnością i osiągnięciami w działalności naukowej i dydaktycznej, pełni też wiele ważnych funkcji w strukturach naukowych na uczelni. W latach 1991-1996 Profesor Janusz Mrocza był dyrektorem Instytutu Metrologii Elektrycznej na Politechnice Wrocławskiej, na tej samej uczelni od roku 1998 kieruje Katedrą Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej, która powstała z Jego inicjatywy. W zespole katedralnym realizuje On, wspólnie ze współpracownikami, cele i zadania badawcze stawiane w obszarze nauk empirycznych. Należy też podkreślić, że Profesor podejmuje z sukcesem problematykę naukową z innych dyscyplin, np. fizyki, optoelektroniki i inżynierii biomedycznej. Dzięki wypracowaniu znaczącego potencjału badawczego i dorobku naukowego na poziomie wysokich standardów światowych, stworzona przez Profesora Janusza Mroczkę Katedra postrzegana jest, zarówno w kraju i za granicą, jako renomowana szkoła naukowa w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej.

W aktywności zawodowej Profesora Mroczki godnym podziwu jest rozległość obszaru Jego zainteresowań naukowych, które między innymi dotyczą metodologii procesu poznawczego, algorytmizacji problemu odwrotnego, pomiarów pośrednich źle uwarunkowanych numerycznie, analizy spektralnej i polaryzacyjnej promieniowania rozproszonego w opisie właściwości układów dyspersyjnych, metodologii łączenia danych pomiarowych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod przetwarzania (fuzja danych), wykorzystania reprezentacji czasowo-częstotliwościowych

sygnałów w przetwarzaniu danych pomiarowych, opracowania metody momentów w analizie układów dyspersyjnych. Tematyka prac badawczych prowadzonych przez Profesora Janusza Mroczkę jest szeroka, wielowątkowa, w dużej części ma charakter interdyscyplinarny, obejmuje ważne pod względem poznawczym i potencjalnych zastosowań zagadnienia naukowe:

- Metodologię obserwacji i eksperymentu,
- Algorytmizację problemu odwrotnego,
- Modelowania matematycznego pól fizycznych i ich praktyczną realizację metodami tomografii optycznej i impedancyjnej,
- Kompleksowe modelowanie dynamicznych obiektów technicznych i biomedycznych z uwzględnieniem parametrów skupionych i rozłożonych,
- Analizę spektralną i polaryzacyjną promieniowania rozproszonego w układach dyspersyjnych i ich praktyczne wykorzystanie w ocenie właściwości materiałów kompozytowych,
- Metody obrazowania optycznego i przetwarzania danych pomiarowych w trójwymiarowej przestrzeni i ich fuzja na potrzeby bezstratnego kodowania obrazów,
- WieloczuJNIKOWĄ fuzję danych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod ich przetwarzania na rekonstrukcje o wyższej jakości.
- Wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowej do przetwarzania danych pomiarowych i ich realizację za pomocą procesorów sygnałowych,
- Metody identyfikacji parametrycznej statycznych i dynamicznych modeli złożonych obiektów, wraz z ich praktycznym zastosowaniem w pomiarach właściwości układu oddechowego i krwionośnego człowieka,
- Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do pozyskania informacji ilościowych i jakościowych z danych pomiarowych,
- Projektowanie, opracowanie i optymalizacja komputerowych systemów pomiarowych i informacyjnych do badań naukowych oraz procesów technologicznych,

- Projektowanie i wykonanie inteligentnych przyrządów pomiarowych z wykorzystaniem techniki mikroprocesorowej,
- Opracowanie systemów telemedycznych współpracujących z inteligentnym domem, nadzorującym bezpieczeństwo i stan zdrowia mieszkańców.

Aktualnie Profesor Mrocza wraz ze współpracownikami i doktorantami silnie skupiają swoją uwagę naukową na badaniach zagadnień mających duże znaczenie poznawcze i aplikacyjne:

- Uwarunkowania metrologiczne modeli fraktalnych fazy rozproszonej w analizie właściwości cząstek układów dyspersyjnych z wykorzystaniem światła rozproszonego,
- Analiza właściwości włókien światłowodowych z wykorzystaniem światła rozproszonego,
- Estymacja parametrów sygnału wieloczęstotliwościowego w zastosowaniu do sygnału sieci energetycznej w systemach energii odnawialnej,
- Analiza niejednorodności płuc w warunkach sztucznej wentylacji pacjenta,
- Maksymalizacja mocy pozyskanej z paneli fotowoltaicznych w systemach autonomicznych.

Profesor Janusz Mrocza realizuje szereg swoich badań we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Owocem osobistych kontaktów Profesora i badań prowadzonych w zespołach międzynarodowych są też wspólne publikacje oraz odbyte staże naukowe przez doktorantów i studentów. Współpraca ta dotyczy następujących ośrodków zagranicznych:

- Institut National des Sciences Appliquees, Rouen, Francja,
- Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, Preston, Wielka Brytania,
- Institut Universitaire des Systemes Thermiques Industriels, Marsylia, Francja,
- Department of Biomedical Engineering, Boston University, Boston, USA,
- Biomedical Physics Laboratory, Universite Libre de Bruxelles, Bruksela, Belgia,
- Auckland Bioengineering Institute, The University of Aucland, Nowa Zelandia,

- Department of Electrical Engineering Systems and Automation, Gent University, Belgia,
- Dipartimento di Ingegneria Dell' Innovazione, University of Salento, Lecce, Włochy,

oraz utrzymuje kontakty naukowe z:

- Centre for Modelling and Information in Medecine, City University, Londyn, Wielka Brytania,
- Dipartimento de Electronica e Informatica, Univrsity of Padova, Padwa, Włochy,
- Royal Brompton National Heart and Lung Hospital, Londyn, Wielka Brytania,
- Physiologie Respiratoire et Sportive, Hospital Charles Nicolle, Rouen, Francja,

W kraju Profesor Mrocza współpracuje z następującymi uczelniami:

- Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie,
- Politechnika Warszawska,
- Politechnika Gdańska,
- Politechnika Opolska,
- Politechnika Lubelska.

Dorobek naukowy Profesora Janusza Mroczi jest imponujący i zawiera wiele oryginalnych osiągnięć. Jest autorem i współautorem łącznie **415** publikacji, w tym **115** prac opublikował w czasopismach indeksowanych w Journal Citation Reports (JCR), **131** artykuły w czasopismach recenzowanych, **13** książek/monografii, w tym **7** zagranicznych, **145** referatów na konferencjach, w tym **64** na konferencjach międzynarodowych, **8** patentów. Jego prace były dotychczas cytowane **1110** razy wg. bazy WoS, **1276** razy wg. bazy Scopus i **1482** wg. bazy Google Scholar. Indeks Hirscha jest następujący: $h = 21$ wg. WoS, $h = 22$ wg. Scopus i $h = 27$ wg. Google Scholar. Był kierownikiem **21** projektów badawczych, w tym zrealizował: **6** projektów badawczych własnych, **7** projektów międzynarodowych, **1** projekt rozwojowy i **8** projektów promotorskich. W **6** projektach badawczych, w tym w **4** projektach własnych i w **2** projektach celowych brał udział jako główny wykonawca. Wyniki badań **4** projektów

zostały wdrożone do praktycznego stosowania. Profesor Mrocza jest stałym recenzentem wielu wydawnictw renomowanych czasopism naukowych, krajowych i zagranicznych. Opracował również liczne recenzje monografii i książek naukowych.

Profesor Janusz Mrocza, za działalność naukowo-badawczą i dydaktyczną otrzymał wiele wyróżnień i prestiżowych nagród, między innymi ponad 30 Nagród JM Rektora Politechniki Wrocławskiej. Otrzymał również Nagrodę Indywidualną II stopnia MEN (1989), Nagrodę Wydziału IV PAN (1993) oraz Subsydium Profesorskie Fundacji na rzecz Nauki Polskiej za rok 2005. Wyróżniony był Nagrodą *Professor Opollensis* (2014), Nagrodą Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia w opiece naukowej i dydaktycznej (2014) oraz Nagrodą Prezesa PAN za stworzenie szkoły naukowej w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej wraz z cykliczną serią wydawniczą „Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej” oraz czasopismem specjalistycznym indeksowanym w JCR „Metrology and Measurement Systems” (2015). Otrzymał również Nagrodę Naukową im. prof. Mariana Suskiego, Złotą Odznakę Politechniki Wrocławskiej z Brylantem, Medal im. prof. Kazimierza Idaszewskiego oraz Medal im. Prof. Włodzimierza Krukowskiego. Jest odznaczony Krzyżem Oficerskim Orderu Odrodzenia Polski, Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski, Złotym, Srebrnym i Brązowym Krzyżem Zasługi oraz Medalem Komisji Edukacji Narodowej. Profesor jest Doktorem *Honoris Causa* Politechniki Lubelskiej (2014) i Politechniki Opolskiej (2017).

Rozwój kadry naukowej i współpraca międzynarodowa

Dorobek Profesora Janusza Mroczi, w zakresie rozwoju kadry naukowej, zasługuje na szczególnie wysoką ocenę i uznanie. W swojej działalności dydaktycznej i wychowawczej zawsze priorytetowo widzi problemy oraz potrzeby młodych pracowników nauki i traktuje to jako kluczową przesłankę rozwoju nauki. Jego zaangażowanie oraz ogromny wkład pracy na tym polu zostało docenione i nagrodzone przez Fundację Nauki Polskiej w roku 2005 prestiżowym Subsydium Profesorskim „Mistrz”, przeznaczonym na przeprowadzenie zaawansowanych badań pt. „*Metrologiczne uwarunkowania fotonicznych metod analizy spektralnej i polaryzacyjnej promieniowania rozproszonego w układach dyspersyjnych*”.

Profesor relację mistrz – uczeń autorsko formułuje w następujących słowach: „*To relacja opierająca się na otwartości, wzajemnym zaufaniu i dobrowolności. Mistrz musi respektować godność, podmiotowość i autonomię ucznia, szanować jego prawo do swobodnej opinii na tematy naukowe. Mistrz powinien umieć odnosić się krytycznie i artykułować swoje uwagi tak, aby uczeń nie odbierał ich jako nagany, ale jako sposobność zrozumienia i pójścia krok do przodu. Nauka może rozwijać się tylko wtedy, kiedy ma miejsce rzeczywista ocena rezultatów, a nie kamuflaż i lobbowanie sztuczności*”

Kształcenie młodej kadry to również dbałość o wykazywanie właściwych postaw moralnych i przestrzeganie wysokich norm etycznych w relacjach pomiędzy naukowcami. Profesor Mrocza temu celowi poświęcił wiele uwagi w swoich licznych wykładach i referatach seminaryjnych, między innymi w specjalnym wykładzie „*Mistrz i uczeń*”, wygłoszonym po raz pierwszy przed Senatem Politechniki Wrocławskiej, a następnie w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie oraz w Instytucie Immunologii i Terapii Doświadczalnej im. L. Hirszfelda PAN w roku 2011. Problemy te są również przedmiotem rozważań w Jego referacie pt. „*Proces poznawczy w naukach empirycznych*” wygłoszonym w Politechnice Lubelskiej, w ramach seminariów naukowych pt. „*International Seminars on Computer Science*”, związanych z realizacją projektu Unii Europejskiej „*Absolwent na miarę czasu*”. Wykłady te były prezentowane wielokrotnie w innych ośrodkach akademickich i naukowych, m. in. na Politechnice Gdańskiej, zawsze wzbudzając ogromne zainteresowanie wśród słuchaczy.

Profesor Janusz Mrocza był promotorem **24** prac doktorskich, w tym **4** doktoraty *co-tutelle* we Francji, sprawował opiekę naukową nad **8** habilitantami, opracował **3** recenzje doktoratów *Honoris Causa* (prof. A. Barella z Barcelony, prof. Z. Hotra ze Lwowa, prof. W. Wolińskiego z Politechniki Warszawskiej), **54** recenzji wniosków profesorskich (**1** za granicą), **52** recenzji w przewodach habilitacyjnych oraz **20** recenzji rozpraw doktorskich, przewodniczył w **36** postępowaniach habilitacyjnych, wypromował ponad **200** magistrów inżynierów. Te imponujące osiągnięcia ujawniają talent i wyjątkową zdolność dostrzegania problemów badawczych, a także umiejętność tworzenia warunków i atmosfery mobilizującej młodych ludzi do twórczej pracy. Są też wynikiem systematycznej wieloletniej pracy Profesora z młodymi

ludźmi, co pozwoliło na zbudowanie prężnego zespołu badawczego z nowoczesną tematyką, a tym samym umożliwiło młodym uczonym współpracę z renomowanymi ośrodkami zagranicznymi na zasadach partnerskich.

Od lat Profesor utrzymuje kontakty z wieloma czołowymi ośrodkami naukowymi w Europie, USA, Kanadzie, Ameryce Południowej i Nowej Zelandii. Między innymi, owocem tak zapoczątkowanej pracy stały się doktoraty *co-tutelle*, prowadzone wspólnie z ośrodkami akademickimi we Francji. Profesor Janusz Mrocza był jednym z prekursorów tej formy współpracy międzynarodowej. Wypromowanie 4 doktoratów *co-tutelle*, wszystkich z wyróżnieniem, 1 z tych rozpraw otrzymała nagrodę im. M. Skłodowskiej – Curie jako najlepszy doktorat w danej dyscyplinie w Europie, świadczy również o umiejętności w poszukiwaniu warsztatu naukowego dla swoich doktorantów na światowym poziomie. O uznaniu i wysokiej pozycji Profesora Mroczy w międzynarodowym środowisku naukowym świadczy też fakt, że w 1993 roku powierzono Mu zorganizowanie i współprzewodniczenie w International Symposium of Optical Applied Science and Engineering „Optical Diagnostics in Fluid and Thermal Flow”, San Diego, USA. Za osiągnięcia naukowe 2 uczniów Profesora Janusza Mroczy otrzymało stypendium Fundacji Nauki Polskiej – „Nobel dla młodych”, 1 z uczniów został wyróżniony Nagrodą Wydziału IV PAN, 6 wychowanków jest już po habilitacji samodzielnymi pracownikami naukowymi.

Zasługi dla Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie i działalność organizacyjna

Przy bliższym poznaniu Profesora Janusza Mroczy dostrzegamy, że zawsze bardzo poważnie traktuje swoje obowiązki, nigdy się przed nimi nie uchyla, dążąc do tego, by wszystko zrealizować w terminie. We współpracy zawodowej z partnerami stara się nie zawodzić pokładanych w nim nadziei - tym bardziej, że pragnie mieć w swoim życiu jakąś misję. Jest z tego pokolenia, pewnie też z takiego domu, gdzie pracę naukową traktowano jako nobilitację. Twierdzi On, że praca naukowa buduje tożsamość własną jak i narodową, bowiem pracownik naukowy musi mieć poczucie misji, a pokora prowadzi do sukcesu. W duchu takich wartości Profesor Mrocza rozwija od wielu lat współpracę z zasłużoną dla obronności kraju

Wojskową Akademią Techniczną w Warszawie. Opracował liczne recenzje rozpraw doktorskich i habilitacyjnych oraz wniosków o nadanie tytułu profesora pracownikom naukowym Wojskowej Akademii Technicznej. Współpracował także w przygotowaniu wniosku o uzyskanie uprawnień do nadawania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika Instytutowi Optoelektroniki WAT. Jako członek Polskiej Akademii Nauk mobilizował środowisko naukowe WAT do aktywnego angażowania się w działalność na rzecz komitetów naukowych, czego wynikiem jest między innymi liczna reprezentacja przedstawicieli tej uczelni, (6 osób z WAT) w Komitecie Metrologii i Aparatury Naukowej PAN. Poprzez realizację wspólnych projektów badawczych, organizację konferencji i seminariów naukowych rozwinął szeroką i owocną współpracę na Wydziałach Elektroniki Politechniki Wrocławskiej i Wojskowej Akademii Technicznej. Wspiera tę uczelnię w rozwoju kadry naukowej, w podejmowaniu wspólnych projektów badawczych oraz w upowszechnianiu dorobku naukowego i kreowaniu wizerunku Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie jako znaczącej uczelni technicznej.

Profesor Janusz Mrocza, pomimo olbrzymiego zaangażowania w działalności naukowej i wielu obowiązków dydaktycznych, jest bardzo aktywny w pracach organizacyjnych na rzecz środowisk naukowych w kraju i za granicą. Jest też członkiem wielu prestiżowych organizacji akademickich i naukowych zarówno krajowych jak i międzynarodowych:

- Członek korespondent Polskiej Akademii Nauk (od 2010 r.),
- Członek Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych (od 2013 r.),
- Założyciel i Kierownik Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej (od 1998 r.),
- Dyrektor Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej (1991-1996 r.),
- Stały członek SPIE - The International Society for Optical Engineering (od 1992 r.),
- Członek International Technical Working Group on Penetrating Radiation, USA (od 1994 r.),
- Członek Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN (od 1993 r.), gdzie w latach 2001-2007 pełnił funkcję Wiceprzewodniczącego Komitetu, a od roku 2007 jest Przewodniczącym Komitetu,
- Członek stały Polskiego Towarzystwa Fizycznego (od 1986 r.),

- Członek Sekcji Miernictwo Interdyscyplinarne KBN (10 konkursów),
- Przewodniczący Sekcji Miernictwo Interdyscyplinarne KBN (5 konkursów),
- Członek Senatu Politechniki Wrocławskiej (1999-2005 r.),
- Członek wielu komisji na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej.

Profesor wraz z grupą swoich wychowanków i doktorantów aktywnie uczestniczy w organizacji konferencji naukowych, w tym *Kongresu Metrologii* odbywającego się w cyklu 3-letnim, konferencji *Metrologia Wspierana Komputerowo* odbywającej się w cyklu 2-letnim, sympozjum *Modelowanie i Pomiary w Medycynie* odbywającego się w cyklu 2-letnim.

Wniosek końcowy

Profesor Janusz Mrocza to uczony wielkiego formatu, wybitny autorytet i specjalista w zakresie elektroniki, metrologii i fotoniki. W badaniach naukowych wykorzystując swój niewątpliwy talent i zdolności, z wytrwałością i konsekwencją potrafi dążyć do postawionego celu. Spotykane trudności i przeciwności nie zniechęcają Go, a mobilizują do większego wysiłku. W swoich dociekaniach poznawczych, zawsze chętnie stosuje możliwości weryfikacji empirycznej wyników uzyskanych w procesie prowadzonych badań. Jest On pracownikiem naukowym, odznaczającym się szerokimi zainteresowaniami badawczymi, głęboką pasją poznawczą, krytycyzmem, pomysłowością i poczuciem humoru, które – zdaniem psychologów – pozostaje w istotnej statystycznie korelacji z potencjałem twórczym.

Poprzez umiejętne łączenie zawansowanych metod badawczych z dogłębną wiedzą i doświadczeniem, wielowątkowa działalność naukowa Profesora zaowocowała nie tylko bogatym dorobkiem publikacyjnym, ponad 400 pozycji, ale i uzyskaniem wyników, mających duże znaczenie poznawcze i aplikacyjne. Tak uprawiana tematyka naukowo-badawcza jest bardzo aktualna, także w wymiarze międzynarodowym. Konkludując, stwierdzam, że rzadkie przymioty osobiste i akademickie w sposób szczególnie predestynują Profesora Janusza Mroczkę do tego zaszczytu.

Jestem głęboko przekonany, że pozycja i uznanie, jakie Profesor Janusz Mrocza osiągnął w środowisku naukowym zarówno krajowym jak i zagranicznym, imponujące osiągnięcia w działalności naukowej oraz dydaktyczno-wychowawczej i społecznej oraz Jego walory etyczne, w pełni uzasadniają intencję Senatu Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie wyróżnienia Go godnością Doktora *Honoris Causa* tej Uczelni.

A handwritten signature in blue ink, reading "Stanisław Szepietowski". The signature is written in a cursive style with a large initial 'S'.

Gdańsk, 28 czerwca 2018 r.

OPINIA

o dorobku naukowym, osiągnięciach i zasługach prof. dr. hab. inż. Janusza Mroczki, profesora zwyczajnego Politechniki Wrocławskiej, członka korespondenta PAN, członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych, Kandydata do tytułu i godności *doktora honoris causa* Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego

*Gdy chcemy rozwinąć sztandary,
musimy iść naprzeciw przeciwnym wiatrom*
St. J. LEC

Wprowadzenie

Społeczność akademicka posiada wiele możliwości honorowania najlepszych ze swego grona. Najwyższym zaszczytem, przyznawanym tylko nielicznym, jest honorowy tytuł doktora. Ten zaszczytny tytuł honorowy *doktora honoris causa* to od pięciu stuleci najwyższy tytuł honorowy tradycyjnie przyznawany przez uczelnie szczególnie zasłużonym i godnym uhonorowania osobom spełniającym bardzo wysokie wymagania moralne. Poza tym naukowcy kandydujący do tego wyróżnienia muszą posiadać znaczące osiągnięcia naukowe, wyróżniać się znakomitymi efektami działalności dydaktycznej i prezentować rozpoznawalne w środowisku akademickim osiągnięcia organizacyjne. Osoby spełniające takie wymagania niewątpliwie mają znaczący wpływ na wyznaczanie standardów zachowań dla innych pracowników uczelni.

Przyznawanie tego zaszczytnego tytułu rozpoczęto w XV wieku na Uniwersytecie w Oxfordzie – najstarszej uczelni w Wielkiej Brytanii, powstałej w 1176 r.¹ Tytułem tym wyróżnia się do dzisiaj wybitnych przedstawicieli

¹ Dokładna data założenia Uniwersytetu w Oksfordzie nie jest znana, ale wiadomo, że należy on do najstarszych średniowiecznych uniwersytetów. Istnieją dane wskazujące na to, że wykładano tu już w roku 1096.

nauki, kultury i życia publicznego, cieszących się powszechnym szacunkiem, autorytetem naukowym i nienaganną postawą moralną i etyczną. Są to osoby godne naśladowania, znane i cenione nie tylko w swoim środowisku, a efekty ich działalności przynoszą trwały pożytek szerszej społeczności.

Jestem głęboko przekonany, że profesor dr hab. inż. Janusz Mrocza, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk, członek Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów, profesor zwyczajny Politechniki Wrocławskiej, *doktor honoris causa* Politechniki Lubelskiej i Politechniki Opolskiej, trwale wpisał się w ten obraz szanowanego pracownika naukowego, skupiając w swojej osobowości wszystkie wartości rozważane podczas procedowania tego znaczącego wyróżnienia. Decyzję o przyznaniu godności honorowej *doktora honoris causa* poprzedza zawsze wnikliwa analiza osiągnięć Kandydata, w tym Jego sylwetki moralno-etycznej, zarówno przez Senat uczelni nadającej tytuł, jak również przez Senaty prestiżowych uczelni akademickich prezentujących zbliżone obszary nauk, z których wywodzą się recenzenci powołani w prowadzonej procedurze.

Wnioskodawcami przyznania profesorowi dr hab. inż. Januszowi Mrocze godności *doktora honoris causa* były dwie podstawowe jednostki Wojskowej Akademii Technicznej: Wydział Elektroniki oraz Instytut Optoelektroniki. Wkład wnoszony przez wiele lat przez profesora Janusza Mroczkę w ramach współpracy naukowej, najpierw przez wiele lat z Wydziałem Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, a w ostatnim okresie również z Instytutem Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, w tym w szczególności mający niezaprzeczalny wpływ na rozwój kadry naukowej tych jednostek, moim zdaniem w pełni uzasadnia uhonorowanie Kandydata tytułem *doktora honoris causa*. Jest dla mnie znaczącym wyróżnieniem, że mogę być opiniodawcą dorobku profesora Janusza Mroczki w postępowaniu o przyznanie Mu tytułu *doktora honoris causa* tej Uczelni.

Sylwetka Kandydata

Profesor dr hab. inż. Janusz Mrocza urodził się 27.04.1952 r. w Dębicy. Ukończył I Liceum Ogólnokształcące w Dębicy w 1971 r. W tym samym roku podjął studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Ukończył je w 1976 r., broniąc pracę magisterską pt. *Filtr adaptacyjny dolnoprzepustowy do tłumienia sygnałów zakłócających w przyrządach tablicowych*. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w Instytucie Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej w 1980 r., na podstawie pracy doktorskiej pt. *Zagadnienie pomiaru mętności wody oraz wielkości cząstek roztworów koloidalnych za pomocą*

światła rozproszonego. W 1991 r. na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej uzyskał stopień doktora habilitowanego na podstawie monografii pt. *Metrologiczne problemy wykorzystywania światła rozproszonego do badań rozkładu wielkości cząstek w roztworach dyspersyjnych*. Ten okres Jego aktywności naukowej w znacznym stopniu ukształtował zainteresowania naukowe Profesora, kontynuowane do dzisiaj, pomimo naturalnego poszerzania obszaru badań naukowych w dalszych latach jego kariery naukowej.

Na stanowisko profesora nadzwyczajnego został powołany w 1994 r. Tytuł naukowy profesora otrzymał w 1996 r., a na stanowisko profesora zwyczajnego rodzimej uczelni został powołany w 1999 r. W latach 1991-96 pełnił z wyboru funkcję dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej. W 1998 r. założył – pierwszą po 1968 roku i związanych z tym okresem zmianach organizacyjnych Uczelni – Katedrę Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, którą kieruje do dzisiaj. Było to zwrócenie się przeciw panującej w tym okresie – od 1968 r. – na Politechnice Wrocławskiej doktrynie wiążącej strukturę uczelni z wydziałami i instytutami wydziałowymi. Fakt ten jest o tyle istotny, że już z tego okresu znane są wypowiedzi profesora Janusza Mroczi, w których jasno formułuje opinię, że rozwój nauki odbywa się na najniższych szczeblach organizacyjnych – w katedrach. Często także twierdził, że rozwój uczelni zależy głównie od ludzi, którym należy możliwie wysoko ustawiać poprzeczkę wymagań.

Profesor Janusz Mrocza pełnił w latach 1999-2005 zaszczytną funkcję senatora Senatu Politechniki Wrocławskiej. Profesor jest *doktorem honoris causa* Politechniki Lubelskiej (od 2014 r.) i Politechniki Opolskiej (doktorat nadany w 2016 r.).

Poza rodzimą uczelnią profesor Janusz Mrocza aktywnie uczestniczy w pracach wielu organizacji i komisji. Działania te prowadził zarówno w krajowych, jak też w uznanych organizacjach międzynarodowych. Jest także członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Pomiarowej PAN oraz Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Na niwie zagranicznej aktywnie działa w The International Society for Optical Engineering (USA), International Technical Working Group on Penetrating Radiation (USA). Od 1994 r. był członkiem Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego KBN (18 konkursów, w tym w sześciu pełnił funkcję przewodniczącego). W tym właśnie czasie miałem zaszczyt poznać osobiście Kandydata, obserwując Jego sposób działania i kierowania Sekcją, co pozwoliło mi nabyć dobrych zwyczajów związanych z procedowaniem wniosków o finansowanie zgłaszanych projektów badawczych. Do dzisiaj obserwacje te uważam za istotne.

Profesor Janusz Mrocza był w latach 2001-2007 wiceprzewodniczącym, a w latach 2007-2015 przewodniczącym Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN (członkiem tego gremium był od 1993 r.), który w 2014 r. został oceniony przez władze PAN jako najlepszy komitet naukowy tej organizacji.

Od roku 2013 profesor Janusz Mrocza jest członkiem Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów, gdzie w nowym otoczeniu prezentuje swoje poglądy oraz próbuje wdrażać je do praktyki związanej z procedurami awansowymi w nauce.

Zainteresowania naukowe Profesora dotyczą metodologii procesu poznawczego, algorytmizacji problemu odwrotnego, pomiarów pośrednich źle uwarunkowanych numerycznie, analizy spektralnej i polaryzacyjnej promieniowania rozproszonego w opisie właściwości układów dyspersyjnych, metodologii łączenia danych pomiarowych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod przetwarzania (fuzja danych), wykorzystania reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnałów w przetwarzaniu danych pomiarowych, opracowania metody momentów w analizie układów dyspersyjnych.

O ogromnym uznaniu działalności Profesora świadczy fakt, że jest członkiem wielu międzynarodowych organizacji, w tym jest stałym członkiem SPIE – The International Society for Optical Engineering (od 1992 r.), członkiem International Technical Working Group on Penetrating Radiation, USA (od 1994 r.), członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego (od 1986 r.). Powierzono Mu zorganizowanie i współprzewodniczenie International Symposium of Optical Applied Science and Engineering „Optical Diagnostics in Fluid and Thermal Flow”, San Diego, USA (1993). Utrzymuje On kontakty z wieloma ośrodkami naukowymi, m.in. w: Rouen, Yokohamie, Toronto, Preston, Marsylii, Eindhoven, Berlinie, Bostonie, San Diego, Rio de Janeiro, Buenos Aires, Londynie, Padwie, Lecce, Brukseli, Tampere, Szanghaju.

Za swoją działalność uzyskał liczne nagrody i wyróżnienia. Znajdują się w tym obszernym zestawieniu m.in.: Nagroda II stopnia MEN (1989 r.), Nagroda Wydziału IV PAN (1993 r.), subsydium profesorskie FNP za 2005 r., Nagroda Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za Wybitne Osiągnięcia w Opiece Naukowej i Dydaktycznej w 2014 r., Nagroda Prezesa Polskiej Akademii Nauk za 2015 r., Nagroda Naukowa im. prof. M. Suskiego, Nagroda *Professor Opoliensis* w 2014 r. Kandydat jest laureatem ponad 30 Nagród JM Rektora Politechniki Wrocławskiej. Został odznaczony m.in.: Krzyżem Oficerskim OOP, Krzyżem Kawalerskim OOP, Złotym, Srebrnym i Brązowym Krzyżem Zasługi, Medalem Komisji Edukacji Narodowej, Złotą Odznaką Politechniki Wrocławskiej z Brylantem, Medalem im. prof. Kazimierza Idaszewskiego oraz Medalem im. prof. Włodzimierza Krukowskiego.

Profesor Janusz Mrocza jest człowiekiem o silnej osobowości, odwadze i widocznym zacięciu humanistycznym. Jest On silnie osadzony w realiach problemów codziennych towarzyszących pracy naukowej, to również pragmatyk starający się skutecznie rozwiązywać problemy i trudności przy organizowaniu badań. Cechuje go błyskotliwość umysłu, rzadko spotykana pracowitość, spostrzegawczość i skłonność do rozważania paradoksów codzienności. Refleksyjna natura, jasność i precyzja jego toku myślenia, a także otwartość na istnienie ludzkich niedoskonałości i ograniczeń pozwoliły Mu zjednać do wspólnego działania szerokie spektrum naukowców. Profesor Mrocza jest przeciwnikiem szybkich, co za tym idzie zazwyczaj pochopnych ocen w odniesieniu zarówno do postaw współpracowników, otoczenia zawodowego, ale również w szerszym ujęciu obserwowanych zjawisk w bliższym i dalszym otoczeniu. Obcując z Nim, można ukierunkować swoje działania naukowe – niekiedy również uporządkować rozchwiane relacje osobowościowe – a nade wszystko zastanowić się nad znaczeniem przesłania realizowanego przez pracowników naukowych i dydaktycznych, które w postaci licznych cytatów uznanych autorytetów nauki, techniki i kultury Profesor przywoływał nie tylko podczas niezwykle ciekawych, emocjonalnych wykładów, lecz także w kontaktach interpersonalnych, w tym bardzo często w relacji nauczyciel – uczeń. Często prezentowane bezpośrednio myśli wskazywały na ukryte treści, których celem jest ukazanie odbiorcy sposobu różnego rozumienia i interpretacji, a tym samym przeniesienie i zasugerowanie głębszego poziomu znaczenia wypowiedzianych sentencji. Było to szczególnie ważne w okresach, w których Profesor borykał się z widoczną niechęcią wobec prezentowanych przez Niego tez i poglądów.

Symbolika stała się dla Niego narzędziem oddziaływania na innych. Widocznym przykładem tego jest umieszczona przez Niego osobiście w 1998 r. tablica z myślą Platona *Diligere veritatem omnem et in omnibus* nad drzwiami wejściowymi do Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej, którą założył na Politechnice Wrocławskiej.

Jedną z ważnych treści przekazywanych przez Profesora adeptom kariery akademickiej jest próba wskazania na powiązanie działań realizowanych w procesie kształtowania osobowości naukowca i dydaktyka na uczelni wyższej z długofalową oceną środowiska akademickiego efektów tych działań. Wiąza się z tym obszarem działalności Profesora Mroczki zawsze chętnie wykonywane, życzliwe, ale w pełni kompetentne recenzje prac i osiągnięć podczas wszelkich procedur awansowych młodszych koleżanek i kolegów, wybierających trudną, a niekiedy również pełną nieoczekiwanych zwrotów karierę naukowca. Recenzje opracowywane przez profesora Janusza Mroczkę, poza

walorami związanymi z kompetentną oceną osiągnięć Kandydata, posiadają zazwyczaj dodatkowe walory pozwalające na przemyślenia, także w zakresie pozamerytorycznych cech i osiągnięć Kandydata.

