



POLITECHNIKA LUBELSKA  
WYDZIAŁ  
ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI



PROFESOR  
**JANUSZ MROCZKA**

Doktor Honoris Causa  
Politechniki Lubelskiej

Lublin 2014

# **POLITECHNIKA LUBELSKA**



**Profesor**

**Janusz Mroczka**

**Doktor Honoris Causa  
Politechniki Lubelskiej**



**Lublin 2014**



Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2014

ISBN: 978-83-7947-015-0



**Uchwała Nr 10/2014/III  
Senatu Politechniki Lubelskiej  
z dnia 27 marca 2014 r.**

*w sprawie nadania  
prof. dr. hab. inż. Januszowi Mrocze  
tytułu doktora honoris causa Politechniki Lubelskiej*

Działając zgodnie z § 23 ust. 2 pkt 5 Statutu Politechniki Lubelskiej, oceniając dorobek naukowy, dydaktyczny i organizacyjny jako wybitny, na podstawie opinii wyrażonej przez prof. dr. hab. inż. Piotra Kacejko, promotora tego przewodu, oraz uwzględniając opinie Senatów: Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie oraz Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie, Senat Politechniki Lubelskiej

**n a d a j e**

**prof. dr. hab. inż. Januszowi Mrocze**

**tytuł**

**DOKTORA HONORIS CAUSA  
POLITECHNIKI LUBELSKIEJ**

Przewodniczący  
Senatu Politechniki Lubelskiej

*Piotr Kacejko*

**R e k t o r**

*Prof. dr. hab. inż. Piotr Kacejko*



SUMMIS AUSPICIIS  
SERENISSIMAE REI PUBLICAE POLONORUM  
NOS  
RECTOR IDEMQUE PROMOTOR RITE CONSTITUTUS  
CUM SENATU POLYTECHNICAЕ LUBLINENSIS  
NEC NON  
DECANUS FACULTATIS ELECTROTECHNICAЕ ET INFORMATICAЕ  
CUM  
UNANIMO CONSENSU SENATUUM  
ACADEMIAE METALLURGICAЕ-AERARIAE CRACOVIENSIS  
ET ACADEMIAE TECHNICAЕ-MILITARIS VARSOVIENSIS

IN  
ILLUSTRISSIMUM ET DOCTISSIMUM DOMINUM  
SOCIUM ACADEMIAE SCIENTIARUM POLONAE CORRESPONDENTEM  
DISCIPLINARUM TECHNICARUM DOCTOREM HABILITATUM, PROFESSOREM  
ORDINARIUM, RATIONIS ATQUE ARTIS METIENDI ET AD USUM  
APPLICANDIPERITUM

## **IANUSSIUM MROCZKA**

QUI COPIOSA SERIE GRAVIUM LIBRORUM IN GLORIAM VENIT  
ET ITEM MAGNA INDUSTRIA IN ORDINANDIS RATIONIBUS, UT SCIENTIA  
PERVESTIGARETUR, EXCELLUIT  
VIRUM DE CONFORMATIONE ALUMNORUM POLYTECHNICAЕ LUBLINENSIS,  
QUI IN ALBO PROFESSORUM SUNT INSCRIPTI, BENE MERITUM

## **DOCTORIS HONORIS CAUSA SCIENTIARUM TECHNICARUM**

NOMEN AC DIGNITATEM, IURA AC PRIVILEGIA CONTULIMUS IN EIUSQUE REI  
FIDEM HOC DIPLOMA SIGILLO POLYTECHNICAЕ LUBLINENSIS SANCIENDUM  
CURAVIMUS

HENRICA D. STRYCZEWSKA  
H. T. DECANUS

PETRUS KACEJKO  
H. T. RECTOR MAGNIFICUS  
AC PROMOTOR

LUBLINI, DIE XIII MENSIS MAII A. D. MMXIV



**LAUDACJA**  
**z okazji nadania godności Doktora Honoris Causa**  
**Politechniki Lubelskiej prof. dr hab. inż. Januszowi Mrocze,**  
**wyłoszona przez**  
**JM Rektora Politechniki Lubelskiej prof. dr hab. inż. Piotra Kacejko**

*Czcigodni Doktorzy Honoris Causa i Profesorowie Honorowi Politechniki  
Lubelskiej, Dostojni Goście, Wysoki Senacie*

Przypadł mi zaszczyt wyłoszenia laudacji z okazji nadania godności Doktora Honoris Causa wybitnemu uczonemu Profesorowi Januszowi Mrocze, członkowi korespondentowi Polskiej Akademii Nauk, profesorowi zwyczajnemu Politechniki Wrocławskiej. Nadanie tej godności jest wyrazem uznania naszego środowiska dla wielkiego wkładu Profesora Janusza Mroczi w rozwój nauki, w szczególności w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej. Wydział Elektrotechniki i Informatyki naszej Uczelni, który obchodzi dziś swoje pięćdziesięciolecie czuje się zaszczycony, że do grona swoich Doktorów Honoris Causa może zaliczyć tak wybitnego uczonego.

Tytuł honorowy – *Doktor Honoris Causa* wiąże się z tradycją wprowadzoną w XV wieku przez Uniwersytet w Oxfordzie w celu honorowania osób szczególnie zasłużonych, o wysokim statusie naukowym, cieszących się powszechnym szacunkiem i niekwestionowanym uznaniem. Są to osoby znane i cenione nie tylko w swoim środowisku, ale także w swoim własnym kraju i na świecie. Decyzja o wyróżnieniu tym tytułem jest zawsze poprzedzana szczegółową analizą osiągnięć i zasług kandydata.

Dzisiaj, z woli Senatu Politechniki Lubelskiej, wobec jednoznacznie pozytywnych recenzji przyjętych przez Wysokie Senaty Akademii Górniczo Hutniczej i Wojskowej Akademii Technicznej, w obecności znamienitych gości celebруемy takie właśnie podniosłe wydarzenie.

Prof. dr hab. inż. Janusz Mrocza urodził się 27 kwietnia 1952 r. Studia wyższe ukończył w roku 1976 na wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Wtedy też, zdecydował, że jego specjalnością będzie szeroko rozumiana metrologia i tej pasji pozostaje wierny do dziś. W roku 1991 uzyskał stopień doktora habilitowanego w oparciu o monografię „Metrologiczne wykorzystanie światła rozproszonego do badań rozkładu cząstek w roztworach dyspersyjnych”. Już po pięciu latach, w 1996 r. uzyskał tytuł naukowy profesora nauk technicznych. W roku 1991 został wybrany na stanowisko dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej – funkcję tę pełnił do roku 1996. W roku 1998 z inicjatywy prof. Mroczi na Wydziale Elektroniki powstała Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej, którą Profesor nieprzerwanie kieruje do dnia dzisiejszego.

Prof. Janusza Mroczkę można śmiało nazwać człowiekiem renesansu z uwagi na rozległość obszaru jego zainteresowań i posiadanej wiedzy z takich dziedzin, dyscyplin i specjalności jak: elektronika, optoelektronika, metrologia, fizyka ciała stałego, matematyka, w tym głęboka znajomość równań całkowych, procesy stochastyczne, współczesne metody analizy sygnałów, filozofia, wybrane działy medycyny i bioinżynierii. To doskonale przygotowanie pozwala mu na realizację, również w zespołach, które tworzy, szeregu poważnych problemów naukowych dotyczących między innymi: wykorzystania zjawisk optycznych do celów pomiarowych, rozwiązywania problemów odwrotnych w naukach empirycznych, pomiarów pośrednich źle uwarunkowanych numerycznie, opracowania metody momentów w analizie układów dyspersyjnych. Liczne tematy naukowe realizowane w zespole prof. Mroczki pozwalają na stwierdzenie, że Profesor jest twórcą poważnej szkoły naukowej znanej zarówno w kraju, jak i zagranicą.

Przybliżenie Szanownym Uczestnikom dzisiejszej uroczystości istoty działalności badawczej Profesora Mroczki nie jest zadaniem łatwym. Próżno szukać terminu „metrologia” w zdefiniowanym w stosownym rozporządzeniu wykazie obszarów, dziedzin i dyscyplin. Z drugiej strony istnieje niemała grupa inżynierów i uczonych mówiących o sobie „jestem metrologiem”. Uczni Ci spotykają się na kongresach i seminariach – jednym słowem ta tajemnicza metrologia łączy ich silnie pomimo zróżnicowanego wykształcenia pierwotnego – metrologami są elektrycy, elektronicy, fizycy, mechanicy, automatycy, metrologią zajmują również matematycy. Pozwalając sobie na odrobinę humoru można przytoczyć anegdotę o znajomym pewnego metrologa, który powiedział o nim: „*och ... metrolog – to jak Ci idzie stary to przepowiadanie pogody...*”. Już całkowicie poważnie możemy stwierdzić, że metrologia to nauka dotycząca sposobów dokonywania pomiarów oraz zasad interpretacji uzyskanych wyników. A tych pomiarów jest wokół nas znacznie więcej niż z pozoru mogłoby się wydawać.

Pomiar czasu od wieków reguluje bieg naszego życia, bardzo precyzyjny pomiar czasu dokonywany przez systemy GPS pozycjonuje miejsce naszego położenia i wskazuje drogę do celu. Wyniki pomiarów stanu naszego organizmu – ciśnienia, tętna, temperatury, poziomu cukru i hemoglobiny pozwalają zidentyfikować stan chorobowy. Wagi sklepowe i kuchenne wskazują ilości pożywienia, które kupujemy i spożywamy. Liczniki energii elektrycznej i cieplnej, gazomierze, wodomierze wyceniają zużycie odpowiednich mediów przez odbiorców. Oprócz pomiarów, których wyniki świadomie odczytujemy i interpretujemy, ich niezliczona liczba działa w otaczającym nas środowisku, w którym w pętlach sprzężenia zwrotnego zachodzi regulacja – temperatury, wilgotności, prędkości, napięcia, prądu, ilości powietrza, paliwa itp. Jak więc widzimy pomiar jest wszechobecny w otaczającym nas świecie – a jego jakość rozumiana jako dokładność, dostępność, szybkość powtarzalność ma zasadnicze znaczenia dla naszego funkcjonowania, czy nawet szerzej dla naszego życia.

W tym bardzo szerokim rozumieniu terminu metrologia należy wyróżnić obszar szczególnie bliski Profesorowi Mroczone – optoelektronikę. Mówiąc w ogromnym uproszczeniu światło, czyli pewien specyficzny rodzaj promieniowania elektromagnetycznego jest wykorzystywane w bardzo wielu technikach i przyrządach pomiarowych. Przykładowo, zmiana parametrów fali świetlnej może służyć do badania stężenia gazów w kontrolowanej przestrzeni rurociągu, kotła lub medycznego urządzenia diagnostycznego.

Tak opisany w sposób „brutalnie” uproszczony przedmiot studiów i dociekań Prof. Mroczone został w istotny sposób wzbogacony przez Jego osiągnięcia badawcze i publikacyjne oraz udział w kształceniu kadr naukowych. Są one następujące:

- 325 publikacji (w tym 97 artykułów z listy filadelfijskiej),
- 4 książki i 13 rozdziałów w monografiach,
- wypromowanie 23 doktorów nauk technicznych,
- występowanie 88 razy w roli recenzenta postępowań o tytuł profesorski, stopień doktora i doktora habilitowanego.

W uznaniu osiągnięć naukowych oraz zasług w zakresie badań naukowych, kształcenia kadry i prac organizacyjnych na rzecz środowiska naukowego metrologów prof. Janusz Mroczone został w 2010 r. wybrany na członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk. Od roku 2013 pełni z wyboru funkcję Członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów. Jego zasługi dla rozwoju Politechniki Wrocławskiej i rozwoju nauki podkreślają wysokie odznaczenia państwowe – Krzyż Oficerski i Krzyż Kawalerski OOP oraz Krzyże Zasługi – Złoty, Srebrny i Brązowy.

Szczególnie ważne dla nauki są prace Profesora Mroczone poświęcone tematyce tzw. problemu odwrotnego oraz analizy odwrotnej zwłaszcza w pomiarach o złym uwarunkowaniu (problemy źle postawione). Publikacje naukowe w prestiżowych czasopismach międzynarodowych, poruszające metrologiczne aspekty fotonicznych metod analizy spektralnej promieniowania rozproszonego w układach dyspersyjnych, zjednały Panu Profesorowi opinię wybitnego znawcy zagadnień dotyczących uwarunkowań metrologicznych w pomiarach optycznych oraz metrologii fotonicznej.

Opublikowane prace udowadniają możliwość wnioskowania o przyczynach na podstawie skutków i wskazują ogólne zasady, które należy przestrzegać, aby wykorzystać takie wnioskowanie w innych niż fotonika i optyka obszarach naukowych. Na tym polega uniwersalność badań naukowych i wynikających z nich metod pomiarowych, rozwijanych przez Profesora Mroczone.

Prezentowana laudacja ma służyć w intencji promotora, także popularyzacji zainteresowań i osiągnięć Doktora Honoris Causa. Spróbujmy zatem zdefiniować choć w zarysie, co to właściwie jest zagadnienie odwrotne, problem odwrotny czy analiza odwrotna, czyli niejako „sztandarowe” specjalności profesora Mroczone, gdyż te terminy brzmią dla laików, nawet o wykształceniu technicznym wyjątkowo tajemniczo. Jest rzeczą oczywistą, że skoro istnieje zagadnienie

odwrotne, to musi istnieć także zagadnienie proste. W języku polskim słowa „*prosty – odwrotny*” nie są w sposób oczywisty uznane za antonimy, lepsze jest tu słownictwo angielskie i określenia „*forward – inverse*”. Jeśli jednak wyobrażymy sobie groźnego niedźwiedzia, to poszukiwanie związku jego wagi, wieku i gatunku z kształtem śladów odcisniętych przez łapy jest przykładem rozwiązywania zagadnienia prostego. Jeżeli jednak na podstawie śladów, co jest wyraźnie trudniejsze, staramy się określić te same cechy groźnego zwierza, to jest właśnie przykład zagadnienia odwrotnego.

I wreszcie, jeżeli na podstawie śladów, które pozostawił po sobie na Politechnice Lubelskiej Pan Profesor Mrocza, będziemy starali się określić jego relacje z naszą uczelnią, to ten problem odwrotny jest niezwykle łatwy do rozwiązania. Bo te relacje od lat są znakomite i Politechnika czerpie z nich wymierne korzyści. Tyle, że tak jak w prawdziwym problemie odwrotnym jest tu element niepewności, bo nikt nie potrafi dojść skąd biorą się u Pana Profesora te pokłady życzliwości dla naszej Uczelni.

Zasługi Profesora Janusza Mroczi na rzecz Politechniki Lubelskiej są związane zarówno z obszarem rozwoju kadry i badań naukowych. Wniesiony przez Niego wkład opisują pod względem liczbowym następujące dane:

- 4 recenzje rozpraw doktorskich,
- recenzje opracowane w czterech postępowaniach habilitacyjnych,
- 6 opinii opracowanych w postępowaniach o nadanie tytułu profesora,
- ocena działalności i dorobku naukowego w postępowaniu o nadanie tytułu doktora honoris causa na Politechnice Lubelskiej,
- wygłoszenie cyklu wykładów zamawianych na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki dla studentów i pracowników naukowych,
- prowadzenie trzech seminariów naukowych „International Seminars on Computer Sciences”,
- pobyt na Politechnice Lubelskiej w roli profesora wizytującego.

Powyższe dane liczbowe, choć robią wrażenie, nie oddają rzeczy najważniejszej, o której już wspominałem – ogromnej życzliwości i okazywanego wsparcia Profesora dla aktywności naukowej młodych pracowników Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Każdy, komu znany jest trud naukowych dociekań i dywagacji, wie jak bezcennych może być kilka wypowiedzianych w prostych słowach rad i wskazówek pochodzących od Mistrza, od osoby, której autorytet uznajemy i podziwiamy. A na takie życzliwe rady, wskazówki i wsparcie od Profesora Mroczi pracownicy Politechniki Lubelskiej zawsze mogli i mogą liczyć, włącznie z autorem tych słów.

Kończąc, pragnę podkreślić, że było dla mnie zaszczytem, że mogłem zaprezentować Państwu sylwetkę Profesora Janusza Mroczi, metrologa, uczonego światowego formatu, przyjaciela Politechniki Lubelskiej.



**AGH**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

prof. dr hab. inż.

Tadeusz Słomka

REKTOR

*P. E. Gajdę*  
*Prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko*  
*REKTOR*

Rb-zor/O.521-1-1/2014

Kraków, dn. 11.03.2014

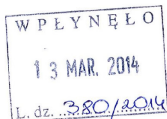
**Jego Magnificencja**  
**Prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko**  
**Rektor Politechniki Lubelskiej**

*Szanowny Panie Rektorze,*

Upieramie informuję Pana Rektora, że Senat Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie na posiedzeniu w dniu 5 marca 2014 roku w głosowaniu tajnym poparł wniosek o nadanie Panu Profesorowi Januszowi Mroczone tytułu doktora honoris causa Politechniki Lubelskiej.

W załączeniu przesyłam wyciąg z protokołu posiedzenia Senatu AGH oraz opracowaną przez prof. Janusza Gajdę opinię o dorobku naukowym, osiągnięciach i zasługach prof. Janusza Mroczone.

*Z poważaniem*  
*Mroczone*



al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: +48 12 617 20 02, fax: +48 12 633 46 72  
e-mail: tslomka@agh.edu.pl, www.agh.edu.pl





AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Kraków 2014.03.10

Wyciąg z Protokołu  
Posiedzenia Senatu AGH z dnia 5 marca 2014

Ad. 11/

Prorektor ds. Ogólnych prof. M. Karbowniczek na wstępie poinformował, że prof. J. Gajda, autor recenzji nie mógł być na posiedzeniu Senatu, ponieważ jest w delegacji, a następnie odczytał wybrane fragmenty recenzji. Profesor Janusz Mrocza jest profesorem zwyczajnym elektroniki i metrologii na Politechnice Wrocławskiej. Od ukończenia studiów w 1976 roku jako swoją specjalność i pasję naukową wybrał metrologię. Tej pasji pozostaje wierny do dzisiaj. W 1991 roku otrzymał stopień doktora habilitowanego w zakresie elektroniki, a w 1996 roku otrzymał tytuł profesora nauk technicznych. W latach 1991-1996 Profesor pełnił funkcję dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, a od 1998 kieruje Katedrą Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, która powstała z Jego inicjatywy. Dorobek naukowy Profesora jest bardzo bogaty, a jego struktura jest zróżnicowana. Jest On autorem łącznie 325 publikacji. W tej liczbie znajdują się publikacje z listy filadelfijskiej (60), artykuły w czasopismach (131), monografie i książki (4), rozdziały w monografiach i książkach (13), referaty konferencyjne (145) oraz patenty i zgłoszenia patentowe osiem pozycji. Profesor kierował 20 projektami badawczymi, zarówno krajowymi jak i międzynarodowymi. W czterech następnych brał udział jako główny wykonawca. Wyniki 4 projektów zostały wdrożone do praktycznego zastosowania. Wielokrotnie był zgłaszany przez redakcje czasopism zagranicznych jako recenzent. Opracowywał również liczne recenzje monografii i książek. Profesor wypromował łącznie 23 doktorów, w tym cztery doktoraty w układzie cotutelle we Francji. Jest autorem dwóch recenzji doktoratów Honoris Causa, 31 recenzji wniosków profesorskich, 43 recenzji w przewodach habilitacyjnych oraz 16 monografii doktorskich. Zasługi Prof. J. Mroczi dla Politechniki Lubelskiej i środowiska naukowego koncentrują się zarówno w obszarze rozwoju kadry naukowej jak i również w obszarze badań naukowych. Profesor przyczynił się w znacznym stopniu do rozwoju kadry naukowej na Politechnice, a Jego wkład obrazują następujące dane:



**AGH**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

- cztery recenzje rozpraw doktorskich,
- recenzje opracowane w czterech postępowaniach habilitacyjnych,
- sześć opinii opracowanych w postępowaniach o nadanie tytułu profesora,
- opracowanie opinii o przedłużeniu zatrudnienia na stanowisku profesora nadzwyczajnego w pięciu przypadkach,
- opracowania recenzji o nadanie Tytułu Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej,
- wygłosił cykl wykładów zamawianych na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki dla studentów i pracowników naukowych,
- przeprowadził kilkanaście seminariów naukowych „International Seminars on Computer Sciences”,
- dwukrotnie odbył role Visiting profesora w Politechnice Lubelskiej.

Pomimo olbrzymiego zaangażowania w prace naukową oraz w pracę z młodymi pracownikami nauki nie uchyla się od prac organizacyjnych w kraju i za granicą. Jest członkiem stałym Polskiego Towarzystwa Fizycznego, był wiceprzewodniczącym International Symposium of Optical Applied Science and Engineering, był członkiem Senatu Politechniki Wrocławskiej, pełnił funkcję Przewodniczącego Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego KBN, jest członkiem The International Society for Optical Engineering, jest członkiem założycielem International Technical Working Group on Penetrating Radiation USA, był głównym organizatorem Kongresu Metrologii we Wrocławiu. Jest członkiem wielu komitetów naukowych zagranicznych i krajowych oraz czasopism. Od 18 lat jest członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, pełnił funkcję wiceprzewodniczącego, a aktualnie pełni funkcję Przewodniczącego tego Komitetu. Bogata jest również współpraca Profesora z zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Współpracuje z ośrodkami we Francji, Stanach Zjednoczonych, Wielkiej Brytanii, Szwecji i wielu innych. Profesor od wielu lat podejmuje działania, których celem jest integracja krajowego środowiska naukowego, w tym metrologów. Obecnie swoje starania w tym zakresie prowadzi na forum Komitetu Metrologii i Aparatury naukowej PAN, poprzez wydawanie informatorów prezentujących sylwetki polskich metrologów, podejmuje inicjatywy, których celem jest zbudowanie syntetycznego opisu stanu metrologii i kierunków jej rozwoju, wreszcie poprzez zainicjowanie i sukcesywne wydawanie cyklu monografii pt. „Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej”. Elementem integrującym środowisko krajowe jest również czasopismo naukowe „Metrology and Measurement Systems”, kwartalnik PAN, który wydawany jest dzięki dużej aktywności prof. Mroczi. Zasługi Profesora na polu jednoczenia i rozwoju środowiska metrologów są jednoznaczne i niepodważalne. Osiągnięcia tak naukowe jak i w zakresie rozwoju kadry naukowej są znane i cenione w kraju i za granicą. Nie do przecenienia jest



**AGH**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

również poziom merytoryczny prac oraz wprowadzenie wielu pozycji na listę filadelfijską. Kończąc swoją recenzję prof. J. Gajda pisze: „Jestem głęboko przekonany, że prof. Janusz Mrocza w pełni zasłużył na wyróżnienie Go godnością Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej. Dlatego intencje Senatu Politechniki Lubelskiej popieram z najwyższym uznaniem.

Wobec braku głosów w dyskusji w głosowaniu tajnym, w którym uczestniczyło 74 Senatorów (na 87 uprawnionych do głosowania) 72 głosy „za”, 0 głosów „przeciw”, 2 głosy „wstrzymuję się” Senat podjął uchwałę nr 26/2014 w sprawie przyjęcia recenzji prof. Janusza Gajdy do wniosku Politechniki Lubelskiej o nadanie Tytułu Doktora Honoris Causa prof. dr hab. inż. Januszowi Mrocze.

REKTOR  
Akademii Górniczo-Hutniczej  
Im. Stanisława Staszica w Krakowie  
  
prof. dr hab. inż. Tadeusz Słomka





AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii  
Biomedycznej

Katedra Metrologii i Elektroniki

Prof. dr hab. inż. Janusz Gajda

Kraków, 10.02.2014

### OPINIA

nt.

**dorobku naukowego i osiągnięć**

**Pana Prof. dr hab. inż. Janusza Mroczi, czł. kor. PAN**

**w związku z wszczęciem postępowania o nadanie tytułu doktora Honoris Causa  
Politechniki Lubelskiej**

#### Wprowadzenie

Tytuł honorowy – *Doctor Honoris Causa* jest tradycją wprowadzoną w XV wieku przez Uniwersytet w Oxfordzie w celu honorowania osób szczególnie zasłużonych, o wysokim statusie naukowym lub społecznym, cieszących się powszechnym szacunkiem i niekwestionowanym uznaniem. Są to osoby znane i cenione nie tylko w swoim środowisku, a efekty ich działalności przynoszą trwałe korzyści szerszej społeczności, niekiedy przekraczając granice krajów i kontynentów. Decyzja o wyróżnieniu tym tytułem jest zawsze poprzedzana szczegółową analizą osiągnięć i zasług kandydata oraz jego poziomu etycznego. Pozytywna decyzja senatu uczelni jest podejmowana tylko w przypadkach nie budzących żadnych wątpliwości.

