KOMITET METROLOGII I APARATURY NAUKOWEJ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

PROBLEMY METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ 10

KSIĘGA DEDYKOWANA PROF. JANUSZOWI MROCZCE
Z OKAZJI 70. ROCZNICY URODZIN I 46-LECIA PRACY
NA POLITECHNICE WROCŁAWSKIEJ

Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

PROBLEMY METROLOGII
ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ

KSIĘGA DEDYKOWANA PROF. JANUSZOWI MROCZCE
Z OKAZJI 70. ROCZNICY URODZIN I 46-LECIA PRACY
NA POLITECHNICE WROCŁAWSKIEJ

KOMITET METROLOGII I APARATURY NAUKOWEJ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

PROBLEMY METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ 10

pod redakcją naukową
Grzegorza Świrniaka

Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2022

Redakcja techniczna
Stanisław GANCARZ

Projekt okładki
Janusz MROCZKA

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2022

OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
http://www.oficyna.pwr.edu.pl
e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-202-8

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

Spis treści

Przedmowa / 9

Biografia / 11

Alma Mater / 13

Szkoła metrologii elektronicznej i fotonicznej / 27

Mistrz i uczeń / 33

Professor Magnus / 42

Wybrane laudacje i recenzje / 53

Laudacja promotorska wygłoszona z okazji nadania Prof. Mroczce tytułu doktora honoris causa Akademii Górniczo-Hutniczej (*J. Gajda*) / 55

Recenzja dorobku naukowego, osiągnięć i zasług prof. Mroczki, kandydata do tytułu doktora honoris causa Akademii Górniczo-Hutniczej (*P. Kisała*) / 61

Recenzja dorobku naukowego, osiągnięć i zasług prof. Mroczki, kandydata do tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej (*A. Zając*) / 73

Opinia w sprawie nadania prof. Mroczce tytułu doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej (*A. Materka*) / 88

Opinia o dorobku naukowym, osiągnięciach i zasługach prof. Mroczki, członka korespondenta PAN, kandydata do tytułu i godności doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej (*A. Bieńkowski*) / 94

Podziękowanie prof. Mroczki wygłoszone podczas uroczystości nadania mu tytułu doktora honoris causa Akademii Górniczo-Hutniczej / 109

Wpis prof. Mroczki w księdze pamiątkowej Wojskowej Akademii Technicznej z okazji uroczystości nadania mu tytułu doktora honoris causa / **112**

Referaty Prof. Mroczki w biuletynie Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej / **115**

Politechnika nie jest samotną wyspą / **117**

Współczesna epoka jest wyścigiem między wychowaniem i katastrofą / **120**

Tempora mutantur et nos mutamur in illis / **123**

Wykłady / **127**

Światło jako narzędzie pomiarowe w charakterystyce średnicy transparentnego włókna / **129**

Proces poznawczy w metrologii / **177**

Tęcza w procesie poznawczym / **213**

Wybrane zagadnienia modelowania agregatów fraktalnych / **277**

Matematyczne uwarunkowania problemu odwrotnego w pośrednich pomiarach rozkładu wielkości cząstek układów dyspersyjnych / **315**

Dyplomy doktora honoris causa / **383**

Zakończenie / **391**

Discipulorum amor et pietas

Profesorowi Januszowi Mroczce

z wdzięcznością

przyjaciele, współpracownicy i wychowankowie

Przedmowa

Zobaczyć świat w ziarenku piasku,
Niebiosa w jednym kwiecie z lasu.
W ściśniętej dłoni zamknąć bezmiar,
W godzinie – nieskończoność czasu.

(W. Blake, *Wróżby niewinności*)

Niniejsze dziesiąte wydanie *Problemów Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej* dedykowane jest Panu Profesorowi Januszowi Mroczce z okazji jubileuszu 70-lecia urodzin oraz 46-lecia pracy naukowej na Politechnice Wrocławskiej.

Inicjatywa przygotowania niniejszej księgi spotkała się z entuzjastycznym przyjęciem przyjaciół, współpracowników oraz wychowanków Profesora Mroczki. Wszystko to za sprawą niezwykłej atencji, jaką jest on obdarowywany. Zawodowo – elektronik, profesor zwyczajny Politechniki Wrocławskiej, twórca polskiej szkoły metrologii elektronicznej i fotonicznej, autor cenionych publikacji, wychowawca kilku pokoleń studentów, doktorów i samodzielnych pracowników nauki. Prawy Mistrz stawiający intelektualną poprzeczkę wysoko, ale zawsze na odpowiedniej drodze. Wymagający rozmówca – raz za razem prowokuje, by obudzić myślenie i racjonalność. W swym usposobieniu uderza w naukowe stereotypy i polityczne uwarunkowania, odzierając je z maski głupoty i obłudy. Jest człowiekiem niezależnym, bowiem etyka i własne przekonania są ważniejsze od niejasnych korzyści politycznych bądź finansowych. A z natury i usposobienia to skromny i serdeczny człowiek. Zawsze idzie do ludzi z pogodnym obliczem, dowodząc, że wybitnemu umysłowi niekoniecznie musi towarzyszyć styl nauczyciela akademickiego wpatrzonego w zakurzone tomy książek. Nieodparcie narzuca się myśl, że to życie Profesora, kierowane pasją wiedzy i szacunku do ludzi, jest spełnieniem jego powołania. A gdy jest mu nieraz ciężko, jak to w życiu, zwykł powtarzać za Waligórskim „Wnuki rosną… E, jakoś to będzie”.

Ta oto książka jest zbiorem wybranych owoców naukowej twórczości Profesora Mroczki. Podejmuje ona za swą przewodnią myśl filozoficzne przesłanie, że istnienie nauki zawdzięczamy osobistym pasjom ludzi nauki. To również spotkanie z nietu-

zinkową osobowością, która nie daje się zakuć w kajdany metodologicznej rutyny i politycznej poprawności.

Przez 46 lat pracy Profesor Mroczka tworzył język nauki, który nam – wychowankom, współpracownikom i przyjaciołom, pomaga nazywać rzeczywistość. Jego życie jest pochwałą dla wyobraźni i radością z twórczego myślenia. Myślenia, które czyni nas wolnymi. Z tego powodu czujemy dumę Panie Profesorze.

Biografia

Alma Mater

Profesor Janusz Mroczka związał swoje losy z Politechniką Wrocławską w 1971 roku. Studia na Wydziale Elektroniki ukończył w 1976 roku, broniąc pracę magisterską pt. „Filtr adaptacyjny dolnoprzepustowy do tłumienia sygnałów zakłócających w przyrządach tablicowych". Dalszą karierę akademicką kontynuuje w Instytucie Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej. Lata 1976–1980 to okres szczególnej aktywności naukowej Profesora Mroczki. Swoje pierwotne naukowe zainteresowania kieruje ku nowatorskim, nieznanym jeszcze w Polsce metodom optycznej i nieinwazyjnej charakterystyki ośrodków dyspersyjnych. Zwyczajnie – i w naturalny sposób – ten wybór wywodzi się z zamiłowania do metod empirycznych w nauce, łączących wiedzę i umiejętności modelowania fizycznego i matematycznego rzeczywistości z praktycznymi umiejętnościami poczynań eksperymentalnych. W 1980 roku uzyskuje stopień doktora nauk technicznych na podstawie dysertacji „Zagadnienie pomiaru mętności wody oraz wielkości cząstek roztworów koloidalnych za pomocą światła rozproszonego", a stopień doktora habilitowanego w roku 1991 na podstawie monografii pt. „Metrologiczne problemy wykorzystywania światła rozproszonego do badań rozkładu wielkości cząstek w roztworach dyspersyjnych". Już po pięciu latach, w 1996 roku, otrzymuje tytuł naukowy profesora nauk technicznych, a w 1999 stanowisko profesora zwyczajnego Politechniki Wrocławskiej.

Instytut Metrologii Elektrycznej

Instytut Metrologii Elektrycznej (IME) Politechniki Wrocławskiej powstał 1 września 1968 roku. Był to instytut międzywydziałowy, utworzony poprzez połączenie wcześniej funkcjonujących katedr: Katedry Pomiarów Elektrycznych Wydziału Elektrycznego i Katedry Miernictwa Elektronicznego Wydziału Elektroniki. Katedra Pomiarów Elektrycznych istniała od września 1945 roku, a jej założycielem i kierownikiem był profesor Kaziemierz Idaszewski. Katedra Miernictwa Elektronicznego powstała w 1963 roku. Była to jednostka ówczesnego Wydziału Łączności (przekształconego w 1966 roku w Wydział Elektroniki), a jej kierownikiem był profesor Andrzej Jellonek. W 1980 roku część pracowników IME dołączyło do Wydziału Podstawowych Problemów Techniki, gdzie powstawał kierunek „bioinżynieria". Od tej pory IME jest grupą zakładów wchodzących w skład trzech wydziałów. Są to zakłady: Fizycznych Podstaw Pomiaru, Metod i Teorii Pomiaru, Miernictwa Przemysłowego, Mikroprocesorowych Systemów Pomiarowych oraz Elektronicznej i Medycznej Aparatury Pomiarowej.

Rok 1989 przynosi przełomowe zmiany w historii Polski. Rzeczywistość kształtowana przez rynkową politykę państwa stawia przed uczelniami nowe, długofalowe wyzwania i uzależnienie wielkości finansowania od wymiernych osiągnięć zarówno w sferze społecznej (umasowione kształcenie nowych pokoleń inżynierów i pracowników nauki, weryfikacja struktury kadr), jak i naukowej (pozycja w międzynarodowych rankingach, efektywność pozyskiwania funduszy na badania naukowe, komercjalizacja badań naukowych etc.). W tej nowej, przedmiotowej rzeczywistości w 1991 roku Profesor Janusz Mroczka podejmuje zadanie zreformowania struktury kształcenia i procesów związanych z badaniami, obejmując stanowisko dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej (IME) Politechniki Wrocławskiej. Funkcję tę pełni do 1996 roku. Punkt wyjścia jego działalności jest złożony: koniunkturalna gorączka, brak odpowiedniego zaplecza technicznego do prowadzenia konkurencyjnych badań, przeciążenie pracowników nauki dydaktyką, brak systemu motywacyjnego do rozwoju naukowego – szczególnie w przestrzeni finansowej.

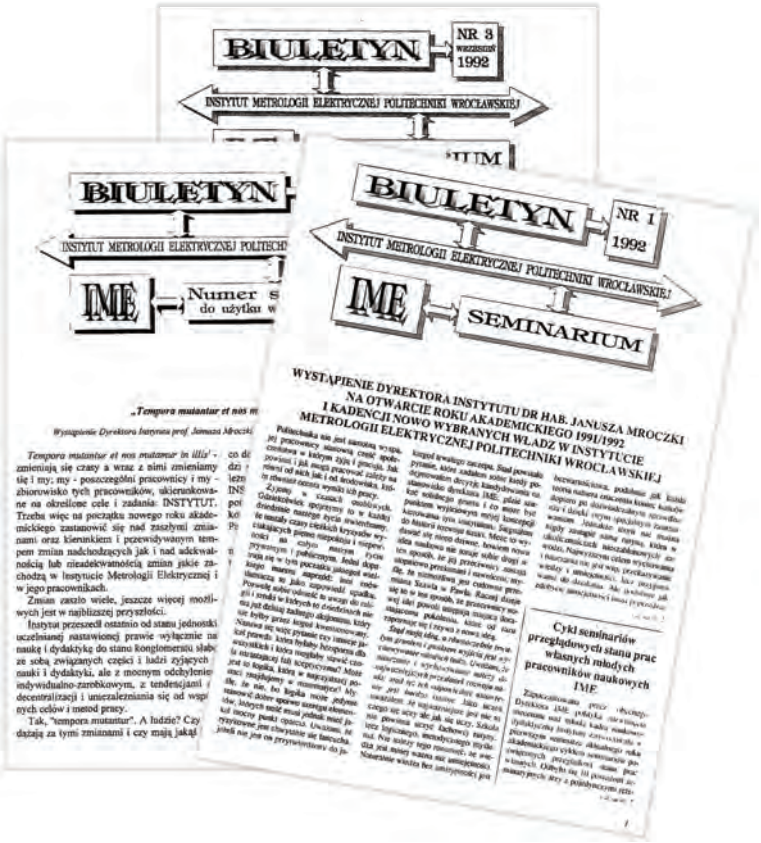
Przegląd tego, co „działo się" w IME odnajdziemy w serii referatów Profesora Mroczki zamieszczonych w biuletynie IME, ukazującym się regularnie w latach 1991–1996. Biuletyn ten, wydawany z jego inicjatywy po objęciu stanowiska dyrektora Instytutu, miał być miejscem dla wymiany myśli naukowej oraz publikacji sprawozdań i komunikatów z nadzieją na dyskusję i pozytywny odbiór środowiska akademickiego, nie zaś polityczną grę. Lektura referatów opublikowanych przez Profesora nasuwa czytelny wniosek: **rozwój instytucji naukowej nie może polegać na przyjęciu biernej postawy świadka w procesie przemian, lecz na aktywnym i starannym planowaniu przyszłości**.

Aby zdefiniować tę przyszłość, Profesor Mroczka nie odwołuje się do tradycyjnej roli Instytutu/Politechniki, jako organów autonomicznych o wielowiekowych tradycjach i – wynikających z tych tradycji – postawach naukowych rozumianych jako nienaruszalne akademickie *status quo*, lecz – niejako przekornie – do naukowej etyki. Przyszłość Profesor widzi przede wszystkim w dorastającym i dynamicznym pokoleniu. W jednym z referatów przeczytamy:

> (…) *Stąd moją ideą, a równocześnie trwałym gruntem i punktem wyjścia jest wychowywanie młodych ludzi. Uważam, że nauczanie i wychowywanie należy do najważniejszych przesłanek rozwoju nauki*[1].

Profesor Mroczka w dyskusjach z młodymi ludźmi często podkreślał, że przez opóźnienia gospodarcze spowodowane latami panowania obcego ustroju jego spadko-

[1] Referat Instytutu Metrologii Elektrycznej na otwarcie roku akademickiego 1991/1992.



Cykl referatów prof. Janusza Mroczki publikowanych w latach 1991–1996 po objęciu stanowiska Dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej

biercy i ofiary nie zawsze nadążają za trendami i dynamizmem rozwoju naukowego|i technologicznego na świecie, a zauroczeni własną historią tracą z horyzontu to, co ważne. W pokoleniach młodych ludzi o krytycznych umysłach Profesor upatruje potencjał do realizacji pokoleniowego przeskoku. To oni są przyszłością i to oni są w stanie zmienić zasadę *plus vis quam rati*o na *plus ratio quam vis*[2].

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej

W 1997 roku na wniosek władz Uczelni, Senat Politechniki Wrocławskiej podejmuje uchwałę o likwidacji instytutów międzywydziałowych. Motywacją tej decyzji jest

[2] łac. „Więcej znaczy rozum, niż siła”.

brak spójności finansowej takich struktur. Po blisko 30 latach kończy także działalność Instytut Metrologii Elektrycznej.

Niespójność finansowa nie była jednak największą bolączką IME, lecz erozja mentalności czy postaw akademików prowadząca do deprecjacji zawodu naukowca. Głównym powodem erozji etosu akademickiego jest coraz powszechniejszy brak troski o dobro wspólne, dobro wypierane przez interesy jednostek. Profesor Mroczka dobitnie pisze o tym w jednym z biuletynów IME[3]:

> *Instytut przeszedł ostatnio od stanu jednostki uczelnianej nastawionej prawie wyłącznie na naukę i dydaktykę do stanu konglomeratu słabo ze sobą związanych części i ludzi żyjących z nauki i dydaktyki, ale z mocnym odchyleniem indywidualno-zarobkowym, z tendencjami do decentralizacji i uniezależniania się od wspólnych celów i metod pracy* (…).
>
> *Problem, na który pragnę zwrócić uwagę dotyczy naszej wspólnej pracy i wzajemnego współdziałania.* (…)

W likwidacji IME Profesor Mroczka dostrzega paradoksalnie szansę na zmianę tego *status quo*, szansę na zbudowanie nowego zespołu, dla którego **nauka jest życiem samym, a nie sposobem na życie.** Wartości akademickich należy bronić, a orężem tej walki jest szacunek dla norm etycznych i kultywowanie dobra. Czytamy dalej:

> *Uczmy się dobrej roboty patrząc w przyszłość, a otoczenie nasze przestanie być przybytkiem zawiści i zła. Uświadommy sobie, że dane jest już nam żyć w wolności i z uznania tych wartości nie wynika bezużyteczna akceptacja różnych zachowań tych, którzy z nich korzystają.*

I tak nadchodzi 1998 rok: czas powołania do życia Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej przez Profesora Mroczkę. Mandat do pełnienia roli kierownika Katedry uzyskuje on z wyboru pracowników byłego Instytutu Metrologii Elektrycznej. 1 kwietnia 1998 roku Senat Politechniki Wrocławskiej podejmuje formalną uchwałę o powołaniu **pierwszej po 1968 roku Katedry na Politechnice Wrocławskiej**.

Jednostkami pomocniczymi Katedry zostają biblioteka dysponująca zbiorem 7379 książek i 83 tytułami czasopism specjalistycznych z dziedziny metrologii (zlikwidowana 1 stycznia 2005 roku decyzją Dziekana Wydziału Elektroniki) oraz warsztat.

---

[3] Referat Instytutu Metrologii Elektrycznej na otwarcie roku akademickiego 1995/1996.

W chwili kiedy powstaje niniejsza książka mijają 24 lata działalności Katedry. Jej powołaniu towarzyszy następujące przesłanie:

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej powstała w wierze, że czym większy wysiłek skierujemy w poznanie, tym głębsza będzie świadomość naszej podmiotowości.

Katedra to miejsce i wspólnota służąca prawdzie poznawanej i przekazywanej, gdzie spotykają się uczeni i uczniowie, profesorowie i studenci zespoleni dążeniem do nauczania młodych oraz pomnażania dobra kulturowego ludzi.

Janusz Mroczka, Wrocław, marzec 1998

Powołanie Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej silnie wpłynęło na wewnętrzną organizację i procesy restrukturyzacyjne na Politechnice Wrocławskiej, sprzyjając powstaniu w następnych latach kolejnych struktur katedralnych. Aby zrozumieć rangę tego wydarzenia, warto przypomnieć, że protesty studenckie i ich następstwa w 1968 roku doprowadziły do ogólnopolskiej reorganizacji struktury uczelni wyższych. Zlikwidowano tradycyjny podział katedralny (ukształtowany jeszcze w XIV i XV wieku na Uniwersytecie Jagiellońskim), zastępując go instytutami o nowych strukturach kadrowych i kompetencyjnych, co miało na celu wzmocnienie wpływu komunistycznej partii na działalność środowiska naukowego. Ta bezprecedensowa „reforma" dokonująca się w kontekście wydarzeń politycznych marca '68 przynosi przede wszystkim niechlubną wymianę pokoleniową. Miejsca wielu profesorów zmuszonych do rezygnacji lub do odejścia na emeryturę zajmują nowi pracownicy rozpoczynający kariery naukowe od podstaw. Profesor Mroczka tak oto postrzega procesy kształtujące rzeczywistość uczelni po 1968 roku:

Był to rok 1998, trzydzieści lat po wydarzeniach marca 1968 roku. kiedy to w miejsce istniejących na Politechnice Wrocławskiej katedr powołane zostały instytuty. Ten fakt opisywany mi przez moich mentorów i wychowawców tłumaczyłem sobie jako młody pracownik nauki wówczas słabością przestrzeni moralnej, deficytem kapitału moralnego. Rozczytany w Dziennikach Kisiela szybko zauważyłem rozziew pomiędzy moralnością prywatną a publiczną, jak również moją indywidualną odrębność od grupy ludzi dzierżawiących swoje sumienie (…)[4].

[4] J. Mroczka (red.), *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*. Tom 1, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej (2008).

Katedra szybko formuje swoją strukturę i przyjmuje ambitny program rozwoju. Za główny cel działalności profesor Mroczka uznaje **dążenie do naukowej prawdy oraz kształcenie otwartych i krytycznych umysłów**, zaś cele operacyjne przybierają listę konkretnych działań:

Kamienna tablica przed głównym wejściem do Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej

Budynek Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej przy ulicy Prusa we Wrocławiu

- kształcenie i rozwijanie zainteresowań metrologicznych wśród studentów i doktorantów przez prowadzenie i kierowanie specjalnością dydaktyczną „Aparatura Elektroniczna” na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej;
- przygotowywanie pomocy dydaktycznych (skrypty, podręczniki, stanowiska laboratoryjne);
- inicjowanie i wykonywanie metrologicznych prac naukowych oraz współpraca z innymi uczelniami technicznymi i jednostkami PAN;
- współpraca z krajową służbą metrologiczną w zakresie wdrażania własnych osiągnięć naukowych jak i propagowanie osiągnięć innych ośrodków krajowych i zagranicznych, oraz prognozowanie rozwoju metrologii i jej roli w różnych dziedzinach wytwórczości;
- podejmowanie współpracy z ośrodkami zagranicznymi w procesie kształcenia (wspólne doktoraty), prowadzenie wspólnych grantów (wspólne publikacje), inicjowanie wspólnych międzynarodowych konferencji.

Podstawą **działalności naukowej** Katedry staje się posługiwanie się zaawansowanym warsztatem fizyko-matematycznym w celu strukturalnego opisu rzeczywistych zjawisk i problemów. W połączeniu ze zdobyczami współczesnej elektroniki i fotoniki, warsztat ten pozwala na rozwiązywanie istotnych problemów nauki i techniki. Szczegółowy program naukowy Katedry obejmuje następujące zagadnienia:

- metodologia obserwacji i eksperymentu;
- algorytmizacja problemu odwrotnego;
- modelowanie matematyczne pól fizycznych i ich praktyczną realizację metodami tomografii optycznej i impedancyjnej;
- kompleksowe modelowanie dynamicznych obiektów technicznych i biomedycznych z uwzględnieniem parametrów skupionych i rozłożonych;
- analiza spektralna i polaryzacyjna promieniowania rozproszonego w układach dyspersyjnych i ich praktyczne wykorzystanie w ocenie właściwości materiałów kompozytowych;
- obrazowanie optyczne i przetwarzanie danych pomiarowych w trójwymiarowej przestrzeni i ich fuzja na potrzeby bezstratnego kodowania obrazów;

- wieloczujnikowa fuzja danych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod ich przetwarzania na rekonstrukcję o wyższej jakości;

- wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowej do przetwarzania danych pomiarowych i ich praktyczną realizację za pomocą procesorów sygnałowych;

- identyfikacja parametryczna statycznych i dynamicznych modeli złożonych obiektów wraz z ich praktycznym zastosowaniem w pomiarach właściwości układu oddechowego i krwionośnego człowieka;

- wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do pozyskiwania informacji ilościowych i jakościowych z danych pomiarowych;

- projektowanie, opracowywanie i optymalizacja komputerowych systemów pomiarowych i informacyjnych do badań naukowych oraz procesów technologicznych;

- projektowanie i wykonywanie inteligentnych przyrządów pomiarowych z wykorzystaniem techniki mikroprocesorowej;

- opracowywanie systemów telemedycznych współpracujących z inteligentnym domem, nadzorujących bezpieczeństwo i stan zdrowia mieszkańców.

Szczególnym obszarem działalności Katedry jest **dydaktyka** prowadzona w ramach specjalności „Aparatura Elektroniczna" na wszystkich poziomach kształcenia. Oferta dydaktyczna była od początku działalności Katedry przedmiotem szerokiego zainteresowania najróżniejszych firm i środowiska przemysłowego na Dolnym Śląsku. Dzięki temu powstał bogaty i różnorodny program dydaktyczny, obejmujący zarówno teoretyczne podstawy funkcjonowania aparatury elektronicznej jak i zajęcia praktyczne. Ważniejsze punkty tego programu są następujące:

- dobór właściwych czujników i przetworników;

- zastosowanie najnowszych osiągnięć fotoniki i optoelektroniki w aparaturze elektronicznej;

- podstawy matematyczno-fizyczne prowadzenia pomiarów oraz przetwarzania danych pomiarowych;

- modelowanie matematyczne i symulacje komputerowe;
- programowanie mikrokontrolerów 32-bitowych;
- programowanie procesorów sygnałowych (DSP) i cyfrowych kontrolerów sygnałów (DSC);
- projektowanie specjalizowanych układów elektronicznych (VHDL, CPLD, FPGA);
- zastosowanie mikrokontrolerów i procesorów sygnałowych do przetwarzania sygnałów;
- projektowanie pomiarowo-diagnostycznych przyrządów wirtualnych i programowanie systemów pomiarowo-kontrolnych (VISA, SCPI, LabVIEW);
- projektowanie aplikacji internetowych;
- wykorzystanie metod sztucznej inteligencji w aparaturze elektronicznej;
- nauka efektywnej współpracy w zespole.

Sprawne procesy organizacyjne w Katedrze umożliwiły pozyskanie środków finansowych na budowę nowoczesnych laboratoriów dydaktycznych, takich jak: laboratorium mikrokontrolerów 32-bitowych, laboratorium optoelektroniki i fotoniki, laboratorium metod cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP), laboratorium fizycznych podstaw pomiaru, laboratorium systemów pomiarowych, laboratorium miernictwa elektronicznego i inne.

Nowa oferta dydaktyczna szybko znajduje uznanie wśród studentów, a specjalność „Aparatura Elektroniczna" do chwili obecnej cieszy się największą popularnością wśród studentów Wydziału Elektroniki (przekształconego w 2021 roku w Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów), zrzeszając osoby pasjonujące się połączeniem teorii i praktyki w projektowaniu, konstrukcji, oprogramowaniu, uruchamianiu, eksploatacji oraz serwisie aparatury elektronicznej, zawierającej czujniki, mikroprocesory, mikrokontrolery, procesory sygnałowe, kontrolery sygnałów oraz nowoczesne, specjalizowane układy elektroniczne. Absolwenci specjalności Aparatura Elektroniczna są przygotowani zarówno do działań kreatywnych (projektanci, konsultanci), menedżerskich, jak i do obsługi i serwisu aparatury elektronicznej.

Otwartość Profesora Mroczki na realizację projektów studenckich owocuje powstaniem dwóch kół naukowych działających przy Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej. Są to:

– koło naukowe MOS (*Microsystems Oriented Society*) założone w 2003 roku, znane z takich projektów, jak projekt P.I.W.O. (Potężny Indeksowany Wyświetlacz Oknowy), zakończony sukcesem lot balonu stratosferycznego na wysokość 26 km realizującego pomiary atmosfery, a także Wielki Zegar Binarny BBC (*Big Binary Clock*) umieszczony w oknach budynku C-13 Politechniki;

– koło naukowe LabView Fan Group (2013) zrzeszające profesjonalistów i pasjonatów programowania w środowisku LabView i organizujące coroczne Mistrzostwa Polski Programistów LabView.

Prawda jako fundament etyki zawodowej

Intelektualne i zawodowe życie człowieka nie jest możliwe bez wewnętrznych, ugruntowanych mechanizmów działania, umożliwiających odróżnianie dobra od zła, żywienie przekonań, wydawanie osądów, bycie takim lub innym. Profesor Mroczka jako moralną powinność swojego zawodowego i prywatnego etosu objął Platonowski imperatyw *diligere veritatem omnem et in omnibus* („należy miłować prawdę – całą i we wszystkim/wszystkich") nakazujący postępowanie w drodze poszukiwania prawdy i dążenia do budowania swojej świadomości i zasad moralnych na jej gruncie. Ta szczególnie pozytywna i honorowa zasada staje się 1998 roku mottem zakładanej przez Profesora Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej. I tak jak Platon w swojej Akademii witał uczniów słowami *diligere veritatem omnem et in omnibus*, tak i tymi słowy umieszczonymi nad drzwiami witani są goście Katedry (w nadziei na terapeutyczną i diagnostyczną moc tych słów).

„Mroczki miłują prawdę" – śmieje się dziś Profesor. W rozmowie z nim odkrywamy źródła przywiązania do wartości humanistycznych. Mają one swoje korzenie w rodzinnych uwarunkowaniach i są dalekie od kultu ofiary, męczeństwa, rozpamiętywania wszelkiego rodzaju niepowodzeń czy klęsk. Wywodzą się z subtelnej formy dydaktyzmu jego matki Zofii z domu Łukasiewicz, która wielokrotnie w okresie szkoły podstawowej swoim synom Bogusławowi i Jauszowi recytowała z pamięci obszerne fragmenty wielu dzieł Mickiewicza, Słowackiego czy Norwida. Robiła to praktycznie codziennie kiedy po obiedzie przystępowała do zmywania naczyń w szafliku z wodą postawionym na rozkładanym drewnianym krześle, przy którym na swoich dziecięcych stołeczkach zasiadali synowie wsłuchując się w wypowiadane treści.

Mama Profesora Mroczki otoczona wianuszkiem wsłuchanych w nią wnucząt – Justynka, Wojtuś i Rafałek (fot. archiwum prof. Mroczki)

Diligere veritatem omnem et in omnibus – motto witające gości Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej (fot. archiwum prof. Mroczki)

Ta forma dydaktyzmu dała owoce i jest widoczna u Profesora Mroczki w przestrzeni znaczeniowej uczuciowości, emocji, autentyczności przeżyć osobistych, jak i refleksji o życiu. W tej przestrzeni widoczna jest demokracja w formie adekwatnej do czasów współczesnych, patriotyzm szlachetny, synkretyzm estetyczny, kosmopolityzm europejski, ale również solidna płaszczyzna wyrazu buntu i niezgody na zastaną rzeczywistość, kult indywidualizmu i podmiotowości. To wszystko składa się na wielowymiarową złożoną romantyczną przestrzeń intelektualną, co w ogłoszonym przez Sejm RP Rokiem Romantyzmu, może być sprawdzonym wzorcem zachowań.

Wychowany w duchu prawdy i dbałości o drugiego człowieka, Profesor pozostał ufny, czasem może wręcz naiwny. Niektórzy do dziś wykorzystują jego naiwność, dezorganizując jego życie zawodowe i rodzinne. Na szczęście (dla nas – wychowanków-buntowników, a także dla jego politycznych oponentów) nie jest obrażalski.

Jest już tradycją, że świeżo upieczeni wychowankowie – doktorzy, otrzymują od Profesora Mroczki książki z dedykacją. To piękny zwyczaj i jego sposób na wyrażenie wzajemnie wzbogacających się relacji i wskazanie drogi na przyszłość. W jednej z dedykacji[5] do „Książeczki o człowieku" Romana Ingardena pisze o kryzysie poszukiwania obiektywnej prawdy i roli uczonych, która nie może być obojętna:

To przedmiotowa rzeczywistość jest tym szczególnym miejscem, gdzie każdy kto poświecił się pracy naukowej odkrywa swoją podmiotowość. To też szczególne miejsce, bowiem w tym odkrywaniu rozumienie jest tą cechą, która nobilituje, ale również zasiewa pesymizm. Ten pesymizm nie jest pesymizmem człowieka zrezygnowanego, ale człowieka, który coś chce wnosić i mieć na tyle siły by pojawiające się frustracje przezwyciężać, i przenosić to co dobrego poprzednie pokolenia nam pozostawiły i rozwijać to co my następnym pokoleniom chcemy przekazać. Istotnym jest fakt, że to rozumienie jako fundament hermeneutyki zawiera przesłankę abyśmy byli otwarci na odbywanie i w ostateczności na demaskowanie różnorakich dyskursów czy to etycznych, politycznych czy innych. Jest rzeczą oczywistą, że owo rozmyślanie nie może być oderwane od refleksji nad własnymi postawami, nad dyskursami kierującymi naszym własnym dyskursem, by nie popaść w bezkrytyczny dogmatyzm. Łatwo o tym przypominać w czasie kryzysu, gdzie jest to widoczne i wyraźne. Najtrudniejsze jest rozpoznawanie owych dyskursów w czasach spokoju i prosperity, gdzie wszystko wydaje się pro-

[5] Dedykacja prof. J. Mroczki w książce podarowanej G. Świrniakowi z okazji obrony pracy doktorskiej.

ste i bezdyskusyjne. To w takiej chwili rola krytyki uczonych może przeciwstawić się nieprawości, przemocy, korupcji i innym wynaturzeniom życia społecznego. Historia nas uczy, że wśród takich ludzi, którzy tego dokonywali odnajdujemy bohaterów, autorytety, wzorce do naśladowania. Śledząc ich biografie stwierdzamy niekiedy, że było to nieopłacalne za ich życia, ale w retrospekcji całego ich życia stwierdzamy, że było to warte. Oni byli naprawdę szczęśliwymi.

Dialektyka podmiotowości i transcendencja ku prawdzie jawi się jeszcze wyraźniej, gdy prawda o dobru rodzi powinność moralną.