Osiągnięcia w pracy naukowo-badawczej

Obszar zainteresowań oraz posiadana wiedza i kompetencje profesora Janusza Mroczi związane są z takimi dziedzinami i specjalnościami jak: elektronika, optoelektronika, metrologia, fizyka, w tym fizyka ciała stałego, matematyka, w tym równania całkowe, procesy stochastyczne, metody analizy sygnałów, wybrane działy bioinżynierii, filozofia nauki. Ta obszerna, interdyscyplinarna, doskonale opanowana wiedza pozwala Mu na prowadzenie badań o szerokim spektrum tematycznym. Profesor nie tylko sam realizuje prace w tej rozległej tematyce, ale skutecznie tworzy zespoły badawcze, które zgrupowane wokół Jego dominującej osobowości, potrafią rozwiązywać bardzo złożone problemy naukowe i aplikacyjne. Zainteresowania naukowe profesora Janusza Mroczi koncentrują się wokół kilku zasadniczych problemów: metodologii procesu poznawczego, algorytmizacji problemu odwrotnego, pomiarów pośrednich źle uwarunkowanych numerycznie, metodologii łączenia danych pomiarowych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod przetwarzania, wykorzystania reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnałów w przetwarzaniu danych pomiarowych, opracowania metody momentów w analizie układów dyspersyjnych. Aktualnie profesor Janusz Mrocza prowadzi badania naukowe i publikuje prace w następujących obszarach: metodologia obserwacji i eksperymentu, algorytmizacja problemów odwrotnych, modelowanie pól wielkości fizycznych i ich wykorzystanie w diagnostyce obiektów, modelowanie dynamicznych obiektów technicznych i biomedycznych z uwzględnieniem modeli o parametrach skupionych i rozłożonych, analiza spektralna i polaryzacyjna promieniowania rozproszonego w układach dyspersyjnych i ich praktyczne wykorzystanie w ocenie właściwości materiałów kompozytowych, metody obrazowania optycznego i przetwarzania danych pomiarowych w trójwymiarowej przestrzeni i ich fuzja na potrzeby bezstratnego kodowania obrazów, wieloczuJNIkowa fuzja danych o różnej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod ich przetwarzania na rekonstrukcję o wyższej jakości, wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowej do przetwarzania danych pomiarowych i ich praktyczna realizacja za pomocą procesorów sygnałowych, metody identyfikacji parametrycznej statycznych i dynamicz-

nych modeli złożonych obiektów wraz z ich praktycznym zastosowaniem w pomiarach właściwości układu oddechowego i krwionośnego człowieka, wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do pozyskiwania informacji ilościowych i jakościowych z danych pomiarowych, projektowanie, opracowywanie i optymalizacja komputerowych systemów pomiarowych i informacyjnych do badań naukowych oraz procesów technologicznych, projektowanie i wykonywanie inteligentnych przyrządów pomiarowych z wykorzystaniem techniki mikroprocesorowej oraz opracowywanie systemów zdalnego nadzoru medycznego współpracujących z inteligentnym domem, nadzorujących bezpieczeństwo i stan zdrowia mieszkańców.

Powyższe obszary naukowe pozwalają profesorowi Januszowi Mroczce wykorzystywać szeroką wiedzę teoretyczną i praktyczną, metodologię badań opracowaną przez Niego, wnoszące istotny wkład do nauk podstawowych. Szczególnie bliskie są Mu zagadnienia badawcze i naukowe dotyczące algorytmizacji problemu odwrotnego źle uwarunkowanych zadań w złożonych pomiarach pośrednich.

Profesor Janusz Mroczka w 2000 roku założył na Politechnice Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki grupę naukową zajmującą się cyfrowym przetwarzaniem sygnałów. Do tworzonego zespołu, w którym znajdowało się już dwóch Jego wychowanków, w 2002 r. dołączył kolejny Jego uczeń wywodzący się z Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, a w roku 2006 magistrantka Profesora - absolwentka Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Prace prowadzone w zespole zaowocowały do tej pory obroną czterech doktoratów oraz uzyskaniem dwóch habilitacji. Tematyka badawcza stworzonego przez prof. Janusza Mroczkę zespołu obejmuje cztery zasadnicze obszary: zastosowanie analiz czasowych, częstotliwościowych oraz czasowo-częstotliwościowych w badaniach jakości energii elektrycznej, analizę i pomiary zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych, w tym także problematykę jakości energii elektrycznej, konstrukcję wbudowanego sprzętu pomiarowego opartego na nowoczesnych jednostkach obliczeniowych typu procesory aplikacyjne, procesory sygnałowe, układy FPGA i mikrokontrolery oraz zastosowanie zaawansowanych analiz cyfrowego sygnału do badania sygnałów biomedycznych. Prace koncentrują się wokół poszukiwania zaawansowanych metod analizy oraz cyfrowego przetwarzania sygnałów, które często ze względu na swoją złożoność obliczeniową nie były powszechnie stosowane w tym obszarze naukowym.

Zespół w ciągu kilkunastu lat swojego istnienia podejmował wiele inicjatyw naukowo-organizacyjnych. Opublikowano liczne artykuły w czasopiśmie

o zasięgu międzynarodowym i krajowym, m.in. „IEEE Transactions on Power Delivery”, „Metrology and Measurement Systems”, „Energy Spectrum”. Wyniki badań prezentowane były na prestiżowych międzynarodowych konferencjach, m.in. International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, International Conference on Harmonics and Quality of Power, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, International Scientific Conference – Electric Power Engineering. Realizowano programy stażowe w przemyśle – łącznie osiem. Członkowie zespołu uczestniczą ponadto w pracach Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk oraz Komisji Elektroniki Polskiej Akademii Nauk. Obecnie w zespole rozwija się kolejne pokolenie naukowców, zgromadzone wokół tematyki zainspirowanej przez Profesora Mroczkę, poszerzając ją o zagadnienia informatyczne w systemach wbudowanych oraz problematykę automatyki trakcji kolejowej.

Podobnie inspirujące osiągnięcia Profesor Mroczka posiada w odniesieniu do prac realizowanych przy współpracy z Politechniką Lubelską, dotyczą one problematyki czujników światłowodowych i ich aplikacji w diagnostyce obiektów oraz kontroli wybranych parametrów procesów technologicznych i charakteryzacji w czasie rzeczywistym wybranych parametrów obiektów technicznych. Wymiernym owocem tej współpracy jest jedna zakończona habilitacja oraz jedna procedura habilitacyjna w toku.

Profesor Janusz Mroczka jest autorem/współautorem **415** publikacji, wśród nich **115** z listy filadelfijskiej, **131** artykułów w czasopiśmie, **4** monografii i książek, **13** rozdziałów w monografiach i książkach, **145** referatów konferencyjnych, w tym **64** na konferencjach międzynarodowych, **8** patentów i zgłoszeń patentowych, **23** recenzji artykułów z listy filadelfijskiej, **6** recenzji monografii i książek. Liczba cytowań, będąca wskaźnikiem odbioru w świecie prac publikowanych przez prof. J. Mroczkę, wynosi **1103** wg bazy WoS, **1267** wg bazy Scopus i **1743** wg bazy Google Scholar, natomiast indeks Hirscha $h = 21$ dla WoS, $h = 22$ dla Scopus, $h = 27$ dla Google Scholar.

Profesor opracował **3** recenzje doktoratów *honoris causa* (prof. A. Barella z Barcelony, prof. Z. Hotra ze Lwowa, prof. W. Woliński, WAT, Warszawa), **54** recenzje wniosków profesorskich, **1** recenzję wniosku profesorskiego za granicą (Preston, Anglia), **52** recenzje przewodów habilitacyjnych oraz **20** recenzji prac doktorskich.

Uczestniczył w realizacji **27** projektów badawczych, w tym zrealizował: **9** projektów badawczych własnych, **2** projekty celowe, **1** projekt rozwojowy, **8** projektów promotorskich i **7** projektów międzynarodowych. W **4** projektach badawczych brał udział jako główny wykonawca, a wyniki badań z **4** projektów zostały wdrożone do praktycznego stosowania.

Za osiągnięcia naukowe dwóch wychowanków profesora Janusza Mroccki otrzymało stypendium Fundacji Nauki Polskiej: „Nobel dla młodych”, jeden został wyróżniony nagrodą Wydziału IV PAN, a trzynastu obroniło z wyróżnieniem prace doktorskie. Ośmiu z nich jest obecnie samodzielnymi pracownikami naukowymi.

Zespół profesora Janusza Mroccki realizuje wiele projektów naukowych we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Owocem tych badań są wspólne publikacje oraz staże naukowe doktorantów i studentów. Zrealizowane w zespole profesora J. Mroccki badania naukowe pozwalają uznać, że jest On twórcą, liczącej się w kraju i za granicą, szkoły naukowej w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej.

Profesor Janusz Mroccka jawi się w tym kontekście jako nietuzinkowa postać naukowca, będąc także bardzo ciekawą i znaczącą osobowością w polskiej metrologii. Jego działania w tej dziedzinie to wiele znaczących osiągnięć. Zaczynając od ciągłego wskazywania istotnych aspektów metrologii i jej ukrytego piękna, które to problemy i zdobycze zaznaczał przy każdej okazji, a kończąc na głębokiej reformie organizacyjnej zrealizowanej w Komitecie Metrologii i Aparatury Pomiarowej PAN. Nadal wskazuje na piękno metrologii, a swoją pracą wciąż rozwija tę dziedzinę wiedzy. To On w 2008 r. zapoczątkował wydawanie cyklu książek pt. **Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej**, który systematycznie pod jego redakcją ukazuje się każdego roku. Ten cykl wydawniczy ukazuje najnowsze osiągnięcia polskich uczonych, stanowiąc dla wielu młodych adeptów nauki możliwość szerszego zaprezentowania swoich opracowań i przemyśleń na gruncie większego forum naukowego.

Cykl ten to każdorazowo jednolicie zredagowany zbiór obszernych (nawet kilkudziesięciostronicowych) opracowań naukowych, których twórcami są zarówno znane autorytety z tej dziedziny w Polsce, jak i zauważane w środowisku nowe twarze naukowców reprezentujących już wysoki poziom merytoryczny w swoich opracowaniach. Seria cieszy się dużym uznaniem także za granicą. Tak przyjęta forma pozwala ukazać i propagować w szerokim gremium naukowym najlepsze prace na stopień doktora i doktora habilitowanego, dając tym samym wykładnię poziomu i sposobu prowadzenia badań naukowych. Ta seria ukazała się dotychczas w 9 tomach (wliczając numer tegoroczny) i stanowi uznane opracowanie w środowisku naukowym. W opracowaniu i studiowaniu tej publikacji zdobywają ostrogi naukowe młodsze pokolenia pracowników naukowych. Jest też uznanym sposobem doskonalenia się i kształtowania postaw młodych ludzi.

Uznanie, jakim cieszy się za granicą, pozwoliło profesorowi J. Mrocckie wprowadzić czasopismo „Metrology and Measurement Systems” na listę

filadelfijską - aktualny wskaźnik IF czasopisma wynosi 1,63. Taka pozycja czasopisma w obszarze nauk technicznych jest dużym sukcesem. Kierowany przez Niego Komitet Metrologii i Aparatury Pomiarowej PAN (w którym pełnił, z wyboru, funkcję Przewodniczącego przez dwie kadencje, tzn. od 2007 do 2015 r.) w ocenie Prezydium PAN zajął pierwsze miejsce jako najlepszy Komitet w Polskiej Akademii Nauk.

Osiągnięcia w zakresie opieki naukowej i dydaktycznej

W swojej działalności dydaktycznej i wychowawczej Profesor na pierwszym miejscu stawia na rozwój naukowy młodych pracowników i traktuje to jako kluczową przesłankę rozwoju nauki. Profesor Janusz Mroczka często powtarza, że rozwój uczelni zależy przede wszystkim od ludzi. Twierdzi, że rozwój polskiej nauki rodzi się na najniższych jej szczeblach organizacyjnych. W istotny sposób rozwinął zaplecze i bazę aparaturową, a także wiele wątków badawczych w kierowanej przez Niego Katedrze. Odbywają się tam stałe seminaria naukowe, na których prezentowane są prace młodych pracowników, doktorantów i wyróżniających się studentów, którzy podczas studiów zgłaszają chęć realizacji swoich zainteresowań naukowych w Katedrze. Młodym adeptom nauki stara się wpoić przekonanie, że czas właściwej oceny ich ewentualnych osiągnięć może być długi – bywa, że staje się dłuższy niż jedno życie i tylko ci z nich, którzy swoje działania planują w takiej skali czasowej, potrafią w pełni realizować swoje plany naukowe, a równocześnie umożliwia to przeprowadzenie misji związanej z kształtowaniem swoich następców. Profesor Mroczka własnym przykładem potwierdza te stwierdzenia, przekazując młodym współpracownikom i studentom swoje doświadczenie życiowe, kształtuje wrażliwość aksjologiczną, krytycyzm w działaniach badawczych oraz stara się uformować jasność myśli i najcenniejszą dla członka społeczności akademickiej troskę o zachowanie krytycyzmu i prawa do odrębności poglądów, ale również twórczy niepokój w poszukiwaniu obiektywnej prawdy – niekiedy również pozanaukowej.

W latach 1991-1996 profesor J. Mroczka był dyrektorem Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, gdzie założył specjalność dydaktyczną aparatura elektroniczna, która do dziś jest najbardziej popularna wśród studentów na kierunku elektronika, a w przypadku pracodawców stanowi kuźnię młodych talentów poszukiwanych na rynku pracy w całym kraju.

Profesor Janusz Mroczka, będąc zatrudniony od roku 1997 na Politechnice Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki, również w tym środowisku zaznaczył swoją obecność. Prowadził wykłady z zakresu

cyfrowego przetwarzania sygnałów, kładąc podwaliny samodzielnej grupy naukowej prowadzącej badania w zakresie aplikowania zaawansowanych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów w wielu obszarach techniki i technologii. Jego autorskie wykłady na kierunkach informatyka, elektronika i telekomunikacja, automatyka i robotyka pozwoliły Mu ukształtować intelektualnie i dać podstawy do działań praktycznych kilku pokoleniom studentów i doktorantów oraz umożliwiły wypromowanie 41 dyplomantów. Ta wieloletnia praca Profesora z młodymi studentami i doktorantami pozwoliła na utworzenie i zbudowanie zespołu zajmującego się atrakcyjną, nowoczesną tematyką, a tym samym umożliwienie współpracy z różnymi ośrodkami zagranicznymi i krajowymi na zasadach partnerskich. Owocem tak zapoczątkowanej pracy stały się doktoraty prowadzone wspólnie z naukowymi ośrodkami francuskimi. Istotne jest, że prof. J. Mroczka był jednym z prekursorów takich doktoratów, zapoczątkowanych w latach 90. ubiegłego wieku. Wypromowanie przez prof. Janusza Mroczkę przy współpracy z ośrodkami francuskimi czterech doktoratów, wszystkich obronionych z wyróżnieniem, świadczy o umiejętności Kandydata w poszukiwaniu warsztatu naukowego na światowym poziomie dla młodych aplikantów do kariery akademickiej. Ostatni z tych doktoratów otrzymał nagrodę Marii Skłodowskiej-Curie za najlepszy doktorat w Europie w danej dyscyplinie w danym roku. Profesor Mroczka wypromował łącznie 24 doktorów, sprawował opiekę naukową nad ośmioma habilitantami.

Jego aktywność na polu dydaktyki została zauważona i nagrodzona przez Fundację Nauki Polskiej w 2005 roku subsydem profesorskim „Mistrz”. W swojej aktywności zawodowej prezentuje pogląd, że zawód nauczyciela akademickiego zobowiązuje do realizacji wymagających wysokich kryteriów moralnych. Pogląd ten potwierdza swoimi codziennymi działaniami. Całym swoim życiem, bardzo aktywnym i pełnym zaangażowania, Profesor kształtuje szkołę moralną opartą o takie wartości jak szlachetność, odwaga, pokora, poszanowanie pracy, szacunek dla współpracowników i oponentów na niwie naukowej i w codziennych zachowaniach. Profesor Janusz Mroczka realizuje swoje cele i wykonuje zaplanowane zadania z pełną determinacją. Równocześnie uwielbia wyzwania i dobrze się czuje, stając w ich obliczu.

Do najważniejszych osiągnięć prof. J. Mroczki w działalności dydaktycznej należy utworzenie na Wydziale Elektroniki specjalności aparatura elektroniczna i konsekwentna jej modernizacja przez wiele lat. W trakcie kolejnych aktualizacji i dostosowywania tematyki tej specjalności do potrzeb absolwentów, ale głównie do oczekiwań zmieniającego się rynku pracy, kierował się w szczególności zapewnieniem młodym ludziom szansy dalszego rozwoju

i sprostania konkurencji na bardzo wymagającym rynku pracy. Pochłonięty współpracą z młodymi, stara się ich od pierwszych lat studiów zainteresować pracą naukową, a po ich deklaracji o kontynuacji współpracy na studiach doktoranckich konsekwentnie z nimi współpracować. Wychowany w surowej szkole etycznej pragnie tak zaszczepione wartości przekazywać swoim wychowankom. Przykładem jest wykład „Mistrz i uczeń”, znany w wielu ośrodkach akademickich w kraju, pokazujący wizję profesora J. Mroczi i paradygmat, jakim posługuje się w procesie dydaktycznym. Wykład ten, wygłoszony po raz pierwszy w Sali Senatu Politechniki Wrocławskiej, zdobył rozgłos w środowisku akademickim jako ten element, który mógłby odegrać istotną rolę w coraz bardziej skomercjalizowanych uwarunkowaniach, w których dane jest młodym pokoleniom dorastać. Wykład ten został wygłoszony na zaproszenie m.in. w: Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, w Instytucie Immunologii i Terapii Doświadczalnej PAN im. L. Hirszfelda we Wrocławiu i w wielu innych środowiskach akademickich, w których został entuzjastycznie przyjęty nie tylko przez starsze pokolenia naukowców, ale przede wszystkim przez młodsze pokolenia. W całej swojej działalności zawodowej profesor Janusz Mrocza wskazuje, że zawód nauczyciela akademickiego zobowiązuje do realizacji nie tylko zadań naukowych i dydaktycznych, lecz także wzniosłych norm moralnych.

Swoim zachowaniem, bezkompromisową postawą przeciwstawia się każdej próbie obchodzenia wymogów stawianych pracownikom uniwersyteckim, broniąc wypracowanej przez poprzednie pokolenia podmiotowości w życiu akademickim.

Profesor Janusz Mrocza realizuje wiele badań naukowych we współpracy z zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Owocem osobistych kontaktów Profesora i badań prowadzonych w zespołach międzynarodowych są wspólne publikacje oraz odbyte staże naukowe przez doktorantów i studentów. Współpraca ta dotyczy następujących ośrodków zagranicznych: Institut National des Sciences Appliquées, Rouen, CNRS unite 6614 DS10, Francja, Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire (Preston, Wielka Brytania), Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (Marsylia, Francja), Department of Biomedical Engineering, Boston University (USA), Biomedical Physics Laboratory, Université Libre de Bruxelles (Belgia), Auckland Bioengineering Institute, The University of Auckland (Nowa Zelandia), Department of Electrical Engineering, Systems and Automation, Ghent University (Belgia), Dipartimento di Ingegneria Dell'Innovazione, University of Salento (Lecce, Włochy). Utrzymuje także kontakty naukowe z: Centre for Modelling and Information

in Medicine, City University (Londyn, Wielka Brytania), Dipartimento de Elettronica e Informatica, University of Padova (Włochy), Royal Brompton National Heart and Lung Hospital (Londyn, Wielka Brytania), Physiologie Respiratoire et Sportive, Hospital Charles Nicolle (Rouen, Francja).

Profesor Janusz Mroczka był promotorem 24 prac doktorskich (4 we Francji, wszystkie wyróżnione, a ostatnia zrealizowana przez jego doktoranta praca doktorska otrzymała nagrodę im. M. Skłodowskiej-Curie jako najlepszy doktorat w danej dyscyplinie w Europie). Kandydat sprawował opiekę nad przygotowaniem ośmiu habilitacji, recenzował trzy wnioski o nadanie *doktoratu honoris causa*, 54 wnioski profesorskie (jeden za granicą), 52 habilitacje, 20 doktoratów, przewodniczył 27 komisjom habilitacyjnym, wypromował ponad 200 dyplomantów.

Od roku 2013 Kandydat pełni z wyboru funkcję Członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych, a od roku 1996, w którym otrzymał tytuł naukowy profesora, często powoływany jest na superrecenzenta Centralnej Komisji.

Zasługi dla Wojskowej Akademii Technicznej

Profesor Janusz Mroczka rozpoczął swoją współpracę z Wojskową Akademią Techniczną w 1996 roku. Podjął wtedy współpracę z Wydziałem Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, a wiele lat później równoległe takie same działania rozpoczął w relacjach z Instytutem Optoelektroniki. Zasługi profesora Janusza Mroczki na rzecz Wojskowej Akademii Technicznej koncentrują się zarówno w obszarze rozwoju kadry naukowej, jak również na badaniach naukowych oraz uczestniczeniu w działaniach organizacyjnych prowadzonych w obszarze metrologii.

Profesor Janusz Mroczka, współpracując od wielu lat z zespołami naukowymi Wojskowej Akademii Technicznej, był powoływany do realizacji licznych recenzji rozpraw doktorskich i habilitacyjnych oraz do opiniowania wniosków o nadanie tytułu profesora pracownikom naukowym WAT. Brał udział w opiniowaniu wniosku o uzyskanie uprawnień do nadawania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika, o jakie starał się Instytut Optoelektroniki WAT.

Zachęcał środowisko naukowe WAT do aktywnego angażowania się w działalność na rzecz komitetów naukowych, czego wynikiem jest, między innymi, liczna reprezentacja tego grona w Komitecie Metrologii i Aparatury Naukowej PAN (sześć osób z WAT). Poprzez wspólne projekty badawcze, konferencje i seminaria rozwinął szeroką i owocną współpracę Wydziału

Elektroniki Politechniki Wrocławskiej i Wojskowej Akademii Technicznej. Wspierał i nadal wspiera Wojskową Akademię Techniczną w rozwoju kadry naukowej, w podejmowaniu tematów badawczych oraz w upowszechnianiu dorobku naukowego i kreowaniu wizerunku Wojskowej Akademii Technicznej jako znaczącej uczelni technicznej. Profesor Janusz Mroczyka przyczynił się w dużym stopniu do rozwoju samodzielnej kadry naukowej w Wojskowej Akademii Technicznej, a Jego wkład opisują pod względem liczbowym następujące dane:

1. Recenzja wykonana w ramach oceny wniosku Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej aplikującego o uzyskanie uprawnień do nadawania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika.
2. Recenzje pięciu wniosków o tytuł profesora procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej dla jej pracowników: dr hab. inż. Krzysztof Chrzanowski (2002), dr hab. inż. Ryszard Pełka (2004), dr hab. inż. Waldemar Żendzian (2016), dr hab. inż. Przemysław Wachulak (2017) oraz dr hab. inż. Krzysztof Józwiowski (2018).
4. Recenzja wniosku o tytuł profesora procedowanego w Wojskowej Akademii Technicznej dla pracowników z zewnątrz - dr hab. inż. Tadeusz Pustelny (2006).
3. Recenzje sześciu wniosków habilitacyjnych procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej - dr inż. Krzysztof Chrzanowski (1996), dr inż. Ryszard Pełka (1997), dr inż. Michał Pawłowski (2008), dr inż. Ryszard Szplet (2013), dr inż. Jacek Świdorski (2015), dr inż. Jacek Wojtas (2015).
4. Recenzje dwóch rozpraw doktorskich procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej - mgr inż. Krzysztof Kwiatos (2000), mgr inż. Anna Kurzych (2018).
5. Przewodniczący sześciu komisji habilitacyjnych przewodów procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej - dr inż. Piotr Martyniuk (2015), dr inż. Andrzej Bartnik (2016), dr inż. Norbert Pałka (2016), dr inż. Jacek Kwiatkowski (2016), dr inż. Marcin Kochanowicz (2017), dr inż. Małgorzata Kopytko (2018). W tym zestawieniu pojawia się również pracownik Politechniki Białostockiej, który uzyskał stopień dr. hab. - dr hab. inż. Marcin Kochanowicz.
6. Rzecznik opinujący w Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów trzy wnioski profesorskie procedowane w Wojskowej Akademii Technicznej - dr hab. inż. Henryk Madura (2015), dr hab. inż. Andrzej Dobrowolski (2016), dr hab. inż. Tadeusz Dąbrowski (2018).

Profesor Janusz Mroczka, wraz z grupą swoich wychowanków i doktorantów, aktywnie uczestniczy w przygotowaniu konferencji naukowych organizowanych przez jednostki Wojskowej Akademii Technicznej oraz bierze w nich aktywny udział. Są to: *Kongres Metrologii* odbywający się w cyklu trzyletnim, konferencja *MWK - Metrologia Wspierana Komputerowo* - w cyklu dwuletnim, sympozjum *Modelowanie i Pomiary w Medycynie* odbywające się w cyklu dwuletnim.

Wniosek końcowy

Profesor Janusz Mroczka to uczonego dużego formatu, obdarzony talentem i zdolnościami w wielu obszarach nauki i techniki. Jest bardzo sprawnym organizatorem w obszarze nauki i dydaktyki. Jest uznanym autorytetem w zakresie szeroko pojętej metrologii. W pracy naukowo-badawczej potrafi z konsekwencją dążyć do wyznaczonych celów, przewyższać pojawiające się na wyznaczonej drodze trudności i przeciwności. Takie utrudnienia nie zniechęcają Go, a mobilizują do zwiększonego wysiłku. Profesor Janusz Mroczka znany jest z przestrzegania norm etycznych, nie schodzi z tak obranej drogi zarówno w działalności naukowej, jak również w życiu osobistym. Wrażliwy na wymiar etyczny działalności naukowej, jako członek Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów Naukowych nie przyryka oczu na słabości ludzkiego działania w postępowaniach kwalifikacyjnych na stopień czy tytuł naukowy. Swoją pryncypialnością u oponentów wzbudza niepewność, ale także szacunek do wygłaszanych twierdzeń i opinii.

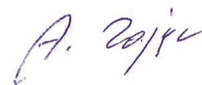
Jest otwarty, z dużym poczuciem humoru i dystansem do siebie. Współpraca z Nim nie jest łatwa, ale każda jej próba stanowi dla Jego współpracowników źródło korzyści. Profesor Mroczka jest osobowością wyjątkowo kreatywną, pełną entuzjazmu w działaniach zarówno codziennych, jak i tych zaplanowanych na wiele lat. W relacjach werbalnych Profesor jest osobą reagującą szybką ripostą, a dobrze dobrane, cięte odpowiedzi stały się jednym z bardziej rozpoznawalnych elementów Jego wizerunku.

W życiu Profesora i Jego sposobie bycia odnajdujemy, chyba już nie tak dominujący, jak w znanych przekazach o życiu w środowisku akademickim, klimat świata nauki; wykładów będących dla braci studenckiej źródłem przemyśleń i modelem do kształtowania swojej sylwetki predestynującej do elity społecznej. Wykładów okraszonych ciekawymi dykteryjkami, niekiedy ocierających się o wybrane rozważania filozoficzne, korzystających z oczekiwanej od profesury erudycji, stwarzających podstawę do zainteresowania słuchaczy i kształtowania szkoły naukowej.

Profesor Janusz Mroczka w codziennej praktyce realizuje – dzisiaj już coraz rzadziej spotykane w środowisku akademickim – klasyczne wymogi elegancji, dobrego smaku w ubiorze i zachowaniu. Znane są Jego eleganckie garnitury uzupełnione perfekcyjnie dobranymi muszkami, ale także (rzadziej) krawatami i poszetkami. W rezultacie staje się wzorem do naśladowania i wskazuje dobre (nawet niekiedy już zapominane) postawy akademika. Jest człowiekiem wrażliwym, refleksyjnym, solidnym, wiernym, o niespotykanej aktywności intelektualnej. Znany jest z tego, że potrafił zrezygnować z zaszczytów na rzecz dobra wspólnego.

Zapytany o rodzinę, zawsze podkreśla, że jest dla Niego ostoją i wsparciem we wszystkich działaniach. Jednak równocześnie, mając na myśli codzienne troski związane z niepełnosprawnością najstarszego syna, cytuje Indirę Gandhi: „Mieć trudne życie to wielki przywilej”. Artykułuje też często myśl, że poświęcenie wielu swoich działań było i jest mimo to nieustającym natchnieniem do działania – jednym tchem dodaje wtedy, że to dzięki oddaniu rodziny może żyć nauką.

Jestem przekonany, że działalność naukowa, osiągnięcia organizacyjne, autorytet w środowisku akademickim i uznanie, jakie profesor Janusz Mroczka uzyskał w roli członka społeczności akademickiej nie tylko w kraju, lecz także za granicą, znaczące osiągnięcia w działalności dydaktyczno-wychowawczej, a nade wszystko walory etyczne, jakie z pełnym przekonaniem nie tylko otwarcie prezentuje, ale i z pełną determinacją wdraża w swoich przedsięwzięciach, w pełni uzasadniają zainicjowanie działań Senatu Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, by wyróżnić Go godnością *doktora honoris causa* tej Uczelni.



**Uchwała Senatu
Wojskowej Akademii Technicznej**

**w sprawie nadania
prof. dr. hab. inż. Januszowi Mrocze, czł. koresp. PAN
tytułu *doktora honoris causa*
Wojskowej Akademii Technicznej**



Wojskowa
Akademia
Techniczna

**Uchwała
Senatu Wojskowej Akademii Technicznej
im. Jarosława Dąbrowskiego**

nr 53/WAT/2018 z dnia 22 listopada 2018 r.

**w sprawie nadania prof. dr. hab. inż. Januszowi MROCZCE czł. koresp. PAN
tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej
im. Jarosława Dąbrowskiego**

Na podstawie § 9 ust.2 i 6 Statutu WAT, stanowiącego załącznik do *uchwały nr 215/III/2012 Senatu WAT z dnia 29 marca 2012 r. w sprawie uchwalenia Statutu WAT* (t.j. obwieszczenie Rektora WAT nr 1/WAT/2017 z dnia 6 lipca 2017 r.), na wniosek Rady Wydziału Elektroniki oraz w oparciu o pozytywne opinie prof. dr. hab. inż. Adama BIENKOWSKIEGO, prof. dr. hab. inż. Stanisława SZCZEPANSKIEGO i prof. dr. hab. inż. Andrzeja ZAJĄCA, a także uchwał Senatu Politechniki Warszawskiej, Senatu Politechniki Gdańskiej i Senatu Politechniki Białostockiej, uchwała się, co następuje:

§ 1

Prof. dr. hab. inż. Januszowi MROCZCE wybitnemu specjalście w dziedzinie nauk technicznych, członkowi korespondentowi Polskiej Akademii Nauk, doktorowi honoris causa Politechniki Lubelskiej i Politechniki Opolskiej, twórcy szkoły metrologii elektronicznej i fotonicznej, kierownikowi Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, byłemu długoletniemu Przewodniczącemu Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, członkowi Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów, aktywnie współpracującemu z Wojskową Akademią Techniczną, nadaje się tytuł doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w uznaniu zasług dla rozwoju nauki i techniki, a w szczególności za istotny wkład w rozwój kadry naukowej Wojskowej Akademii Technicznej.

§ 2

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Senatu

plk dr hab. inż. Tadeusz SZCZUREK

**ZA ZGODNOŚĆ
Z ORYGINAŁEM**

**SEKRETARZ SENATU
WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ**
Mincel
mgr inż. Tomasz MISZCZAK

Dyplom



OBY TO BYŁO SZCZĘŚLIWE, POMYŚLNE I DOBRE
POD AUSPICJAMI RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ

MY

REKTOR

TADEUSZ SZCZUREK

DOKTOR HABILITOWANY NAUK SPOŁECZNYCH

DZIEKAN

DZIEKAN WYDZIAŁU ELEKTRONIKI

ANDRZEJ DOBROWOLSKI

PROFESOR DOKTOR HABILITOWANY NAUK TECHNICZNYCH

PROMOTOR

ADAM KAWALEC

PROFESOR DOKTOR HABILITOWANY NAUK TECHNICZNYCH

NA MOCY UCHWAŁY SENATU WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ
IMIENIA JAROSŁAWA DĄBROWSKIEGO
PODJĘTEJ W DNIU 22 LISTOPADA 2018 R.