Wysoka ranga tego tytułu powoduje, że jest on przyznawany bardzo rzadko. Dlatego jest to wydarzenie szczególne zarówno dla wyróżnionego tym zaszczytem jak również dla ośrodka akademickiego takie wyróżnienie przyznającego.

Dzisiaj, z woli Profesorów Politechniki Lubelskiej, w obecności J.M. Rektora Politechniki Lubelskiej, Członków Senatu i znamienitych gości celebруемy także właśnie szczególne wydarzenie – nadanie godności doktora *Honoris Causa* Politechniki Lubelskiej Profesorowi dr hab. inż. Januszowi Mrocze, członkowi korespondentowi Polskiej Akademii Nauk, profesorowi zwyczajnemu Politechniki Wrocławskiej.

Zasługi Profesora na polu jednoczenia i rozwoju środowiska metrologów w Polsce są niepodważalne. Osiągnięcia Profesora Janusza Mroczi, tak naukowe, jak i w zakresie rozwoju kadry naukowej są znane i cenione nie tylko w Polsce. Nie do przecenienia jest



Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Katedra Metrologii i Elektroniki  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,  
tel. +48 12 617 39 72, fax +48 12 633 85 65  
e-mail: [zmetr@uci.agh.edu.pl](mailto:zmetr@uci.agh.edu.pl)

wkład wniesiony przez Profesora podczas współpracy naukowej z Politechniką Lubelską oraz Jego wkład w rozwój kadry naukowej na Politechnice.

Osiągnięcia Profesora Janusza Mroczi, Jego działalność na rzecz Politechniki Lubelskiej oraz na rzecz polskiego środowiska naukowego w pełni uzasadniają podjęcie inicjatywy uhonorowania Go tytułem doktora *Honoris Causa*.

#### Dorobek naukowy

Profesor Janusz Mrocza jest profesorem zwyczajnym elektroniki i metrologii na Politechnice Wrocławskiej. Od ukończenia studiów w 1976 roku jako swoją specjalność i pasję naukową wybrał metrologię. Tej pasji pozostaje wierny do dzisiaj.

W 1991 roku otrzymał stopień doktora habilitowanego w zakresie elektroniki na podstawie rozprawy pt. „*Metrologiczne wykorzystywanie światła rozproszonego do badań rozkładu wielkości cząstek w roztworach dyspersyjnych*”, a w 1996 roku otrzymał tytuł profesora nauk technicznych.

W latach 1991–1996 Profesor Janusz Mrocza pełnił funkcję dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, a od roku 1998 kieruje Katedrą Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, która powstała z Jego inicjatywy. W tym zespole realizuje On, wspólnie ze swoimi wychowankami, cele badawcze, koncentrujące się wokół rozwiązywania problemu odwrotnego w naukach empirycznych. Dzięki spójności tematycznej, wypracowanemu potencjałowi badawczemu i dorobkowi naukowemu znanemu w kraju i zagranicą, stworzona przez Profesora Janusza Mroczkę Katedra postrzegana jest jako renomowana szkoła naukowa, aktywna w dziedzinie pomiarów właściwości fizycznych układów dyspersyjnych za pomocą promieniowania rozproszonego.

Działalność naukowa Profesora obejmuje badania nad procesem poznawczym, metodologię badań naukowych, rozwiązywaniem problemu odwrotnego, a w szczególności problemu źle uwarunkowanego numerycznie, pomiary fotoniczne, w tym badania układów dyspersyjnych metodą analizy promieniowania rozproszonego oraz wykorzystanie do tego celu metody momentów, rozwój deterministycznych i statystycznych metod przetwarzania danych pomiarowych, zastosowanie transformacji czasowo – częstotliwościowych w przetwarzaniu sygnałów pomiarowych.

Dorobek naukowy Profesora Janusza Mroczi jest bardzo bogaty, a jego struktura zróżnicowana. Jest On autorem łącznie 325 publikacji. W tej liczbie znajdują się publikacje z listy filadelfijskiej (60), artykuły w czasopismach (131), monografie i książki (4), rozdziały w monografiach i książkach (13), referaty konferencyjne (145), patenty i zgłoszenia patentowe (8).

Profesor Janusz Mrocza kierował 20 projektami badawczymi, zarówno krajowymi jak i międzynarodowymi, W czterech następnych brał udział jako główny wykonawca. Wyniki czterech projektów zostały wdrożone do praktycznego stosowania. Wielokrotnie był

zapraszany przez redakcje renomowanych czasopism zagranicznych jako recenzent. Opracowywał również liczne recenzje monografii i książek.

#### Dorobek dydaktyczny

Dorobek Profesora Janusza Mroczi w zakresie rozwoju kadry naukowej jest równie imponujący. W swojej działalności dydaktycznej i wychowawczej na pierwszym miejscu stawia On na 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 subsydem profesorskim „Mistrz”, przeznaczonym na badania pod tytułem *"Metrologiczne uwarunkowania fotonicznych metod analizy spektralnej i polaryzacyjnej promieniowania rozproszonego w układach dyspersyjnych"*.

Profesor wypromował łącznie 23 doktorów, w tym cztery doktoraty *cotutelle* we Francji, sprawował opiekę naukową nad sześcioma habilitantami, jest autorem dwóch recenzji doktoratów *Honoris Causa*, 31 recenzji wniosków profesorskich, 43 recenzji w przewodach habilitacyjnych oraz 16 monografii doktorskich.

Za tym dorobkiem stoi ponadprzeciętna zdolność dostrzegania problemów badawczych i formułowania tematyki naukowej, a także umiejętność budowania atmosfery mobilizującej młodych ludzi do intensywnej, twórczej pracy.

Jest tym, który wyzwala u swoich wychowanków wrażliwość aksjologiczną, przekazuje im swoje doświadczenie życiowe, wykształca w nich jasność spojrzenia i myśli, a w szczególności obok spokojnej kontemplacji prawdy - niepokój jej poszukiwania.

Uzyskane pod opieką Profesora dobre opanowanie warsztatu naukowego umożliwia Jego wychowankom późniejsze, samodzielne rozwijanie swojej kariery naukowej. Za osiągnięcia naukowe dwóch wychowanków Profesora Janusza Mroczi otrzymało stypendium Fundacji Nauki Polskiej: „Nobel dla młodych”, jeden został wyróżniony nagrodą Wydziału IV PAN, a trzynastu obroniło z wyróżnieniem prace doktorskie, w tym we Francji czterech. Sześciu z nich jest już samodzielnymi pracownikami nauki.

#### Zasługi dla Politechniki Lubelskiej i środowiska naukowego

Zasługi Profesora Janusza Mroczi na rzecz Politechniki Lubelskiej koncentrują się zarówno w obszarze rozwoju kadry naukowej jak również w obszarze badań naukowych.

Profesor przyczynił się w znacznym stopniu do rozwoju kadry naukowej na Politechnice. Wniesiony przez Niego wkład opisują pod względem liczbowym następujące dane:

- cztery recenzje rozpraw doktorskich,
- recenzje opracowane w czterech postępowaniach habilitacyjnych,
- sześć opinii opracowanych w postępowaniach o nadanie tytułu profesora,

- opinia opracowana w związku z postępowaniem o przedłużenie zatrudnienia na stanowisku profesora nadzwyczajnego,
- ocena działalności i dorobku naukowego w postępowaniu o nadanie tytułu doktora *Honoris Causa* na Politechnice Lubelskiej,
- wygłoszenie cyklu wykładów zamawianych na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki dla studentów i pracowników naukowych,
- prowadzenie trzech seminariów naukowych „International Seminars on Computer Sciences”,
- pobyt na Politechnice Lubelskiej w roli *visiting professor'a*,
- opieka naukowa nad pracownikami Politechniki Lubelskiej podczas ich staży naukowych w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, odbywanych w ramach współpracy międzyuczelnianej.

Mimo olbrzymiego zaangażowania w pracę naukową oraz pracę z młodymi pracownikami nauki nie uchyła się On od prac organizacyjnych na rzecz środowiska naukowego w kraju i zagranicą:

- od 1986 roku jest członkiem stałym Polskiego Towarzystwa Fizycznego,
- w roku 1993 był wice-przewodniczącym International Symposium of Optical Applied Science and Engineering *"Optical Diagnostics in Fluid and Thermal Flow"* w San Diego USA,
- w latach 1999 – 2005 był członkiem Senatu Politechniki Wrocławskiej,
- przez okres 5 konkursów pełnił funkcję Przewodniczącego Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego KBN,
- od roku 1992 jest stałym członkiem SPIE (The International Society for Optical Engineering),
- od roku 1994 roku jest członkiem-założycielem International Technical Working Group on Penetrating Radiation, USA,
- w roku 2004 był głównym organizatorem Kongresu Metrologii we Wrocławiu.

Jest ponadto członkiem wielu komitetów naukowych zagranicznych i krajowych konferencji oraz czasopism.

Od 18 lat Prof. Janusz Mroczka jest członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, w latach 2001–2007 pełnił funkcję wiceprzewodniczącego Komitetu, a od roku 2007 pełni funkcję Przewodniczącego Komitetu.

Kształcenie kadry to nie tylko dbanie o rozwój naukowy młodych adeptów. To również dbałość o znajomość i przestrzeganie wysokich norm etycznych i wzorcowych relacji pomiędzy naukowcami. Temu celowi służą wykłady wygłaszane przez Profesora. Przykładem są: wykład zatytułowany *„Mistrz i uczeń"*, wygłoszony po raz pierwszy przed Senatem Politechniki Wrocławskiej, a następnie w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie i w Instytucie Immunologii i Terapii Doświadczalnej im. L. Hirszfelda PAN w maju 2011r oraz referat pt. *„Proces poznawczy w naukach empirycznych"* wygłoszony 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, a szczególnie pierwszy z nich, były

później prezentowane również w innych środowiskach naukowych, za każdym razem wzbudzając ogromne zainteresowanie wśród słuchaczy.

Znamienne są myśli, które Profesor J. Mrocza umieszcza w licznych swoich wystąpieniach. Oto jedna z nich: „...*będąc nauczycielem akademickim mam świadomość, że w tej społeczności nie jesteśmy dani tylko sobie, ale przez pracę, wolność i wewnętrzną siłę tworzenia również dla innych, z którymi współdziałając budujemy ścieżkę do własnej pełni*”.

Bogata jest również współpraca Profesora z zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Współpracuje On z francuskim Institut Universitaire des Systemes Thermiques Industriels w Marsylii oraz Institut National des Sciences Appliquees w Rouen, poza tym z Department of Biomedical Engineering, Boston University w USA i Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, Preston w Wielkiej Brytanii.

W uznaniu osiągnięć naukowych, oraz zasług w zakresie kształcenia młodej kadry naukowej i prac organizacyjnych na rzecz środowiska naukowego metrologów Prof. Janusz Mrocza został w 2010 roku wybrany na członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk. Od roku 2013 pełni z wyboru funkcję Członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych. Tu pozwolę sobie przytoczyć słowa, które wypowiedział zapytany o to czym jest dla Niego Centralna Komisja: „... *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*”.

#### Wniosek końcowy

Podsumowując swoją opinię chciałbym podkreślić jeszcze jeden aspekt działalności Profesora Janusza Mroczi, moim zdaniem szczególnie ważny. Profesor od wielu lat podejmuje działania, których celem jest integracja krajowego środowiska naukowego, w tym metrologów. Obecnie swoje starania w tym zakresie prowadzi na forum Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk, poprzez wydawanie informatorów prezentujących sylwetki polskich metrologów, podejmowanie inicjatyw, których celem jest zbudowanie syntetycznego opisu stanu metrologii i kierunków jej rozwoju, wreszcie poprzez zainicjowanie i sukcesywne wydawanie cyklu monografii zatytułowanego „*Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*”, który ilustruje aktualne kierunki rozwoju metrologii. Publikowane w nim materiały pochodzą z różnych ośrodków metrologicznych i w większości przypadków są wynikami prac na kolejne stopnie naukowe. Dotychczas w tej serii ukazało się sześć tomów.

Elementem integrującym krajowe środowisko metrologiczne jest również czasopismo naukowe *Metrology and Measurement Systems*, kwartalnik PAN. To dzięki uporowi Profesora Mroczi i Jego konsekwentnie prowadzonym działaniom promującym to czasopismo, szczególnie w skali międzynarodowej, oraz dzięki ciągłej dbałości o wysoki

poziom merytoryczny publikowanych prac, zostało ono wprowadzone na tzw. listę filadelfijską.

Profesor Janusz Mrocza jest członkiem Polskiej Akademii Nauk, wybitnym naukowcem działającym w obszarze elektroniki i metrologii, a jednocześnie człowiekiem skromnym, z pokorą akceptującym wpływ czasu i nasze z nim przemijanie, słabości ducha i ciała, ludzkie niedostatki. W przedmowie do jednej z monografii Profesor napisał cyt.: „...*Forma jaką się posługujemy, pisząc, jest właściwa każdemu z nas. Ukazujemy naszą codzienność, pozostając ciągle takim samym, trwamy przy raz zaakceptowanych wartościach, tyleż oczywistych i może nie zawsze uznawanych. Czas bogaci nasze wartości merytoryczne, doskonalili naszą formę i styl przekazu, wzbogaca słownictwo, ale również może ukazywać spadek naszych zdolności twórczych. Jest to następstwo upływającego czasu. Przez to jesteśmy zwyczajni w swojej upartej, a może naiwnej wartości, ale też zwyczajni w swoich przywarach, błędach i upadkach*”.

Jest On człowiekiem obdarowanym poczuciem humoru i swadą. Lojalność, bezwzględna zgodność słowa z czynem, dochowywanie przyjaźni to niektóre cechy Profesora, które pozwalam sobie wymienić. Należy On do tych, którzy potrafią składać ofiarę z jednych wartości dla wartości innych, które są podyktowane wspólnym, nadrzędnym dobrem.

Profesor Janusz Mrocza jest tym „mistrzem” i człowiekiem niezłomnej nadziei, który czerpie siłę z ufności do swoich uczniów i ludzi, z którymi dane jest mu współpracować.

Jestem głęboko przekonany, że Profesor Janusz Mrocza w pełni zasłużył na wyróżnienie Go godnością doktora *Honoris Causa* Politechniki Lubelskiej. Dlatego intencję Senatu Politechniki Lubelskiej popieram z najwyższym uznaniem, a powyższe fakty przytoczyłem aby służyły tego poparcia wzmocnieniu.





**Wojskowa  
Akademia  
Techniczna**  
im. Jarosława Dąbrowskiego

*P. Kacejko*  
Prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko

Warszawa, dnia 28 lutego 2014 r.

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA  
IM. JAROSŁAWA DĄBROWSKIEGO  
Nr. 2598/M  
03 MAR 2014  
00-908 Warszawa 49

**JM Rektor Politechniki Lubelskiej**  
**Pan prof. dr hab. inż. Piotr KACEJKO**  
**ul. Nadbystrzycka 38D**  
**20-618 Lublin**

Dotyczy: uchwały Senatu WAT

*Magnificencjo, Szanowny Panie Rektore,*

Uprzejmie informuję Pana Rektora, że Senat Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego na posiedzeniu w dniu 27 lutego 2014 r. poparł inicjatywę Politechniki Lubelskiej o nadanie prof. dr. hab. inż. Januszowi MROCZCE tytułu doktora honoris causa.

W załączeniu przesyłam opinię o dorobku prof. Janusza MROCZKI opracowaną przez prof. dr. hab. inż. Jerzego BARZYKOWSKIEGO wraz z uchwałą Senatu WAT w tej sprawie.

Załączników: 3 na 8 ark. – tylko adresat.

*Z wyrazami szacunku*

**REKTOR**

*Z. Mierny*

**gen. bryg. prof. dr hab. inż. Zygmunt MIERCZYK**

Sporządził: - J.L. (tel. 22 683 96 32, e-mail: julian.laskowski@wat.edu.pl)

W P Ł Y N Ę Ł O  
07 MAR. 2014  
L. dz. 350/2014





**Wojskowa  
Akademia  
Techniczna**

im. Jarosława Dąbrowskiego

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

**nr 12/WAT/2014 z dnia 27 lutego 2014 r.**

**w sprawie przyjęcia opinii o dorobku i poparcia inicjatywy  
nadania tytułu doktora honoris causa przez Politechnikę Lubelską**

Na podstawie art. 16 ust. 3 *ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym* (t.j. Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.) i § 19 ust. 1 pkt 56 *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 nr 1/RKR/2012 z dnia 3 września 2012 r.), uchwała się, co następuje:

§ 1

1. Przyjmuje się opinię o dorobku prof. dr. hab. inż. Janusza MROCZKI opracowaną przez prof. dr. hab. inż. Jerzego BARZYKOWSKIEGO.
2. Popiera się inicjatywę nadania prof. dr. hab. inż. Januszowi MROCZCE tytułu doktora honoris causa przez Politechnikę Lubelską.

§ 2

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

**Przewodniczący**

**gen bryg. prof. dr hab. inż. Zygmunt MIERCZYK**



## **WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA**

**im. JAROSŁAWA DĄBROWSKIEGO**

**Prof. dr hab. inż.**

Warszawa 03.02.2014r.

**Jerzy BARZYKOWSKI**

### **OPINIA**

**o dorobku naukowym, osiągnięciach i zasługach prof. dr hab. inż. Janusza MROCZKI, prof. zw. Politechniki Wrocławskiej, członka korespondenta PAN, członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych , kandydata do tytułu i godności Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej.**

*Tak naprawdę, to nauka jest po prostu  
wyrafinowanym zdrowym rozsądkiem.  
Albert Einstein*

### **WPROWADZENIE**

Doktor Honoris Causa to najwyższy tytuł honorowy wprowadzony przed sześcioma wiekami do tradycji akademickiej przez Uniwersytet w Oxfordzie. Wyróżnia się tym tytułem wybitnych przedstawicieli nauki i życia publicznego o powszechnie uznanym statusie. Decyzja o przyznaniu tego tytułu poprzedzana jest zawsze bardzo wnikliwą analizą osiągnięć i sylwetki zgłoszonego kandydata, zarówno przez senat nadający tytuł jak i przez dwa senaty znanych uczelni akademickich prezentujących zbliżony obszar nauki.

### **SYLWETKA KANDYDATA**

Prof. dr hab. inż. Janusz MROCZKA urodził się 27 kwietnia 1952r.. Studia wyższe ukończył w roku 1976 na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Wtedy też , prawdopodobnie pod wpływem autorytetu prof. A. Jellonka, zadeklarował że jego specjalnością będzie szeroko rozumiana metrologia i tej pasji pozostaje wierny do dnia dzisiejszego. W roku 1991 uzyskuje stopień doktora habilitowanego w oparciu o monografię

„Metrologiczne wykorzystanie światła rozproszonego do badań rozkładu cząstek w roztworach dyspersyjnych”. Już po pięciu latach w 1996r. uzyskuje tytuł naukowy profesora nauk technicznych a w 1999r. stanowisko profesora zwyczajnego Politechniki Wrocławskiej. W roku 1991 został wybrany na dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, którą pełni nieprzerwanie do roku 1996. Po likwidacji tegoż Instytutu jako jednostki ogólnouczelnianej powstaje w roku 1998 z inicjatywy prof. J. Mroczi na Wydziale Elektroniki Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej, którą kieruje On nieprzerwanie do dnia dzisiejszego.

Poniżej zamieszczam bardzo syntetyczny wykaz najważniejszych funkcji, wyróżnień i zaszczytów będących udziałem Profesora: od 2010r. członek korespondent PAN, od 2013r. członek Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych, od 1992r. stały członek SPIE (The International Society for Optical Engineering), od 1994r. członek International Technical Working Group on Penetrating Radiation, Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej PAN od 1993r. członek, w latach 2001-2007 wiceprzewodniczący, od 2007r. przewodniczący. Członek Komitetu Elektroniki i Telekomunikacji PAN od 2012r. Od 1986r. członek stały Polskiego Towarzystwa Fizycznego, piętnastokrotnie powoływany do prac konkursowych Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego Zespołu Nr 10 KBN (pięciokrotnie przewodniczący Sekcji).

Istotniejsze uzyskane nagrody to: w r. 1989 Indywidualna Nagroda II stopnia MEN, w 1993r. Nagroda wydziału IV PAN, Stypendium Profesorskie FNP za rok 2005.

Ważniejsze posiadane odznaczenia to: Krzyż Oficerski i Kawalerski OOP, Złoty, Srebrny i Brązowy Krzyż Zasługi, Medal Komisji Edukacji Narodowej, nagrody macierzystej uczelni – Nagroda Naukowa im. Prof. M. Suskiego (wybitnego profesora Politechniki Wrocławskiej oraz olimpijczyka-szermierza z roku 1936), Złota Odznaka z Brylantem Politechniki Wrocławskiej, medal im. Prof. K. Idaszewskiego.

#### **WAŻNIEJSZE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE**

Prof. Janusza Mroczkę można śmiało nazwać człowiekiem renesansu z uwagi na rozległość obszaru jego zainteresowań i posiadanej wiedzy z takich dziedzin i specjalności jak : elektronika, optoelektronika, metrologia, fizyka w tym fizyka

ciała stałego, matematyka w tym głęboka znajomość równań całkowych, procesy stochastyczne, współczesne metody analizy sygnałów, filozofia, wybrane działy medycyny i bioinżynierii. To doskonale przygotowanie bazowe pozwala Mu na realizację, również w zespołach które tworzy szeregu poważnych problemów naukowych dotyczących między innymi: wykorzystania zjawisk optycznych do celów pomiarowych, rozwiązywania problemów odwrotnych w naukach empirycznych, pomiarów pośrednich źle uwarunkowanych numerycznie, opracowania metody momentów w analizie układów dyspersyjnych, rozwój metodologii łączenia danych pomiarowych o różnej przestrzennej rozdzielczości przy wykorzystaniu deterministycznych i stochastycznych metod przetwarzania. Liczne tematy naukowe realizowane w zespole prof. J. Mroczi pozwalają na stwierdzenie, że Profesor jest twórcą poważnej szkoły naukowej znanej zarówno w kraju jak i za granicą.

Naukowy dorobek J. Mroczi jest niezmiernie bogaty a jeśli przyjąć, że z 37 lat aktywności naukowej ostatnie 20 lat obejmują zdecydowaną większość tego dorobku to nie jest przesadą stwierdzenie że jest to aktywność naukowa istotnie imponująca. Syntetyczny przegląd dorobku przedstawia się następująco:

- łączna liczba publikacji 325
- publikacje z tak zwanej listy filadelfijskiej 60
- artykuły w czasopismach 131
- monografie i książki 4
- rozdziały w monografiach i książkach 13
- referaty konferencyjne krajowe 79
- referaty na konferencjach międzynarodowych 64
- współczynnik Hirscha  $h=11$
- patenty i zgłoszenia patentowe 8

Prof. J. Mrocza kierował 24 projektami badawczymi w tym 6 międzynarodowymi a wyniki 4 prac zostały wdrożone do praktyki. W Jego dorobku edytorskim, redakcyjnym, autorskim i współautorskim pragnę przykładowo wymienić dwa dokonania moim zdaniem zasługujące na szczególne podkreślenie.

Wydana w 2003 roku (1-sze wydanie ; 2007 2-gie wyd.) monografia pt. Współczesna Metrologia – Zagadnienia Wybrane (550str). Rozdział 2 tej

monografii autorstwa J. Mroczi (str. 17-66) nosił tytuł „Metrologia w procesie poznania” i był unikalną w treści rozprawą o fizycznych i filozoficznych aspektach metrologii. Ten tekst uzyskał pełną aprobatę GURU polskiej metrologii prof. A. Jellonka a kilka lat później w nieco zmodyfikowanej treści w wersji anglojęzycznej był publikowany w specjalnym wydaniu czasopisma Measurement – z okazji jubileuszu prof. L. Finkelsteina. Ta monografia będąca pokłosiem wykładów w ramach Szkoły- Konferencji MWK (metrologia wspomagana komputerowo) 1-sza w roku 1993 a już 10-ta w maju bieżącego roku, w ramach której to Szkoły Profesor głosił tekst swego wykładu. Podejrzewam, że te wykłady zainspirowały Profesora do podjęcia się siedem lat temu do prawdziwie tytanicznej pracy wydawania w cyklu rocznym kolejnych tomów monografii „Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej”, której 7-my tom ukaże się w 2014 roku. Autorami poza samym Profesorem, równocześnie redaktorem naczelnym są przeważnie młodzi adepci metrologii a już doktorzy bądź doktorzy habilitowani. Ten dobór autorów gwarantuje, że wydawane tomy monografii są poświęcone ważnym współczesnym zagadnieniom metrologii.

Od ponad dwudziestu lat Profesor Mrocza prowadzi owocną współpracę z szeregiem ośrodków zagranicznych jak np. :

- Institut Universitaire des Systemes Thermiques Industriels w Marsylii,
- Institut National des Sciences Appliques w Rouen,
- Department of Biomedical Engineering Boston University w USA,
- Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, Preston w Wielkiej Brytanii.