Niech myśli te będą pomocne w pokonywaniu kolejnych progów kariery akademickiej.

Z życzeniami dalszych sukcesów w poczynaniach naukowych

Janusz Mroczka, 14.10.2009

Miłość prawdy we wszystkim jest, bez wątpienia, niezwykle trudna i to nie tylko w czasach niepokoju, lecz i także czasach dobrobytu – szczególnie gdy pełniony urząd podlega politycznej i osobistej presji. Profesor Mroczka, zapytany o realia wypełniania jego moralnego zobowiązania, tak odpowiedział:

Nie mam wpływu na zachowania ludzi, tych pokoleniowo młodszych spadkobierców tamtej epoki. Sam fakt, że dane mi było żyć i rozwijać się w PRL-u, gdzie niewygodnych profesorów zsyłano na naukowy niebyt, i że to przekazano młodszemu pokoleniu, które przeniosło to już we współczesne czasy. Moim szczęście było, że to zauważyłem i unikałem tych ludzi, co pozwoliło mi przetrwać, a umożliwił mi przy tym jeszcze brak u tych ludzi zdolności do rozumienia metafory i pauperyzację poczucia humoru. Ubolewam nad faktem, że w latach 2008–2020 chciano eliminować mnie z aktywności na rzecz społeczności akademickiej. Władzę na mojej uczelni sprawowali moi rówieśnicy, z którymi studiowałem, z którymi łączyły mnie różne interakcje w minionych trudnych latach, a które to fakty upływający czas nie zatarł w pamięci każdego z nas. Dzisiaj po zakończonych kadencjach gros z minionych faktów postrzegamy zupełnie inaczej i to one kreują atmosferę milczenia i niepewności. Pytany o to nie mogę milczeć, aby nie dać o tym zapomnieć i pozostawić tym samym młodym pokoleniom coś do przemyślenia. Stawianie na młodych to proaktywny sposób tworzenia nowego społeczeństwa, społeczeństwa opartego na służeniu drugiemu,

dzieleniu się z drugim, społeczeństwa w którym wartość bycia razem jest nadrzędna do posiadania tylko więcej. Upływający czas zmienia każdego z nas. Doświadczenia nasze ukształtowane w minionych latach nie mogą być zapomniane. Obecnie nie ma już miejsca na udawanie na podwójne standardy, na tuszowanie rzeczywistości. To młode pokolenie musi nauczyć się realizować pamięć zdolną do rozliczenia się z przeszłością, aby uwolnić przyszłość z własnych rozczarowań niejasności czy urojeń. W tej drodze do prawdy musimy pamiętać, że prawda nie może być postrzegana i odbierana jako chęć zemsty, a umożliwić dialog prowadzący do pojednania i może w dalszej perspektywie przebaczenia. Jako nauczyciel z ponad czterdziestoletnim doświadczeniem uważam, że tylko młode pokolenie może dokonać radykalnych zmian w tym co nam, pokoleniom starszym narzucił obcy system.

Po czym, po chwili zadumy, wyszeptał:

„molestos patienter sustinere[6]*”*

by następnie dodać cytując słowa Indiry Gandhi:

„mieć trudne życie to też przywilej”.

[6] (łac.) krzywdy cierpliwie znosić.

Szkoła metrologii elektronicznej i fotonicznej

Szkoła metrologii elektronicznej i fotonicznej jest wspólnotą uczonych, której rodowód sięga 1990 roku, gdy Profesor Mroczka obejmuje z wyboru stanowisko dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej (IME) Politechniki Wrocławskiej. Podejmuje w tym czasie trudną próbę zreformowania struktury i zasad funkcjonowania Instytutu. Zdolności organizacyjne Profesora okazały się decydujące z punktu widzenia sprawnej organizacji tej jednostki i pokonania problemów finansowych, administracyjnych i politycznych. Na pierwszym miejscu stawia jednak współpracę z młodymi ludźmi i ich rozwój naukowy, bowiem – jak często zwykł powtarzać „rozwój uczelni zależy przede wszystkim od ludzi". Szybko tworzy się kilkuosobowy zalążek młodego, dynamicznego zespołu. Łączy ich wspólna cecha: wierzą, że ciągle jest coś do okrycia i odnajdują w sobie emocje nieustannego poszukiwania. Są zaciekawieni tematyką prac badawczych profesora, pociąga ich perspektywa zdobywania naukowych szlifów, podążają za jego charyzmą. I chyba nie mogło być inaczej. Jeśli jest mistrz, muszą przecież pojawić się uczniowie.

Rdzeń metodologiczny nowej szkoły naukowej opiera się na czytelnych zasadach: (i) obserwacja rzeczywistości i wyciąganie wniosków; (ii) poszukiwanie i przyjmowanie adekwatnych wzorców rzeczywistości, podlegających zasadom dokładności, prostoty, funkcjonalności i spójności; (iii) poszukiwanie formalnych modeli rzeczywistości i świadome posługiwanie się tymi modelami; (iv) akceptacja ocen i rozstrzygnięć, formułowanie wniosków.

W celu stworzenia dogodnych warunków pracy młodym naukowcom Profesor Mroczka inicjuje na początku lat 90. ub. wieku współpracę z francuskim ośrodkiem naukowym *Laboratoire d'Energétique des Systèmes et Procédés INSA de Rouen*, specjalizującym się w metrologii ośrodków dyspersyjnych. To renomowany ośrodek realizujący badania i praktyczne wdrożenia, francuska szkoła metrologii fotonicznej. Tam odbywa kilkukrotnie staże naukowe (jeden 9-miesięczny). Dla młodego profesora zza żelaznej kurtyny to chyba spełnienie marzeń, wzmagane nadchodzącą w Polsce modą na nauki ścisłe. Tam nie tylko poznaje warsztat francuskich naukowców, ale także znajduje uznanie dla swoich pomysłów i wcześniejszych dokonań. Zawiązują się polsko-francuskie przyjaźnie, które trwają do dziś… Po latach Profesor wspomina, że czas spędzony we Francji daleki był od naukowej sielanki.

Twórcy polskiej i francuskiej szkoły metrologii fotonicznej: Janusz Mroczka (po lewej) i Gérard Gouesbet z *Institut National des Sciences Appliquees*, INSA, w Rouen (Helsinki, 2016) (fot. archiwum prof. Mroczki)

To przede wszystkim czas mozolnej pracy, fascynującej i porywającej, jednak mozolnej. Pomimo wytężonej pracy i często długich rozstań z najbliższymi utwierdza się w przekonaniu, że warto było tyle trudzić się i warto trudzić się dalej. Intuicja naukowa nie zawiodła Profesora. Któż mógł wtedy przypuszczać, ze mało znana jeszcze w Polsce metrologia fotoniczna stanie się przedmiotem nowej przygody i narodowej specjalizacji?

Pasja i zainteresowania naukowe Profesora Mroczki znajdują podatny grunt w Polsce. Tematyka prac badawczych jego młodego zespołu zaczyna w naturalny sposób ewaluować w kierunku nieinwazyjnych, optycznych technik pomiarowych. Dobra „fama" Profesora we Francji przynosi owoce – dwoje jego podopiecznych otrzymuje w 1994 i 1995 roku stypendia naukowe rządu francuskiego i rozpoczyna tzw. doktoraty *cotutelle*, prowadząc badania przez 6 miesięcy w Polsce i 6 we Francji przez 3 lata. A to dopiero początek…

Dokonania zespołu Profesora Mroczki zyskują z czasem uznanie zewnętrzne. Do zespołu dołączają kolejni naukowcy specjalizujący się w optycznych systemach pomiarowych, modelowaniu pól optycznych, cyfrowym przetwarzaniu danych pomiarowych, komputerowych systemach akwizycji danych, modelowaniu systemów biologicznych, fizyce i elektronice źródeł energii odnawialnej i algorytmach inteligentnych.

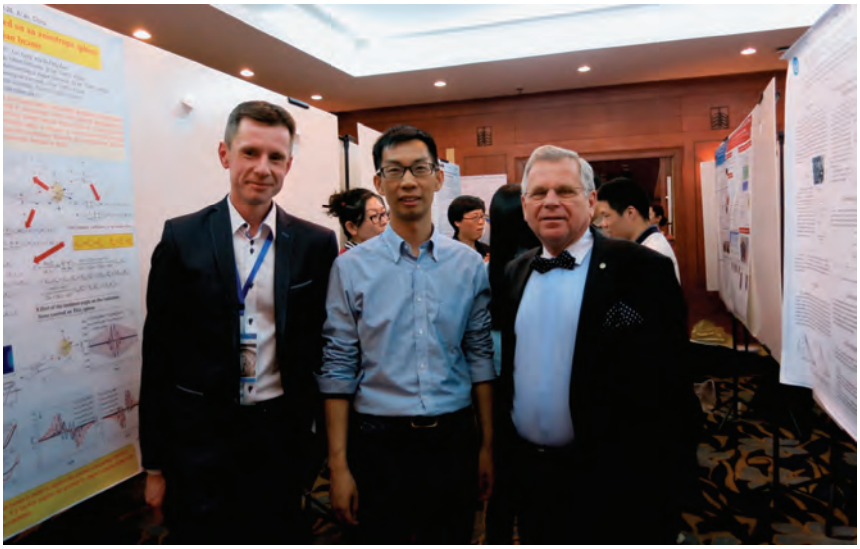
Ważne rezultaty naukowych ich prac pozwalają na nawiązanie współpracy naukowej z wiodącymi ośrodkami naukowymi na całym świecie, m.in. w Berlinie, Bremie, Bostonie, Brukseli, Eindhoven, Londynie, Marsylii, Rouen, Preston, San Diego, Szanghaju, Toronto, Bremie, Xi'an i Yokohamie. Owocem tej współpracy są wspólne publikacje oraz kolejne staże naukowe.

W 1997 roku Profesor Mroczka podejmuje współpracę z Wydziałem Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej. Prowadzi tam wykłady dydaktyczne z zakresu cyfrowego przetwarzania sygnałów. Tam również, wraz z dwójką swoich wrocławskich wychowanków, inspiruje w 2000 roku powstanie nowej grupy zajmującej się cyfrowym przetwarzaniem sygnałów. W 2002 roku do grupy dołącza kolejny podopieczny, a w roku 2006 – magistrantka Profesora – absolwentka Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Tematyka prac badawczych zespołu opolskiego obejmuje cztery główne obszary: (i) zastosowanie analiz czasowych, częstotliwościowych oraz czasowo-częstotliwościowych w badaniach jakości energii elektrycznej oraz zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych, (ii) pomiary zakłóceń oraz jakości energii elektrycznej, (iii) konstrukcja wbudowanego sprzętu pomiarowego opartego o nowoczesne jednostki obliczeniowe typu procesory aplikacyjne, procesory sygnałowe, układy FPGA oraz mikrokontrolery, (iv) zastosowanie zaawansowanych analiz cyfrowego sygnału do badania sygnałów biomedycznych. Zespół stale się rozwija. Kolejne pokolenie naukowców odnosi pierwsze sukcesy w zakresie systemów automatyki trakcji kolejowej.

Do grona wychowanków Profesora Mroczki stale dołączają kolejni naukowcy z wiodących ośrodków uniwersyteckich i przemysłowych w Opolu, Lublinie, Krakowie, Gdańsku i Warszawie. Grono wrocławskich wychowanków liczy dziś 26 doktorów, 5 doktorów habilitowanych i 2 profesorów tytularnych. Większość obroniło swoje doktoraty z wyróżnieniem, dwoje otrzymało stypendia Fundacji Nauki Polskiej (nazywane „polskimi nagrodami Nobla"), jeden został wyróżniony nagrodą Wydziału IV PAN, a czworo obroniło swoje prace doktorskie na Uniwersytetach w Rouen i w Marsylii we Francji w ramach umowy *cotutelle* (również z wyróżnieniem!) Ostatni doktorat międzynarodowy otrzymał nagrodę im. Marii Skłodowskiej-Curie i Pierre Curie za najlepszą pracę w roku 2012 w Europie w danej dyscyplinie. Niektórzy wychowankowie wypromowali już własnych doktorów.

Wydaje się, że coraz powszechniejsza kultura indywidualizmu nie sprzyja powstawaniu szkół naukowych. Wspólnotę szkoły naukowej łączą bowiem niepowtarzalne, międzypodmiotowe relacje skupione wokół wspólnego dobra i celu. W świecie nauki szkoła metrologii elektronicznej i fotonicznej Profesora Mroczki zaistniała faktycznie, a „uczniów mistrza" można z pewnością nazywać „uczniami tej szkoły".

Profesor Mroczka ze swoimi uczniami na konferencji w Minneapolis, USA (1998): dr inż. Marek Czerwiński (po lewej) i dr inż. Dariusz Wysoczański, obaj po doktoratach międzynarodowych *cotutelle* (fot. archiwum prof. Mroczki)



Reprezentacja wrocławskiej szkoły naukowej z wizytą naukową w Xi'an, Chiny (2016): Od lewej: Grzegorz Świrniak, prof. Politechniki Wrocławskiej, wychowanek Profesora Mroczki; prof. Renxian Li, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University; prof. Janusz Mroczka (fot. archiwum prof. Mroczki)

Rozprawy doktorskie wychowanków wypromowanych przez prof. Janusza Mroczkę

Autor	Tytuł rozprawy	Obrona
Adam G. Polak	*Metrologiczna ocena modelu natężonego wydechu w pomiarze wybranych parametrów układu oddechowego.*	4.01.1994 Politechnika Wrocławska
Dariusz Wysoczański	*Diffusion multiple de la lumiere: application a l'orientation de fibres dans des materiaux composites.* (Cotutelle, z wyróżnieniem)	13.09.1996 Université de Rouen
Józef Borkowski	*Metoda liniowej interpolacji dyskretnego przekształcenia Fouriera w analizie sygnału z czujnika pomiarowego.*	16.09.1997 Politechnika Wrocławska
Marek Czerwiński	*Modelisation de la turbidite spectrale d'un milieu multidiffusi et son application au probleme inverse.* (Cotutelle, z wyróżnieniem)	16.11.1998 Université de Rouen
Jarosław Gronczyński	*Hiperboliczne okna segmentowe w transformacjach czasowo- częstotliwościowych.* (Z wyróżnieniem)	09.10.2001 Politechnika Wrocławska
Remigiusz Szczepanowski	*Model wielokrotnego rozproszenia światła w ośrodku krwi z wykorzystaniem metody Monte Carlo.*	17.04.2002 Politechnika Wrocławska
Ireneusz Jabłoński	*Analiza metrologiczna techniki przerywanego przepływu w badaniach właściwości układu oddechowego.* (Z wyróżnieniem)	28.01.2004 Politechnika Wrocławska
Marcin Kondraciuk	*Wybrane zagadnienia metrologiczne metody turbidymetryczno--sedymentacyjnej w opisie układów dyspersyjnych.* (Z wyróżnieniem)	10.03.2004 Politechnika Wrocławska
Krzysztof Górecki	*Analiza zakłóceń stacjonarnych i niestacjonarnych metodą transformat Fouriera i falkowej w pomiarach jakości energii elektrycznej z wykorzystaniem procesora sygnałowego.*	19.05.2005 Politechnika Opolska
Mirosław Szmajda	*Analiza czasowo-częstotliwościowa zakłóceń sygnałów w sieciach energetycznych metodą Prony'ego oraz przekształcenia Wignera–Ville'a w pomiarach jakości energii elektrycznej z wykorzystaniem procesora sygnałowego.*	19.05.2005 Politechnika Opolska
Piotr Binek	*Analiza ośrodków gęstych z wykorzystaniem macierzy T.*	21.02.2007 Politechnika Wrocławska
Tomasz Wojtaszek	*Fazowa interferometria dopplerowska w pomiarach właściwości ośrodków wielofazowych.* (Z wyróżnieniem)	30.05.2007 Politechnika Wrocławska
Jarosław Zygarlicki	*Analiza i kompresja danych pomiarowych sygnału z sieci elektroenergetycznej dla potrzeb badania jakości energii.*	15.11.2007 Politechnika Opolska

Wojciech Frączek	*Interferometryczny pomiar rozkładu fazy pola optycznego z wykorzystaniem nieciągłości fazowych.* (Z wyróżnieniem)	7.01.2009 Politechnika Wrocławska
Grzegorz Świrniak	*Pomiar średnicy włókna optycznego z wykorzystaniem światła rozproszonego.* (Z wyróżnieniem)	14.10.2009 Politechnika Wrocławska
Mariusz Krzysiek	*Particle systems characterization by rainbow and critical light scattering patterns inversion.* (Cotutelle, z wyróżnieniem)	8.12.2009 Aix-Marseille Université, Marseille
Damian Lewandowski	*Wytwarzanie aerozolu wodnego metodą wybuchową – aspekty metrologiczne.* (Z wyróżnieniem)	6.04.2011 Politechnika Wrocławska
Damian Szczuczyński	*Wybrane zagadnienia problemu odwrotnego w wyznaczaniu rozkładu wielkości cząstek fazy rozproszonej układu dyspersyjnego z zastosowaniem technik pomiarowych wykorzystujących rozproszenie promieniowania.* (Z wyróżnieniem)	26.06.2011 Politechnika Wrocławska
Małgorzata Zygarlicka	*Wybrane metody przetwarzania obrazów w analizie czasowo-częstotliwościowej zakłóceń w sieciach elektroenergetycznych.*	8.12.2011 Politechnika Opolska
Mariusz Woźniak	*Characterization of nanoparticle aggregates with light scattering techniques.* (Cotutelle, z wyróżnieniem, nagroda naukowa im. M. Skłodowskiej-Curie i P. Curie za najlepszy doktorat w roku 2012 w Europie w danej dyscyplinie)	19.10.2012 Aix-Marseille Université, Marseille
Grzegorz Głomb	*Analiza przepływu w sztucznych narządach układu krążenia z wykorzystaniem pomiarów prędkości metodą obrazową.* (Z wyróżnieniem)	14.11.2013 Politechnika Wrocławska
Sylwester Nowocień	*Metrologiczne uwarunkowania nieinwazyjnych metod pomiaru saturacji tlenowej krwi.* (Z wyróżnieniem)	15.11.2013 Politechnika Wrocławska
Bartosz Kołodziej	*Realizacja punktu potrójnego argonu jako definicyjnego punktu stałego skali temperatury.* (Z wyróżnieniem)	30.04.2014 Politechnika Wrocławska
Krzysztof Skorupski	*Metoda dyskretnych dipoli w analizie agregatów fraktalnych spiekanych mikro i nanocząsteczek.* (Z wyróżnieniem)	9.05.2016 Politechnika Wrocławska
Mariusz Ostrowski	*Fuzja algorytmów wyszukiwania punktu mocy maksymalnej paneli fotowoltaicznych w warunkach zmiennego zacienienia.* (Z wyróżnieniem)	13.03.2019 Politechnika Wrocławska
Kamil Płachta	*System fotowoltaiczny z grzbietowym koncentratorem wykorzystujący układ nadążny.* (Z wyróżnieniem)	10.06.2021 Politechnika Wrocławska

Mistrz i uczeń

Tempora mutantur et nos mutamur in illis – czasy się zmieniają, a my zmieniamy się wraz z nimi. Przemiany cywilizacyjne dokonują się nie tylko sferze przemysłowej i technologicznej, ale także w sferze społecznej. Już w XX wieku H. Arendt zauważa, że „postępowi współczesnego świata towarzyszy nieustający, coraz rozleglejszy i coraz głębszy kryzys autorytetu”[7]. Wydaje się, że jesteśmy świadkami schyłku wielkich symboli i autorytetów moralnych, zacieraniem dychotomicznego podziału na *sacrum* i *profanum*. Według socjologów jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy jest porzucenie poszukiwania pojęcia doskonałości na rzecz trywialnych celów, bowiem jak stwierdza W. Tatarkiewicz, „dążyć do doskonałości, przeznaczać dziełu nieograniczony czas pracy, stawiać sobie jak Goethe cel niezniszczalny, są to wszystko zamierzenia, które usuwa układ nowoczesnego życia”[8].

Mimo tych niepokojących rozstrzygnięć wydaje się, że w naturze człowieka świadomego i poszukującego leży naśladowanie dobrowolnie akceptowanych (nie zaś narzucanych) wzorców, źródeł inspiracji, mentorów i mistrzów.

W zawodowym życiu Profesora Mroczki relacja między mistrzem i uczniem ma wymiar psychospołeczny, interpretowany w kategoriach zaufania, umiłowania prawdy i dążenia do sprawiedliwości. W jednym z wywiadów z Profesorem przeczytamy[9]:

> *To relacja opierająca się na otwartości, wzajemnym zaufaniu i dobrowolności* (…). *Mistrz powinien umieć odnosić się krytycznie i artykułować swoje uwagi, tak aby uczeń nie odbierał ich jako nagany, ale jako sposobność zrozumienia i pójścia krok do przodu* (…). *Mistrz musi respektować godność, podmiotowość i autonomię ucznia, szanować jego prawo do swobodnej opinii na tematy naukowe.*

Zapytany zaś o cechy niezbywalne mistrza akademickiego Profesor Mroczka wymienił:

– *entuzjazm w podejmowaniu tematyki naukowej, pasja w jej wykonywaniu;*

---

[7] H. Arendt „Między czasem minionym a przyszłym”. Warszawa, Wydawnictwo Fundacja Aletheia (1994).

[8] W. Tatarkiewicz „O doskonałości”. Warszawa, PWN (1976).

[9] „Otwartość mistrza” – rozmowa z prof. Januszem Mroczką, laureatem nagrody ministra, red. L. Sterniuk-Gronek, https://wu.po.opole.pl

– *bezwzględna uczciwość w poszukiwaniu prawdy, odwaga w jej głoszeniu;*
– *bezinteresowność, duże poczucie obowiązku;*
– *otwartość i cierpliwość.*

Wymiar aksjologiczny relacji mistrz–uczeń według Profesora to dobro w postaci twórczego podejmowania i realizacji naukowych wątków. Takiej relacji poświęca się całe życie zawodowe, osobiste i społeczne. I taka relacja ma dobrze określony sens w kulturze naszych czasów.

●

Współcześnie rzadko obecna narracja w przestrzeni akademickiej o relacji mistrz–uczeń została zainicjowana przez Profesora Mroczkę w 2007 roku wykładem pt. „Mistrz–uczeń" w Sali Senatu Politechniki Wrocławskiej. Entuzjastycznie przyjęty, wykład ten został jeszcze wielokrotnie powtórzony na zaproszenie różnych ośrodków naukowych i akademickich w Polsce.

Przeczytajmy, co o relacji mistrz–uczeń pisze sam mistrz:

W dniu 20 stycznia 2011 r., na zaproszenie pani dr Izabeli Hudymy, odbyło się w Klubie Seniora Politechniki Wrocławskiej spotkanie na którym wygłosiłem referat zatytułowany: „Mistrz – kto to jest?". Idea zawarta w prelekcji zaproszonego wykładu ukazała paradygmat „Mistrz–uczeń" jako możliwy do przyjęcia w procesie kształcenia młodych pracowników nauki mimo powszechnie coraz częściej akceptowanej w środowisku szkół wyższych postawy „nabywca–sprzedawca". W tym prezentowanym paradygmacie upatruję możliwości stworzenia niszy dla rozwoju najzdolniejszej młodzieży i przyszłych adeptów nauki, nawiązując do czasookresu i świetności pierwszych uniwersytetów, które mimo wielowiekowej tradycji dalej są na czołowych miejscach w rankingach światowych. Uważam, że tym sposobem można ocalić od zapomnienia jakże wciąż wartościową i gwarantującą marsz ku prawdzie relację „mistrz–uczeń", charakterystyczną dla czasów największego rozkwitu uniwersytetów. I nawet trudno byłoby tutaj ubrać w słowa emocje obecnych na sali seniorów Politechniki Wrocławskiej, i – warto zaznaczyć – wciąż aktualnych mistrzów, kiedy opowiadali o swoich osobistych wzorcach akademickich czy życiowych, i jawnie stwierdzali w trakcie dyskusji (przykrą) prawdę, że w czasach ich aktywności zawodowej nie byłoby potrzeby, by słowa wykładu padały publicznie („to wszyscy wiedzieli i czuli"). W opinii jednego z seniorów uczestniczących w wymianie poglądów po zakończo-

nym wykładzie: „W obecnej sytuacji, mówienie w środowisku akademickim o dobrych, dawnych zasadach zdrowego i wielopokoleniowego funkcjonowania środowisk twórczych jest konieczne i może wręcz stanowić wyzwanie chwili”.

Mistrz czy uczeń? Zdjęcie pamiątkowe z XVIII konferencji metrologicznej IMEKO w Rio de Janeiro (2006), które ukazało się w Pryzmacie Politechniki Wrocławskiej (nr 208–209 / 2007)

Za kanwę moich rozważań przyjąłem okres starożytności oraz średniowiecza, jako te, które w historii ludzkości i rozwoju uniwersytetów odegrały kluczową rolę. Późniejsza projekcja na mniej odległą przeszłość oraz świat współczesny w zamierzeniu eksponowały ogólność i uniwersalność pewnych ugruntowanych schematów zapiętych w klamrę warunków koniecznych i wystarczających na zaistnienie relacji mistrz-uczeń, zaprezentowanych szerokiemu audytorium. Wykład nie był przykładem „biernego źródła wlewającego się w świadomość słuchaczy", lecz prowokującym do zastanowienia, kontemplacji exposé, w swej ostatecznej formie poprzez pytania cząstkowe sformułowane w pytającej treści hipotez zamykających wykład. To przemieszczania się, czy wręcz balansowanie na granicy między tym co na zewnątrz, a tym co wewnątrz każdego z nas. W pewnym sensie jest to także kontrargument dla spostrzeżenia o jedynie eschatologicznej naturze prezentowanych wywodów, jakie mogłoby ukształtować się w świadomości „wybiórczego" słuchacza. Przywoływanymi wątpliwościami, a w konsekwencji stawianymi pytaniami – przymioty naukowej domeny aktywności człowieka – chciałem tak zaprezentowanej dyspucie jednoznacznie zadeklarować swoją przynależność do świata poznania, natomiast nie odżegnuje się jednocześnie od komplementarności badacza jako podmiotu ludzkiego, czyli jego humanizmu. Chciałem ukazać, że wszelkie poznanie wymaga trzech rzeczy: podmiot badającego, przedmiotu badania i aktu poznawczego między nimi. Rozwijając powyższy aksjomat, pragnąłem ukazać zbiorowość niepowtarzalnej podmiotowości jednostki ludzkiej, koncentrującej swą aktywność życiową, szerzej aniżeli tylko zawodową, wokół kwestii poznania. Pragnąłem ukazać, że przede wszystkim człowiek, nie jedynie naukowiec, przede wszystkim naukowiec, nie jedynie nauka. W tym sensie połączenie owej zbiorowości, chociażby na etapie młodych adeptów sztuki poznania, z niepowtarzalnością skumulowaną w osobie mistrza może okazać się trafioną metodą na utrzymanie stabilności wskazanej hierarchii. Czy jest o co walczyć? Czy mechanizm nauki nie znalazł się na drodze, gdzie ona sama nie zwraca uwagi na osobę naukowca, który już jedynie eksperymentuje i kontynuuje swoje zabawy ze szczurami? Pytania... Uczeni ciągle badają szczury, małpy i inne żywe stworzenia. Dotarli do cząsteczek, atomów i elektronów, ale stale zapominają o tym, że sami także istnieją... Laboratorium bez naukowca, laboratorium bez człowieka traci sens. Kto przeprowadza eksperymenty? Świadomość, istota zdolna do obserwacji. To takie proste, lecz od trzystu lat w mojej opinii nauka nie potrafi przyjąć do wiadomości oczywistego faktu. W konsekwencji, zamiast dążyć do unifikacji ludzkiego istnienia, coraz częściej zdradza tendencje separatystyczne. Dowodem tego może być rozwijający się obecnie nurt „neopedagogiki", której liberalność

w postrzeganiu świata, ale przede wszystkim w postrzeganiu w nim człowieka i relacji międzyludzkich, prowadzi do degradacji wartości przynależnych środowisku akademickiemu, a w konsekwencji także istnienia ludzkiego. Ten wykład jest próbą zwrócenia uwagi i ukierunkowania pewnych procesów dziejących się dziś na uczelniach, w szkolnictwie wyższym. Powstanie nowej kategorii „nabywca–sprzedawca" jest faktem i wydaje się rozwijać bez względu na „koszty" dla ogółu społecznego (do nasycenia tego procesu jeszcze niemała droga). Może zatem niech nie stanie się naszym celem zawracanie tego trendu, lecz skupmy się na tym, co może przynieść pewną ciągłość (nie tylko merytoryczną) w wielowymiarowym tworze jakim jest nauka i uprawiający ją podmiot. W takim świetle, proponuje relację „mistrz–uczeń", która to stanowić powinna podstawowy organizm struktury uniwersytetu, a dalej społeczności człowieka. Warto więc w cichości własnych gabinetów raz jeszcze przemyśleć i przywrócić zaproponowany wiele lat wcześniej medal „Discipolorum amor et pietas – Uczniów miłość i wdzięczne przywiązanie", jako niezależnego odznaczenia wyrażającego uhonorowanie na rzecz kultywowania najszlachetniejszych tradycji ludzkich, w tym zawodowych. Niechaj przyszły laureat stanowi emanację jednoznacznej synergii pomiędzy tylko pozornie dwoma odmiennymi wymiarami: naukową wizją obiektywnej rzeczywistości oraz subiektywnym doświadczeniem istnienia. Niechaj dla kolejnych pokoleń uczniów stanowi zdecydowany dowód na pochodzenie właściwego wymiaru z natury rzeczy, a nie jedynie z iluzji naszego umysłu. Korzystajmy z doświadczeń poprzedzających nas cywilizacji, ale budujmy przede wszystkim własny, lecz wciąż spójny, dobry świat. Pragnę aby ten wykład odczytano jako manifest na rzecz „odtechnokratyzowania" współczesnej jednostki ludzkiej, w pojęciu wielu środowisk interpretowany jako wyraz idealizmu prelegenta czy wręcz rodzaju naiwności. A może jednak warto zachować taką postawę, by przypomnieć nam o cywilizacjach, które stworzyły wspaniałą technikę, ale zapomniały o tym, że nawet największy postęp techniczny nie sprawi, że ludzie będą bardziej szczęśliwi, spokojni, mniej osamotnieni...? Pragnę tym wykładem uświadamiać oczywisty fakt, że ludzie od zarania zmagają się z nierównowagą między tym, co na zewnątrz, a tym, co wewnątrz nich.

To, co zewnętrzne, jest łatwiejsze i wydaje się bardziej obiektywne. Jeden człowiek, Tomasz Edison, odkrywa żarówkę, a cała ludzkość z niej korzysta. Nie trzeba odkrywać jej po raz drugi. Czy to już tytułowy „mistrz"? Jest jeszcze drugi wymiar – zindywidualizowany rozwój wewnętrzny. Zupełnie inne zjawisko. Ktoś, uczony o wielkich dokonaniach w sensie merytorycznym, może doznać oświecenia, ale nie oznacza to, że wszyscy od razu je osiągną. Każdy czło-

wiek musi odnaleźć prawdę na własną rękę. Wszystko, co dzieje się na zewnątrz można zgromadzić. Postęp naukowy kumuluje się, gdyż każdy naukowiec stoi na ramionach innych uczonych. Rozwój świadomości nie podlega jednak takim prawom. Pragnę ukazać, że owa świadomość to naturalna i nierozłączna cecha mistrza, potem ucznia, a w kategorii następstw, być może także przyszłego mistrza...

Profesor Mroczka podczas wykładu pt. „Mistrz–uczeń" w Sali Senatu Politechniki Wrocławskiej (2007)

Każdy człowiek musi odkryć ją sam; nie może posłużyć się cudzymi dokonaniami, może natomiast rozwijać się kontemplując wcześniej wygenerowane fakty. Może dopuścić sugestie zewnętrzne, mistrza, natomiast (a z pewnością od pewnego etapu) powinien indywidualnie kreować przyszłość.

Wszystkim, co obiektywne można się dzielić, można tego uczyć w szkole i na uniwersytecie. Nie dotyczy to jednak rzeczy subiektywnych. Mogę wiedzieć

wszystko o świecie wewnętrznym, ale nie potrafię przekazać tej wiedzy nikomu. Jednym z podstawowych praw istnienia jest to, że wewnętrzną prawdę trzeba odkryć samodzielnie, własnym wysiłkiem. Nie można jej kupić na targu ani dostać w prezencie. Nie jest ona towarem ani przedmiotem materialnym. Czyjaś indywidualność, miłość, obecność, czyjeś współczucie oraz czyjś spokój mogą dowodzić, że ten ktoś miał takie doświadczenie. Są to jednak tylko oznaki świadczące o tym, że coś się w kimś wydarzyło. Taka osoba może nas zachęcić, powiedzieć, że nie zagłębiamy się w sobie na próżno. Zapewnić: „Znajdziecie skarby tak jak ja". Każdy mistrz to chodzący argument, dowód, naoczny świadek.