NADAJEMY

PROFESOROWI DOKTOROWI HABILITOWANEMU INŻYNIEROWI

JANUSZOWI MROCZCE

WYBITNEMU SPECJALIŚCIE NAUK TECHNICZNYCH,
CZŁONKOWI KORESPONDENTOWI POLSKIEJ AKADEMII NAUK,
WIELOKROTNEMU DOKTOROWI HONORIS CAUSA,
CZŁONKOWI CENTRALNEJ KOMISJI DS. STOPNI I TYTUŁÓW,
ZASŁUŻONEMU DLA INTEGRACJI KRAJOWEGO I MIĘDZYNARODOWEGO ŚRODOWISKA NAUKOWEGO,
AKTYWNIIE WSPÓŁPRACUJĄCEMU Z WOJSKOWĄ AKADEMIAŃ TECHNICZNAŃ,
ZA WYBITNE OSIĄGNIĘCIA W ZAKRESIE METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ
I SZCZEGÓLNY WKLAD W ROZWÓJ KADRY NAUKOWEJ

TYTUŁ, GODNOŚĆ I PRAWA

DOKTORA HONORIS CAUSA

WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ IM. JAROSŁAWA DĄBROWSKIEGO

DLA POTWIERDZENIA TEGO FAKTU POLECILIŚMY OPIECZĘTOWAĆ DYPLOM TEN
PIECZĘCIAMI WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ

WARSZAWA, DNIA 6 MARCA 2019 ROKU

ANDRZEJ DOBROWOLSKI
DZIEKAN

TADEUSZ SZCZUREK
REKTOR

ADAM KAWALEC
PROMOTOR



QUOD FELIX FAUSTUM



FORTUNATUMQUE SIT

SUMMIS AUSPICIIS SERENISSIMAE REI PUBLICAE POLONORUM

NOS

THADDAEUS SZCZUREK

SCIENTIARUM SOCIALIUM DOCTOR HABILITATUS,
MILITARIS ACADEMIAE TECHNICAЕ H.T. RECTOR MAGNIFICUS,

ANDREAS DOBROWOLSKI

SCIENTIARUM TECHNICARUM DOCTOR HABILITATUS,
PROFESSOR, FACULTATIS SCIENTIAE ELECTRONICAE
H.T. DECANUS SPECTABILIS,

ADAMUS KAWALEC

SCIENTIARUM TECHNICARUM DOCTOR HABILITATUS,
PROFESSOR, PROMOTOR RITE CONSTITUTUS,

SENATUS MILITARIS ACADEMIAE TECHNICAЕ
NOMINE JAROSLAVII DĄBROWSKI CONSULTI
NUNCUPATAE DIE XXII MENSIS NOVEMBRIS ANNO MMXVIII
AUCTORITATIS,

IN VIRUM CLARISSIMUM

IANUM MROCZKA

SCIENTIARUM TECHNICARUM DOCTOREM HABILITATUM,
PROFESSOREM EGREGIUM,
SCIENTIARUM TECHNICARUM VIRUM PERITISSIMUM,
SODALEM CORRESPONDENTEM ACADEMIAE SCIENTIARUM POLONAE,
MULTIPLICEM HONORIS CAUSA DOCTOREM,
CENTRALIS CONSILII AD GRADUS ET TITULOS ACADEMICOS DECERNENDOS MEMBRUM,
MERITUM DE INTEGRATIONE NATIONALIS INTERNATIONALISQUE ACADEMICAЕ COMMUNITATIS,
QUI MILITARI ACADEMIAE TECHNICAЕ SOCIAM OPERAM STRENUЕ NAVABAT,
QUI DISCIPLINAM METROLOGIAE ELECTRONICUM ET PHOTONICUM MAGNIFICE EXCOLUIT
ATQUE DE ERUDIENDIS VIRIS SCIENTIAE DEDITIS OPTIME MERUIT,

DOCTORIS HONORIS CAUSA

MILITARIS ACADEMIAE TECHNICAЕ
NOMINE JAROSLAVII DĄBROWSKI


NOMEN ET HONORES, IURA ET PRIVILEGIA CONFERIMUS
IN EIUSQUE REI FIDEM PERPETUAMQUE MEMORIAM
HOC DIPLOMA SIGILLO MILITARIS ACADEMIAE
TECHNICAЕ SANCIENDUM CURAVIMUS

DATUM VARSAVIAE, DIE VI MENSIS MARTII
ANNO MMXIX

THADDAEUS SZCZUREK
H.T. RECTOR MAGNIFICUS

ADAMUS KAWALEC
PROMOTOR RITE CONSTITUTUS




ANDREAS DOBROWOLSKI
H.T. DECANUS SPECTABILIS



Podziękowanie

Podziękowanie

Z głębokim wzruszeniem oraz pełną wdzięczności radością pragnę podziękować za otrzymaną godność, która jest dla mnie wielkim darem wspólnoty akademickiej Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie.

Magnificencjo, Panie Rektorze-Komendancie, na Pańskie ręce składam podziękowania dla całej wspólnoty; Wysokiemu Senatowi Wojskowej Akademii Technicznej dziękuję za przychylność dla procedury przewodu i uchwałę nadającą mi tytuł *doktora honoris causa*. Dziękuję Panu Profesorowi Adamowi Kawalcowi za podjęcie się roli Promotora w honorowym przewodzie, Panom Profesorom: Adamowi Bieńkowskiemu z Politechniki Warszawskiej, Stanisławowi Szczepańskiemu z Politechniki Gdańskiej oraz Andrzejowi Zającowi z Politechniki Białostockiej za wsparcie swoimi przychylnymi recenzjami. Radzie Wydziału Elektroniki WAT za zainicjowanie nadania mi tej godności oraz Radom Instytutu Optoelektroniki WAT i Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa WAT za współudział w tym procesie. Pragnę również serdecznie podziękować wszystkim zaangażowanym w przeprowadzenie tego postępowania, którzy tak starannie, pedantycznie i misternie przygotowali materiały i całą oprawę tej wspaniałej uroczystości.

Pozwolę sobie w tym miejscu wyrazić moją wdzięczność tym nielicznym spośród bardzo wielu. W pierwszej kolejności zwracam się do mojej Małżonki Ewy, która jest mi najbliższym przyjacielem i towarzyszką życia w najlepszych, ale i najtrudniejszych sytuacjach życiowych, do moich dzieci, Wojciecha, Justyny i Rafała – oni w największym stopniu uczestniczyli w „kosztach” moich sukcesów życiowych i są współtwórcami nie tylko dzisiejszego mojego wyróżnienia. To Wasza wyrozumiałość i miłość pozwoliły mi żyć nauką. Za moją egoistyczną izolację od Was najserdeczniej przepraszam, a za Waszą wspaniałomyślność, okazaną pomoc i Wasze wyrzeczenia dla mnie z całego serca dziękuję. Bez Waszej wyrozumiałości, cierpliwości i miłości nie byłoby mnie tutaj dzisiaj. Nie sposób w tym miejscu nie wspomnieć moich Rodziców, którzy dali mi życie i od najmłodszych lat zaszczepiali podstawowe cechy moralności, które sprzyjały mojemu rozwojowi. Przygotowanie do samodzielnego życia i ukształtowanie mojej osobowości zawdzięczam nie tylko Rodzicom, lecz także nauczycielom, którzy uczestniczyli w całym moim procesie edukacyjnym przez wiele lat. Z pełnym uznaniem i wdzięcznością wspominam wielu moich nauczycieli

i wychowawców. Byli to ludzie dobrze przygotowani do pracy pedagogicznej. Nie kierowali się panującą modą na określone tematy (społeczne, polityczne itp.). Osobowość moich nauczycieli harmonizowała z deontologią typową dla przedstawicieli środowisk niepodległościowych. W swojej aktywności zawodowej dawali wyraz przeświadczeniu, że zawód nauczyciela zobowiązuje ich do realizacji wzniosłych norm moralnych. Swoją pracę traktowali jako misję, którą spełniają wobec niezależności polskiej kultury. Dbałością o te ideały i stanowczością głoszonych tez, obowiązkowością, systematycznością, gorliwością kształtowali nasze osobowości. Życiem wypełnionym czynem tworzyli surową szkołę moralną, a Ich szlachetność, inteligencja, odwaga uczyła nas pokory i poszanowania dla pracy i drugiego człowieka.

Społeczność akademicka Wojskowej Akademii Technicznej, nadając mi ten tytuł, życzliwie przyjęła mnie do swojej wspólnoty i grona *doktorów honoris causa* tej uczelni. To co dane mi było zaobserwować, przyjeżdżając do WAT-u w minionych dwudziestu latach, to ofensywna, odważna i zorientowana na przyszłość i młodość strategia Waszej i obecnie już mojej Alma Mater. Jestem niezwykle wdzięczny za to wyróżnienie. Moje słowa podziękowania wiążę ze zobowiązaniem służenia Waszej i mojej Alma Mater w jej rozkwicie i aspiracjach.

Serdecznie dziękuję dostojnym gościom, którzy zaszczytili swoją obecnością tę uroczystość. Dziękuję przedstawicielom środowiska akademickiego z kraju, przedstawicielom Polskiej Akademii Nauk, członkom Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów, moim przełożonym z Politechniki Wrocławskiej, a w szczególności moim współpracownikom z Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej.

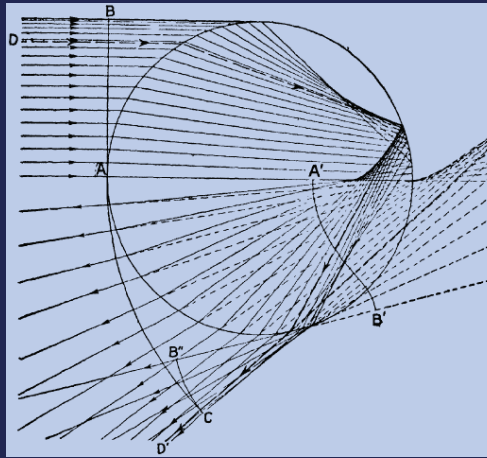
Moją osobowość ukształtowały różne interakcje z różnymi ludźmi, od wielu z nich czerpałem wiedzę, od jednych doświadczenie życiowe, od innych poczucie humoru i sposób dystansowania się od siebie. Nie sposób wymienić tego, co obcowanie z drugim człowiekiem daje każdemu z nas. Dzisiaj mogę powiedzieć, że to oni są tymi anonimowymi współautorami mojego sukcesu.

Bądźcie pewni, że tak jak Wy tu dzisiaj obecni łączycie się ze wzruszeniem, które mi towarzyszy, tak ja w chwilach dla Was podobnych będę z Wami. To przecież oczywiste, że ludzie bliscy są sobie naturą.

Czuję się człowiekiem szczęśliwym i naukowo spełnionym, bo to, co mnie spotkało, przeżywam w gronie moich przyjaciół i osób mi bliskich.

Janusz Mrocčka

Wykład



Tęcza w procesie poznawczym

Janusz Mrocza

Spis treści

Wprowadzenie	90
1. Między estetyką i naukowym poznaniem - fizyczne i matematyczne interpretacje tęczy	94
1.1. Tęcza w ujęciu optyki geometrycznej	94
1.2. Tęcza w ujęciu optyki falowej	99
1.3. Elektromagnetyczna teoria tęczy	103
2. Tęcze wielokrotne powstające w wyniku rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej. Część I: <i>Analiza DFT</i>	108
2.1. Model rozproszenia	108
2.2. Homogeniczne włókno szklane	110
2.3. Światłowód o skokowym profilu refrakcyjnym	114
• Tęcze wielokrotne i ich transformacje	114
• Analiza rozproszenia z wykorzystaniem szeregów Debye' go	117
• Geometryczna interpretacja jednokrotnego wewnętrznego odbicia	118
• Interpretacja DFT tęcz wielokrotnych powstających w wyniku rozpraszania polichromatycznej wiązki światła	121
• Inwersyjna charakterystyka rdzenia – analiza przygotowawcza	123
2.4. Światłowód o gradientowym profilu refrakcyjnym	124
3. Tęcze wielokrotne powstające w wyniku rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej. Część II: <i>Analiza w dziedzinie czasu</i>	127
3.1. Model rozproszenia	127
3.2. Homogeniczne włókno szklane	129
3.3. Światłowód o skokowym i gradientowym profilu refrakcyjnym	131

4.	Analiza tęczy w nieinwazyjnym pomiarze średnicy i współczynnika załamania transparentnego włókna.....	137
4.1.	Analiza przyczynowa	137
4.2.	Analiza inwersyjna	139
4.3.	Analiza rozproszenia światła na włóknie o eliptycznym przekroju.....	144
5.	Podsumowanie.....	148
	Literatura	149

Wprowadzenie

*Więcej jest rzeczy na ziemi i w niebie,
Niż się ich śniło naszym filozofom.*

(Hamlet, Akt I, scena V, s. 49, tłum. J. Paszkowski.)

Paradygmat matematyczno-empirycznego poznania może mieć swój początek w obserwacji, a coraz nowsze zagadnienia poznawcze rodzone na jej gruncie wydają się potwierdzać słowa Hamleta otwierające niniejszy rozdział. To obserwacje tęczy i jej matematyczne interpretacje poczynione przez Kartezjusza, Newtona, Younga i wielu innych badaczy, poddane weryfikacji w drodze instrumentalnego poznania, stanowią podwaliny współczesnych metod pomiarowych wykorzystujących światło jako narzędzie poznawcze.

Wykorzystanie tęczy w procesie poznawczym w metrologii¹⁻³ ma wiele korzyści. Według teorii morfogenezy (inaczej – teorii katastrof lub przejść nieciągłych)^{4,5} tęcza jest strukturalnie stabilną, rzeczywistą kaustyką, co oznacza że niewielkie zmiany geometrii cząstki rozpraszającej światło wywołują lokalne transformacje sygnału prążkowego (przesunięcia w kącie rozproszenia, rozciągnięcia, etc.) lecz nie doprowadzają do jej destrukcji. Tęcza powstaje w wyniku propagacji światła przez transparentne cząstki, a więc zawiera informację o ich morfologii. Co więcej, rejestracja tęczy może odbywać się przy użyciu konwencjonalnych instrumentów pomiarowych, ponieważ natężenie światła rozproszonego w jej obszarze jest relatywnie duże.

Zarówno fascynacja tęczą jak i ogromny postęp w dziedzinie symulacji i numerycznego modelowania pól optycznych doprowadziły do utworzenia wyrafinowanej, wąskiej tematycznie dziedziny metrologii optycznej jaką jest metrologia tęczy. Klasyczny układ pomiarowy posługuje się tzw. tęczą monochromatyczną, powstającą w wyniku ugięcia wysokospójnej wiązki promieniowania na cząstce (lub zbiorze cząsteczek) w odróżnieniu od tęczy wielobarwnej, powstającej w warunkach naturalnych. Studia nad wykorzystaniem tęczy do celów pomiarowych zostały zapoczątkowane przez Presby'ego i Marcusa⁶, którzy zbadali możliwość wykorzystania tego zjawiska do oceny cech geometrycznych światłowodów i preform światłowodowych. Prace Rotha i in⁷ oraz Sankara i in⁸ stanowią z kolei debiut w zakresie pomiaru współczynnika załamania i temperatury strumienia rozgrzanych kropeł na podstawie oceny przesunięcia kąтового tzw. tęczy Airy'ego. Integracja techniki tęczy z anemometrem dopplerowskim umożliwiła jednoczesny

pomiar rozmiaru, temperatury i prędkości transparentnych cząsteczek^{9,10}. Bardziej aktualne badania poruszają problematykę tęczy powstającej na cząstkach o zaburzonej symetrii osiowej¹¹⁻¹⁴, cząstkach o niejednorodnej strukturze refrakcyjnej¹⁵⁻¹⁹, a także na układach polidispersyjnych cząsteczek²⁰⁻²³.

Znanym problemem metrologii tęczy posługującej się wysokospójnym promieniowaniem laserowym jest złożona interpretacja danych pomiarowych, mająca na celu charakterystykę obiektu rozpraszającego falę na podstawie zarejestrowanego i przetworzonego w odpowiednim zakresie kątowym sygnału tęczy (analiza inwersyjna). Złożoność ta wynika przede wszystkim ze skomplikowanej natury pola rozproszonego, będącego superpozycją różnorodnych zjawisk fizycznych, takich jak dyfrakcja, załamanie, absorpcja, fale powierzchniowe, etc. Wykorzystanie kompleksowych modeli fizyko-matematycznych opisujących rozproszenie światła monochromatycznego, np. teorii Lorenza-Mie²⁴ w celu rozwiązania zagadnienia odwrotnego jest ograniczone, ze względu na problemy niejednoznaczności rozwiązania wskutek kolinearności parametrów w strukturze rozbudowanego modelu, nieliniowości pola od cząstki rozpraszającej falę oraz złych warunków numerycznych wymienionych modeli, prowadzących do powstania błędów obliczeń uniemożliwiających poprawną interpretację wyników^{25,26}. Odmienne podejście do inwersyjnej analizy stanu pola zjawisk tęczy zostało zaprezentowane w pracach zespołu naukowego autora²⁷⁻²⁹ i polega na aranżowaniu eksperymentu pomiarowego w taki sposób, aby pole rozproszone posiadało łatwiejszą makroskopową interpretację fizyczną w porównaniu z rozpraszaniem światła wysokospójnego. Wykorzystanie do tego celu promieniowania cechującego się niskim stopniem spójności czasowej powoduje, że możliwe staje się wykorzystanie przyczynowych i inwersyjnych aproksymacyjnych modeli rozproszenia światła.

Dziedzina jaką jest metrologia tęczy formułuje nowe i coraz bardziej złożone zagadnienia poznawcze. Osobiste zainteresowania autora przesądziły o tym, że niniejsza praca stanowi kompendium najbardziej aktualnych poczynań realizowanych w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej przy Politechnice Wrocławskiej w obszarze metrologii tęczy posługującej się promieniowaniem o niskim stopniu spójności czasowej. I tak, w rozdziale 2 napisano o sztuce odczytywania symboli, czyli o tych epokowych obserwacjach i interpretacjach tęczy naturalnej, które stworzyły fundamenty współczesnej wiedzy o tym zjawisku. Rozdział ten wieńczy analiza dokonana przy użyciu kompleksowego aparatu matematycznego, rozpatrującego to zjawisko w ujęciu makroskopowych równań Maxwella. To może nieco nieproporcjonalne zestawienie wydaje się jednak racjonalne z punktu widzenia naukowej skrupulatności opisu, ale również uświadamia, że precyzyjny aparat matematyczny nie ma swojej uniwersalnej i transparentnej

formy, ale posiada ograniczenia, wpływające na możliwości naukowego poznania i realizmu. Jakościowa interpretacja wyników obliczeń jest bowiem często uzależniona od sposobu sformułowania problemu i, w konsekwencji, struktury matematycznego modelu rzeczywistości. W rozdziale 3 przedstawiono analizę rozproszenia światła w obszarze tęczy pierwotnych powstających na transparentnych włóknach o odmiennej budowie – szklanym włóknie homogenicznym oraz światłowodzie o skokowym i gradientowym profilu refrakcyjnym. Analiza ta ukierunkowana jest na poznanie fizycznych mechanizmów rozpraszania światła w obszarze tych tęczy pierwotnych, a w szczególności zbadanie wpływu stopnia spójności czasowej promieniowania na te mechanizmy. W tym celu posłużono się dyskretnym przekształceniem Fouriera (DFT), co umożliwiło zbadanie wpływu interferencji różnorodnych komponentów propagujących się przez badane włókna na reprezentacje tęczy pierwotnych w dziedzinie częstotliwości. Odmienne sposoby analizy tego problemu przedstawiono w rozdziale 4, badając odpowiedź włókna bądź światłowodu na ultrakrótki impuls światła. Ta metoda pozwala na separację interferujących w polu dalekim komponentów rozproszonych w dziedzinie czasu. Wyniki prac ujawniają fizyczne piękno tęczy, cechujące się różnorodnością zjawisk i mechanizmów dokonujących się podczas rozproszenia światła, a obie metody analizy wzajemnie się uzupełniają tworząc jednolity pogląd na naturę tęczy pierwotnych. Ta wielowymiarowa analiza stanowi jeden z najważniejszych etapów procesu poznawczego w metrologii, dążącego do formułowania fizycznych, matematycznych i metrologicznych modeli rzeczywistości. Jako przykład postępowania wpisującego się w schemat tego procesu, w rozdziale 4 pokazano zastosowanie dokonanych analiz w rozwiązaniu problemu odwrotnego w nieinwazyjnym pomiarze średnicy i współczynnika załamania szklanego włókna.

Dotychczasowe doświadczenia autora w zakresie optycznej i nieinwazyjnej charakterystyki obiektów złożonych obejmują m.in.: problematykę pomiarów wielkości cząstek ośrodków dyspersyjnych metodami optycznymi³⁰⁻³⁷, w tym hybrydowe metody w opisie transmitancji światła w warunkach rozproszenia wielokrotnego dla monodispersyjnego rozkładu wielkości cząstek^{38,39} oraz metody inwersyjne wykorzystujące sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej⁴⁰, wykorzystanie spektralnych i polaryzacyjnych właściwości laserowego promieniowania rozproszonego w nieinwazyjnym badaniu materiałów kompozytowych⁴¹⁻⁴³, nieinwazyjną diagnostykę parametrów optycznych i właściwości rozproszeniowych pełnej krwi i erytrocytów⁴⁴, modelowania matematycznego rozproszenia światła przez cząstki niesferyczne i ich agregaty⁴⁵⁻⁴⁸, modelowania i symulacji matematycznych przepływów wielofazowych, modelowania matematycznego trójwiązkowej anemometrii dopplerowskiej w określaniu położenia i prędkości

cząstek w ośrodkach wielofazowych⁴⁹, a także nieinwazyjny pomiar *in situ* średnicy homogenicznych i niehomogenicznych, przezroczystych włókien wykorzystywanych m.in. w materiałach kompozytowych i jako światłowody telekomunikacyjne i pomiarowe^{27-29,50}.

1. Między estetyką i poznaniem naukowym - fizyczne i matematyczne interpretacje tęczy

Jeśli widzę dalej, to tylko dlatego, że stoję na ramionach olbrzymów.

(Newton, 1676)

Tęcza powstaje w wyniku rozpraszania światła na cząsteczkach, charakteryzujących się niską tłumiennością, wysokim stopniem symetrii osiowej i rozmiarem znacznie większym od długości fali promieniowania. W naturalnych warunkach możemy zaobserwować zwykle tzw. tęczę pierwotną. Rzadziej powstaje druga – wtórna tęcza, która charakteryzuje się znacznie mniejszym natężeniem i inwersją barw w porównaniu z tęczą pierwotną, Rys.1.1. Fizyczne i matematyczne interpretacje tęczy tworzą mozaikę wzajemnie zwalczających się poglądów i interpretacji^{51,52}. To swoiste współzawodnictwo nie jest jednak czymś niezwykłym, lecz dobrze wpisuje się w logikę ewolucji naukowych teorii. Wydaje się rzeczą naturalną, aby dyskusej o procesie poznawczym w metrologii tęczy rozpocząć od ukazania najważniejszych poglądów na jej naturę. Na początku omówmy interpretację geometryczną.

1.1. Tęcza w ujęciu optyki geometrycznej

Pierwotne próby interpretacji natury tęczy pojawiają się w starożytnym opracowaniu *Meteorologica* Arystotelesa* (IV w. p.n.e.), który założył że zjawisko to powstaje w wyniku wyjątkowego odbicia światła (pod określonym kątem) od deszczowych chmur, a kolorowe łuki tęczy są kompozycją trzech kolorów – czerwonego, zielonego i fioletowego. Te pierwsze poczynania pozwalały na wytlumaczenie kształtu tęczy i podważyły mityczny pogląd, że tęcza jest materią, powstającą w określonym położeniu na nieboskłonie. Łuk pierwotnej i wtórnej tęczy, widoczny na Rys. 1.1, odgranicza tzw. ciemne pasmo Aleksandra, nazywane tak na cześć Aleksandra z Afrodyzji (II i III w n.e.), który był kontynuatorem myśli arystotelejskiej i jako pierwszy zaobserwował ten efekt. Położenie kątowe tęczy pierwotnej ponad horyzontem, wynikające ze współczynnika załamania

* Przekład oryginalnych dzieł Arystotelesa: W.D. Ross, LL.D. Hoss, *The Works of Aristotle*, vol. III, Oxford 1931.



Rys. 1.1. Tęcza pierwotna (o większym natężeniu) i wtórna na obrazie *Rainy Season in the Tropics* Edwina Churcha, 1866 (lic. *public domain*).

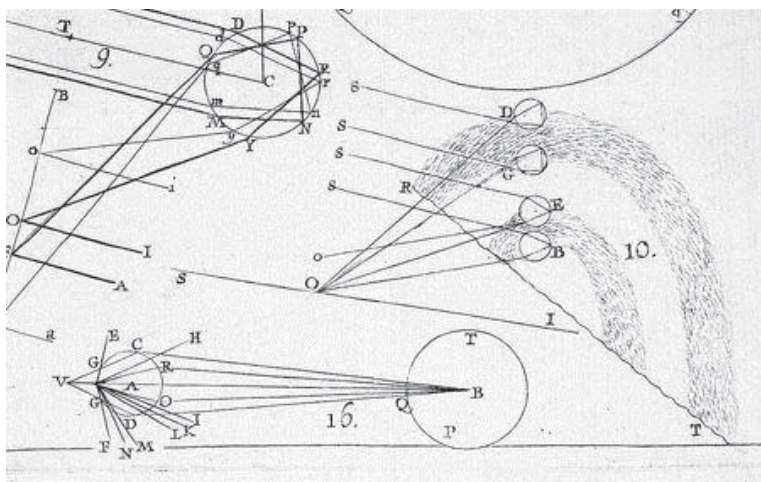
kropel wody ($n = 1.33$), wynosi około 42° . Pomiar tego kąta zostały dokonane przez franciszkanina i empirystę Rogera Bacona w 1266 roku. Tęcza wtórna znajduje się nieco wyżej, około 9° ponad tęczą pierwotną*. Arystotelejski pogląd na naturę tęczy został zrewidowany w XIV wieku niezależnie przez dwóch badaczy – niemieckiego teologa i fizyka Teodoryka z Freibergu w pracy zatytułowanej *De iride et radialibus impressionibus*† (1304) oraz perskiego fizyka i matematyka Kamala al-Din al-Farisi w *Tanqih al-Manazir*‡ (1309). Oboje uczeni dowodzili, że tęcza powstaje w wyniku ugięcia światła na indywidualnych kroplach wody, nie zaś w wyniku odbicia światła od deszczowych chmur, jak przypuszczał Arystoteles. Swoje wnioski poparli eksperymentami – perski uczoney prowadził doświadczenia z rozproszeniem światła na szklanej kuli wypełnionej wodą, a Teodoryk eksperymentował ze szklaną, sferyczną kolbą. Co więcej, zarówno Teodoryk z Freibergu jak i Kamal al-Din al-Farisi analizowali mechanizmy propagacji światła przez krople wody posługując się geometrycznymi promieniami światła, które

* W obecnej konwencji położenie kątowe tęczy wyraża się określając dziewięć promieni słonecznych w odniesieniu do ich pierwotnego biegu, czyli tęcza pierwotna występuje w kącie rozproszenia równym $180^\circ - 42^\circ = 138^\circ$, zaś wtórna w kącie ok. 129° .

† Tłum.: *O tęczy i wrażeniach wywołanych promieniowaniem*.

‡ Tłum.: *Przegląd optyki*.

ulegały odbiciu i refrakcji, dowodząc tym samym, że tęcza pierwotna powstaje w wyniku rozproszenia światła po dwóch załamaniach i jednokrotnym wewnętrznym odbiciu światła, zaś tęcza wtórna - po dwóch takich odbiciach. W ówczesnych czasach nie znano jeszcze precyzyjnej, matematycznej postaci prawa załamania światła, odkrytego w 1621 roku przez Snelliusa*, więc wyniki ich prac nie miały ilościowej podbudowy. Blisko 300 lat po dziełach Teodoryka z Freibergu i Kamala al-Din al-Farisi ukazuje się praca *Tractatus de radiis visus et lucis in vitris, perspectivis et iride* (1611) autorstwa Marco Antonio de Dominisa, arcybiskupa Dalmacji i człowieka nauki. On również tworzy geometryczne szkice wyjaśniające mechanizmy powstawania tęczy pierwotnej i wtórnej, zob. Rys. 1.2, a wartość jego prac uznaje sam Newton, który w tomie *Opticks* (1704) wyjaśnia dyspersyjne rozszczepienie kolorów tęczy w eksperymencie z pryzmatem.



Rys. 1.2. Szkic Marco Antonio de Dominisa ilustrujący mechanizmy powstawania tęczy pierwotnej i wtórnej przy użyciu geometrycznych promieni światła. (lic. public domain).

Kolejny etap w poznaniu tęczy otwiera Kartezjusz, który w swoich obserwacjach rzeczywistości poszukuje archimedesowego „punktu podparcia”†, niepowątpiewalnych podstaw filozofii metody i *cogito*. Jego prace w tym zakresie odnajdujemy w słynnym *Discours de la methode* (1637). Kartezjusz studiuje odbicie i załamanie promieni światła w kropli deszczu, Rys. 1.3, wyjaśniając powstawanie

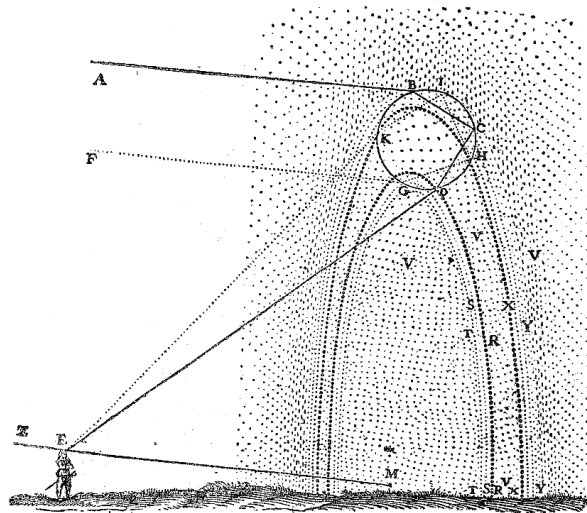
* Pierwsze prawo refrakcji, ograniczone do dużych kątów, sformułował Klaudiusz Ptolomeusz w II wieku n.e.

† *Dajcie mi punkt podparcia, a poruszę Ziemię* – myśl Archimedes, ilustrująca zasadę dźwigni.

tęczy pierwotnej i wtórnej. W odróżnieniu od Teodoryka czy de Dominisa, którzy tworzyli podobne, ale intuicyjne schematy propagacji pojedynczych promieni światła, Kartezjusz poszedł o krok dalej, zastanawiając się w jaki sposób krople wody załamują serie równoległych geometrycznych promieni światła. W tym celu Kartezjusz posłużył się dobrze znanym równaniem załamania światła Willebrorda Snelliusa*:

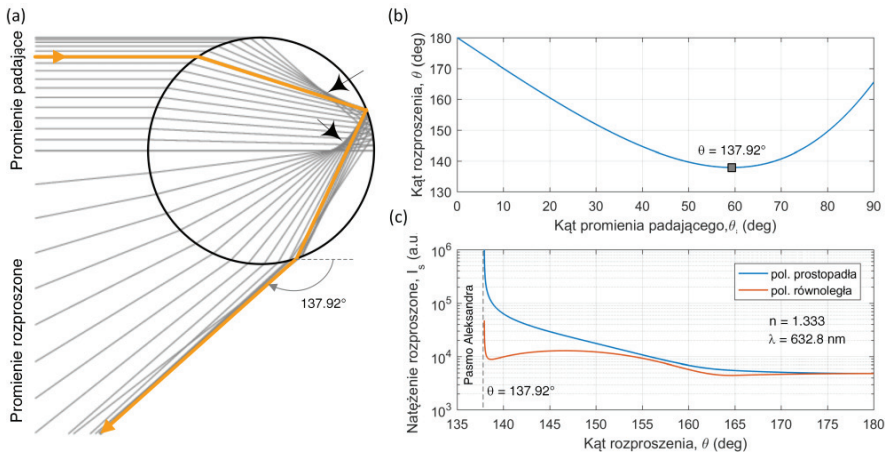
$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r, \quad (1.1)$$

gdzie θ_i i θ_r są kątami promienia padającego (i) na granicę dwóch ośrodków i załamanego (r), zaś n_i i n_r są współczynnikami załamania ośrodków, w których propaguje się odpowiednio promień oryginalny i załamany. Propagacja każdego z promieni spełnia zasadę Fermata, według której droga danego promienia pomiędzy punktem źródłowym a punktem obserwacyjnym jest ekstremalna (najmniejsza lub największa) lub taka sama dla wszystkich promieni. W izotropowej i homogenicznej cząstce promienie tworzą odcinki proste. Analizując propagację promieni światła przez kroplę wody jak na Rys. 1.4, można wykazać, że kąt



Rys. 1.3. Szkic Kartezjusza ilustrujący odbicia i załamania promieni światła w kropli deszczu, prowadzące do powstania tęczy pierwotnej (promienie ABCDE) i wtórnej (FGHIKE) (René Descartes, *Discours de la méthode*, 1637).

* Kartezjusz opublikował w 1637 roku prace Snelliusa, czyli po jego śmierci⁵³. Co ciekawe, w ojczyźnie Kartezjusza prawo załamania światła nazywane jest prawem Kartezjusza lub Kartezjusza-Snella (*Snell-Descartes pour la réfraction*).



Rys. 1.4. (a) Geometryczne promienie światła padające na kroplę wody ($n = 1.333$) pod różnymi kątami i opuszczające ją po dwukrotnym załamaniu i jednokrotnym wewnętrznym odbiciu. Promień pogrubiony jest tzw. promieniem Kartezjusza, który opuszcza cząstkę pod najmniejszym możliwym kątem w odniesieniu do kierunku propagacji promienia oryginalnego. Strzałkami oznaczono kaustyki. (b) Wykres ilustrujący zależność kąta rozproszenia (obserwacji) od kąta padania geometrycznego promienia światła. Współczynnik załamania otoczenia wynosi 1. (c) Natężenie rozproszone w funkcji kąta rozproszenia powstające na kropli wody o średnicy $100 \mu\text{m}$ dla dwóch ortogonalnych polaryzacji światła padającego o długości 632.8 nm . Stan polaryzacyjny wyrażony jest względem płaszczyzny rozproszenia.

promienia opuszczającego cząstkę po dwóch załamaniach i jednokrotnym wewnętrznym odbiciu (czyli promienia przyczyniającego się do powstania tęczy pierwotnej), jest następujący:

$$\theta = \pi + 2\theta_i - 4\theta_r, \quad (1.2)$$

gdzie θ_i jest kątem padania promienia (kątem pomiędzy promieniem i prostą normalną do powierzchni kropli), zaś θ_r jest kątem załamania. Graficzna zależność pomiędzy θ oraz θ_i przedstawiona na Rys. 1.4b wskazuje, że rozproszone promienie światła formują specyficzny punkt koncentracji energii – optyczną kaustykę. Wyznaczając minimalne odchylenie promieni światła od ich pierwotnego kierunku, które wynosi 137.9° dla wody ($n = 1.333$), Kartezjusz potrafił udowodnić wcześniejsze obserwacje Bacona o położeniu tęczy ponad horyzontem. Promień, który opuszcza cząstkę pod najmniejszym możliwym kątem jest dziś nazywany promieniem Kartezjusza (*Descartes ray*), promieniem tęczy (*rainbow ray*) lub promieniem kaustycznym (*caustic ray*), a odpowiadający mu kąt – kątem Kartezjusza. Warto zwrócić uwagę, że położenie promienia Kartezjusza nie zależy od

rozmiaru cząsteczki – czyli jest on stacjonarny (przynajmniej w rozumieniu optyki geometrycznej), a jego znajomość pozwala na szacunkowe zlokalizowanie tęczy w polu rozproszonym.