#### **NIEKTÓRE ELEMENTY DOROBKU DYDAKTYCZNEGO I WYCHOWAWCZEGO**

Szczególnie w zakresie rozwoju kadry działalność Prof. J. Mroczi jest znacznie ponad przeciętną. Posiada w swoim dorobku promotorstwo 22 obronionych prac doktorskich w tym 4 doktoraty cotutelle w Francji oraz aktywną opiekę naukową nad sześcioma habilitantami. Dorobek opracowanych recenzji obejmuje: 2 doktoraty honoris causa, 31 dotyczy wniosków profesorskich, 43 monografii i obron habilitacyjnych, 16 prac doktorskich.

Zdaniem Profesora proces dydaktyczny i rozwój kadry to nie wyłącznie troska o przyswajanie wiedzy i rozwój naukowy lecz również ważne jest kształtowanie

wysokiego poziomu etycznego i prawdziwie szczerych relacji pomiędzy ludźmi zaangażowanymi w działalność dydaktyczną i naukową. Przykładem tej troski jest autorski wykład o treści filozoficzno-etycznej pt. „Mistrz i Uczeń”, wygłoszony po raz pierwszy w Sali Senatu Politechniki Wrocławskiej, a następnie w roku 2008 na posiedzeniu publicznym (z udziałem kadry i studentów) Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN oraz wielokrotnie powtarzany na zaproszenie różnych instytucji naukowych. Treść tego wykładu budziła niezmiennie ogromne zainteresowanie słuchaczy.

Profesor jest czynnym dydaktykiem o bardzo szerokim wachlarzu wykładanych przedmiotów.

### **DZIAŁALNOŚĆ NA RZECZ POLITECHNIKI LUBELSKIEJ**

Działalność i osiągnięcia Prof. J. Mroczi na terenie i na rzecz Politechniki Lubelskiej niewątpliwie i najlepiej są znane środowisku tej uczelni. Dlatego też pozwalam sobie na bardzo syntetyczny i skrótowy opis tych dokonań.

Profesor recenzował: 4 obronione w P.L. prace doktorskie, monografie i osiągnięcia naukowe w 3 przewodach habilitacyjnych, całokształt dorobku w 5 procesach o nadanie tytułu naukowego profesora (dwa w toku). Opracował jedną opinię dotyczącą nadania przez Politechnikę Lubelską doktoratu Honoris Causa.

Profesor przeprowadził na terenie Politechniki Lubelskiej cykl wykładów i seminariów w ramach:

- Projektu Politechnika XXI wieku - wykłady w dniach 14-15 czerwiec 2011r. (Europejski Fundusz Społeczny),
- Projektu Absolwent na Miarę Czasu (E.F.S.) 19-21.12. 2011; 25-27.01.2012; 15-17.05.2012.

Trzykrotnie jako „profesor wizytujący” realizował cykl prelekcji, wykładów i spotkań dyskusyjnych ze studentami i pracownikami naukowymi w okresach: 23.11-22.12. 2011, 27.12.2011-28.01.2012, 18.04-17.05 2012.

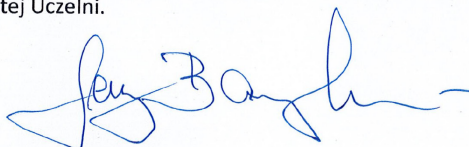
W Katedrze prowadzonej przez Profesora odbywali staże naukowe pracownicy Politechniki Lubelskiej: dr inż. Piotr Kisała i dr. inż. Sławomir Ciężczyk. Prof. J. Mrocza sprawował opiekę naukową związaną z przygotowaniem rozprawy habilitacyjnej przez pierwszego z wymienionych stażystów.

## WNIOSEK KOŃCOWY

Prof. Janusz Mrocza prezentuje sobą czystej wody talent naukowy poparty ogromną pracowitością i skutecznością działania a równocześnie bezwzględną stanowczość w ocenie postaw moralnych i etycznych zachowań w środowisku naukowym oraz studenckim. Jest On przykładem kariery w pozytywnym sensie tego słowa opartej na permanentnym doskonaleniu warsztatu badawczego, na umiejętnym łączeniu poważnej teorii z praktyką, abstrakcyjnej matematyki z inżynierią, filozofii z rzemiosłem, przy osobistym zaangażowaniu w formułowaniu zadań badawczych i umiejętnością kierowania zespołami przy ich rozwiązywaniu. Posiada On nieczęsto spotykaną życzliwość w ocenie dokonań innych, co charakteryzuje ludzi o wysokim morale.

Od wielu lat działając w Komitecie Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, Prof. J. Mrocza niestrudzenie i z dużym zaangażowaniem dąży do ścisłej integracji środowiska krajowego metrologów. Poza wymienionymi w przedstawianej opinii wieloma konkretnymi działaniami upatruje On ważną rolę, jaką dla rozwoju polskiej metrologii może wnieść popularyzacja czasopisma naukowego „Metrology and Measurement Systems” (kwartalnika PAN figurującego na liście filadelfijskiej).

Pozycja jaką prof. J. Mrocza osiągnął w środowisku naukowym krajowym i zagranicznym, wybitne osiągnięcia naukowe oraz w działalności dydaktycznej, wychowawczej i społecznej, nienaganny poziom etyczny w moim przekonaniu w pełni uzasadniają wniosek Senatu Politechniki Lubelskiej o nadanie prof. dr hab. inż. Januszowi Mrocze, członkowi nadzwyczajnemu PAN, godności naukowej Doktora Honoris Causa tej Uczelni.



## Podziękowanie

**Z** głębokim wzruszeniem oraz pełną wdzięczności radością pragnę podziękować za otrzymaną godność, która jest dla mnie wielkim darem wspólnoty akademickiej Politechniki Lubelskiej.

*Magnificencjo, Panie Rektorze, na Pańskie ręce składam podziękowania dla całej wspólnoty; Wysokiemu Senatowi Politechniki Lubelskiej dziękuję za przychylność dla procedury przewodu i uchwałę nadającą mi tytuł doktora honoris causa. Dziękuję Panu Rektorowi za podjęcie się roli Promotora w honorowym przewodzie. Panom Profesorom: Jerzemu Barzykowskiemu z Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie, Januszowi Gajdzie z Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie za wsparcie swoimi przychylnymi recenzjami. Radzie Wydziału Elektrotechniki i Informatyki za zainicjowanie nadania mi tej godności.*

*Pozwolę sobie w tym miejscu wyrazić moją wdzięczność tym nielicznym, spośród bardzo wielu. W pierwszych 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, którzy w największym stopniu, uczestniczyli w „kosztach” moich sukcesów życiowych i że jesteście współtwórcami nie tylko dzisiejszego mojego wyróżnienia. To Wasza wyrozumiałość i miłość pozwoliły mi żyć nauką. Za Waszą wspierałość dla mojej egoistycznej izolacji od Was, najserdeczniej przepraszam, a za 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 zaszczylili podstawowe cechy moralności, które sprzyjały mojemu rozwojowi. Przygotowanie do samodzielnego życia i ukształtowanie mojej osobowości zawdzięczam nie tylko Rodzicom, ale również nauczycielom, a zwłaszcza z Liceum Ogólnokształcącym im. Władysława Jagiełły w Dębicy. Z pełnym uznaniem i wdzięcznością wspominam 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.*

*To życzliwość społeczności akademickiej Politechniki Lubelskiej nadając mi ten tytuł przyjęła mnie do swojej wspólnoty i grona doktorów honoris causa tej uczelni. Los tak zrzędził, że to dzisiaj 13 maja dane jest mi świętować te szczególne dla mnie chwile wraz z gronem społeczności Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, obchodzącej swoje pięćdziesięciolecie powstania. Z tej okazji Święta Wydziału składam najlepsze życzenia całej społeczności akademickiej Uczelni życząc dalszych sukcesów naukowych i osiągnięć na różnych płaszczyznach działalności akademickiej. To co dane mi było zaobserwować przyjeżdżając do Lublina w minionych ośmiu latach, to ofensywna, odważna i zorientowana na przyszłość i młodość strategia Waszej Alma Mater. Jestem niezwykle wdzięczny za to wyróżnienie. Moje słowa podziękowania wiążę ze zobowiązaniem służenia Waszej i od dzisiaj też mojej Alma Mater w jej rozkwicie i aspiracjach.*

*Serdecznie dziękuje 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, przedstawicielom Politechniki Opolskiej, a w szczególności moim współpracownikom z Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej.*

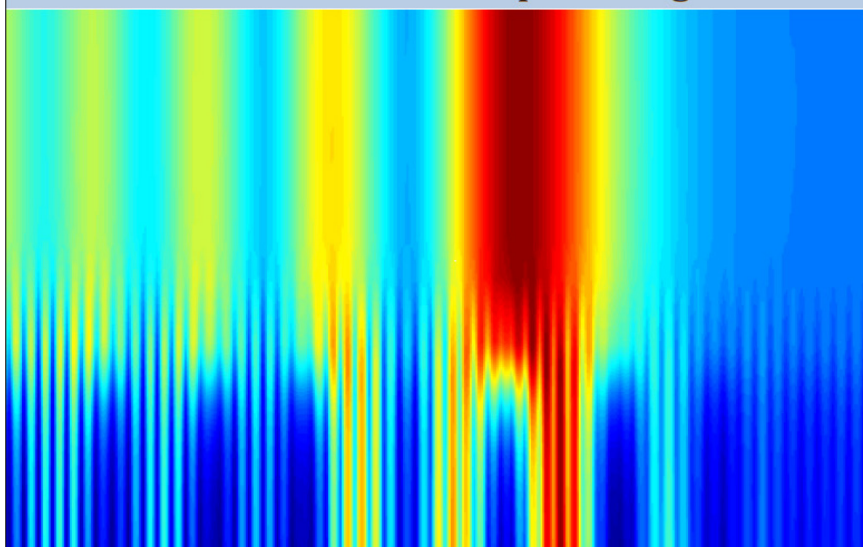
*Moją osobowość ukształtowały różne interakcje z różnymi ludźmi, od wielu z nich czerpałem wiedzę, od innych doświadczenie życiowe, od innych poczucie humoru i sposób dystansowania się od siebie. Nie sposób wymieniść tego, co obcowanie z drugim człowiekiem daje każdemu z nas. Dzisiaj mogę powiedzieć, 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 spełnionym, bo to co mnie spotkało przeżywam w gronie moich przyjaciół i osób mi bliskich.*

*Janusz Mroczka*

**Światło jako narzędzie pomiarowe  
w charakterystyce średnicy  
transparentnego włókna**



**Janusz Mroczka**

**2014**



## Słowo wstępne

*Tu es responsable pour toujours de ce que tu as apprivoisé.*

*- Pozostajesz na zawsze odpowiedzialny za to, co oswoiłeś.*

(A.de Saint-Exupéry, *Mały Książe*)

Postęp dokonany w metrologii optycznej uczynił z niej wyrafinowaną dyscyplinę, która łączy dokonania fizyki, matematyki, informatyki, inżynierii i wielu innych. Ten postęp wymusza naturalny podział dyscypliny naukowej na hermetyczne, wąskotematyczne wątki posługujące się metodami, wpisującymi się w schemat matematyczno-empirycznego paradygmatu poznawczego. Rolę matematyczno-empirycznej metody wyraża choćby pogląd Romana Ingardena, według którego „zdanie, dla którego nie ma metody sprawdzania, sensu nie ma”<sup>\*</sup>. Niewątpliwie, uprawianie nauki ma swój początek w ciekawości świata, przekształcającej się stopniowo w pasję tworzenia w drodze ku poznaniu prawdy i zrozumienia jako fundamentów współczesnej hermeneutyki. Poprzez łączenie obserwacji z wiedzą i doświadczeniem powstają z kolei modele rzeczywistości, które funkcjonują w postaci praw, twierdzeń, hipotez, czy dobrze wyodrębnionych strukturalnych elementów – matematycznych równań. Niełatwo oprzeć się wrażeniu, że granice matematyczno-empirycznego realizmu nie leżą w niedoskonałości matematycznego języka opisu i innych teoretycznych narzędzi, lecz w możliwości empirycznej weryfikacji obserwacji i jej matematycznej formy. Można zaryzykować stwierdzenie, że to rozwój *narzędzi* poznania, przyrządów pomiarowych, jest jednym z najistotniejszych czynników wpływających na granice wyjaśnienia i realizmu.

Postęp naukowo-techniczny rodzi coraz nowsze zagadnienia poznawcze. Te z kolei stymulują rozwój metod i narzędzi pomiarowych. Niniejsza praca porusza zagadnienia z obszaru nieinwazyjnej metrologii optycznej właściwości geometrycznych transparentnych włókien homogenicznych i wielowarstwowych w postaci światłowodów włóknistych, szklanych nitek stosowanych w materiałach kompozytowych, kapilar wykorzystywanych w elektroforezie kapilarnej czy analityce medycznej, etc. Rozwój technologiczny w tym zakresie decyduje o jakości produkcji przemysłowej, a w przypadku techniki światłowodowej może być przedmiotem narodowej specjalności w międzynarodowym podziale rynku *high-tech*. Problematyka nieinwazyjnej charakterystyki cech geometrycznych transparentnych struktur jest często dyskutowanym, ważkim wątkiem obecnym we współczesnej literaturze przedmiotu. Szczególne zainteresowanie badaczy

---

<sup>\*</sup> J. M. Bocheński *Wspomnienia*, Antyk (2008).

i trud poznawczy skierowany jest ku zwiększeniu dokładności pomiaru średnicy światłowodu włóknistego i umożliwieniu charakterystyki jego struktury wewnętrznej metodą *in situ* w czasie rzeczywistym, w tym pomiaru średnicy rdzenia, detekcji zaburzeń strukturalnych, etc. Dotychczasowe próby rozwiązania tych problemów należy uznać za nieudane, przede wszystkim ze względu na znaczną złożoność pola pomiarowego, powstałego w drodze rozpraszania wiązki laserowej na wysoko przezroczystym włóknie, a także wrażliwość układów pomiarowych na liczne zakłócenia powstające w warunkach przemysłowych. Rozwiązanie zarysowanych powyżej celów jest zagadnieniem trudnym i wymaga prowadzenia analiz w drodze matematyczno-empirycznych poczynań.

Poruszane w pracy wątki obejmują charakterystykę dwóch metod pomiarowych, które wykorzystują promieniowanie rozproszone rejestrowane pod małym kątem (metoda dyfraktometryczna) i pod kątem dużym (interferometria tęczy). W intencji autora było przedyskutowanie przede wszystkim jakościowych aspektów badawczych oraz zaakcentowanie związku przyczynowo-skutkowego w ramach zarysowanej metody poznawczej. Spójność i syntetyczność poruszanych zagadnień została ukazana drogą symulacji numerycznych z wykorzystaniem kompleksowych i aproksymacyjnych modeli matematycznych.

# 1. Światło jako nieinwazyjne narzędzie poznania

Zapytałam dziecko niosące świeczkę:  
– Skąd pochodzi to światło?  
Chłopczyk natychmiast ją zdmuchnął.  
– Powiedz mi, dokąd teraz odeszło – odparł. – Wtedy ja powiem ci, skąd pochodzi.

(J. Carroll, *Poza Ciszą*, 1992)

## 1.1. Metody nieinwazyjnej charakterystyki optycznej w nauce i technice

Najpowszechniejsze metody poznawcze, w szczególności te nieinwazyjne, opierają się na zmysłach człowieka. To obserwacje kształtują obraz rzeczywistości w jego umyśle, ale ich interpretacja jest cechą osobniczą, na którą ma wpływ perspektywa percepcji, wiedza i doświadczenie obserwatora. Jeśli można mówić o niezależnej interpretacji rzeczywistości, to niewątpliwie doświadczenia empiryczne nadają obserwacjom wartości jakościowej i ilościowej. Narzędziami empirycznego poznania są z kolei metody i przyrządy pomiarowe.

Szczególny wątek teoretyczno-empirycznych prac naukowych stanowią badania w dziedzinie nieinwazyjnej charakterystyki właściwości fizycznych obiektów syntetycznych jak i biologicznych, które wykorzystują światło jako *narzędzie* poznania. Immanentną cechą takiego narzędzia jest nieinwazyjność, ale także potencjalnie duża czułość i selektywność, a także możliwość realizacji pomiaru *in situ* w czasie rzeczywistym [1]. Co więcej, praca w paśmie terahercowym, w zakresie fal widzialnych, przekłada się na doskonałą zdolność rozdzielczą rzędu ułamków mikrona.

Interakcja światła z ośrodkiem materialnym ma formę wymiany energii. Natura tej wymiany zależy od dwóch zjawisk – rozpraszania i absorpcji. W efekcie rozpraszania dochodzi do wzbudzenia atomów ośrodka i sprężystej bądź niesprężystej reradiacji energii w różnych kierunkach. Z kolei absorpcja dokonuje się w wyniku konwersji energii pola elektromagnetycznego przez wzbudzone atomy ośrodka w inną formę energii, np. ciepło. W ujęciu makroskopowym, rozproszenie światła ujawnia się w postaci takich zjawisk jak dyfrakcja, odbicie i załamanie i ich wzajemnej interakcji.

Rozproszenie światła jest zjawiskiem spełniającym zasadę przyczynowości, która określa relacje pomiędzy przyczyną – falą elektromagnetyczną działającą na cząstkę (lub zbiór cząsteczek), a skutkiem, czyli światłem rozproszonym [2,3]. Analiza światła rozproszonego może więc ujawnić naturę cząstki i ma formę postępowania odwrotnego.

Dotychczasowe doświadczenia autora w zakresie metod optycznej charakterystyki obiektów złożonych, obejmują m.in. problematykę pomiarów wielkości cząstek ośrodków dyspersyjnych metodami optycznymi [4-11], w tym hybrydowe metody w opisie transmitancji światła w warunkach rozproszenia wielokrotnego dla monodispersyjnego rozkładu wielkości cząstek [12,13] oraz metody inwersyjne wykorzystujące sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej [14], wykorzystanie spektralnych i polaryzacyjnych właściwości laserowego promieniowania rozproszonego w nieinwazyjnym badaniu materiałów kompozytowych [15-17], nieinwazyjną diagnostykę parametrów optycznych i właściwości rozproszeniowych pełnej krwi i erytrocytów [18], modelowania matematycznego rozproszenia światła przez cząstki niesferyczne i ich agregaty [19-21], modelowania i symulacji matematycznych przepływów wielofazowych, modelowania matematycznego trójwiązkowej anemometrii dopplerowskiej w określaniu położenia i prędkości cząstek w ośrodkach wielofazowych [22], a także nieinwazyjny pomiar *in situ* średnicy homogenicznych i niehomogenicznych, przezroczystych włókien wykorzystywanych m.in. w materiałach kompozytowych i jako światłowody telekomunikacyjne i pomiarowe [23-26]. Cechą szczególną podejmowanych wątków badawczych jest interdyscyplinarność, obejmująca zagadnienia modelowania fizycznego, matematycznego i metrologicznego, algorytmizacji problemu odwrotnego, analizy sygnałów i jej praktycznej realizacji za pomocą procesorów sygnałowych, wiedzy z zakresu metod obrazowania optycznego i przetwarzania danych pomiarowych w trójwymiarowej przestrzeni i czasie, etc.

## **1.2. Charakterystyka szklanego włókna na podstawie światła rozproszonego**

Postęp jest nierozzerwalnie związany z wdrażaniem nowych technologii i doskonaleniem obecnych. W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój inżynierii materiałowej włókien wykonywanych ze szkła bądź polimeru. Miniaturowe homogeniczne włókna szklane o średnicy mniejszej od 40 mikrometrów, nazywane włóknami wzmacniającymi (*reinforcement fibers*) lub włóknami kompozytowymi (*composite fibers*), są podstawowym komponentem konstrukcyjnym materiałów kompozytowych [27]. Kompozyty budowane z wykorzystaniem takich włókien są lekkie, wytrzymałe i odporne na działanie niekorzystnych warunków. Dzięki swym właściwościom mechanicznym i termicznym,

znalazły one zastosowanie w takich produktach jak: wytrzymałe tkaniny, ubrania kwasoodporne i ognioodporne, materiały budowlane, materiały produkowane na potrzeby elektroniki, korpusy nowoczesnych samochodów i samolotów i wiele innych. Szkło i polimer są surowcami, z których wytwarza się światłowody włókniste (*optical fibers*) i specjalne, np. fotoniczne (*photonic-crystal fibers*) czy kapilarne (*capillary optical fibers*), powszechnie wykorzystywane w telekomunikacji i metrologii. Technologia niehomogenicznych struktur szklanych i polimerowych obejmuje również kapilary o średnicy wynoszącej 350÷400  $\mu\text{m}$  z rdzeniem 10÷100  $\mu\text{m}$ , stosowane np. w elektroforezie kapilarnej i analizie medycznej.

Technologia produkcji szklanego włókna polega zwykle na wytopie masy szkła umieszczonych w tyglu grzewczym lub lokalnym topieniu szklanej preformy w piecu indukcyjnym [27,28]. Już na etapie wytwarzania włókna zachodzi potrzeba charakterystyki jego parametrów, np. średnicy, ale nierzadko wymagane jest monitorowanie obecności zaburzeń strukturalnych (pęcherze powietrza, zanieczyszczenia), wibracji, siły wyciągania, itp. Pomiar wykonywany w warunkach in situ umożliwia kontrolowanie parametrów procesu technologicznego w pętli sprzężenia. Realizacja metrologiczna takiego zagadnienia jest trudna, bowiem potencjalna technika pomiarowa powinna spełniać następujące wymagania:

- nieinwazyjność, czyli pomiar bez użycia mechanicznych elementów,
- odporność na zakłócenia (głównie wibracje włókna) i czynniki, które trudno jest ustalić (izotropowe i anizotropowe zmiany współczynnika załamania materiału) lub nie są znane (geometria i profil temperaturowy włókna),
- działanie w czasie rzeczywistym,
- dokładność pomiaru spełniająca wymagania obowiązujących norm.

W świetle powyższych kryteriów, szczególnego znaczenia nabierają te techniki pomiarowe, które wykorzystują promieniowanie optyczne jako narzędzie poznawcze. Wśród metod charakterystyki optycznej zaadaptowanych na skalę przemysłową należy wymienić dyfraktometrię laserową w ocenie średnicy włókna wzmacniającego [29] oraz technikę laserowej wiązki skanującej (*Laser Beam Scanning*, LBS) w pomiarze średnicy światłowodu [30-32].

Wykorzystanie dyfrakcji promieniowania laserowego jako pola zjawisk w nieinwazyjnej charakterystyce włókna, dokonało się w drodze naturalnej próby adaptacji dobrze opracowanych metod nieinwazyjnej oceny cząstek silnie pochłaniających światło lub nieprzepuszczalnych. Do szczególnych cech metod dyfrakcyjnych należy zaliczyć stosunkowo nieskomplikowany układ pomiarowy, realizujący najczęściej proste przekształcenie Fouriera, a także prostotę modelu matematycznego zjawiska rozpraszania światła, opartego na

zasadzie Huygensa-Fresnela. Rozwój metod obliczeniowych prowadzący do weryfikacji istniejących modeli rozproszenia dowiódł jednak, że prosty model dyfrakcyjny jest nieadekwatny w opisie rozpraszania światła na włóknie szklanym, charakteryzującym się niską tłumiennością w paśmie optycznym, co może prowadzić do powstania nadmiernych błędów metody [29].

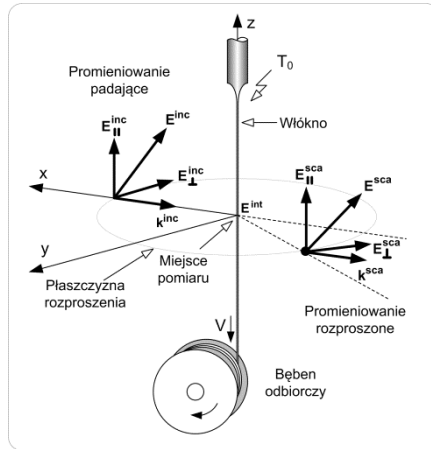
Ideą techniki LBS jest przemieszczanie uformowanego strumienia światła laserowego w płaszczyźnie prostopadłej do osi symetrii badanego włókna. Sygnał rejestrowany przez matrycę detektorów, poddany filtracji z zastosowaniem metod cyfrowego przetwarzania sygnału, zawiera informację o średnim rozmiarze włókna na pewnej jego długości, zależnej od prędkości wyciągania włókna, częstotliwości przemieszczania wiązki i czasu akwizycji danych. Istotną wadą, obecnie najpopularniejszej metody charakterystyki światłowodów, jest pomiar z opóźnieniem w odniesieniu do dynamiki procesu technologicznego. Brak informacji w reżimie czasu rzeczywistego prowadzi do trudności interpretacyjnych pomiaru dokonywanego metodą LBS [33], coraz bardziej istotnych w obliczu stałego postępu technologicznego wyrażającego się m.in. coraz większą prędkością wyciągania światłowodów (obecnie do  $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Aparatura działająca w myśli zasady LBS wymaga ponadto kompensacji wpływu promieniowania przechodzącego przez włókno na daną pomiarową [34]. Taka kompensacja polega zwykle na przeprowadzeniu procedury kalibracyjnej z wykorzystaniem wzorcowego włókna, a sygnał pomiarowy przetwarzany jest z wykorzystaniem dedykowanych, opracowanych przez producenta, algorytmów.