Osiągnięcia nauki i techniki to dobra powszechnie dostępne, ale sfera subiektywna jest domeną jednostki. Pytanie tylko, jak zaprowadzić w tym wszystkim równowagę, jak zaprowadzić równowagę nie tylko w domenie profesji, lecz życia w ogóle. Wykładem „Mistrz-uczeń", pragnę ukazać, że istnieje tylko jedna nauka o dwóch wymiarach. Jeden z nich zwraca się ku rzeczywistości zewnętrznej, a drugi ku wewnętrznej. Jeden jest obiektywny, a drugi subiektywny, ale ich metody i wnioski się nie różnią. W obu przypadkach zaczynamy od wątpliwości.

•

Jednym ze słuchaczy wykładu pt. „Mistrz – kto to jest?", który odbył się w 2011 roku w Klubie Seniora Politechniki Wrocławskiej, był profesor Ryszard Krasnodębski, mistrz polskich matematyków i ekonomistów. Zainspirowany wykładem, podejmuje ciekawą dyskusję z Profesorem Mroczką. Oto jego głos:

UCZEŃ O MISTRZU

Ze szczególnego względu zainteresował mnie odczyt profesora Janusza Mroczki „Mistrz – kto to jest?", jakiego z satysfakcją wysłuchałem 20 stycznia tego roku na spotkaniu czwartkowym Klubu Seniora Politechniki Wrocławskiej. Lata mojej przeszłości byłyby w niemałym stopniu inne pod niektórymi względami, gdyby nie Jego, profesora Wincentego Stysia, interwencja, gdy byłem jeszcze studentem: zaproponował mi asystenturę.

Był rok 1947. Studiowałem w Wyższej Szkole Handlowej; było nas około tysiąca. Idąc na zajęcia odbywające się w budynku przy ulicy Uniwersytetów

Szwedzkich, dziś Uniwersyteckiej, lub do sali Balzera, wciąż przechodziliśmy obok Szermierza.

Była to asystentura w Katedrze Ekonomii Politycznej, jednocześnie katedrze uniwersyteckiej, której kierownikiem był prof. W. Styś. Słuchałem Jego wykładów. Nie bez znaczenia i dzisiaj byłyby jego słowa o tym, że efekt rozważań teoretycznych w ekonomii o gospodarce kraju należy w końcu skonfrontować ze zdrowym rozsądkiem. Cieszyłem się Jego opiekuńczym i przyjaznym stosunkiem do mnie aż do jego śmierci w 1960 roku. Zmarł mając 57 lat. Był dla mnie nie tylko nauczycielem akademickim – choć, bezpośrednio zaledwie przez niepełne trzy lata – lecz także, później, współwędrowcem w wielu wędrówkach, głównie między Haliczem a Wisłą. I słuchałem, słuchałem.

O dwóch zdarzeniach opowiem dokładniej. Jedno – natury publicznej, drugie ilustrujące szacunek dla istoty relacji, jakiej poświęcony był wspomniany odczyt prof. Mroczki. Kilkuletnia liberalizacja powojenna – można powiedzieć taktyczna – w Polsce, przejawiająca się w wyższych szkołach, w drobnej przedsiębiorczości, w rolnictwie, skończyła się. Otrzymaliśmy stalinizm z jego koniecznymi atrybutami.

Profesor Styś został usunięty z kierownictwa Katedry Ekonomii, przeniesiony do Katedry Historii Gospodarczej i pozbawiony prawa wykładania w obu uczelniach. Nie zgodził się bowiem na wykładanie ekonomii marksistowskiej, jako jedynie słusznej i zaprzestanie wykładów ekonomii, jak mówili marksiści, burżuazyjnej. Więcej, zażądano pokajania się publicznego na zwołanym w tym celu zebraniu wszystkich studentów – już wówczas Wyższej Szkoły Ekonomicznej – i jej nauczy-cieli akademickich. Odmówił. Byłem już wtedy poza tą uczelnią; w obliczu faktów zwolniłem się i kontynuowałem studia matematyczne w Uniwersytecie Wrocławskim; wkrótce otrzymałem dyplom WSE.

Po siedmiu latach wygnania przywrócono profesorowi Stysiowi kierownictwo Katedry, a nawet wybrano Go na początku roku 1957 rektorem Wyższej Szkoły Ekonomicznej. Wybór na następną kadencję nie został przez ministra zatwierdzony.

Drugie zdarzenie miało miejsce w kilka lat później w gmachu historii Uniwersytetu, gdzie prof. Styś przesiadywał godzinami i, jak mówił, młócił na arytmometrze elektrycznym Facit – ówcześnie sukcesem było w Polsce mieć go do dyspozycji – stosy ankiet zawierających dane zebrane wśród rolników woje-

wództwa rzeszowskiego. Rezultatem jest książka pt. „Współzależność rozwoju rodziny chłopskiej i jej gospodarstwa” wydanej 1959 roku przez Wrocławskie Towarzystwo Naukowe. Odwiedzałem Go niekiedy w owym gmachu przy ulicy Szewskiej. Wizyty te były okazją do opowieści o szczegółach tej pracy.

W czasie jednej z nich, jesienią 1955 roku, jego relacja o pewnych obliczeniach była szczególnie dokładna. Metoda doradzona mu przez matematyków wywołała u profesora niezadowolenie. Wyszedłem i przemierzałem korytarze dostojnego gmachu. Wróciłem do sali, w której prof. Styś wciąż pracowicie naciskał klawisze Faci-ta; a ten wciąż furkotał. Zreferowałem swój pomysł inaczej rozwiązujący problem. Efektem jest przypis w dziele wspomnianym wyżej: „Tę metodę doradził mi mój dawny uczeń i asystent przy Katedrze Ekonomii W.S.E., a obecnie asystent Katedry Matematyki Politechniki Wrocławskiej, mgr Ryszard Krasnodębski. (…) *przedyskutowana* (…) *na seminarium* (…) *pod przewodnictwem profesora H. Steinhausa.* (…)*”. W gruncie rzeczy jestem pewny, że gdyby nie ta notatka, zapomniałbym o sprawie. Tak dalekie były mi problemy, o których mówił mi prof. Styś. Odczuwam dzisiaj niemałą satysfakcję, a jednocześnie wywołuje ta notatka myśl gorzką: jest, można powiedzieć, niezwykłym ewenementem na tle obecnych obyczajów. To ich obserwacja jest stymulatorem inicjatywy prof. J. Mroczki.*

W środowisku matematycznym, łączącym jeżeli idzie o matematykę i o rozumienie etosu uczonego, za swoich nauczycieli akademickich profesorów: Władysława Ślebodzińskiego, Edwarda Marczewskiego i Hugona Steinhausa.

Wykładanie matematyki na Politechnice – jak czyniłem to przez wiele lat – zwłaszcza gdy zainteresowania wykładowcy są dalekie od zastosowań, nie stwarza okazji, by mieć uczniów w ścisłym sensie, a nie tylko za pośrednictwem wykładów i egzaminów.

Mistrz i uczeń – razem wypowiedziane – to dwa wielkie słowa. Gdy znów będą przemilczane, jak też inne wielkie słowa, będzie to znakiem, jak sądzę, powrotu dobrych obyczajów. Jak długo na to będą czekać młodsze ode mnie pokolenia?

Ryszard Krasnodębski, 8 lutego 2011

Professor Magnus

Aktywność naukowa i społeczna Profesora Mroczki opera się na trzech filarach: (i) rzetelnego i wolnego od wpływów politycznych prowadzenia badań naukowych, (ii) dążenia do transparentności awansu naukowego przez merytoryczną ocenę dorobku uczonych, (iii) promowania i umiędzynarodowienia działań naukowych. O ile nie jest pewne, czy kolejne polityczne reformy przynoszą więcej odkryć naukowych, o tyle to szczególne zaangażowanie Profesora przyniosło wymierne korzyści społeczności akademickiej i zmieniło same uczelnie.

Nauka to pasja

W świecie nauki chyba najtrudniej jest nie stracić z oczu sensu naukowego powołania. Jest to nad wyraz trudne w obliczu wszechobecnego ujmowania poczynań naukowców w sztywny gorset parametryzacji i kategoryzacji jednostek naukowych. Cóż za wyzwanie! Profesor Mroczka mimo upływu lat pokazuje, że nauka może być i jest piękna i staje się pasją dla tego, kto poświęca się jej uczciwie i wiernie. *Inventas vitam iuvat excoluisse per artes*[10]. Umiłowanie Profesora do uprawiania nauki budzi osobiste zadziwienie i szacunek.

Profesor Mroczka swe naukowe uczucia ofiarował metrologii, choć to fizyka i matematyka były jego młodzieńczymi objawieniami. Do dzisiaj w swobodnej rozmowie potrafi zaskakiwać studentów i kolegów profesorów nieoczywistymi zadaniami i zagadkami z fizyki i matematyki (podobno w czasach studenckich był „zafiksowany" na rozwiązywaniu zadań z polskich i zagranicznych zbiorów i nie było dla niego zadań „nie do przejścia"). Ale było warto!

Dzisiejsze zainteresowania naukowe Profesora Mroczki obejmują: metodologię procesu poznawczego, algorytmizację problemu odwrotnego, pomiary pośrednie źle uwarunkowane numerycznie, analizę spektralną i polaryzacyjną promieniowania rozproszonego w opisie właściwości układów dyspersyjnych, metodologię łączenia danych pomiarowych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod przetwarzania, wykorzystanie reprezentacji czaso-

[10] (łac.) „Uczyńmy życie lepszym przez naukę i sztukę" – cytat z Wergiliusza widniejący na rewersie medalu noblowskiego dla laureatów z fizyki i chemii.

wo-częstotliwościowych sygnałów w przetwarzaniu danych pomiarowych, wykorzystanie metody momentów w analizie układów dyspersyjnych.

Dorobek naukowy Profesora Mroczki jest bardzo bogaty. Wyraźmy ten dorobek *expressis verbis*. W chwili pisania niniejszego tomu *Problemów Metrologii* Profesor jest autorem bądź współautorem 446 publikacji (144 z tzw. listy filadelfijskiej), współautorem 13 książek (5 zagranicznych, 8 krajowych) oraz autorem 8 patentów (4 wdrożenia, m.in. „Mętnościomierz laboratoryjny" i „Turbidymetr T-1"). Liczba cytowań jego prac wynosi 1937, zaś indeks Hirscha to 29 (według bazy danych Scopus).

Profesor był kierownikiem 24 projektów badawczych, w tym zrealizował: 11 projektów badawczych własnych, 1 projekt celowy, 1 projekt rozwojowy, 8 projektów promotorskich i 7 projektów międzynarodowych. W 4 projektach badawczych brał udział jako główny wykonawca. Wyniki badań 4 projektów zostały wdrożone do praktycznego stosowania.

Działalność recenzencka Profesora obejmuje recenzje trzech doktoratów honorowych (prof. A. Barella z Barcelony, prof. Z. Hotry ze Lwowa i prof. W. Wolińskiego z Warszawy), 58 wniosków profesorskich (jeden za granicą), 56 habilitacji oraz 22 doktoratów.

Zespół Profesora Mroczki realizuje szereg wątków naukowych we współpracy z zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Owocem tych badań są wspólne publikacje oraz staże naukowe. Na liście tych ośrodków znajdują się:

- Institut National des Sciences Appliquees, Rouen, CNRS 6614 DS10, Francja,
- Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, Preston, Wielka Brytania,
- Institut Universitaire des Systemes Thermiques Industriels, Marsylia, UMR CNRS 6595, Francja,
- Department of Biomedical Engineering, Boston University, Boston, USA,
- Biomedical Physics Laboratory, Université Libre de Bruxelles, Belgia,
- Department of Medical Informatics, University of Szeged, Szeged, Węgry,
- Department of Electrical Engineering, Systems and Automation, Ghent University, Belgia,

- Dipartmento di Ingegneria Dell' Innovazione, University of Salento, Lecce, Włochy,
- Centre for Modelling and Information in Medicine, City University, London, UK,
- Dipartimento de Elettronica e Informatica, University of Padowa, Padwa, Włochy,
- Royal Brompton National Heart and Lung Hospital, London, Wielka Brytania,
- Physiologie Respiratoire et Sportive, Hopital Charles Nicolle, Rouen, Francja,
- Auckland Bioengineering Institute, The University of Auckland, Nowa Zelandia,
- Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen, Niemcy,
- Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Bruksela, Belgia,
- Xidian University, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Chiny.

Rola krytyki uczonych: działalność ekspercka w Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów

Praca zawodowa i działalność naukowa Profesora Mroczki są nieodłącznie związane z aktywnością ekspercką w prestiżowych instytucjach opiniodawczych i gremiach doradczych. Jest to dla niego sposobność do wyrażania realnego wpływu na politykę naukową państwa.

W grudniu 2020 roku minęło 30 lat od powołania Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów. Jej zadania statutowe powierzono nowo utworzonej Radzie Doskonałości Naukowej. Działaniu Komisji przypisywano nierzadko rolę „sądu kapturowego", poddając w wątpliwość praktyki stosowane w ocenie dorobku naukowego akademików, takie jak uznaniowość i jednowymiarowość czy terminowość ocen[11]. Żywiołowa dyskusja prowadzona chociażby na forum opiniotwórczych periodyków branżowych, takich jak „Forum Akademickie" czy „Nauka", stanowi oryginalne i bogate „studium przypadku".

Współpraca Profesora Mroczki z Centralną Komisją rozpoczęła się w 2013 roku, gdy został wyłoniony w drodze wyboru środowiska naukowego na członka sekcji VI

[11] Z. Drozdowicz „Ocena osiągnięć naukowych". Forum Akademickie 9/2020.

(nauki techniczne – elektronika). Funkcję tę pełnił do grudnia 2020 roku. Do roli rzeczoznawcy był jednak wcześniej niejednokrotnie zapraszany już od 1997 roku. W tym czasie Centralna Komisja borykała się z zalewem wniosków awansowych związanym ze zmianą zasad uzyskiwania stopni i tytułów naukowych w 2011 i 2019 roku. Wytężona praca przyniosła jednak wymierne rezultaty – Profesor przewodniczył w tym czasie 56 komisjom powołanym w przewodach habilitacyjnych (w 16 posiedzeniach podjęto uchwałę o opinii negatywnej). Zapytany, czym była dla niego Centralna Komisja, odpowiedział:

> *To miejsce szczególne, gdzie zrozumiałem na czym polega krytycyzm chroniący nas od ślepego ulegania autorytetowi; jasność i ścisłość w naukowej argumentacji; bezwzględne dążenie do prawdy na różnych polach ludzkich dociekań.*

Siłą sprawczą Profesora Mroczki staje się wnikliwe dążenie do naukowej prawdy, wykazywanie faktycznej wartości naukowych osiągnięć, kierując się zasadą ludzkiej przyzwoitości, ale też i życzliwości. Jest przeciwnikiem szybkich ocen w postępowaniach awansowych, aby w natłoku spraw Centralnej Komisji nie prześlizgiwały się osoby, które nie powinny. Jego recenzje cieszą się dużą poczytnością w środowisku naukowym. Poświęca im wiele czasu, bowiem – jak sam przyznaje – „dobra recenzja jest dziełem sztuki niczym szekspirowski dramat". Profesor Andrzej Materka tak oto wspomina współpracę z Profesorem Mroczką w Komisji[12]:

> *Pisze wnikliwe, a jednocześnie błyskotliwe recenzje dysertacji naukowych i dorobku uczonych. Umie przedstawić krytykę w sposób prawdziwie życzliwy. Z dużą intuicją wyczuwa potencjał autora ocenianych dzieł i podsuwa nowe kierunki twórczych poszukiwań. Nakreśla perspektywę sukcesu i zachęca do szukania własnej drogi zawodowej, której przeciwstawia opcję powielania drogi mistrza. Jest w wypełnianiu tego dzieła wybitny.*

Członkowie komisji habilitacyjnych, którym przewodniczył Profesor Mroczka, często wspominają wspólne posiedzenia jako swoistą ucztę intelektualną, tak odmienną od wspomnianego już „sądu kapturowego". Wymagał od członków komisji starannego przygotowania, co zmuszało do większego wysiłku, ale też **uczyło** jakże trudnej **oceny** dorobku naukowego drugiego człowieka i **docenienia** tegoż dorobku niezależnie od ostatecznego werdyktu komisji.

---

[12] A. Materka „Opinia w sprawie nadania prof. J. Mroczce tytułu doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej" (2018).

Przez długie lata pracy w Centralnej Komisji Profesor Mroczka doczekał się etykiety specjalisty od odważnych i wnikliwych recenzji dorobków habilitacyjnych czy profesorskich. Outsidera broniącego sprawiedliwych ocen i sądów. Wśród ludzi związanych politycznym sznurem z Centralną Komisją była to postawa mocno ryzykowna. Za odwagę w kreowaniu krytycznych opinii w ocenie dorobku uczonych płacił niejednokrotnie banicją ze strony rodzimego środowiska zarządzającego jego *Alma Mater*. Chyba najbardziej znanym społeczności akademickiej przykładem jest pominięcie jego kandydatury w wyborach do Rady Doskonałości w 2019 roku. Brzmi to absurdalnie, ale zwracano się o to do innych uczelni i to robili jego przełożeni. Odnotowujemy te zarzuty nie po to, by z nimi polemizować, lecz po to, by zwrócić uwagę na słabości systemu recenzenckiego, gdzie recenzja rzetelna, ale wypadająca na niekorzyść kandydata odbierana jako atak personalny.

Można opisać jeszcze wiele takich przypadków, które dotknęły zarówno Profesora, jak i jego wychowanków… Tylko komu jest to dzisiaj potrzebne?

Promotor polskiej myśli naukowej

Mamy ambitne plany, takie jak: rozwój nauki, umiędzynarodowienie osiągnięć polskich naukowców, znakomite kształcenie. Markę polskiej nauki tworzą nie tylko innowacje, lecz także ludzie aktywnie działający na rzecz jej rozkwitu, promowania, integracji, ustanawiania standardów prowadzenia badań i norm etycznych. Ogólnie – działalności w imię dobra wspólnego – *bonum universitatis*.

W przypadku Profesora Mroczki udział w tym *dobru wspólnym* wydaje się kwestią klarowną. Od wielu lat aktywnie działa w wielu organizacjach naukowych w kraju i za granicą. Są to m.in.:

- Funkcje w strukturach Polskiej Akademii Nauk:
  - członek (od 1993 roku), wiceprzewodniczący (2001–2007), przewodniczący (2007–2015, dwie kadencje) Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN;
  - członek korespondent PAN od 2010 roku w Wydziale IV (wydział nauk technicznych);
  - członek rzeczywisty PAN od 2022 roku w Wydziale IV (wydział nauk technicznych);
  - wiceprezes oddziału PAN we Wrocławiu (od 2014 roku);

- przewodniczący Kapituły Nagrody *Iuvenes Wratislaviae* wrocławskiego oddziału PAN (2013–2014);
- członek Rady Kuratorów Wydziału IV PAN (wydział nauk technicznych);
- członek Sekcji Fotoniki Komitetu Elektroniki i Telekomunikacji PAN (kadencja 2020–2022).

- Członkostwo innych organizacji naukowych w kraju i za granicą:
  - członek Polskiego Towarzystwa Fizycznego (od 1986 roku);
  - członek Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego;
  - członek Komitetu Naukowego czasopisma *Metrology and Measurement Systems* Polskiej Akademii Nauk (od 1990);
  - stały członek stowarzyszenia SPIE – The International Society for Optical Engineering (od 1992 roku);
  - wiceprezydent *International Symposium of Optical Applied Science and Engineering* „Optical Diagnostics in Fluid and Thermal Flow" w San Diego, USA (1993);
  - członek International Technical Working Group on Penetrating Radiation, USA (od 1994 roku);
  - członek Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego KBN (18 konkursów, w 6 był przewodniczącym);
  - członek Senatu Politechniki Wrocławskiej (1999–2005).

Kadencja Profesora Mroczki jako przewodniczącego w Komitecie Metrologii i Aparatury Naukowej PAN jest daleka od „planowania przy zielonym stoliku". Jego szczególnym osiągnięciem organizacyjnym jest wprowadzenie czasopisma naukowego *Metrology and Measurement Systems*, wydawanego przez PAN, na tzw. listę filadelfijską, czyli listę czasopism indeksowanych w bazie *Journal Citation Reports*, JCR. W 2019 roku czasopismo to uzyskuje wysoką 100-punktową notację Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (obecnie Ministerstwa Edukacji i Nauki), a dzisiaj zaliczane jest do prestiżowych czasopism o tematyce metrologicznej o międzynarodowym zasięgu.

Kolejny przykład działalności profesora w Komitecie to zapoczątkowanie w 2008 roku serii wydawniczej *Problemy Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej*, ukazującej osiągnięcia naukowe polskich uczonych w postaci kilkudziesięciostronicowych opracowań. Tą drogą pragnie stworzyć pole do dyskusji i współpracy z najlepszymi ośrodkami na świecie. Jest to również sposobność do upowszechniania dokonań naukowych młodych i utalentowanych pracowników nauki. Seria ta liczy już 10 tomów (wliczając niniejszy) i jest uznanym opracowaniem w środowisku naukowym.

W pierwszej ocenie komitetów PAN dokonanej w 2013 roku Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej kierowany przez Profesora Mroczkę otrzymuje najwyższą notę i zajmuje pierwsze miejsce wśród wszystkich komitetów PAN.

Uznania, zaszczyty i wyróżnienia

Profesor Mroczka jest laureatem licznych nagród i zaszczytów. To świadectwo tego szczególnego czasu, który wypełnił swoją obecnością w świecie nauki. Czasu ważnych i wzniosłych tematów, radości, ale też i chwil trudnych. Zaszczyty te przyjmował zawsze z właściwą sobie powściągliwością i skromnością, bowiem – jak twierdzi – „subtelna pycha i próżność, która w łatwy sposób gnieździ się umysłach uczonych rodzi subiektywizm, błąd i niewłaściwą ocenę rzeczywistości". I co najważniejsze – zawsze odczuwał dumę, lecz nie z powodu tych licznych nagród i zaszczytów, ale z dokonań swoich wychowanków.

Profesor Mroczka może poszczycić się licznymi nagrodami za wspieranie młodych talentów. W 2005 roku otrzymał subsydium profesorskie „Mistrz" Fundacji Nauki Polskiej, a w 2014 roku – Nagrodę Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za Wybitne Osiągnięcia w Opiece Naukowej i Dydaktycznej. W dowód uznania działalności szkoły metrologii elektronicznej i fotonicznej profesor Mroczka odebrał w 2015 roku Nagrodę Naukową Prezesa Polskiej Akademii Nauk.

Działalność naukowo-badawcza Profesora została uhonorowana m.in.: Nagrodą II stopnia MEN (1989), Nagrodą Wydziału IV PAN (1993), Nagrodą MNiSW za Wybitne Osiągnięcia w Opiece Naukowej i Dydaktycznej w 2014 roku, Nagrodą Prezesa PAN za 2015 rok, Nagrodą Naukową im. Prof. Mariana Suskiego, Nagrodą *Professor Opoliensis* w 2014 roku, 38 Nagrodami JM Rektora Politechniki Wrocławskiej. Został odznaczony m.in.: Krzyżem Kawalerskim (2003), Oficerskim (2013) i Komandorskim (2021) Orderu Odrodzenia Polski, Brązowym (1989), Srebrnym (1994) i Złotym

(1998) Krzyżem Zasługi, Medalem Komisji Edukacji Narodowej, Złotą Odznaką Politechniki Wrocławskiej z Brylantem, Medalem im. Prof. Kazimierza Idaszewskiego, Medalem im. Prof. Włodzimierza Krukowskiego.

Za wybitne osiągnięcia i zasługi dla integracji krajowego i międzynarodowego środowiska naukowego oraz osiągnięcia w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej, a także za szczególny wkład w rozwój kadry naukowej uczelni wyższych technicznych otrzymał **doktoraty *honoris causa*** następujących uczelni: Politechnika Lubelska (2014), Politechnika Opolska (2017), Politechnika Gdańska (2019), Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie (2019), Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie (2020).

Profesor Mroczka znalazł się na opublikowanych w 2020 i 2021 roku listach TOP 2% prestiżowego rankingu najbardziej wpływowych ludzi nauki na świecie.

W 2021 roku w drodze konkursu uzyskał status *professor magnus* Politechniki Wrocławskiej. I to jedno z nielicznych uznań Jego pracy przez najważniejszą dla niego uczelnię, Jego *Alma Mater*.

Profesor Mroczka podczas wykładu okolicznościowego wygłoszonego na uroczystości nadania Mu tytułu doktora *honoris causa* Politechniki Lubelskiej (2014) – a to dopiero początek! (fot. archiwum prof. Mroczki)

„Honor ze wszech miar zasłużony!" – tak powitano nowego doktora honorowego Politechniki Opolskiej (2017). Wieść niesie, że miarą wielkości uczonego ustanowioną tym wydarzeniem „jedna Mroczka" (fot. archiwum prof. Mroczki)

Świeżo upieczony doktor honorowy Politechniki Gdańskiej z małżonką Ewą (2019) (fot. archiwum prof. Mroczki)

„Obrady okrągłego stołu" po nadaniu prof. Mroczce godności doktora *honoris causa* Politechniki Gdańskiej (2019). Od lewej: prof. Jacek Namieśnik, rektor Politechniki Gdańskiej; naprzeciwko: prof. Janusz Mroczka z małżonką (fot. archiwum prof. Mroczki)

Profesor Mroczka w towarzystwie małżonki Ewy odbiera pamiątkowy dyplom z rąk gen. bryg. prof. Tadeusza Szczurka (Rektor-Komendant WAT) podczas uroczystości nadania Mu godności doktora *honoris causa* Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie (2019) (fot. Sebastian Jurek, WAT)

„Oblicza sukcesu" to tytuł prelekcji, jaką wygłosił prof. Mroczka z okazji uroczystości nadania Mu godności doktora honoris causa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (2020) (fot. Zbigniew Sulima, AGH)

„Czuję się człowiekiem szczęśliwym i naukowo spełnionym" – wyznał profesor Mroczka podczas uroczystości nadania Mu godności doktora honoris causa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (2022). Na zdjęciu z JM Rektorem AGH, prof. Jerzym Lisem (fot. Zbigniew Sulima, AGH)

Wybrane laudacje i recenzje

Laudacja promotorska wygłoszona z okazji nadania Prof. Mroczce tytułu doktora honoris causa Akademii Górniczo-Hutniczej

Prof. dr hab. inż. Janusz Gajda (AGH)

Magnificencjo Rektorze!

Wysoki Senacie!

Panie Dziekanie!

Wielce Dostojny Panie Profesorze,

Przypadł mi niewątpliwy zaszczyt wygłoszenia laudacji podczas uroczystego posiedzenia Senatu Akademii Górniczo-Hutniczej, poświęconego nadaniu tytułu Doktora Honoris Causa Profesorowi Januszowi Mroczce, członkowi korespondentowi Polskiej Akademii Nauk, profesorowi *Magnusowi* Politechniki Wrocławskiej. Tytuł ten jest nadawany w uznaniu zasług Profesora dla całego środowiska naukowego jak również dla Akademii Górniczo-Hutniczej.

Godność Doktora Honoris Causa jest najwyższym wyróżnieniem jakie może nadać uniwersytet. Jest ona nadawana za zasługi i dla zaszczytu. W ten sposób uniwersytet wyróżnia osoby wybitne. Zaszczyt jest obustronny tak dla wyróżnionej osoby jak też uczelni, która tę godność nadaje. Jestem jednak głęboko przekonany, że tytuł Doktora Honoris Causa pełni jeszcze jedną, równie ważną rolę. Wskazuje mianowicie osobę, która dla nas wszystkich przynależących do wspólnoty akademickiej, może służyć za najwyższej jakości wzorzec postaw obowiązujących, w procesach zdobywania i przekazywania wiedzy.

Profesor Janusz Mroczka jest metrologiem, a pojęcie wzorca jest jednym z podstawowych pojęć używanych w metrologii. Wzorzec powinien charakteryzować się pewnymi cechami, do których należą niezmienność w czasie oraz mała i znana nie-

pewność. Po wielu latach znajomości mogę stwierdzić, że obie te cechy wyróżniają również Profesora. Niezmienność dotyczy przede wszystkim Jego standardów etycznych przestrzeganych zarówno podczas prowadzenia badań, zajęć dydaktycznych jak również wtedy, gdy w roli recenzenta ocenia dorobek kandydatów do awansu naukowego. Mała niepewność w odniesieniu do osoby Profesora oznacza przewidywalność Jego postawy, w każdej nawet najtrudniejszej sytuacji życiowej lub zawodowej. Można być pewnym, że decyzje, oceny i opinie wygłaszane przez Profesora będą zawsze oparte na dogłębnej znajomości zagadnienia i będą zgodne z najwyższymi standardami etycznymi.

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

Dorobek naukowy Profesora Janusza Mroczki przedstawili i ocenili opiniodawcy powołani w tym przewodzie: prof. Piotr Kisała z Politechniki Lubelskiej oraz prof. Przemysław Wachulak z Wojskowej Akademii Technicznej. W swojej laudacji skupię się więc na przedstawieniu osoby Profesora Janusza Mroczki, Jego szczególnych cech charakteru, które obok wybitnych osiągnięć naukowych dodatkowo uzasadniają wyróżnienie Go tą najwyższą godnością akademicką jaką jest tytuł Doktora Honoris Causa.

Karl Jaspers, niemiecki filozof w swojej książce zatytułowanej *Idea uniwersytetu*, wydanej po raz pierwszy w Berlinie w 1923 roku, wskazał na pięć filarów, na których opiera się tożsamość uniwersytetu. Wg Jaspers'a są nimi poszukiwanie prawdy, wspólnotowość, bezinteresowność, zaufanie oraz wolność. Według tych wskazań można również oceniać postawę każdego badacza i naukowca. W przypadku Profesora Janusza Mroczki taka ocena wypada jednoznacznie pozytywnie.

Profesora Janusza Mroczkę znam od prawie 30 lat. W kontaktach osobistych z Profesorem zwraca szczególną uwagę przestrzeganie przez Niego wysokich standardów moralnych. Prawdomówność, odpowiedzialność, niezależność, wolność, niepodatność na naciski, bezwzględna zgodność słowa z czynem uczyniły Go wzorcem etycznym w środowisku akademickim. Profesor stara się zaszczepić te cnoty również swoim współpracownikom i wychowankom. Relacje Profesora Janusza Mroczki z Jego wychowankami, studentami i współpracownikami charakteryzuje tolerancja dla poglą-

dów, szacunek dla drugiego człowieka, umiejętność dostrzegania uzdolnień i talentów oraz wspieranie ich rozwoju, wyrozumiałość dla błędów i słabości, życzliwy stosunek i pełna gotowość do pomocy, gdy tylko jest taka potrzeba. Wkład Profesora Janusza Mroczki w sposób oceny ludzkich dokonań to fenomen ukazujący jak na podstawie ocenianego dorobku kandydatów do awansu można wywnioskować o tym, co w osobowościach, w charakterach, we wnętrzu tych osób jest wielkie i najcenniejsze. Twierdzi On, że właśnie tam widać ich prawdziwy charakter i wewnętrzną intelektualną sprawczość.

Zaangażowanie Profesora i bezgraniczna wiara w sprawiedliwość oraz wartości, pozwoliły Mu ustanowić standardy oceny w postępowaniach kwalifikacyjnych. Jest przeciwnikiem szybkich pochopnych ocen. Twierdzi, że *„czas prawdziwej oceny jest niekiedy dłuższy niż jedno życie”*. Uważa, że należy oceniać to co oceniany stworzył czyli rzeczywiste dzieło, a nie fakt jego tworzenia, w którym jak twierdzi można trwać całe życie i nic nie stworzyć. Jego ośmioletni czas bycia członkiem Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów był miejscem i płaszczyzną intelektualnego oddziaływania i propagowania wypracowanego przez wiele lat sposobu oceny dorobku naukowego. Te cechy przejawiają się w opracowywanych przez Profesora recenzjach dorobku naukowego kandydatów wspinających się po szczeblach kariery akademickiej. W wielu recenzjach pokazał On, jak można zachować niezależność, solidność, uczciwość w ocenie dorobku drugiego człowieka, oceniając go w sposób rzetelny i przyjazny, ale również krytyczny i bezstronny. Taka właśnie forma recenzji stała się wzorcem do naśladowania i ukształtowała liczne grono młodych uczonych, obecnych recenzentów.