Natężenie promienia Kartezjusza wymaga kilka zdań odrębnego komentarza. Aby je wyznaczyć, należy posłużyć się amplitudowymi współczynnikami odbicia i załamania *fali* przechodzącej przez granicę dwóch ośrodków. Takowe współczynniki zostały sformułowane w 1823 roku przez Augustina Fresnela, blisko 200 lat po dokonaniach Kartezjusza. Wyprzedzając nieco epokę Kartezjusza (ale wciąż trzymając się ram optyki geometrycznej) przeanalizujmy krótko Rys. 1.4c, ilustrujący zmianę natężenia promienia Kartezjusza w funkcji kąta rozproszenia. Wykres ten został sporządzony dla dwóch odmiennych – ortogonalnych stanów polaryzacji fali padającej o długości 632.8 nm na kroplę wody o średnicy 100 μm . Promień Kartezjusza wyznacza nagle przejście pomiędzy ciemnym pasmem Aleksandra i jasnym regionem tęczy i tej granicy odpowiada natężenie światła dążące ku nieskończoności. Taka nieskończona koncentracja światła nie jest oczywiście możliwa i wynika z uproszczonego modelowania propagacji światła przy użyciu geometrycznych promieni. Odmienność polaryzacyjna wskazuje natomiast, że tęcza jest zjawiskiem silnie spolaryzowanym, co wynika ze spełnienia warunku Brewstera podczas wewnętrznego odbicia⁵⁴.

Obliczenia Kartezjusza wraz z odkryciem Newtona o dyspersji chromatycznej wydawały się tworzyć jednolity i kompletny pogląd na naturę tęczy. Pogląd ten w czasach korpuskularnej teorii światła nie mógł być inny. Nadejście ery Grimaldiego, Huygensa, Younga i falowej koncepcji światła zmieniło jednak oblicze tęczy.

1.2. Tęcza w ujęciu optyki falowej

W szczególnych warunkach tęcza pierwotna (znacznie rzadziej również tęcza wtórna) ukazuje falowe oblicze światła ulegającego załamaniu na kropelkach wody w postaci tzw. łuków nadliczbowych, powstających w sąsiedztwie głównego łuku tęczy, Rys. 1.5. Ich pochodzenie można było wytłumaczyć wraz z nadejściem ery fal elektromagnetycznych i odkryciem interferencji światła przez Thomasa Younga w 1801 roku. Young w swoim artykule⁵⁵ z 1804 roku dochodzi do wniosku, że to interferencja dwóch wiązek światła wywołuje „Repetycje kolorów zauważalne czasami w zwykłej tęczy (...)”. Pochodzenie tych dwóch wiązek światła, do których odwołuje się Young jest łatwo zrozumieć, analizując ponownie Rys. 1.4b. Jako, że wykres ten posiada lokalne minimum, to istnieją dwa niestacjonarne promienie światła, które opuszczają cząstkę pod tym samym kątem.

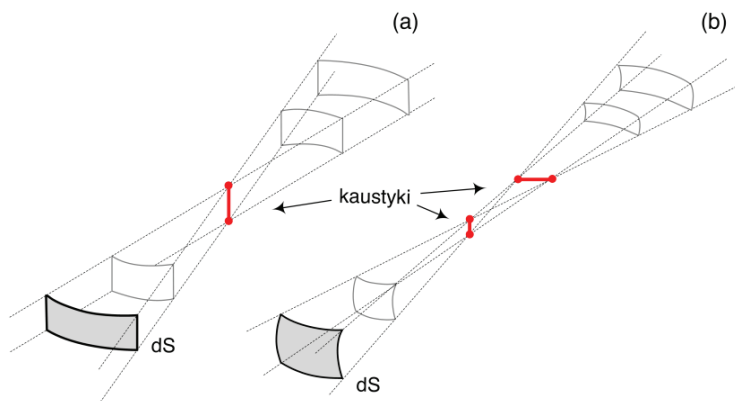


Rys. 1.5. Nadliczbowe łuki tęczy pierwotnej (*supernumerary arcs*) powstające w sąsiedztwie łuku głównego. (fot. Mika-Pekka Markkanen, lic. *public domain*).

Promienie te mają odmienne drogi optyczne (promień o większym kącie natarcia przemierza dłuższą drogę), a więc natężenie rozproszone w tym kącie będzie zależało od różnicy ich faz.

Analiza interferencji geometrycznych promieni światła w polu dalekim wymaga rozważenia wpływu obszarów kaustycznych na fazę każdego z nich. W rozumieniu optyki geometrycznej kaustyka jest hiperpowierzchnią, w której dochodzi do przecięcia się nieskończenie blisko położonych względem siebie promieni światła^{4,5}. Wiązka światła może tworzyć wiele kaustyk w zależności od jej geometrii (zbieżna, rozbieżna) i jak i morfologii cząsteczki rozpraszającej światło, czyli jej kształtu (sfera, cylinder, etc.) i profilu refrakcyjnego. Dla przykładu, wiązka światła cechująca się dywergencją w jednej płaszczyźnie (posiadająca jeden promień krzywizny) jak na Rys. 1.6a, ma pojedynczą kaustykę, podczas gdy wiązka o dywergencji w dwóch płaszczyznach (o dwóch promieniach krzywizny), Rys. 1.6b, tworzy dwie kaustyki. Prace Gouya⁵⁶ z 1890 roku wskazały, że faza promienia w kaustyce zmienia się o $-\pi/2$ co *de facto* oznacza skrócenie drogi optycznej o wartość $\lambda/4$. Gdy promień styczny jest do m kaustyk, wypadkowe przesunięcie fazowe wynosi $m(-\pi/2)$. Jak pokazuje Rys. 1.4a wiązka światła propagująca się przez kroplę wody tworzy dwie wewnętrzne kaustyki zaznaczone strzałkami. Więcej o propagacji promieni w obszarze tych kaustyk w ujęciu interferencyjnej teorii Younga zawiera praca Lavena⁵⁷.

Young we wspomnianej pracy abstrahuje od formalnego modelu tęczy na rzecz obserwacji i interpretacji zjawiska interferencji, ujawniającego się w

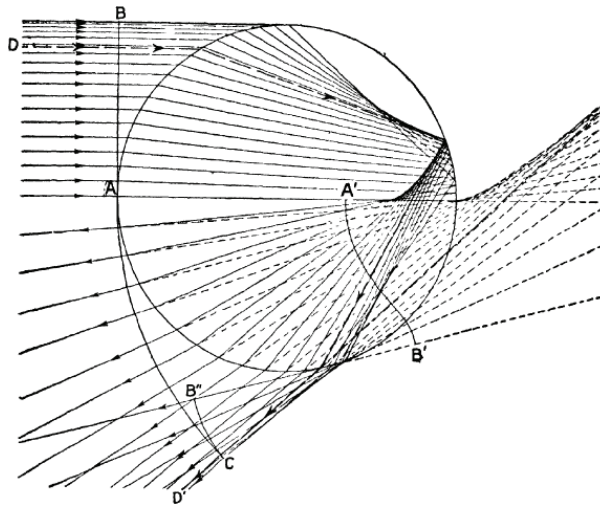


Rys. 1.6. Geometria astygmatycznych wiązek światła, powstających na elementach dS : (a) dywergencja w jednej płaszczyźnie, (b) dywergencja w dwóch płaszczyznach.

rozmaitych eksperymentach. Dopiero późniejsze doświadczenia Fresnela, pokazujące że światło jest falą poprzeczną, czy pomiary Fizeau i Foucaulta prędkości światła w ośrodkach o różnych gęstościach, a także prawa dyfrakcji sformułowane przez Huyensa i Fresnela przekonały środowisko naukowe do nowej jakości, do falowej teorii światła.

Prace Younga zostały rozwinięte przez dwóch naukowców uniwersytetu w Cambridge – chemika Richarda Pottera i astronoma Sir Georgea Biddella Airy’ego. Potter studiował m.in. kształty kaustyk powstających w kropli wody. Airy poszedł o krok dalej – zauważył, że w ujęciu falowym skokowa zmiana natężenia światła, czyli taka jaka ma miejsce w sąsiedztwie promienia Kartezjusza, jest w istocie łagodzona przez zjawisko dyfrakcji światła. To spostrzeżenie wnosi bardzo wiele do ówczesnego pojmowania tęczy – Airy przewiduje bowiem, że obszar Aleksandra pomiędzy tęczą pierwotną i wtórną nie jest pozbawiony światła, w czym zaprzecza poglądom wyrażonym przez Kartezjusza, Newtona i Younga. Na podstawie obserwacji Pottera, Airy dokonuje lokalnej – w zakresie kąta Kartezjusza, aproksymacji frontu falowego o kształcie litery S, Rys. 1.7, z wykorzystaniem równania algebraicznego trzeciego stopnia w kartezjańskim układzie współrzędnych⁵⁸:

$$y = x^3 h / 3a^2; \quad h = \frac{(p^2 - 1)^2}{p^2(n^2 - 1)} \sqrt{\frac{p^2 - n^2}{n^2 - 1}}, \quad (1.3)$$



Rys. 1.7. Geometryczne promienie światła rozproszone na kropli wody i opuszczające ją po dwukrotnym załamaniu i jednokrotnym wewnętrznym odbiciu i tworzące kaustykę rzeczywistą (linie ciągłe) i pozorną (linie przerywane). Aproksymacja Airy’ego frontu falowego $A'B'$ o kształcie litery S w obszarze promienia Kartezjusza D' posługuje się równaniem algebraicznym trzeciego stopnia. Promienie opuszczające cząstkę tworzą stożek kaustyczny o wierzchołku w punkcie C . Źródło: Humphreys⁵⁸.

gdzie a jest promieniem kulistej kropki wody, n jest współczynnikiem załamania, zaś $p = 2$ dla tęczy pierwotnej. W poszukiwaniu rozkładu amplitudy pola rozproszonego w dalekim dystansie, Airy stosuje klasyczną regułę dyfrakcyjną Huygensa, taktując każdy punkt frontu falowego jako źródło fali, co doprowadziło go do następującego rozwiązania w płaszczyźnie zespolonej^{58,59}:

$$f(z) = \int_0^{\infty} \cos \frac{\pi}{2} (u^3 - zu) du. \quad (1.4)$$

Funkcja ta została nazwana całką Airy’ego⁶⁰ w uznaniu osiągnięć tego astronoma w optyce falowej. Natężenie światła rozproszonego w obszarze stożka kaustycznego jest proporcjonalne do $f^2(z)$. Dla ujemnych wartości argumentu, czyli dla obszaru tęczy pierwotnej, funkcja ta ma postać gasnących oscylacji o malejącym okresie wraz z oddalaniem się w kącie rozproszenia od promienia Kartezjusza. Dla pozytywnych wartości argumentu – czyli w zakresie ciemnego pasma Aleksandra, $f(z)$ maleje wykładniczo do zera. Aproksymacja Airy’ego ma charakter lokalny, co powoduje, że jej dokładność jest największa w sąsiedztwie promienia Kartezjusza. Dokładność ta zależy także od wymiarów cząsteczki, a ściślej rzecz biorąc od tzw. parametru rozmiarowego $x = 2\pi a / \lambda$; czym większy x , tym wzór Airy’ego dokładniej opisuje tęczę.

1.3. Elektromagnetyczna teoria tęczy

Wiek XIX przynosi rozwój elektrodynamiki klasycznej. Zbiór praw elektrodynamiki zapisany w 1861 roku pod postacią czterech równań przez Maxwella, rozwiniętych przy wykorzystaniu rachunku wektorowego w 1885 roku przez Heaviside'a, ukazuje że światło jest poprzeczną falą elektromagnetyczną, którą cechuje polaryzacja i która może rozchodzić się w próżni. Ostateczne potwierdzenie istnienia fal elektromagnetycznych przez Hertza w 1887 roku w słynnym eksperymencie z oscylatorem otwiera drogę do nowych teorii, mogących wyjaśnić naturę tęczy.

Pierwszy, kompleksowy opis interakcji fali elektromagnetycznej i sferycznej cząsteczki wykorzystujący elektrodynamikę Maxwella publikuje w 1908 roku Mie⁶¹. Ekwiwalentne rozwiązanie, ale abstrahujące od równań Maxwella, pojawiło się jednak wcześniej w 1898 roku za przyczyną Lorenza⁶², dlatego dzisiaj mówimy o teorii Lorenza-Mie*. Rozwiązanie zaproponowane przez Mie ma niekonwencjonalną formę – padająca fala elektromagnetyczna o płaskim froncie zostaje zapisana w postaci szeregu harmonik sferycznych, następnie dokonywane jest obliczenie amplitudy pola rozproszonego dla każdej z harmonik osobno, aby w końcowym etapie dokonać superpozycji rozproszonych fal cząstkowych. Rozwiązaniem są tzw. funkcje amplitudowe mające postać nieskończonych, ale zbieżnych szeregów, wyrażone dla dwóch ortogonalnych polaryzacji 1 i 2 fali padającej⁶³:

$$\begin{aligned} S_1(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n), \\ S_2(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \pi_n + a_n \tau_n), \end{aligned} \tag{1.5}$$

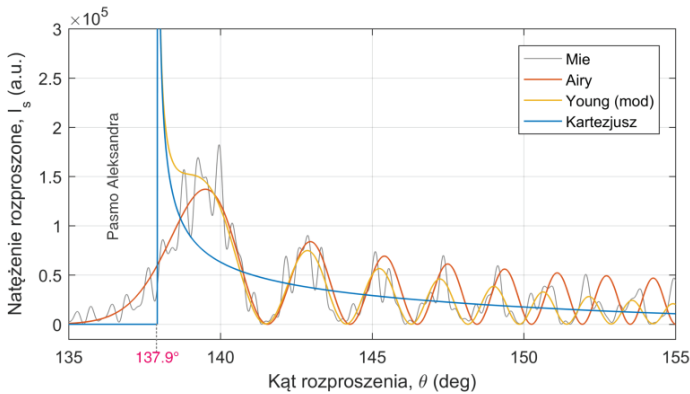
przy czym π_n, τ_n to pochodne funkcji Legendre'a pierwszego rodzaju⁶³, θ jest kątem rozproszenia, zaś a_n i b_n są zespolonymi współczynnikami rozwinięcia fali elektromagnetycznej zależnymi od parametrów cząsteczki (wielkość, kształt, budowa) i padającego promieniowania, które wynikają z zapisu warunków brzegowych dla równań Maxwella na powierzchni sfery:

* Termin „teoria Lorenza-Mie” w dzisiejszych czasach używany jest w odniesieniu do różnych narzędzi bądź metod matematycznego poznania, które dostarczają kompleksowego opisu rozproszenia światła na różnych cząsteczkach (sferach, cylindrach, etc.), nie zaś w odniesieniu do teorii czy praw fizycznych. Z kolei tzw. „rozpraszanie Mie” sugeruje sytuację, w której rozmiary cząsteczki są porównywalne z długością fali.

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{m^2 j_n(mx)[xj_n(x)]' - j_n(x)[mxj_n(mx)]'}{m^2 j_n(mx)[xh_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x)[mxj_n(mx)]'}, \\
 b_n &= \frac{j_n(mx)[xj_n(x)]' - j_n(x)[mxj_n(mx)]'}{j_n(mx)[xh_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x)[mxj_n(mx)]'},
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

gdzie $x = 2\pi a / \lambda$ to parametr rozmiarowy sfery o promieniu a , m jest jej zespolonym współczynnikiem załamania, zaś $j_n(z)$, $h_n^{(1)}(z)$ to sferyczne funkcje odpowiednio Bessela i Hankela pierwszego rodzaju⁶⁰. Natężenie rozproszone jest proporcjonalne do $S \cdot S^*$ gdzie (*) oznacza sprzężenie zespolone. Praktyczne zastosowanie rozwiązania Mie w XIX wieku było praktycznie niemożliwe, ponieważ obliczenie rozproszenia na kroplach deszczu wymaga zsumowania nawet kilkunastu tysięcy wyrazów⁶⁴. Dopiero rozwój technik obliczeniowych w drugiej połowie XX wieku ukazał potencjał teorii Lorenza-Mie w kompleksowym, dokładnym opisie zjawisk towarzyszących rozproszeniu światła, w tym tęczy. Współczesne wersje teorii Lorenza-Mie zostały zoptymalizowane pod kątem komputerowego zapisu i wykonania⁶³⁻⁶⁶.

Na Rysunku 1.8 ukazano wykresy natężeń rozproszonych w obszarze tęczy pierwotnej powstającej na kropli wody ($n = 1.333$) o średnicy $100 \mu\text{m}$ oświetlonej falą o długości 632.8 nm , obliczone według przedstawionych wcześniej teorii: Kartezjańskiej, Younga uwzględniającej zmianę fazy o $-\pi/2$ w kaustyce (par. 1.2), Airy'ego oraz Lorenza-Mie. Zgodnie z oczekiwaniami, teoria Kartezjusza



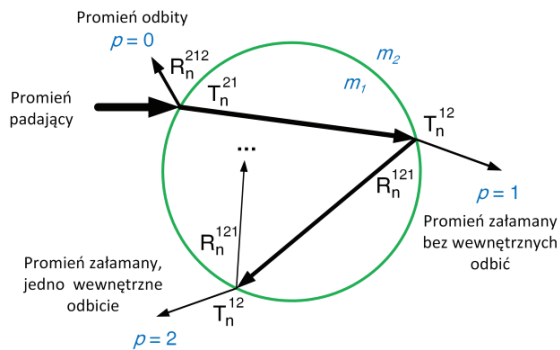
Rys. 1.8. Natężenie rozproszone w obszarze tęczy pierwotnej powstającej na kropli wody ($n = 1.333$) o średnicy $100 \mu\text{m}$ oświetlonej falą o długości 632.8 nm , obliczone według różnych teorii: Kartezjańskiej, Younga uwzględniającej zmianę fazy o $-\pi/2$ w kaustyce (par. 1.2), Airy'ego oraz Lorenza-Mie. Kąt Kartezjusza wynosi 137.9° . Fala padająca spolaryzowana jest prostopadle względem płaszczyzny rozproszenia. Obliczenia wykonano przy wykorzystaniu programu MiePlot (www.philiplaven.com).

i Younga przewidują natężenie dążące ku nieskończoności w kącie Kartezjusza (137.9°) i brak światła w paśmie Aleksandra, podczas gdy teoria Airy’ego wykazuje łagodne przejście natężenia w kącie Kartezjusza i maksimum natężenia tęczy położone na prawo od tego kąta. Tęcza według Mie ujawnia szereg zawiłych nieliniowości, które świadczą o tym, że jej natura jest znacznie bardziej skomplikowana niż przewidywali wcześniejsi badacze. Trudno oprzeć się wrażeniu, że to komputer skrupulatnie przetwarzający szeregi funkcji amplitudowych Mie wciąż wie więcej o tęczy!

W makroskopowym opisie rozpraszania posługujemy się takimi pojęciami fizycznymi jak dyfrakcja, załamanie i odbicie światła. Zjawiska te wzajemnie wpływają na siebie, a pole rozproszone jest ich liniową bądź nieliniową kombinacją. W rozumieniu elektrodynamiki klasycznej nie jest możliwe ich rozdzielenie i podanie indywidualnej analizie. W 1909 roku Peter Debye, holenderski laureat nagrody Nobla w dziedzinie chemii, zaproponował nieco inny sposób zapisu współczynników rozwinięcia a_n i b_n w postaci szeregów składających się ze współczynników transmisji T_n^j i odbicia R_n^j fali elektromagnetycznej ulegającej wielokrotnemu rozproszeniu na sferycznej cząstce^{67,68}:

$$\left. \begin{matrix} a_n \\ b_n \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left[1 - R_n^{212} - \sum_{p=1}^{\infty} T_n^{21} (R_n^{121})^{p-1} T_n^{12} \right], \quad (1.7)$$

przy czym $p = 0, 1, 2, \dots$ to tzw. rząd rozproszenia. Znaczenie tych parametrów ilustruje Rys. 1.9. Obliczenie współczynników T_n^j i R_n^j odbywa się na zasadzie rozwiązania skalarnego równania propagacyjnego przy uwzględnieniu warunków brzegowych na granicy sąsiadujących ze sobą ośrodków m_1 i m_2 ^{65,68}. Zapis

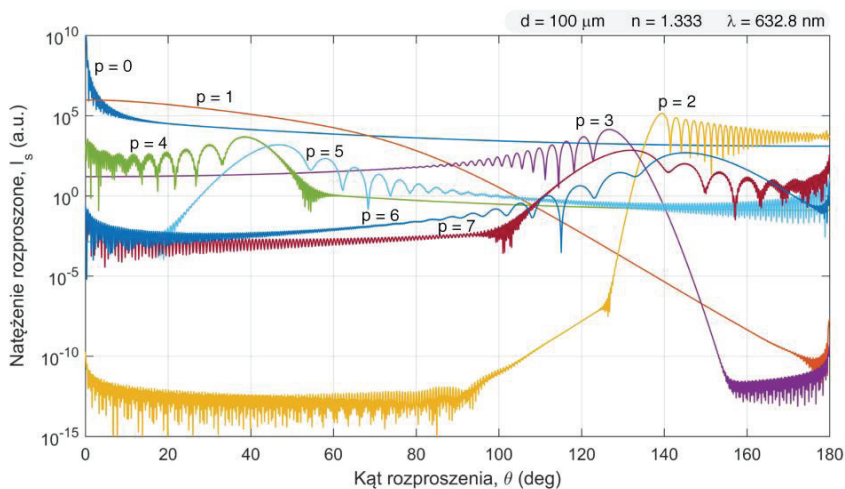


Rys. 1.9. Szkic ilustrujący znaczenie parametrów T_n^j , R_n^j oraz p w rozwinięciu Debye’go.

Debye'go ma bardzo duże znaczenie informacyjne, bowiem pozwala na analizę wpływu na pole rozproszone indywidualnych jego składowych – promieniowania ulegającego ugięciu i odbiciu od powierzchni cząstki ($p = 0$), promieniowania załamane go bez wewnętrznych odbić ($p = 1$), promieniowania załamane go po jednokrotnym ($p = 2$), dwukrotnym ($p = 3$) wewnętrznym odbiciu, itd.

Rysunek 1.10 ujawnia składowe Debye'go rzędu $p = 0, 1, \dots, 7$, czyli skromną część bogactwa różnorodnych mechanizmów światła wstępujących podczas rozproszenia na kropki wody o średnicy $100 \mu\text{m}$. W zakresie tęczy pierwotnej największy wpływ mają komponenty $p = 2$ oraz $p = 0$. Faktycznie, to interferencja promieni jednokrotnie wewnątrz odbitych, opuszczających cząsteczkę pod tym samym kątem ale charakteryzujących się odmiennymi drogami optycznymi, prowadzi do powstania tęczy Younga i Airy'ego z Rys.1.8. Wpływ promieniowania odbitego ($p = 0$) niewątpliwie przyczynia się do postania form nieliniowych na wykresie Mie.

Warto nadmienić, że zsumowanie dostatecznie dużej liczby wyrazów szeregu Debye'go (1.7) prowadzi do rozwiązania tożsamego szeregiem funkcji harmonicznych według teorii Lorenza-Mie⁶⁸.



Rys. 1.10. Komponenty rozproszone rzędu p obliczone metodą szeregów Debye'go dla na kropki wody ($n = 1.333$) o średnicy $100 \mu\text{m}$ rozpraszającej monochromatyczną wiązkę światła o długości 632.8 nm . Wartości natężenia wyrażono w skali logarymicznej. Fala padająca spolaryzowana jest prostopadle względem płaszczyzny rozproszenia.

W zakończeniu dyskusji o fizycznych i matematycznych interpretacjach tęczy należy przytoczyć jeszcze jedną, interesującą teorię tęczy. Bardzo duża ilość wyrazów funkcji amplitudowej (1.5) w teorii Lorenza-Mie, wymagana do wygenerowania zbieżnego szeregu funkcji harmoniczych, zainspirowała Nussenzveiga w latach 60 XX wieku do stworzenia teorii CAM⁶⁹⁻⁷³ (*Complex Angular Momentum*). Ideą CAM jest osobliwa transformacja funkcji amplitudowej cząstki rozpraszającej monochromatyczną falę elektromagnetyczną przedstawionej w postaci Poissona, do postaci całkowitej z zastosowaniem zmodyfikowanej transformaty Watsona. Tak sformułowane zagadnienie jest następnie rozwiązywane poprzez zastosowanie metod aproksymacyjnych, a rozwiązanie ma postać sumy dominujących, asymptotycznych i szybkozbieżnych rozwinięć.

2. Tęcze wielokrotne powstające w wyniku rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej.

Część I: Analiza DFT

*Szczególna słabość do problemu tęczy
przenika nawet najcięższe obliczenia.*

(H.C. van de Hulst, 1957)

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę numeryczną rozproszenia światła cechującego się niskim stopniem spójności czasowej na nieskończonym, transparentnym i homogenicznym włóknie oraz na światłowodach o skokowym i parabolicznym profilu refrakcyjnym. Analiza ta posługuje się dyskretnym przekształceniem Fouriera (DFT) w celu zrozumienia mechanizmów fizycznych rozpraszania światła w zakresie wielokrotnych tęcz pierwotnych.

2.1. Model rozproszenia

Na potrzeby niniejszej dyskusji przyjmuje się, że rozproszenie światła dokonuje się na nieskończenie długim, osiowosymetrycznym cylindrze o warstwowej budowie. Każdą z warstw opisuje parametr rozmiarowy $x_j = 2\pi r_j / \lambda$ oraz zespolony współczynnik załamania $m_j(\lambda) = n_j(\lambda) + i\kappa$, $j = 1, 2, \dots, J$, gdzie J oznacza ilość warstw, r_j jest promieniem warstwy j , λ jest długością fali padającego promieniowania, zaś $i = (-1)^{1/2}$. Przyjmuje się, że część rzeczywista współczynnika załamania zmienia się wraz z długością fali (wykazuje dyspersję chromatyczną), natomiast część urojona jest stała, co jest słuszne w zakresie dyspersji normalnej dla większości szkieł w paśmie optycznym⁷⁴. Konfigurację eksperymentu definiuje prawoskrętny układ współrzędnych, w którym oś symetrii cylindra pokrywa się z osią z jak na Rys. 2.1a.

Polichromatyczna, skolimowana wiązka promieniowania o wektorze elektrycznym oscylującym wzdłuż osi z (polaryzacja magnetyczna, TM) propaguje się w kierunku $-x$ i oświetla włókno pod kątem prostym. Widmo emisyjne tej wiązki opisuje rozkład normalny:

$$I^{inc}(\lambda) = I_0 \exp\left[4 \log(0.5) \left((\lambda - \lambda_0) / \text{FWHM}\right)^2\right], \quad (2.1)$$

gdzie λ_0 jest długością fali maksimum emisyjnego, I_0 jest natężeniem tego maksimum, zaś FWHM jest szerokością połówkową. Kąt rozproszenia θ określa położenie punktowego detektora natężenia światła względem kierunku propagacji padającej wiązki światła. Ogólna dyskusja na temat rozpraszania promieniowania quasi-monochromatycznego i polichromatycznego zawarta jest w pracy²⁴. Pole padające rozpatrywane jest jako wektorowa superpozycja N wzajemnie niekoherentnych monochromatycznych pól elektromagnetycznych o częstotliwościach z zakresu $\Delta\omega = [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ i propagujących się w tym samym kierunku²⁴:

$$\mathbf{E}^{\text{inc}}(x, t) = \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n^{\text{inc}}(t) \exp(-ik_n^{\text{inc}} x - i\omega_n t), \quad (2.2)$$

gdzie $\mathbf{E}_n^{\text{inc}}(t)$ jest zespoloną amplitudą pola elektrycznego, która fluktuuje w czasie z okresem relatywnie długim względnie zespolonego czynnika $\exp(-i\omega_n t)$, zaś k_n^{inc} jest rzeczywistym wektorem falowym. Wyrażenie dla zespolonego pola magnetycznego \mathbf{H}^{inc} otrzymuje się poprzez zamianę \mathbf{E} na \mathbf{H} w równaniu (2.2). Rozpraszanie każdej fali monochromatycznej ze zbioru N fal rozpatrywane jest jako odrębne zdarzenie. Transformacja pola padającego $[\mathbf{E}^{\text{inc}}, \mathbf{H}^{\text{inc}}]$ w pole rozproszone $[\mathbf{E}^{\text{sca}}, \mathbf{H}^{\text{sca}}]$ w wyniku interakcji z włóknem, rozpatrywana jest w ujęciu kompleksowym z wykorzystaniem rozwiązania równań Maxwell'a przy użyciu metody rozdzielania zmiennych (*Separation of Variables Method*, SVM)⁷⁵ oraz rozwinięcia pola elektromagnetycznego w szeregi Debye'go⁷⁶. Obie metody analizy formułują ekwiwalentne, kompleksowe rozwiązanie problemu rozproszenia. W odróżnieniu od metody SVM, metoda Debye'go ma postać szeregu, składającego się z wyrazów, które mają czytelną interpretację fizyczną. I tak, wyrazy rzędu $p = 0$ odpowiadają promieniowaniu ulegającemu ugięciu na włóknie (dyfrakcji) i odbiciu, $p = 1$ to promieniowanie rozproszone bez wewnętrznych odbić, $p = 2$ oznacza rozproszenie po jednokrotnym wewnętrznym odbiciu, itd. Wektorowa suma odpowiednio dużej ilości wyrazów* prowadzi do rozwiązania tożsamego metodzie SVM. Zakładając, że interakcja światła z włóknem ma charakter liniowych oddziaływań, to uśredniony w czasie wektor Poynting'a światła rozproszonego w punkcie \mathbf{r} przestrzeni opisuje reguła addytywna²⁴:

$$\ll \mathbf{S}^{\text{sca}}(\mathbf{r}, t) \gg = \text{Re} \sum_{n=1}^N \mathbf{S}_n^{\text{sca}}(\mathbf{r}), \quad (2.3)$$

* W teorii – nieskończenie dużej, a w praktyce ilościowe zastąpienie słowa „dużej” uwarunkowane jest parametrami eksperymentu (wielkość cząstki, długość fali, etc.) i wymaganą dokładnością obserwacji.

przy czym $\langle\langle \dots \rangle\rangle$ oznacza uśrednianie w czasie, natomiast $\mathbf{S}_n^{\text{sca}}$ to zespolony wektor Poynting'a odpowiadający n -tej fali monochromatycznej z zakresu $\Delta\omega = [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$:

$$\mathbf{S}_n^{\text{sca}}(\mathbf{r}) = 1/2 \mathbf{E}_n^{\text{sca}}(\mathbf{r}) \times [\mathbf{H}_n^{\text{sca}}(\mathbf{r})]^*, \quad (2.4)$$

gdzie (*) oznacza sprzężenie zespolone. Natężenie pola rozproszonego w polu dalekim (czyli uśredniona w czasie amplituda wektora Poynting'a) zmierzone przez konwencjonalny detektor światła o odpowiedzi proporcjonalnej do kwadratu amplitudy pola elektrycznego, jest następujące:

$$\langle\langle I^{\text{sca}}(\mathbf{r}) \rangle\rangle = \sum_{n=1}^N I_n^{\text{sca}}(\mathbf{r}), \quad (2.5)$$

gdzie I_n^{sca} jest natężeniem n -tej rozproszonej fali monochromatycznej. Nieskomplikowana heurystyka zastosowana w równaniach (2.3) i (2.5) nie wynika wprost z równań Maxwella, ale jej słuszność została potwierdzona empirycznie w opisie pola rozproszonego, gdy zakres częstotliwości $\Delta\omega$ padającej wiązki promieniowania wyniósł 0.2 częstotliwości maksimum emisyjnego²⁸. Na potrzebę dalszych obliczeń widmo emisyjne według (2.1) podzielono na $N = 2945$ składowych oddalonych co 0.1 nm, zaś zakres widmowy $\Delta\lambda$ stanowi 0.47 maksimum emisyjnego λ_0 równego 0.6328 μm .

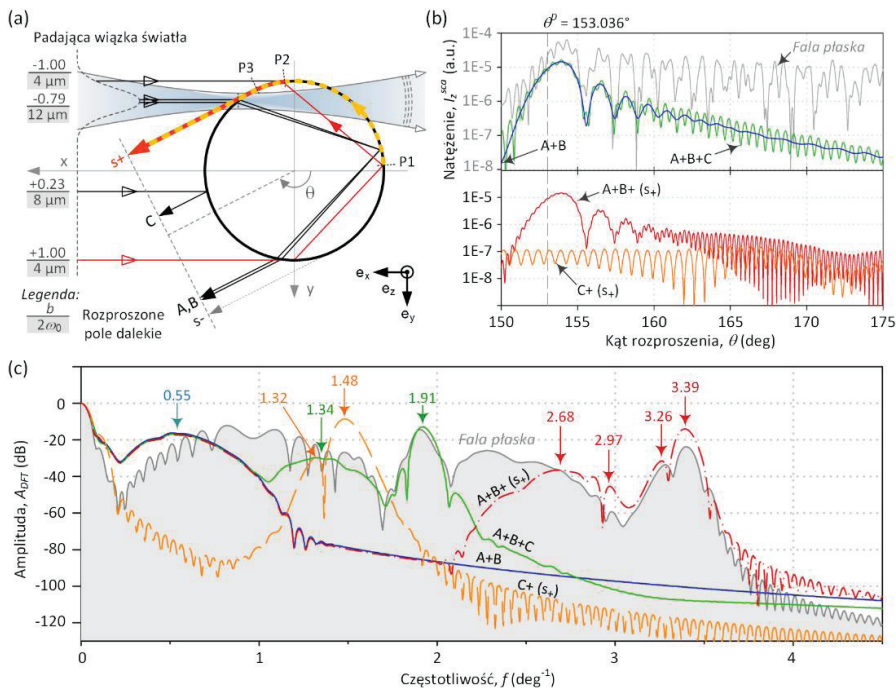
2.2. Homogeniczne włókno szklane

Na początku rozważmy rozpraszanie światła na homogenicznym włóknie wykonanym ze szkła kwarcowego (SiO_2). Współczynnik załamania włókna opisuje formuła interpolacyjna Sellmeier'a:

$$m_{\text{SiO}_2}(\lambda) = \left[1 + \sum_{i=1}^3 A_i \lambda^2 / (\lambda^2 - \ell_i^2) \right]^{1/2} + i\kappa, \quad (2.6)$$

gdzie $A_i = (0.6961663, 0.4079426, 0.8974794)$, $\ell_i = (0.0684043, 0.1162414, 9.896161\text{s})$ empirycznymi współczynnikami Sellmeier'a⁷⁷ oraz $\kappa = 1\text{E-}08$ wyraża niskie tłumienie szła w paśmie optycznym.