W ogólnej dyskusji na temat nieinwazyjnych metod charakterystyki szklanych włókien nie sposób pominąć metod interferometrycznych, w tym laserowej interferometrii dopplerowskiej [35] (*Shadow Doppler Interferometry*, SDI) oraz fazowej [36,37] (*Phase Doppler Interferometry*, PDI), a także spektralnej optycznej tomografii koherencyjnej [38-41] (*Fourier Domain Optical Coherence Tomography*, FDOCT). Ze względu na wysoką podatność na zakłócenia i złożoność układów pomiarowych, metody te nie znajdują praktycznej adaptacji na potrzeby pomiaru średnicy włókna w warunkach przemysłowych.

### **1.3. Matematyczne metody opisu rozproszenia światła na szklanym włóknie**

Na Rys. 1.1 przedstawiono szkic procesu wyciągania szklanego włókna wraz z geometrią rozpraszania światła. Wyciąganie włókna odbywa się poprzez lokalne podgrzewanie szklanej preformy bądź roztapianie szkła w specjalnych tyglach, a powstała struga szklana nawijana jest na zespół bębnow [27,28]. Włókno oświetlone jest w miejscu pomiaru wiązką promieniowania o składowej

elektrycznej  $\mathbf{E}^{inc}$ , co wywołuje zaindukowanie pola wewnętrznego cząstki  $\mathbf{E}^{int}$ . Pewna część  $\mathbf{E}^{inc}$  ulega interakcji z cząstką tworząc pole rozproszone  $\mathbf{E}^{sca}$ .



Rys.1.1. Schemat procesu wyciągania włókna i geometria modelu rozpraszania promieniowania.

Ogólny problem rozpraszania światła polega na znalezieniu relacji matematycznych, które wiążą pole rozproszone i wewnętrzne z polem padającym. Z kolei zagadnienie inwersyjne w nieinwazyjnej ocenie właściwości włókna polega na znalezieniu identyfikowalnego związku – relacji przyczynowo-skutkowej pomiędzy polem rozproszonym a cechą włókna podlegającą ocenie.

Narzędziem poznania naukowego są modele fizyko-matematyczne [3], przyjmujące bardziej lub mniej formalny charakter, bowiem „przedmiotem matematyki jest rzeczywistość”<sup>†</sup>. Opis matematyczny złożonych obiektów i eksperymentów może przyjmować formę modelu kompleksowego, uwzględniającego możliwie pełny zbiór wiedzy o budowie obiektu i jego działaniu, a także formę modelu uproszczonego (inaczej – aproksymacyjnego), stanowiącego zredukowaną postać modelu kompleksowego.

Kompleksowe ujęcie problematyki rozpraszania promieniowania monochromatycznego i czasowo-harmonicznego umożliwia uzyskanie wiernego obrazu rzeczywistych procesów w ramach przyczynowo-skutkowej metodologii postępowania. Skomplikowana natura pola rozproszonego, dająca swój wyraz bogactwu fizyki rozproszenia, powoduje, że modelowanie kompleksowe jest procesem trudnym, zwykle rekurencyjnym i możliwym w realizacji w uproszczonych konfiguracjach eksperymentu. Konwencjonalne podejście w modelowaniu kompleksowym polega na zapisaniu równania fali padającej płaskiej bądź sferycznej w adekwatnym układzie współrzędnych i rozwiązaniu

<sup>†</sup> Hugo Steinhaus, przedmowa do Kalejdoskopu matematycznego (1956).

równań Maxwella opisujących eksperyment dla odpowiednio sformułowanych warunków brzegowych, z wykorzystaniem np. [42-44]: metody rozdzielania zmiennych (*Separation of Variables*, SVM), rozszerzonych warunków brzegowych (*Extended Boundary Condition Method*, EBCM), czy metody potencjałów brzegowych (*Point-Matching Method*, PMM). Cechą wspólną wymienionych metod jest sposób opisu pola padającego i rozproszonego w postaci szeregów harmonik cylindrycznych, a rozwiązanie stanowią funkcje amplitudowe w postaci nieskończonych sum szeregów opisujących falę cylindryczną rozchodzącą się dookoła cylindra.

Podejście kompleksowe, ekwiwalentne swojej fizycznej i matematycznej precyzji fragmentowi rzeczywistości zamkniętej w ramy rozpatrywanego doświadczenia, prowadzi jednak do znacznego skomplikowania zagadnienia modelowania matematycznego pola rozproszonego, a w szczególności zagadnienia inwersji danych pomiarowych, mającego cechy rekonstrukcji tomograficznej. Jest tak dlatego, ponieważ zagadnienie odwrotne jest najczęściej niejednoznaczne wskutek kolinearności parametrów w strukturze rozbudowanej, a ponadto pole rozproszone jest nieliniowo zależne od właściwości obiektu rozpraszającego falę [45,46]. Co więcej, modele rozpraszania światła identyfikowalne teoretycznie w praktyce okazują się zwykle źle uwarunkowane numerycznie [7-9] i próba inwersji danych pomiarowych prowadzi do błędów obliczeń uniemożliwiających interpretację wyników. Nie bez znaczenia pozostaje fakt, że czas analizy numerycznej z wykorzystaniem modeli kompleksowych jest nierzadko relatywnie długi w odniesieniu do dynamiki zmian modelowanego procesu.

W aproksymacyjnym ujęciu problemu rozproszenia światła w ramach tzw. optyki geometrycznej (*Geometrical Optics*, GO), fala elektromagnetyczna interpretowana jest jako zbiór wyróżnialnych, elementarnych ciągów falowych, tzw. promieni [47]. Propagacja każdego z promieni spełnia zasadę Fermata. Na granicy dwóch optycznie odmiennych ośrodków, kierunek każdego z promieni wyznaczany jest z wykorzystaniem prawa Snella, natomiast amplituda i faza wynika z równań Fresnela. Ugięcie fali na cząstce opisują formuły matematyczne Fresnela (w polu bliskim) i Fraunhofera (w polu dalekim). Wypadkowe zaburzenie falowe w punkcie ułożonym w polu dalekim jest superpozycją promieni ulegających dyfrakcji, odbiciu i załamaniu. Prawa optyki geometrycznej opisują z dobrą dokładnością zjawisko rozproszenia fali wówczas, gdy rozmiar cząstki jest dużo większy niż długość rozpraszanej fali. Istotnym ograniczeniem optyki geometrycznej jest fakt, że nie opisuje ona prawidłowo natężenia światła w obszarach kaustycznych [47].

Szczególną odmianą optyki geometrycznej, która pozwala na analizę pola rozproszonego powstającego w warunkach zastosowania wiązki o niejednorodnym rozkładzie przestrzennym amplitudy, jest rozszerzona optyka geometryczna (*Extended Geometrical Optics*, EGO). Metoda ta posługuje się lokalną aproksy-

macją na niewielkiej powierzchni cząstki homogeniczną falą płaską. Dla każdego rozważanego przedziału aproksymacji stosowane są reguły optyki geometrycznej, a pole wynikowe uśredniane jest przez detektor. Szczegółowy opis tej teorii przytacza Albrecht i in [36].

Wiedza o badanym włóknie szklanym i technologii jego wytwarzania, która ma wpływ na to włókno, stanowi zbiór ograniczony i niekompletny. Ta niepełność informacji wynika zarówno ze świadomej rezygnacji jak i również wymuszonej utraty pewnej części wiedzy. W pierwszym przypadku dokonuje się selekcji tylko istotnych czynników mogących mieć wpływ na pole rozproszone na włóknie, inne uznając za nieistotne w skali rozpatrywanych zjawisk fizycznych. W drugim przypadku, ograniczony dostęp do wiedzy jest konsekwencją np. tajemnicy technologii produkcji. Systematyczna analiza źródeł literaturowych pozwala jednak na sformułowanie ogólnych postulatów na temat rozważanego ośrodka, który jest [48]:

- *Liniowy*. Promieniowanie ulegające rozproszeniu wewnątrz włókna propaguje się niewielkich dystansach a natężenie fali jest pomijalnie małe w porównaniu z natężeniem pól wewnętrznych w szkle, więc odpowiedź polaryzacyjna ośrodka jest liniową funkcją zmian natężenia pola elektrycznego.
- *Anizotropowy*. Szkło jest materiałem amorficznym wykazującym izotropię właściwości fizycznych i ich addytywność, jednak w procesie technologicznym dochodzi do utrwalenia w szkle naprężeń o podłożu mechanicznym (działanie siły wyciągającej), wywołujących anizotropię współczynnika załamania  $n$  (dwójłomność). Anizotropię współczynnika ekstynkcji  $\kappa$  (dichroizm) można pominąć ze względu na niewielkie tłumienie szkła w paśmie optycznym. Wpływ naprężeń na współczynnik załamania jest tym większy im mniejsza jest średnica włókna.
- *Dyspersyjny*. W obszarze dyspersji normalnej w zakresie częstotliwości optycznych, wartość współczynnika załamania maleje wraz ze zwiększaniem długości fali (dyspersja chromatyczna).
- *Niehomogeniczny* (pod względem przestrzennym). Niehomogeniczność, rozumiana jako niejednorodność współczynnika załamania w pewnej objętości, może mieć postać założoną, np. poprzez kształtowanie profilu refrakcyjnego, lub zaindukowaną – w postaci różnorodnych zaburzeń struktury szkła, pęcherzy powietrza, zanieczyszczeń, etc.

Parametry optyczne szklanego włókna zależą również od temperatury. W typowych konfiguracjach wież wyciągowych, kontrola średnicy dokonywana jest w miejscu, w którym włókno osiąga temperaturę otoczenia, a jego parametry fizyczne są ustalone. Wpływ temperatury topienia szkła powoduje trwale zaindukowanie naprężeń i jest przyczyną izotropowych zmian współczynnika załamania.

## 2. Dyfrakcja promieniowania o niskim stopniu spójności w charakterystyce optycznej szklanego włókna

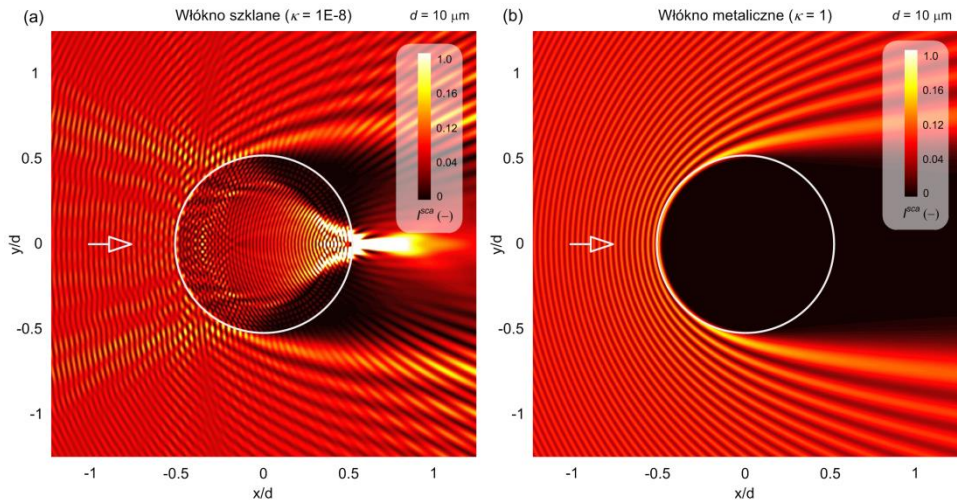
*Całą mechanikę kwantową  
da się wyprowadzić z doświadczenia  
z dwiema szczelinami*

(R. Feynman)

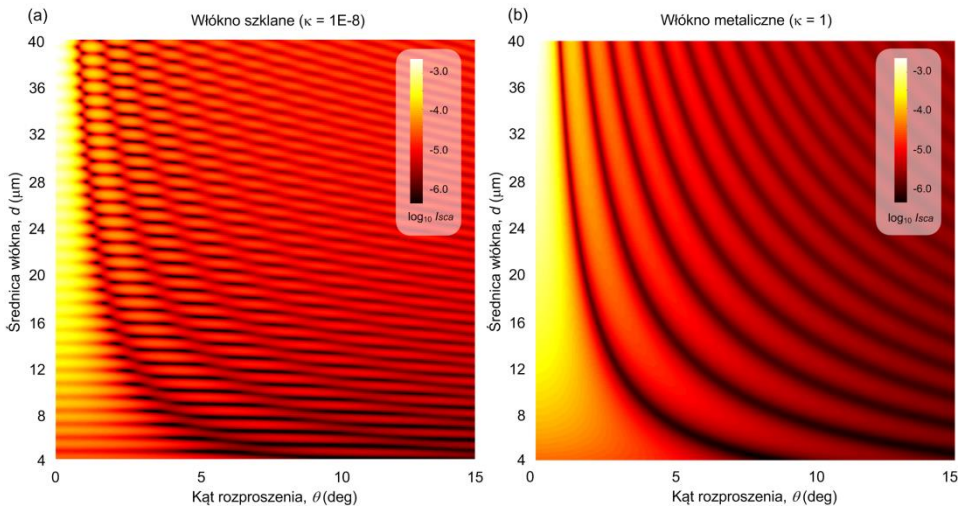
### 2.1. Problematyka wykorzystania dyfrakcji promieniowania laserowego w charakterystyce optycznej szklanego włókna

Szczególny rodzaj empirycznych technik poznania, które umożliwiają realizację pomiaru nieinwazyjnego *in situ* w czasie rzeczywistym stanowią te, które wykorzystują promieniowanie optyczne jako narzędzie pomiarowe. Metodologia poznania ma w tym przypadku charakter przyczynowo-skutkowy i polega najczęściej na ilościowym wnioskowaniu o właściwościach badanego obiektu (przyczyna) na podstawie cech zarejestrowanego i przetworzonego promieniowania rozproszonego (skutek). Taka metodologia postępowania jest fundamentem działania m.in. techniki dyfraktometrycznej, w której podstawą analizy jest promieniowanie rozproszone pod małym kątem, w tym promieniowanie ulegające ugięciu na cząstce. Dyfrakcja stanowi wyjątkowo atrakcyjne pole zjawisk w nieinwazyjnym pomiarze, bowiem w ujęciu analogii fizycznych, którymi posługuje się teoria dyfrakcji Fraunhofera, pole ugięte nie zależy od właściwości refrakcyjnych cząstki. Dodatkowo, rejestracja pola ugiętego odbywa się w relatywnie nieskomplikowanym układzie pomiarowym.

Technika dyfraktometrii promieniowania spójnego została starannie zbadana i wdrożona na potrzeby nieinwazyjnej charakterystyki obiektów nieprzezroczystych, np. metalowego drutu [49]. Próba aplikacji tej metody do charakterystyki cząstek charakteryzujących się niewielką tłumiennością w pasmie optycznym jest trudna, bowiem prosta interpretacja pola rozproszonego pod małym kątem według zasady Huygensa-Fresnela, słuszna dla obiektów nieprzezroczystych, jest niewystarczająca do opisu rozproszenia światła na obiektach o niewielkiej tłumienności. Istotę tego problemu ilustruje rysunek porównawczy, obrazujący pole rozproszone w sąsiedztwie i wewnątrz włókna szklanego, Rys. 2.1a, oraz włókna metalicznego, silnie tłumiącego promieniowanie, Rys. 2.1b.



**Rys. 2.1.** Unormowane natężenie promieniowania wewnątrz włókna i w polu bliskim w płaszczyźnie rozpraszania: (a) włókno szklane (b) włókno metaliczne ( $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ ,  $m = 1,5505 + \kappa$ ).



**Rys. 2.2.** Wykres poziomicowy logarytmu natężenia fali rozproszonej (jednostki dowolne) w funkcji kąta rozproszenia i średnicy włókna (wg. teorii Lorenza-Mie): (a) dla włókna szklanego, (b) dla włókna metalicznego ( $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ , pol. TM,  $m = 1,5505 + \kappa$ ).

Promieniowanie propagujące się przez strukturę szklanego włókna istotnie wpływa na pole rozproszone pod małym kątem. Dokonując symulacji natężenia pola rozproszonego pod małym kątem w funkcji zmian średnicy szklanego włókna, Rys. 2.2a, można zauważyć obecność znaczących nieliniowości, przybierających nierzadko formę mikroform rezonansowych (*Morphology-*

*Dependent Resonances*, MDR). Eksperymentalnie, tego typu nieliniowości nie są obserwowane w polu silnie tłumiących cząstek jak na Rys. 2.2b, bowiem promieniowanie jest tłumione lub nie wnika do wnętrza.

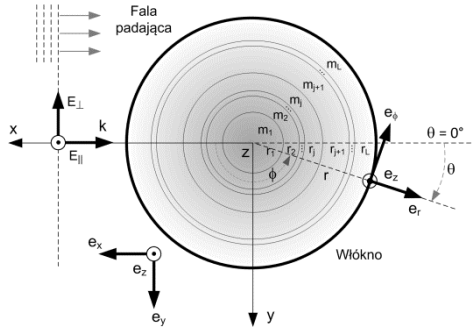
Sformułowanie kompleksowego opisu rozpraszania promieniowania na szklanym włóknie wymaga rozwiązania równania fali płaskiej w cylindrycznym układzie współrzędnych, dla odpowiednio sformułowanych warunków brzegowych z wykorzystaniem np. metody rozdzielania zmiennych [42-44]. Takie podejście prowadzi jednak do znacznego skomplikowania zagadnienia modelowania matematycznego pola rozproszonego, a w szczególności zagadnienia inwersji danych pomiarowych.

Jako, że w ujęciu teorii Lorenza-Mie nie jest możliwa przestrzenna separacja składowych rozproszonych np. składowych ugiętych, opisane w literaturze techniki inwersji danych pomiarowych z pola rozproszonego na szklanej cząstce bazują na analizie zarejestrowanego i wstępnie przetworzonego sygnału. Procedura inwersji danych pomiarowych uzyskanych z pola rozproszonego pod małym kątem na transparentnym włóknie oświetlonym promieniowaniem laserowym opracowana przez Onofri'ego i in. [29] (*Joint Probability Method*), bazuje na wiedzy apriorycznej o badanym włóknie, zgromadzonej drogą symulacji numerycznych według teorii Lorenza-Mie, porównywanej za pomocą estymatora korelacyjnego z rzeczywistym polem rozproszonym. Wymagana jest przy tym dokładna znajomość współczynnika załamania włókna oraz jego zmian w procesie kształtowania technologicznego. Co ważne, wartość błędu pomiarowego jest nieokreślona w warunkach wystąpienia rozpraszania rezonansowego. Podjęte zostały także próby realizacji zagadnienia odwrotnego na podstawie identyfikacji ekstremów rezonansowych [50,51]. Nadzwyczajna precyzja charakterystyki optycznej średnicy szklanego włókna w skali nanometrycznej jest jednak okupiona silną podatnością na inne parametry eksperymentu, takie jak długość fali, polaryzacja, kształt i orientacja włókna względem fali padającej.

## **2.2. Pole rozproszone na szklanym włóknie pod małym kątem w warunkach oświetlenia promieniowaniem o niskim stopniu spójności czasowej**

### *2.2.1. Model rozproszenia*

Przedmiotem analizy jest nieskończenie długie, niemagnetyczne i liniowe włókno o średnicy  $d$ , którego oś symetrii pokrywa się z osią  $z$  prostokątnego układu współrzędnych, Rys. 2.3. Włókno ma budowę warstwową i osiowosymetryczną, a własności refrakcyjne każdej z warstw definiuje parametr rozmiarowy  $x_j = 2\pi r_j / \lambda$  i zespolony współczynnik załamania:



**Rys.2.3.** Geometria rozproszenia światła na wielowarstwowym włóknie.

$$m_j(\lambda) = n_j(\lambda) + i\kappa_j, \quad j = 1, 2, \dots, L, \quad (2.1)$$

przy czym  $r_j$  jest promieniem warstwy  $j$ ,  $\lambda$  jest długością fali,  $L$  – liczbą warstw,  $\kappa_j$  – współczynnikiem ekstynkcji. Zmienność  $n_j$  względem długości fali jest poddyktowana dyspersją normalną materiału (szkła, polimeru, kryształu, etc.) w paśmie widzialnym i jest zwyczajowo wyrażana za pomocą formuł interpolacyjnych Sellmeiera, Laurenta, Cauchy’ego, Herzberga i in. [52]. Niniejsze studium obejmuje analizę rozproszenia na włóknach wykonanych z czystej krzemionki ( $\text{SiO}_2$ ), a dyspersyjne zmiany współczynnika załamania opisuje formuła Sellmeiera, ograniczona do trzech pierwszych wyrazów w postaci:

$$n_j(\lambda) = \left[ 1 + \sum_{i=1}^3 A_i \lambda^2 / (\lambda^2 - \ell_i^2) \right]^{1/2} + D_j, \quad (2.2)$$

$$A_i = \begin{Bmatrix} 0.6961663 \\ 0.4079426 \\ 0.8974794 \end{Bmatrix}, \ell_i = \begin{Bmatrix} 0.0684043 \\ 0.1162414 \\ 9.896161 \end{Bmatrix},$$

Gdzie  $A_i, \ell_i$  są empirycznymi współczynnikami Sellmeiera [53],  $D_j$  – wyraża przesunięcie charakterystyki dyspersyjnej  $\text{SiO}_2$  wskutek domieszkowania. Niezależność kształtu charakterystyki  $n_j(\lambda)$  od domieszki jest dobrym przybliżeniem dla typowych światłowodów [54].

Pole padające na włókno ma postać skolimowanej, padającej normalnie wiązki o jednorodnym rozkładzie intensywności w obrębie objętości pomiarowej. Rozpatruje się stan polaryzacyjny TM, dla którego wektor elektryczny fali padającej jest równoległy względem osi włókna i poprzeczny względem wektora falowego  $\mathbf{k} = -k\mathbf{e}_x = -(2\pi/\lambda)\mathbf{e}_x$ , przy czym  $\lambda$  jest długością fali. Rozkład widmowy źródła promieniowania aproksymowano krzywą Gaussa, typową dla źródeł o umiarkowanym poszerzeniu widmowym, takich jak np. diody elektroluminescencyjne (LED):

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left[-0.5\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma}\right)^2\right], \quad (2.3)$$

gdzie  $\lambda_0$  jest długością fali odpowiadającą maksimum emisyjnemu,  $I_0$  – natężeniem maksimum emisyjnego, zaś  $\sigma$  jest odchyleniem standardowym rozkładu związanym z szerokością połówkową widma,  $fwhm$ , relacją:

$$\sigma = fwhm / \left[2(2\ln 2)^{1/2}\right] \approx fwhm / 2.355. \quad (2.4)$$

Punktowy detektor promieniowania umieszczony jest w polu dalekim ( $kr \gg 1$ ) w miejscu określonym przez współrzędne cylindryczne ( $r, \theta, z = 0$ ). Kompleksowy opis rozproszenia promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej możliwy jest na gruncie optyki statystycznej [55]. W praktycznym przypadku, losowość rozpraszania światła wynika zarówno fluktuacji czasowych i przestrzennych fal zawartych w widmie światła padającego, jak i również z niejednorodności cząstki, która rozprasza światło. Chociaż taki sposób analizy problemu odpowiada paradygmatowi Kartezjusza, aby „Każdy problem rozbić na tyle oddzielnych, prostych elementów na ile jest to możliwe”<sup>‡</sup>, to jednak jest możliwy i uzasadniony w opisie nieskomplikowanych eksperymentów. Dlatego też proponuje się wykorzystanie bardziej opisowego niż formalnego języka. Według tej heurystyki, zespolone amplitudy fal należących do widma promieniowania zmieniają się w sposób losowy i wzajemnie niezależny. Z kolei, warunek liniowości włókna pozwala na rozpatrywanie problemu rozproszenia każdej z fal niezależnie, zatem natężenie rozproszone zmierzone przez detektor interpretowane jako niekoherentna (czyli niezależna od fazy) superpozycja wszystkich fal.