Przez stałe dbanie o zachowanie wysokich norm etycznych i moralnych stał się legendą w dziedzinie nauk technicznych, profesorem zaangażowanym w obronę sprawiedliwości i wartości moralnych. Bezkompromisowa postawa Profesora nie zawsze spotykała się z uznaniem i zrozumieniem ze strony własnego środowiska. Pomimo to Profesor odważnie i uporczywie pracował i nadal pracuje na rzecz poszanowania autentycznych wartości. Jakże prawdziwe w tym kontekście są słowa wypowiedziane przez Tadeusza Kantora, polskiego malarza i reżysera, scenografa i teoretyka sztuki cyt.: „*Nie można być ciągle na fali – trzeba być falą*”. Ze względu na swoje poglądy i bezkompromisową postawę Profesor Janusz Mroczka rzadko bywał na fali, ale często sam był falą.

Prof. Andrzej Meterka w swojej recenzji opracowanej w innym czasie i dla potrzeb innego postępowania trafnie scharakteryzował sylwetkę Profesora Janusza Mroczki cyt.: „*Ma ogromną, historyczną i bieżącą, wiedzę na temat działalności naukowej i zawodowej kilkuset badaczy uprawiających dyscyplinę elektronika i związane z elektroniką obszary teorii i praktyki. Łatwo nawiązuje i rozwija nowe kontakty, jest przyjazny, otwarty i uważny. Pisze wnikliwe, a jednocześnie błyskotliwe recenzje dysertacji naukowych i dorobku uczonych. Umie przedstawić krytykę w sposób prawdziwie życzli-*

wy. Z dużą intuicją wyczuwa potencjał autora ocenianych dzieł i podsuwa nowe kierunki twórczych poszukiwań. Nakreśla perspektywę sukcesu i zachęca do szukania własnej drogi zawodowej, której przeciwstawia opcję powielania drogi mistrza. Jest w wypełnianiu tego dzieła wybitny".

Profesor Janusz Mroczka należy do tego pokolenia, którego życie osobiste i zawodowe przypadło na wyjątkowo trudny czas, w którym narzucono realia obcego systemu komunistycznego. On wychowany w rodzinie z tradycjami ustroju wiejsko-dworkowego w atmosferze ukształtowanej przez dzieła Młodej Polski i postromantyczne echa, w żaden sposób nie mógł się odnaleźć w komunistycznej rzeczywistości, a zarazem był przekonany, że aby przetrwać, nie wystarczy żyć w ukryciu, w stanie duchowej emigracji. Obdarowany szczególną kreatywnością, pełen zapału, poszukujący coraz to nowych dróg realizacji siebie, zauważa rozziew pomiędzy moralnością prywatną a publiczną. Ten fakt oraz jego życiowa otwartość ułatwiły mu unikanie i nie zadawanie się z liczną wówczas grupą, w której dominowała bierność, odtwórczość, nieufność, zamknięcie i niewiara we własne siły. W ten sposób znalazł się poza tzw. „*straconym pokoleniem*", które to pokolenie zawsze eksponowało swoiste rozczarowanie, poczucie krzywdy i wiecznego niezadowolenia.

Jest zwolennikiem „*odbrązowienia*" posągów ludzi zasłużonych, wyniesionych przez ideologiczne struktury, za chęć tylko bycia, trwania, a niekiedy tylko pomnażania własnego bytu materialnego. Temu, jak twierdzi Profesor Janusz Mroczka może jedynie zaradzić zmiana mentalności społecznej, a dokonać tego mogą młodsze pokolenia. Stąd jak mówi należy wszelkimi siłami im pomagać i poprzeczkę wymagań merytorycznych oraz etycznych ustawiać możliwie wysoko. Te pokolenia winny zmienić zasadę „*plus vis quam ratio*" na tę, która bliska jest Profesorowi Mroczce „*plus ratio quam vis*". Znamienne są słowa Profesora zamieszczone w jednym z Jego dzieł: „*To co przeminęło, nie powraca już nigdy. Z pokorą musimy akceptować upływający czas i nasze w nim przemijanie, słabości ducha i ciała, ludzkie niedostatki. Stąd epilogiem nie mogą być tu nakazy, pouczenia, rady i opinie. Dzieje ludzkie to nic innego jak wymuszona, pokoleniowa wymiana, gdzie wartością i nieodzownym elementem staje się ludzka pamięć. Kończąc, dedykuję wszystkim utwór – apel Adama Asnyka z 1880 r. „Do młodych", wytyczający kierunki działania, szukania prawdy według własnego pomysłu, budowania przyszłości i realizacji własnych marzeń, szanując dokonania swoich poprzedników."* To przykład formy i subtelności metod, jakimi Profesor dociera do wnętrz swoich młodych wychowanków, tym samym dopełniając, nieznane Mu w pełni, ich *ego*.

W dokonywanej samoistnie pokoleniowej zmianie na uniwersytetach należy, jak uważa prof. Janusz Mroczka, „*…pozostawić młodym pokoleniom coś do przemyślenia. Stawianie na młodych to proaktywny sposób tworzenia nowego społeczeństwa, opartego na służeniu drugiemu, dzieleniu się z drugim, społeczeństwa w którym bycie ra-*

zem jest wartością nadrzędną względem posiadania więcej. Upływający czas zmienia każdego z nas. Doświadczenia nasze ukształtowane w minionych latach nie mogą być jednak zapomniane".

Przytaczam tutaj fragmenty z różnych wypowiedzi i wystąpień Profesora Janusza Mroczki aby ukazać jego wkład w kształtowanie i wychowanie młodych pokoleń. Profesor wyzwala w swoich wychowankach wrażliwość aksjologiczną, przekazuje im doświadczenie życiowe, wykształca w nich jasność spojrzenia i myśli, a w szczególności obok spokojnej kontemplacji prawdy – niepokój w jej poszukiwaniu.

W tym kontekście znowu przychodzi na myśl odniesienie do idei uniwersytetu przedstawionej przez Karla Jaspers'a. Formowanie lub inaczej mówiąc wychowanie człowieczeństwa uważał on za najważniejszy element misji wypełnianej przez uniwersytet, a równocześnie za podstawowe uzasadnienie istnienia uniwersytetu.

Charakterystyczną cechą twórczej aktywności wybitnych uczonych jest fakt nierozłącznej więzi z filozoficzną refleksją nad sensem i istotą poznania, a w szczególności metodologicznych poczynań w dziedzinie wiedzy, w której pracują. Aby lepiej scharakteryzować sylwetkę prof. Mroczki jako nauczyciela i uczonego posłużę się Jego słowami zaczerpniętymi ze wstępu do dziesiątego tomu serii *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej* redagowanej przez Profesora: „*…Kiedy w 2008 roku składałem do druku pierwszą książkę pod tytułem „Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej" przyświecał mi cel upamiętnienia powstania z mojej inicjatywy pierwszej Katedry na Politechnice Wrocławskiej, po 1968 roku. Było to w roku 1998, trzydzieści lat po wydarzeniach marca 1968 roku, kiedy to w miejsce istniejących wówczas na Politechnice Wrocławskiej katedr powołane zostały instytuty. Ten fakt opisywany mi przez moich mentorów i wychowawców tłumaczyłem sobie słabością przestrzeni moralnej, deficytem kapitału moralnego. Rozczytany w Dziennikach Kisiela szybko zauważyłem rozziew pomiędzy moralnością prywatną a publiczną, jak również moją indywidualną odrębność od grupy ludzi dzierżawiących swoje sumienie. W kolejnym 2009 roku podjąłem decyzję, aby wydać kolejną książkę, ale już jako cykliczną serię. Uważałem, że po dwudziestu latach traumy transformacyjnej, szoku po gwałtownej i radykalnej zmianie ustrojowej w roku 1989, wytrąceni z utartych ścieżek życia, dokonujących rekonstrukcji codziennych reguł egzystencji na uczelni, ludzie nauki chętnie podejmą trud publikowania obszernych prac w tym cyklu książkowym.*" Ta inicjatywa Profesora przyniosła wymierny efekt; wielu autorów publikujących swoje prace w tej serii pokonało kolejny stopień awansu naukowego. Wzbudziło to zasłużone uznanie i szacunek w środowisku akademickim, o czym świadczą przyznane Mu liczne wyróżnienia oraz cztery doktoraty Honoris Causa.

Niezmienna jest również przychylność i życzliwość Profesora Janusza Mroczki dla spraw dotyczących Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Związki Profesora

z Akademią trwają już ponad 20 lat. W tym okresie podejmował On liczne działania na rzecz rozwoju naukowego Uczelni, jej promocji w środowisku krajowym oraz rozwoju młodej kadry naukowej. W szczególności Profesor przyczynił się w sposób istotny do:

– stworzenia korzystnych warunków do dalszego rozwoju naukowego Wydziału EAIiIB, poprzez sprawne przeprowadzenie procesu opiniowania wniosków o przyznanie Wydziałowi uprawnień do nadawania stopnia doktora i doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika.

– promowania Uczelni w krajowym i zagranicznym środowisku naukowym poprzez wspieranie merytoryczne i udział w komitetach naukowych konferencji organizowanych przez Wydział EAIiIB. Łącznie we współpracy z Profesorem zostały zorganizowane 32 konferencje.

– rozwoju kadr poprzez udział w procesie awansowania naukowego wielu pracowników AGH.

Powyższe fakty pokazują, że prof. J. Mroczka legitymuje się wybitną twórczością naukową i zasłużył się dla rozwoju nauki i wychowania młodych pokoleń uczonych. Tym co tworzy w pełni wkomponowuje się w dewizę Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica: *„Labore creata, labori et scientiae servio”*.

W ponad 100-letniej historii Akademii Górniczo-Hutniczej tą najwyższą akademicką godnością Doktora Honoris Causa zostało wyróżnionych ponad stu wybitnych uczonych, polityków, twórców kultury. Wśród znamienitych postaci w tym panteonie są Wojciech Korfanty, Ignacy Mościcki, Walery Goetel, Tadeusz Sendzimir, Michał Heller, Wiesław Ochman oraz najwybitniejszy Polak Święty Jan Paweł II. Na mocy decyzji Senatu Akademii Górniczo-Hutniczej dzisiaj dołącza do tego wybitnego grona Profesor Janusz Mroczka, którego obdarzamy najwyższą godnością naszej Akademii Górniczo-Hutniczej.

Kraków, 28 maja 2021

Recenzja dorobku naukowego, osiągnięć i zasług prof. Mroczki, kandydata do tytułu doktora honoris causa Akademii Górniczo-Hutniczej

Prof. dr hab. inż. Piotr Kisała (Politechnika Lubelska)

Wprowadzenie

Niniejsza opinia w sprawie nadania tytułu doktora *honoris causa* Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie Profesorowi Januszowi Mroczce wykonana została w związku z wnioskiem Senatu Akademii. Zawiera ona informacje o najważniejszych osiągnięciach w pracy naukowo-badawczej Kandydata do tego zaszczytnego tytułu honorowego, opisując Jego wkład wniesiony w ramach współpracy z innymi Uczelniami, ze szczególnym uwzględnieniem roli Profesora Janusza Mroczki w rozwój Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Tytuł doktora *honoris causa* jest nadawany przez uczelnie osobom szczególnie zasłużonym dla nauki i kultury, osobom o wysokim statusie społecznym lub naukowym. Przyznanie godności doktora honorowego to dowód uznania środowiska akademickiego za wszechstronny wkład w rozwój badanej dziedziny, zarówno pod względem naukowym jak i organizacyjnym. Prof. Janusz Mroczka, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk, profesor Politechniki Wrocławskiej, doktor *honoris causa* czterech uczelni to mentor i wzór do naśladowania dla wielu uczonych, autorytet naukowy, który pracowitością wytrwałością motywuje drugich. Jest On wybitnym przedstawicielem nauki i strażnikiem zasad moralnych, cieszącym się powszechnym szacunkiem, nieprzypadkowo wybranym do otrzymania najwyższego tytułu, nadawanego przez Uczelnię wyższą.

Czuję się zaszczycony pisząc opinię o dorobku, osiągnięciach i zasługach Profesora Janusza Mroczki w postępowaniu zmierzającym do nadania Mu tytułu doktora *honoris causa* przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie. Jest to duże wyzwanie, gdyż próba opisu dorobku nagromadzonego w tak aktywnym życiu naukowym Profesora Janusza Mroczki w krótkiej recenzji wydaje się trudna. Niemniej jednak fakt, że tak wybitny uczony część aktywności zawodowej poświęcił

współpracy z Akademią Górniczo-Hutniczą zasługuje na szczególne podkreślenie w niniejszej opinii.

Zwyczaj obowiązujący przy pisaniu opinii dotyczącej nadania tytułu doktora *honoris causa* nakazuje jej rozpoczęcie od podania najważniejszych momentów w życiorysie Kandydata.

Sylwetka Kandydata

Prof. dr hab. inż. Janusz Mroczka urodził się w Dębicy 27 kwietnia 1952 roku. Po skończeniu edukacji w I Liceum Ogólnokształcącym w Dębicy, w roku 1971 rozpoczął studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. W roku 1976 uzyskał **tytuł magistra**, broniąc pracę pt. „*Filtr adaptacyjny dolnoprzepustowy do tłumienia sygnałów zakłócających w przyrządach tablicowych*". W roku 1980 obronił na Politechnice Wrocławskiej pracę doktorską pt. „*Zagadnienie pomiaru mętności wody oraz wielkości cząstek roztworów koloidalnych za pomocą światła rozproszonego*", uzyskując **stopień doktora** nauk technicznych. W roku 1991 na podstawie monografii pt. „*Metrologiczne problemy wykorzystywania światła rozproszonego do badań rozkładu wielkości cząstek w roztworach dyspersyjnych*" uzyskał **stopień doktora habilitowanego**. Był to ważny okres w karierze Pana Profesora, również ze względu na objęcie przez Niego funkcji dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej na Politechnice Wrocławskiej. Już w roku 1996 uzyskał **tytuł profesora** i od tego czasu pracuje w swojej *Alma Mater* na stanowisku profesora zwyczajnego. Rok 1998 przynosi kolejny rozwój i zmiany w poczynaniach naukowych i organizacyjnych Pana Profesora. Zakłada On na Politechnice Wrocławskiej Katedrę Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej, zostaje jej kierownikiem i kieruje Katedrą do chwili obecnej.

Czy można zamknąć osobowość prof. Janusz Mroczki w precyzyjnie skonstruowane ideowe szufladki? Jest to chyba niemożliwe. Wymyka się z nich. Wystawia się na widok publiczny, oddaje się czemuś z wielkim zaangażowaniem (patrz działalność w Komitecie Metrologii i Aparatury Naukowej PAN), po czym wycofuje się, chowa, znika. To osobowość, którą trudno pojąć, inteligencja w ciągłym ruchu, przyjaźń szczera, bezwzględna harmonia słowa z czynem, wysoki poziom empatii, bezwzględne szanowanie uczuć drugich i wszelkich norm i reguł społecznych. Myślę, że to osobowość wielokształtna, wielowartościowa. To dzięki temu wzbudza On ludzki podziw i zaufanie. Znany jest, że podczas różnych wystąpień posługuje się licznymi cytatami znanych osobowości świata literatury, nauki i sztuki. Pewna specyficzna forma przekazu jest widoczna w jego rozmowach czy wykładach. Tą formą jest symbolika, zamierzona zagadkowość, która jest dla niego narzędziem Jego oddziaływania na drugich.

Jest dobrym mówcą, ale potrafi też słuchać. Bowiem jak twierdzi należy słuchać tego czego ludzie nie mówią i tu cytuje francuskiego pisarza eseistę André Malraux: „*Prawda o człowieku leży przede wszystkim w tym, czego nie mówi*”. Wsłuchuje się w wypowiedzi swojego każdego rozmówcy twierdząc, że każdy ma „swoją pieśń”. Zapytany, skąd taki sentyment do tak licznych cytatów? Odpowiedział: „*tymi cytatami staram się wskazać odmienny sposób postrzegania rzeczywistości, tworzyć tym samym nowe źródła inspiracji jak i podmioty, które po głębokim przemyśleniu uchronią nas od trywialności ulicy i coraz to bardziej rozkrzyczanego tłumu.*”

W uznaniu osiągnięć Profesorowi Januszowi Mroczce powierzano wiele funkcji w środowisku naukowym, w tym wiele z wyboru. Był wiceprezydentem International Symposium of Optical Applied Science and Engineering „*Optical Diagnostics in Fluid and Thermal Flow*” w San Diego w USA. Od roku 1994 roku jest członkiem-założycielem International Technical Working Group on Penetrating Radiation w USA. Również od roku 1994 przez kilka lat był członkiem Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego Komitetu Badań Naukowych. W latach 1999–2005 był członkiem Senatu Politechniki Wrocławskiej. Od roku 1993 jest członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk (KMiAN PAN), a w latach 2001–2007 był wiceprzewodniczącym tego Komitetu, natomiast w okresie 2007–2015 pełnił zaszczytną funkcję przewodniczącego KMiAN PAN. To właśnie w roku 2014 Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej został uznany w drodze konkursu za najlepiej pracujący Komitet Polskiej Akademii Nauk. W latach 2013–2020 Profesor Janusz Mroczka pełnił również funkcję członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów (sekcja VI nauki techniczne, elektronika). Tu pozwolę sobie przytoczyć słowa, które wypowiedział zapytany o to czym była 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*”. W środowisku naukowym doskonale znane są sporządzone przez Niego wnikliwe recenzje w postępowaniach habilitacyjnych i profesorskich. Pełne konstruktywnej krytyki, obiektywne i bardzo rzeczowe, stały się niewątpliwie wyznacznikiem i wzorem do naśladowania. Prof. J. Mroczka stosuje wszystkie dopuszczalne reguły oceny by pokazać osiągnięcia Kandydata jego zdolności twórcze, nieprzeciętną inteligencję, pracowitość, zmysł twórczy i organizacyjny, ale również w skrajnie odmiennych uwarunkowaniach ma cywilną odwagę ujawnić jego, hipokryzję, zakłamanie, pokazać zapożyczenia i inne słabości ludzkiego postępowania.

Szeroko znana jest również działalność międzynarodowa Pana Profesora. Kontakty z ośrodkami naukowymi w Berlinie, Bostonie, Brukseli, Eindhoven, Marsylii, Preston, San Diego, Szanghaju, Toronto, Yokohamie zaowocowały wspólnymi projektami naukowymi i publikacjami. Był ponadto członkiem wielu komitetów naukowych zagranicznych i krajowych konferencji.

Za swoją działalność uzyskał liczne nagrody i wyróżnienia. Spośród wielu, nie sposób nie wymienić m.in.: Nagrody Ministerstwa Edukacji Narodowej II stopnia otrzymanej w 1989 r., Nagrody Wydziału IV Polskiej Akademii Nauk otrzymanej w 1993 r., Subsydium Profesorskiego Fundacji Nauki Polskiej za rok 2005, Nagrody Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za Wybitne Osiągnięcia w Opiece Naukowej i Dydaktycznej otrzymanej w 2014 r., Nagrody Prezesa Polskiej Akademii Nauk przyznanej w roku 2015 za stworzenie szkoły naukowej w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej wraz z cykliczną serią wydawniczą pt. „*Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*" oraz czasopismem z listy filadelfijskiej „*Metrology and Measurement Systems*", Nagrody Naukowej im. prof. Mariana Suskiego czy wreszcie Nagrody *Professor Opoliensis*, przyznanej w 2014 roku. W tym miejscu nie sposób nie wymienić również ponad 30 Nagród JM Rektora Politechniki Wrocławskiej. Szanowny Kandydat został także odznaczony Krzyżem Oficerskim Orderu Odrodzenia Polski, Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski, Złotym, Srebrnym i Brązowym Krzyżem Zasługi, Medalem Komisji Edukacji Narodowej, Złotą Odznaką Politechniki Wrocławskiej z Brylantem, Medalem im. prof. Kazimierza Idaszewskiego, oraz Medalem im. Prof. Włodzimierza Krukowskiego. W roku 2020 znalazł się na liście prestiżowego rankingu najbardziej wpływowych ludzi nauki na świecie, tzw. lista TOP 2%. W roku 2021 został odznaczony Krzyżem Komandorskim Orderu Odrodzenia Polski.

Profesor Janusz Mroczka jest **doktorem *honoris causa***:

- Politechniki Lubelskiej, tytuł nadany w roku 2014,
- Politechniki Opolskiej, tytuł nadany w roku 2017,
- Politechniki Gdańskiej, tytuł nadany w roku 2018,
- Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, tytuł nadany w roku 2019.

Analiza dorobku Profesora Janusza Mroczki bez odniesienia się do Jego osobowości w krótkiej recenzji wydaje się być skazana na niepowodzenie. W przypadku tego Uczonego każde analityczne „TAK" generuje natychmiast interpretacyjne „NIE". Swoim sposobem bycia udowadnia, że nie ma określenia, epitetu czy formy, w którą można by zamknąć Jego intelektualną przestrzeń. Jest postacią przerastającą *status quo*. Zawsze próbuje czegoś więcej. Każdy kto z Nim się spotkał nie zapomni Go nigdy. Swoim intelektem, sposobem bycia, otwartością poraża, ale jednoczenie zaraża. Ten urodzony indywidualista, znakomicie odnajduje się w wieloosobowym zespole, w żaden sposób nie przeszkadzając w niezależności intelektualnej swoich współpartnerów.

Jest On uczonym w starym stylu, dla którego priorytetem jest służenie swojej *Alma Mater* w jej rozkwicie i dbanie o rozwój intelektualny swoich wychowanków bowiem jak twierdzi, cyt.: „…*wychowanie młodego pokolenia to sprawa serio*". Mogę powiedzieć, że jest beneficjentem tego samego naukowego rodowodu, co Jan Łukasiewicz, Władysław Tatarkiewicz, Tadeusz Kotarbiński, Kazimierz Ajdukiewicz, Izydora Dąmbska, których często przywołuje w swoich wystąpieniach. Na półkach Jego prywatnej biblioteki czołową pozycję zajmują dzieła przedstawicieli szkoły lwowsko-warszawskiej. To one są chyba tym źródłem jego intelektualnych uwarunkowań i motywacją w Jego działaniu. Nieprzejednany w swoich zasadach etycznych pozostaje jedną z ostatnich redut wyjątkowości. Jest On przykładem, że można budować karierę zawodową inaczej.

Jak ocenić prof. J Mroczkę w trzech słowach? Uczący, doradzający, pomagający, jednym słowem życzliwy człowiek. Chcąc to rozwinąć napotykamy na osobowość wielowątkową, wielopłaszczyznową. Ta osobowość zmusza do zastanowienia z przywołaniem kwestii fundamentalnych: Czym jest prawda? Jak pogodzić bezstronność z politycznym i moralnym uwarunkowaniem? I wreszcie – czym jest zło, z którym prof. J. Mroczka dokonując oceny ludzkiego dorobku naukowego musiał, chcąc nie chcąc niekiedy się spotkać?

Prywatnie jego pasją jest zaaranżowany i stworzony samodzielnie od podstaw przepiękny ogród z wieloma gatunkami egzotycznych iglaków, wkomponowanymi wśród kwiatów granitowymi ścieżkami i klombami. To prawdziwy Jego azyl, w którym spędza cały wolny swój czas. Tu znajduje natchnienie, relaks i mimo fizycznego zmęczenia prawdziwy wypoczynek dystansując się od zewnętrznego zamętu.

Jest On przykładem człowieka żyjącego w zgodzie z naturą, kierującego się rozumem. Taki sposób bycia prezentują stoicy. Dopełniając opis Jego sylwetki zacytuję myśli trzech stoickich przedstawicieli, antycznych filozofów, których przemyślenia mogą być dla każdego z nas drogowskazem po nieznanych ścieżkach i w trudnych chwilach naszego życia, jednocześnie uzasadnieniem takiego sposobu postrzegania sylwetki Kandydata:

„Spośród wszystkich ludzi tylko ci znajdują spokój, którzy poświęcają czas na filozofię, tylko oni prawdziwie żyją. Nie zadawalają się wyłącznie bacznym poznawaniem swych dni, ale dodają też wieki przyszłe. Wszystkie plony przeszłości są dodawane do ich spichlerzy. Tylko niewdzięcznik nie pojmie, że ci wielcy architekci szacownych myśli narodzili się dla nas i dla nas zaprojektowali sposób życia".

SENEKA

„Podstawowe zadanie w życiu polega na tym, by identyfikować i odpowiednio dzielić sprawy na zewnętrzne, nad którymi nie mamy kontroli, oraz na te związane z naszymi wyborami. Gdzie więc należy szukać dobra i zła? Nie w pozostających poza naszą kontrolą rzeczach zewnętrznych, ale w sobie, w wyborach, które do nas należą […]*”.*

EPIKTET, DIATRYBY, 2.5.4 – 5

„Natura rzeczy rozumnych dała każdemu człowiekowi moc rozumowania. Podobnie dała mu też inną moc: tak jak natura przekształca zgodnie z własnym celem wszystkie zawady i przeciwności oraz wyznacza im miejsce w ustalonym porządku rzeczy i pochłania je, tak i każda istota rozumna może zmienić wszelką przeszkodę w tworzywo dla własnych celów”.

MAREK AURELIUSZ, ROZMYŚLANIA, 8.35

Osiągnięcia w pracy naukowo-badawczej

Działalność naukowo-badawcza Profesora obejmuje szeroko pojętą elektronikę i metrologię. Znane i cenione są prace naukowe Profesora dotyczące metodologii procesu poznawczego, pomiarów pośrednich źle uwarunkowanych, tzw. problemu odwrotnego, analizy spektralnej promieniowania rozproszonego w opisie układów optycznych dyspersyjnych, metodologii łączenia danych pomiarowych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod przetwarzania, wykorzystania reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnałów w przetwarzaniu danych pomiarowych, opracowania metody momentów w analizie układów dyspersyjnych, a także badania procesu spiekania mikro- i nanocząsteczek z wykorzystaniem rozpraszania światła i tworzenia algorytmów generacji agregatów fraktalnych. Znana w środowisku naukowym seria wydawnicza pt. „*Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*”, zapoczątkowana wiele lat temu i kontynuowana do dziś jest cenionym kompendium wiedzy z zakresu najnowszych metod pomiarowych z obszaru elektroniki i fotoniki. Seria ta prezentuje osiągnięcia naukowe młodych pracowników naukowych wraz z ich mentorami. To również dzięki niej Profesor nazywany jest założycielem polskiej szkoły metrologii elektronicznej i fotonicznej. Ważnym osiągnięciem i wkładem Profesora było również wprowadzenie czasopisma *Metrology and Measurement Systems* na listę filadelfijską.

Dorobek naukowy Profesora Janusza Mroczki obejmuje **446** publikacje (**144** z listy filadelfijskiej), jest On współautorem **13** książek (**5** zagranicznych, **8** krajowych) i **8** patentów (w tym 4 wdrożonych). Dane bibliometryczne są następujące: wg. bazy *Web of*

Science: **1542** cytowania oraz h = **26**; wg. bazy *Scopus*: **1791** cytowań oraz h = **27**; wg. *Google Scholar*: **2291** cytowań oraz h = **31**. Prof. Janusz Mroczka był realizatorem (jako kierownik lub główny wykonawca) **31** grantów (w tym **7** międzynarodowych).

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

Zasługi w zakresie opieki naukowej i dydaktycznej

Dorobek Profesora Janusza Mroczki w zakresie rozwoju kadry jest imponujący i obejmuje **3** recenzje doktoratów *honoris causa*, **58** recenzji wniosków profesorskich, **56** recenzji w przewodach habilitacyjnych, **22** recenzji rozpraw doktorskich oraz **56**-krotne pełnienie funkcji Przewodniczącego Komisji Habilitacyjnej.

Profesor wypromował łącznie **26** doktorów. Wielu z nich to profesorowie, którzy pracują na innych niż ich Mentor uczelniach, np. Politechnika Opolska czy nawet University of Central Lancashire, Preston w Anglii. Wspólnym paradygmatem założonej przez Profesora szkoły metrologii elektronicznej i fotonicznej jest szerzenie szczytnej idei promującej relacje mistrz-uczeń. Ideę tę Profesor Mroczka prezentował wielokrotnie wygłaszając wykład pt. „*Mistrz i uczeń*" w różnych ośrodkach akademickich w kraju. Efektem wdrażania tej idei są również zagraniczne doktoraty prowadzone przez Pana Profesora. Wypromował on z wyróżnieniem **4** doktorów we Francji, tzw. doktoraty *cotutelle, a ostatni* otrzymał prestiżową nagrodę Marii Skłodowskiej-Curie za najlepszy doktorat w Europie. Upowszechnianie polskiej nauki za granicą realizuje również przez swoich doktorantów, wysyłając ich do licznych ośrodków zagranicznych, gdzie odbywają oni staże. Ośrodkami tymi są:

- Institut Universitaire des Systemes Thermiques Industriels, Marseille, Francja.
- Laboratoire d'Energetique des Systemes et Pocedes, Institut national des sciences appliquées de Rouen, Francja.
- Department of Biomedical Engineering, University Boston, USA; Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, Preston, Wielka Brytania.
- Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen, Niemcy.
- Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Bruksela, Belgia.

Promowanie polskiej nauki w ośrodkach zagranicznych zostało nagrodzone w 2013 r. przez Prezydenta Rzeczpospolitej Polskiej Krzyżem Oficerskim Orderu Odrodzenia Polski.

W roku 2021 Profesor Janusz Mroczka został odznaczony Krzyżem Komandorskim Orderu Odrodzenia Polski za wybitne zasługi dla rozwoju polskiej nauki, za szczególne osiągnięcia w promowaniu polskiej myśli naukowej na świecie.

Ta część recenzji, traktująca o zasługach Pana Profesora w zakresie opieki naukowej jest również dla mnie osobiście okazją do refleksji. W roku 2012 dane mi było odbyć staż naukowy w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej w ramach cyklu staży naukowych pracowników mojej Uczelni odbywanych w wiodących ośrodkach naukowych. Praca z tak dynamicznym mentorem to codzienne konsultacje naukowe pozwalające na ewaluację na bieżąco programu badawczego, to codzienne dyskusje w zespole Pana Profesora, to nieprawdopodobna motywacja, czerpanie z Jego doświadczenia, to nieocenione wsparcie i pomoc. Gdybym miał określić w kilku słowach jak ważne było wówczas dla mnie to wsparcie wyraziłbym to w sposób następujący: To wskazanie autostrady myśli naukowej, która biegła cały czas tuż obok nas, ale błądząc nie byliśmy w stanie jej zauważyć. To wskazanie drogi, gdy nie widać nawet ścieżki. Wskazanie, ale nie prowadzenie za rękę. Zachęta do samodzielnego myślenia i ciężkiej pracy, ale nie kopiowanie i bezkrytyczne naśladowanie.

Zasługi dla Akademii Górniczo-Hutniczej i środowiska naukowego

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, zamierzająca nadać tytuł doktora *honoris causa* Profesorowi Januszowi Mroczce należy do elity polskich uczelni, prowadzących działalność naukową, badawczą i dydaktyczną w zakresie szeroko rozumianych nauk technicznych, w której nauki ścisłe mają również bardzo silną reprezentację. Powołana i założona w 1913 roku jest Uczelnią publiczną o zasięgu ogólnopolskim, rozwijającą partnerską współpracę z uczelniami Europy i świata, konsekwentnie budująca silna pozycję na rynku edukacyjnym i badawczym, nie tylko w wymiarze krajowym, ale także międzynarodowym. Priorytetem Uczelni jest realizacja zadań wkomponowanych w trójkąt wiedzy: kształcenie – badania naukowe – innowacje.

Czołowe miejsce Uczelni związane jest przede wszystkim z działalnością badawczą, dydaktyczną i ekspercką wykonywaną przez liczną grupę pracowników Uczelni. Mocna pozycja Akademii znalazła także swe odbicie w szeroko rozbudowanej sieci kontaktów

międzynarodowych, w której Uczelnia pełni ważną rolę oraz jest cenionym i poważanym partnerem. Świadczą o tym wysokie miejsca w prestiżowych rankingach. O randze tej pozycji zaświadczać mogą także ludzie i instytucje, z którymi Akademia Górniczo-Hutnicza współpracuje, w tym jej doktorzy *honoris causa*. Akademia bardzo konsekwentnie podchodzi do realizacji tradycji nadawania godności doktora *honoris causa* tym osobistościom, które wniosły największy wkład do nauki lub praktyki biznesu, a jednocześnie wyróżniły się zakresem i intensywnością współpracy z tą Uczelnią. Wydaje się bowiem, że dopiero łączne spełnienie tych dwóch kryteriów wskazywania doktorów *honoris causa* daje wiarygodny merytorycznie i wizerunkowo pozytywny obraz Akademii. Z tego punktu widzenia wybór osoby Profesora Janusza Mroczki jako pretendenta do godności doktora *honoris causa* jest wyborem najlepszym z możliwych. Po pierwsze bowiem Profesor jest wybitnym, renomowanym, cenionym i powszechnie szanowanym autorytetem w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej. Po wtóre należy również podkreślić, że Pan Profesor prowadzi współpracę z Akademią Górniczo-Hutniczą od 23 lat. Najważniejszymi, znanymi mi efektami tej współpracy jest stworzenie warunków do rozwoju naukowego Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej (WEAIiIB) AGH. Było to możliwe dzięki sprawnemu przeprowadzeniu procesu opiniowania wniosków o przyznanie WEAIiIB AGH uprawnień do nadawania stopnia doktora i doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika. Profesor Janusz Mroczka aktywnie uczestniczył również w promowaniu Akademii w środowisku krajowym. Przejawiało się to przede wszystkim we wspieraniu merytorycznym pracowników naukowych WEAIiIB AGH oraz udziale w komitetach naukowych konferencji organizowanych przez WEAIiIB Akademii. Do chwili obecnej zorganizowane zostały 32 konferencje naukowe.