Analizę widma promieniowania rozproszonego dogodnie jest rozpocząć od przypadku oświetlenia wiązką monochromatyczną, czyli gdy $\text{FWHM} \rightarrow 0$. Narzędziem analizy będzie model rozpraszania na cylindrze Gaussowskiej wiązki światła sformułowany przez Méesa i in.⁷⁸ Dobierając odpowiednio parametry geometryczne tej wiązki oraz miejsce jej oddziaływania, jak pokazano na Rys. 2.1a, możliwe jest uzyskanie quasi-selektywnej generacji składowych rozproszonych, oddziałujących na pole rozproszone w sąsiedztwie tęczy pierwotnej w kącie



Rys. 2.1. Analiza DFT natężenia światła rozproszonego w sąsiedztwie tęczy pierwotnej powstającej na włóknie homogenicznym, oświetlonym światłem monochromatycznym: (a) quasi-selektywna generacja promieni rozproszonych A , B , C oraz $s+/s-$ (objaśnienia w tekście) przy wykorzystaniu wiązki Gaussowskiej o średnicy przewężenia $2\omega_0$ i padającej na cylinder w miejscu określonym przez współczynnik oddziaływania $b = [-1,+1]$. (b) wykresy natężenia rozproszonego w funkcji kąta rozproszenia ukazujące wpływ poszczególnych promieni A , B , C oraz $s+/s-$ na pole rozproszone, (c) DFT natężeń rozproszonych z Rys. 2.1b. Parametry DFT: zakres kątowy analizy $153.036\text{--}175^\circ$, okres próbkowania: 0.002° , ilość punktów DFT: 65536 (uzupełnione zerami), okno Hanna.

θ , tj.: dwóch promieni A i B ulegających jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu na granicy włókno-otoczenie różniących się nieznacznie drogami optycznymi, promienia C odbitego od powierzchni włókna oraz promieni stycznych do powierzchni włókna, oznaczonych jako $s+$ i $s-$. Pozycję wertykalną wiązki światła definiuje współczynnik oddziaływania $b = [-1,+1]$.

Na Rys. 2.1b ukazano natężenia rozproszone w obszarze tęczy pierwotnej, odpowiadające promieniom A , B , C oraz $s+/s-$ z Rys. 2.1a oraz ich wektorowej superpozycji. Dla porównania zamieszczono również wykres natężenia obliczony dla przypadku fali padającej o płaskim froncie falowym (obliczony z wykorzystaniem teorii Lorenza-Mie), który ujmuje w sposób kompleksowy proces rozproszenia światła. Przekształcając następnie te sygnały do dziedziny częstotliwości,

otrzymano Rys. 2.1c. Dobór parametrów analizy DFT decyduje przy tym o możliwości jakościowej analizy natury tęczy na podstawie jej reprezentacji w dziedzinie częstotliwości. Zakres kątowy analizy DFT ma swój początek w kącie Kartezjusza tęczy pierwotnej powstającej na włóknie o średnicy 125 μm , wynoszącym 153.036°. Koniec przedziału próbkowania ustalono arbitralnie na 175°, unikając analizy sygnału rozproszonego wstecz i przyczyniającego się do powstania optycznej glorii^{79,80}. Oryginalny zbiór próbek oddalonych w kącie rozproszenia o 0.002° został następnie przeskalowany z wykorzystaniem okna Hanna minimalizującego przeciek widma, a następnie uzupełniony zerami do $2^{16} = 65536$ próbek. Dla tak sformułowanych warunków analizy DFT, rozdzielczość widmowa wynosi około 0.0076 deg^{-1} . Okno Hanna, cechujące się względnie dużym tłumieniem listków bocznych oraz poszerzonym listkiem głównym⁸¹, umożliwia rozróżnienie sygnałów w widmie o zróżnicowanych amplitudach (silny udział interferencji promieni A i B i znacznie mniejszy wpływ fal powierzchniowych $s+$, por. Rys. 2.1b. Druga cecha tego okna pogarsza możliwość wykrycia słabych komponentów widmowych w sąsiedztwie prążka odpowiadającego interferencji promieni A i B .

Analiza DFT z Rys. 2.1c dowodzi, że wektorowa suma składowych rozproszonych A i B ujawnia się w postaci maksimum zlokalizowanego przy częstotliwości $\sim 0.55 \text{ deg}^{-1}$. Maksimum to wpisuje się w szeroki listek widmowy tęczy, zawarty w zakresie ~ 0.2 do 1.55 deg^{-1} , obserwowanej dla przypadku płaskiej fali monochromatycznej. Z kolei składowa odbita C , interferując z parą promieni A i B , przyczynia się do powstania dwóch kolejnych elementów widmowych, posiadających swoje maksima przy 1.34 i 1.91 deg^{-1} .

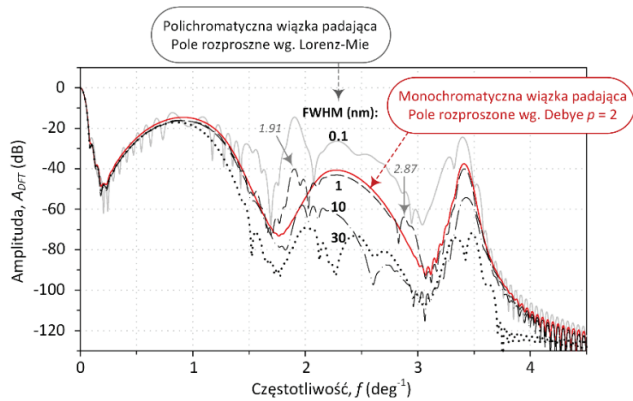
Wpływ fali powierzchniowej $s+$ na widmo tęczy ujawnia się m.in. jako wynik interferencji z promieniem odbitym C w postaci dwóch maksimów występujących przy 1.32 i 1.48 deg^{-1} . Naturę tej interferencji wyjaśnia schematycznie Rys. 2.1a. Według optyki geometrycznej, promień padający stycznie na cylinder, o współczynniku oddziaływania $b = +1$, ulega wewnętrznemu odbiciu w punkcie P1, następnie propaguje się wstecznie do punktu P2 i opuszcza cylinder pod kątem $\theta = 173.36^\circ$. Wpływ oddziaływania generowanego przez ten promień światła obserwowany jest również w zakresie większych kątów rozpraszania, dzięki propagacji począwszy od punktu P2 w postaci fali powierzchniowej. W każdym punkcie tej ścieżki propagacyjnej dochodzi do generacji energii promienistej do pola dalekiego i stopniowej degradacji natężenia fali powierzchniowej wraz z odległością^{68,70,71}. Możliwy jest również inny mechanizm generacji fali powierzchniowej $s+$, w którym nie zachodzi wewnętrzne odbicie. Jak ukazuje Rys. 2.1a, promień o współczynniku oddziaływania $b = +1$ może zostać załamany do wnętrza cylindra, a po osiągnięciu powierzchni granicznej w punkcie P1 propagować się w dalszym

etapie już jako fala powierzchniowa. Warto podkreślić, że optyka geometryczna nie uzasadnia powstawania i propagacji fal powierzchniowych. Wyniki analizy numerycznej Lavena⁸² z wykorzystaniem szeregów Debye'go dostarczają jednak przekonujących argumentów potwierdzających istnienie wyżej zarysowanych mechanizmów propagacyjnych. Fale powierzchniowe $s+$ interferują również z parą promieni A i B , co skutkuje powstaniem maksimum widmowych przy 2.68, 2.97, 3.26 oraz 3.39 deg^{-1} .

Widmo z Rys. 2.1c nie ujawnia wpływu fali powierzchniowej $s-$, pomimo tego, że mechanizm propagacji światła dla tego przypadku jest podobny do tego, który obserwujemy dla promienia o $b = +1$. Dzieje się tak dlatego, że promień styczny o współczynniku oddziaływania $b = -1$ generuje promień załamany do wnętrza włókna, który ulega wewnętrznemu odbiciu, a następnie opuszcza cylinder pod kątem $\theta = 186.64^\circ$ zanim zacznie propagować się pod postacią fali powierzchniowej $s-$, czyli daleko poza zakresem kątów rozpraszania objętych analizą (153.036° – 175°).

Kształt DFT natężenia rozproszonego dla przypadku padającej fali płaskiej jest niewątpliwie odmienny od kształtu DFT wektorowej superpozycji poszczególnych składowych rozproszonych A , B , C oraz $s+$, zarówno pod względem ilości informacji jak i również amplitudy poszczególnych maksimum widmowych. Mody rozproszone generowane przy użyciu selektywnej wiązki gaussowskiej stanowią bowiem ograniczony fragment wielu procesów zachodzących podczas rozpraszania fali o płaskim froncie.

Rysunek 2.2 ilustruje wpływ szerokości połowkowej widma promieniowania padającego na włókno na DFT natężenia rozproszonego w obszarze tęczy pierwotnej. Struktura DFT dla wiązki promieniowania o najmniejszym FWHM jest bardzo podobna do tej zaobserwowanej dla przypadku monochromatycznej fali płaskiej z Rys. 2.1c. Wzrostowi FWHM towarzyszy stopniowa redukcja amplitud składowych o największych częstotliwościach na skutek superpozycji natężeń rozproszonych w kącie rozproszenia o długościach fal zawartych w widmie padającego promieniowania²⁷⁻²⁹. Rysunek 2.2 zawiera również jeszcze jeden wykres DFT, odpowiadający tęczy która powstaje w wyniku wektorowej superpozycji komponentów ulegających tylko jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu wewnątrz włókna i przy oświetleniu falą *monochromatyczną* o takiej długości, która odpowiada maksimum emisyjnemu w eksperymencie z wiązką polichromatyczną ($0.6328 \mu\text{m}$). Taką selektywną tęczę uzyskano wykorzystując wyrazy rzędu $p = 2$ w rozwinięciu pola rozproszonego metodą Debye'go. Podobieństwo wykresu



Rys. 2.2. DFT natężenia rozproszonego z obszaru tęczy pierwotnej powstającej na szklanym, homogenicznym włóknie SiO_2 o średnicy $125 \mu\text{m}$ w warunkach oświetlenia wiązką polichromatyczną o $\text{FWHM} = 0.1, 1, 10, \text{ i } 30 \text{ nm}$; natężenie rozproszone obliczono według teorii Lorenza-Mie. Dla porównania zamieszczono DFT natężenia rozproszonego według rozwinięcia Debye'go dla wyrazów rzędu $p = 2$ (patrz tekst), ale promieniowania monochromatycznego o długości fali równej maksimum emisyjnego promieniowania polichromatycznego ($0,6328 \mu\text{m}$). Parametry DFT jak dla Rys. 2.1c.

sporządzonego dla źródła polichromatycznego o $\text{FWHM} = 1 \text{ nm}$ do wykresu według rozwinięcia Debye'go nasuwa następującą konkluzję:

makroskopowe efekty rozpraszania promieniowania cechującego się niskim stopniem spójności czasowej w sąsiedztwie tęczy pierwotnej powstającej na homogenicznym włóknie, mogą być interpretowane jako rezultat rozpraszania promieniowania monochromatycznego, ulegającego jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu.

Wśród różnic należy wymienić dwa maksima widmowe zlokalizowane przy częstotliwościach 1.91 i 2.87 deg^{-1} (por. Rys. 2.1c). Amplituda obu tych maksimów silnie jednak maleje wraz ze wzrostem FWHM . Warto również nadmienić, że powyższa konkluzja jest słuszna pod warunkiem symetrycznego rozkładu energii promieniowania względem maksimum w widmie emisyjnym źródła światła²⁷ (λ_0).

2.3. Światłowód o skokowym profilu refrakcyjnym

Tęcze wielokrotne i ich transformacje

Rozproszenie światła na cząstce o niejednorodnej strukturze refrakcyjnej może skutkować powstaniem wielokrotnych tęczy pierwotnych w polu dalekim w wy-

niku jednokrotnego wewnętrznego odbicia światła⁸³. Niniejszy paragraf poświęcono analizie rozpraszania światła w obszarze wielokrotnych tęcz pierwotnych powstających na światłowodzie o średnicy zewnętrznej d_{clad} oraz średnicy rdzenia d_{core} , który cechuje się skokowym profilem refrakcyjnym według wzoru:

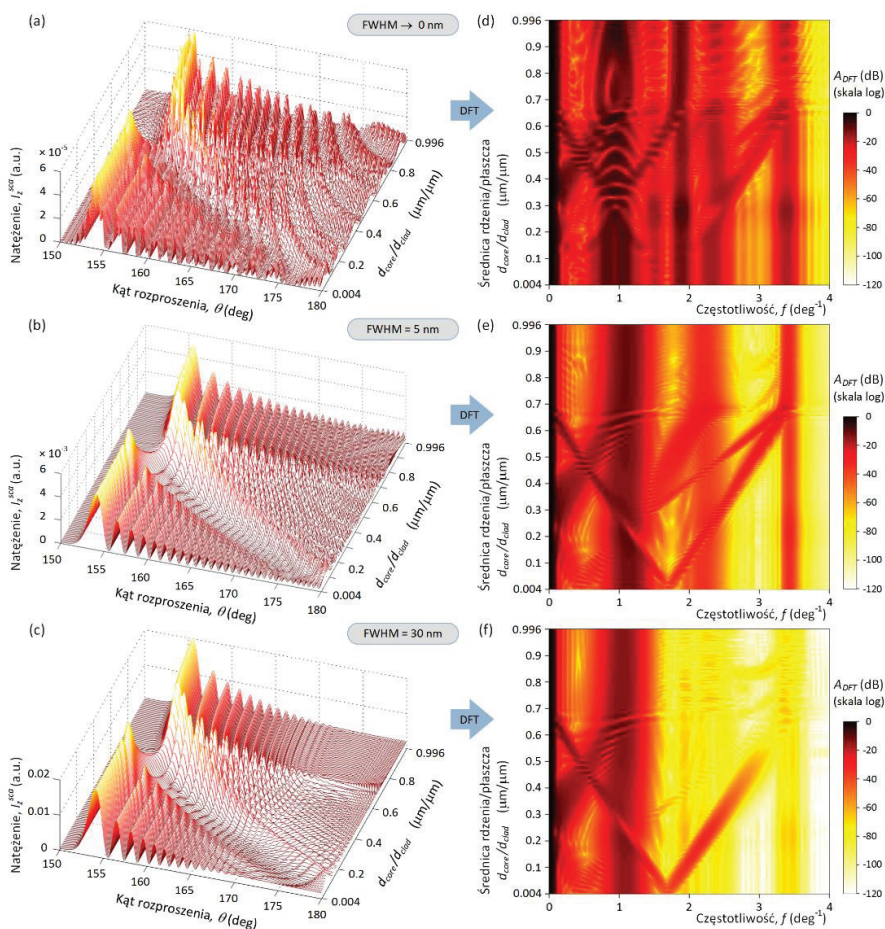
$$m(r, \lambda) = \begin{cases} m_{SiO_2}(\lambda) + D; & r < a \\ m_{SiO_2}(\lambda); & r \geq a \end{cases}, \quad (2.7)$$

gdzie r jest współrzędną radialną, $m_{SiO_2}(\lambda)$ definiuje równanie (2.6), $a = d_{core} / 2$ jest promieniem światłowodu, a $D = +0.014$ jest stałą korekcyjną, wyrażającą obecność domieszki w rdzeniu. Domieszkowanie stosowane w klasycznych światłowodach nie modyfikuje kształtu krzywej dyspersyjnej⁸⁴ $m_{SiO_2}(\lambda)$.

Na Rys. 2.3a–c przedstawiono pseudotrójwymiarowe rozkłady natężenia światła rozproszonego w zakresie dużych kątów w funkcji średnicy rdzenia światłowodu, zmieniającej się w zakresie 0.5, 1.0, ...124.5 μm , przy założeniu niezmienniej średnicy zewnętrznej 125 μm . Wykresy te zostały sporządzone dla trzech źródeł światła, cechujących się odmiennymi parametrami widmowymi: źródła monochromatycznego (Rys. 2.3a), polichromatycznej wiązki o umiarkowanym poszerzeniu widmowym (FWHM) wynoszącym 5 nm (Rys. 2.3b) i polichromatycznej o FWHM = 30 nm (Rys. 2.3c). Ogólna obserwacja pozwala na wyróżnienie dwóch osobnych tęcz, oddzielonych charakterystycznym układem prążków mory, wynikającym z ich interferencji*. Poszerzenie widmowe promieniowania padającego na światłowód powoduje eliminację wysokoczęstotliwościowych form na skutek niekoherentnej superpozycji fal rozproszonych w polu dalekim, należących do widma padającego promieniowania.

Na Rys. 2.3d–f ukazano przekształcenia DFT rozkładów natężenia światła rozproszonego z Rys. 2.3a–c, dokonane dla zakresu kąтового 160–175° z rozdzielczością 0.002°. W porównaniu z analizą przeprowadzoną dla włókna homogenicznego (Rozdz. 2.2), punkt początkowy analizy przesunięto z $\theta = 153.036^\circ$ (kąt Kartezjusza tęczy pierwotnej) do 160°, co pozwoliło na redukcję silnego wpływu interferencji promieni A i B na wynik DFT w zakresie 0...~1 deg⁻¹ (kosztem pogorszenia rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości). Wierszowe porównanie Rys. 2.3d–f ilustruje wpływ rodzaju padającego promieniowania na wynik DFT. Warto zauważyć, że DFT z Rys. 2.3d ujawnia komponenty stacjonarne,

* Szczegółowa analiza natury tych tęcz, wykorzystująca model Debye'go rozproszenia i pojęcia optyki geometrycznej, będzie ukazana w dalszej części niniejszego rozdziału.



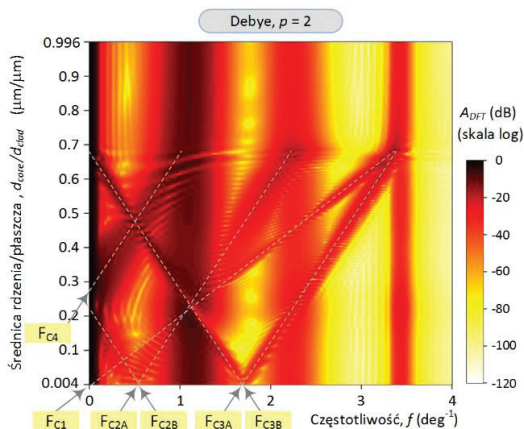
Rys. 2.3. Lewa kolumna: pseudotrójwymiarowe rozkłady natężenia światła rozproszonego w zakresie dużych kątów (w obszarze wielokrotnych tęczy pierwotnych) w funkcji średnicy rdzenia światłowodu o średnicy płaszczka 125 μm , oświetlonego wiązką światła monochromatycznego (a) oraz wiązką polichromatyczną: (b) FWHM = 5 nm, (c) FWHM = 30 nm. **Prawa kolumna:** DFT rozkładów natężenia z Rys. 2.3a–c ($\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, $m_{clad}(\lambda_0) = 1.45702 + i1\text{E}-08$, $m_{core}(\lambda_0) = m_{clad}(\lambda_0) + 0.014$). Parametry DFT: zakres kątowy analizy 153.036–175°, okres próbkowania: 0.002°, ilość punktów DFT: 65536 (uzupełnione zerami), okno Hanna.

charakterystyczne dla włókna homogenicznego (por. Rys. 2.1c), ale również słabo wyróżnialne maksima, które zmieniają się wraz z progresją rdzenia światłowodu i tworzą charakterystyczne struktury w kształcie litery V. Rysunek 2.3e pokazuje, że wzrost FWHM źródła światła polepsza zdolność do odróżnienia tych struktur

od innych form widmowych (w znaczeniu kryterium Rayleigha). Dalsze poszerzenie widma promieniowania padającego, Rys. 2.3f, prowadzi do degradacji amplitudy maksimów widmowych, wynikających z obecności rdzenia.

Analiza rozproszenia z wykorzystaniem szeregow Debye'go

W celu wyjaśnienia natury promieniowania rozproszonego w obszarze wielokrotnych tęcz pierwotnych przeanalizujemy Rys. 2.4, przedstawiający diagram DFT analogiczny do tych ukazanych na Rys. 2.3d–f, lecz pokazujący udział tylko promieniowania ulegającego jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu w światłowodzie. Diagram ten powstał w drodze symulacji rozkładu natężenia światła rozproszonego w funkcji ilorazu średnicy rdzenia i płaszczka (analogicznie do Rys. 2.3a–c), lecz przy wykorzystaniu modelu Debye'go rozproszenia promieniowania monochromatycznego dla komponentów rzędu $p = 2$, a następnie został przekształcony do dziedziny częstotliwości z zachowaniem takich samych reguł jak dla Rys. 2.3d–f. Nawet pobieżna, jakościowa ocena wskazuje na podobieństwo Rys. 2.3e i Rys. 2.4, a wśród jawnych różnic należy wskazać: i) obecność



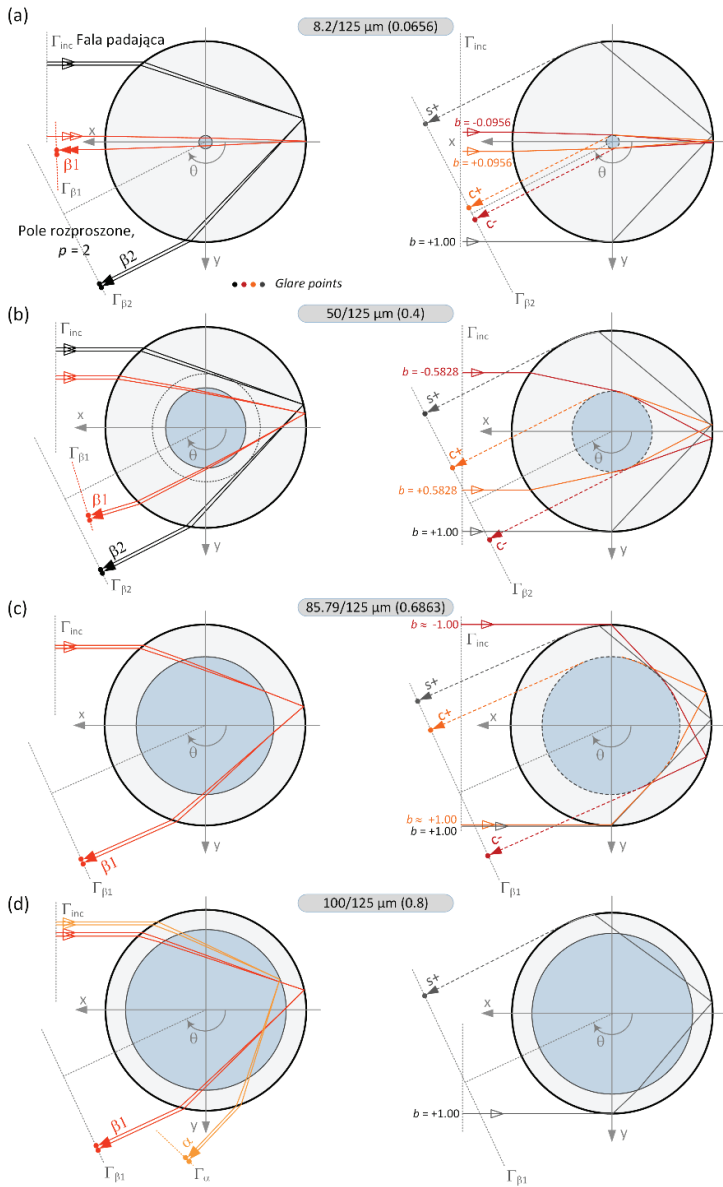
Rys. 2.4. DFT natężenia rozproszonego z obszaru wielokrotnych tęcz pierwotnych powstających na światłowodzie o średnicy 125 μm i skokowym profilu refrakcyjnym, w funkcji ilorazu średnicy rdzenia i płaszczka. Natężenie rozproszone obliczono z wykorzystaniem rozwinięcia Debye'go pola rozproszonego dla komponentów ulegających jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu ($p = 2$) i dla przypadku monochromatycznej fali padającej ($\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, $m_{\text{clad}}(\lambda_0) = 1.45702 + i1\text{E-}08$, $m_{\text{core}}(\lambda_0) = m_{\text{clad}}(\lambda_0) + 0.014$). Parametry DFT jak dla Rys. 2.3).

maksimów o niewielkiej amplitudzie o częstotliwościach ~ 1.5 i $\sim 1.9 \text{ deg}^{-1}$ na Rys. 2.3e, które są charakterystyczne dla DFT promieniowania rozproszonego na homogenicznym włóknie z Rys. 2.1c, ii) położenia prążków DFT powyżej granicy $d_{core} / d_{clad} \approx 0.65$ na Rys. 2.3e ulegają silnym oscylacjom pod wpływem zmian średnicy rdzenia (efekt ten nie występuje na Rys. 2.4), iii) na Rys. 2.3e widoczne są dwa maksima przy $f \approx 3 \text{ deg}^{-1}$, zmieniające swoje położenie wraz ze zmianą średnicy rdzenia powyżej granicy $d_{core} / d_{clad} \approx 0.65$ (również nieobecne na Rys. 2.4). To podobieństwo obu transformacji skłania do przeprowadzenia dalszych analiz, zmierzających do poznania natury pola rozproszonego, w kategorii zjawisk fizycznych odwołujących się do jednokrotnego wewnętrznego odbicia światła.

Geometryczna interpretacja jednokrotnego wewnętrznego odbicia

Natura oddziaływań rzędu $p = 2$ zależy od morfologii światłowodu. Rysunek 2.5 identyfikuje dominujące oddziaływania rzędu $p = 2$, które przyczyniają się do powstania wielokrotnych tęcz pierwotnych (α , β_1 , β_2), a także fale powierzchniowe powstające na granicy pomiędzy rdzeniem i płaszczem ($c+$, $c-$) oraz płaszczem i otoczeniem ($s+$). Analizę podzielono na cztery przypadki, różniące się średnicą rdzenia światłowodu o średnicy zewnętrznej wynoszącej $125 \mu\text{m}$: (a) $8.2 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m}$, (c) $89.79 \mu\text{m}$ i (d) $100 \mu\text{m}$. W każdym z tych przypadków naszkicowano odrębnie geometryczne promienie światła odpowiadające za powstanie tęcz pierwotnych i promienie światła symbolizujące fale powierzchniowe. Sposób oznaczania tęcz generowanych w drodze wewnętrznego odbicia na granicy rdzeń-płaszcz (α) oraz płaszcz-otoczenie (β) jest zgodny z systematyką Locka i in.⁸⁵. Kropki obecne na płaszczyznach Γ_α , Γ_{β_1} , Γ_{β_2} symbolizują punkty oddziaływania w polu dalekim, w których natężenie w kącie rozproszenia θ jest największe (*glare points*)⁸⁶.

Analizę Rys. 2.5 dogodnie jest rozpocząć od światłowodu o najmniejszym rdzeniu, $d_{core} = 0.0656 \cdot d_{clad}$ (Rys. 2.5a). W wyniku wewnętrznego odbicia światła na granicy pomiędzy płaszczem i otoczeniem, dochodzi do powstania pary promieni rozproszonych, opuszczających światłowód pod takim samym kątem. Para ta interferuje w polu dalekim, tworząc tęczę pierwotną β_2 o kącie Kartezjusza wynoszącym 153.036° . Niewielka część promieniowania propaguje się także przez płaszcz i rdzeń, ulega odbiciu na granicy płaszcz-otoczenie, a następnie propaguje się wstecznie przechodząc ponownie przez płaszcz i rdzeń światłowodu. Para promieni, które rozpraszają się według tego scenariusza tworzy drugą –



Rys. 2.5. Dominujące oddziaływania rzędu $p = 2$, które przyczyniają się do powstania wielokrotnych tęcz pierwotnych (α , β_1 , β_2), a także fale powierzchniowe powstające na granicy pomiędzy rdzeniem i płaszczem ($c+$, $c-$) oraz płaszczem i otoczeniem ($s+$). Monochromatyczna fala płaska rozpraszana jest na światłowodzie o skokowym profilu refrakcyjnym i o średnicy zewnętrznej $125 \mu\text{m}$. Parametrem analizy jest średnica rdzenia, odpowiednio: (a) $8.2 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m}$, (c) $89.79 \mu\text{m}$ i (d) $100 \mu\text{m}$. ($\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, $m_{\text{clad}}(\lambda_0) = 1.45702 + iE-08$, $m_{\text{core}}(\lambda_0) = m_{\text{clad}}(\lambda_0) + 0.014$).

bliźniaczą tęczę pierwotną β_1 o kącie Kartezjusza wynoszącym 179.18° , a więc zlokalizowanym w zakresie rozpraszania wstecz. Obecność rdzenia wywołuje także inne osobliwe oddziaływania w postaci dwóch fal powierzchniowych $c+$ i $c-$, które powstają wówczas, gdy promieniowanie propagujące się przez płaszcz jest styczne do rdzenia. Tego typu fale wzbudzone są przez promieniowanie padające o niedużym współczynniku oddziaływania b wynoszącym ± 0.0956 .

Wzrost średnicy rdzenia (przy zachowaniu rozmiaru płaszcz) prowadzi do relokacji tęczy β_1 w kącie rozpraszania w kierunku tęczy β_2 , Rys. 2.5b. Obie tęcze β mają porównywalne natężenia, a oddziela je charakterystyczny obszar przejściowy jak na Rys. 2.3b. Dalsze powiększanie średnicy rdzenia do ok. $0.5376 \cdot d_{clad}$ powoduje wykluczenie przez rdzeń pary promieni propagujących się przez płaszcz, co prowadzi do powstania tylko tęczy β_1 . Porównanie Rys. 2.5a i 2.5b pokazuje również, że ewolucja średnicy rdzenia prowadzi do oddalania się punktów oddziaływania fal powierzchniowych $c+$ i $c-$ na płaszczyźnie Γ_{β_2} .

Według zasad optyki geometrycznej, propagacja powierzchniowych fal rdzeniowych $c+$ i $c-$ zostanie zablokowana, gdy wśród padających i załamanych w płaszczu promieni światła nie będzie takich, które będą styczne do powierzchni rdzenia. Sytuacja taka ukazana jest na Rys. 2.5c, na którym promienie padające o współczynniku oddziaływania b bliskim 1 nie tworzą stycznych do rdzenia, a tym samym – nie generują fal $c+$ i $c-$ gdy średnica rdzenia wynosi około $0.6863 \cdot d_{clad}$.

W ostatnim rozpatrywanym przypadku, płaszcz światłowodu ma formę cienkiej otuliny pokrywającej rdzeń o średnicy $d_{core} = 0.8 \cdot d_{clad}$, jak na Rys. 2.5d. W tej sytuacji w polu rozproszonym dominuje wyraźny obraz prążkowy tęczy β_1 , por. Rys. 2.3b. Optyka geometryczna przewiduje również udział tęczy α , posiadającej kąt Kartezjusza w kącie 133.42° i która powstaje w wyniku wewnętrznego odbicia światła na granicy pomiędzy rdzeniem i płaszczem. Promień światła padający stycznie na powierzchnię światłowodu ($b = +1$) ulega następnie załamaniu i propaguje się dwukrotnie przez rdzeń zanim rozpocznie propagację w postaci fali powierzchniowej $s+$. W granicznej sytuacji, gdy płaszcz jest cienkim filmem otaczającym światłowodowy rdzeń ($d_{core} \rightarrow d_{clad}$), promienie światła rzędu $p = 2$, dzięki którym powstają tęcze α i β_1 , mają zbliżone drogi optyczne a obrazy prążkowe obu tęczy pokrywają się^{85,87,88}.

Optyka geometryczna jest niewątpliwie prostym i intuicyjnym narzędziem w analizie niektórych zjawisk towarzyszących rozproszeniu światła, ma jednak ograniczone zastosowanie do opisu propagacji fal powierzchniowych. Należy za-

znaczyć, że styczne ścieżki propagacji ukazane na Rys. 2.5a–d, tłumaczą powstanie fal powierzchniowych $c-$, $c+$ i $s+$ o *dominującym* udziale w polu dalekim. Innym znanym mechanizmem generacji fal powierzchniowych rzędu $p = 2$ (i innych rzędów) jest tzw. *efekt tunelowania*^{71,89,90}. Efekt ten zachodzi, gdy fala elektromagnetyczna nie ulega stycznej interakcji z powierzchnią rdzenia czy płaszczu, lecz propaguje się w bliskim jej sąsiedztwie. Oddziaływanie fali z tą powierzchnią jest słabe i dokonuje się poprzez barierę potencjału tworzącą się na styku dwóch ośrodków, podobnie jak cząsteczki, które pokonują barierę potencjału o wysokości większej niż energia cząstki według mechaniki kwantowej. Efekt tunelowania również prowadzi do powstania fal elektromagnetycznych, które propagują się cyrkularnie na styku rdzenia i płaszczu oraz płaszczu i otoczenia. Te dwa mechanizmy generacji fal powierzchniowych, czyli styczne oddziaływanie padających promieni światła oraz efekt tunelowania, powinny być rozważane *de facto* jako niepodzielny proces fizyczny^{91,92}. Warto w tym miejscu zauważyć, że płaszcz stanowiący wąską otulinę rdzenia jak na Rys. 2.5d, funkcjonuje jak falowód o pierścieniowym kształcie⁸⁵.