W niniejszej pracy zagadnienie rozpraszania monochromatycznej fali płaskiej rozpatrywane jest w ujęciu kompleksowym, tzn. rozwiązanie ma postać funkcji natężenia wynikającej z rozwiązania równania falowego w cylindrycznym układzie współrzędnych i przy wykorzystaniu metody rozdzielania zmiennych [47,56]. Konwencjonalny zapis relacji pomiędzy składowymi wektorowymi pola padającego  $E_{\parallel}^{inc}$  i rozproszonego  $E_{\parallel}^{sca}$  wykorzystuje tzw. funkcję amplitudową  $T_1$ , zależną od kąta obserwacji [56]:

$$E_{\parallel}^{sca}(r, \theta, t) = \exp(i3\pi/4) (2/\pi kr)^{1/2} T_1(\theta) \times E_{\parallel}^{inc} \exp(ikr - i\omega t), \quad (2.5)$$

gdzie  $\omega$  jest pulsacją fali,

---

<sup>‡</sup> Kartezjusz, *Rozprawa o metodzie*. Wydawnictwo Marek Derewiecki (2009).

$$T_1(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_{nl} \exp(-in\theta) = b_{0l} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} b_{nl} \cos(n\theta). \quad (2.6)$$

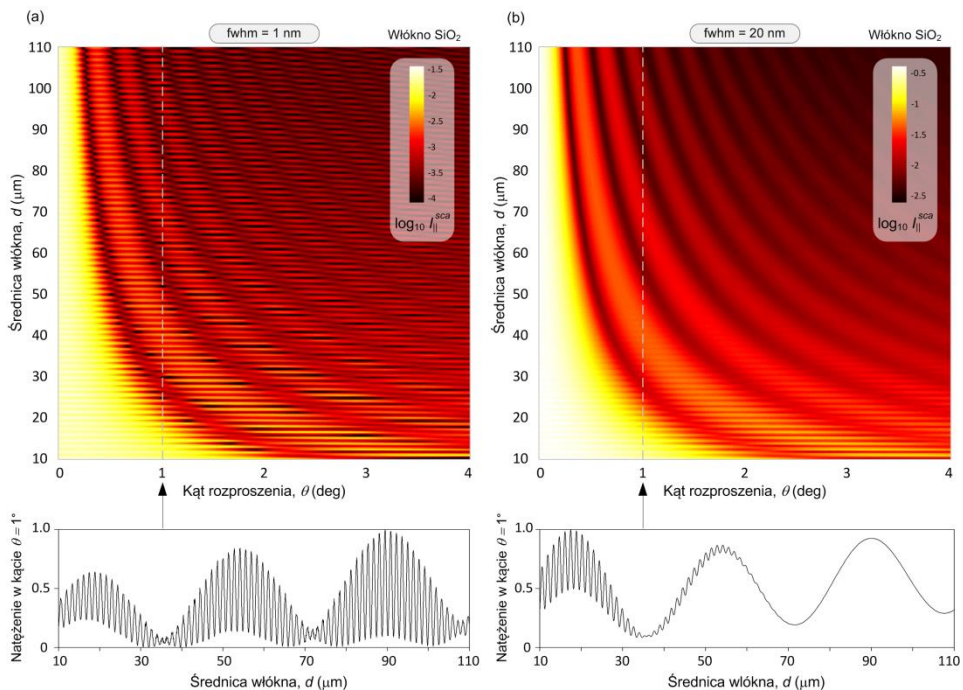
$b_{nl}$  jest współczynnikiem rozwinięcia rozproszonego pola elektromagnetycznego, zależnym od morfologii włókna oraz parametrów fali padającej. Dla włókna wielowarstwowego, parametr ten wyrażony jest następująco [57]:

$$b_{nl} = \frac{m_L H_{b,n}^L(m_L x_L) J_n(x_L) - J_n'(x_L)}{m_L H_{b,n}^L(m_L x_L) H_n^{(1)}(x_L) - H_n^{(1)'}(x_L)}. \quad (2.7)$$

$J_n$  oznacza funkcję Bessela pierwszego rodzaju,  $H_n^{(1)}$  – funkcję Hankela pierwszego rodzaju, apostrof oznacza pochodną funkcji względem jej argumentu,  $H_{b,n}^{(j)}$  to współczynnik rozproszenia dla warstwy  $j$ , wyznaczany rekursywnie, począwszy od warstwy  $j = 1$ , dla której osiąga wartość  $H_{b,n}^{(1)} = J_n'(m_1 x_1) / J_n(m_1 x_1)$ . Szczegóły analizy rekursywnej dyskutuje Onofri [57]. Natężenie rozproszone w polu dalekim, interpretowane jako uśredniona po czasie amplituda wektora Poynting’a [56], opisuje relacja  $E_{\parallel}^{sca} \cdot E_{\parallel}^{sca*}$ , gdzie (\*) oznacza sprzężenie liczby zespolonej. W niniejszej pracy zawarto również wątki analizy rozproszenia fali na cylindrze jednorodnym z wykorzystaniem rozwinięcia pola rozproszonego w szeregi Debye’go, co pozwoliło dekompozycję pola rozproszonego w komponenty, posiadające czytelną interpretację w zakresie pojęć i praw optyki geometrycznej. Współczynnik  $b_n$  odpowiedni do tej analizy można znaleźć w pracy Li i in [58].

### 2.2.2. Natura pola rozproszonego

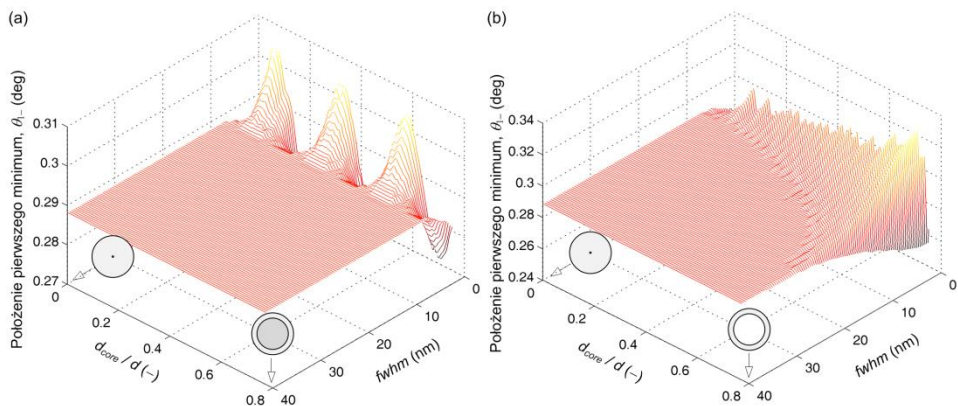
Losowe oddziaływanie rozproszonych fal cząstkowych wydzielonych z widma promieniowania oświetlającego w polu dalekim, funkcjonuje jako uśrednianie pola rozproszonego pod małym kątem w dziedzinie przestrzeni, lub – równoważnie, filtracja dolnoprzepustowa w dziedzinie częstotliwości. Dla zilustrowania tej cechy pola rozproszonego, na Rys. 2.4 przedstawiono dwa wykresy poziomicowe natężenia pola rozproszonego  $I_{\parallel s}$  w kącie rozproszenia  $\theta = 0 \div 5^\circ$  oraz w zakresie zmian średnicy homogenicznego  $d$  włókna od 10 do 110  $\mu\text{m}$ , sporządzone dla odmiennych szerokości linii widmowej źródła, tj. 1 nm (Rys. 2.4a) oraz 20 nm (Rys. 2.4b). Część rzeczywistą współczynnika załamania wyrażono przy użyciu formuły interpolacyjnej Sellmeier’a, ograniczonej do trzech pierwszych wyrazów według równania (2.2), przy czym  $D = 0$ . Spektrum źródła promieniowania o gaussowskiej obwiedni podzielono na  $N = 1345$  dyskretnych składowych rozmieszczonych w jednakowych odstępach względem



**Rys.2.4.** Diagramy logarytmu natężenia rozproszonego (jednostki dowolne) dla przypadku fali padającej, cechującej się niskim stopniem spójności czasowej; szerokość połówkowa widma promieniowania padającego wynosi: (a) 1 nm, (b) 20 nm ( $\lambda_0 = 0,6328 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 0,5656 \div 0,7 \mu\text{m}$ , pol. TM, szkło SiO<sub>2</sub>,  $\kappa = 1\text{E-}8$ ).

maksimum  $\lambda_0 = 0,6328 \mu\text{m}$  w zakresie od  $0,5656$  do  $0,7 \mu\text{m}$ . W świetle o najmniejszej wartości  $fwhm$ , położenia kolejnych prążków są modulowane wysokoczęstotliwościową składową, znacznie komplikując tym samym realizację zadania odwrotnego, polegającego na pośrednim pomiarze średnicy włókna. Zwiększenie  $fwhm$  skutkuje wytlumieniem form modulujących, lecz stopień tego wytlumienia zależy od średnicy. Taka zależność wynika z faktu, że wraz ze wzrostem średnicy włókna (lub, równoważnie, parametru rozmiarowego  $\pi d/\lambda_0$ ), dochodzi do coraz większej koncentracji prążków dyfrakcyjnych w obszarze prążka centralnego.

Wyniki powyższej analizy wskazują, że możliwe jest takie dobranie warunków eksperymentu, aby promieniowanie propagujące się przez strukturę szklanego włókna miało nieznaczący wpływ na pole rozproszone pod małym kątem. Fakt ten daje również podstawy do przypuszczenia, że struktura refrakcyjna włókna w takich warunkach również nie ma wpływu na to pole. W celu weryfikacji tego przypuszczenia, dokonano obliczeń pola rozproszonego pod małym kątem na dwóch włóknach o średnicy zewnętrznej  $d = 125 \mu\text{m}$ : (i)



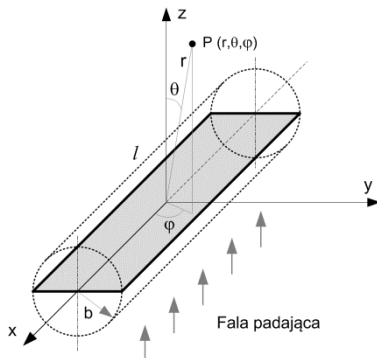
**Rys.2.5.** Wpływ średnicy (a) rdzenia światłowodu o skokowym profilu refrakcyjnym, (b) rdzenia powietrznego kapilary, na pozycję pierwszego minimum w polu rozproszonym pod małym kątem. Szerokość połówkowa widma promieniowania padającego wynosi  $fwhm$  ( $d = 125 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_0 = 0,6328 \mu\text{m}$ ,  $m_{clad}(\lambda_0) = 1,45702 + i1E-7$ ,  $m_{core} = m_{clad} + 0.02$  /światłowód/,  $m_{core} = 1$  /kapilara/).

światłowodzie o skokowym profilu refrakcyjnym, (ii) kapilarze z rdzeniem powietrznym. Założono, że oba włókna wykonane są z krzemionki ( $\text{SiO}_2$ ) o własnościach dyspersyjnych wyrażonych równaniem (2.2). Krzywą dyspersyjną rdzenia światłowodu,  $m_{core}(\lambda)$ , przesunięto względem krzywej dyspersyjnej płaszczka o stałą wartość wynoszącą  $D = +0,02$ . Wyniki obliczeń pola rozproszonego ukazano na Rys. 2.5a, przedstawiającym zależność położenia pierwszego ciemnego prążka  $\theta_{1-}$  w funkcji ilorazu średnicy rdzenia światłowodu i płaszczka  $d_{core}/d = (0.01, 1, 1.1 \dots 100)/125 \mu\text{m}$ , wykonaną dla wybranych wartości  $fwhm$  źródła promieniowania. Położenie prążka ustalono z dokładnością  $\pm 0,001^\circ$ . Analogiczną funkcję obliczono dla przypadku kapilary, Rys. 2.5b. Na obu wykresach widoczne są obszary, ilustrujące małą podatność lub niewrażliwość  $\theta_{1-}$  na obecność rdzenia. Ta osobliwa cecha promieniowania rozproszonego pod małym kątem umożliwia realizację analizy inwersyjnej, prowadzącej do poznania średnicy włókna, która da wynik bezwzględny, tj. niepodatny na morfologię włókna i jej izotropowe i anizotropowe zmiany, wynikające z wpływu temperatury, naprężeń, lokalnych i rozciągniętych wad materiałowych (pęcherze powietrza, zanieczyszczenia, zaburzenia gęstości), etc.

### 2.3. Inwersja danych pomiarowych z pola rozproszonego pod małym kątem

Inwersja danych pomiarowych ma doprowadzić do uzyskania jednoznacznej informacji o średnicy badanego włókna. W tym celu wykorzystano aproksyma-

cyjny model przyczynowy (wprost), którego struktura wynika z założenia,



**Rys.2.6.** Ugięcie fali płaskiej na nieprzezroczystym cylindrze o długości  $l$ .

że obiekt rozpraszający promieniowanie ma postać nieprzezroczystej przeszkody. Próba aproksymacji pola rozproszonego na szklanym włóknie modelem opartym na zasadzie Huygensa-Fresnela jest uzasadniona w świetle rezultatów analizy z poprzedniego paragrafu, według których światło analizowane pod małym kątem w warunkach rozpraszania promieniowania niespójnego, wykazuje cechy promieniowania ugiętego.

Rozważmy nieprzezroczystą, prostokątną przeszkodę o długości  $l$ , oświetloną falą płaską o długości  $\lambda_0$  pod kątem prostym, Rys. 2.6. W przybliżeniu Fraunhofera, tj.  $r \gg l^2/\lambda_0$ , fala rozproszona propaguje się jak fala o sferycznym froncie, a związek pomiędzy amplitudą  $E_0$  fali padającej i amplitudą  $E_p$  fali, która uległa dyfrakcji w punkcie  $P$  może być wyrażony następująco [56]:

$$E_p = E_0 e^{ikz} - E_0 (ikr)^{-1} e^{ikr} S(\theta, \varphi), \quad (2.8)$$

gdzie  $k = 2\pi/\lambda_0$ , zaś  $S(\theta, \varphi)$  jest funkcją amplitudową [56]:

$$S(\theta, \varphi) = 0.5(1 + \cos \theta) k^2 / 2\pi \iint_G e^{-ik(x \cos \varphi + y \sin \varphi) \sin \theta} dx dy, \quad (2.9)$$

przy czym  $G$  jest polem przekroju czynnego przeszkody. Rozwiązaniem powyższej całki jest funkcja [56]:

$$S(\theta, \varphi) = 0.5(1 + \cos \theta) (blk^2/\pi) E(0.5kl \cdot \sin \theta \cos \varphi) \times E(kb \cdot \sin \theta \sin \varphi), \quad (2.10)$$

gdzie  $b = d/2$ ,  $E(u) = \sin(u)/u$ . Konwersję funkcji amplitudowej  $S(\theta, \varphi)$  dla włókna o długości  $l$ , do postaci odpowiedniej dla włókna nieskończenie długiego, tj.  $T(\theta)$ , umożliwia relacja [47]:

$$S(\theta, \varphi) = (kl/\pi) E[0.5kl \cdot (\pi/2 - \varphi)] T(\theta), \quad (2.11)$$

Dla padania normalnego, światło rozpraszane jest w płaszczyźnie z-y, stąd  $\varphi = \pi/2$ , a powyższa funkcja przy uwzględnieniu równania (2.10) przyjmuje postać:

$$T(\theta) = 0.5(1 + \cos \theta) kb \cdot E(kb \sin \theta). \quad (2.12)$$

Amplitudowa funkcja dyfrakcji nie zależy od polaryzacji fali padającej, więc  $T(\theta) = T_1(\theta)$  we wzorze (2.5). Pierwsze minimum funkcji dyfrakcji,  $\theta_{1-}$ , czyli zero funkcji  $E(u)$ , związane jest ze średnicą włókna relacją:

$$\sin \theta_{1-} = \lambda/d. \quad (2.13)$$

Dla przetestowania powyższej formuły inwersyjnej w pośrednim pomiarze średnicy, dokonano symulacji niespójnego pola rozproszonego pod małym kątem na czterech odmiennych włóknach: (i) światłowodzie jednomodowym (SMF) o wymiarach nominalnych 10/125  $\mu\text{m}$  (średnica rdzenia/płaszczka), (ii) światłowodzie wielomodowym (MMF), 50/125  $\mu\text{m}$ , (iii) włóknie szklanym o silnej absorpcji ( $\kappa = 1$ ) o średnicy 125  $\mu\text{m}$  oraz (iv) kapilarze, 50/200  $\mu\text{m}$ . Założono, że włókna wykonane są ze szkła krzemionkowego ( $\text{SiO}_2$ ). Profil refrakcyjny światłowodów SMF i MMF wyrażono za pomocą równania [59]:

$$n(r, \lambda) = \begin{cases} n_{core}(\lambda) \left[ 1 - 2\Delta (r/a)^\alpha \right]^{1/2} & ; r < a \\ n_{clad}(\lambda) & ; r \geq a \end{cases}, \quad (2.14)$$

gdzie  $n_{clad}(\lambda)$  jest współczynnikiem załamania płaszcza  $\text{SiO}_2$  podlegającym zmianom względem  $\lambda$  według równania (2.2) ( $D_j = 0$ )  $n_{core}(\lambda) = n_{clad}(\lambda) + 0.014$  jest współczynnikiem załamania domieszkowanego rdzenia w osi światłowodu,  $\Delta = (n_{core}^2 - n_{clad}^2) / 2n_{core}^2$ ,  $r$  – jest współrzędną radialną,  $a$  – promieniem światłowodu,  $\alpha = 2$  dla światłowodu MMF (profil paraboliczny) i  $\alpha = Inf$  dla światłowodu SMF (profil skokowy), przy czym  $Inf$  jest arytmetyczną reprezentacją liczby nieskończonej, zależną od maszyny numerycznej. Hiperbolę profilu refrakcyjnego rdzenia światłowodu MMF aproksymowano 250 warstwami.

Dokładność pośredniego pomiaru średnicy zewnętrznej tych włókien według wzoru (2.13) pozwala ocenić tabela 1, w której zawarto obliczenia granicznego błędu systematycznego w zakresie pomiarowym 120÷130  $\mu\text{m}$  (SMF, MMF, włókno metaliczne) i 195÷205  $\mu\text{m}$  (kapilara). Błąd graniczny obliczono jako maksymalną, bezwzględną różnicę w zadanym zakresie pomiarowym pomiędzy wynikiem pomiaru według relacji (2.13), a wartością zadaną, stanowiącą para-

**Tabela 1.** Błąd graniczny  $\delta d$  (%) wnioskowania o średnicy w zakresie pomiarowym 120÷130  $\mu\text{m}$  (SMF, MMF, włókno metaliczne) i 195÷205  $\mu\text{m}$  (kapilara). Badane włókno oświetlone jest źródłem o umiarkowanym poszerzeniu widmowym:  $\lambda_0 = 0,6328 \mu\text{m}$ ,  $fwhm = 1, 5, 15 \text{ nm}$ .

Rodzaj włókna	$\delta d$ (%)		
	$fwhm$ : 1 nm	$fwhm$ : 5 nm	$fwhm$ : 15 nm
SMF, 10/125 $\mu\text{m}$	5,06	1,37	0,73
MMF, 50/125 $\mu\text{m}$	7,75	1,65	0,73
Włókno metaliczne, 125 $\mu\text{m}$	0,65	0,65	0,65
Kapilara, 50/200 $\mu\text{m}$	3,23	0,67	0,53

Legenda: SMF – światłowód jednomodowy, MMF – światłowód wielomodowy.

metr symulacji metodą niekoherentnej superpozycji. Daną pomiarową, tj.  $\theta_1$ -, odczytano z rozdzielczością 0,0001°. Obliczenia przeprowadzono dla źródła światła o linii widmowej aproksymowanej krzywą Gaussa w maksimum przypadającym na 0.6328  $\mu\text{m}$  i o szerokości połówkowej równej 1, 5 i 15 nm (parametr symulacji). Widmo źródła światła analizowano w zakresie 0,5656÷0,7000  $\mu\text{m}$  z krokiem co 0,1 nm. Obliczenia średnicy i jej błędu systematycznego zostały wykonane z krokiem 0,1  $\mu\text{m}$  w każdym z zakresów pomiarowych, aby sprawdzić wpływ mikroform rezonansowych na jakość aproksymacji.

Dokładność pomiaru średnicy determinują dwa czynniki: (i) aproksymacyjny charakter modelu inwersyjnego, (ii) dokładność odczytu położenia prążka. Odnosząc się do pierwszego czynnika, jakość aproksymacji zależy od parametru rozmiarowego włókna, co jest cechą charakterystyczną modelu opartego na zasadzie Huygensa-Fresnela [47,56]. Dane w tabeli wskazują ponadto, że model aproksymacyjny dostarcza adekwatnych wyników pod warunkiem, że widmo wiązki promieniowania jest odpowiednio szerokie – dla przypadku  $fwhm = 15 \text{ nm}$  wartości błędów obliczone dla włókien o takich samych wymiarach zewnętrznych, tj. SMF, MMF i włókna metalicznego, stanowiącego nieprzezroczystą przeszkodę dla padającego światła, są zbliżone. Powiększona wartość błędu dla wiązki promieniowania o mniejszej szerokości połówkowej linii widmowej, sugeruje wpływ komponentów propagujących się przez szklaną strukturę na daną pomiarową. Dokładność wnioskowania odwrotnego może zostać poprawiona drogą modelowania bazującego na syntetycznych bądź rzeczywistych danych empirycznych.

### 3. Analiza inwersyjna tęczy pierwotnej w charakterystyce średnicy szklanego włókna

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

(J. Sztudynger)

#### 3.1. Natura tęczy

**P**aradygmat matematyczno-empirycznego poznania może mieć swój początek w obserwacji, a coraz nowsze zagadnienia poznawcze rodzone na jej gruncie wydają się potwierdzać słowa Hamleta „Więcej jest rzeczy na ziemi i w niebie, Niż się ich śniło waszym filozofom”<sup>§</sup>. To obserwacje tęczy i jej matematyczne interpretacje, poddane weryfikacji w drodze instrumentalnego poznania, stanowią podwaliny współczesnych metod wykorzystujących światło jako narzędzie poznawcze.

Tęcza jest manifestacją rozpraszania fali na cząstce charakteryzującej się niską tłumiennością, wysokim stopniem symetrii osiowej i średnicą znacznie większą od długości fali promieniowania. W warunkach naturalnych obserwuje się najczęściej tzw. tęczę pierwotną. Rzadziej można zaobserwować tęczę wtórną, która charakteryzuje się nieco mniejszym natężeniem i inwersją barw, Rys. 3.1. Obszar pomiędzy tęczą pierwszego i drugiego rzędu nosi nazwę pasma Aleksandra<sup>\*\*</sup>. W naturze wielobarwne łuki tęczy powstają w wyniku załamania i dyspersji chromatycznej promieni Słońca na kroplach wody. W warunkach laboratoryjnych tęczę można uzyskać zastępując światło słoneczne wysokospójnym promieniowaniem laserowym, co prowadzi do powstania tęczy monochromatycznej. Na Rys. 3.2a przedstawiono wyniki numerycznej analizy światła rozproszonego na cylindrycznej, szklanej cząsteczce, otrzymane z wykorzystaniem teorii Lorenza-Mie [47,56]. Widoczne są dwa obszary o podwyższonym natężeniu – struktura umiejscowiona w kącie  $\sim 155^\circ$  to tęcza pierwotna, natomiast struktura widoczna w kącie rozproszenia  $\sim 94^\circ$  i mniejszych to tęcza wtórna.

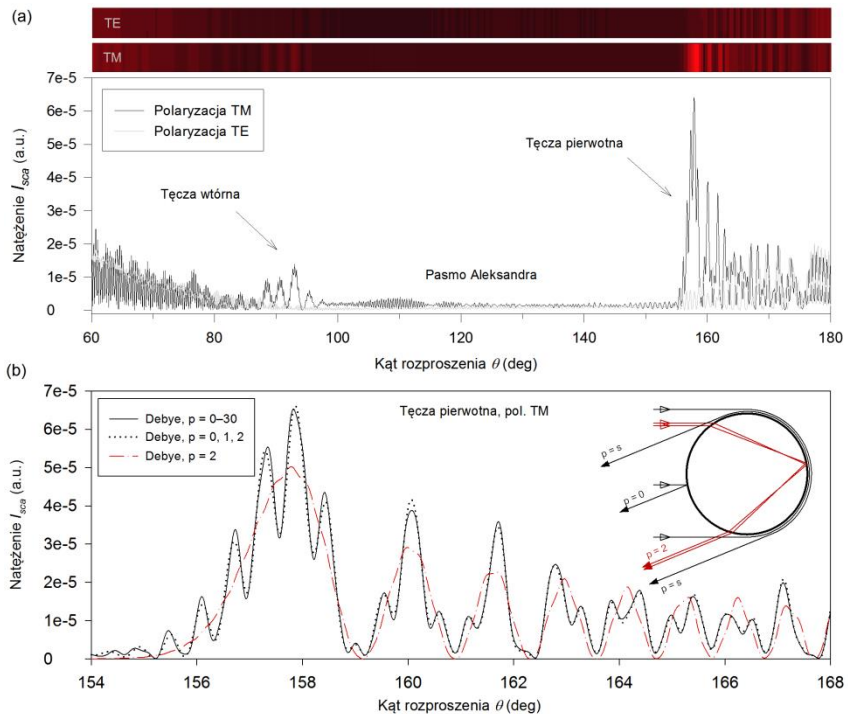
---

<sup>§</sup> W. Shakespeare „Hamlet”, akt pierwszy.