Inicjatywa i ogromna determinacja Profesora doprowadziły do zorganizowania w AGH Kongresu Metrologii w roku 2007. Wzięło w nim udział około 250 uczestników reprezentujących wszystkie ośrodki akademickie, a także wybrane jednostki badawcze i produkcyjne z zakresu metrologii i aparatury naukowej. W wydarzeniu uczestniczyło również kilkunastu gości z zagranicy, większość z nich wygłosiło wykłady plenarne. W program Kongresu zostały włączone obchody 50-lecia Katedry Metrologii WEAIiIB AGH, co stało się dodatkową okazją do przekazania uczestnikom poszerzonej informacji, zarówno o Akademii, Wydziale jak i Katedrze. Z tej okazji został wybity Medal 50-lecia Katedry Metrologii, którym zostały odznaczone ówczesne Władze Akademii, Władze Wydziału, pracownicy Katedry, jej byli kierownicy oraz wybitni metrolodzy z innych ośrodków.

Od kilkudziesięciu lat Profesor bierze czynny udział w rozwoju kadr. Jest obecny na wielu etapach awansu naukowego pracowników, począwszy od doktoratu, a skończywszy na uzyskaniu tytułu profesorskiego. Wieloletnia współpraca Pana Profesora z pracownikami Akademii doprowadziła do nawiązania przez nich współpracy nauko-

wej, łącząc potencjał Uczelni z University of Central Lancashire. Efektem tej współpracy była realizacja dwóch grantów naukowych pt. „*Metrology Guided Radiotherapy oraz Engineering and Computational Science for Oncology Network (ECSON)*”.

Podsumowanie

Prof. Mroczka to autorytet ukształtowany własną pracą, sposobem bycia, interakcją z różnymi ludźmi w różnych sprawach, sposobem poszukiwania prawdy oraz odwadze w jej głoszeniu, otwartością, zaufaniem do innych. Taki mistrz jest środowisku akademickiemu bardzo potrzebny. Jesteśmy bytami przygodnymi, kruchymi, słabymi i niewystarczającymi samemu sobie zarówno w aspekcie całości jak i poszczególnych wymiarach naszego funkcjonowania. Potrzebujemy oparcia, stąd pojawienie się na naszej drodze takiej osobowości jest czymś szczególnym i ze wszech miar pożądanym.

Pan Profesor w chwilach trudnych nigdy się nie poddawał. To utalentowany tytan pracy. Człowiek wyrazisty, odważny bezkompromisowy i niepokonany, broniący własnej niezależności. Swoim oponentom przeciwstawiał wiedzę, merytoryczne przygotowanie, błyskotliwe i złożone wypowiedzi, elegancję i dystyngowane zachowanie. To postać charyzmatyczna, której trudno nie zauważyć. Swoim wychowankom tłumaczył, że cyt.: „*…w nauce prawem jest etyka, a sprawy haniebne nie ulegają przedawnieniu*”. Dzięki uporowi i determinacji przecierał niedostępne szlaki naukowego labiryntu, prowadząc nimi do celu swoich wychowanków.

W swoich poczynaniach przeciwstawia się niezdrowej ambicji, zazdrości, chęci dominowania nad drugim, robienia kariery kosztem pracy drugiego. Twierdzi, że „*subtelna pycha i próżność, która w łatwy sposób gnieździ się umysłach uczonych rodzi subiektywizm, błąd i niewłaściwą ocenę rzeczywistości*.”

To co można zauważyć w twórczej aktywności prof. J. Mroczki, to głęboka filozoficzna refleksja nad sensem i istotą poznania, a w szczególności Jego metodologiczne poczynania w metrologii, którą rozwija propaguje, a przede wszystkich ukazuje jej tożsamość jako odrębnej dziedziny nauki, będącej merytoryczną nadbudową miernictwa. Znajdujemy te elementy w redagowanej przez Niego serii wydawniczej „*Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*”, a w szczególności w artykule „*The cognitive process in metrology*”*, opublikowanym w czasopiśmie *Measurement*. Znamienne są słowa, które prof. J Mroczka wypowiedział, cyt.:

* J. Mroczka, The cognitive process in metrology, *Measurement* 46(8), 2896–2907, 2013.

„...pod pojęciem nauki rozumiemy zwykle zespół twierdzeń uznawanych aktualnie powszechnie za prawdziwe, stanowiący usystematyzowaną całość i wchodzących w skład określonej dyscypliny badawczej, a w przypadku nauk przyrodniczych weryfikowalnych doświadczalnie. Jeżeli metrologia jest dyscypliną naukową, to podstawowe jej problemy powinny tworzyć taki zbiór twierdzeń. Sprecyzowanie i udowodnienie prawdziwości poszczególnych twierdzeń oraz powiązanie ich w spójny system jest jej zasadniczą treścią i zadaniem pracy nad podstawowymi problemami metrologii, a tym samym i celem publikowanych od wielu lat w tej serii prac, zatytułowanej „Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej". W tym obszernym zbiorze prac należałoby zastanowić się które przesłanki ogólne można przyjąć w rozważaniach nad statusem naukowym metrologii jako ogólnie uznawane pewniki, z których następnie można byłoby wywieść poszczególne twierdzenia o metrologii."

Prof. J. Mroczka należy do tej specyficznej wspólnoty ludzi, gdzie egzystencja człowieka żywi się wartościami, a ich sumienie nie jest skażone żadnymi ideologicznymi uwarunkowaniami. Jest w opozycji do rozprzestrzeniającego się relatywizmu obyczajowego i moralnego, dając wyraz swoim postępowaniem na rzecz ocalenia człowieka i jego własnego świata. W środowisku, w którym dane jest mu być budzi poczucie podmiotowości, wielkości i wzajemnego szacunku. Jest człowiekiem wielkich dokonań i wielkich nadziei jakie z nim wiążą inni. Swoimi poczynaniami prezentuje On to co w nauce najszlachetniejsze, najbardziej wartościowe. To odwaga, szczerość, prawość, niezależność i uczciwość.

Wniosek końcowy

Z głębokim przeświadczeniem przedstawiam wniosek o nadanie Panu Profesorowi Januszowi Mroczce, członkowi korespondentowi Polskiej Akademii Nauk tytułu doktora *honoris causa* Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Z całym przekonaniem wyrażam opinię, że prof. Janusz Mroczka zasługuje na wyróżnienie go doktoratem *honoris causa*. Tytuł ten stanowić będzie wyraz uznania dla Jego bogatego dorobku, cennego i wspierającego wizję moralności i uczciwości w nauce, będzie też aktem potwierdzającym więź, jaka łączy od lat Akademię Górniczo-Hutniczą z Jego myślą i z Nim samym. W szeregu uczelni, które uhonorowały prof. Janusza Mroczkę tym zaszczytem nie może wręcz zabraknąć Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Zaufanie, szacunek, lojalność, sprawiedliwość, wzajemność, prawość oraz solidarność to elementy wyznaczające przestrzeń moralną Prof. Janusza Mroczki. I tak jak

pisze profesor Michał Heller*: „*Są cnoty bardziej lub mniej cenione. Ale jedna cnota ceniona przez wszystkich – prawość. Każdy ceni prawego człowieka. Każdy chciałby być prawym człowiekiem. Prawym się człowiek nie rodzi. Prawość trzeba w sobie wypracować, ale dążyć do prawości może każdy. Nic tak nie chroni przed złem, jak czynienie dobra. Dobra wola jest warunkiem dobrych czynów. Czy wszystko można załatwić, gdy się ma odpowiednie protekcje (i poglądy)? Budzi w nas moralny szacunek, gdy widzimy, że ktoś jest prawy*".

To tymi słowami chciałbym zakończyć moją ocenę Profesora Janusza Mroczki, dając tym samym pełną rekomendację dla wyróżnienia Go tym akademickim zaszczytem.

Lublin, 20 maja 2021

* M. Heller, Zakład o życie wieczne, *Copernicus Center Press*, Kraków, 2016.

Recenzja dorobku naukowego, osiągnięć i zasług prof. Mroczki, kandydata do tytułu doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej

Prof. dr hab. inż. Andrzej Zając (Politechnika Białostocka)

Gdy chcemy rozwinąć sztandary,
musimy iść naprzeciw przeciwnym wiatrom

St. J. Lec

Wprowadzenie

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

Przyznawanie tego zaszczytnego tytułu rozpoczęto w XV wieku na Uniwersytecie w Oxfordzie – najstarszej uczelni w Wielkiej Brytanii, powstałej w 1176 r.* Tytułem tym wyróżnia się do dzisiaj wybitnych przedstawicieli nauki, kultury i życia publicznego, cieszących się powszechnym szacunkiem, autorytetem naukowym i nienaganną postawą moralną i etyczną. Są to osoby godne naśladowania, znane i cenione nie tylko

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

w swoim środowisku, a efekty ich działalności przynoszą trwały pożytek szerszej społeczności.

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

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

Sylwetka Kandydata

Prof. dr hab. inż. Janusz Mroczka urodził się 27.04.1952r. w Dębicy. Ukończył I Liceum Ogólnokształcące w Dębicy w 1971 r. W tym samym roku podjął studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Studia ukończył w 1976 r. broniąc prace magisterską pt.: ***Filtr adaptacyjny dolnoprzepustowy do tłumienia sygnałów zakłócających w przyrządach tablicowych.*** Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w Instytucie Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej w 1980 r., na podstawie pracy doktorskiej pt.: ***Zagadnienie pomiaru mętności wody oraz wielkości cząstek roztworów koloidalnych za pomocą światła rozproszonego.*** W 1991r. na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej uzyskał stopień doktora habilitowanego na podstawie monografii pt. ***Metrologiczne wykorzystywania światła rozproszonego do badań rozkładu wielkości cząstek w roztworach dyspersyjnych.*** Ten okres Jego aktywności

naukowej w znacznym stopniu ukształtował zainteresowania naukowe Profesora, kontynuowane do dzisiaj, pomimo naturalnego poszerzania obszaru badań naukowych w dalszych latach jego kariery naukowej.

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

Profesor Janusz Mroczka pełnił w latach 1999–2005 zaszczytną funkcję senatora Senatu Politechniki Wrocławskiej. Profesor jest Doktorem *Honoris Causa* Politechniki Lubelskiej (przyznanym w 2014 r.) i Politechniki Opolskiej (doktorat nadany w 2016 r.).

Poza rodzimą Uczelnię profesor Janusz Mroczka aktywnie uczestniczy w pracach wielu organizacji i komisji. Działania te prowadził zarówno w krajowych, jak też w uznanych organizacjach międzynarodowych. Jest także członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Pomiarowej PAN, oraz Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Na niwie zagranicznej aktywnie działa w The International Society for Optical Engineering (USA), International Technical Working Group on Penetrating Radiation (USA). Od 1994 r. był członkiem Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego KBN (18 konkursów, w tym w 6 pełnił funkcję jej Przewodniczącego). W tym właśnie czasie miałem zaszczyt poznać osobiście Kandydata, obserwując Jego sposób działania i kierowania Sekcją, co pozwoliło mi nabyć dobrych zwyczajów związanych z procedowaniem wniosków o finansowanie zgłaszanych projektów badawczych. Do dzisiaj obserwacje te uważam za istotne.

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

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

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

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

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

Profesor Janusz Mroczka, jest człowiekiem o silnej osobowości, odwadze i widocznym zacięciu humanistycznym. Jest On silnie osadzony w realiach problemów codziennych towarzyszących pracy naukowej, jak również pragmatykiem starającym się skutecznie rozwiązywać problemy i trudności przy organizowaniu badań. Cechuje go błyskotliwość umysłu, rzadko spotykana pracowitość, spostrzegawczość i skłonność

do rozważania paradoksów codzienności. Refleksyjna natura, jasność i precyzja jego toku myślenia, a także otwartość na istnienie ludzkich niedoskonałości i ograniczeń pozwoliły Mu zjednać do wspólnego działania szerokie spektrum naukowców. Profesor Mroczka jest przeciwnikiem szybkich, co za tym idzie zazwyczaj pochopnych, ocen w odniesieniu zarówno do postaw współpracowników, otoczenia zawodowego, ale również w szerszym ujęciu obserwowanych zjawisk w bliższym i dalszym otoczeniu. Obcując z Nim można ukierunkować swoje działania naukowe – niekiedy również uporządkować rozchwiane relacje osobowościowe – a nade wszystko zastanowić się nad znaczeniem przesłania realizowanego przez pracowników naukowych i dydaktycznych, które w postaci licznych cytatów uznanych autorytetów nauki, techniki i kultury Profesor przywoływał nie tylko podczas niezwykle ciekawych, emocjonalnych wykładów, ale także w kontaktach interpersonalnych, w tym bardzo często w relacji nauczyciel–uczeń. Często prezentowane bezpośrednio myśli wskazywały na ukryte treści, celem których jest ukazanie odbiorcy sposobu różnego rozumienia i interpretacji, a tym samym przeniesienie i zasugerowanie głębszego poziomu znaczenia wypowiadanych przez niego sentencji. Było to szczególnie ważne w okresach, w których Profesor borykał się z widoczną niechęcią w odniesieniu do prezentowanych przez Niego tez i poglądów.

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

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

Osiągnięcia w pracy naukowo-badawczej

Obszar zainteresowań oraz posiadana wiedza i kompetencje Profesora Janusza Mroczki związane są z takimi dziedzinami i specjalnościami jak: elektronika, optoelektronika, metrologia, fizyka, a w tym fizyka ciała stałego, matematyka, a w tym równania

całkowe, procesy stochastyczne, metody analizy sygnałów, wybrane działy bioinżynierii, filozofia nauki. Ta szeroka, interdyscyplinarna, doskonale opanowana wiedza, pozwala Mu na realizację badań o szerokim spektrum tematycznym. Profesor nie tylko sam realizuje prace w tej szerokiej tematyce, ale skutecznie tworzy zespoły badawcze, które zgrupowane wokół Jego dominującej osobowości, potrafią rozwiązywać bardzo złożone problemy naukowe i aplikacyjne. Zainteresowania naukowe Profesora Janusza Mroczki koncentrują się wokół kilku zasadniczych problemów: metodologii procesu poznawczego, algorytmizacji problemu odwrotnego, pomiarów pośrednich źle uwarunkowanych numerycznie, metodologii łączenia danych pomiarowych o różnej przestrzennej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod przetwarzania, wykorzystaniu reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnałów w przetwarzaniu danych pomiarowych, opracowaniu metody momentów w analizie układów dyspersyjnych. Aktualnie Profesor Janusz Mroczka prowadzi badania naukowe i publikuje prace w następujących obszarach: metodologia obserwacji i eksperymentu, algorytmizacja problemów odwrotnych, modelowanie pól wielkości fizycznych i ich wykorzystanie w diagnostyce obiektów, modelowanie dynamicznych obiektów technicznych i biomedycznych z uwzględnieniem modeli o parametrach skupionych i rozłożonych, analizę spektralną i polaryzacyjną promieniowania rozproszonego w układach dyspersyjnych i ich praktyczne wykorzystanie w ocenie właściwości materiałów kompozytowych, metody obrazowania optycznego i przetwarzania danych pomiarowych w trójwymiarowej przestrzeni i ich fuzja na potrzeby bezstratnego kodowania obrazów, wieloczujnikowa fuzja danych o różnej rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod ich przetwarzania na rekonstrukcję o wyższej jakości, wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowej do przetwarzania danych pomiarowych i ich praktyczną realizację za pomocą procesorów sygnałowych, metod identyfikacji parametrycznej statycznych i dynamicznych modeli złożonych obiektów wraz z ich praktycznym zastosowaniem w pomiarach właściwości układu oddechowego i krwionośnego człowieka, wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do pozyskiwania informacji ilościowych i jakościowych z danych pomiarowych, projektowanie, opracowywanie i optymalizacja komputerowych systemów pomiarowych i informacyjnych do badań naukowych oraz procesów technologicznych, projektowanie i wykonywanie inteligentnych przyrządów pomiarowych z wykorzystaniem techniki mikroprocesorowej oraz opracowywanie systemów zdalnego nadzoru medycznego współpracujących z inteligentnym domem, nadzorujących bezpieczeństwo i stan zdrowia mieszkańców.

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

Profesor Janusz Mroczka w 2000 roku założył na Politechnice Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki grupę naukową zajmującą się cyfrowym przetwarzaniem sygnałów. Do tworzonego zespołu, w którym znajdowało się już dwóch Jego wychowanków, w 2002 r. dołączył kolejny Jego uczeń wywodzący się z Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, a w roku 2006 magistrantka Profesora – absolwentka Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Prace prowadzone w zespole zaowocowały do tej pory obroną 4 doktoratów oraz uzyskaniem 2 habilitacji. Tematyka badawcza stworzonego przez prof. Janusza Mroczkę zespołu obejmuje cztery zasadnicze obszary: zastosowanie analiz czasowych, częstotliwościowych oraz czasowo-częstotliwościowych w badaniach jakości energii elektrycznej, analizę i pomiary zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych, w tym także problematykę jakości energii elektrycznej, konstrukcję wbudowanego sprzętu pomiarowego opartego o nowoczesne jednostki obliczeniowe typu procesory aplikacyjne, procesory sygnałowe, układy FPGA i mikrokontrolery, oraz zastosowanie zaawansowanych analiz cyfrowego sygnału do badania sygnałów biomedycznych. Prace koncentrują się wokół poszukiwania zaawansowanych metod analizy oraz cyfrowego przetwarzania sygnałów, które często ze względu na swoją złożoność obliczeniową, nie były powszechnie stosowane w tym obszarze naukowym.

Zespół, w ciągu kilkunastu lat swojego istnienia, podejmował wiele inicjatyw naukowo-organizacyjnych. Opublikowano wiele artykułów w czasopismach o zasięgu międzynarodowym i krajowym, m.in. IEEE Transactions on Power Delivery, Metrology and Measurement Systems, Energy Spectrum. Wyniki badań prezentowane były na prestiżowych międzynarodowych konferencjach, m.in. International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, International Conference on Harmonics and Quality of Power, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, International Scientific Conference – Electric Power Engineering. Realizowano programy stażowe w przemyśle – łącznie 8. Członkowie zespołu uczestniczą ponadto w pracach Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk oraz Komisji Elektroniki Polskiej Akademii Nauk. Obecnie w zespole rozwija się kolejne pokolenie naukowców, zgromadzone wokół tematyki zainspirowanej przez Profesora Mroczkę, poszerzając ją o zagadnienia informatyczne w systemach wbudowanych oraz problematykę automatyki trakcji kolejowej.

Podobnie inspirujące działania posiada na swoim koncie Profesor Mroczka w odniesieniu do prac realizowanych przy współpracy z Politechnika Lubelską, dotyczących problematyki czujników światłowodowych i ich aplikacji w diagnostyce obiektów i kontroli wybranych parametrów procesów technologicznych i charakteryzacja w czasie rzeczywistym wybranych parametrów obiektów technicznych. Wymiernym owocem tej współpracy jest jedna zakończona habilitacja oraz jedna procedura habilitacyjna w toku.

Profesor Janusz Mroczka jest autorem/współautorem **415** publikacji, wśród nich **115** z listy filadelfijskiej, **131** artykułów w czasopismach, **4** monografii i książek, **13** rozdziałów w monografiach i książkach, **145** referatów konferencyjnych, w tym **64** na konferencjach międzynarodowych, **8** patentów i zgłoszeń patentowych, **23** recenzji artykułów z listy filadelfijskiej, **6** recenzji monografii i książek. Liczba cytowań Jego prac, będąca wskaźnikiem odbioru w świecie prac publikowanych przez prof. J. Mroczkę, wynosi **1150** wg. bazy WoS, **1310** wg. bazy Scopus i **1785** wg. bazy Google Scholar, natomiast *indeks Hirscha* h = **22** dla WoS, h = **23** dla Scopus, h = **26** dla Google Scholar).

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

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

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

Zespół Profesora Janusza Mroczki realizuje wiele wątków naukowych we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Owocem wspólnych badań z tymi ośrodkami są wspólne publikacje oraz odbyte staże naukowe przez doktorantów i studentów. Zrealizowane w zespole Profesora J. Mroczki badania naukowe pozwalają uznać, że Profesor jest twórcą, liczącej się w kraju i za granicą, szkoły naukowej w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej.

Profesor Janusz Mroczka jawi się w tym kontekście jako nietuzinkowa postać naukowca, będąc także bardzo ciekawą i znaczącą osobowością w polskiej metrologii. Jego działania w tej dziedzinie stanowią szereg znaczących osiągnięć. Poczynając od ciągłego wskazywania istotnych aspektów metrologii i jej ukrytego piękna, które to problemy i zdobycze wskazywał przy każdej okazji, a kończąc na głębokiej reformie organizacyjnej zrealizowanej w Komitecie Metrologii i Aparatury Pomiarowej PAN. Nadal wskazuje na piękno metrologii, a swoją pracą nadal rozwija tę dziedzinę wiedzy. To On w 2008 r. zapoczątkował wydawanie cyklu książek pt. ***Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej***, który systematycznie pod jego redakcją ukazuje się

każdego roku. Ten cykl wydawniczy ukazuje najnowsze osiągnięcia polskich uczonych, stanowiąc dla wielu młodych adeptów nauki możliwość szerszego zaprezentowania swoich opracowań i przemyśleń na gruncie szerszego forum naukowego.

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

Uznanie jakim cieszy się za granicą, pozwoliło Profesorowi J. Mroczce wprowadzić czasopismo *Metrology and Measurement Systems* na listę filadelfijską – aktualny wskaźnik IF czasopisma wynosi 1,63. Taka pozycja czasopisma w obszarze nauk technicznych jest dużym sukcesem. Kierowany przez Niego Komitet Metrologii i Aparatury Pomiarowej PAN (w którym pełnił, z wyboru, funkcję Przewodniczącego przez dwie kadencje tzn. od 2007 do 2015 r.), w ocenie Prezydium PAN zajął pierwsze miejsce jako najlepszy Komitet w Polskiej Akademii Nauk.

Dorobek naukowy Profesora J. Mroczki jest bardzo bogaty, a jego aktywność w ostatnich 20 latach, obejmująca większość tego dorobku pozwala uznać, że jest to imponująca aktywność naukowa.

Osiągnięcia w zakresie opieki naukowej i dydaktycznej

W swojej działalności dydaktycznej i wychowawczej, Profesor na pierwszym miejscu stawia na rozwój naukowy młodych pracowników i traktuje to jako kluczową przesłankę rozwoju nauki. Profesor Janusz Mroczka często powtarza, że rozwój uczelni zależy przede wszystkim od ludzi. Twierdzi, że rozwój polskiej nauki rodzi się na najniższych jej szczeblach organizacyjnych. W istotny sposób rozwinął zaplecze i bazę aparaturową, a także rozwinął wiele wątków badawczych w kierowanej przez Niego Katedrze. W prowadzonej przez Niego Katedrze odbywają się stałe seminaria naukowe, na którym prezentowane są prace młodych pracowników, doktorantów i wyróżniających się studentów, którzy podczas studiów zgłaszają chęć

realizacji swoich zainteresowań naukowych w Katedrze. Młodym adeptom nauki stara się wpoić przekonanie, że czas właściwej oceny ich ewentualnych osiągnięć może być długi – bywa, że staje się dłuższy niż jedno życie i tylko ci z nich, którzy swoje działania planują w takiej skali czasowej potrafią w pełni realizować swoje plany naukowe, a równocześnie umożliwia to realizację misji związanej z kształtowaniem swoich następców. Profesor Mroczka własnym przykładem potwierdza te stwierdzenia, przekazując młodym współpracownikom i studentom swoje doświadczenie życiowe, kształtując wrażliwość aksjologiczną, kształtuje krytycyzm w działaniach badawczych, oraz stara się uformować jasność myśli i najcenniejszą dla członka społeczności akademickiej troskę o zachowanie krytycyzmu i prawa do odrębności poglądów, ale również twórczy niepokój w poszukiwaniu obiektywnej prawdy – niekiedy również poza naukowej.

W latach 1991–1996 Profesor J. Mroczka był Dyrektorem Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, gdzie założył specjalność dydaktyczną Aparatura Elektroniczna, która do chwili obecnej jest najbardziej popularną wśród studentów na kierunku Elektronika, a w przypadku pracodawców, kuźnią młodych talentów poszukiwanych na rynku pracy w całym kraju.

Profesor Janusz Mroczka, będąc zatrudniony od roku 1997 na Politechnice Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki, również w tym środowisku zapisał swoją obecność. Prowadził wykłady z zakresu cyfrowego przetwarzania sygnałów, kładąc podwaliny samodzielnej grupy naukowej, prowadzącej badania w zakresie aplikowania zaawansowanych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów w wielu obszarach techniki i technologii. Jego autorskie wykłady na kierunkach; Informatyka, Elektronika i Telekomunikacja, Automatyka i Robotyka, pozwoliły Mu ukształtować intelektualnie i dać podstawy do działań praktycznych kilku pokoleniom studentów i doktorantów oraz umożliwiły wypromowanie 41 dyplomantów. Ta wieloletnia praca Profesora z młodymi studentami i doktorantami pozwoliła na utworzenie i zbudowanie zespołu zajmującego się atrakcyjną, nowoczesną tematyką, a tym samym pozwala na współpracę z różnymi ośrodkami zagranicznymi i krajowymi na zasadach partnerskich. Owocem tak zapoczątkowanej pracy stały się doktoraty prowadzone wspólnie z naukowymi ośrodkami francuskimi. Istotnym jest, że prof. J. Mroczka był jednym z prekursorów, zapoczątkowanych w latach 90-tych ubiegłego wieku takich doktoratów. Wypromowanie przez prof. Janusza Mroczkę przy współpracy z ośrodkami francuskimi czterech doktoratów, wszystkich obronionych z wyróżnieniem, świadczy o umiejętności Kandydata w poszukiwaniu warsztatu naukowego na światowym poziomie dla młodych aplikantów do kariery akademickiej. Ostatni z tych doktoratów otrzymał nagrodę Marii Skłodowskiej Curie za najlepszy doktorat w Europie w danej dyscyplinie, w danym roku. Profesor Mroczka wypromował łącznie 24 doktorów, sprawował opiekę naukową nad 8 habilitantami.

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

Do najważniejszych osiągnięć prof. J. Mroczki w działalności dydaktycznej należy utworzenie na Wydziale Elektroniki specjalności Aparatura Elektroniczna i konsekwentna jej modernizacja przez wiele lat. W trakcie kolejnych aktualizacji i dostosowywania tematyki tej specjalności do potrzeb absolwentów, ale głównie dostosowywaniu jej tematyki do oczekiwań zmieniającego się rynku pracy, kierował się w szczególności na zapewnieniu młodym ludziom szansy dalszego rozwoju, i sprostaniu konkurencji na bardzo wymagającym rynku pracy. Pochłonięty współpracą z młodymi stara się ich, od pierwszych lat studiów, zainteresować pracą naukową, a po ich deklaracji o kontynuacji współpracy na studiach doktoranckich, konsekwentnie z nimi współpracować. Wychowany w surowej szkole etycznej pragnie tak zaszczepione wartości przekazywać swoim wychowankom. Przykładem tym jest wykład „Mistrz i uczeń", znany w wielu ośrodkach akademickich w kraju, pokazujący wizję Profesora J. Mroczki i paradygmat, jakim w procesie dydaktycznym się posługuje. Wykład ten, wygłoszony po raz pierwszy w Sali Senatu Politechniki Wrocławskiej, zdobył rozgłos w środowisku akademickim jako ten element, który mógłby odegrać istotną rolę w coraz to bardziej skomercjalizowanych uwarunkowaniach, w których dane jest młodym pokoleniom dorastać. Wykład ten był wygłoszony na zaproszenie, m.in. w: Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, w Instytucie Immunologii i Terapii Doświadczalnej PAN im. L. Hirszfelda we Wrocławiu i w szeregu innych środowiskach akademickich, w których został entuzjastycznie przyjęty nie tylko przez starsze pokolenia naukowców, ale przede wszystkim przez młodsze pokolenia. W całej swojej działalności zawodowej Profesor Janusz Mroczka wskazuje, że zawód nauczyciela akademickiego zobowiązuje do realizacji nie tylko zadań naukowych i dydaktycznych, ale także wzniosłych norm moralnych.

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

Profesor Janusz Mroczka realizuje szereg badań naukowych we współpracy z zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Owocem osobistych kontaktów Profesora i ba-

dań prowadzonych w zespołach międzynarodowych są wspólne publikacje oraz odbyte staże naukowe przez doktorantów i studentów. Współpraca ta dotyczy następujących ośrodków zagranicznych: Institut National des Sciences Appliquees, Rouen, CNRS unite 6614 DS10, Francja, Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, (Preston, Wielka Brytania), Institut Universitaire des Systemes Thermiques Industriels, (Marsylia, Francja), Department of Biomedical Engineering, Boston University, (USA), Biomedical Physics Laboratory, Universite Libre de Bruxelles, (Belgia), Auckland Bioengineering Institute, The University of Auckland, (Nowa Zelandia), Department of Electrical Engineering, Systems and Automation, Ghent University, (Belgia), Dipartmento di Ingegneria Dell' Innovazione, University of Salento, (Lecce, Włochy), oraz utrzymuje kontakty naukowe z: Centre for Modelling and Information in Medicine, City University, (Londyn, Wielka Brytania), Dipartimento de Elettronica e Informatica, University of Padowa, (Włochy), Royal Brompton National Heart and Lung Hospital, (Londyn, Wielka Brytania), Physiologie Respiratoire et Sportive, Hospital Charles Nicolle, (Rouen, Francja).

Prof. Janusz Mroczka był promotorem 24 prac doktorskich (4 we Francji, wszystkie wyróżnione, a ostatnia zrealizowana przez jego doktoranta praca doktorska otrzymała nagrodę im. M. Skłodowskiej-Curie jako najlepszy doktorat w danej dyscyplinie w Europie). Kandydat sprawował opiekę nad przygotowaniem 8 habilitacji, recenzował 3 wnioski o nadanie doktoratu *honoris causa*, 54 wniosków profesorskich (1 za granicą), 52 habilitacji, 20 doktoratów, przewodniczył 27 komisjom habilitacyjnym, wypromował ponad 200 dyplomantów.

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

Zasługi dla Wojskowej Akademii Technicznej

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

Profesor Janusz Mroczka współpracując od wielu lat z zespołami naukowymi Wojskowej Akademii Technicznej, był powoływany do realizacji licznych recenzji roz-

praw doktorskich i habilitacyjnych oraz do opiniowania wniosków o nadanie tytułu profesora pracownikom naukowym WAT. Brał udział w opiniowaniu wniosku o uzyskanie uprawnień do nadawania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika, o jakie starał się Instytut Optoelektroniki WAT.

Zachęcał środowisko naukowe WAT do aktywnego angażowania się w działalność na rzecz komitetów naukowych, czego wynikiem jest, między innymi, liczna reprezentacja tego grona w Komitecie Metrologii i Aparatury Naukowej PAN (6 osób z WAT). Poprzez wspólne projekty badawcze, konferencje i seminaria rozwinął szeroką i owocną współpracę Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej i Wojskowej Akademii Technicznej. Wspierał i nadal wspiera Wojskową Akademię Techniczną w rozwoju kadry naukowej, w podejmowaniu tematów badawczych oraz w upowszechnianiu dorobku naukowego i kreowaniu wizerunku Wojskowej Akademii Technicznej jako znaczącej uczelni technicznej. Profesor Janusz Mroczka przyczynił się w dużym stopniu do rozwoju samodzielnej kadry naukowej w Wojskowej Akademii Technicznej, a wniesiony przez Niego wkład opisują pod względem liczbowym następujące dane:

1. Recenzja wykonana w ramach oceny wniosku Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej aplikującego o uzyskanie uprawnień do nadawania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika.