Interpretacja DFT tęczy wielokrotnych powstających w wyniku rozpraszania polichromatycznej wiązki światła

W próbie połączenia wyników geometrycznej analizy rozproszenia światła z Rys. 2.5 oraz rezultatów analizy DFT z Rys. 2.4, warto przytoczyć intuicyjną metodę interpretacji widma zastosowaną przez van Beecka i Reithmullera w analizie widma tęczy powstającej na kropki wody⁹³. W analogii do eksperymentu Younga z dwiema szczelinami wykazali oni, że każde maksimum widmowe jest wynikiem interferencji pomiędzy dwoma, geometrycznymi promieniami światła. Punkty oddziaływania (*glare points*) tych promieni w polu dalekim mogą być interpretowane jako spójne, punktowe źródła promieniowania. Podobnie jak w eksperymencie Younga, źródła te interferują a wynik tej interakcji ma postać obrazu prążkowego.

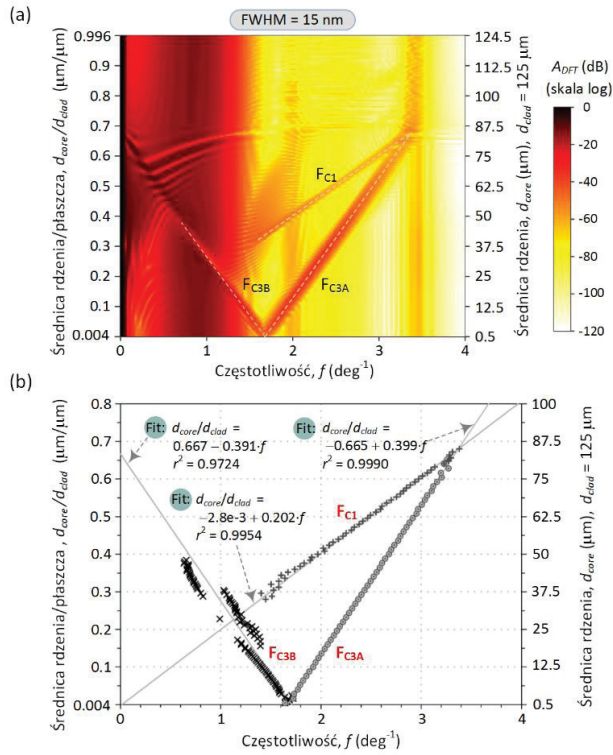
Uważna analiza zmian położenia punktów oddziaływania fal powierzchniowych $c+$ i $c-$ wraz ze wzrostem średnicy światłowodu na Rys. 2.5a–c wskazuje, że interferencja tych fal ujawnia się w postaci maksimum DFT oznaczonym jako F_{Cl} na Rys. 2.4. Gdy średnica rdzenia jest najmniejsza, jak na Rys. 2.5a, punkty oddziaływania fal powierzchniowych $c+$ i $c-$ znajdują się blisko siebie, co skutkuje powstaniem maksimum widmowego o relatywnie niedużej częstotliwości. To maksimum ujawnia się na Rys. 2.4 wówczas, gdy średnica rdzenia d_{core} osiągnie wartość około $0.2 \cdot d_{clad}$, ponieważ w zakresie częstotliwości 0 do $\sim 1.2 \text{ deg}^{-1}$

dominują silne komponenty widmowe związane z interferencją promieni tworzących tęczę β_2 . Wzrost średnicy rdzenia przyczynia się do zwiększenia odstepu punktów oddziaływania fal powierzchniowych $c+$ i $c-$ w polu dalekim, czemu towarzyszy przesuwanie się maksimum F_{C1} w stronę wyższych częstotliwości.

Geometria oddziaływań rzędu $p = 2$ przedstawiona na Rys. 2.5a i b sugeruje, że DFT natężenia rozproszonego z obszaru tęczy pierwotnych powinno zawierać komponenty wynikające z interferencji elektromagnetycznych fal powierzchniowych $c+$, $c-$ oraz promieni ulegających wewnętrznemu odbiciu od granicy pomiędzy płaszczem i otoczeniem. Każdy z promieni tworzących tęczę β_2 interferuje z jedną z fal powierzchniowych $c+$ i $c-$, dlatego DFT natężenia rozproszonego na Rys. 2.4 zawiera cztery maksima odpowiadające tej interferencji, oznaczone jako F_{C2A} , F_{C2B} , F_{C3A} i F_{C3B} . Zmiany położenia tych maksimów wraz ze średnicą światłowodu tworzą charakterystyczne struktury w kształcie litery V, o wierzchołkach umiejscowionych przy częstotliwościach ~ 0.50 i 1.68 deg^{-1} . Wraz ze wzrostem średnicy światłowodu obie pary maksimów DFT oddalają się od siebie, ponieważ rosną odległości pomiędzy punktami oddziaływań fal powierzchniowych $c+$, $c-$ w polu dalekim przy zachowaniu kąta Kartezjusza promieni tworzących tęczę β_2 (do chwili, gdy rdzeń o średnicy ok. $0.5376 \cdot d_{clad}$ wykluczy parę promieni propagujących się przez płaszcz, co prowadzi do powstania tylko tęczy β_1). Warto również zauważyć, że maksima DFT na Rys. 2.4, które wynikają z istnienia fal powierzchniowych $c+$ i $c-$ zanikają, gdy rdzeń osiągnie średnicę $d_{core} \approx 0.69 \cdot d_{clad}$, czyli gdy promienie padające na światłowód o współczynniku oddziaływania b bliskim 1 nie tworzą stycznych do rdzenia, a tym samym – nie generują fal $c+$ i $c-$ (jak na Rys.2.5c). Nie można oczywiście wykluczyć istnienia rdzeniowych fal powierzchniowych powyżej granicy $d_{core} \approx 0.69 \cdot d_{clad}$ posługując się prostymi regułami optyki geometrycznej. Jak wspomniano wcześniej, powstanie fal rdzeniowych dokonuje się również na zasadzie zjawiska tunelowania energii promieniowania propagującego się w sąsiedztwie rdzenia, ale nie mającego punktu styczności z tym rdzeniem w rozumieniu optyki geometrycznej. Zjawisko to tłumaczy obecność licznych wąskich ekstremów na Rys. 2.3d–f powyżej granicy $d_{core} / d_{clad} \approx 0.69$.

Ostatnie maksimum DFT oznaczone na Rys. 2.4 jako F_{C4} uwidacznia się, gdy średnica rdzenia d_{core} osiąga wartość około $0.3 \cdot d_{clad}$, czyli gdy tęcza β_1 wkracza w zakres kątów rozpraszania, objęty oknem analizy (160 – 175°), por. Rys. 2.3b. Pozycja widmowa F_{C4} zależy od średnicy rdzenia światłowodu, ponieważ para promieni tworzących tęczę β_1 propaguje się zarówno przez płaszcz, jak i przez rdzeń.

Wyniki analizy DFT przedstawione na Rys. 2.3e i 2.3f sugerują możliwość pośredniej oceny średnicy włókna na podstawie położenia wybranych maksimów DFT. Na Rys. 2.6a przedstawiono diagram DFT analogiczny do tych ukazanych na Rys. 2.3e i f, lecz wykonany dla padającej wiązki polichromatycznej o szerokości połówkowej widma emisyjnego (FWHM) równej 15 nm, co jest typową wartością dla jednobarwnych diod LED o umiarkowanym poszerzeniu widmowym. Oknem analizy objęto natężenie rozproszone w polu dalekim w zakresie kątowym $153.036\text{--}175^\circ$ z krokiem co 0.002° . Poszerzony zakres analizy, w porównaniu do warunków zastosowanych dla Rys. 2.3e i f, umożliwił zwiększenie rozdzielczości częstotliwościowej kosztem pogorszenia widoczności komponentów widmowych o niewielkiej amplitudzie w zakresie częstotliwości $0\text{...}\sim 1\text{ deg}^{-1}$, w którym dominuje interferencja promieni tworzących obie tęcze β . Rodowód trzech wyróżnionych maksimów oznaczonych jako F_{C1} , F_{C3A} i F_{C3B} na Rys. 2.6a wynika z opisanych wcześniej oddziaływań rdzeniowych fal powierzchniowych $c+$ i $c-$. Na Rys. 2.6b przedstawiano wyniki analizy położenia widmowego tych maksimów w szerokim zakresie zmian średnicy rdzenia ($0.5\text{--}124.5\text{ }\mu\text{m}$) wraz z regresją liniową otrzymanych zbiorów danych. Warto zauważyć, że położenie maksimum F_{C3A} jest liniową funkcją średnicy rdzenia w szerokim zakresie jej zmian, obejmującym standardowe, telekomunikacyjne światłowody jednomodowe (rdzeń o średnicy $8.2\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$) oraz wielomodowe światłowody o skokowym profilu refrakcyjnym (rdzeń 50 lub $62.5\text{ }\mu\text{m}$). Praktyczne wykorzystanie tych szczególnych cech widmowych, które mogą posłużyć do identyfikacji średnicy światłowodu w procesie pomiarowym wymaga jednak dalszych analiz. Przede wszystkim należy poznać wpływ różnorodnych niedoskonałości geometrycznych światłowodu (niewspółosiowość oraz eliptyczność rdzenia i płaszczka) na maksima F_{C1} , F_{C3A} i F_{C3B} . Warto zauważyć, że taka analiza może być zredukowana do badania rozproszenia komponentów ulegających jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu ($p = 2$), bez potrzeby posługiwania się pełnym, kompleksowym rozwiązaniem wynikającym z równań Maxwella. Budowanie formalnych analogii łączących widmo tęczy i cechy światłowodu napotyka również na liczne trudności, ponieważ wynik DFT zależy od konfiguracji układu eksperymentalnego (właściwości emisyjne źródła promieniowania, pochylenie włókna względem padającej wiązki promieniowania, etc.) jak i również parametrów tej transformacji (zakres kątów analizy, częstotliwość próbkowania sygnału natężenia, kształt funkcji okna).



Rys. 2.6. (a) DFT natężenia rozproszonego z obszaru wielokrotnych tęcz pierwotnych powstających na światłowodzie o średnicy 125 μm i skokowym profilu refrakcyjnym w funkcji ilorazu średnicy rdzenia i płaszczu. Światłowód oświetlony jest wiązką promieniowania polichromatycznego o FWHM = 15 nm. (b) wyniki analizy położenia maksimów F_{C1} , F_{C3A} i F_{C3B} z Rys. 2.6a. ($\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, $m_{\text{clad}}(\lambda_0) = 1.45702 + i1\text{E}-08$, $m_{\text{core}}(\lambda_0) = m_{\text{clad}}(\lambda_0) + 0.014$. Parametry DFT: zakres kątowy analizy 153.036–175°, okres próbkowania: 0.002°, ilość punktów DFT: 65536 (uzupełnione zerami), okno Hanna.

2.4. Światłowód o gradientowym profilu refrakcyjnym

Niniejszy paragraf poświęcono analizie rozpraszania światła w obszarze wielokrotnych tęcz pierwotnych, powstających na światłowodzie o średnicy 125 μm z rdzeniem o gradientowym profilu refrakcyjnym według wzoru:

$$m(r, \lambda) = \begin{cases} m_{\text{core}0}(\lambda)[1 - 2\Delta(r/a)^\alpha]^{1/2}; & r < a \\ m_{\text{SiO}_2}(\lambda); & r \geq a \end{cases}, \quad (2.8)$$

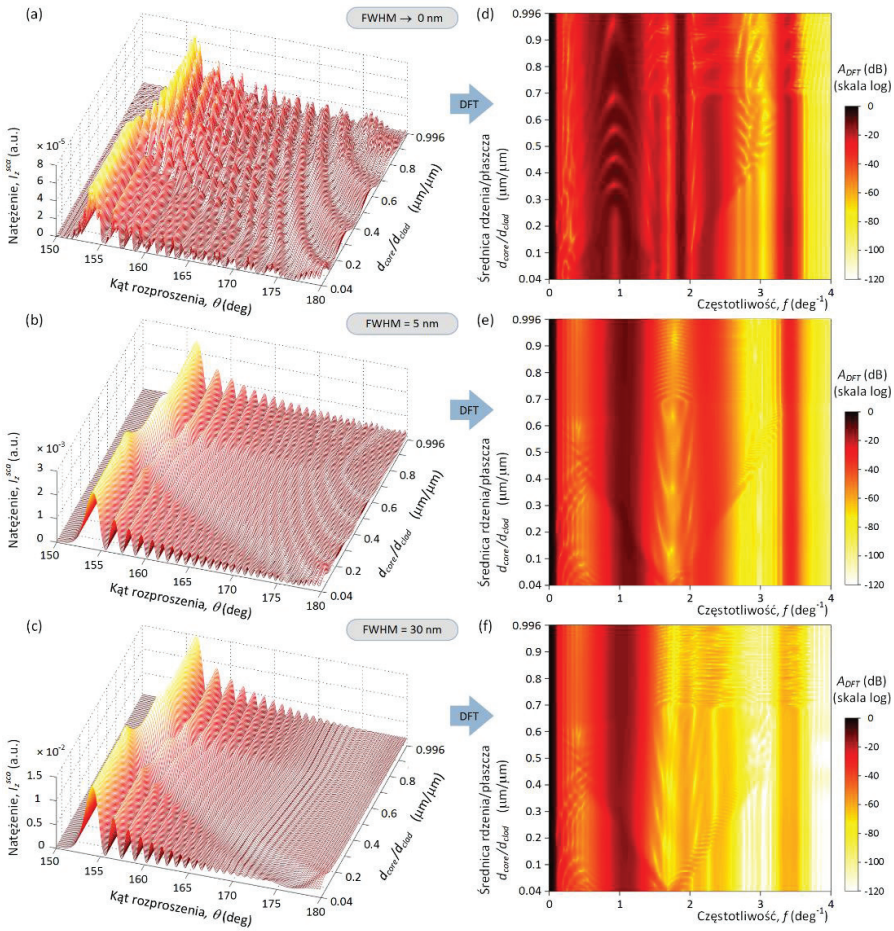
gdzie $m_{\text{core}0}(\lambda) = m_{\text{SiO}_2}(\lambda) + D$ jest współczynnikiem załamania w osi rdzenia, $D = +0.014$ jest stałą korekcyjną, wyrażającą obecność domieszki w rdzeniu,

$m_{SiO_2}(\lambda)$ wyraża wzór (2.6), $\Delta = (m_{core}^2 - m_{SiO_2}^2) / 2m_{core}^2$ jest względną różnicą współczynników załamania w osi rdzenia i płaszczu, r jest współrzędną radialną, $a = d_{core} / 2$ jest promieniem rdzenia, natomiast $\alpha = 2$ jest współczynnikiem kształtu profilu refrakcyjnego (profil paraboliczny). Na potrzeby analizy numerycznej, profil refrakcyjny rdzenia aproksymowano serią osiowosymetrycznych warstw, każda o grubości 0.1 μm .

Na Rys. 2.7a–c przedstawiono pseudotrójwymiarowe rozkłady natężenia światła rozproszonego w zakresie dużych kątów w funkcji średnicy rdzenia światłowodu (5.0, 5.5...124.5 μm), sporządzone dla trzech odmiennych FWHM padającego promieniowania: FWHM $\rightarrow 0$ (promieniowanie monochromatyczne, Rys. 2.7a), FWHM = 5 nm (Rys. 2.7b) oraz FWHM = 30 nm (Rys. 2.7c). Średnica płaszczu jest stała i wynosi 125 μm . Każdy z tych rozkładów natężenia ujawnia obecność dwóch, bliźniaczych tęczy pierwotnych β , wyróżnionych także w analogicznych rozkładach natężenia, sporządzonych dla światłowodu o skokowym profilu, Rys. 3a–c.

Rysunki 2.7d–f ukazują przekształcenia DFT rozkładów natężenia światła rozproszonego z Rys. 7a–c. Zachowano przy tym parametry analizy ustalone w badaniu rozproszenia na światłowodzie o profilu skokowym. Widoczny słaby udział form widmowych, ujawniających się w wpływie fal rdzeniowych ($c+$, $c-$) na pole dalekie, wynika z niewielkiej różnicy potencjałów refrakcyjnych na granicy pomiędzy płaszczem i rdzeniem. Pochodzenie tych form łatwo zidentyfikować, porównując wyniki symulacji z Rys. 2.7d–f do wyników analizy światła rozproszonego na światłowodzie o skokowym profilu, ujętych na Rys. 2.3e i Rys. 2.4.

Ocena wyników analizy DFT pod kątem pośredniego pomiaru średnicy rdzenia światłowodu gradientowego wydaje się ograniczona, ponieważ Rys. 2.7d–f zawierają informację, którą trudno jest ocenić zarówno w sposób jakościowy jak i ilościowy. Te subtelne oddziaływania fal powierzchniowych na pole dalekie zostaną znacznie bardziej czytelnie rozpoznane w rozdziale 3, który prezentuje analizę odpowiedzi impulsowej badanego włókna, pozwalającą na czasową separację interferujących ze sobą komponentów rozproszonych.



Rys. 2.7. Wyniki symulacji analitycznej do tych z Rys. 2.3, ale wykonane dla światłowodu o gradientowym profilu refrakcyjnym ($\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, $m_{clad}(\lambda_0) = 1.45702 + i1E-08$, $m_{core0}(\lambda_0) = m_{clad}(\lambda_0) + 0.014$, $\alpha = 2$). Parametry DFT jak dla Rys. 2.3).

3. Tęcze wielokrotne powstające w wyniku rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej.

Część II: Analiza w dziedzinie czasu

— *A kto ciebie, śliczna tęczo,
Siedmiobarwny pasie,
Wymalował na tej chmurce
Jakby na atlasie?*

(M. Konopnicka, *Tęcza*)

Analiza w dziedzinie czasu polega na obserwacji odpowiedzi badanego włókna na ultrakrótki impuls promieniowania monochromatycznego. Technika ta, dobrze znana z teorii sygnałów i systemów, jest szczególnie przydatna w analizie mechanizmów rozpraszania, bowiem pozwala na czasową separację różnorodnych komponentów rozproszonych na detektorze w odróżnieniu od analizy DFT, ukazującej wynik wektorowej sumy (interferencji) tych komponentów.

3.1. Model rozproszenia

Ogólna metodyka analizy odpowiedzi impulsowej centrum rozpraszającego falę elektromagnetyczną jest przedmiotem prac⁹⁴⁻⁹⁶. Rozważmy impuls fali elektromagnetycznej o płaskim froncie, propagujący się w kierunku $-x$ i padający normalnie na włókno jak na Rys. 2.1a (Rozdz. 2.1). Wektor elektryczny tej fali oscyluje równoległe względem osi z tego włókna:

$$\mathbf{E}^{inc}(x, t) = \hat{E}^{inc}(x, t) \exp[i\omega_0(t - x/c)] \mathbf{e}_z, \quad (3.1)$$

przy czym $\omega_0 = 2\pi c / \lambda_0$ jest częstotliwością kątową, gdzie c jest prędkością światła w próżni zaś λ_0 jest długością fali odpowiadającą maksimum widmowemu, $\hat{E}^{inc}(x, t)$ jest rzeczywistą funkcją opisującą obwiednię impulsu fali elektromagnetycznej, oraz $i = (-1)^{1/2}$. Parametr $\tau = t - x/c$ jest czasem w lokalnym układzie współrzędnych ($\xi = x, \tau$) poruszającego się impulsu (względem maksimum jego obwiedni). Niech $E^{inc}(\omega)$ oznacza widmo częstotliwościowe padającego impulsu światła:

$$E^{inc}(\omega) = F \left\{ \hat{E}^{inc}(x, t) \exp[i \omega_0(t - x/c)] \right\}, \quad (3.2)$$

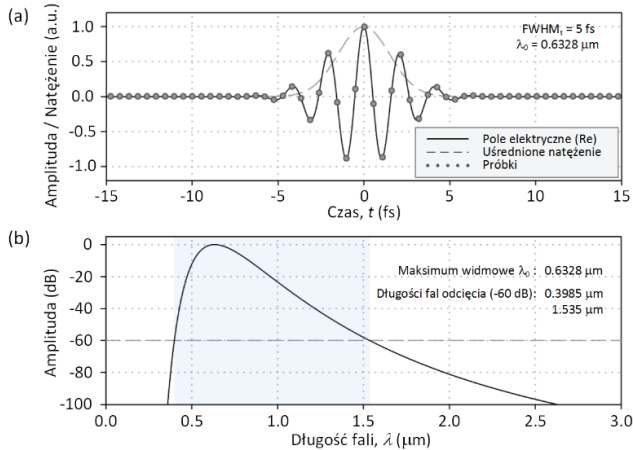
gdzie F oznacza transformację Fouriera. Maksimum funkcji $E^{inc}(\omega)$ przypada na dodatnią częstotliwość ω_0 . Zakładając, że interakcja światła i włókna jest liniowa, to odpowiedź czasowa $\mathbf{E}^{sca}(\mathbf{r}, t)$ w polu dalekim w punkcie \mathbf{r} może być wyrażona jako odwrotna transformata Fouriera iloczynu funkcji $E^{inc}(\omega)$ oraz odpowiedzi impulsowej włókna $\mathbf{E}^\delta(\omega, \mathbf{r})$:

$$\mathbf{E}^{sca}(\mathbf{r}, t) = F^{-1} \{ E^{inc}(\omega) \mathbf{E}^\delta(\mathbf{r}, \omega) \} \quad (3.3)$$

Na potrzeby niniejszego opracowania przyjmuje się, że amplituda wektora elektrycznego wynosi 1, a obwiednia impulsu opisana jest rozkładem normalnym:

$$\hat{E}^{inc}(x, t) = E_0 \exp[-(t - x/c)^2 / 2\sigma_t^2], \quad (3.4)$$

gdzie E_0 jest amplitudą pola elektrycznego, $\sigma_t = \text{FWHM}_t / [2(2 \ln 2)^{1/2}]$ jest odchyleniem standardowym, zaś FWHM_t – szerokością połówkową rozkładu normalnego. Rysunek 3.1a ilustruje oscylację rzeczywistej części wektora pola elektrycznego impulsu fali elektromagnetycznej w funkcji czasu oraz natężenie $\mathbf{E}^{inc} \cdot \mathbf{E}^{inc*}$, przyjmując $\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$ oraz $\text{FWHM}_t = 5 \text{ fs}$ w równaniach (3.1) i (3.4). Czas $t = 0$ pokrywa się z maksimum obwiedni impulsu. Punkty na Rys. 3.1a reprezentują zbiór $N_{DFT} = 8192$ próbek oddalonych od siebie w równych



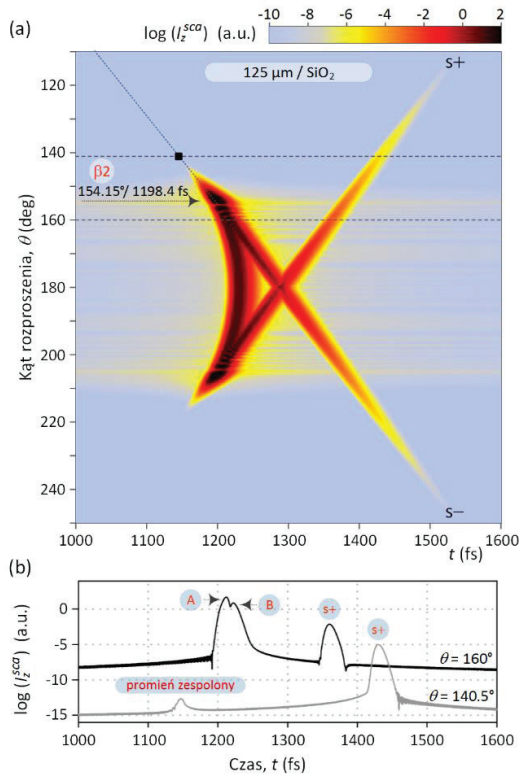
Rys. 3.1. (a) Oscylacje wektora pola elektrycznego impulsu fali elektromagnetycznej o długości $0.6328 \mu\text{m}$ i połówkowym czasie trwania FWHM_t równym 5 fs w funkcji czasu wraz z natężeniem $\mathbf{E}^{inc} \cdot \mathbf{E}^{inc*}$, (b) widmo emisyjne impulsu z Rys. 3.1a.

odstępach czasu $\Delta t = 1/f_s \approx 0.53$ fs, gdzie $f_s = 4.0c/\lambda_0$ jest częstotliwością próbkowania. Rysunek 3.1b ukazuje ciągle widmo impulsu światła z Rys. 3.1a, obliczone z wykorzystaniem równania (3.2). W świetle wniosków płynących z analizy DFT o możliwości interpretacji tęczy polichromatycznych jako superpozycji komponentów ulegających jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu (Rozdz. 2), analiza odpowiedzi impulsowej $\mathbf{E}^\delta(\mathbf{r}, \omega)$ będzie oparta na kompleksowym modelu Debye'go rozproszenia promieniowania monochromatycznego⁷⁶ dla komponentów rzędu $p = 2$. Ciągłe widmo emisyjne z Rys. 3.1b ograniczono do zakresu (0.3985, 1.535 μm), wyznaczonego przez -60 dB poziom względem maksimum widmowego (0 dB). Dyspersyjne zmiany współczynnika załamania definiują równania (2.6), (2.7) i (2.8) odpowiednio dla włókna ze szkła kwarcowego i światłowodu o skokowym i gradientowym profilu refrakcyjnym.

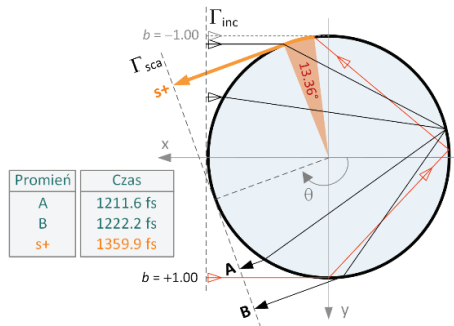
3.2. Homogeniczne włókno szklane

W analizie odpowiedzi impulsowej homogenicznego włókna kwarcowego (SiO_2) o średnicy 125 μm zostaną wykorzystane tzw. diagramy Lavena⁸², ukazujące odpowiedź impulsową badanej cząstki w wybranym zakresie kątów rozproszenia. Rysunek 3.2a prezentuje diagram Lavena dla promieniowania ulegającego jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu ($p = 2$) w zakresie kątowym $110^\circ \leq \theta \leq 225^\circ$ w krokach co 0.05° . Natężenie rozproszone wyrażono w skali logarytmicznej, a interwał czasowy pomiędzy kolejnymi punktami wykresu wynosi $\Delta t = 1/f_s \approx 0.53$ fs. Czas „0” odnosi się do chwili, gdy impuls światła dociera do płaszczyzny Γ_{inc} , która jest normalna do powierzchni włókna, a rejestracja natężenia rozproszonego odbywa się w płaszczyźnie Γ_{sca} jak ukazano na Rys. 3.3.

Wśród osobliwych form widocznych na Rys. 3.2a należy wyróżnić maksimum natężenia pojawiające się dla $\theta \approx 154.15^\circ$ i $t \approx 1198.4$ fs, odpowiadające maksimum natężenia tęczy β_2 , o kącie Kartezjusza przypadającym na 153.036° . Dwa pojawiające się w bliskim sąsiedztwie impulsy światła odpowiadają geometrycznym promieniom światła A i B , które ulegają wewnętrznemu odbiciu na granicy pomiędzy włóknem i otoczeniem jak na Rys. 3.3. Interferencja obu tych promieni w polu dalekim objawia się w postaci tęczy Airy'ego, por. Rys. 2.1b (Rozdz. 2). Wraz ze wzrostem kąta rozproszenia począwszy od kąta Kartezjusza (153.036°), te dwa impulsy światła stają się coraz bardziej odseparowane w czasie, co jest wynikiem powiększającej się różnicy ich dróg optycznych pomiędzy dwiema płaszczyznami referencyjnymi Γ_{inc} i Γ_{sca} . W chwili $t \approx 1230.1$ fs jeden



Rys. 3.2. (a) Diagram Lavena – odpowiedź homogenicznego, szklanego (SiO₂) włókna na impuls światła o połówkowym czasie trwania 5 fs w funkcji kąta rozproszenia θ . (b) odpowiedź impulsowa w $\theta = 140.5^\circ$, 160° ($\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, $m(\lambda_0) = 1.45702 + i1\text{E-}08$).



Rys. 3.3. Propagacja geometrycznych promieni światła ulegających jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu ($p = 2$) i opuszczających homogeniczne włókno pod kątem $\theta = 160^\circ$, w odpowiedzi na 5-fs impuls światła. Czas propagacji mierzony jest pomiędzy dwiema płaszczyznami referencyjnymi – Γ_{inc} i Γ_{sca} . Parametry eksperymentu jak dla Rys. 3.2.

z promieni ulega rozproszeniu wstecz ($\theta = 180^\circ$) po dotarciu do granicy pomiędzy włóknem i otoczeniem. Drugi impuls światła pojawiający się przy $\theta = 180^\circ$ i $t \approx 1287.6$ fs wynika z geometrycznego promienia światła, który pada na włókno niemal stycznie do jego krawędzi ($b = +0.998$). Impuls ten kontynuuje propagację osiągając $\theta_c \approx 173.36^\circ$ i $t \approx 1263.9$ fs. Kąt θ_c jest tzw. kątem krytycznym, dla którego padający stycznie promień światła ($b = +1$) ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu na granicy włókno-otoczenie, jak ukazano na Rys. 3.3. Impuls światła odpowiadający tej ścieżce na Rys. 3.2a kontynuuje jednak swoją propagację poza granicę wynikającą ze stycznego padania światła w wyniku powstania fali powierzchniowej s^+ ^{68,71,82,91}. Warto zauważyć, że Rys. 3.2a jest symetryczny względem $\theta = 180^\circ$, dzięki czemu tęczy, która ujawnia się w kącie $\theta \approx 154.15^\circ$ towarzyszy druga, identyczna tęcza pierwotna widoczna w $\theta \approx 360^\circ - 154.15^\circ = 205.85^\circ$ i $t \approx 1198.4$ fs. Rysunek 3.2a ukazuje również obecność fali powierzchniowej s^- , propagującej się zgodnie z ruchem wskazówek zegara, która powstaje w wyniku stycznego padania światła, ale ze współczynnikiem oddziaływania $b = -1$. Geometryczny promień światła, który zostaje załamany do wnętrza włókna w takich warunkach, ulega wewnętrznemu odbiciu w kącie krytycznym $\theta_c \approx 360^\circ - 173.36^\circ = 186.64^\circ$ w chwili $t \approx 1263.9$ fs zanim rozpocznie propagację w postaci fali powierzchniowej s^- . Fala ta stopniowo traci energię w drodze propagacji, dlatego jej wpływ w kącie $\theta = 160^\circ$ jest niewidoczny.

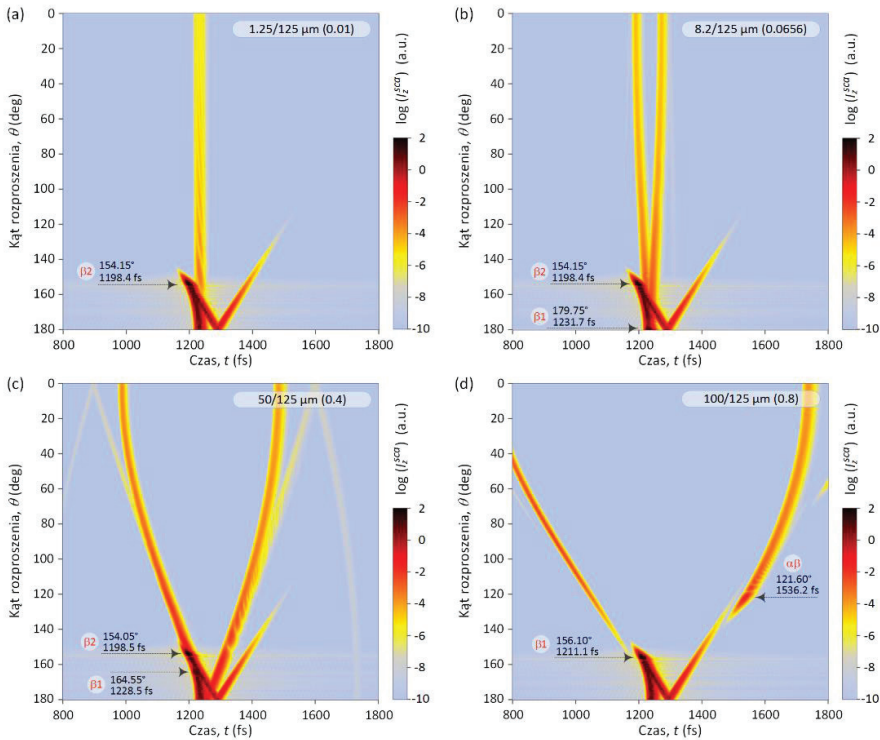
Ograniczona dynamika barw Rys. 3.2a nie pozwala na wykrycie subtelnych komponentów rozproszonych. Interesujące fakty ujawnia Rys. 3.2b, pokazujący odpowiedź impulsową badanego włókna w dwóch wyróżnionych kątach rozproszenia: $\theta = 140.5^\circ$ oraz 160° . Dwa sąsiadujące ze sobą maksima natężenia światła występujące w kącie $\theta = 160^\circ$ reprezentują geometryczne promienie światła A i B z Rys. 3.3. Fala powierzchniowa s^+ manifestuje swój udział w postaci dwóch, relatywnie silnych impulsów światła występujących w czasie $t \approx 1359.7$ fs ($\theta = 160^\circ$) oraz $t \approx 1430.6$ fs ($\theta = 140.5^\circ$). Natężenie rejestrowane w kącie obserwacji $\theta = 140.5^\circ$ ujawnia ponadto impuls światła o niewielkim natężeniu w chwili $t \approx 1146.7$ fs. Jest to oznaka tzw. zespolonego promienia światła⁶⁸ (*complex ray*), wynikającego z subtelnych oddziaływań falowych mających miejsce poniżej kąta Kartzjusza tęczy pierwotnej β_2 .