<sup>\*\*</sup> Na cześć Aleksandra z Afrodyzji (II / III w. n.e.), greckiego filozofa, który studiował naturę tęczy i jako pierwszy opisał ciemny obszar pomiędzy tęczą pierwszego i drugiego rzędu.



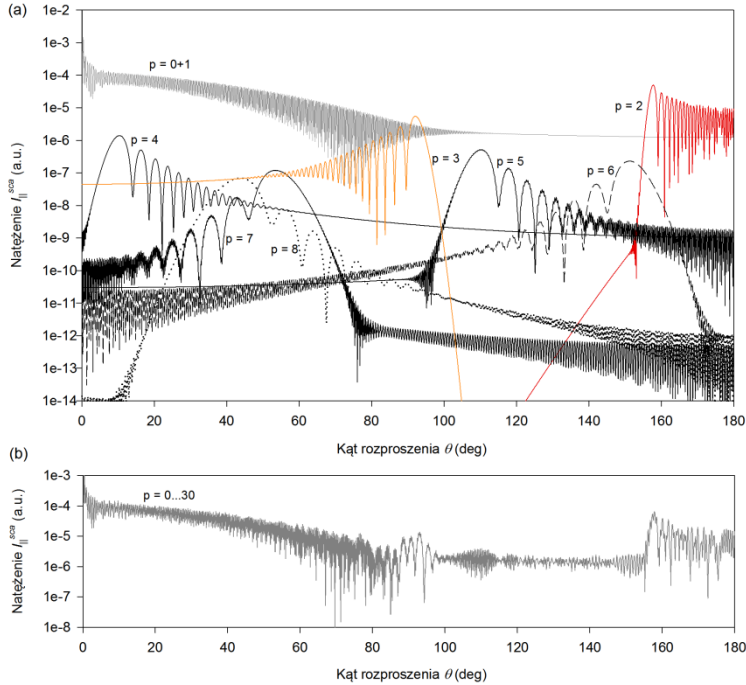
**Rys.3.1.** Tęcza pierwotna i wtórna (o mniejszym natężeniu) w warunkach naturalnych (fot. G. Świrniak).



**Rys.3.2.** Natężenie światła rozproszonego (jednostki dowolne) na szklanym włóknie o średnicy  $125 \mu\text{m}$  w obszarze tęczy pierwotnej i wtórnej według: (a) teorii Lorenza-Mie, (b) metody Debye'go dekompozycji pola w szeregi ( $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ ,  $m(\lambda) = 1,4957 + i1\text{E-}8$ ).

Proces poznawczy w niniejszym opracowaniu ma swój początek w analizie tęczy monochromatycznej powstającej na szklanym, osiowosymetrycznym włóknie. Zrozumienie natury tęczy umożliwia metoda rozwinięcia rozproszonego pola elektromagnetycznego w szeregi Debye'go [47], pozwalająca na dekompozycję pola rozproszonego w komponenty, posiadające czytelną interpretację w zakresie pojęć i praw optyki geometrycznej. Na Rys. 3.2b przedstawiono wyniki dekompozycji pola rozproszonego w obszarze tęczy pierwszego rzędu, wykonanej metodą szeregów Debye'go. Wyróżniono jeden promień odbity od powierzchni włókna (rzędu  $p = 0$ ) i dwa promienie załamane po jednym wewnętrznym odbiciu ( $p = 2$ ). Promienie rzędu 2. cechują się zbliżonymi drogami optycznymi, porównywalnymi amplitudami, opuszczają włókno pod tym samym kątem, ale mają odmienne kąty padania. Interferencja tych komponentów w polu dalekim powoduje powstanie w polu dalekim regularnego układu jasnych i ciemnych prążków. Poczynania naukowe w zakresie interpretacji fizycznej i matematycznej tej struktury prążkowej dokonały się za sprawą takich badaczy jak Kartezjusz, Young, Newton [60,61], ale jej pierwszy prawidłowy aproksymacyjny został sformułowany w XIX wieku przez Sir George'a Airy'ego, który wykorzystał w tym zakresie elementy teorii dyfrakcji [62]. Jak ukazuje Rys. 3.2b, wpływ promieniowania odbitego od powierzchni cząstki, rzędu  $p = 0$ , ujawnia się w postaci znaczących nieliniowości (*ripple structure*), które wydatnie modulują strukturę niskoczęstotliwościowego układu prążków. Wektorowa suma pól reprezentowanych przez promienie  $p = 0$  i 2 daje w wyniku pole zbliżone do rzeczywistego, aproksymowanego dużą liczbą komponentów w rozwinięciu Debye'go ( $p = 0 \div 30$ ). Dla uzupełnienia opisu rozproszenia fali w obszarze tęczy, na Rys. 3.2b zaznaczono schematycznie udział fal powierzchniowych, propagujących się na granicy włókno-otoczenie w warunkach bliskich całkowitemu wewnętrznemu odbiciu. Transparentna, osiowosymetryczna cząstka jest *de facto* mikrorezonatorem optycznym [63].

Tęcza może zostać uformowana w wyniku wielokrotnego wewnętrznego odbicia promieniowania. Oprócz tęczy pierwotnej, powstałej po jednokrotnym wewnętrznym odbiciu, i wtórnej (dwa wewnętrzne odbicia) mogą powstać także tęcze wyższych rzędów. W warunkach naturalnych udało się jak dotąd zaobserwować również tęczę trzeciego [60] i czwartego rzędu [61] o bardzo słabym natężeniu ze względu na niewielką amplitudę komponentów rozproszonych warunkujących ich powstanie. Na Rys. 3.3a ukazano wyniki dekompozycji Debye'go fali rozproszonej na homogenicznym włóknie o średnicy 125  $\mu\text{m}$ , w wyniku której obliczono natężenia rozproszone odpowiadające komponentom rzędu  $p = 0+1$  i kolejnych  $p = 2 \dots 8$ , natomiast na Rys. 3.3b zilustrowano natężenie rozproszone odpowiadające sumie komponentów  $p = 0 \div 30$ . Suma komponentów rzędu  $p = 0$  i 1 ilustruje superpozycję dyfrakcji oraz fali odbitej od powierzchni cylindra. Komponenty rzędu  $2 \div 7$ . tworzą tęcze monochromatyczne rzędu kolejno 1 do 7.



**Rys. 3.3.** Dekompozycja metodą szeregów Debye’go pola rozproszonego padającego normalnie na szklane włókno na składowe rzędu: (a)  $p = 0+1, 2, \dots, 8$ , (b)  $p = 0+1, \dots, 30$ . Widoczne są tęcze rzędu 1 do 7. W warunkach naturalnych dochodzi najczęściej do powstania tęczy pierwotnej ( $p = 2$ ) i wtórnej ( $p = 3$ ). ( $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ , pol. TM,  $m(\lambda) = 1,4957 + i0$ ).

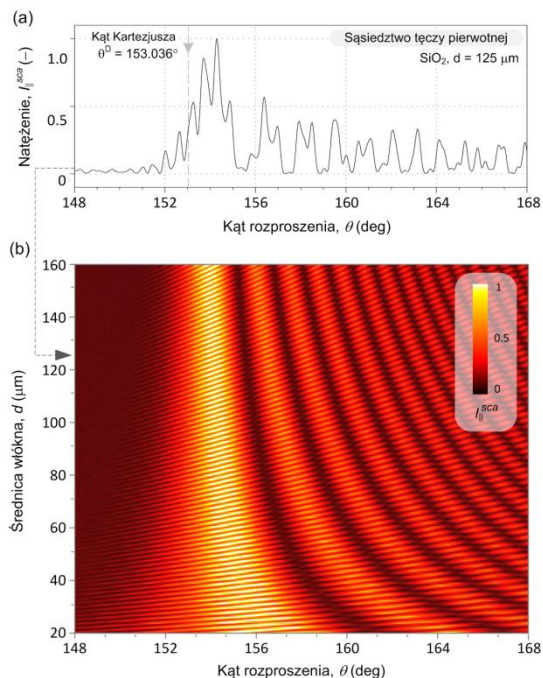
Struktura tęczy jest odmienna dla dwóch ortogonalnych stanów polaryzacyjnych – magnetycznego (*Transverse Magnetic*, TM), dla którego wektor elektryczny drga w kierunku zgodnym z osią symetrii włókna, oraz elektrycznego (*Transverse Electric*, TE), dla którego wektor elektryczny leży w płaszczyźnie rozpraszania. Wyraźny obraz prążkowy powstaje tylko dla polaryzacji magnetycznej (Rys. 3.2a). Rozróżnienie polaryzacyjne wynika z faktu, że znaczna część energii pola świetlnego spolaryzowanego elektrycznie ulega załamaniu na granicy włókno – otoczenie pod kątem równym lub zbliżonym do kąta Brewstera, a niewielka część rozpraszana jest do obszaru tęczy [64].

### 3.2. Problematyka wykorzystania promieniowania rozproszonego pod dużym kątem w charakterystyce optycznej szklanego włókna

Generacja tęczy w warunkach laboratoryjnych dokonuje się zazwyczaj z wykorzystaniem wysokospójnego promieniowania laserowego, umożliwiającego uzyskanie kontrastowego, łatwego w rejestracji sygnału. Tą drogą udało się jak dotąd wygenerować tęczę nawet 200. rzędu [65]. Numeryczne odzwierciedlenie takiego eksperymentu dla szklanej, cylindrycznej cząstki przedstawiono na Rys. 3.4a. Genezę powstawania podstawowego układu jasnych i ciemnych prążków w postaci szerokiego prążka głównego, położonego w kącie ok.  $154^\circ$ , wraz z licznymi prążkami interferencyjnymi tłumaczy teoria dyfrakcyjna sformułowana Airy'ego. Tęcza Airy'ego jest w istotny sposób modulowana przez liczne formy nieliniowe. W ten sposób uwydatnia się wpływ dodatkowych komponentów rozproszonych nie uwzględnionych przez Airy'ego – m.in. promieniowania ulegającego odbiciu od powierzchni cząstki, promieniowania wielokrotnie rozproszonego w jej strukturze i ich wzajemnych interakcji przybierających, w szczególnych konfiguracjach geometryczno-przestrzennych eksperymentu rozpraszania, formę rozpraszania rezonansowego [60].

Skomplikowana natura tęczy sprawia, że nieinwazyjna charakterystyka cząstek autonomicznych, np. szklanego włókna czy kropli wody napotyka na ograniczenia związane z złożonością w zakresie interpretacji fizyko-matematycznej pola rozproszonego ukierunkowanej na rozwiązanie zagadnienia odwrotnego. Istotę tego problemu ilustruje wykres poziomicowy tęczy powstającej na szklanym włóknie sporządzony w funkcji średnicy włókna, Rys. 3.4b. Silnie nieliniowy charakter tęczy stanowi przeszkodę w drodze ku sformułowaniu jednoznacznych relacji przyczynowo-skutkowych pomiędzy cechą obserwowanego pola (daną pomiarową) a mierzoną właściwością fizyczną cząstki (średnicy). Inwersja danych pomiarowych z wykorzystaniem kompleksowych modeli rozproszenia, opisujących eksperyment rozpraszania światła w adekwatny sposób, np. modelu według teorii Lorenza-Mie [47], jest skomplikowana z dwóch powodów. Przede wszystkim, pole rozproszone w rozważanym przypadku jest nieliniowo zależne od właściwości obiektu rozpraszającego falę [46]. Co więcej, kompleksowe modele rozpraszania światła, identyfikowalne teoretycznie w praktyce okazują się zwykle źle uwarunkowane numerycznie [7,10].

Metody analizy inwersyjnej tęczy są generalnie ukierunkowane na badanie widma tęczy, którego czytelną interpretację zaproponował van Beeck [66]. Metodą filtracji dolnoprzepustowej możliwe jest wyodrębnienie prążków tęczy Airy'ego [67], zaś metoda korelacji widmowej CSD opiera swoje funkcjonowanie na analizie nieliniowych form modulujących tę tęczę [68]. Metoda analizy



**Rys. 3.4.** (a) Natężenie w polu dalekim w sąsiedztwie tęczy pierwotnej, powstającej na krzemionkowym (SiO<sub>2</sub>) włóknie o średnicy 125 μm, (b) natężenie rozproszone jak (a) lecz w funkcji średnicy włókna ( $\lambda = 0,6328$  μm, polaryzacja, TM,  $m(\lambda) = 1,45702 + i1E-7$ ).

widma tęczy daje jednak prawidłowe wyniki tylko wówczas, gdy składowe widma są łatwo rozróżnialne, co jest spełnione wówczas, gdy rozmiar cząstki jest istotnie większy od długości oświetlającego promieniowania. W praktyce warunek ten ogranicza zastosowanie wymienionych metod do charakterystyki cząstek o średnicy wynoszącej kilkaset mikrometrów. Wytworzenie tęczy Airy'ego możliwe jest także w drodze czasowego różnicowania komponentów rozproszonych przy wykorzystaniu ultrakrótkich impulsów lasera [69,70] bądź różnicowania przestrzennego tych komponentów przy wykorzystaniu silnie skupionej wiązki laserowej [71]. Praktyczne zastosowanie obu wymienionych metod jest jednak ograniczone ze względu na wysokie wymagania układowe.

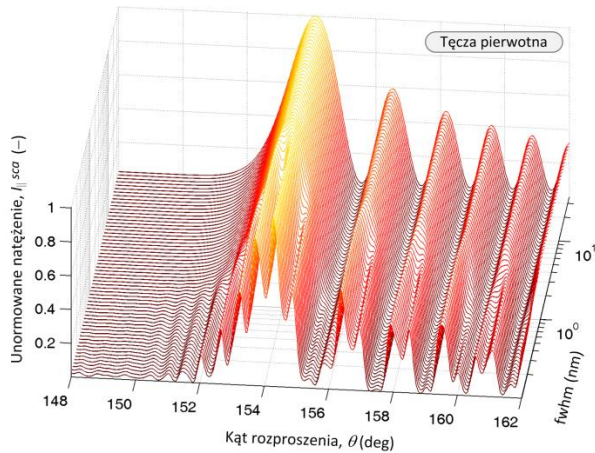
Proponowana metoda analizy inwersyjnej, ukierunkowana na nieinwazyjny pomiar średnicy szklanego włókna, polega na modyfikacji cech widmowych promieniowania oświetlającego włókno w celu wygenerowania tęczy pozbawionej udziału form nieliniowych, zakłócających niskoczęstotliwościową strukturę prążkową, której powstawanie tłumaczy model Airy'ego. Takie postępowanie ma doprowadzić do uproszczenia zarówno modelu fizycznego jak i matematycznego pola w opozycji do problemu rozpraszania promieniowania laserowe-

go. Podjęcie tej tematyki jest uzasadnione w świetle nowych możliwości formowania skolimowanych wiązek promieniowania z wykorzystaniem wysoko-wydajnych źródeł promieniowania cechującego się niskim stopniem spójności czasowej, np. diod elektroluminescencyjnych (LED) dużej mocy.

### 3.3. Natura tęczy pierwotnej powstającej w wyniku rozproszenia promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej

Kompleksowy aparat matematyczny rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności zaprezentowano w rozdziale 2.2.1 wraz z definicją geometrii eksperymentu na Rys. 2.3. Przedmiotem analizy jest nieskończenie długi, osiowo-symetryczny i liniowy cylinder o średnicy  $d$ , którego oś symetrii pokrywa się z osią z prostokątnego układu współrzędnych. Fala padająca o płaskim froncie propaguje się w kierunku  $-x$  i pada na włókno pod kątem prostym. Rozpatruje się polaryzację TM fali padającej, dla której wektor elektryczny jest równoległy względem osi włókna i poprzeczny względem wektora falowego  $\mathbf{k}$ . Obwiednię widma źródła promieniowania aproksymuje się funkcją Gaussa o szerokości połówkowej  $fwhm$  i o maksimum emisyjnym  $\lambda_0$  przypadającym na  $0,6328 \mu\text{m}$ . Detekcja promieniowania odbywa się w sposób punktowy w polu dalekim ( $kr \gg 1$ ) w miejscu określonym przez współrzędne cylindryczne  $(r, \theta, z)$ . Jako, że w warunkach padania normalnego cylinder nie modyfikuje polaryzacji fali [47,56], zagadnienie analizy pola rozproszonego można ograniczyć do składowej elektrycznej spolaryzowanej równolegle względem osi włókna,  $E_{\parallel}^{sca}$ , opisanej zależnością (2.5) w rozdziale 2.2.1.

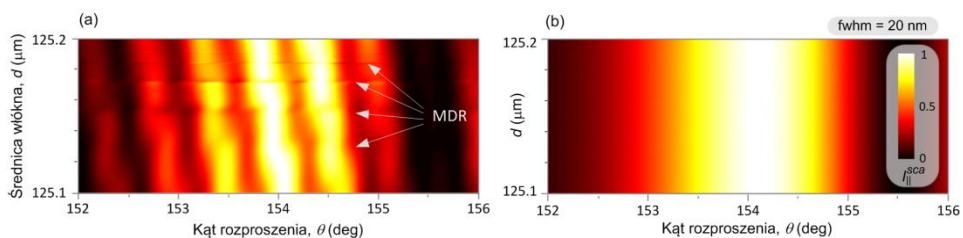
Początkowy wątek analizy numerycznej ukierunkowano na jakościowe poznanie wpływu promieniowania cechującego się niskim stopniem spójności czasowej, na pole rozproszone pod dużym kątem, czyli w obszarze tęczy pierwotnej. Na Rys. 3.5 ukazano wyniki symulacji natężenia rozproszonego w sąsiedztwie tęczy pierwotnej, sporządzonego dla wybranych wartości  $fwhm$  z zakresu  $0,1 \div 35 \text{ nm}$ . W świetle cechującym się najmniejszą szerokością widma, tęcza jest zakłócona jest przez liczne formy nieliniowe do tego stopnia, że dochodzi do zamiany pozycji jasnych i ciemnych prążków. Dla coraz większych wartości  $fwhm$  dochodzi do stopniowego wytłumienia form nieliniowych, nałożonych na podstawowy, niskoczęstotliwościowy sygnał tęczy pomimo tego, że nie występuje fizyczna separacja promieniowania rozproszonego, warunkującego jej powstawanie. Interpretując te wyniki należy zauważyć, że niekoherentne sumowanie rozproszonych fal cząstkowych, wydzielonych z widma promieniowania oświetlającego, funkcjonuje jako uśrednianie tęczy w dziedzinie przestrzeni, lub – równoważnie, filtracja dolnoprzepustowa w dziedzinie częstotliwości.



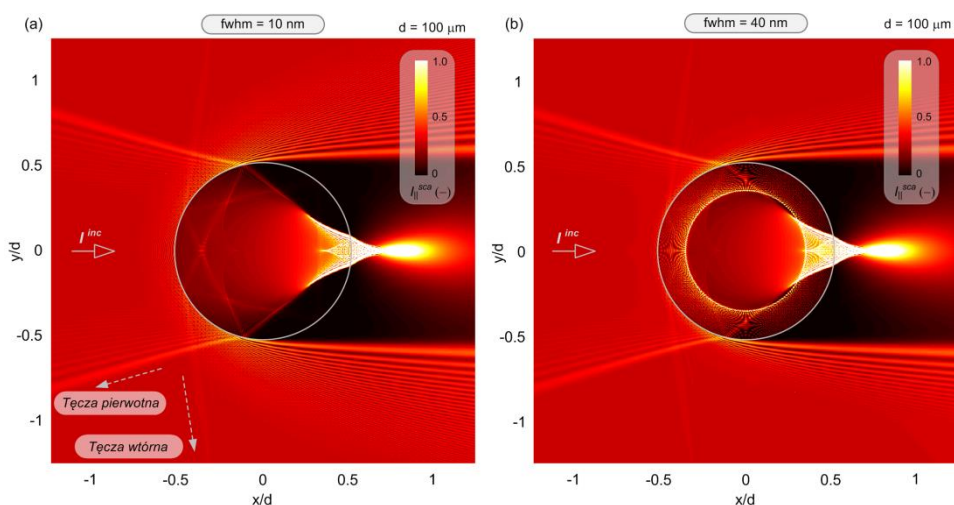
**Rys. 3.5.** Unormowane natężenie w polu dalekim w sąsiedztwie tęczy pierwotnej powstającej na homogenicznym włóknie SiO<sub>2</sub> o średnicy 125 μm. Włókno oświetlone jest promieniowaniem cechującym się średnim poszerzeniem widmowym o maksimum w 0,6328 μm i szerokości połowkowej  $fwhm = 0,1 \pm 30$  nm ( $\Delta\lambda = 0,5656 \pm 0,7$  μm, pol. TM).

Jeżeli obwiednia widma promieniowania jest symetryczna względem maksimum emisyjnego  $\lambda_0$ , to powstała tęcza będzie rezultatem filtracji dolnoprzepustowej, dokonanej na natężeniu rozproszonym odpowiadającym  $\lambda_0$ .

Immanentną cechą tęczy powstającej w wyniku rozpraszania promieniowania monochromatycznego na transparentnych cząstkach charakteryzujących się wysokim stopniem symetrii osiowej, jest podatność na rozpraszanie rezonansowe, prowadzące do obserwowalnych efektów nieliniowych. Taka cząstka jest mikrorezonatorem optycznym, ograniczającym w szczególnych warunkach propagację światła w małej objętości na zasadzie rezonansu optycznego [50,51,72]. Skutki rozpraszania rezonansowego na tęczę rejestrowaną w polu dalekim ukazuje Rys. 3.6a, przedstawiający natężenie w obszarze prążka głównego, obliczone z bardzo niewielkim krokiem średnicy szklanego włókna ( $\Delta d = 0,0001$  μm). Rezonansowe rozpraszanie fali wewnątrz włókna objawia się w tym przypadku obecnością mikroform MDR (*Morphology Dependent Resonances*). Nie obserwuje się MDR w tęczy rozproszonej na układach cząstek polidispersyjnych [73-75] (natężenia rozproszone przez cząsteczki sumują się niekoherentnie). Analogiczne obliczenia przeprowadzone dla przypadku wiązki padającej o niskim stopniu spójności czasowej, zilustrowane na Rys. 3.6b, nie wykazały obecności MDR w polu dalekim. Nie oznacza to, że rozpraszanie rezonansowe wewnątrz włókna nie zachodzi, ale jego skutki obserwowane w polu dalekim są niezauważalne w przyjętej skali obserwacji. Zagadnienie to ilustruje

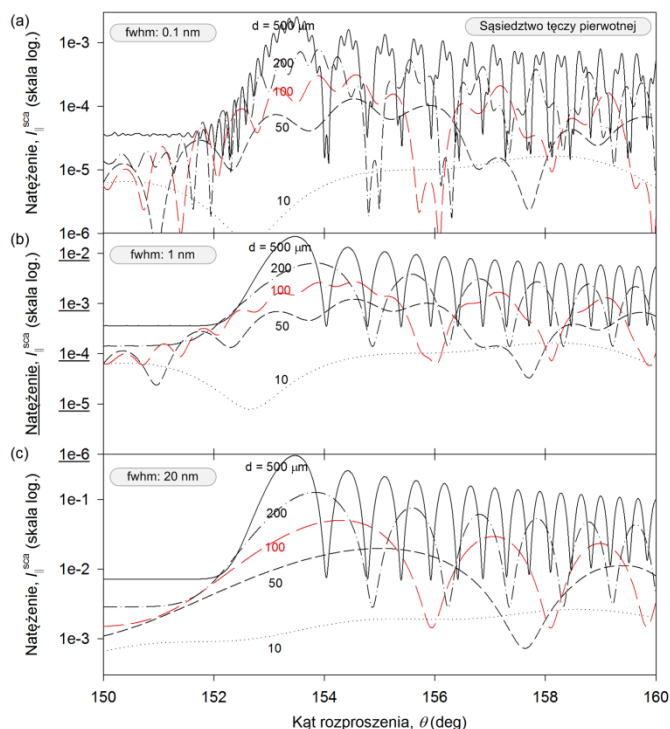


**Rys. 3.6.** Unormowane natężenie w polu dalekim w sąsiedztwie tęczy pierwotnej powstającej na homogenicznym włóknie SiO<sub>2</sub> w funkcji bardzo małych zmian średnicy ( $\Delta d = 0,0001 \mu\text{m}$ ) dla przypadku: (a) monochromatycznej fali padającej ( $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ ), (b) promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej ( $\lambda_0 = 0,6328 \mu\text{m}$ ,  $fwhm = 20 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 0,5656 \div 0,7 \mu\text{m}$ , pol. TM).