2. Recenzje pięciu wniosków o tytuł profesora procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej dla jej pracowników – dr hab. inż. Krzysztof Chrzanowski (2002 r.), dr hab. inż. Ryszard Pełka (2004 r.), dr hab. inż. Waldemar Żendzian (2016), dr hab. inż. Przemysław Wachulak (2017) oraz dr hab. inż. Krzysztof Jóźwikowski (2018).

3. Recenzja wniosku o tytuł profesora procedowanego w Wojskowej Akademii Technicznej dla pracowników z zewnątrz – dr hab. inż. Tadeusz Pustelny (2006).

4. Recenzje sześciu wniosków habilitacyjnych procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej – dr inż. Krzysztof Chrzanowski (1996), dr inż. Ryszard Pełka (1997), dr inż. Michał Pawłowski (2008), dr inż. Ryszard Szplet (2013), dr inż. Jacek Świderski (2015), dr inż. Jacek Wojtas (2015).

5. Recenzje dwóch rozpraw doktorskich procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej – mgr inż. Krzysztof Kwiatos (2000), mgr inż. Anna Kurzych (2018).

6. Przewodniczący sześciu Komisji Habilitacyjnych przewodów procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej – dr inż. Piotr Martyniuk (2015), dr inż. Andrzej Bartnik (2016), dr inż. Norbert Pałka (2016), dr inż. Jacek Kwiatkowski (2016), dr inż. Marcin Kochanowicz (2017), dr inż. Małgorzata Kopytko

(2018). W tym zestawieniu pojawia się również pracownik Politechniki Białostockiej, który uzyskał stopień dr hab. – dr hab. inż. Marcin Kochanowicz.

7. Rzeczoznawca opiniujący w Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów trzy wnioski profesorskie procedowane w Wojskowej Akademii Technicznej – dr hab. inż. Henryk Madura (2015), dr hab. inż. Andrzej Dobrowolski (2016), dr hab. inż. Tadeusz Dąbrowski (2018).

Profesor Janusz Mroczka, wraz z grupą swoich wychowanków i doktorantów, aktywnie uczestniczy w organizacji konferencji naukowych organizowanych przez jednostki Wojskowej Akademii Technicznej, oraz bierze w nich aktywny udział. Są to: *Kongres Metrologii* odbywającego się w cyklu 3-letnim, konferencja *MWK – Metrologia Wspierana Komputerowo* odbywająca się w cyklu 2-letnim, sympozjum *Modelowanie i Pomiary w Medycynie* odbywające się w cyklu 2-letnim.

Wniosek końcowy

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

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

W życiu Profesora i Jego sposobie bycia, odnajdujemy – chyba już nie tak dominujący, jak w znanych przekazach o życiu w środowisku akademickim, klimat świata

nauki; wykładów będących dla braci studenckiej źródłem przemyśleń i modelem do kształtowania swojej sylwetki predestynującej do elity społecznej. Wykładów okraszonych ciekawymi dykteryjkami, niekiedy ocierających się o wybrane rozważania filozoficzne, korzystających z oczekiwanej od profesury erudycji, stwarzających podstawę do zainteresowania słuchaczy i kształtowania szkoły naukowej.

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

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

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

Białystok, 18 sierpnia 2018

Opinia w sprawie nadania prof. Mroczce tytułu doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej

Prof. dr hab. inż. Andrzej Materka (Politechnika Łódzka)

Profesor Janusz Mroczka specjalizuje się w metrologii – teorii i praktyce pomiarów pośrednich oraz metodologii procesu poznawczego. Jest założycielem i kierownikiem Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, członkiem korespondentem Polskiej Akademii Nauk. Posiada tytuł doktora *honoris causa* dwóch Politechnik – Lubelskiej i Opolskiej.

Badania naukowe

Bogaty dorobek naukowy Profesora Mroczki został opisany w ponad 400 różnorodnych publikacjach. Są wśród nich artykuły z listy Web of Science (122), monografie (8) oraz patenty (8).

Szczególny wkład do wiedzy, zaznaczony także bardzo dużą liczbą odwołań w pracach innych badaczy, wnoszą moim zdaniem artykuły: „Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements", *Metrology and Measurement Systems* (2009), „A reduced Prony's method in power-quality analysis parameter selection", *IEEE Transactions on Power Delivery* (2010), "The cognitive process in metrology", *Measurement* (2013), a także kilkadziesiąt innych prac opublikowanych w *Journal of Aerosol Science*, *Applied Optics*, *Review of Scientific Instruments, Experiments in Fluids, Computers in Biology and Medicine, Particle & Particle Systems Characterization, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Physica A – Statistical Mechanics and Its Applications, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Optical Engineering* i *Optics Letters*.

Mimo pozorów tematycznego rozproszenia, wybór profilu tych periodyków naukowych jest dobrze przemyślany. Jest on ilustracją erudycji naukowej Profesora i odwzorowaniem interdyscyplinarnego charakteru Jego badań. Choć cechuje je spójność me-

todologiczna właściwa dla metrologii, profesor Mroczka nie unika, a wręcz świadomie zabiega o ocenę znaczenia publikowanych doniesień przez specjalistów reprezentujących inne niż elektronika dyscypliny naukowe, które Go inspirowały, a także przez wymagających odbiorców Jego oryginalnych metod i technik pomiarowych – fizyków, lekarzy, energetyków.

Ważne wyniki badań Profesora Mroczki były też poddawane szerokiej dyskusji na renomowanych konferencjach naukowych, jak *IEEE International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*.

Jego oryginalne metody pozyskiwania, przetwarzania i modelowania sygnałów są podstawą konstruowania aparatury pomiarowej, wykorzystywanej w praktyce. Umiejętność łączenia badań naukowych na najwyższym światowym poziomie z praktyką inżynierską jest kolejną – ważną i wyróżniającą – cechą dorobku naukowego Profesora Mroczki.

Praca dydaktyczna i wychowawcza

Mam niewątpliwą przyjemność i zaszczyt od kilku lat blisko współpracować z Profesorem Mroczką. Okazją do tej współpracy jest wypełnianie statutowych obowiązków członków Centralnej Komisji do spraw Stopni i Tytułów, w której obaj reprezentujemy dyscyplinę naukową elektronika. Współpraca ta dostarcza wielu obserwacji i materiału do przemyśleń, niedostępnych w typowych relacjach profesorów różnych uczelni.

Oprócz rozległej wiedzy, obejmującej m.in. fizykę ciała stałego, optykę i fotonikę, liczne działy matematyki, filozofię oraz praktykę inżynierską, Profesor posiada wiele szczególnych przymiotów charakteru i jest wierny zapominanym zbyt często zasadom, które odważnie wygłasza i wytrwale wdraża w życie akademickie. Przypomina, że podstawą rozwoju nauki – a więc uczelni wyższych i innych instytucji powołanych do jej uprawiania – są zdolni i uczciwi ludzie zajmujący się poszukiwaniem prawdy poprzez rzetelnie prowadzone badania naukowe. Podkreśla dalej, że ludzie Ci potrzebują wskazówek i przykładów, pokazujących im jak działać – potrzebują Mistrza. Ma świadomość, że powszechna pogoń za dobrami materialnymi, łatwość medialnego kształtowania fałszywego wizerunku i konieczność zaspokajania potrzeb codziennego życia młodych adeptów nauki nie czynią zawodu badacza atrakcyjnym w ich oczach. Sięga zatem do wszystkich możliwych sposobów wyszukiwania ludzi uzdolnionych, uświadamiania im ich własnych talentów i motywowania do dalszego rozwoju na

rzecz wzbogacania wiedzy. Wykazuje w realizacji tej misji nieprzeciętne osobiste zaangażowanie.

Ma ogromną, historyczną i bieżącą wiedzę na temat działalności naukowej i zawodowej kilkuset badaczy uprawiających dyscyplinę elektronika i związane z elektroniką obszary teorii i praktyki. Łatwo nawiązuje i rozwija nowe kontakty, jest przyjazny, otwarty i uważny. Pisze wnikliwe, a jednocześnie błyskotliwe recenzje dysertacji naukowych i dorobku uczonych. Umie przedstawić krytykę w sposób prawdziwie życzliwy. Z dużą intuicją wyczuwa potencjał autora ocenianych dzieł i podsuwa nowe kierunki twórczych poszukiwań. Nakreśla perspektywę sukcesu i zachęca do szukania własnej drogi zawodowej, której przeciwstawia opcję powielania drogi mistrza. Jest w wypełnianiu tego dzieła wybitny.

Kandydat utworzył i umocnił dwa liczące się w międzynarodowej społeczności zespoły naukowe – na Politechnice Wrocławskiej i Opolskiej. Był promotorem 24 obronionych prac doktorskich; kilkanaście z nich wyróżniono, także nagrodami JM Rektora Politechniki Wrocławskiej. Cztery z tych dysertacji to doktoraty międzynarodowe – przygotowane pod opieką dwóch promotorów, z Polski i Francji.

Jego siedmiu byłych doktorantów posiada stopień doktora habilitowanego. Są oni laureatami konkursów i nagród prestiżowych instytucji, jak Fundacja na rzecz Nauki Polskiej i Polska Akademia Nauk. Niektórzy wypromowali już własnych doktorów. Ma wyraźny wkład w kształcenie samodzielnych pracowników nauki w innych uczelniach, jak Politechnika Lubelska, Wojskowa Akademia Techniczna i Politechnika Gdańska.

Miałem okazję współpracować z wychowankami Profesora Mroczki. Są to dojrzali badacze, odpowiedzialni, ambitni i rzetelni profesjonaliści. Ich dysertacje są efektem wzorcowej współpracy i głębokiego porozumienia z opiekunem naukowym, który potrafi rozwijać indywidualne zdolności swoich podopiecznych i wzmacniać ich zamiłowanie do pracy naukowej. Z całą pewnością wiernie służą rozwojowi wiedzy i nie „grzeją się leniwie w cieple sławy" ich mentora.

Profesor Janusz Mroczka ma również poważne osiągnięcia dydaktyczne. Jego zaawansowane pojęciowo ale przystępnie podane wykłady przyciągają licznych słuchaczy – studentów i pracowników różnych uczelni oraz instytutów naukowych, przez które jest zapraszany. Jako charyzmatyczny mówca jest niedościgłym wzorem do naśladowania. Trafną ilustracją tej cechy Profesora jest zmontowany przez Jego studentów z użyciem programu *Photoshop* żartobliwy obraz rzymskiego oratora w todze, z uśmiechniętą twarzą Profesora Mroczki – uważnie i bystro obserwującego spektatorów.

Tak prof. Mroczka postrzegany jest przez swoich studentów (fot. archiwum prof. Mroczki)

Działalność organizacyjna

Profesor Mroczka odbył roczny staż naukowy w *Institut National des Sciences Apliques* w Ruen oraz kilkanaście kilkutygodniowych wizyt w renomowanych instytucjach naukowych Francji, Japonii, Kanady, Wielkiej Brytanii, Niemiec i Holandii. Jego rozległe kontakty naukowe owocują projektami i stażami naukowymi doktorantów oraz studentów w ośrodkach badawczych na całym świecie, m.in. we Francji, Wielkiej Brytanii, USA, Belgii, Włoszech i Nowej Zelandii. Rezultatem tej współpracy są publikacje w uznanych periodykach naukowych, a także wyróżniane w Polsce i za granicą projekty doktorskie z dwoma promotorami.

Wysokie uznanie międzynarodowego środowiska metrologów dla osiągnięć naukowych Kandydata pomogło Mu wprowadzić kwartalnik *Metrology and Measurement Systems* na listę czasopism indeksowanych w bazie Web of Science, na której to rodzime pismo zajmuje obecnie wysoką pozycję, ze współczynnikiem wpływu 1,6.

Od 2008 roku Kandydat corocznie wydaje jeden tom utworzonego przez siebie cyklu monograficznego *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*. Każda z tych książek zawiera kilka obszernych rozdziałów prezentujących wyniki najlepszych prac doktorskich i habilitacyjnych, wybranych w kraju przez redaktora tej serii – Profesora Mroczkę. To unikatowe i popularne dzieło promuje przykłady wysokie-

go poziomu oraz właściwego dokumentowania badań naukowych i jest bardzo pomocne w doskonaleniu procesu kształcenia młodych pracowników nauki, nie tylko w Polsce.

Profesor Mroczka i pracownicy kierowanych przez niego zespołów są współorganizatorami cyklicznych imprez integrujących i stymulujących aktywność środowiska metrologów – *Kongresu Metrologii* (w cyklu trzyletnim) oraz konferencji *Metrologia Wspierana Komputerowo* (co 2 lata) i sympozjum *Modelowanie i Pomiary w Medycynie* (co 2 lata).

Kandydat kierował 24 projektami badawczymi finansowanymi w drodze konkursów krajowych i międzynarodowych. W 2005 roku otrzymał subsydium profesorskie Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Recenzował liczne artykuły zgłaszane w redakcjach renomowanych czasopism naukowych. Był recenzentem dorobku trzech kandydatów do tytułu doktora honoris causa, 54 wniosków o nadanie tytułu profesora, 52 wniosków o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz 20 dysertacji doktorskich. Przewodniczył 27 komisjom habilitacyjnym.

Profesor Mroczka, ze swoją osobowością, talentem, wiedzą, pracowitością i zaangażowaniem jest wybitną postacią na polskiej scenie naukowej. Cieszy się zasłużonym uznaniem i zaufaniem pracowników nauki. Przez dwie kadencje pełnił funkcję przewodniczącego Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk. Od 2010 roku jest członkiem korespondentem Akademii. Od roku 2013 jest z wyboru środowiska profesorów-elektroników członkiem Centralnej Komisji do spraw Stopni i Tytułów.

Za swoją wyróżniającą się aktywność i wybitne osiągnięcia został wielokrotnie odznaczony i wyróżniony, między innymi Krzyżami Kawalerskim i Oficerskim Orderu Odrodzenia Polski, Krzyżami Zasługi: Złotym, Srebrnym i Brązowym, Medalem Komisji Edukacji Narodowej, Nagrodą Prezesa PAN za stworzenie szkoły naukowej, Nagrodą *Professor Opoliensis* oraz 30 Nagrodami JM Rektora Politechniki Wrocławskiej.

Podsumowanie

Profesor Janusz Mroczka jest twórcą uznanej w Polsce i za jej granicami szkoły naukowej w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej. Jest wybitnym Profesorem i Mistrzem, którego skutecznie wypełniana misja polega na wyszukiwaniu i szlifowaniu „diamentów” środowiska akademickiego w całym kraju. Współdziałanie z nim to dla wielu z nas ekscytująca intelektualna przygoda na drodze rozwijania dyscyplin na-

ukowych i doskonalenia sposobów zdobywania nowej wiedzy. Wniósł znaczny i znaczący wkład w rozwój nauki oraz w organizację działalności badawczej i dydaktyczno-wychowawczej. Wytycza, promuje i wdraża wysokie standardy moralne, których zachowanie jest kluczowe dla niezakłóconego poszukiwania prawdy. Ma uczniów i przyjaciół w wielu ośrodkach akademickich i naukowych, jest niewątpliwym przyjacielem Politechniki Gdańskiej. Z przekonaniem popieram wniosek o nadanie Profesorowi Januszowi Mroczce zaszczytnego tytułu doktora *honoris causa* tej znanej z wysokich wymagań Uczelni.

Łódź, 1 września 2018

Opinia o dorobku naukowym, osiągnięciach i zasługach prof. Mroczki, członka korespondenta PAN, kandydata do tytułu i godności doktora honoris causa Wojskowej Akademii Technicznej

Prof. dr hab. inż. Adam Bieńkowski (Politechnika Warszawska)

Wprowadzenie

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

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

Wnioskodawcą przyznania Profesorowi Januszowi Mroczce godności doktora *Honoris Causa* był Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, oraz Instytut Optoelektroniki tej uczelni. Wkład wniesiony przez Profesora w ramach współpracy naukowej, w tym w rozwój kadry naukowej, tej Uczelni, w pełni uzasadniają uhonorowanie Go tytułem doktora *Honoris Causa.* Jest dla mnie wyróżnieniem, że mogę być w tym postępowaniu opiniodawcą, wniosku Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, o nadanie profesorowi Januszowi Mroczce tytułu doktora *Honoris Causa* tej Uczelni.

Sylwetka Kandydata

Prof. dr hab. inż. Janusz Mroczka urodził się 27 kwietnia 1952 r. w Dębicy. Studia wyższe ukończył w roku 1976 na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, uzyskując tytuł zawodowy magistra inżyniera elektronika. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 1980 r., a stopień doktora habilitowanego w roku 1991 na podstawie monografii pt. *„Metrologiczne wykorzystywania światła rozproszonego do badań rozkładu wielkości cząstek w roztworach dyspersyjnych”*. Już po pięciu latach, w roku 1996 otrzymał tytuł naukowy profesora nauk technicznych, a w 1999 r. stanowisko profesora zwyczajnego Politechniki Wrocławskiej. W roku 1991 zostaje wybrany na dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej i pełni tę funkcję do roku 1996. W roku 1998, z inicjatywy prof. J. Mroczki, powstaje na Wydziale Elektroniki, Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej którą kieruje do dnia dzisiejszego.

Syntetyczny wykaz najważniejszych zaszczytów, pełnionych funkcji i wyróżnień będących udziałem Profesora obejmuje; doktor *Honoris Causa* Politechnik Lubelskiej 2014 r. i Opolskiej 2016 r, Członek Korespondent PAN, z wyboru, (od 2010 r.), Członek Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych, (od 2013 r.), Wiceprzewodniczący (w latach 2001–2007), a (w latach 2007–2015, dwie kadencje), Przewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN.

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

Profesor Janusz Mroczka, za działalność naukowo-badawczą i dydaktyczną otrzymał wiele wyróżnień i prestiżowych nagród, między innymi ponad 30 Nagród JM Rektora Politechniki Wrocławskiej. Otrzymał również Nagrodę Indywidualną II stopnia MEN (1989 r.), Nagrodę Wydziału IV PAN (1993 r.). Wyróżniony był Nagrodą Professor Opollensis (2014 r.), Nagrodą Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia w opiece naukowej i dydaktycznej (2014 r.) oraz Nagrodą Prezesa PAN za stworzenie szkoły naukowej w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej wraz z cykliczną serią wydawniczą „Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej” (od 2008 r.) oraz czasopismem specjalistycznym indeksowanym w JCR „Metrology and Measurement Systems” (2015 r.). Otrzymał również Nagrodę Naukową im. prof. Mariana Suskiego, Złotą Odznakę Politechniki Wrocławskiej z Brylantem, Medal im. prof. Kazimierza Idaszewskiego oraz Medal im. Prof. Włodzimierza Krukowskiego.

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

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

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

Osiągnięcia w pracy naukowo-badawczej

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

Zainteresowania naukowe Profesora Janusza Mroczki to: metodologia procesu poznawczego, algorytmizacja problemu odwrotnego, pomiary pośrednie źle uwarunkowane numerycznie, metodologia łączenia danych pomiarowych o różnej przestrzennej

rozdzielczości z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod przetwarzania, wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnałów w przetwarzaniu danych pomiarowych, opracowanie metody momentów w analizie układów dyspersyjnych.

Aktualnie Profesor J. Mroczka prowadzi badania naukowe w pięciu zasadniczych obszarach:

1. Uwarunkowania metrologiczne modeli fraktalnych fazy rozproszonej w analizie właściwości cząstek układów dyspersyjnych z wykorzystaniem światła rozproszonego.

2. Analiza właściwości włókien światłowodowych z wykorzystaniem światła rozproszonego.

3. Estymacja parametrów sygnału wieloczęstotliwościowego w zastosowaniu do sygnału sieci energetycznej w systemach energii odnawialnej.

4. Analiza niejednorodności płuc w warunkach sztucznej wentylacji pacjenta.

5. Maksymalizacja mocy pozyskiwanej z paneli fotowoltaicznych w systemach autonomicznych.

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

Profesor Janusz Mroczka w 2000 roku, z dwoma wychowankami, którzy zatrudnili się na Politechnice Opolskiej, a wcześniej studiowali na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, założył na Politechnice Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki, grupę naukową zajmującą się cyfrowym przetwarzaniem sygnałów. Do Zespołu w 2002 r. dołączył kolejny wychowanek Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, a w roku 2006 magistrantka Profesora – absolwentka Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Prace prowadzone w zespole zaowocowały obroną 4 doktoratów oraz 2 habilitacji. Tematyka badawcza stworzonego przez prof. Janusza Mroczkę zespołu obejmuje cztery zasadnicze obszary:

– zastosowanie analiz czasowych, częstotliwościowych oraz czasowo-częstotliwościowych w badaniach jakości energii elektrycznej oraz zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych,

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

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

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

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

Istotnym czynnikiem prac prowadzonych w Zespole była współpraca z partnerami z przemysłu. Obejmowała ona prace w zakresie konstrukcji sprzętu elektronicznego, implementacji algorytmów przetwarzania sygnałów w branży elektroenergetycznej oraz medycznej. Współpraca zaowocowała wykonaniem 8 ekspertyz dla przemysłu oraz opracowaniem 30 zgłoszeń patentowych. Realizowano programy stażowe w przemyśle – łącznie 8. Członkowie zespołu uczestniczą ponadto w pracach Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk oraz Komitetu Elektroniki i Telekomunikacji Polskiej Akademii Nauk.

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

Prof. Janusz Mroczka jest autorem/współautorem **415** publikacji, wśród nich **115** z listy filadelfijskiej, **131** artykułów w czasopismach, **4** monografii i książek, **13** roz-

działów w monografiach i książkach, **145** referatów konferencyjnych, w tym **64** na konferencjach międzynarodowych, **8** patentów i zgłoszeń patentowych, **23** recenzji artykułów z listy filadelfijskiej, **6** recenzji monografii i książek. Liczba cytowań Jego prac, będąca wskaźnikiem odbioru w świecie prac publikowanych przez prof. J. Mroczkę, wynosi **1150** wg. bazy WoS, **1310** wg. bazy Scopus i **1785** wg. bazy Google Scholar, natomiast *indeks Hirscha h* = **22** dla WoS, *h* = **23** dla Scopus, *h* = **26** dla Google Scholar).

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

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

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

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

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

To On w 2008 r. zapoczątkował wydawanie cyklu książek pt. ***Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej***, który systematycznie pod jego redakcją ukazuje się każdego roku. Ten cykl wydawniczy ukazuje najnowsze osiągnięcia polskich uczonych.

Cykl ten będący zbiorem obszernych, pięćdziesięcio i więcej stronicowych opracowań naukowych, których autorami są znane autorytety w tej dziedzinie w Polsce, cieszy się dużym uznaniem zagranicą. Tak przyjęta forma pozwala ukazać i propa-

gować w szerokim gremium naukowym najlepsze prace na stopień doktora i doktora habilitowanego, dając tym samym wykładnię poziomu i sposobu prowadzenia badań naukowych. Ta seria ukazała się dotychczas w 8 tomach i stanowi bestseller w środowisku naukowym, w którym doskonali się sposób kształcenia młodych ludzi.

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

Dorobek naukowy prof. J. Mroczki jest bardzo bogaty, a jego aktywność w ostatnich 20 latach, obejmująca większość tego dorobku, pozwala uznać, że jest to imponująca aktywność naukowa.

Zasługi w zakresie opieki naukowej i dydaktycznej

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

W latach 1991-1996 Profesor J. Mroczka był Dyrektorem Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, gdzie założył specjalność dydaktyczną Aparatura Elektroniczna, która do chwili obecnej jest najbardziej popularną wśród studentów na kierunku Elektronika, a w przypadku pracodawców, kuźnią młodych talentów poszukiwanych na rynku pracy w całym kraju.

Profesor Janusz Mroczka, będąc zatrudniony od roku 1997 na Politechnice Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki, w początkowym okresie swojej działalności

dydaktycznej prowadził wykłady dydaktyczne z zakresu cyfrowego przetwarzania sygnałów, kładąc podwaliny samodzielnej grupy naukowej o tematyce badawczej w zakresie zastosowania zaawansowanych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów. W następnych latach prowadził autorskie wykłady dla studentów na kierunkach; Informatyka (*Komputerowa analiza sygnałów i systemów)*, Elektronika i Telekomunikacja (*Systemy mikroprocesorowe i komputerowe*, *Elektroniczne systemy pomiarowe*, *Podstawy i algorytmy przetwarzania sygnałów),* Automatyka i Robotyka (*Przetwarzanie sygnałów*, *Przetworniki i układy pomiarowe*, *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*), oraz wypromował 41 dyplomantów.

Ta systematyczna wieloletnia praca Profesora z młodymi ludźmi pozwoliła na zbudowanie zespołu badawczego z nowoczesną tematyką, a tym samym umożliwiła młodym uczonym współpracę z różnymi ośrodkami zagranicznymi i krajowymi na zasadach partnerskich. Owocem tak zapoczątkowanej pracy stały się doktoraty *co-tutelle* prowadzone wspólnie z ośrodkami francuskimi. Istotnym jest, że prof. J. Mroczka był jednym z prekursorów, zapoczątkowanych w latach 90-tych ubiegłego wieku doktoratów *co-tutelle*. Wypromowanie, w tej formule, przez prof. J. Mroczkę 4 – doktorów, wszystkich z wyróżnieniem, (ostatni z nich otrzymał nagrodę Marii Skłodowskiej Curie za najlepszy doktorat w Europie w danej dyscyplinie i w danym roku) świadczy o umiejętności w poszukiwaniu warsztatu naukowego dla młodych, na światowym poziomie, a w szczególności o konsekwentnej pracy u podstaw z młodymi ludźmi, których przygotowywał do tego typu doktoratów już od pierwszych lat.

W swojej działalności dydaktycznej i wychowawczej, Profesor na pierwszym miejscu stawia 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 subsydium profesorskim „Mistrz". Profesor wypromował łącznie 24 doktorów (w tym 4 doktoraty *co-tutelle* we Francji), sprawował opiekę naukową nad 8 habilitantami.

W swojej aktywności zawodowej daje wyraz przeświadczeniu, że zawód nauczyciela akademickiego zobowiązuje ich do realizacji wzniosłych norm moralnych. Swoją pracę traktuje jako misję, którą spełnia wobec niezależności polskiej kultury. Dbałością o te ideały i stanowczością głoszonych tez, obowiązkowością, systematycznością, gorliwością kształtuje osobowości tych, z którymi współpracuje.

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

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

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

Zapytany w jednym z wywiadów na czym polega relacja mistrz – uczeń Profesor Janusz Mroczka powiedział:

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

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

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

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

Starszy nie powinien myśleć tylko o swoich sukcesach, ale powinien zauważyć, że jeśli podzieli się z młodszym, to łatwej będzie mu przejść ten trudny, a czekający go

nieuchronnie okres, kiedy nie będzie już miał tyle sił i twórczego zapału. Dzięki młodym będzie mógł być wciąż aktywny i cieszyć się z ich sukcesów, wiedząc, że to on dał tym sukcesom początek.

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

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

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

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

Zasługi dla Wojskowej Akademii Technicznej i środowiska naukowego

Profesor Janusz Mroczka rozpoczął swoją współpracę z Wydziałem Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 1996 roku. Zasługi Profesora Janusza Mroczki na rzecz Wojskowej Akademii Technicznej koncentrują się zarówno w obszarze rozwoju kadry naukowej jak również w obszarze badań naukowych.

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

Zachęcał środowisko naukowe WAT do aktywnego angażowania się w działalność na rzecz komitetów naukowych, czego wynikiem jest, między innymi, liczna reprezentacja tego grona w Komitecie Metrologii i Aparatury Naukowej PAN (6 osób z WAT). Poprzez wspólne projekty badawcze, konferencje i seminaria rozwinął szeroką i owocną współpracę Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej i Wojskowej Akademii Technicznej. Wspierał i nadal wspiera Wojskową Akademię Techniczną w rozwoju kadry naukowej, w podejmowaniu tematów badawczych oraz w upowszechnianiu dorobku naukowego i kreowaniu wizerunku WAT jako znaczącej uczelni technicznej.

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

1. Recenzja dotycząca uprawnień do nadawania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika Instytutowi Optoelektroniki WAT

2. Recenzje wniosków profesorskich procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej:

   – Dr hab. inż. Krzysztof Chrzanowski (2002),

   – Dr hab. inż. Ryszard Pełka (2004),

   – Dr hab. inż. Tadeusz Pustelny (2006),

   – Dr hab. inż. Waldemar Żendzian (2016),

   – Dr hab. inż. Przemysław Wachulak (2017),

   – Dr hab. inż. Krzysztof Józwikowski (2018).

3. Recenzje wniosków habilitacyjnych procedowanych w Wojskowej Akademii Technicznej:

   – Dr inż. Krzysztof Chrzanowski (1996),

   – Dr inż. Ryszard Pełka (1997),

   – Dr inż. Michał Pawłowski (2008),

   – Dr inż. Ryszard Szplet (2013),

   – Dr inż. Jacek Świderski (2015),

   – Dr inż. Jacek Wojtas (2015).

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

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

- Institut National des Sciences Appliquees, Rouen, CNRS unite 6614 DS10, Francja,
- Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, Preston, Wielka Brytania,

- Institut Universitaire des Systemes Thermiques Industriels, Marsylia, UMR CNRS 6595, Francja,
- Department of Biomedical Engineering, Boston University, Boston, USA,
- Biomedical Physics Laboratory, Universite Libre de Bruxelles, Bruksela, Belgia,
- Auckland Bioengineering Institute, The University of Auckland, Auckland, Nowa Zelandia,
- Department of Electrical Engineering, Systems and Automation, Ghent University, Belgia,
- Dipartmento di Ingegneria Dell' Innovazione, University of Salento, Lecce, Włochy,

oraz utrzymuje kontakty naukowe z:

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

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

Profesor Janusz Mroczka od roku 2013 pełni z wyboru funkcję Członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych, a od roku 1996, w którym otrzymał tytuł naukowy profesora, był często powoływany na superrecenzenta Centralnej Komisji. Zapytany o to czym jest dla Niego Centralna Komisja odpowiedział słowami: „*...to miejsce szczególne, gdzie zrozumiałem na czym polega krytycyzm chroniący nas od ślepego ulegania autorytetowi; jasność i ścisłość w naukowej argumentacji; bezwzględne dążenie do prawdy na różnych polach ludzkich dociekań*". Pytany z kolei dlaczego tyle czasu i serca wkłada przy opracowaniu tak misternych opinii odpowiedział: „*...dobra recenzja jest dziełem sztuki niczym Szekspirowski dramat*" a gdy pyta-

no dalej: skąd tu Szekspir, w odpowiedzi przytoczył słowa Jakuba w idyllicznej komedii „Jak wam się podoba": „*Świat jest teatrem, aktorami ludzie*" W odniesieniu do roli recenzenta na pytanie kim jest recenzent odpowiedz brzmiała „*…to osoba mająca przywilej, że może być jednocześnie widzem ludzkiego dramatu, zaufanym Kandydata i współautorem, ponieważ towarzyszy Kandydatowi przez cały czas trwania procesu postępowania kwalifikacyjnego, pomagając Mu zmierzyć się z „piątym aktem jego tragedii, epilogiem jego powieści, rozwiązaniem akcji jego scenariusza"*. Myślę że przytoczone tu wypowiedzi mimo ukrytej, charakterystycznej dla Niego symboliki, jednoznacznie określają jego rolę, zrozumienie i pozycję jako opiniującego wnioski awansowe.

Wniosek końcowy

Profesor Janusz Mroczka to uczony wielkiego formatu, obdarzony niewątpliwym talentem i zdolnościami, wybitny autorytet i specjalista w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej. W pracy naukowo-badawczej potrafi z wytrwałością i konsekwencją dążyć do postanowionego celu, a napotykane trudności i przeciwności nie zniechęcają Go, a wręcz mobilizują do zwiększonego wysiłku.

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

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

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

W życiu Profesora i Jego sposobie bycia, odnajdujemy cały klimat polskiego świata nauki; emocjonalnych wykładów okraszonych ciekawymi dykteryjkami, trud-

nych filozoficznych rozważań, niespotykanej erudycji. Dane mi było poznać Profesora bliżej, dzięki licznym spotkaniom w komisjach postępowań habilitacyjnych i wspólnym dyskusjom. W dyskusjach tych zauważalna jest olbrzymia moc Jego analitycznego myślenia, łatwość rezygnacji z zewnętrznych uwarunkowań, czynienia możliwego z niemożliwego, ale i też zauważalna zamierzona zagadkowość.

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

Profesor znany jest też z kwitowania rzeczywistości cytatami klasyków. Swoim wychowankom pisze dedykacje opatrzone myślami filozofów czy pisarzy. W większości wszelkie przedmowy zaczyna cytatami. Jest człowiekiem wrażliwym, refleksyjnym, solidnym, wiernym o niespotykanej aktywności intelektualnej. Znany jest z tego że potrafił zrezygnować z zaszczytów, na rzecz dobra wspólnego.