3.3. Światłowód o skokowym i gradientowym profilu refrakcyjnym

Cztery diagramy Lavena przedstawione na Rys. 3.4a-d umożliwiają analizę natury promieniowania ulegającego jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu ($p = 2$)

w zakresie kątowym $0\text{--}180^\circ$. Każdy z tych wykresów został wykonany dla odmienniej średnicy rdzenia światłowodu o skokowym profilu refrakcyjnym: (a) $1.25\ \mu\text{m}$, (b) $8.2\ \mu\text{m}$, (c) $50\ \mu\text{m}$, (d) $100\ \mu\text{m}$. Natężenie rozproszone wyrażono w skali logarytmicznej.

Rysunek 3.4a pokazuje, że obecność nawet niewielkiego rdzenia o średnicy niewiele większej od maksimum widmowego padającego promieniowania ($0.6328\ \mu\text{m}$) powoduje powstanie dwóch następujących po sobie impulsów światła, zaznaczających swoją obecność w całym zakresie kątów rozpraszania. Oba impulsy zbiegają się w kącie rozpraszania wstecz (180°) w chwili $t \approx 1230\ \text{fs}$, sąsiadując z impulsem światła pochodzącym od promienia B i współtworzącego tęczę pierwotną β_2 . Genezę tych impulsów wyjaśnia geometria rozproszenia z Rys. 2.5 (Rozdz. 2). Światło, które pada na włókno z niewielkim współczynnikiem



Rys. 3.4. Diagramy Lavena dla światłowodu o skokowym profilu refrakcyjnym i rdzeniem o średnicy: (a) $1.25\ \mu\text{m}$, (b) $8.2\ \mu\text{m}$, (c) $50\ \mu\text{m}$, (d) $100\ \mu\text{m}$, w odpowiedzi na impuls światła o $\text{FWHM}_t = 5\ \text{fs}$. Średnica płaszczka światłowodu wynosi $125\ \mu\text{m}$. Strzałkami zaznaczono maksymalne wartości natężeń tęczy pierwotnych ($\lambda_0 = 0.6328\ \mu\text{m}$, $m_{\text{clad}}(\lambda_0) = 1.45702 + i1\text{E-}08$, $m_{\text{core}}(\lambda_0) = m_{\text{clad}}(\lambda_0) + 0.014$).

oddziaływania (b), propaguje się zarówno przez płaszcz jak i rdzeń światłowodu, ulegając wewnętrznemu odbiciu od granicy płaszcz-otoczenie. Ten geometryczny udział ulega płynnemu przekształceniu w fale powierzchniowe $c-/c+$ wówczas, gdy promieniowanie załamane w płaszczu propaguje się stycznie do rdzenia. W światłowodzie, w którym rdzeń ma średnicę równą $1.25\ \mu\text{m}$ taka sytuacja zachodzi gdy współczynnik oddziaływania wynosi zaledwie ± 0.0146 , skutkując powstaniem fal powierzchniowych propagujących się w przeciwnych kierunkach po obwodzie rdzenia począwszy od kątów krytycznych wynoszących 149.3° ($c+$) i 210.7° ($c-$).

Rysunki 3.4b i 3.4c ilustrują zmiany zachodzące w odpowiedzi impulsowej światłowodu wraz ze wzrostem średnicy rdzenia. Struktura w kształcie litery V ulega rozszerzeniu w kącie rozproszenia, co wynika z powiększenia drogi optycznej komponentów generujących fale powierzchniowe $c-/c+$. Wierzchołek tej struktury, przypadający na w kącie rozproszenia wstecz (180°), przesuwa się w kierunku większych czasów propagacji wraz z powiększaniem rdzenia (w porównaniu z Rys. 3.4a przesunięcie to wynosi około 30 fs). Obecność rdzeniowych fal powierzchniowych uwidacznia się również pod postacią słabych impulsów światła powyżej $t \approx 1400$ fs na Rys. 3.4c.

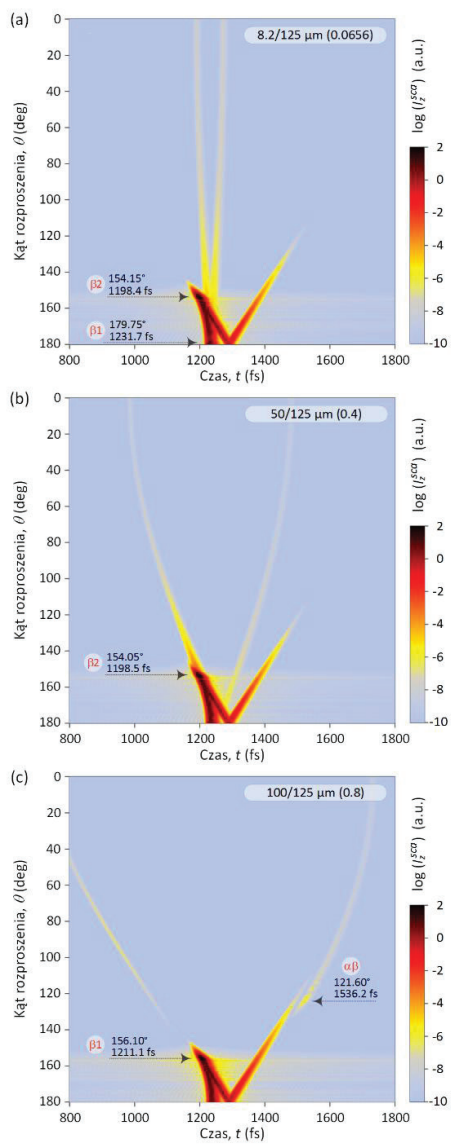
Diagram Lavena z Rys. 3.4b ujawnia także obecność drugiej bliźniaczej tęczy pierwotnej β_1 . Zbiór geometrycznych promieni światła, które formują kaustykę tej tęczy, posiada swój kąt Kartezjusza w $\theta = 179.18^\circ$. Maksimum natężenia tęczy β_1 (czyli natężenia jej prążka głównego) pojawiające się w $\theta \approx 179.75^\circ$ oraz $t \approx 1321.7$ fs, przypada na zakres kątowy pola rozproszonego, w którym dominuje zjawisko optycznej glorii^{70,80}. Tęcza β_1 staje się znacznie bardziej wydatna, gdy średnica rdzenia powiększa się do $50\ \mu\text{m}$, jak na Rys. 3.4c. Maksimum natężenia tęczy β_1 w tym przypadku pojawia się w $\theta \approx 164.55^\circ$ and $t \approx 1228.5$ fs, natomiast kąt Kartezjusza przesuwa się do 163.25° . Dwa impulsy światła, które współtworzą tęczę β_1 są jednak słabo wyróżnialne w obecności pozostałych komponentów rozproszonych.

Uważana analiza Rys. 3.4c ujawnia także impuls światła, rozpoczynający swoją propagację w kącie $\theta = 180^\circ$, tworzący odwróconą strukturę w kształcie litery V o wierzchołku w punkcie $t \approx 897$ fs i dołączający do fal powierzchniowych $c-/c+$ począwszy od $t \approx 1000$ fs. Źródłem tego impulsu jest promieniowanie, które penetruje płaszcz i ulega wewnętrznemu odbiciu od rdzenia światłowodu. Udział promieniowania odbitego od rdzenia jest trudniej zaobserwować wówczas, gdy średnica rdzenia jest znacznie mniejsza, jak dla przypadku zilustrowanego na

Rys. 3.4b, bowiem optyczne drogi propagacji promieniowania odbitego od rdzenia i tworzącego fale powierzchniowe $c-/c+$ są zbliżone. Maksymalna amplituda impulsu światła odbitego od rdzenia jest około 220 dB mniejsza od amplitudy maksimum tęczy β_2 , co tłumaczy niezauważalny wpływ tego promieniowania na DFT natężenia rozproszonego w obszarze tęczy pierwotnej (Rozdz. 2.3).

Diagram Lavena z Rys. 3.4d prezentuje odpowiedź impulsową światłowodu, w którym płaszcz jest cienką otuliną pokrywającą rdzeń o średnicy $d_{core} = 0.8 \cdot d_{clad}$. Tęcza pierwotna β_2 , która powstaje w drodze ugięcia promieniowania w płaszczu, została wykluczona z pola rozproszonego, ponieważ wszystkie geometryczne promienie światła, które propagują się w płaszczu muszą również pokonać rdzeń. Zmiana średnicy rdzenia w odniesieniu do Rys. 3.4c spowodowała także przesunięcie maksimum natężenia tęczy β_1 do punktu $\theta \approx 156.10^\circ$, $t \approx 1211.1$ fs oraz przemieszczenie kąta Kartezjusza do 155.01° . Diagram z Rys. 3.4d nie ujawnia przy tym obecności tęczy α , powstającej w wyniku wewnętrznego odbicia promieniowania od granicy pomiędzy rdzeniem i płaszczem. Wprawdzie mechanizm powstawania takiej tęczy o kącie Kartezjusza wynoszącym 133.42° opisano w Rozdz. 2.3, to energia promieniowania odbitego od powierzchni stycznej pomiędzy tymi dwoma ośrodkami, cechującymi się niewielką różnicą potencjałów refrakcyjnych, jest mała w odniesieniu do innych komponentów rozproszonych. Diagram Lavena z Rys. 3.4d uwidacznia inną formę rozproszoną, która ma postać osobliwej tęczy oznaczonej jako $\alpha\beta$ o maksimum natężenia występującym w punkcie $\theta \approx 121.60^\circ$, $t \approx 1536.2$ fs. Maksimum to (a więc i również kąt Kartezjusza tej tęczy) przemieszcza się w stronę większych wartości czasu propagacji i mniejszych kątów rozproszenia pod wpływem dalszego powiększania rdzenia. Analiza Locka i Lavena⁹⁰, dokonana przy użyciu zmodyfikowanych szeregów Debye'go, udowodniła że tęcza tego rodzaju powstaje w wyniku *zdegenerowanego* udziału promieniowania rzędu $p = 3$ (ulegającego dwóm wewnętrznym odbiciom na powierzchniach granicznych pomiędzy rdzeniem i płaszczem oraz płaszczem i otoczeniem) w rozpraszaniu promieniowania rzędu $p = 2$ (podlegającego jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu). Tęcza $\alpha\beta$ zanika gdy $d_{core} \rightarrow d_{clad}$.

Ostatni fragment niniejszego rozdziału poświęcono analizie odpowiedzi impulsowej światłowodu z rdzeniem o gradientowym profilu refrakcyjnym. Model profilu refrakcyjnego przyjętego w analizie numerycznej odpowiada typowym światłowodom telekomunikacyjnym; współczynnik załamania w osi rdzenia jest większy o +0.014 od współczynnika załamania krzemionkowego płaszczu i maleje w kierunku osiowym według zależności (2.8) przedstawionej w Rozdz. 2.4. Na Rys. 3.5a–c przedstawiono diagramy Lavena dla światłowodu gradientowego,



Rys. 3.5. Diagramy Lavena podobne do tych z Rys. 3.4, ale wykonane dla światłowodu o gradientowym profilu refrakcyjnym ($\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, $m_{clad}(\lambda_0) = 1.45702 + i1E-08$, $m_{core0}(\lambda_0) = m_{clad}(\lambda_0) + 0.014$, $\alpha = 2$).

analogiczne do diagramów z Rys. 3.4b–d, ilustrujących odpowiedź impulsową światłowodu o skokowym profilu refrakcyjnym. Profile refrakcyjne rdzeni o średnicach (a) 8,2, (b) 50 oraz (c) 100 μm aproksymowano serią koncentrycznych warstw, każda o średnicy równej 0,1 μm . Analiza porównawcza diagramów z Rys. 3.4b–d oraz Rys. 3.5a–c pozwala na wyróżnienie podobnych efektów rozproszenia światła w obu typach światłowodów i mechanizmów fizycznych, które je wywołują, aczkolwiek ich natężenie jest w obu przypadkach odmienne. Wśród znaczących różnic należy wymienić niewykrywalny udział tęczy β_1 na Rys. 3.5b w wyniku słabego potencjału refrakcyjnego rdzenia. Monotoniczne zmiany współczynnika załamania rdzenia w kierunku osiowym przyczyniają się również do degradacji natężenia innych komponentów rozproszonych o naturze zależnej od parametrów fizycznych rdzenia, w tym tęczy $\alpha\beta$ oraz fal powierzchniowych $c-/c+$.

4. Analiza tęczy w nieinwazyjnym pomiarze średnicy i współczynnika załamania transparentnego włókna

*Niedowiarkom ręczę,
Że jednak można oprzeć się o tęczę.*

(J. Sztudynger)

W niniejszym rozdziale przedstawiono metodę nieinwazyjnej i równoczesnej charakterystyki średnicy i współczynnika załamania osiowosymetrycznego, jednorodnego i transparentnego włókna wykorzystującą rozproszenie światła cechującego się niskim stopniem spójności czasowej, analizowanego w zakresie tęczy pierwotnej. Obserwacje tęczy pozwolą na sformułowanie relacji łączących badaną cechę włókna i pole rozproszone, a następnie opracowanie aproksymacyjnego modelu przyczynowego i jego odwrotnej formy umożliwiającej realizację pomiaru pośredniego. Kolejne wątki będą poświęcone zbadaniu wpływu deformacji włókna od osiowej symetrii na dane pomiarowe i wyniki pomiarów.

4.1. Analiza przyczynowa

Ogólna analiza rozpraszania promieniowania cechującego się niskim stopniem spójności czasowej pod dużym kątem rozproszenia i przy wykorzystaniu kompleksowego, makroskopowego modelu rozpraszania według Lorenza-Mie (LMT) została zawarta w pracy²⁷. W niniejszej analizie rozważa się rozpraszanie skolimowanej wiązki światła o płaskim froncie falowym i linii emisyjnej aproksymowanej przez funkcję Gaussa o maksimum λ_0 w 632.8 nm i szerokości połówkowej FWHM. Wiązka światła pada na badane włókno normalnie. Osiowosymetryczne włókno o średnicy d charakteryzuje zespolony współczynnik załamania $n(\lambda) + i1E - 8$, który ulega zmianom wraz z długością fali padającego promieniowania według formuły Sellmeiera⁷⁷. Wektor elektryczny padającej fali płaskiej oscyluje wzdłuż osi symetrii włókna (polaryzacja magnetyczna TM). Według teorii LMT, stan polaryzacyjny rozproszonego pola elektrycznego jest zachowany (włókno nie zmienia polaryzacji fali padającej w warunkach padania normalnego) i opisany wzorem⁶⁶:

$$E_z^{sca}(kr) = -E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n b_n H_n^{(1)}(kr) e^{in\theta}, \quad (4.1)$$

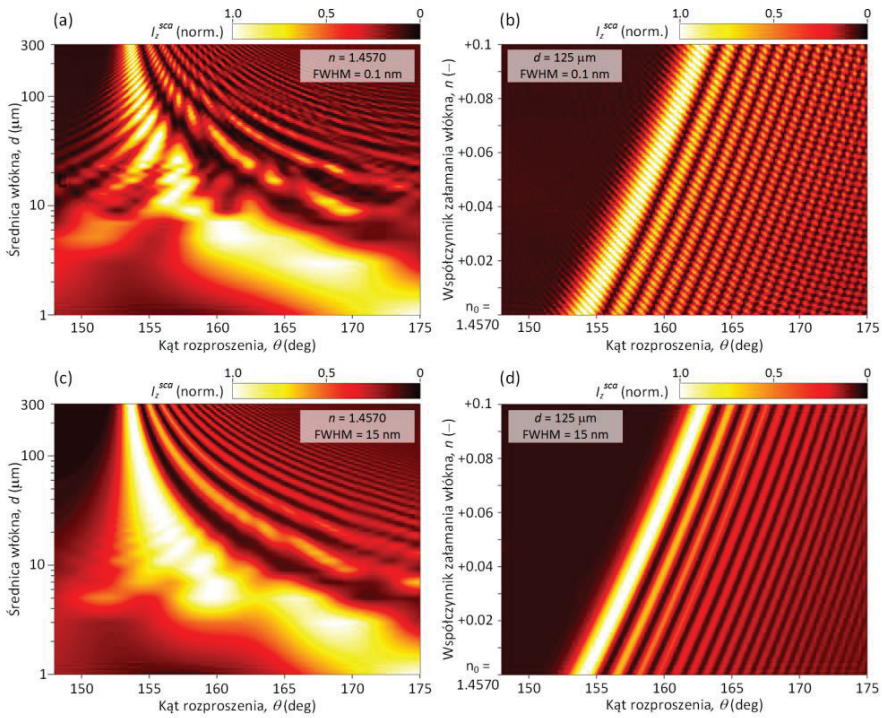
gdzie E_0 jest amplitudą padającego pola elektrycznego, b_n jest współczynnikiem rozwinięcia pola rozproszonego⁶⁶, $H_n^{(1)}$ jest funkcją Hankela pierwszego rodzaju, $k = 2\pi/\lambda$ jest liczbą falową, θ jest kątem rozproszenia, zaś r jest zmienną radialną. Przyjmuje się, że fala padająca jest kompozycją fal monochromatycznych o wzajemnie losowych zależnościach fazowych. Przy warunku liniowości rozproszenia na włóknie, natężenie pola rozproszonego w dalekim zakresie ($kr \gg 1$) jest niekoherentną superpozycją monochromatycznych fal rozproszonych:

$$I_z^{sca}(\theta, r) = \sum_{i=1}^N E_z^{sca}(k_i r) \cdot E_z^{sca*}(k_i r), \quad (4.2)$$

gdzie $k_i = 2\pi/\lambda_i$, N jest liczbą fal z widma emisyjnego promieniowania padającego uwzględnionych w obliczeniach pola rozproszonego, a symbol (*) oznacza sprzężenie zespolone. Na potrzeby dalszej analizy numerycznej, z widma promieniowania padającego wyodrębniono $N = 1345$ dyskretnych składowych rozmieszczonych symetrycznie co 0.1 nm względem λ_0 .

Rysunki 4.1a i 4.1c ilustrują wpływ średnicy włókna na natężenie pola rozproszonego w obszarze tęczy pierwszego rzędu dla FWHM odpowiednio 0.1 i 15 nm. Dla pierwszego przypadku widoczne są wyraźne formy nieliniowe, które uniemożliwiają odczytanie pozycji kątowych maksimów i minimów tęczy Airy'ego. Efekt ten ulega redukcji, gdy włókno jest oświetlone promieniowaniem o poszerzonym widmie, o FWHM typowym dla diod elektroluminescencyjnych. Dla małych średnic widoczny jest udział oscylacji rezydualnych. Podobne obserwacje dotyczą wykresów ilustrujących wpływ współczynnika załamania włókna na natężenie rozproszone w polu dalekim, Rys. 4.1b i 4.1d. Oba rysunki potwierdzają obserwacje Wanga i Hulsta, według których zmiany współczynnika załamania wpływają w głównej mierze na bezwzględne pozycje kątowe jasnych i ciemnych prążków, a w małym stopniu na ich wzajemne odległości⁹⁷. Ta druga dana pomiarowa może być wykorzystana do inwersyjnego pomiaru średnicy, co ilustrują Rys. 4.1a i 4.1c.

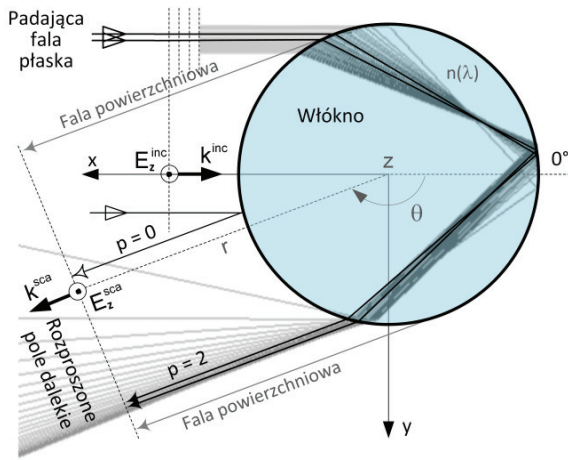
Jak wykazano w pracy²⁷, model przyczynowy według Airy'ego opisujący *monochromatyczne* promieniowanie rozproszone w obszarze tęczy pierwotnej jest adekwatny w opisie rozproszenia promieniowania o poszerzonym widmie przez szklane, homogeniczne włókno.



Rys. 4.1. Natężenie pola rozproszonego na homogenicznym włóknie szklanym (SiO_2) w sąsiedztwie tęczy pierwotnej, oświetlonym wiązką promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej: (a), (b) w funkcji średnicy włókna dla FWHM odpowiednio 0.1 i 15 nm, (c), (d) w funkcji współczynnika załamania włókna dla FWHM odpowiednio 0.1 i 15 nm. ($\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, $m(\lambda_0) = 1.45702 + i1\text{e-}8$).

4.2. Analiza inwersyjna

Rozważmy uformowaną wiązkę promieni światła jak na Rys. 4.2. Każdy promień reprezentuje falę o długości λ padającą na homogeniczne, przezroczyste dla częstotliwości optycznych włókno o średnicy d , współczynnika załamania n oraz parametrem rozmiarowym $x = \pi d / \lambda$. Padające pole elektryczne spolaryzowane jest równoległe względem osi symetrii włókna i poprzecznie względem wektora falowego $\mathbf{k}^{\text{inc}} = -k\mathbf{e}_x = -(2\pi / \lambda)\mathbf{e}_x$. Wiązka promieni ulega jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu od granicy włókno-otoczenie i formuje tęczę monochromatyczną w polu dalekim^{65,98}. Natężenie rozproszone w polu dalekim może być aproksymowane przez teorię tęczy Airy'ego^{59,65,97}, skorygowaną w niniejszym opracowaniu o współczynnik $(1 + B\Delta)$:



Rys. 4.2. Przekrój włókna w płaszczyźnie poprzecznej względem osi symetrii włókna wraz z geometrycznymi promieniami światła formującymi tęczę pierwotną.

$$I_z^{sca}(\theta) \propto \text{Ai}^2[-(x^{2/3} \Delta / h^{1/3})(1 + B\Delta)]. \quad (4.3)$$

Współczynnik $(1 + B\Delta)$ poprawia jakość aproksymacji maksimów i minimów tęczy^{17,27,99} i wynika z porównania rozwiązania na natężenie rozproszone według teorii Airy'ego oraz teorii CAM tęczy pierwotnej, sformułowanej przez Nussenzveiga^{69,70}. W powyższym równaniu $\text{Ai}^2(-z)$ oznacza całkę Airy'ego⁶⁰, θ jest kątem rozproszenia, $\Delta \equiv \theta - \theta^D$, zaś θ^D jest kątem Kartezjusza, czyli kątem geometrycznego promienia światła rozproszonego pod możliwie najmniejszym kątem w odniesieniu do kierunku padania:

$$\theta^D = \pi + 2\theta_i^D - 4\theta_i^D, \quad (4.4)$$

przy czym θ_i^D jest kątem padania pomiędzy prostą wyznaczoną przez trajektorię promienia padającego oraz prostej normalnej względem powierzchni włókna, θ_r^D jest kątem załamania promienia wewnątrz włókna. Oba kąty wyraża prawo Snelliusa załamania światła:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_i^D) &= [(n^2 - 1) / 3]^{1/2}, \\ \sin(\theta_i^D) &= n^{-1} \sin(\theta_r^D), \end{aligned} \quad (4.5)$$

Współczynnik B w równaniu (4.3) jest funkcją współczynnika załamania^{69,70},

$$\begin{aligned} B &= [(875c^6 - 1257c^4 + 657c^2 + 45) / 8640(cs)^3], \\ s &= [(4 - n^2) / 3]^{1/2}, \\ c &= [(n^2 \mathfrak{z} - 1) / 3]^{1/2}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

zaś parametr h jest bezwymiarową miarą kształtu frontu falowego w sąsiedztwie kąta Kartezjusza θ^D :

$$h = 9(4 - n^2)^{1/2} / 4(n^2 - 1)^{3/2}. \quad (4.7)$$

Celem inwersji danych pomiarowych jest przekształcenie danych pomiarowych z pola rozproszonego w zbiór parametrów $\{\hat{d}, \hat{n}\}$, które opisują rzeczywiste parametry włókna $\{d, n\}$ w możliwie dokładny sposób. Procedura inwersyjna jest dwuetapowa:

- W pierwszym kroku wyznacza się \hat{n} na podstawie dwóch bezwzględnych pozycji kątowych prążków $\{\theta_i, \theta_j\}$, realizując tym samym pomiar pośredni bez znajomości średnicy włókna.
- W drugim kroku dokonuje się obliczenia \hat{d} na podstawie \hat{n} oraz odstepu kąowego pomiędzy θ_i oraz θ_j . Pomiar średnicy na podstawie odstepu kąowego pomiędzy dwoma prążkami jest mało wrażliwy na zmiany współczynnika załamania²⁷.

Niech $\{z_i, z_j\}$ będą argumentami funkcji Airy'ego w równaniu (4.3), dla których osiąga ona ekstrema $\{\theta_i, \theta_j\}$. Jasne i ciemne prążki natężenia rozproszonego pojawiają się w punktach krytycznych funkcji Airy'ego. Dla pierwszych pięciu ekstremów $z_i = (1.018793161, 2.33810741, 3.248197582, 4.087949444, 4.820099211)$, gdzie $i = 1$ dla prążka głównego, $i = 3, 5$ dla kolejnych prążków jasnych oraz $i = 2, 4$ dla kolejnych prążków ciemnych⁶⁰. Niech $\Delta_{i,j} = \theta_{i,j} - \theta^D$ gdzie θ^D wynika z równania (4.4). Sformułowanie układu równań dla każdego z argumentów $\{z_i, z_j\}$ prowadzi do następującego wyrażenia:

$$\Delta_j \Delta_i^{-1} = z_j z_i^{-1} (1 + B \Delta_j)^{-1} (1 + B \Delta_i), \quad (4.8)$$

Powyższe równie nie posiada jawnej postaci ze względu na \hat{n} , więc do obliczenia współczynnika załamania włókna zastosowano procedurę iteracyjną. Obie strony tego równania są nieliniowymi funkcjami współczynnika załamania, zatem równanie to posiada wiele rozwiązań należących do zbioru liczb rzeczywistych dodatnich. Weryfikacja wyników wymaga więc posiadania pewnej wiedzy eksperckiej o badanym włóknie, co zostanie szczegółowo przedyskutowane w dalszej części pracy. W celu wyznaczenia średnicy włókna na podstawie odstepu pomiędzy dwoma prążkami, rozważmy różnicę argumentów funkcji Airy'ego:

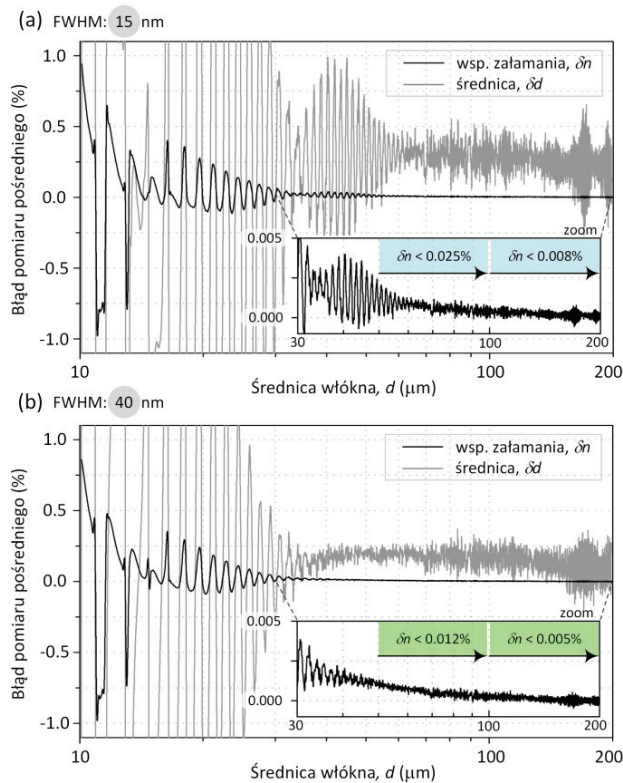
$$z_i - z_j = (x^{2/3} / h^{1/3}) [\Delta_i (1 + B \Delta_i) - \Delta_j (1 + B \Delta_j)], \quad (4.9)$$

przy czym h obliczane jest na podstawie równania (4.7), zaś \hat{n} jest wynikiem procedury iteracyjnej opisanej powyżej. Przekształcenie powyższego wzoru ze względu na d prowadzi finalnie do następującego wzoru:

$$\hat{d} = \frac{\lambda}{\pi} h^{1/2} \left[\frac{z_i - z_j}{\Delta_i(1 + B\Delta_i) - \Delta_j(1 + B\Delta_j)} \right]^{3/2}. \quad (4.10)$$

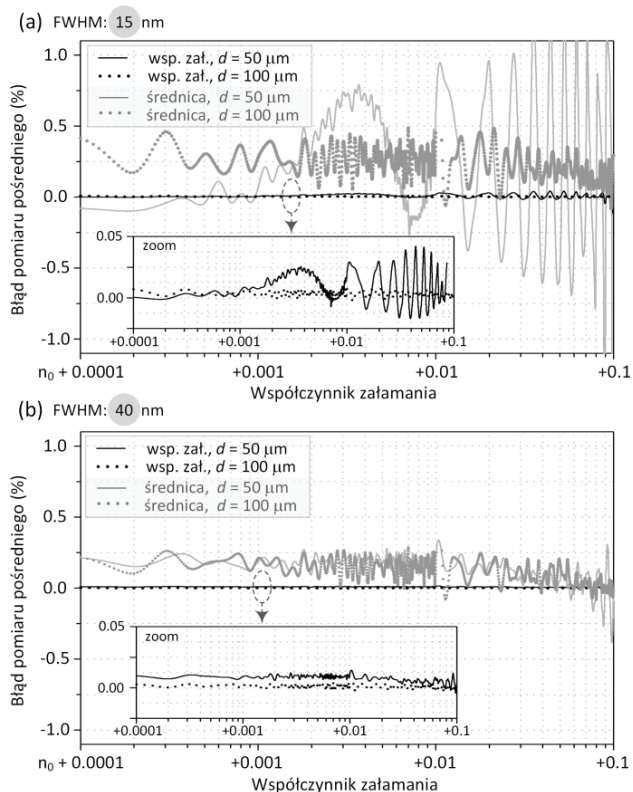
Walidacja przedstawionej powyżej procedury inwersyjnej będzie dokonywana przy wykorzystaniu informacji o położeniach kątowych dwóch pierwszych minimów natężenia rozproszonego, czyli $\{\theta_i, \theta_j\} = \{\theta_2, \theta_4\}$. Wybór ten wynika z faktu, że ciemne prążki są mniej podatne na oscylacje rezydualne niż prążki jasne²⁷. Co więcej, aproksymacja Airy’ego pogarsza się wraz z odległością od kąta Kartezjusza⁹⁷, co z kolei uzasadnia wybór danych pomiarowych leżących w jego sąsiedztwie. Referencyjne dane pomiarowe uzyskano w drodze symulacji pola rozproszonego na homogenicznym włóknie oświetlonym promieniowaniem cechującym się niskim stopniem spójności czasowej przy wykorzystaniu modelu matematycznego zjawiska przedstawionego w rozdziale 4.1.

Wyniki analizy inwersyjnej w pomiarze \hat{n} oraz \hat{d} przedstawiono na Rys. 4.3a i 4.3b w postaci błędu względnego tych wielkości w funkcji rzeczywistej średnicy d . Rysunki te sporządzono dla odmiennych FWHM padającego promieniowania, odpowiednio 15 i 40 nm. Pozycje danych pomiarowych (dwóch pierwszych ciemnych prążków) wyznaczono z dokładnością równą 0.001°. Przyjęto *a priori*, że zakres możliwych rozwiązań równania (4.8) dla współczynnika załamania zawiera się w przedziale 1.40000–1.60000, co pozwoliło na otrzymanie jednoznacznego wyniku. Zakres ten należy uznać za szeroki biorąc pod uwagę fakt, że współczynnik załamania krzemionki (SiO₂) w paśmie widzialnym (0.390–0.700 μm) zmienia się w granicach od 1.4713 do 1.4553⁷⁷. Rysunki 4.3a i 4.3b ilustrują ogólne fakty na temat rozpraszania promieniowania cechującego się niskim stopniem spójności czasowej. Wpływ form nieliniowych, ujawniających się w postaci oscylacji wykresów błędów, ulega redukcji wraz ze wzrostem FWHM. Dla niewielkich d oscylacje te są bardziej znaczące, ponieważ częstotliwość i amplituda form nieliniowych jest podobna oscylacji tęczy Airy’ego. Uważna analiza wskazuje również, że błędy pomiaru obu wielkości maleją wraz ze wzrostem średnicy włókna, co jest wynikiem poprawiającej się aproksymacji frontu falowego w sąsiedztwie tęczy pierwotnej przez model rozproszenia Airy’ego⁶⁵. Na wyniki pomiaru ma również wpływ ograniczona rozdzielczość odczytu położenia kąтового dwóch minimów tęczy (dane pomiarowe θ_2, θ_4), co wyraża się powiększającą się niepewnością pomiaru d wraz ze wzrostem rozmiaru włókna.



Rys. 4.3. Wyniki inwersji danych pomiarowych: błąd względny pomiaru pośrodkiego współczynnika załamania δn i średnicy δd włókna w funkcji rzeczywistej średnicy d . FWHM = (A) 15 nm, (B) 40 nm ($\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, $m(\lambda_0) = 1.45702 + i1e-8$).