**Rys. 3.7.** Unormowane natężenie promieniowania wewnątrz włókna szklanego i w polu bliskim w płaszczyźnie rozpraszania w warunkach rozpraszania promieniowania (a) monochromatycznego oraz o umiarkowanym poszerzeniu widmowym: (b)  $fwhm = 10 \text{ nm}$ , (c)  $fwhm = 40 \text{ nm}$ , wystąpienie rozpraszania rezonansowego ( $\lambda_0 = 0,6328 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 0,5748 \div 0,6908 \mu\text{m}$ , pol. TM,  $\kappa = 1\text{E-}8$ ).

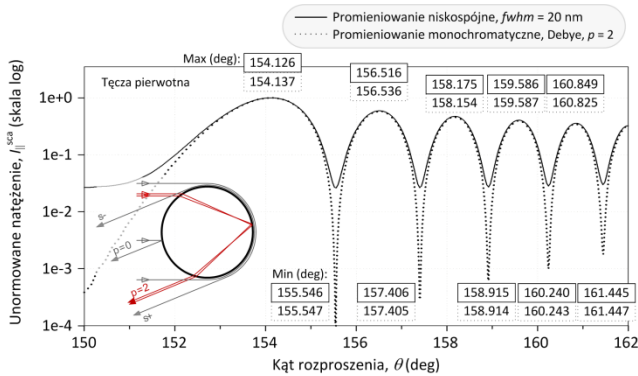
Rys. 3.7a÷c ukazujący wpływ promieniowania o różnym stopniu poszerzenia widmowego na pole rozproszone wewnątrz szklanego włókna oraz w polu bliskim. Dla przypadku wiązki promieniowania o największej szerokości linii emisyjnej wystąpiło rozpraszanie rezonansowe wewnątrz cylindra, mające postać charakterystycznej struktury pierścieniowej w rozkładzie natężenia wewnątrz włókna i objawiające się znacznym wzrostem natężenia w całym zakresie kąta rozpraszania. W odniesieniu do wiązki o mniejszej szerokości widma, takie rozpraszanie nie jest obecne. Nie odnotowano wpływu tego rezonansu na położenie prążków tęczy w polu *dalekim* ustalone z dokładnością do  $0,001^\circ$  (rozdzielczość symulacji kąta rozproszenia).



**Rys. 3.8.** Natężenie rozproszone w obszarze tęczy pierwotnej powstającej na szklanym, homogenicznym włóknie o średnicy  $d$  i szerokości  $\frac{1}{2}$  linii widmowej wynoszącej: (a) 0,1 nm, (b) 1 nm, (c) 20 nm. ( $\lambda_0 = 0,6328 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 0,5656 \pm 0,7 \mu\text{m}$ , pol. TM, szkło  $\text{SiO}_2$ ,  $\kappa = 1\text{E}-8$ ).

Jak pokazuje Rys. 3.8, stopień redukcji wysokoczęstotliwościowych form nieliniowych zależy także od średnicy włókna (lub, ekwiwalentnie, parametru rozmiarowego  $x$ ). Łatwo wyróżnialne prążki tęczy udało się nawet zaobserwować dla sytuacji skrajnej z punktu widzenia parametrów geometryczno-falowych układu, w sytuacji gdy średnica cząstki wynosi  $50 \mu\text{m}$  ( $x \approx 250$  przy  $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ ) i oświetlonej promieniowaniem o szerokości widmowej 20 nm (Rys. 3.8c). Częstotliwość przestrzenna form nieliniowych zależy od średnicy włókna, dlatego stopień redukcji tych form jest mniej widoczny dla niewielkich średnic.

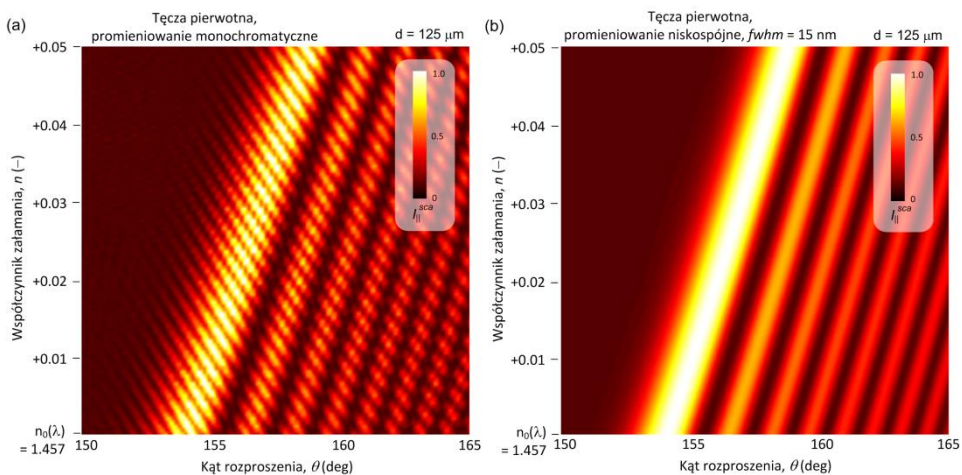
Powstanie tęczy z wytłumionym udziałem wysokoczęstotliwościowych form nieliniowych rodzi pytanie, czy taka tęcza jest adekwatna tej, powstającej na skutek rozpraszania promieniowania monochromatycznego stosownie do teorii Airy'ego? Z punktu widzenia makroskopowych efektów rozpraszania, taka weryfikacja może być dokonana przy wykorzystaniu metody dekompozycji pola rozproszonego w szeregi Debye'go, posiadające czytelną interpretację w zakre-



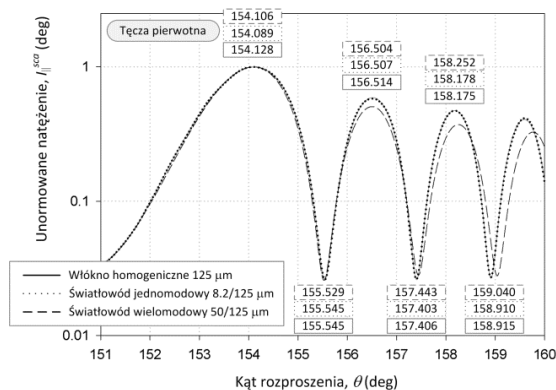
**Rys. 3.9.** Unormowane natężenie w polu dalekim w sąsiedztwie tęczy pierwotnej powstającej na homogenicznym włóknie SiO<sub>2</sub> według: (–) kompleksowego modelu rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności,  $fwhm = 20$  nm, (···) rozpraszania promieniowania monochromatycznego, jako wynik koherentnej superpozycji komponentów rzędu  $p = 2$ , uzyskany metodą dekompozycji w szeregi Debye’go.

sie optyki geometrycznej. Na Rys. 3.9 zestawiono wykresy natężenia pola rozproszonego, obliczone dla zakresu kąтового tęczy pierwotnej dla następujących przypadków: (i) rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności,  $fwhm = 20$  nm, (ii) rozpraszania promieniowania monochromatycznego, jako wynik koherentnej superpozycji komponentów rzędu  $p = 2$ , czyli rozproszonych po jednokrotnym wewnętrznym odbiciu (por. szkic na Rys. 3.9), uzyskany metodą dekompozycji Debye’go. Długość fali odpowiadająca maksimum emisyjnemu w obu przypadkach to  $0,6328 \mu\text{m}$ . Przyjmując za kryterium porównawcze położenia kolejnych maksimum i minimum okazuje się, że większość prążków ciemnych ma zgodną pozycję z dokładnością równą rozdzielczości symulacji kąta rozproszenia ( $0,001^\circ$ ), natomiast położenia prążków jasnych są mniej zgodne i pokrywają się w dokładnością do  $0,024^\circ$ . Wyniki te świadczą o tym, że reprezentacja matematyczna rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności może być sprowadzona do metody aproksymacyjnej, formułowanej językiem teorii tęczy Airy’ego dla eksperymentu z rozproszeniem promieniowania monochromatycznego. Taka równoważność zachodzi oczywiście wówczas, gdy obwiednia widma źródła jest symetryczna względem maksimum emisyjnego.

Tęcza jest zjawiskiem, powstającym w wyniku załamania promieniowania przez niskotłumiącą cząsteczkę, zatem pozycja tęczy w polu rozproszonym oraz ułożenie kątowe jej prążków zależą od profilu refrakcyjnego tej cząstki. Na Rys. 3.10 przedstawiono wykres poziomicowy unormowanego natężenia tęczy pierwotnej w funkcji kąta rozproszenia i współczynnika załamania homogenicznego włókna o średnicy  $125 \mu\text{m}$ , wykonany dla (a) źródła spójnego i (b) o niskim stopniu spójności czasowej ( $\lambda_0 = 0,6328 \mu\text{m}$ ). Bezwzględne położenia



**Rys. 3.10.** Wpływ współczynnika załamania na tęczę pierwotną powstającą na szklanym ( $\text{SiO}_2$ ), homogenicznym włóknie o średnicy  $125\ \mu\text{m}$  w warunkach oświetlenia promieniowaniem: (a) monochromatycznym ( $\lambda = 0,6328\ \mu\text{m}$ , pol. TM), (b) o umiarkowanym poszerzeniu widmowym aproksymowanym krzywą Gaussa ( $\lambda_0 = 0,6328\ \mu\text{m}$ ,  $fwhm = 15\ \text{nm}$ ,  $\Delta\lambda = 0,6056 \div 0,66\ \mu\text{m}$ , pol. TM).



**Rys. 3.11.** Wpływ profilu refrakcyjnego szklanego włókna o średnicy  $125\ \mu\text{m}$  na tęczę pierwotną, powstającą w wyniku rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej, normalny kształt widma ( $\lambda_0 = 0,6328\ \mu\text{m}$ ,  $fwhm = 15\ \text{nm}$ ,  $\Delta\lambda = 0,6056 \div 0,66\ \mu\text{m}$ , pol. TM).

prążków w znacznym stopniu zależą od współczynnika załamania, a w dużo mniejszym stopniu – ich położenia wzajemne. W konsekwencji, inwersyjne wnioski o średnicy włókna rozpraszającego promieniowanie korzystnie jest oprzeć na danych pomiarowych wynikających z częstotliwości przestrzennej funkcji natężenia, np. odległości pomiędzy sąsiadującymi prążkami.

Na Rys. 3.11 ukazano tęczę pierwotną powstającą w świetle o niskim stopniu spójności na trzech różnych włóknach o tej samej średnicy ( $125\ \mu\text{m}$ ), ale odmiennych profilach refrakcyjnych. Obecność nawet niewielkiej niehomo-

geniczności – rdzenia w światłowodzie jednomodowym (SMF), wpływa na pole rozproszone w obszarze tęczy, pomimo tego, że tęcza Airy’ego powstaje w wyniku interferencji w polu dalekim komponentów rzędu 2, załamanych w płaszczu światłowodu. Faktycznie rdzeń powoduje powstanie drugiej – bliźniaczej tęczy, a pole rozproszone jest superpozycją dwóch tęczy [76-78]. Dodatkowo, pole rozproszone wstecznie zależy w silnym stopniu od komponentów jednokrotnie załamanych przez cząstkę, warunkujących powstanie zjawiska glorii [79-81].

### 3.4. Inwersja danych pomiarowych z obszaru tęczy pierwotnej w ocenie średnicy szklanego włókna

Metodyka postępowania inwersyjnego, przedstawionego w niniejszym paragrafie, jest dwuetapowa. W pierwszym etapie zostanie przedyskutowany model przyczynowy według klasycznej teorii Airy’ego, który zostanie następnie skorygowany o czynnik, wynikający z porównania z teorią CAM (*Complex Angular Momentum*), wprowadzony w celu poprawy aproksymacji położenia prążków tęczy pierwotnej, powstającej na szklanym włóknie w wyniku rozproszenia promieniowania o niskim stopniu spójności. Model ten zostanie następnie przekształcony w zależność odwrotną, umożliwiającą realizację pośredniego pomiaru średnicy homogenicznego włókna.

#### 3.4.1. Aproksymacyjny model tęczy pierwotnej według skorygowanej teorii Airy’ego

Teoria tęczy Airy’ego [62] bazuje na aproksymacji frontu falowego w sąsiedztwie tęczy funkcją sześcienną i rozwiązaniu skalarnego równania falowego z wykorzystaniem teorii dyfrakcji. Rozwiązanie w postaci funkcji wyrażającej natężenie rozproszonego pola dalekiego dla przypadku monochromatycznej płaskiej fali padającej spolaryzowanej magnetycznie (TM) ma postać [82]:

$$I_{\parallel}^{sca}(\theta, x, n) = (\pi I_0 F / r) (dx^{1/3} / h^{2/3}) \text{Ai}^2 \left[ -x^{2/3} \Delta / h^{1/3} \right], \quad (3.1)$$

gdzie:  $\text{Ai}$  jest funkcją (całką) Airy [83],  $I_0$  – natężeniem padającej fali płaskiej  $\theta$  – kątem rozproszenia,  $x = kd/2$  jest parametrem rozmiarowym włókna o średnicy  $d$ ,  $n$  – rzeczywistym współczynnikiem załamania włókna,  $r$  – odległością punktu obserwacyjnego (detektora) od osi cylindra w płaszczyźnie rozpraszania,

$$\Delta \equiv \theta - \theta^D, \quad (3.2)$$

$\theta^D$  jest tzw. kątem Kartezjusza tęczy pierwotnej, wyrażonym dla tęczy pierwotnej jako:

$$\theta^D = \pi + 2\theta_i^D - 4\theta_i^D, \quad (3.3)$$

gdzie  $\theta_i^D, \theta_r^D$  to kąty odpowiednio padania i załamania promienia Kartezjusza, które zdefiniowane są względem normalnej do powierzchni włókna i wynikają z prawa Snella:

$$\cos(\theta_i^D) = \left[ (n^2 - 1) / 3 \right]^{1/2}, \quad (3.4)$$

$$\sin(\theta_r^D) = n^{-1} \sin(\theta_i^D), \quad (3.5)$$

Cechą szczególną promienia Kartezjusza spośród promieni rozproszonych tego samego rzędu  $p$  jest to, że opuszcza cząstkę pod najmniejszym możliwym kątem dewiacji od kierunku pierwotnego (padania),  $d\theta/d\theta_i = 0$ . Warto zauważyć, że kąt Kartezjusza  $\theta^D$  jest funkcją współczynnika załamania cząstki, ale nie zależy od jej średnicy. Fakt ten słuszny jest w dziedzinie praw optyki geometrycznej. Czynniki  $F$  w równaniu (3.1) wynika z równań Fresnela i reprezentuje zamianę amplitudy promienia Kartezjusza w wyniku kolejnych odbić i załamań na drodze propagacji:

$$F = T^{21}(\theta_i^D) \cdot \left[ R^{11}(\theta_i^D) \right]^{p-1} \cdot T^{12}(\theta_i^D), \quad (3.6)$$

gdzie  $T^{12}, T^{21}$  są współczynnikami transmisji odpowiednio pomiędzy otoczeniem i cylindrem oraz pomiędzy cylindrem i otoczeniem,  $R^{11}$  – współczynnikiem odbicia fali wewnątrz cylindra [84]. Parametr  $h$  we wzorze (3.1) wyraża położenie tęczy pierwotnej w polu rozproszonym i zdefiniowany jest następująco:

$$h = 9(4 - n^2)^{1/2} / 4(n^2 - 1)^{3/2}. \quad (3.7)$$

Dokładność aproksymacji tęczy w ramach teorii Airy'ego można poprawić poprzez korekcję jądra funkcji Airy we wzorze (3.1) na podstawie porównania rozwiązań według teorii Airy'ego i teorii CAM [79,80,85,86]. Ideą teorii CAM, zaproponowanej przez Nussenzveiga, jest transformacja funkcji amplitudowej cząstki rozpraszającej monochromatyczną falę elektromagnetyczną, przedstawionej w postaci Poissona, do postaci całkowej z zastosowaniem zmodyfikowanej transformaty Watsona. Tak sformułowane zagadnienie, rozwiązywane jest następnie poprzez zastosowanie metod aproksymacyjnych, a rozwiązanie ma postać sumy dominujących, asymptotycznych i szybkozbieżnych rozwinięć. W szczególności, elektryczne pole rozproszone w sąsiedztwie tęczy pierwotnej w ujęciu teorii CAM, jest liniową kombinacją całki Airy (Ai) oraz jej pochodnej [80] (Ai')

$$E_{\perp s}(\theta, x, n) \propto w(\Delta, x) \cdot \text{Ai}\left[-x^{2/3}\Delta/h^{1/3}\right]u(\Delta) - ix^{-1/3}v(\Delta, x) \cdot \text{Ai}'\left[-x^{2/3}\Delta/h^{1/3}\right]u(\Delta). \quad (3.8)$$

Funkcje  $w(\Delta, x)$ ,  $v(\Delta, x)$  wpływają na amplitudę amplitudy prążków tęczy, natomiast funkcja  $u(\Delta)$  wpływa na ich położenie [80]:

$$u(\Delta) = 1 + B\Delta + O(\Delta^2), \quad (3.9)$$

$$w(\Delta, x) = 1 + O(\Delta) + O(x^{-1}), \quad (3.10)$$

$$v(\Delta, x) = 2^{-1/3}C\left[1 + O(\Delta^{1/2}) + O(x^{-1})\right], \quad (3.11)$$

przy czym:

$$B = \left[\frac{(875c^6 - 1257c^4 + 657c^2 + 45)}{5760(cs)^3}\right], \quad (3.12)$$

$$s = \left[\frac{(4 - n^2)}{3}\right]^{1/2}, \quad (3.13)$$

$$c = \left[\frac{(n^2 - 1)}{3}\right]^{1/2}. \quad (3.14)$$

Korekcja jądra we wzorze Airy'ego (3.1), mająca na celu poprawę położenia prążków tęczy w polu rozproszonym, polega na przyjęciu współczynników  $v(\Delta, x) = 0$ ,  $w(\Delta, x) = 1$  oraz uwzględnieniu czynnika  $u(\Delta)$ , ograniczonego do dwóch pierwszych wyrazów:

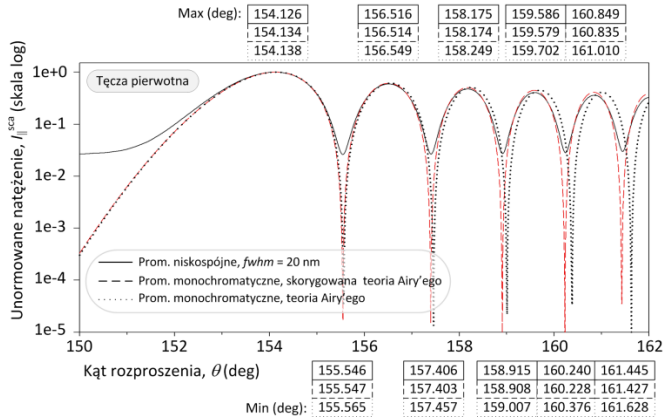
$$I_{\parallel}^{sca}(\theta, x, n) \propto \text{Ai}^2\left[-x^{2/3}\Delta/h^{1/3}\right](1 + B\Delta). \quad (3.15)$$

Na Rys. 3.12 przedstawiono porównanie natężenia pola rozproszonego w obszarze tęczy pierwszego rzędu, powstającej na włóknie SiO<sub>2</sub> o średnicy 125 μm w wyniku rozproszenia promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej ( $\lambda_0 = 0,6328$  μm,  $fwhm = 20$  nm) oraz natężeń obliczonych według klasycznej i skorygowanej teorii Airy'ego ( $\lambda_0 = 0,6328$  μm). Widoczna jest poprawa aproksymacji położenia prążków przez model skorygowany, szczególnie w odniesieniu do początkowych prążków.

### 3.4.2. Model inwersyjny w pomiarze średnicy szklanego włókna

Przyjęta taktyka modelowania inwersyjnego zakłada wykorzystanie informacji o wzajemnym położeniu dwóch pierwszych (licząc począwszy od kąta Kartezjusza), ciemnych prążków tęczy Airy'ego oraz sformułowanie matematycznej struktury modelu odwrotnego na podstawie skorygowanego wzoru Airy'ego według (3.15). Wybór danej pomiarowej, czyli odległości międzyprążkowej,

wynika z faktu, że wykazuje ona mniejszą podatność na zmiany współczynnika załamania niż bezwzględna pozycja prążka [87].



**Rys. 3.12.** Unormowane natężenie w polu dalekim w sąsiedztwie tęczy pierwotnej powstającej na homogenicznym włóknie SiO<sub>2</sub> według: (—) kompleksowego modelu rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności,  $\lambda_0 = 0,6328 \mu\text{m}$   $fwhm = 20 \text{ nm}$ , (---) teorii Airy'ego z korekcją jądra całkowego jako modelu rozpraszania promieniowania monochromatycznego ( $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ ), (····) klasycznej teorii Airy'ego jako modelu rozpraszania promieniowania monochromatycznego ( $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ ).

Niech  $\theta_i, \theta_j$  oznaczają położenia kątowe dwóch wybranych prążków zaś  $z_i, z_j > 0$  – argumenty funkcji Airy we wzorze (3.15), którym odpowiadają odpowiednio  $\theta_i, \theta_j$ . Różnica  $z_i - z_j$  może być wyrażona następująco:

$$z_i - z_j = \left( x^{2/3} / h^{1/3} \right) \left[ \Delta_i (1 + B\Delta_i) - \Delta_j (1 + B\Delta_j) \right], \quad (3.16)$$

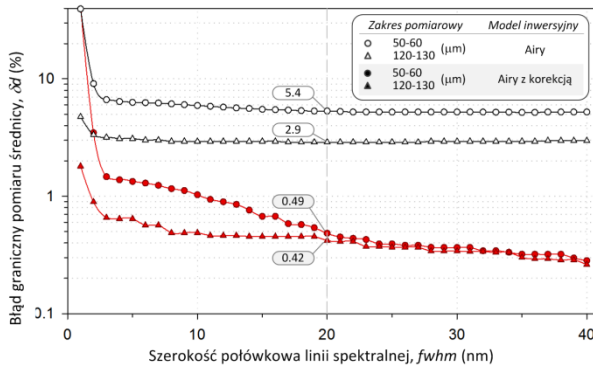
gdzie:

$$\begin{aligned} \Delta_i &\equiv \theta_i - \theta^D, \\ \Delta_j &\equiv \theta_j - \theta^D. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Położenia ciemnych prążków determinują zera funkcji  $\text{Ai}(-z)$ , natomiast położenia jasnych prążków – zera jej pochodnej. Pierwiastki funkcji Airy podają Abramowitz i Stegun [83]. Przekształcenie równania (3.16) względem średnicy włókna prowadzi do poszukiwanej relacji inwersyjnej:

$$\hat{d}(\theta_i, \theta_j, \lambda, n) = (\lambda / \pi) h^{1/2} \left[ (z_i - z_j) / \left( \Delta_i (1 + B\Delta_i) - \Delta_j (1 + B\Delta_j) \right) \right]^{3/2}. \quad (3.18)$$

W celu walidacji powyższej formuły inwersyjnej, dokonano symulacji tęczy powstającej na homogenicznym włóknie szklanym (SiO<sub>2</sub>), oświetlonym wiązką o niskim stopniu spójności, przyjmując jako parametr symulacji średnicę włókna



**Rys. 3.13.** Błąd graniczny pośredniego pomiaru średnicy w funkcji szerokości ½ linii spektralnej źródła promieniowania o maksimum emisyjnym 0,6328 μm. Rozpatrywane są dwa zakresy pomiarowe: 50÷60 μm i 120÷130 μm. Puste symbole reprezentują wynik modelu inwersyjnego opartego na klasycznej teorii Airy’ego; symbole pełne – na skorygowanej teorii Airy’ego.

$d$ , zmienianą w dwóch zakresach pomiarowych: 50÷60 i 120÷130 μm z krokiem co 0,1 μm. Obliczenia przeprowadzono dla źródła światła o linii widmowej aproksymowanej krzywą Gaussa w maksimum przypadającym na 0,6328 μm i o szerokości połówkowej z zakresu 1÷40 nm. Widmo źródła światła próbkowano w zakresie 0,5656÷0,7 μm z krokiem co 0,0001 μm. Z tak powstałego zbioru natężeń rozproszonych, wyznaczono dane pomiarowe w postaci odstępów kąтового pomiędzy dwoma pierwszymi (począwszy od kąta Kartezjusza) ciemnymi prążkami tarczy, stanowiące argument funkcji inwersyjnej (3.18). Bezwzględne położenia prążków odczytano z rozdzielczością 0,001°. Dokładność pośredniego pomiaru średnicy według (3.18) pozwala ocenić Rys. 3.13 przedstawiający zależność granicznego błędu systematycznego średnicy  $\delta d$  w funkcji szerokości połówkowej linii widmowej promieniowania padającego,  $fwhm$ . Błąd  $\delta d$  zdefiniowany jest jako:

$$\delta d = \max \left\{ \left| \frac{(\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}})}{d} \right| \cdot 100 \right\} (\%), \quad (3.19)$$

gdzie:  $\mathbf{d}$  jest wektorem rzeczywistych średnic (dana wejściowa kompleksowego modelu rozpraszania promieniowania niskospójnego) zaś  $\hat{\mathbf{d}}$  jest wektorem wyników pomiaru pośredniego (dana wyjściowa modelu inwersyjnego). Dla celów porównawczych, na wykresie zamieszczono również wyniki analizy inwersyjnej dokonanej z wykorzystaniem formuły inwersyjnej (3.18) z parametrem korekcyjnym  $B = 0$ , co prowadzi do formuły inwersyjnej odnoszącej się do klasycznej teorii Airy’ego.