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

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

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

Warszawa, 26 sierpnia 2018

Podziękowanie prof. Mroczki wygłoszone podczas uroczystości nadania mu tytułu doktora honoris causa Akademii Górniczo-Hutniczej

Z pełną wdzięczności radością pragnę podziękować za otrzymaną godność, która jest dla mnie wielkim darem wspólnoty akademickiej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Magnificencjo, Panie Rektorze, na Pańskie ręce składam podziękowania dla całej wspólnoty; Wysokiemu Senatowi Akademii Górniczo-Hutniczej dziękuje za przychylność dla procedury przewodu i uchwałę nadającą mi tytuł doktora honoris causa. Dziękuję Panu Profesorowi Januszowi Gajdzie za podjęcie się roli Promotora w honorowym przewodzie. Panom Profesorom: Piotrowi Kisale z Politechniki Lubelskiej i Przemysławowi Wachulakowi z Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie – za wsparcie swoimi przychylnymi recenzjami. Panu Dziekanowi Profesorowi Ryszardowi Sroce i Radzie Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH – za zainicjowanie nadania mi tej godności.

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

cą 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 spełniali na rzecz 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.

Dziękuję za życzliwość społeczności akademickiej Akademii Górniczo-Hutniczej, która nadając mi ten tytuł, przyjęła mnie do swojej wspólnoty i grona swoich doktorów honoris causa. Jestem niezwykle wdzięczny za to wyróżnienie. Przy okazji odwiedzin na AGH dane mi było zaobserwować ofensywną, odważną i zorientowaną na przyszłość i młodość strategię Waszej uczelni. Moje słowa podziękowania wiążę ze zobowiązaniem służenia Waszej i teraz już mojej Alma Mater w jej rozkwicie i aspiracjach. Składam moje głębokie homagium wobec Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Dziękuje za laudację i recenzje, w których oprócz oceny mojego dorobku naukowego i zasług na rzecz Akademii Górniczo-Hutniczej podjęto próbę opisu mojej osobowości, ukazania szerszemu gronu mojego procesu wyrastania ponad siebie jako odruchu etycznego i empatycznego. To wzruszające, bo dokonują tego ci, którym ja przed laty pomagałem i doradzałem – mógłbym powiedzieć: moi wychowankowie. Dokonują tego w czasie kryzysu, w którym próbujemy się odnaleźć i któremu pragniemy się przeciwstawić, aby nie sprowadzić świata do statusu przedmiotu, który można rozdrapywać, dzielić, konsumować i niszczyć, jedynie zaspokajając swoje potrzeby. Nie pozwólmy światu umrzeć! Zastanówmy się, czy nie pogubiliśmy się w jego rozumieniu.

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

Pragnę gorąco podziękować tym wszystkim, którzy tak wspaniale i rzetelnie przygotowali tę uroczystość.

Moją osobowość ukształtowały różne interakcje z różnymi ludźmi, od wielu z nich czerpałem wiedzę, od innych doświadczenie życiowe, od innych poczucie humoru

i zwyczaj dystansowania się od siebie. Nie sposób wymienić tego wszystkiego, co obcowanie z drugim człowiekiem daje każdemu z nas. Dzisiaj mogę powiedzieć, że to ci ludzie są anonimowymi współautorami mojego sukcesu.

Bądźcie Państwo 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 wyróżnienie dopełnia moje życie naukowe, jednocześnie w dyskretny sposób ukazując moje w nim przemijanie, nagrody bowiem otrzymuje się po. W dotychczasowym życiu przeszedłem wiele dróg i jak zauważyliście, byłem na nich czasami sam, a czasami z Wami, ale zawsze przemierzałem je po swojemu. To nadzieja i wiara w ludzką sprawczość pozwalały mi żyć i pomagać drugim w odkrywaniu prawdy, którą skrywa przed nami natura.

Czuję się człowiekiem szczęśliwym i naukowo spełnionym, bo to, co mnie spotkało, przeżywam w gronie moich przyjaciół i osób mi bliskich. Jestem przepełniony życzliwością i wdzięcznością wobec ludzi, których tu spotkałem, którym pomagałem i doradzałem i z którymi dane mi było współpracować. Wasza przychylność i hojność dopełniają moje szczęście.

Janusz Mroczka

Wpis prof. Mroczki w księdze pamiątkowej Wojskowej Akademii Technicznej z okazji uroczystości nadania mu tytułu doktora honoris causa

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

Magnificencjo, Panie Rektorze – Komendancie, na Pańskie ręce składam podziękowania dla całej Wspólnoty; Wysokiemu Senatowi Wojskowej Akademii Technicznej dziękuję za przychylność dla procedury przewodu i uchwałę nadającą mi tytuł doktora honoris causa.

W tak uroczystych chwilach, gdzie wzruszenie staje się trudne do opanowania, zagubione w pamięci fakty nabierają nowego znaczenia i tłumaczą obecną rzeczywistość w zupełnie nowy sposób. Zauważamy, że przeszłość i teraźniejszość to tajemnicze kontinuum, a dzisiejsze zdarzenia to tylko echo i następstwo dawnych zdarzeń. Dzisiaj mogę powiedzieć, że tak było z moją znajomością z licznymi osobami społeczności akademickiej WAT, z którymi moje drogi życiowe losowo przecinały się wielokrotnie. Szczodrość losu sprawiła, że byli to ludzie, którym pomagałem, doradzałem, i z którymi współpracowałem. To oni są anonimowymi wnioskodawcami tej nominacji, niestety nie wszyscy z nich są już wśród nas. To ich uczniowie konsekwentnie zrealizowali ich dzieło, a ja z wdzięcznością odbieram ten akademicki zaszczyt. Tę prawdę jestem Wam winien i zapisuję to w tej księdze dochowując wierności rzymskiej zasadzie *verba volant scripto manent*. Pragnę w tym miejscu zadeklarować, że moje dalsze działania będą podążały wspólnie wytyczoną drogą rozkwitu i naszych wspólnych aspiracji, *a quo magis veritas propagetur et lux eius, qua salus humani genesis continetur clarin effulgeat*[*]!

Janusz Mroczka, Warszawa, 6 marca 2019

* (łac.) przez co w wyższym stopniu krzewi się prawda i jej światło, a tam gdzie dołącza dobro rodu ludzkiego jaśniej rozbłyska.

Verba volant scripto manent – profesor Mroczka dokonuje wpisu w księdze pamiątkowej podczas uroczystości nadania mu godności doktora *honoris causa* Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie (2019). Od lewej za prof. Mroczką: prof. Romuald Szeremietiew (Akademia Obrony Narodowej), Łukasz Jerzy Kudlicki (Szef Gabinetu Politycznego Ministra Obrony Narodowej), Ewa Mroczka, małżonka prof. Mroczki, gen. bryg. prof. Tadeusz Szczurek (Rektor-Komendant WAT) (fot. Sebastian Jurek, WAT)

Referaty Prof. Mroczki
w biuletynie
Instytutu Metrologii Elektrycznej
Politechniki Wrocławskiej

Politechnika nie jest samotną wyspą

Referat Dyrektora Instytutu dra hab. Janusza Mroczki na otwarcie roku akademickiego 1991/1992 i kadencji nowo wybranych władz w Instytucie Metrologii Elektrycznej (IME) Politechniki Wrocławskiej

Politechnika nie jest samotną wyspą, jej pracownicy stanowią część społeczeństwa w którym żyją i pracują. Jak powinni i jak mogą pracować zależy na równi od nich jak i od środowiska, które również ocenia wyniki ich pracy.

Żyjemy w czasach osobliwych. Gdziekolwiek spojrzymy to w każdej dziedzinie naszego życia stwierdzamy, że nastały czasy ciężkich kryzysów wyciskających piętno niepokoju i niepewności na całym naszym życiu prywatnym i publicznym. Jedni dopatrują się w tym początku jakiegoś wielkiego marszu naprzód: inni znów tłumaczą to jako zapowiedź upadku. Pozwolę sobie odnieść te uwagi do religii i sztuki w których to dziedzinach nie ma już dzisiaj żadnego aksjomatu, który nie byłby przez kogoś kwestionowany. Nasuwa się więc pytanie czy istnieje jakaś prawda, która byłaby bezsporna dla wszystkich i która mogłaby stawić czoła narastającej fali sceptycyzmu? Może jest to logika, którą w najczystszej postaci znajdujemy w matematyce? Myślę, że nie, bo logika może jedynie dobre spoiwo szeregu elementów, których treść musi jednak mieć jakiś mocny punkt oparcia. Uważam, że ryzykowne jest chwytanie się łańcucha, jeżeli nie jest on przytwierdzony do jakiegoś trwałego zaczepu. Stąd powstało pytanie, które zadałem sobie kiedy podejmowałem decyzję kandydowania na stanowisko dyrektora IME: gdzie szukać solidnego gruntu i co może być punktem wyjściowym mojej koncepcji kierowania tym instytutem. Sięgnąłem do historii rozwoju nauki. Może to wydawać się nieco dziwne, bowiem nowa idea naukowa nie toruje sobie drogi w ten sposób, że jej przeciwnicy zostają stopniowo przekonani i nawróceni: myślę, że niemożliwa jest cudowna przemiana Szawła w Pawła. Raczej dzieje się to w ten sposób, że przeciwnicy nowej idei powoli ustępują miejsca dorastającemu pokoleniu, które od razu zapoznaje się i zżywa z nową ideą.

Stąd moją ideą, a równocześnie trwałym gruntem i punktem wyjścia jest wychowywanie młodych ludzi. Uważam, że nauczanie i wychowywanie należy do najważniejszych przesłanek rozwoju nauki; stąd też ich odpowiednie ustawienie jest bardzo istotne.

Jako uczeń uważałem, że najważniejsze jest nie to czego się uczy ale jak się uczy. Szkoła nie powinna uczyć fachowej rutyny, lecz logicznego, metodycznego myślenia. Nie należy tego rozumieć, że wiedza jest mniej ważna niż umiejętności. Naturalnie wiedza bez umiejętności jest bezwartościowa, podobnie jak każda teoria nabiera znaczenia koniec końców dopiero po doświadczalnym sprawdzeniu i dzięki swym specjalnym zastosowaniom. Jednakże teorii nie można nigdy zastąpić samą rutyną, która w okolicznościach nieszablonowych zawodzi. Najwyższym celem wychowania i nauczania nie jest więc przekazywanie wiedzy i umiejętności, lecz przygotowanie do działania. Ale podobnie jak zdobycie umiejętności musi poprzedzać działanie tak i rzetelna wiedza oraz jej poprawne zrozumienie są nieodzownymi przesłankami zdobycia umiejętności. Odnosząc to do czasów obecnych znamiennych szybkim tempem życia można zauważyć iż wszelkie nowinki o sensacyjnym posmaku połączone w wyszukane metody i zabiegi reklamowe utożsamiane bywają często z nauką; i – o dziwo – takie to właśnie poczynania zyskują aprobatę finansową, podczas gdy cenne i obiecujące badania naukowe prowadzone przez skromnych ludzi niekiedy zagubionych w swoich rozważaniach naukowych stają się ograniczone, a nieraz bywają zaniechane na skutek braku środków.

Po tej dygresji niech wolno mi będzie wrócić do koncepcji nauczania w naszym instytucie. To w takim rozumieniu widzę płaszczyznę integracji naszego instytutu. Nauczanie jest widziane jako połączenie ludzi zajmujących się nauką, żyjących w ciągłej niepewności z powodu wysuniętych i nie zawsze sprawdzonych przez siebie hipotez, z ludźmi zajmującymi się od wielu lat dydaktyką i widzących siebie jako „ludzi" od czarnej roboty. Myślę, ze problemy tych ludzi omówione na wspólnych naradach czy seminariach pozwolą na wzajemne zrozumienie się, w większości przypadków doprowadzą do zjednoczenia sił do współpracy i wzajemnego przenikania się tych pozornie odrębnych grup ludzkich. Sądzę też, że odpowiednia atmosfera prowadzonych w naszym instytucie seminariów nie będzie tutaj bez znaczenia.

Mówiąc o nauce uważam, że w gruncie rzeczy tworzy ona wewnętrznie spoistą jedność. Jej podział na różne dyscypliny nie ma podstaw w samej naturze nauki, lecz wynika z ograniczoności ludzkiej zdolności pojmowania, która nieuchronnie prowadzi do podziału pracy (specjalizacji?). W ten sposób nauka sama zakreśla sobie nieprzekraczalne granice. Ale człowiek w swym niepohamowanym dążeniu do przodu (do postępu?) nie może zatrzymać się przed tą granicą: pragnie i musi! Wyjść poza nią, gdyż nieustannie szuka odpowiedzi na stawiane mu przez życie pytania. Myślę, że trudno będzie znaleźć tę odpowiedź tylko w czystej nauce: sądzę, że należałoby jej poszukiwać w swych własnych przekonaniach etycznych, w swym charakterze, w swym światopoglądzie (i chyba we własnej fantazji – może wyobraźni?). Myślę, że rzetel-

ność i wierność to przewodniki wskazujące każdemu z nas właściwą drogę życiową zarówno w dziedzinie nauki, jak i daleko poza jej granicami. Właściwości te nie zapewniają jednak automatycznie osiągnięcia efektowych, doraźnych sukcesów: są natomiast rękojmią uzyskania spokoju wewnętrznego i prawdziwej wolności, które są dla każdego człowieka dobrem najwyższym.

Chciałbym, aby te cnoty były przewodnikami dla naszego instytutu, który – jak wierzę – w najbliższej i w dalszej przyszłości będzie rozwijał się wbrew burzom wewnętrznym i zewnętrznym.

Współczesna epoka jest wyścigiem między wychowaniem i katastrofą*

Referat Dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej (IME) dra hab. Janusza Mroczki na rozpoczęcie semestru letniego roku akademickiego 1991/1992

W chwili, kiedy mija pół roku wspólnego trudu rozwijania dyscypliny naukowej – metrologii, którą obraliśmy jako swoje podstawowe zainteresowanie zawodowe i zamiłowanie naukowe, należy chyba zastanowić się tak nad ogólnymi zagadnieniami związanymi z naszą działalnością jak i nad szczególnymi okolicznościami towarzyszącymi nam w pracy na uczelni technicznej. Jeżeli mamy zamiłowanie do uprawianej dyscypliny naukowej i przywiązanie do instytucji, która nas wychowała i w której my wychowujemy młodych, to trzeba wspólnie przemyśleć powody niedostatków w naszej pracy i zdecydować się na trud wprowadzenia zmian. Myślę, że każdy z nas odczuwa potrzebę informowania otoczenia, w którym pracuje o swoich prawdziwych osiągnięciach naukowych jak i wyrażania swoich poglądów w kwestiach ogólniejszych, związanych ze swoim środowiskiem, w którym się rozwija. Nie ukrywam, że i ja, od czasu kiedy dane mi było zostać dyrektorem Instytutu Metrologii Elektrycznej, odczuwam potrzebę podzielenia się publicznie ogólnymi kwestiami, dotyczącymi nauki i wychowania. Robię to chętnie, bowiem dzięki tego rodzaju kontaktom uzyskuję szereg cennych inspiracji do dalszego działania. Jesteśmy świadkami, że współczesna nam cywilizacja znajduje się na rozdrożu i że dalszy jej rozwój wymaga innego niż dotychczas sterowania. Wpajana w nas wiara o nieustępującym i automatycznych procesie postępu została zachwiana, z różnych powodów, czego doświadczamy będąc obserwatorami minionej dekady. Jeśli cywilizacja nasza będzie rozwijać się nadal tymi samymi drogami, jeżeli będziemy widzieć przyszłość jako taką samą jak teraźniejszość to będziemy świadkami coraz większych zagrożeń. Słuszne są chyba słowa Wellsa, który po pierwszej wojnie światowej powiedział iż epoka współczesna jest „wyścigiem" między katastrofą a edukacją. Chyba każdy z nas nie ma wątpliwości, że jeżeli wyścig ten ma być wygrany to edukację

* Za H.G. Wellsem; por. Por. B. Suchodolski . *Wychowanie minio wszystko*. Warszawa 1990, s. 302.

musimy traktować jako wielką służbę na rzecz innego niż dotychczas rozwoju. Taki sposób myślenia jest nowym myśleniem, jest to myślenie kwestionujące stan rzeczy w którym żyjemy. Ten rodzaj myślenia to zaufanie nie do tego co jest, ale do tego co być może, to zaufanie do sił tworzących rzeczywistość, a nie do rzeczywistości już stworzonej. Jako że od pracowników szkoły wyższej praca naukowa i dydaktyczna wymaga wysokich kwalifikacji merytorycznych, to ten rodzaj pracy musi być wykonywany zgodnie z regułami logiki i metodologii naukowej. Mamy chyba świadomość, że zgodność naszego postępowania z regułami logiki i metodologii czyni z nas ludzi autonomicznych, niezależnych od tego kto nam ten rodzaj pracy zleca i kto ją finansuje. Ta niezależność merytoryczna, wynikająca z cech specyficznych poznania naukowego i cech metod badania, jest także podstawą moralnej wartości nauki i wynika z samej natury - tak jak sztuka tworzy piękno, tak nauka odkrywa prawdę. Mamy też świadomość, a niekiedy i własne doświadczenie, że przemoc polityczna czy ekonomiczna może przeszkadzać człowiekowi w rozwijaniu nauki czy dydaktyki; jedno co jest pewne - nie może to zmienić metod jego twórczości i to jest chyba najważniejsze. Myślę, że w kontekście prowadzonej obecnie dyskusji nad samorządnością szkoły wyższej te wewnętrzne refleksje każdego z nas są bardzo istotne i rzec można, na czasie. Wróćmy do nowego sposobu myślenia – myślenia alternatywnego i dziedziny nam najbliższej jaką jest nauka. Jesteśmy przyzwyczajeni do tej nauki oraz jej owoców, tzn. techniki. Czy z punktu widzenia „nowego" nie jest nam potrzebna inna nauka i technika? Jesteśmy świadomi tego, że to my przyzwyczajamy się do świata stworzonego przez naukę i technikę, a to właśnie nauka i technika stworzyły naszą cywilizację. Tymczasem teraz widzimy, że nauka i technika rozwijały się według zasady dominacji nad przyrodą i dominacji nad ludźmi; i dzisiaj zbieramy owoce tej dominacji. Nie ma np. dyscypliny nauki, która by nie była wprzęgnięta w machinę przygotowań wojennych – od fizyki aż po psychologię. Wiele uczonych było i może dalej jest w konflikcie z własnymi wewnętrznymi przekonaniami czy mają wyciągnąć rękę do bogatych sponsorów reprezentujących epokę totalitaryzmu. Mamy świadomość, że takie właśnie postępowanie wyzwoliło tak szybki rozwój przemysłu i z tym związaną zagładę środowiska naturalnego, to te poczynania wywołały intensyfikację rolnictwa za pomocą środków chemicznych, spowodowało różnice pomiędzy sądami nauki, a potrzebami poznawczymi ludzi. Myślę, że każdy z nas jako ten, który legitymuje się przynależnością do środowiska naukowego i utożsamia się z nim, winien dać sobie odpowiedź na następujące pytania: czy nauka nie odrywa się od mądrości stając się tylko narzędziem działania, co kładzie nacisk na konieczność stosowania nauki nie tylko formalnie (narzędzia), ale merytorycznie, czy nie wiąże się ona dzisiaj raczej z pragmatyzmem niż z mądrością i czy nie odrywa się od świata wartości? Osobiście jestem przekonany, że to nowe „myślenie" odsłoni nam inne możliwości życia, dzia-

łania, organizowania się jak i sposobu istnienia w dziedzinie którą obraliśmy sobie jako swoje zainteresowanie zawodowe i zamiłowanie naukowe. Specyfika Wyższej Uczelni Technicznej narzuca pracom wykonywanym w jej ramach dążenie do zastosowań, co w sposób bezpośredni lub pośredni winno być uwzględnione w referowaniu wyników każdej pracy badawczej wykonywanej w IME. Pracując naukowo w IME mamy chyba świadomość przynależności naszych prac do elektrotechniki i elektroniki. Metrologia jest jak się wydaje jedną tylko gałęzią nauki, ale szczególną z tego powodu, że wiąże się z wszystkimi dziedzinami nauk przyrodniczych - myślę, że nie tylko przyrodniczych, a w naukach przyrodniczych jest warunkiem wiarygodności każdej hipotezy. Nie pragnę, aby ktoś bezkrytycznie akceptował ten mój program w całości, myślę jednak, że po chociaż pewnej refleksji nad nim będzie mógł widzieć rzeczy "inaczej". To będzie zdjęcie obręczy z naszego umysłu, że wszystko musi być tak jak jest dotychczas. To nic innego jak przewietrzenie gmachu cywilizacji, który dla wielu wydaje się jedynie możliwy, a którego wartość i trwałość wydają się coraz bardziej wątpliwe. Tymi słowami chciałbym otworzyć dyskusję nad sposobem przewietrzenia naszego "gmachu", w którym dane jest nam istnieć, pracować i dalej się rozwijać.

Tempora mutantur et nos mutamur in illis

Referat Dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej (IME)
prof. Janusza Mroczki na otwarcie roku akademickiego 1995/1996

„Tempora mutantur et nos mutamur in illis” – zmieniają się czasy a wraz z nimi zmieniamy się i my; my – poszczególni pracownicy i my – zbiorowisko tych pracowników, ukierunkowane na określone cele i zadania: INSTYTUT. Trzeba więc na początku nowego roku akademickiego zastanowić się nad zaszłymi zmianami oraz kierunkiem i przewidywanym tempem zmian nadchodzących jak i nad adekwatnością lub nieadekwatnością zmian jakie zachodzą w Instytucie Metrologii Elektrycznej i w jego pracownikach.

Zmian zaszło wiele, jeszcze więcej możliwych jest w najbliższej przyszłości.

Instytut przeszedł ostatnio od stanu jednostki uczelnianej nastawionej prawie wyłącznie na naukę i dydaktykę do stanu konglomeratu słabo ze sobą związanych części i ludzi żyjących z nauki i dydaktyki, ale z mocnym odchyleniem indywidualno-zarobkowym, z tendencjami do decentralizacji i uniezależniania się od wspólnych celów i metod pracy.

Tak, „tempora mutantur”. A ludzie? Czy nadążają za tymi zmianami i czy mają jakąś ideę co do pracy w nowych warunkach? Jeżeli chodzi o decentralizację rozumianą jako uniezależnienie się od współpracy i pracy na rzecz INSTYTUTU to tak, ale z ideą nadrzędności potrzeb instytutu, podporządkowaniu swych korzyści jego celom to różnie bywa, znacie to Państwo z własnej praktyki.

Ludzie zmieniają się obecnie znacznie wolniej niż warunki życia. W dodatku kierunek tych zmian jest na ogół inny niż zadań Szkolnictwa Wyższego. Jaką więc drogę ma obrać Kierownictwo Instytutu?

Podobne trudności ma Szkolnictwo Wyższe na całym świecie, w krajach rozwiniętych ma ono jednak do dyspozycji więcej pracowników, a brak kadry może uzupełnić przez drenaż pracowników z krajów uboższych, co jeszcze pogłębia trudności tych ostatnich.

Kiedy metrologia stała się naszą pasją, pomiar jako narzędzie procesu poznania głęboko zakorzenił się w naszej świadomości. Ten fakt sprawił, że dokonując oceny innych niż materialne właściwości, świadomie dany stan rzeczy porównujemy z jakąś normą. Mamy również świadomość, że od tego normatywnego stanu, opinie nasze będą metrologicznie poprawne, bądź też tendencyjnymi pseudoocenami. Tak jak poprawny pomiar właściwości materii wymaga spełnienia szeregu uwarunkowań (obiektywnych metod komparacji, względnej stacjonarności porównywalnych właściwości w chwili ich pomiaru itp.), tak chcąc wydać obiektywny osąd wybranego stanu rzeczy należy głęboko uświadomić sobie szereg okoliczności towarzyszących. Problem, na który pragnę zwrócić uwagę dotyczy naszej wspólnej pracy i wzajemnego współdziałania. Mamy świadomość tego, że od określenia tego właśnie normatywnego punktu odniesienia będą zależeć błędy, które będziemy popełniać. Nie szukajmy tego normatywnego punktu przez porównywanie teraźniejszości z przeszłością, bo będzie to zamienianie propagandy sukcesu w propagandę klęski. Uczmy się dobrej roboty patrząc w przyszłość a otoczenie nasze przestanie być przybytkiem zawiści i zła. Uświadommy sobie, że dane jest już nam żyć w wolności i z uznania tych wartości nie wynika bezużyteczna akceptacja różnych zachowań tych którzy z nich korzystają. To wolność ożywiła w nas słowa tolerancja, lojalność, liberalizm itp. Będąc świadkami toczącej się walki politycznej w różnych środowiskach widzimy, że rzeczywiste zachowania moralne zastępowane są słowami. Ludzie, którzy swą rzetelną pracą urzeczywistniali idee wolności byli, a niekiedy dalej wciągani są w bezowocne dyskusje, w których używa się emocjonalnych słów celem zrównania rezultatów własnej pozornej pracy z rzeczywistymi osiągnięciami pracy tych, dla których uczelnia, instytut był i jest celem nadrzędnym i wobec którego odnoszą się z należną pokorą. W tym to okresie słowa związane z szeroko rozumianymi pojęciami wolności zaczęto używać w skojarzeniach wyłącznie negatywnych zjawisk jak malwersacje finansowe, manipulacje, fanatyzm, itp. W kontekście tych zjawisk każdy z nas zadaje sobie pytanie – co robić i jaką przyjąć postawę wobec tego. Myślę, że należy zachować zdrowy rozsądek bowiem to on pozwoli nam zachować respekt dla moralności i dobrych obyczajów, a tym samym w konkretnych niekiedy trudnych decyzjach wybrać drogę pomiędzy rygoryzmem a nihilizmem.

W trudnych dzisiejszych czasach często odnosimy się do różnych autorytetów moralnych oczekując od nich pomocy. Wykorzystujemy więc słowa Marka Aureliusza, który powiedział: „Zasadami posługiwać się trzeba jak pięściarz, nie jak gladiator. Ten bowiem rzuciwszy miecz ginie, gdy tamten zawsze ma ręce gotowe”. Pragnę również w tym miejscu zwrócić uwagę na myśli, które znaleziono w kościele w Baltimore w 1692 roku zatytułowane „Porady i wskazówki na drogę życia” i które z racji daty ich zapisu nie są skażone naszą teraźniejszością. Niech będą one jedoczesnym zaproszeniem do dyskusji jak pracować, współdziałać i żyć.

Rady i wskazania na drogę życia

Krocz spokojnie wśród zgiełku i pośpiechu – pamiętaj, jaki spokój można znaleźć w ciszy.

Tak dalece, jak to możliwe, bez wyrzekania się siebie, bądź w dobrych stosunkach z innymi ludźmi. Prawdę swą głoś spokojnie i jasno. Słuchaj też tego, co mówią inni, nawet głupcy i ignoranci, oni też mają swą opowieść. Jeśli porównujesz się z innymi, możesz stać się próżny i zgorzkniały, albowiem zawsze będą lepsi i gorsi od ciebie.

Ciesz się zarówno swymi osiągnięciami, jak i planami. Wykonuj z sercem swą pracę, jakakolwiek by była skromna. Jest ona trwałą wartością w zmiennych kolejach losu.

Zachowaj ostrożność w swych przedsięwzięciach – świat bowiem pełen jest oszustwa. Lecz niech ci to nie przesłania prawdziwej cnoty, wielu ludzi dąży do wzniosłych ideałów i wszędzie życie pełne jest heroizmu.

Bądź sobą, a zwłaszcza nie zwalczaj uczuć: nie bądź cyniczny wobec miłości, albowiem w obliczu wszelkiej oschłości i rozczarować – jest ona wieczna jak trawa.

Przyjmuj pogodnie to, co lata niosą, bez goryczy wyrzekając się przymiotów młodości. Rozwijaj siłę ducha, by w nagłym nieszczęściu mogła być tarczą dla ciebie. Lecz nie dręcz się tworami wyobraźni. Wiele obaw rodzi się ze znużenia i samotności.

Obok zdrowej dyscypliny bądź łagodny dla siebie. Jesteś dzieckiem wszechświata, nie mniej niż gwiazdy i drzewa, masz prawo być tutaj, i czy jest dla ciebie jasne czy nie, nie wątp, że wszechświat jest taki, jaki być powinien. Tak więc bądź w pokoju z Bogiem, cokolwiek myślisz o jego istnieniu, czymkolwiek się zajmujesz. Jakiekolwiek są twe pragnienia.

W zgiełku ulicznym, zamęcie życia, zachowaj pokój ze swą duszą. Z całym swym zakłamaniem, znojem i rozwianymi marzeniami ciągle jeszcze ten świat jest piękny. Bądź uważny. Staraj się być szczęśliwy.

Tekst znaleziony w starym kościele w Baltimore, datowany w 1692 roku

Wykłady

Światło jako narzędzie pomiarowe w charakterystyce średnicy transparentnego włókna

Spis treści

Słowo wstępne

1. Światło jako nieinwazyjne narzędzie poznania

1.1. Metody nieinwazyjnej charakterystyki optycznej w nauce i technice

1.2. Charakterystyka szklanego włókna na podstawie światła rozproszonego

1.3. Matematyczne metody opisu rozproszenia światła na szklanym włóknie

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

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

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

2.2.1. Model rozproszenia

2.2.2. Natura pola rozproszonego

2.3. Inwersja danych pomiarowych z pola rozproszonego pod małym kątem

3. Analiza inwersyjna tęczy pierwotnej w charakterystyce średnicy szklanego włókna

3.1. Natura tęczy

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

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

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

3.4.1. Aproksymacyjny model tęczy pierwotnej według skorygowanej teorii Airy'ego

3.4.2. Model inwersyjny w pomiarze średnicy szklanego włókna

Podsumowanie

Literatura

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 Książę*)

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”[*]. 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

[*] J.M. Bocheński, *Wspomnienia*, Antyk (2008).

geometrycznych transparentnych struktur jest często dyskutowanym, ważkim wątkiem obecnym we współczesnej literaturze przedmiotu. Szczególne zainteresowanie badaczy 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 monodyspersyjnego 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 nierozerwalnie 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 fiber*s) 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 μm z rdzeniem 10÷100 μm, stosowane np. w elektroforezie kapilarnej i analityce medycznej.

Technologia produkcji szklanego włókna polega zwykle na wytopie mas 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 nieiwazyjnej 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, chrakteryzującym się niską tłumiennością w paśmie optycznym, co może prowadzić do powstania nadmiernych będów metody[29].

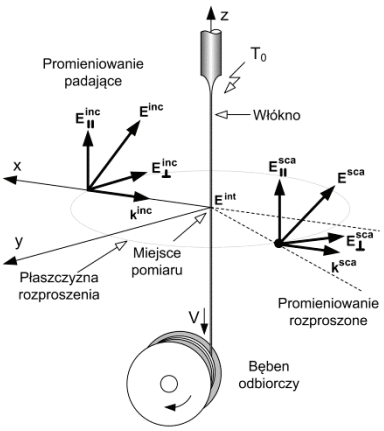
Ideą techniki LBS jest przemieszczanie uformowanego strumienia światła laserowego w płaszczyźnie prostopadłej do osi symetrii badanego włókna. Sygnał rejestrowany przez matrycę detektorów, poddany filtracji z zastosowaniem metod cyfrowego przetwarzania sygnału, zawiera informację o średnim rozmiarze 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 $m \cdot s^{-1}$). 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) [36, 37], a także spektralnej optycznej tomografii koherencyjnej[38-41] (*Fourier Domain Optical Coherence Tomography*, FDOCT). Ze względu na wysoką podatność n 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 pod-

grzewanie szklanej preformy bądź roztapianie szkła w specjalnych tyglach, a powstała struga szklana nawijana jest na zespół bębnów[27, 28]. Włókno oświetlone jest w miejscu pomiaru wiązką promieniowania o składowej elektrycznej $\mathbf{E}^{\mathbf{inc}}$, co wywołuje zaindukowanie pola wewnętrznego cząstki $\mathbf{E}^{\mathbf{int}}$. Pewna część $\mathbf{E}^{\mathbf{inc}}$ ulega interakcji z cząstką tworząc pole rozproszone $\mathbf{E}^{\mathbf{sca}}$.



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”[†]. 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,

[†] Hugo Steinhaus, przedmowa do Kalejdoskopu matematycznego (1956).

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 równań Maxwella opisujących eksperyment dla odpowiednio sformułowanych warunków brzegowych, z wykorzystaniem np.[42-44]: metody rozdzielenia 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 ulokowanym 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 ogranicze-

niem 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 aproksymacją 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 κ (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, mo-

że 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 trwałe zaindukowanie naprężeń i jest przyczyną izotropowych zmian współczynnika załamania.