Rysunki 4.4a i 4.4b umożliwiają ocenę wpływu współczynnika załamania włókna (n) na wyniki analizy inwersyjnej, czyli \hat{n} oraz \hat{d} . Obserwacje przeprowadzono dla dwóch włókien o odmiennych średnicach $d = 50$ i $100 \mu\text{m}$. Rysunki te różnią się zakładaną szerokością połówkową widma padającego promieniowania, odpowiednio 15 i 40 nm. Warto zauważyć, że dokładność pomiaru średnicy jest mało podatna na zmiany współczynnika załamania. Fakt ten jest szczególnie widoczny dla włókna o $d = 100 \mu\text{m}$, gdy wpływ form nieliniowych na pomiar jest najmniejszy. Dokładność pomiaru współczynnika załamania jest zaś niemal stała w szerokim zakresie jego zmian.



Rys. 4.4. Wyniki inwersji danych pomiarowych: błąd względny pomiaru pośredniego współczynnika załamania δn i średnicy δl włókna w funkcji rzeczywistego współczynnika załamania n . FWHM = (a) 15 nm, (b) 40 nm ($\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, $m(\lambda_0) = 1.45702 + i1e-8$).

4.3. Analiza rozproszenia światła na włóknie o eliptycznym przekroju

Kompleksowy opis rozproszenia promieniowania na cząstkach o kształcie odbiegającym od osiowej symetrii dostarcza teoria macierzy przejścia T-Matrix^{100,101}, dedykowana cząstkom o dowolnym kształcie, oraz uogólniona teoria Lorenza-Mie (GLMT) dla cylindrów o eliptycznym przekroju¹⁰²⁻¹⁰⁴. Obie teorie powstały na gruncie rozwiązania równań Maxwella dla odpowiednio sformułowanych warunków brzegowych zagadnienia. Wykorzystanie T-Matrix oraz GLMT jest jednak ograniczone do badań cząstek o wymiarach porównywalnych z długością fali promieniowania lub nieznacznie ją przewyższających, co jest związane ze stabil-

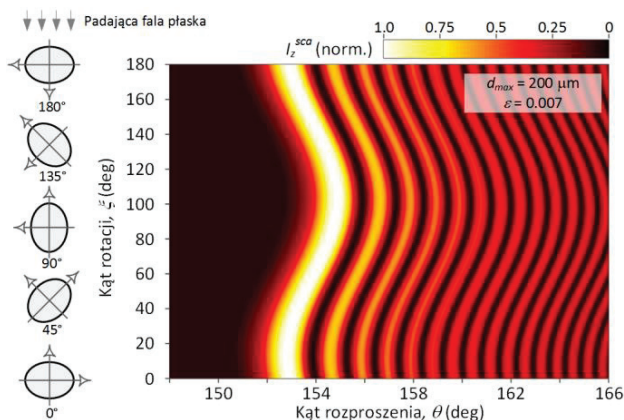
nością znanych algorytmów numerycznych implementujących te modele rozproszenia. Alternatywne metody symulacji pola rozproszonego funkcjonują na rozwiązaniach przybliżonych. W niniejszym rozdziale zostanie wykorzystany model rozproszenia na eliptycznym cylindrze zaproponowany przez Locka i in.^{13,99}, sformułowany na podstawie symulacji numerycznych frontu falowego w bliskim sąsiedztwie tęczy pierwszego i drugiego rzędu, które doprowadziły do wzoru aproksymacyjnego na parametr h (wyrażający odstęp międzyprążkowy na natężenie pola rozproszonego według teorii Airy'ego). Użyteczność modelu Locka ograniczona jest do symulacji pola rozproszonego na cylindrze o niewielkiej perturbacji symetrii osiowej ze względu na pogarszającą się jakość aproksymacji frontu falowego wraz ze wzrostem eliptyczności.

Natężenie pola rozproszonego na cylindrze o eliptycznym przekroju rozproszenia według aproksymacji Locka i in opisuje następująca zależność⁹⁹:

$$I_z^{sca}(\theta, \xi) \propto \text{Ai}^2 \{-x_{ave}^{2/3}[\theta - \theta^D(\xi)] / h(\xi)^{1/3}\}, \quad (4.11)$$

gdzie $x_{ave} = [(\pi d_{min} / \lambda) + (\pi d_{max} / \lambda)] / 2$ jest średnim współczynnikiem rozmiarowym, d_{min}, d_{max} oznaczają odpowiednio średnice krótszej i dłuższej osi elipsy przekroju, zaś ξ oznacza kąt rotacji włókna względem kierunku propagacji fali padającej, jak pokazano na Rys. 4.5. Rotacja włókna wpływa zarówno na kąt Kartezjusza θ^D jak i również na parametr h , co jest przedmiotem szczegółowej analizy w pracy⁹⁹. Kąt rozproszenia θ wyraża odchylenie od kierunku propagacji fali padającej w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara. Eliptyczność włókna wyraża parametr $\varepsilon = 1 - d_{min} / d_{max}$. Równanie (4.11) jest adekwatne w opisie rozproszenia dla $\varepsilon \ll 1$, $1.25 \leq n \leq 1.7$ oraz $x_{ave} \sim 1000$ lub większych⁹⁹. Należy zauważyć, że funkcja natężenia według równania (4.11) nie może być uzupełniona o współczynnik korekcyjny $(1 + B\Delta)$ w analogii do wzoru (4.3), ponieważ parametr B staje się również funkcją kąta orientacji, gdy cylinder ma eliptyczny przekrój osiowy. Dla oceny wpływu symetrii osiowej na pomiary pośrednie współczynnika załamania i średnicy badanego włókna należy więc wyzerować parametr B w równaniach inwersyjnych (4.8) i (4.10).

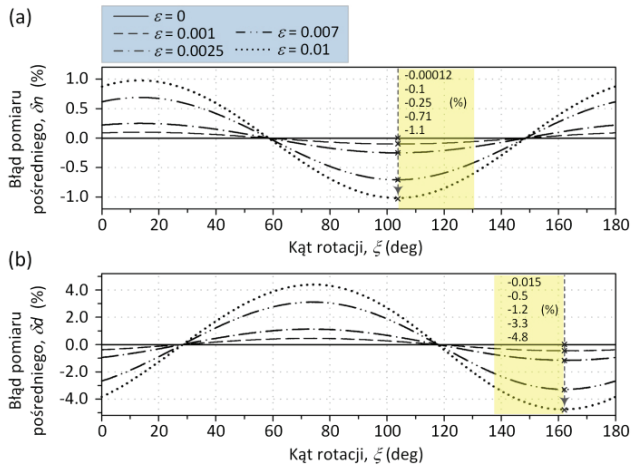
Rysunek 4.5 ukazuje wpływ kąta rotacji ξ włókna względem kierunku propagacji fali padającej na natężenie pola rozproszonego w sąsiedztwie tęczy pierwotnej. Średnica dłuższej osi przekroju d_{max} wynosi 200 μm , zaś współczynnik eliptyczności $\varepsilon = 0.007$ (0.7%), co jest typową wartością dla światłowodów jednomodowych. Tęcza ulega wyraźnemu przemieszczeniu w kącie rozproszenia pod wpływem ξ , lecz jej stabilność strukturalna nie zostaje zaburzona^{4,5}.



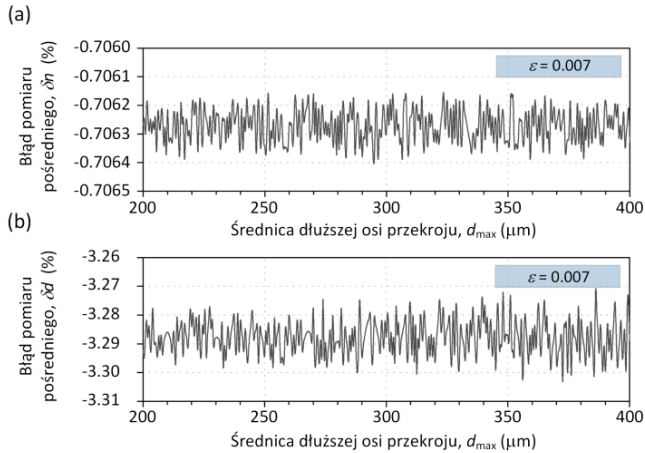
Rys. 4.5. Wpływ kąta rotacji ξ włókna o przekroju eliptycznym względem kierunku propagacji fali padającej na natężenie pola rozproszonego w sąsiedztwie tarczy pierwotnej. Średnica dłuższej osi przekroju d_{max} wynosi 200 μm , zaś współczynnik eliptyczności $\varepsilon = 0.007$. ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $n(\lambda) = 1.45702$).

Rysunki 4.6a i 4.6b umożliwiają obserwację wpływu kąta rotacji ξ na wyniki pomiarów pośrednich współczynnika załamania i średnicy włókna, wyrażonych w postaci błędów względnych tych wielkości. Błąd względny pomiaru średnicy zdefiniowano jako $\delta d = 100 \cdot (1 - \hat{d} / d_{ave})$ (%), gdzie $d_{ave} = (d_{min} + d_{max}) / 2$ jest średnią z dłużej i krótszej osi przekroju włókna, zaś błąd pomiaru pośredniego współczynnika załamania to $\delta n = 100 \cdot (1 - \hat{n} / n)$ (%). Wartości obu błędów zmieniają się periodycznie wraz z kątem rotacji. Przykładowo, największy wzrost błędu pomiaru współczynnika załamania z -0.00012% do około -0.71% przy deformacji przekroju z osiowej symetrii ($\varepsilon = 0$) na elipsę o $\varepsilon = 0.007$ występuje w kącie $\xi = 103.5^\circ$. Taka deformacja wywołuje największy przyrost błędu pomiaru średnicy z -0.015% do blisko -3.3% dla kąta $\xi = 162.5^\circ$. Warto również zauważyć, że dla specyficznych wartości ξ eliptyczność nie wpływa na błędy pomiaru współczynnika załamania i średnicy. Podobne obserwacje poczyniono na gruncie pomiarów cech fizycznych kropli wody¹⁰⁵. Położenie tych szczególnych punktów zależy od współczynnika załamania i, generalnie, jest ono odmienne dla wykresów δn i δd .

Rysunek 4.7a umożliwia obserwację wpływu dłuższej osi d_{max} w przekroju włókna na błąd pomiaru współczynnika załamania w kącie orientacji $\xi = 103.5^\circ$, dla którego obserwuje się największy wpływ deformacji włókna na ten błąd (por. Rys. 4.6a). Współczynnik eliptyczności ε wynosi 0.007. Rysunek 4.6b przedstawia podobną zależność, lecz w odniesieniu do błędu pomiaru średnicy, obliczoną dla kąta orientacji $\xi = 162.5^\circ$ (por. Rys. 4.6b). Oba wykresy ukazują słaby wpływ rozmiaru badanego włókna na błędy inwersji danych pomiarowych.



Rys. 4.6. Wyniki inwersji danych pomiarowych: błąd względny pomiaru pośredniego współczynnika załamania δn (a) i średnicy δd (b) włókna eliptycznego w funkcji kąta rotacji ξ . Średnica dłuższej osi przekroju d_{max} wynosi 200 μm . Parametrem symulacji jest współczynnik eliptyczności ε ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $m(\lambda) = 1.45702 + i1e-8$).



Rys. 4.7. Wyniki inwersji danych pomiarowych: błąd względny pomiaru pośredniego współczynnika załamania δn (a) i średnicy δd (b) włókna eliptycznego o $\varepsilon = 0.007$ w funkcji średnicy dłuższej osi przekroju d_{max} . ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $m(\lambda) = 1.45702 + i1e-8$).

5. Podsumowanie

*Somewhere over the rainbow
Blue birds fly
And the dreams that you dreamed of
Dreams really do come true (...).*

(H. Arlen, E.Y. Harburg, *Over the Rainbow* /Czarnoksiężnik z Oz/, 1939)

Immanentną cechą procesu poznawczego w metrologii jest wielowymiarowość obejmująca analizę i syntezę zagadnień z wielu dyscyplin teoretycznych, a także nauk inżynierskich. Właściwą cechą działań na gruncie tych pierwszych jest metodologia badawcza, która posługuje się fizycznymi i matematycznymi modelami rzeczywistości w celu weryfikacji hipotez. Poprawna metodologia nadaje wartość poznawczą, a działania inżynierskie nadają status poczynaniom teoretycznym. Trudno chyba o bardziej doskonały sposób badania otaczającej nas rzeczywistości niż ten racjonalny i uporządkowany; rzeczywistości która posiada przecież zorganizowaną strukturę, a celem nauki jest odkrywanie jej oblicza, nie zaś nadawanie sensu.

Motywacją procesu poznawczego nie jest wyłącznie jego utylitaryzm. Metrologia tęczy jest doskonałym przykładem dziedziny naukowej, która zrodziła się z ciekawości poznawania rzeczywistości, ciekawości którą „może wykorzenić zbyt specjalistyczne wykształcenie”^{*}. Fenomen tęczy, badany przez stulecia przez najznamienitszych badaczy, nie poddaje się łatwo matematyczno-empirycznej metodzie. Każda próba jego zrozumienia rodzi nowe pytania i refleksje. Jest to największa wartość tęczy, nie zaś jej nielogiczność czy niespójność. Fizyka nie jest przecież domkniętym zbiorem praw i twierdzeń i tylko wewnętrzny niepokój badacza będzie przyczyniał się do jej rozwoju. Realizm poznawczy w tym zakresie wyraża się zarówno w ograniczeniach fizyczno-matematycznych modeli rzeczywistości którymi dysponujemy, jak i również możliwościami eksperymentalnej weryfikacji wyników działania tych modeli (czy nawet najdoskonalszy model matematyczny może znaleźć dostatecznie dobre potwierdzenie?).

Żywię nadzieję, że zaprezentowane w niniejszej pracy poczynania i koncepcje ukazały w przynajmniej minimalistycznym stopniu urok procesu poznawczego w metrologii tęczy, a nieustanne przenikanie się teorii i doświadczenia nadadzą tym rozważaniom pragmatyczne znaczenie.

^{*} Cyt. M. Heller „Filozofia nauki. Wprowadzenie” Petrus, Kraków 2009.

Literatura

- [1] **Mrocza, J.**, [Metrologiczne Problemy Wykorzystywania Światła Rozproszonego do Badań Rozkładu Wielkości Cząstek w Roztworach Dyspersyjnych], Warszawa (1990).
- [2] **Mrocza, J.**, [Metrologia - nowe wyzwania] Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (1997).
- [3] **Mrocza, J.**, "The cognitive process in metrology," *Measurement*, 46(8), 2896-2907 (2013).
- [4] Berry, M. V., "Exuberant Interference: Rainbows, Tides, Edges, (De)Coherence..." *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1794), 1023-1037 (2002).
- [5] Berry, M. V., and Upstill, C., [Catastrophe optics: morphologies of caustics and their diffraction patterns] Elsevier, Amsterdam (1980).
- [6] Presby, H. M., and Marcuse, D., "Refractive Index and Diameter Determinations of Step Index Optical Fibers and Preforms," *Applied Optics*, 13(12), 2882-2885 (1974).
- [7] Roth, N., Anders, K., and Frohn, A., "Refractive-index measurements for the correction of particle sizing methods," *Applied Optics*, 30, 4960-4965 (1991).
- [8] Sankar, S. V., Buermann, D. H., and Bachalo, W. D., "An advanced rainbow signal processor for improved accuracy in droplet temperature measurements." 8 th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, vol. 1, p.9.3.1-9.3.9., Lisbon, Portugal (1996).
- [9] Sankar, S. V., Buermann, D. H., and Bachalo, W. D., "Application of Rainbow Thermometry to the Study of Fuel Droplet Heat-Up and Evaporation Characteristics," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 119(3), 573-584 (1997).
- [10] Hardalupas, Y., and Liu, C. H., "Backscatter phase-Doppler anemometry for transparent non-absorbing spheres," *Experiments in Fluids*, 14, 379-390 (1993).
- [11] Adler, C., Lock, J. A., and Stone, B. R., "Rainbow scattering by a cylinder with a nearly elliptical cross section," *Applied Optics*, 37(9), 1540-1550 (1998).
- [12] Lohner, H., Lehmann, P., and Bauckhage, K., "Detection based on rainbow refractometry of droplet sphericity in liquid-liquid systems," *Applied Optics*, 38(7), 1127-1132 (1999).
- [13] Adler, C., Phipps, D., Saunders, K. W., Nash, J. K., and Lock, J. A., "Supernumerary spacing of rainbows produced by an elliptical-cross-

- section cylinder. II. Experiment,” *Applied Optics*, 40(15), 2535-2545 (2001).
- [14] Jiang, K., Han, X. e., and Ren, K. F., “Scattering from an elliptical cylinder by using the vectorial complex ray model,” *Applied Optics*, 51(34), 8159-8168 (2012).
- [15] Anders, K., Roth, N., and Frohn, A., “Influence of Refractive Index Gradients within droplets on rainbow position and implications for rainbow refractometry,” *Particle & Particle systems Characterization*, 13(2), 125-129 (1996).
- [16] Massoli, P., “Rainbow refractometry applied to radially inhomogeneous spheres: the critical case of evaporating droplets,” *Applied Optics*, 37(15), 3227-3235 (1998).
- [17] Saengkaew, S., Charinpanitkul, T., Vanisri, H., Tanthapanichakoon, W., Biscos, Y., Garcia, N., Lavergne, G., Mèès, L., Gouesbet, G., and Grehan, G., “Rainbow refractometry on particles with radial refractive index gradients,” *Experiments in Fluids*, 43, 595-601 (2007).
- [18] Adam, J. A., and Laven, P., “Rainbows from inhomogeneous transparent spheres: a ray-theoretic approach,” *Applied Optics*, 46(6), 922-929 (2007).
- [19] Song, F., Xu, C., Wang, S., and Zhenfeng, L., “Measurement of temperature gradient in a heated liquid cylinder using rainbow refractometry assisted with infrared thermometry,” *Optics Communications*, 380, 179-185 (2016).
- [20] van Beeck, J., Zimmer, L., and Riethmuller, M. L., “Global Rainbow Thermometry for Mean Temperature and Size Measurement of Spray Droplets,” *Particle & Particle Systems Characterization*, 18(4), 196-204 (2001).
- [21] Vertrano, M. R., Van Beeck, J., and Riethmuller, M. L., “Assessment of refractive index gradients by standard rainbow thermometry,” *Applied Optics*, 44(34), 7275-7281 (2005).
- [22] Lemaitre, P., Porcheron, E., Gréhan, G., and Bouilloux, L., “Development of a global rainbow refractometry technique to measure the temperature of spray droplets in a large containment vessel,” *Measurement Science and Technology*, 17(6), 1299-1306 (2006).
- [23] Saengkaew, S., Godard, G., Blaisot, J. B., and Gréhan, G., “Experimental analysis of global rainbow technique: sensitivity of temperature and size distribution measurements to non-spherical droplets,” *Experiments in Fluids*, 47(4), 839-848 (2009).
- [24] Mishchenko, M. I., [Electromagnetic Scattering by Particles and Particle Groups: An Introduction] Cambridge University Press, New York (2014).
- [25] Devaney, A. J., “Nonuniqueness in the inverse scattering problem,” *Journal of Mathematical Physics*, 19, 1526-1535 (1978).

- [26] Devaney, A. J., and Sherman, G. C., "Nonuniqueness in Inverse Source and Scattering Problems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 30, 1034-1037 (1982).
- [27] Świrniak, G., Głomb, G., and **Mroczka, J.**, "Inverse analysis of the rainbow for the case of low-coherent incident light to determine the diameter of a glass fiber," *Applied Optics*, 53(19), 4239-4247 (2014).
- [28] Świrniak, G., and **Mroczka, J.**, "Approximate solution for optical measurements of the diameter and refractive index of a small and transparent fiber," *Journal of the Optical Society of America A*, 33(4), 667-676 (2016).
- [29] Świrniak, G., and **Mroczka, J.**, "Numerical analysis of primary rainbows from a homogeneous cylinder and an optical fiber for incident low-coherent light," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 195, 176-188 (2017).
- [30] **Mroczka, J.**, [Turbidimetric methods in particle sizing], Beijing, China(1991).
- [31] **Mroczka, J.**, [Integral transform technique in particle sizing], Beijing, China(1991).
- [32] **Mroczka, J.**, "Method of Moments in Light Scattering Data Inversion in the Particle Size Distribution," *Optics Communications*, 99(3-4), 147-151 (1993).
- [33] **Mroczka, J.**, and Szczuczyński, D., "Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements," *Metrology and Measurement Systems*, 16(3), 333-357 (2009).
- [34] **Mroczka, J.**, and Szczuczyński, D., "Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements," *Applied Optics*, 49(24), 4591-4603 (2010).
- [35] **Mroczka, J.**, and Szczuczyński, D., "Simulation research on improved regularized solution of inverse problem in spectral extinction measurements," *Applied Optics*, 51(11), 1715-1723 (2012).
- [36] **Mroczka, J.**, and Szczuczyński, D., "Improved technique of retrieving particle size distribution from angular scattering measurements," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 129, 48-59 (2013).
- [37] Onofri, F., Krzysiek, M., Barbosa, S., Messenger, V., Ren, K. F., and **Mroczka, J.**, "Near-critical-angle scattering for the characterization of clouds of bubbles: particular effects," *Applied Optics*, 50(30), 5759-5769 (2011).
- [38] Czerwiński, M., **Mroczka, J.**, Girasole, T., Gouesbet, G., and Gréhan, G., "Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions. Pt. 1. Direct problem: hybrid-method approximation.," *Applied Optics*, 40, 1514-1524 (2001).

- [39] Czerwiński, M., **Mroczka, J.**, Girasole, T., Gouesbet, G., and Gréhan, G., “Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions. Pt. 2. Inverse problem: particle size determination,” *Applied Optics*, 40, 1525-1531 (2001).
- [40] Guskowski, T., and **Mroczka, J.**, [Metoda inwersyjna wykorzystująca sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej.] Instytut Podstaw Elektroniki Wydział Elektroniki WAT, Waplewo (2003).
- [41] Girasole, T., Bultynck, H., Gouesbet, G., Gréhan, G., Le Meur, F., Le Toulouzan, J. N., **Mroczka, J.**, Ren, K. F., Roze, C., and Wysoczański, D., “Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering: Part 1: Numerical aspects,” *Particle & Particle Systems Characterization*, 14(4), 163-174 (1997).
- [42] Girasole, T., Gouesbet, G., Gréhan, G., Le Toulouzan, J. N., **Mroczka, J.**, Ren, K. F., and Wysoczański, D., “Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering: Part 2: Experimental aspects,” *Particle & Particle Systems Characterization*, 14, 211-218 (1997).
- [43] Girasole, T., Le Toulouzan, J. N., **Mroczka, J.**, and Wysoczański, D., “Fiber orientation and concentration analysis by light scattering: experimental setup and diagnosis,” *Review of Scientific Instruments*, 68(7), 2805-2811 (1997).
- [44] **Mroczka, J.**, Wysoczański, D., and Onofri, F., “Optical parameters and scattering properties of red blood cells,” *Optica Applicata*, 32(4), 691-700 (2002).
- [45] Skorupski, K., and **Mroczka, J.**, “Effect of the necking phenomenon on the optical properties of soot particles,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 141, 40-48 (2014).
- [46] Skorupski, K., **Mroczka, J.**, Riefler, N., Oltmann, H., Will, S., and Wriedt, T., “Impact of morphological parameters onto simulated light scattering patterns,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 119, 53-66 (2013).
- [47] Woźniak, M., Onofri, F., Barbosa, S., Yon, J., and **Mroczka, J.**, “Comparison of methods to derive morphological parameters of multi-fractal samples of particle aggregates from TEM images,” *Journal of Aerosol Science*, 47, 12-26 (2012).
- [48] Skorupski, K., Hellmers, J., Feng, W., **Mroczka, J.**, Wriedt, T., and Mädler, L., “Influence of sintering necks on the spectral behaviour of ITO clusters using the Discrete Dipole Approximation,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 159, 11-18 (2015).
- [49] Wojtaszek, T., and **Mroczka, J.**, [Light scattering simulations of spheroids using three beams phase Doppler system], Rio de Janeiro, Brazil(2006).

- [50] Świrniak, G., Głomb, G., and **Mrocza, J.**, “Inverse analysis of light scattered at a small angle for characterization of a transparent dielectric fiber,” *Applied Optics*, 53(30), 7103-7111 (2014).
- [51] Lee, R. L., and Fraser, A. B., [The Rainbow Bridge: Rainbows in Art, Myth and Science] Pennsylvania State University Press, (2001).
- [52] Boyer, C. B., [The Rainbow: From Myth to Mathematics] Princeton University Press, (1987).
- [53] Smith, M. A., “Descartes's Theory of Light and Refraction: A Discourse on Method,” *Transactions of the American Philosophical Society*, 77(3), i-viii+1-92 (1987).
- [54] Können, G. P., and de Boer, J. H., “Polarized rainbow,” *Applied Optics*, 18, 1961-1965 (1979).
- [55] Young, T., “The Bakerian Lecture: Experiments and Calculations Relative to Physical Optics,” *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 94, 1-16 (1804).
- [56] Gouy, G., “Sur une propriété nouvelle des ondes lumineuses,” *C. R. Acad. Sci. Paris*, 110, (1890).
- [57] Laven, P., “Supernumerary arcs of rainbows: Young’s theory of interference,” *Applied Optics*, 56(19), G104-G112 (2017).
- [58] Humphreys, W. J., [Physics of the Air] McGraw-Hill, New York and London (1929).
- [59] Airy, G. B., [On the intensity of light in the neighbourhood of a caustic] University Press, 379-402 (1838).
- [60] Abramowitz, M., and Stegun, I. A., [Handbook of Mathematical Functions] National Bureau of Standards, Washington DC (1970).
- [61] Mie, G., “Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen,” *Ann. Phys.*, 330, 377-445 (1908).
- [62] Lorenz, L., [Sur la lumière réfléchi et réfractée par une sphère transparente] Lehmann & Stage, Copenhagen (1898).
- [63] Bohren, C. F., and Huffman, D. R., [Absorption and Scattering of Light by Small Particles] John Wiley & Sons, New York (1983).
- [64] Wiscombe, W. J., “Improved Mie scattering algorithms,” *Applied Optics*, 19(9), 1505-1509 (1980).
- [65] van de Hulst, H. C., [Light scattering by small particles] Dover Publications, New York (1981).
- [66] Barber, P. W., and Hill, S. C., [Light Scattering by Particles: Computational Methods] World Scientific Publishing, Singapore, Chapter 2: Scattering by an Infinite Circular Cylinder at Normal Incidence (1990).
- [67] Debye, P., “Der lichtdruck auf kugeln von beliebigem material,” *Annals of Physics*, 30, 57-136 (1909).

- [68] Hovenac, E. A., and Lock, J. A., "Assessing the contributions of surface waves and complex rays to far-field Mie scattering by use of the Debye series," *Journal of Optical Society of America A*, 9(5), 781-795 (1992).
- [69] Khare, V., and Nussenzveig, H. M., "Theory of the Rainbow," *Physical Review Letters*, 33(16), 976-980 (1974).
- [70] Nussenzveig, H. M., "High-Frequency Scattering by a Transparent Sphere. II. Theory of the Rainbow and the Glory," *Journal of Mathematical Physics*, 10, 125-176 (1969).
- [71] Nussenzveig, H. M., "High-Frequency Scattering by a Transparent Sphere. I. Direct Reflection and Transmission," *Journal of Mathematical Physics*, 10(1), 82-124 (1969).
- [72] Nussenzveig, H. M., "Complex angular momentum of the rainbow and the glory," *Journal of optical Society of America*, 69, 1068-1079 (1979).
- [73] Nussenzveig, H. M., [Diffraction Effects in Semiclassical Scattering] Cambridge University Press, Cambridge (1992).
- [74] Bach, H., and Neuroth, N., [The Properties of Optical Glass] Springer-Verlag, Berlin (1998).
- [75] Gurwich, I., Shiloah, N., and Kleiman, M., "The recursive algorithm for electromagnetic scattering by tilted infinite circular multilayered cylinder," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 63, 217-229 (1999).
- [76] Li, R., Han, H., Jiang, H., and Ren, K. F., "Debye series of normally incident plane-wave scattering by an infinite multilayered cylinder," *Applied Optics*, 45, 6255-6262 (2006).
- [77] Fleming, J. W., "Dispersion in GeO₂-SiO₂ glasses," *Applied Optics*, 23(24), 4486-4493 (1984).
- [78] Mèès, L., Ren, K. F., Gréhan, G., and Gouesbet, G., "Scattering of a Gaussian beam by an infinite cylinder with arbitrary location and arbitrary orientation: numerical results," *Applied Optics*, 38, 1867-1876 (1999).
- [79] Laven, P., "Simulation of rainbows, coronas, and glories by use of Mie Theory," *Applied Optics*, 42, 436-444 (2003).
- [80] Laven, P., "How glories are formed?," *Applied Optics*, 44(27), 5675-5683 (2005).
- [81] Harris, F. J., "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform," *Proceedings of the IEEE*, 66(1), 51-83 (1978).
- [82] Laven, P., "Time domain analysis of scattering by a water droplet," *Applied Optics*, 50(28), F29-F38 (2011).
- [83] Walker, J. D., "Multiple rainbows from a single drops of water and other liquids," *American Journal of Physics*, 44(5), 421-433 (1976).

- [84] Butov, O. V., Golant, K. M., Tomashuk, A. L., van Stralen, M. J. N., and Breuls, A. H. E., "Refractive index dispersion of doped silica for fiber optics," *Optics Communications*, 213, 301-308 (2002).
- [85] Lock, J. A., Jamison, M. J., and Lin, C.-Y., "Rainbow scattering by a coated sphere," *Applied Optics*, 33(21), 4677-4690 (1994).
- [86] Van de Hulst, H. C., and Wang, R. T., "Glare points," *Applied Optics*, 30(33), 4755-4763 (1991).
- [87] Adler, C., Lock, J. A., Nash, J. K., and Saunders, K. W., "Experimental observation of rainbow scattering by a coated cylinder: twin primary rainbows and thin-film interference," *Applied Optics*, 40(9), 1548-1558 (2001).
- [88] Adler, C. L., Lock, J. A., Rafferty, I. P., and Hickok, W., "Twin-rainbow metrology. I. Measurement of the thickness of a thin liquid film draining under gravity," *Applied Optics*, 42(33), 6584-6594 (2003).
- [89] Wiscombe, W. J., and Nussenzveig, H. M., "Diffraction as tunneling," *Physical Review Letters*, 59(15), 1667-1670 (1987).
- [90] Lock, J. A., and Laven, P., "Understanding light scattering by a coated sphere Part 1: Theoretical considerations," *Journal of the Optical Society of America A*, 29(8), 1489-1497 (2012).
- [91] Lock, J. A., and Laven, P., "Mie scattering in the time domain. Part I. The role of surface waves," *Journal of the Optical Society of America A*, 28(6), 1086-1095 (2011).
- [92] Lock, J. A., and Laven, P., "Mie scattering in the time domain. Part II. The role of diffraction," *Journal of Optical Society of America*, 28(6), 1096-1106 (2011).
- [93] van Beeck, J. P. A. J., and Riethmuller, M. L., "Rainbow phenomena applied to the measurement of droplet size and velocity and to the detection of nonsphericity," *Applied Optics*, 35(13), 2259-2266 (1996).
- [94] Chowdhury, D. Q., Hill, S. C., and Barber, P. W., "Time dependence of internal intensity of a dielectric sphere on and near resonance," *Journal of the Optical Society of America A*, 9(8), 1364-1373 (1992).
- [95] Khaled, E. E. M., Chowdhury, D. Q., Hill, S. C., and Barber, P. W., "Internal and scattered time-dependent intensity of a dielectric sphere illuminated with a pulsed Gaussian beam," *Journal of the Optical Society of America A*, 11(7), 2065-2071 (1994).
- [96] Gouesbet, G., and Gréhan, G., "Generic Formulation of a Generalized Lorenz-Mie Theory for a Particle Illuminated by Laser Pulses," *Particle & Particle Systems Characterization*, 17(5-6), 213-224 (2000).
- [97] Wang, R. T., and van de Hulst, H. C., "Rainbows: Mie computations and the Airy approximation," *Applied Optics*, 30(1), 106-117 (1991).

- [98] Adam, J. A., "The mathematical physics of rainbows and glories," *Physics Reports*, 356(4-5), 229-365 (2002).
- [99] Lock, J. A., "Supernumerary spacing of rainbows produced by an elliptical-cross-section cylinder. I. Theory.," *Applied Optics*, 39, 5040-5051 (2000).
- [100] Nelson, A., and Eyges, L., "Electromagnetic scattering from dielectric rods of arbitrary cross section," *Journal of the Optical Society of America*, 66(3), 254-259 (1976).
- [101] Mishchenko, M. I., and Travis, L. D., "Capabilities and limitations of a current FORTRAN implementation of the T-matrix method for randomly oriented, rotationally symmetric scatterers," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 60(3), 309-324 (1998).
- [102] Gouesbet, G., and Méès, L., "Generalized Lorenz-Mie theory for infinitely long elliptical cylinders," *Journal of the Optical Society of America A*, 16(6), 1333-1341 (1999).
- [103] Gouesbet, G., Méès, L., and Gréhan, G., "Partial-wave expansions of higher-order Gaussian beams in elliptical cylindrical coordinates," *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 1(2), 121-132 (1998).
- [104] Gouesbet, G., and Gréhan, G., [Generalized Lorenz-Mie Theories] Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (2011).
- [105] van Beeck, J. P. A. J., and Riethmuller, M. L., "Nonintrusive measurements of temperature and size of single falling raindrops," *Applied Optics*, 34, 1633-1639 (1995).