Dokładność pomiaru średnicy w rozważanym przypadku jest uwarunkowana dwoma czynnikami – dokładnością równania inwersyjnego oraz, w znacznie mniejszym stopniu, dokładnością pomiaru położenia kąтового prążka. Rys. 3.13

dowodzi, że dokładność pomiaru przy wykorzystaniu formuły inwersyjnej (3.18) jest większa niż według tej odnoszącej się do klasycznej teorii Airy'ego. Wykorzystując typową diodę elektroluminescencyjną o  $fwhm = 20$  nm jako źródło promieniowania, błąd graniczny według modelu skorygowanego osiąga wartość poniżej 0,5%. Warto zauważyć, że model inwersyjny według klasycznej teorii Airy'ego cechuje się poprawą dokładności pomiaru wraz ze wzrostem średnicy włókna, zaś inwersja danych przy wykorzystaniu modelu skorygowanego, przy warunku  $fwhm > 20$  nm, daje zbliżone błędy pomiaru zarówno w zakresie  $50 \div 60$   $\mu\text{m}$  jaki i  $120 \div 130$   $\mu\text{m}$ . Nie zaobserwowano nadmiernych skoków wartości błędu, których wystąpienie świadczyłoby o wystąpieniu rozpraszania rezonansowego.

## Podsumowanie

Celem poznania naukowego przedstawionego w niniejszej pracy była charakterystyka metod nieinwazyjnej oceny *in-situ* właściwości geometrycznych homogenicznych i niehomogenicznych włókien szklanych, tj. światłowodów włóknistych, włókien stosowanych w materiałach kompozytowych, szklanych kapilar, itp. W dążeniu do sformułowania jednoznacznych zależności przyczynowo-skutkowych, umożliwiających inwersję danych pomiarowych z pola rozproszonego na badanym włóknie, podjęto działania w zakresie modelowania fizyko-matematycznego eksperymentu. Poznanie to zostało oparte na tezie, według której modyfikacja cech widmowych promieniowania padającego na włókno ma doprowadzić do ominięcia, charakterystycznego dla zagadnienia, problemu inwersji zależności całkowych. Ciężar jakościowy takiego podejścia polega przede wszystkim na łatwej interpretacji fizycznej pola rozproszonego, która może mieć charakter makroskopowy, odwołujący się do uśrednionej skali zjawisk. Dzięki temu, modelowanie matematyczne pola rozproszonego może posługiwać się regułami aproksymacyjnymi.

Immanentną cechą metod nieinwazyjnej charakterystyki, które wykorzystują wysokospójne światło lasera jako narzędzie poznawcze, jest rozwinięta analiza danych z pola rozproszonego w ograniczonej dziedzinie z wykorzystaniem przekształceń matematycznych, np. filtracji, które mogą prowadzić do zniekształceń sygnału użytecznego. W opozycji do metod laserowej charakterystyki, wykorzystanie promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej powoduje, że część subtelnych informacji, ujawniających się w wyniku oddziaływania promieniowania wysokospójnego, zostaje utracona. Działanie przyczyniające się do redukcji danych może budzić zastrzeżenia, należy je jednak utożsamiać z doborem narzędzia pomiarowego, które jest odpowiednie do pomiaru średnicy badanego obiektu z dokładnością do części mikrometra.

Dwie zaprezentowane metody pomiarowe wykorzystują to samo nieinwazyjne narzędzie poznawcze, czyli promieniowanie pochodzące ze źródła o umiarkowanym poszerzeniu widmowym, jednak różnią się one w aspekcie skutków oddziaływania pola z badaną cząstką i interpretacji fizyko-matematycznej tego oddziaływania.

Charakterystyczną cechą metody dyfraktometrycznej jest możliwość uzyskania bezwzględniego wyniku pomiaru, tj. niezależnego od struktury morfologicznej badanego włókna i jej izotropowe i anizotropowe zmiany, przy zachowaniu wysokiej wrażliwości na średnicę. Drogą symulacji numerycznych wykazano, że dla optymalnych warunków eksperymentu, tj. szerokości linii widmowej źródła promieniowania, długości fali, możliwe jest uwypuklenie dyfrakcji jako nadrzędnego efektu pola rozproszonego pod małym kątem i wytłumienie

pozostałych efektów, wynikających z propagacji światła przez strukturę transparentnej cząsteczki. Prosta analiza, wykorzystująca przybliżenie całkowite Huygensa-Fresnela, okazała się adekwatnym narzędziem matematycznego opisu promieniowania rozproszonego pod małym kątem.

Badania promieniowania rozproszonego pod dużym kątem zostały zainspirowane fenomenem tęczy powstającej na cząstkach przepuszczających światło. Doświadczenia numeryczne dowiodły, że w wyniku doboru parametrów widmowych źródła promieniowania, możliwe jest wygenerowanie tęczy Airy'ego pozbawionej licznych form nieliniowych oraz adaptacja modelu tęczy pierwotnej zaproponowanego przez Airy'ego do realizacji zagadnienia odwrotnego w pośrednim pomiarze średnicy włókna, cechującego się niewielkim parametrem rozmiarowym. Ten klasyczny model tęczy został dodatkowo skorygowany o czynnik wynikający z teorii CAM w celu redukcji błędu systematycznego. Jako, że tęcza jest zjawiskiem powstającym w wyniku załamania światła przez transparentną cząsteczkę, dane pomiarowe w polu dalekim zależą od struktury refrakcyjnej tej cząstki.

Należy zauważyć, że obie wymienione metody są w istocie komplementarne, gdyż aplikowane w ramach jednego eksperymentu pomiarowego, dostarczają informacji o cechach zewnętrznych badanej cząstki jak i również o jej wewnętrznej strukturze.

Intencją zaprezentowanej w niniejszym opracowaniu analizy jest ukazanie raczej jakościowej niż ilościowej wartości poznawczej. Z perspektywy badań empirycznych konieczna staje się weryfikacja klasycznych rozwiązań układów pomiarowych zaprojektowanych pod kątem generacji i rejestracji spójnego promieniowania rozproszonego pod małym i dużym kątem. Weryfikacja ta wpisuje się w płaszczyznę działań naukowo-badawczych prowadzonych systematycznie w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej.

## Bibliografia

- [1] **J. Mroczka**, *Metrologiczne Problemy Wykorzystywania Światła Rozproszonego do Badań Rozkładu Wielkości Cząstek w Roztworach Dyspersyjnych* vol. 4. Warszawa, 1990.
- [2] **J. Mroczka**, "Metrologia - nowe wyzwania," in *Metrologia wczoraj, dziś, jutro*, J. Mroczka, Ed., ed Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
- [3] **J. Mroczka**, "The cognitive process in metrology," *Measurement*, vol. 46, pp. 2896-2907, 2013.
- [4] **J. Mroczka**, "Turbidimetric methods in particle sizing," presented at the Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO), Beijing, China, 1991.
- [5] **J. Mroczka**, "Integral transform technique in particle sizing," presented at the Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO), Beijing, China, 1991.
- [6] **J. Mroczka**, "Method of Moments in Light Scattering Data Inversion in the Particle Size Distribution," *Optics Communications*, vol. 99, 1993.
- [7] **J. Mroczka** and D. Szczuczyński, "Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements," *Metrology and Measurement Systems*, vol. 16, pp. 333-357, 2009.
- [8] **J. Mroczka** and D. Szczuczyński, "Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements," *Applied Optics*, vol. 49, pp. 4591-4603, 2010.
- [9] **J. Mroczka** and D. Szczuczyński, "Simulation research on improved regularized solution of inverse problem in spectral extinction measurements," *Applied Optics*, vol. 51, pp. 1715-1723, 2012.
- [10] **J. Mroczka** and D. Szczuczyński, "Improved technique of retrieving particle size distribution from angular scattering measurements," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 129, pp. 48-59, 2013.
- [11] F. Onofri, M. Krzysiek, S. Barbosa, V. Messenger, K. F. Ren, and **J. Mroczka**, "Near-critical-angle scattering for the characterization of clouds of bubbles: particular effects," *Applied Optics*, vol. 50, pp. 5759-5769, 2011.
- [12] M. Czerwiński, **J. Mroczka**, T. Girasole, G. Gouesbet, and G. Gréhan, "Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions. Pt. 1. Direct problem: hybrid-method approximation.," *Applied Optics*, vol. 40, pp. 1514-1524, 2001.

- [13] M. Czerwiński, **J. Mroczka**, T. Girasole, G. Gouesbet, and G. Gréhan, "Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions. Pt. 2. Inverse problem: particle size determination," *Applied Optics*, vol. 40, pp. 1525-1531, 2001.
- [14] T. Guszowski and **J. Mroczka**, "Metoda inwersyjna wykorzystująca sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej," presented at the Metrologia wspomagana komputerowo. MWK '2003. VI Szkoła - konferencja., Waplewo, 2003.
- [15] T. Girasole, H. Bultynck, G. Gouesbet, G. Gréhan, F. Le Meur, J. N. Le Toulouzan, **J. Mroczka**, K. F. Ren, C. Roze, and D. Wysoczański, "Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering: Part 1: Numerical aspects," *Particle & Particle Systems Characterization*, vol. 14, pp. 163-174, 1997.
- [16] T. Girasole, G. Gouesbet, G. Gréhan, J. N. Le Toulouzan, **J. Mroczka**, K. F. Ren, and D. Wysoczański, "Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering: Part 2: Experimental aspects," *Particle & Particle Systems Characterization*, vol. 14, pp. 211-218, 1997.
- [17] T. Girasole, J. N. Le Toulouzan, **J. Mroczka**, and D. Wysoczański, "Fiber orientation and concentration analysis by light scattering: experimental setup and diagnosis," *Review of Scientific Instruments*, vol. 68, pp. 2805-2811, 1997.
- [18] **J. Mroczka**, D. Wysoczański, and F. Onofri, "Optical parameters and scattering properties of red blood cells," *Optica Applicata*, vol. 32, pp. 691-700, 2002.
- [19] F. Onofri, S. Barbosa, M. Woźniak, O. Toure, and **J. Mroczka**, "Optical characterization of nanoparticles and aggregates: light extinction spectrometry," presented at the 15th International Symposium on Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2010.
- [20] K. Skorupski, **J. Mroczka**, N. Riefler, H. Oltmann, S. Will, and T. Wriedt, "Impact of morphological parameters onto simulated light scattering patterns," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 119, pp. 53-66, 2013.
- [21] M. Woźniak, F. Onofri, S. Barbosa, J. Yon, and **J. Mroczka**, "Comparison of methods to derive morphological parameters of multi-fractal samples of particle aggregates from TEM images," *Journal of Aerosol Science*, vol. 47, pp. 12-26, 2012.
- [22] T. Wojtaszek and **J. Mroczka**, "Light scattering simulations of spheroids using three beams phase Doppler system," presented at the XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil, 2006.
- [23] G. Świrniak, "Diffraction of incoherent light for thin, glass fibre diameter characterization," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 1a, pp. 276-280, 2012.

- [24] G. Świrniak, "On the use of Airy fringes for indirect measurement of glass fibre diameter," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 3a, pp. 207-211, 2012.
- [25] G. Świrniak and G. Głomb, "Optical characterization of a glass fibre with the use of low coherent light (LED)," in *Optical Micro- and Nanometrology IV*, Brussels, Belgium, 2012, pp. 843017-1 - 843017-8
- [26] G. Świrniak and G. Głomb, "Small angle light scattering for a glass fibre diameter characterization," in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*, Munich, Germany, 2013, pp. 87882N-1 - 87882N-8.
- [27] P. K. Gupta, "Glass Fibers for Composite Materials," in *Fiber Reinforcements for Composite Materials*. vol. II, A. D. Bunsell, Ed., ed The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V., 1988, pp. 19-71.
- [28] J. Dorosz, *Technologia światłowodów włóknistych* vol. 86. Kraków: Polskie Towarzystwo Ceramiczne PAN, 2005.
- [29] F. Onofri, A. Lenoble, H. Bultynck, and P.-H. Guéring, "High-resolution laser diffractometry for the on-line sizing of small transparent fibres," *Optics Communications*, vol. 234, pp. 183-191, 2004.
- [30] R. Jabłoński and P. Fotowicz, "New generation of lasermike," in *Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry*, Florianopolis, Brazil, 2001, pp. 91-98.
- [31] R. Jabłoński, M. Kretkowski, and P. Fotowicz, "Simple Lasermike for Measurement of Dimension, Form and Position of Cylindrical Elements," *Engineering Mechanics*, vol. 12, pp. 299-305, 2005.
- [32] G. F. Marshall, *Handbook of Optical and Laser Scanning*. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [33] G. W. Barton, S. H. Law, and T. N. Phan, "Limitations to the Manufacture of Specialty Optical Fiber," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 127, pp. 663-669, 2005.
- [34] L. G. Cohen and P. Glynn, "Dynamic measurement of optical fiber diameter," *Review of Scientific Instruments*, vol. 44, pp. 1749-1752, 1973.
- [35] Y. Hardalupas, K. Hishida, M. Maeda, H. Morikita, A. M. K. P. Taylor, and J. H. Whitelaw, "Shadow Doppler technique for sizing particles of arbitrary shape," *Applied Optics*, vol. 33, pp. 8417-8426, 1994.
- [36] H.-E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, and C. Tropea, *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [37] S. A. Schaub, A. A. Naqwi, and F. L. Harding, "Design of a phase/Doppler light-scattering system for measurement of small-diameter glass fibers during fiberglass manufacturing," vol. 37, pp. 573-585, 1988.

- [38] J. C. Jasapara, "Non-invasive characterization of microstructured optical fibers using Fourier domain optical coherence tomography," *Optics Express*, vol. 13, pp. 1228-1233, 2005.
- [39] J. C. Jasapara, E. Monberg, F. DiMarcello, and J. W. Nicholson, "Accurate noncontact optical fiber diameter measurement with spectral interferometry," *Optics Letters*, vol. 28, pp. 601-603, 2003.
- [40] J. C. Jasapara and S. Wielandy, "Characterization of coated optical fibers by Fourier-domain optical coherence tomography," *Optics Letters*, vol. 30, pp. 1018-1020, 2005.
- [41] J. C. Jasapara, S. Wielandy, and A. Yablon, "Fourier Domain Optical Coherence Tomography - a new platform for measurement of standard and microstructured fiber dimensions," in *IEE Optoelectronics*, 2006, pp. 229-234.
- [42] A. Kokhanovsky, Ed., *Light Scattering Reviews: Single and Multiple Light Scattering*. Springer, 2006.
- [43] M. N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, 2 ed.: CRC Press, 2001.
- [44] F. M. Kahnert, "Numerical methods in electromagnetic scattering theory," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, vol. 79-80, pp. 775-824, 2003.
- [45] A. J. Devaney, "Nonuniqueness in the inverse scattering problem," *Journal of Mathematical Physics*, vol. 19, pp. 1526-1535, 1978.
- [46] A. J. Devaney and G. C. Sherman, "Nonuniqueness in Inverse Source and Scattering Problems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-30, pp. 1034-1037, 1982.
- [47] H. C. van de Hulst, *Light scattering by small particles*. New York: Dover Publications, 1981.
- [48] G. Świrniak, "Wybrane zagadnienia pomiaru średnicy włókna optycznego w procesie produkcji z wykorzystaniem światła rozproszonego," in *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*, J. Mroczka, Ed., ed Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009, pp. 255-281.
- [49] D. Lebrun, S. Belaid, C. Özkul, K. F. Ren, and G. Gréhan, "Enhancement of wire diameter measurements: comparison between Fraunhofer diffraction and Lorenz-Mie theory," *Optical Engineering*, vol. 4, pp. 946-950, 1996.
- [50] P. W. Barber, J. F. Owen, and R. K. Chang, "Resonant scattering for characterization of axisymmetric objects," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, pp. 168-172, 1982.
- [51] J. F. Owen, P. W. Barber, B. J. Messinger, and R. K. Chang, "Determination of optical-fiber diameter from resonances in the elastic scattering spectrum," *Optics Letters*, vol. 6, pp. 272-274, 1981.

- [52] H. Bach and N. Neuroth, Eds., *The Properties of Optical Glass*. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [53] J. W. Fleming, "Dispersion in GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses," *Applied Optics*, vol. 23, pp. 4486-4493, 1983.
- [54] O. V. Butov, K. M. Golant, A. L. Tomashuk, M. J. N. van Stralen, and A. H. E. Breuls, "Refractive index dispersion of doped silica for fiber optics," *Optics Communications*, vol. 213, pp. 301-308, 2002.
- [55] J. W. Goodman, *Statistical Optics*: Wiley, 2000.
- [56] C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [57] F. Onofri, "Diagnostics optiques des milieux multiphasiques," HDR, Mécanique Energétique, Université de Provence, Marseille, 2005.
- [58] R. Li, H. Han, H. Jiang, and K. F. Ren, "Debye series of normally incident plane-wave scattering by an infinite multilayered cylinder," *Applied Optics*, vol. 45, pp. 6255-6262, 2006.
- [59] S. H. Wemple, "Material dispersion in optical fibers," *Applied Optics*, vol. 18, pp. 31-35, 1979.
- [60] J. A. Adam, "The mathematical physics of rainbows and glories," *Physics Reports*, vol. 356, pp. 229-365, 2002.
- [61] R. L. Lee and A. B. Fraser, *The Rainbow Bridge: Rainbows in Art, Myth and Science*: Pennsylvania State University Press, 2001.
- [62] G. B. Airy, "On the intensity of light in the neighbourhood of a caustic," in *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. vol. 6, ed: University Press, 1838.
- [63] K. J. Vahala, "Optical microcavities," *Nature*, vol. 424, pp. 839-846, 2003.
- [64] G. P. Können and J. H. de Boer, "Polarized rainbow," *Applied Optics*, vol. 18, pp. 1961-1965, 1979.
- [65] P. H. Ng, M. Y. Tse, and W. K. Lee, "Observation of high-order rainbows formed by a pendant drop," *Journal of optical Society of America B*, vol. 15, pp. 2782-2787, 1998.
- [66] J. P. A. J. van Beeck and M. L. Riethmuller, "Rainbow phenomena applied to the measurement of droplet size and velocity and to the detection of nonsphericity," *Applied Optics*, vol. 35, pp. 2259-2266, 1996.
- [67] N. Roth, K. Anders, and A. Frohn, "Refractive-index measurements for the correction of particle sizing methods," *Applied Optics*, vol. 30, pp. 4960-4965, 1991.
- [68] X. e. Han, K. F. Ren, Z. Wu, F. Corbin, G. Gouesbet, and G. Gréhan, "Characterization of initial disturbances in a liquid jet by rainbow sizing," *Applied Optics*, vol. 37, pp. 8498-8503, 1998.

- [69] L. Mèes, G. Gouesbet, and G. Gréhan, "Scattering of laser pulses (plane wave and focused gaussian beam) by spheres," *Applied Optics*, vol. 40, pp. 2546-2550, 2001.
- [70] L. Mèes, G. Gréhan, and G. Gouesbet, "Time-resolved scattering diagrams for a sphere illuminated by plane wave and focused short pulses," *Optics Communications*, vol. 194, pp. 59-65, 2001.
- [71] L. Mèes, K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet, "Scattering of a Gaussian beam by an infinite cylinder with arbitrary location and arbitrary orientation: numerical results," *Applied Optics*, vol. 38, pp. 1867-1876, 1999.
- [72] J. A. Lock, "Morphology-dependent resonances of an infinitely long circular cylinder illuminated by a diagonally incident plane wave or a focused Gaussian beam," *Journal of Optical Society of America A*, vol. 14, pp. 653-661, 1997.
- [73] J. van Beeck, L. Zimmer, and M. L. Riethmuller, "Global Rainbow Thermometry for Mean Temperature and Size Measurement of Spray Droplets," *Particle & Particle Systems Characterization*, vol. 18, pp. 196-204, 2001.
- [74] M. R. Vertrano, J. P. A. J. van Beeck, and M. L. Riethmuller, "Global rainbow thermometry: improvements in the data inversion algorithm and validation technique in liquid-liquid suspension," *Applied Optics*, vol. 43, pp. 3600-3607, 2004.
- [75] M. R. Vertrano, J. Van Beeck, and M. L. Riethmuller, "Assessment of refractive index gradients by standard rainbow thermometry," *Applied Optics*, vol. 44, pp. 7275-7281, 2005.
- [76] H. M. Presby and D. Marcuse, "Refractive Index and Diameter Determinations of Step Index Optical Fibers and Preforms," *Applied Optics*, vol. 13, pp. 2882-2885, 1974.
- [77] C. Adler, J. A. Lock, J. K. Nash, and K. W. Saunders, "Experimental observation of rainbow scattering by a coated cylinder: twin primary rainbows and thin-film interference," *Applied Optics*, vol. 40, pp. 1548-1558, 2001.
- [78] C. L. Adler, J. A. Lock, I. P. Rafferty, and W. Hickok, "Twin-rainbow metrology. I. Measurement of the thickness of a thin liquid film draining under gravity," *Applied Optics*, vol. 42, pp. 6584-6594, 2003.
- [79] V. Khare and H. M. Nussenzveig, "Theory of the Rainbow," *Physical Review Letters*, vol. 33, pp. 976-980, 1974.
- [80] H. M. Nussenzveig, "High-Frequency Scattering by a Transparent Sphere. II. Theory of the Rainbow and the Glory," *Journal of Mathematical Physics*, vol. 10, pp. 125-176, 1969.
- [81] P. Laven, "How glories are formed?," *Applied Optics*, vol. 44, pp. 5675-5683, 2005.

- [82] J. A. Lock, "Supernumerary spacing of rainbows produced by an elliptical-cross-section cylinder. I. Theory.," *Applied Optics*, vol. 39, pp. 5040-5051, 2000.
- [83] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, 9th ed. Washington DC: National Bureau of Standards, 1970.
- [84] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics*, 6th ed. Oxford, UK.: Pergamon Press Ltd., 1980.
- [85] H. M. Nussenzveig, "Complex angular momentum of the rainbow and the glory," *Journal of optical Society of America*, vol. 69, pp. 1068-1079, 1979.
- [86] H. M. Nussenzveig, *Diffraction Effects in Semiclassical Scattering*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [87] R. T. Wang and H. C. van de Hulst, "Rainbows: Mie computations and the Airy approximation," *Applied Optics*, vol. 30, pp. 106-117, 1991.



## Spis treści

Uchwała Nr 10/2014/III Senatu Politechniki Lubelskiej z dnia 27 marca 2014 r. w sprawie nadania tytułu Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej .....	3
Dyplom Doktora Honoris Causa .....	5
Laudacja z okazji nadania godności Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej prof. dr hab. inż. Januszowi Mroczone – wygłoszona przez JM Rektora Politechniki Lubelskiej prof. dr hab. inż. Piotra Kacejko .....	7
Pismo JM Rektora Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie prof. dr hab. inż. Tadeusza Słomki .....	11
Wyciąg z Protokołu Posiedzenia Senatu AGH z dnia 5 marca 2014 roku .....	13
Opinia nt. dorobku naukowego i osiągnięć prof. dr hab. inż. Janusza Mroczone, członka korespondenta PAN w związku z wszczęciem postępowania o nadanie tytułu Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej .....	17
Pismo JM Rektora Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego gen. bryg. prof. dr hab. inż. Zygmunta Mierczyka .....	23
Uchwała Senatu Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego nr 12/WAT/2014 z dnia 27 lutego 2014 r. w sprawie przyjęcia opinii o dorobku i poparciu inicjatywy nadania tytułu Doktora Honoris Causa przez Politechnikę Lubelską .....	25
Opinia o dorobku naukowym, osiągnięciach i zasługach prof. dr hab. inż. Janusza Mroczone, prof. zw. Politechniki Wrocławskiej, członka korespondenta PAN, członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych, kandydata do tytułu i godności Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej .....	27
Podziękowanie Doktora Honoris Causa prof. dr hab. Tadeusza Mroczone .....	33
Wykład Doktora Honoris Causa prof. dr hab. Tadeusza Mroczone: <i>Światło jako narzędzie pomiarowe w charakterystyce średnicy transparentnego włókna</i> .....	35