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

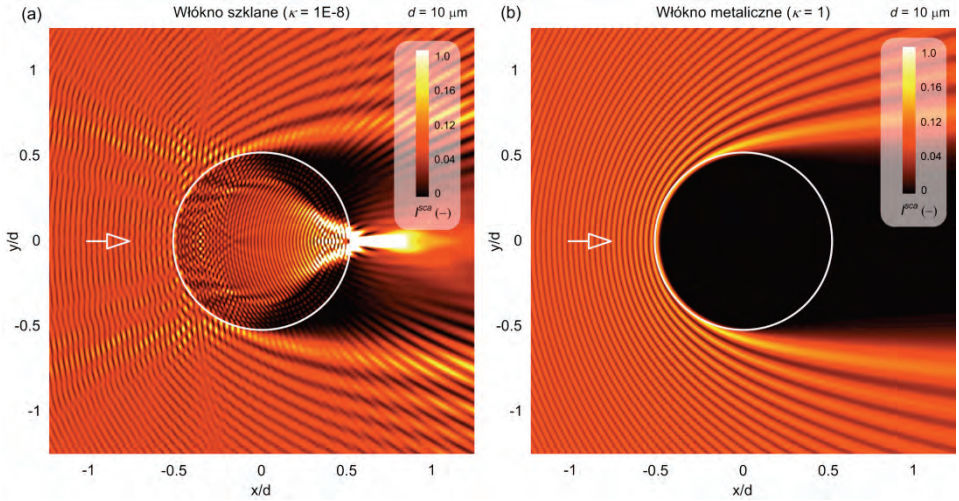
Całą mechanikę kwantową
da się wyprowadzić z doświadczenia
z dwiema szczelinami

(R. Feynman)

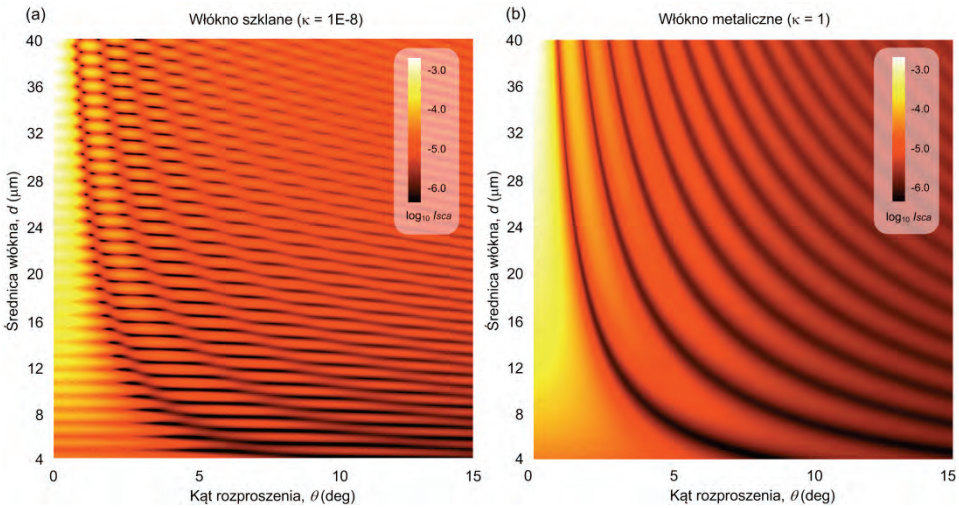
2.1. Problematyka wykorzystania dyfrakcji promieniowania laserowego w charakterystyce optycznej szklanego włókna

Szczególny rodzaj empirycznych technik poznania, które umożliwiają realizacje 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 postepowania 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 niewielka 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 metaıılicznego, 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 (λ = 0,6328 μm, m = 1,5505 + κ)



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 (λ = 0,6328 μm, pol. TM, m = 1,5505 + κ)

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 mikro-

form 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.

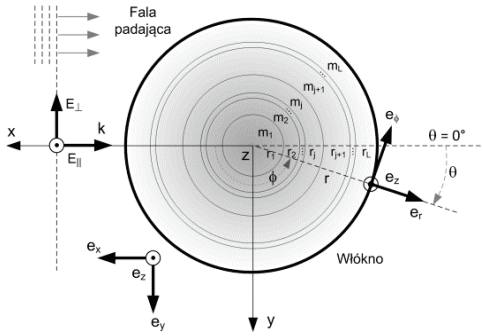
Sformułowanie kompleksowego opisu rozpraszania promieniowania na szklanym włóknie wymaga rozwiązania równania fali płaskiej w cylindrycznym układzie współrzędnych, dla odpowiednio sformułowanych warunków brzegowych z wykorzystaniem np. metody rozdzielenia zmiennych[42-44]. Takie podejście prowadzi jednak 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. Geometria rozproszenia światła na wielowarstwowym włóknie

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:

$$m_j(\lambda) = n_j(\lambda) + i\kappa_j, \quad j = 1, 2, ..., L, \tag{1.1}$$

przy czym r_j jest promieniem warstwy j, λ jest długością fali, L – liczbą warstw, κ_j – współczynnikiem ekstynkcji. Zmienność n_j względem długości fali jest podyktowana 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 (SiO_2), a dyspersyjne zmiany współczynnika załamania opisuje formuła Sellmeiera, ograniczona do trzech pierwszych wyrazów w postaci:

$$\begin{gathered} n_j(\lambda) = \left[1 + \sum_{i=1}^{3} A_i \lambda^2 \Big/ \left(\lambda^2 - \ell_i^2\right)\right]^{1/2} + D_j, \\ A_i = \begin{Bmatrix} 0.6961663 \\ 0.4079426 \\ 0.8974794 \end{Bmatrix}, \ell_i = \begin{Bmatrix} 0.0684043 \\ 0.1162414 \\ 9.896161 \end{Bmatrix}, \end{gathered} \tag{1.2}$$

gdzie A_i, ℓ_i są empirycznymi współczynnikami Sellmeiera[53], D_j – wyraża przesunięcie charakterystyki dyspersyjnej 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 λ jest długością fali. Rozkład widmowy źródła promieniowania aproksymowano krzywą Gaussa, typową dla źródeł o umiarkowanym poszerzeniu widmowym, takich jak np. diody elektroluminescencyjne (LED):

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left[-0.5\left((\lambda - \lambda_0)/\sigma\right)^2\right], \tag{1.3}$$

gdzie λ_0 jest długością fali odpowiadającą maksimum emisyjnemu, I_0 – natężeniem maksimum emisyjnego, zaś σ jest odchyleniem standardowym rozkładu związanym z szerokością połówkową widma, *fwhm*, relacją:

$$\sigma = fwhm \Big/ \left[2(2\ln 2)^{1/2}\right] \approx fwhm/2.355. \tag{1.4}$$

Punktowy detektor promieniowania umieszczony jest w polu dalekim ($kr >> 1$) w miejscu określonym przez współrzędne cylindryczne (r,θ, $z = 0$). 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”[‡], 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 rozdzielenia 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]:

$$\begin{aligned} E_{\parallel}^{sca}(r,\theta,t) = \exp(i3\pi/4)(2/\pi kr)^{1/2} T_1(\theta) \times \\ E_{\parallel}^{inc} \exp(ikr - i\omega t), \end{aligned} \tag{1.5}$$

‡ Kartezjusz, *Rozprawa o metodzie*. Wydawnictwo Marek Derewiecki (2009).

gdzie ω jest pulsacją fali,

$$T_1(\theta) = \sum_{-\infty}^{\infty} b_{nI} \exp(-in\theta) = b_{0I} + 2\sum_{n=1}^{\infty} b_{nI} \cos(n\theta). \tag{1.6}$$

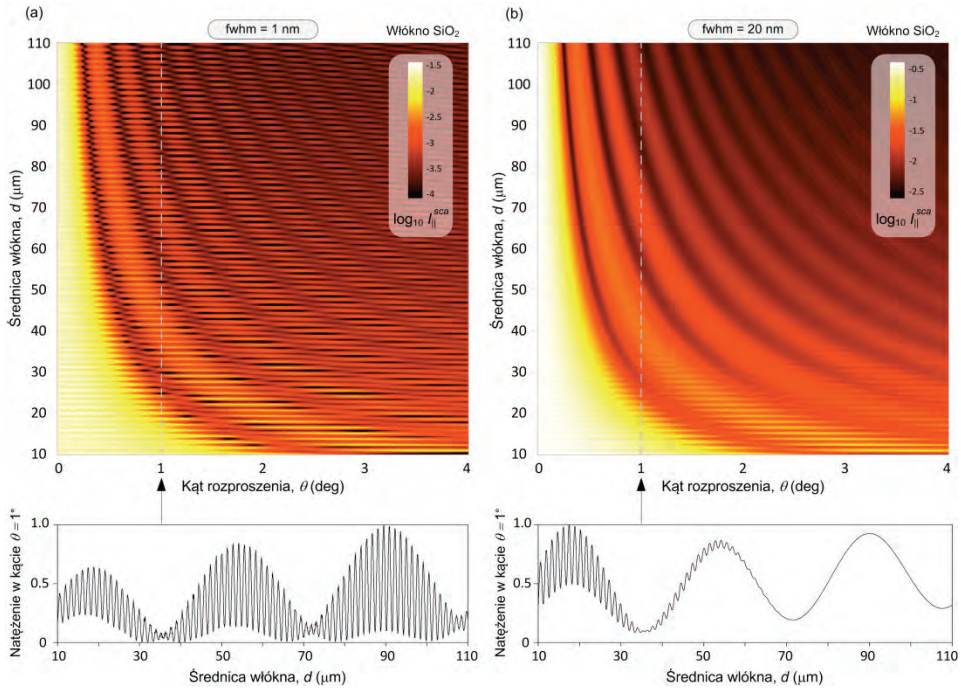
b_{nI} jest współczynnikiem rozwinięcia rozproszonego pola elektromagnetycznego, zależnym od morfologii włókna oraz parametrów fali padającej. Dla włókna wielowarstwowego, parametr ten wyrażony jest następująco[57]:

$$b_{nI} = \frac{m_L H_{b,n}^L(m_L x_L) J_n(x_L) - J_n'(x_L)}{m_L H_{b,n}^L(m_L x_L) H_n^{(1)}(x_L) - H_n^{(1)\prime}(x_L)}. \tag{1.7}$$

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 $E_{\|}^{scu} \cdot E_{\|}^{scu\,*}$, 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

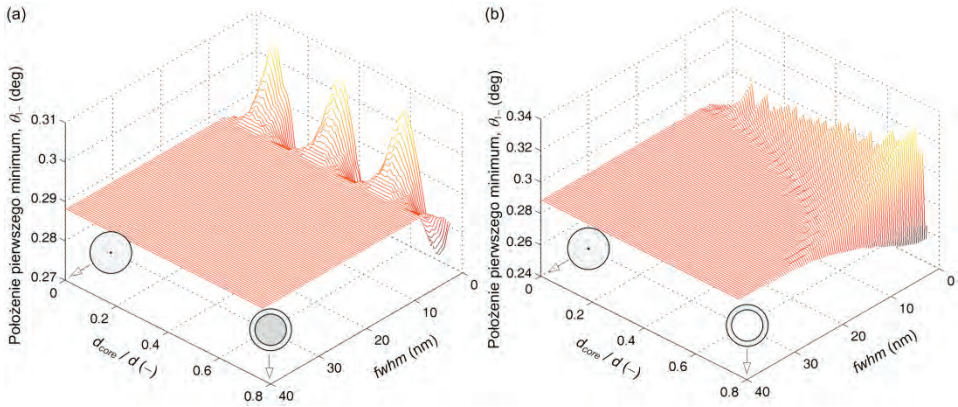
Losowe oddziaływanie rozproszonych fal cząstkowych wydzielonych z widma promieniowania oświetlającego w polu dalekim, funkcjonuje jako uśrednianie pola rozproszonego pod małym kątem w dziedzinie przestrzeni, lub – równoważnie, filtracja dolnoprzepustowa w dziedzinie częstotliwości. Dla zilustrowania tej cechy pola rozproszonego, na Rys. 2.4 przedstawiono dwa wykresy poziomicowe natężenia pola rozproszonego $I_{\|s}$ w kącie rozproszenia θ = 0÷5° oraz w zakresie zmian średnicy homogenicznego *d* włókna od 10 do 110 μm, 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 (1.2), przy czym *D* = 0. Spektrum źródła promieniowania o gaussowskiej obwiedni podzielono na *N* = 1345 dyskretnych składowych rozmieszczonych w jednakowych odstępach względem maksimum λ_0 = 0,6328 μm w zakresie od 0,5656 do 0,7 μm.



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 (λ_0 = 0,6328 μm, $\Delta\lambda$ = 0,5656÷0,7 μm, pol. TM, szkło SiO_2, κ = 1E-8)

W świetle o najmniejszej wartości *fwhm*, położenia kolejnych prążków są modulowane wysokoczęstotliwościową składową, znacznie komplikując tym samym realizację zagadnienia odwrotnego, polegającego na pośrednim pomiarze średnicy włókna. Zwiększenie *fwhm* skutkuje wytłumieniem form modulujących, lecz stopień tego wytłumienia 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 μm: (i) światłowodzie o skokowym profilu refrakcyjnym, (ii) kapilarze z rdzeniem powietrznym.



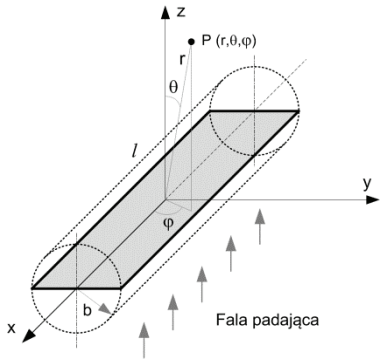
Rys. 2.5. Wpływ średnicy (a) rdzenia światłowodu o skokowym profilu refrakcyjnym, (b) rdzenia powietrznego kapilary, na pozycję pierwszego minimum w polu rozproszonym pod małym kątem. Szerokość połówkowa widma promieniowania padającego wynosi *fwhm* (d = 125 μm, λ_0 = 0,6328 μm, $m_{clad}(\lambda_0)$ = 1,45702 + i1E-7, $m_{core} = m_{clad}$ + 0.02 /światłowód/, m_{core} = 1 /kapilara/)

Założono, że oba włókna wykonane są z krzemionki (SiO_2) o własnościach dyspersyjnych wyrażonych równaniem (1.2). Krzywą dyspersyjną rdzenia światłowodu, $m_{core}(\lambda)$, przesunięto względem krzywej dyspersyjnej płaszcza o stałą wartość wynoszącą D = +0,02. Wyniki obliczeń pola rozproszonego ukazano na Rys. 2.5a, przedstawiającym zależność położenia pierwszego ciemnego prążka θ_{1-} w funkcji ilorazu średnicy rdzenia światłowodu i płaszcza $d_{core}/d =$ (0.01, 1, 1.1…100)/125 μm, wykonaną dla wybranych wartości *fwhm* źródła promieniowania. Położenie prążka ustalono z dokładnością ±0,001°. Analogiczną funkcję obliczono dla przypadku kapilary, Rys. 2.5b. Na obu wykresach widoczne są obszary, ilustrujące małą podatność lub niewrażliwość θ_{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 rozciągłych 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 aproksymacyjny model

przyczynowy (wprost), którego struktura wynika z założenia, 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.



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

Rozważmy nieprzezroczystą, prostokątną przeszkodę o długości *l*, oświetloną falą płaską o długości λ_0 pod kątem prostym, Rys. 2.6. W przybliżeniu Fraunhofera, tj. $r >> l^2/\lambda_0$, 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]:

$$E_p = E_0 e^{ikz} - E_0 (ikr)^{-1} e^{ikr} S(\theta,\varphi), \tag{1.8}$$

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

$$S(\theta,\varphi) = 0.5(1+\cos\theta)k^2 / 2\pi \iint_G e^{-ik(x\cos\varphi + y\sin\varphi)\sin\theta} dxdy, \tag{1.9}$$

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

$$\begin{aligned} S(\theta,\varphi) = 0.5(1+\cos\theta)\left(blk^2/\pi\right)E\left(0.5kl\cdot\sin\theta\cos\varphi\right)\times \\ E\left(kb\cdot\sin\theta\sin\varphi\right), \end{aligned} \tag{1.10}$$

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]:

$$S(\theta,\varphi)=(kl/\pi)E\left[0.5kl\cdot(\pi/2-\varphi)\right]T(\theta), \tag{1.11}$$

Dla padania normalnego, światło rozpraszane jest w płaszczyźnie *z–y*, stąd $\varphi = \pi/2$, a powyższa funkcja przy uwzględnieniu równania (1.10) przyjmuje postać:

$$T(\theta)=0.5(1+\cos\theta)kb\cdot E(kb\sin\theta). \tag{1.12}$$

Amplitudowa funkcja dyfrakcji nie zależy od polaryzacji fali padającej, więc $T(\theta)=T_1(\theta)$ we wzorze (1.5). Pierwsze minimum funkcji dyfrakcji, θ_{1-}, czyli zero funkcji $E(u)$, związane jest ze średnicą włókna relacją:

$$\sin\theta_{1-}=\lambda/d. \tag{1.13}$$

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 μm (średnica rdzenia/płaszcza), (ii) światłowodzie wielomodowym (MMF), 50/125 μm, (iii) włóknie szklanym o silnej absorpcji ($\kappa = 1$) o średnicy 125 μm oraz (iv) kapilarze, 50/200 μm. Założono, że włókna wykonane są ze szkła krzemionkowego (SiO_2). Profil refrakcyjny światłowodów SMF i MMF wyrażono za pomocą równania[59]:

$$n(r,\lambda)=\begin{cases} n_{core}(\lambda)\left[1-2\Delta(r/a)^{\alpha}\right]^{1/2} & ;r<a \\ n_{clad}(\lambda) & ;r\geq a \end{cases}, \tag{1.14}$$

gdzie $n_{clad}(\lambda)$ jest współczynnikiem załamania płaszcza SiO_2 podlegającym zmianom względem λ według równania (1.2) ($D_j = 0$) $n_{core}(\lambda)=n_{clad}(\lambda)+0.014$ jest współczynnikiem załamania domieszkowanego rdzenia w osi światłowodu $\Delta=\left(n_{core}^2-n_{clad}^2\right)/2n_{core}^2$, *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 (1.13) pozwala ocenić tabela 1, w której zawarto obliczenia granicznego błędu systematycznego w zakresie pomiarowym 120÷130 μm (SMF, MMF, włókno metaliczne) i 195÷205 μm (kapilara). Błąd graniczny obliczono jako maksymalną, bezwzględną różnicę w zadanym zakresie pomiarowym pomiędzy wynikiem pomiaru według relacji (1.13), a wartością zadaną, stanowiącą parametr symulacji metodą niekoherentnej superpozycji. Daną pomiarową, tj. θ_{1-}, odczytano z rozdzielczością 0,0001°.

Obliczenia przeprowadzono dla źródła światła o linii widmowej aproksymowanej krzywą Gaussa w maksimum przypadającym na 0.6328 μm i o szerokości połówkowej równej 1, 5 i 15 nm (parametr symulacji). Widmo źródła światła analizowano w zakresie 0,5656÷0,7000 μm z krokiem co 0,1 nm. Obliczenia średnicy i jej błędu systematycznego zostały wykonane z krokiem 0,1 μm w każdym z zakresów pomiarowych, aby sprawdzić wpływ mikroform rezonansowych na jakość aproksymacji.

Tabela 1. Błąd graniczny δd (%) wnioskowania o średnicy w zakresie pomiarowym 120÷130 μm (SMF, MMF, włókno metaliczne) i 195÷205 μm (kapilara). Badane włókno oświetlone jest źródłem o umiarkowanym poszerzeniu widmowym: λ_0 = 0,6328 μm, *fwhm* = 1, 5, 15 nm

Rodzaj włókna	δd (%)		
	fwhm: 1 nm	*fwhm*: 5 nm	*fwhm*: 15 nm
SMF, 10/125 μm	5,06	1,37	0,73
MMF, 50/125 μm	7,75	1,65	0,73
Włókno metaliczne, 125 μm	0,65	0,65	0,65
Kapilara, 50/200 μm	3,23	0,67	0,53

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

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[56, 47]. Dane w tabeli wskazują ponadto, że model aproksymacyjny dostarcza adekwatnych wyników pod warunkiem, że widmo wiązki promieniowania jest odpowiednio szerokie – dla przypadku *fwhm* = 15 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. Sztaudynger)

3.1. Natura tęczy

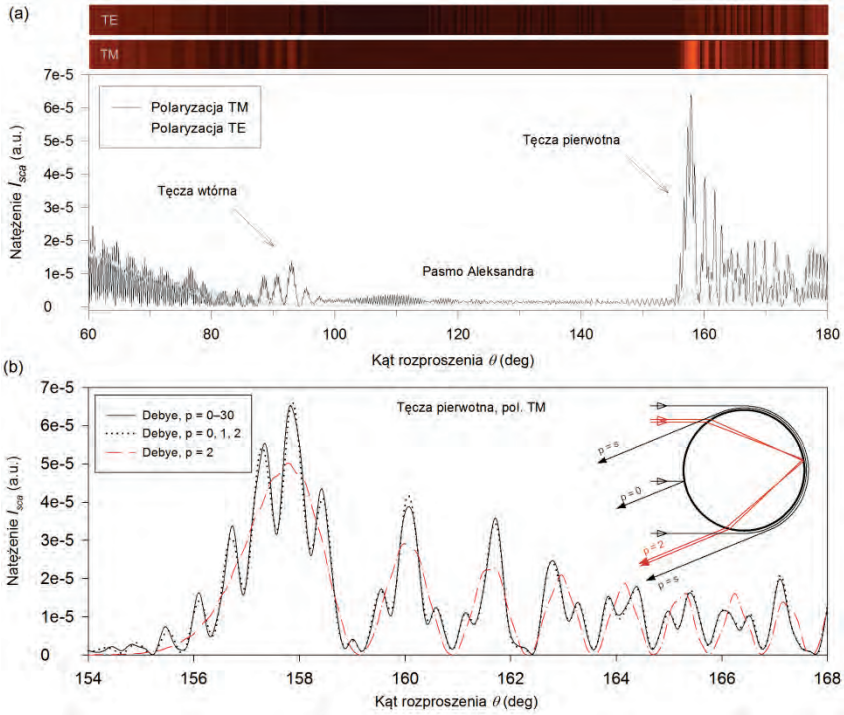
Paradygmat matematyczno-empirycznego poznania może mieć swój początek w obserwacji, a coraz nowsze zagadnienia poznawcze rodzone na jej gruncie wydają się potwierdzać słowa Hamleta „Więcej jest rzeczy na ziemi i w niebie, Niż się ich śniło waszym filozofom”[§]. To obserwacje tęczy i jej matematyczne 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[**]. 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 ~155° to tęcza pierwotna, natomiast struktura widoczna w kącie rozproszenia ~94° i mniejszych to tęcza wtórna.

[§] W. Shakespeare „Hamlet”, akt pierwszy.

[**] 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.

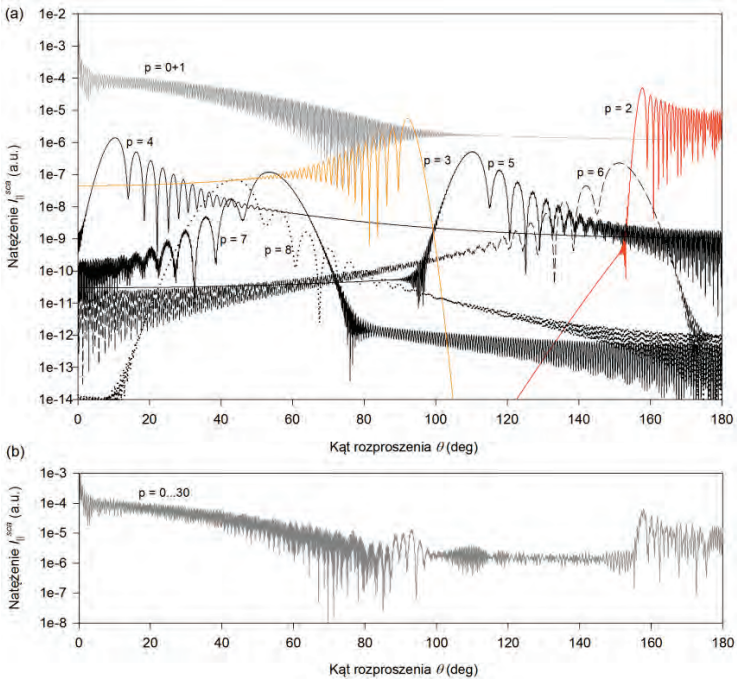
Rys. 3.1. Tęcza pierwotna i wtórna (o mniejszym natężeniu) w warunkach naturalnych (fot. G. Świrniak)



Rys. 3.2. Natężenie światła rozproszonego (jednostki dowolne) na szklanym włóknie o średnicy 125 μm w obszarze tęczy pierwotnej i wtórnej według: (a) teorii Lorenza-Mie, (b) metody Debye'go dekompozycji pola w szeregi (λ = 0,6328 μm, $m(\lambda)$ = 1,4957 + i1E-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 Debyego. 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 μm, w wyniku której obliczono natężenia rozproszone odpowiadające komponentom rzędu $p = 0+1$ i kolejnych $p = 2 \ldots 8$, 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.÷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,…8, (b) p = 0+1+,…,30. Widoczne są tęcze rzędu 1 do 7. W warunkach naturalnych dochodzi najczęściej do powstania tęczy pierwotnej (p = 2) i wtórnej (p = 3). (λ = 0,6328 μm, 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].

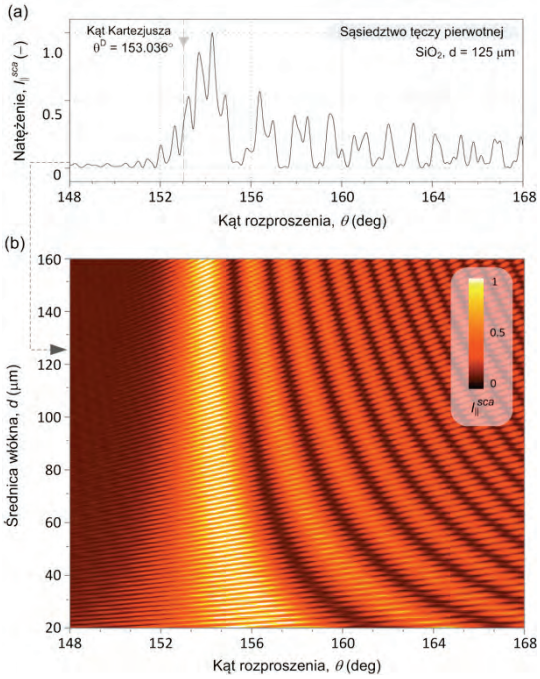
3.2. Problematyka wykorzystania promieniowania rozproszonego pod dużym kątem w charakterystyce optycznej szklanego włókna

Generacja tęczy w warunkach laboratoryjnych dokonuje się zazwyczaj z wykorzystaniem wysokospójnego promieniowania laserowego, umożliwiającego uzyskanie kon-

trastowego, 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°, 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 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 rozpro-



Rys. 3.4. (a) Natężenie w polu dalekim w sąsiedztwie tęczy pierwotnej, powstającej na krzemionkowym (SiO_2) włóknie o średnicy 125 μm, (b) natężenie rozproszone jak (a) lecz w funkcji średnicy włókna (λ = 0,6328 μm, polaryzacja. TM, $m(\lambda)$ = 1,45702 + i1E-7)

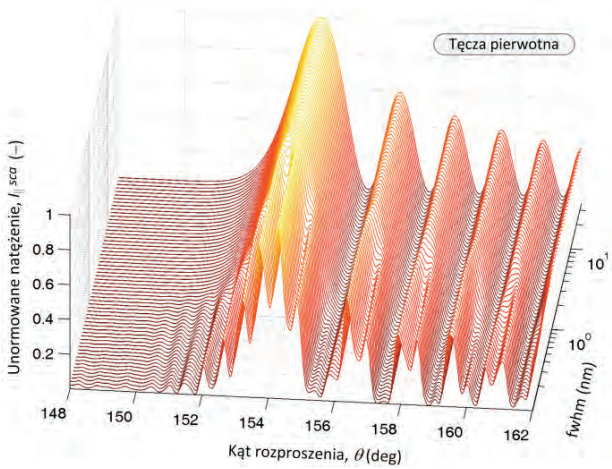
szonych przy wykorzystaniu ultrakrótkich impulsów lasera[69, 70] bądź różnicowania przestrzennego tych komponentów przy wykorzystaniu silnie skupionej wiązki laserowej[71]. Praktyczne zastosowanie obu wymienionych metod jest jednak ograniczone ze względu na wysokie wymagania układowe.

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 laserowego. Podjęcie tej tematyki jest uzasadnione w świetle nowych możliwości formowania skolimowanych wiązek promieniowania z wykorzystaniem wysokowydajnych 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

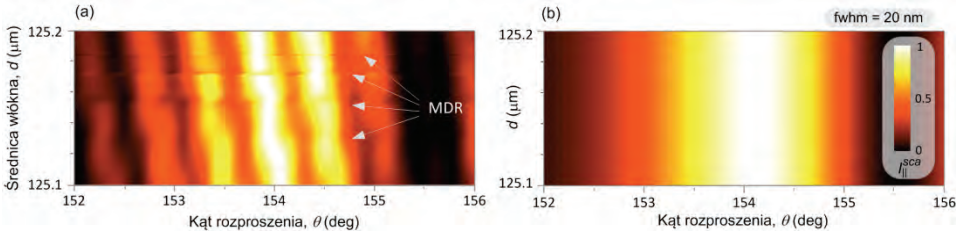
Kompleksowy aparat matematyczny rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności zaprezentowano w rozdziale 2.2.1 wraz z definicją geometrii eksperymentu na Rys. 2.3. Przedmiotem analizy jest nieskończenie długi, osiowosymetryczny i liniowy cylinder o średnicy d, którego oś symetrii pokrywa się 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 **k**. Obwiednię widma źródła promieniowania aproksymuje się funkcją Gaussa o szerokości połówkowej *fwhm* i o maksimum emisyjnym λ_0 przypadającym na 0,6328 μm. Detekcja promieniowania odbywa się w sposób punktowy w polu dalekim ($kr >> 1$) w miejscu określonym przez współrzędne cylindryczne (r, θ, 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 (1.5) 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÷35 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. Jeżeli obwiednia widma promieniowania jest symetryczna względem maksimum emisyjnego λ_0, to powstała tęcza będzie rezultatem filtracji dolnoprzepustowej, dokonanej na natężeniu rozproszonym odpo11wiadającym λ_0.

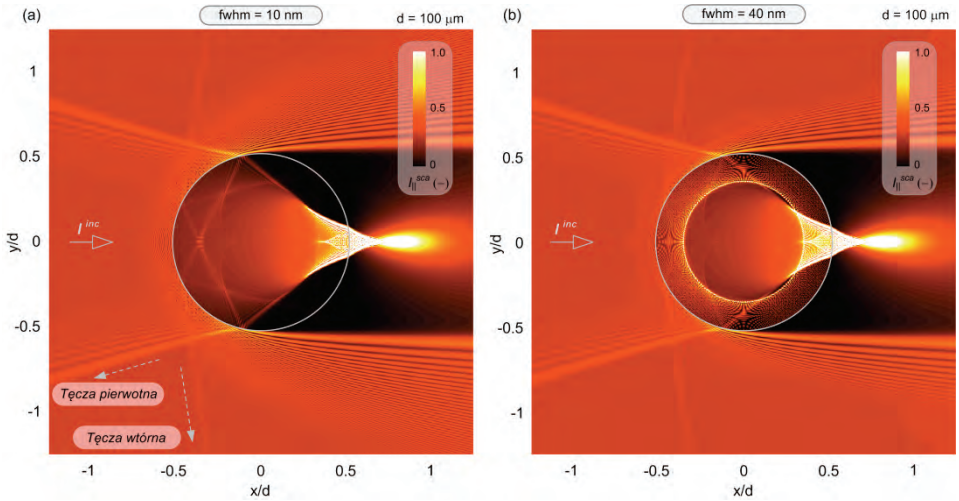


Rys. 3.5. Unormowane natężenie w polu dalekim w sąsiedztwie tęczy pierwotnej powstającej na homogenicznym włóknie SiO_2 o średnicy 125 μm. Włókno oświetlone jest promieniowaniem cechującym się średnim poszerzeniem widmowym o maksimum w 0,6328 μm i szerokości połówkowej *fwhm* = 0,1÷30 nm ($\Delta\lambda$ = 0,5656÷0,7 μm, pol. TM)

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 propagacje 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 (Δd = 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 polidyspersyjnych[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. 3.7a÷c ukazujący wpływ promieniowania o różnym stopniu poszerzenia widmowego na pole rozproszone wewnątrz szklanego włókna oraz w polu bliskim.



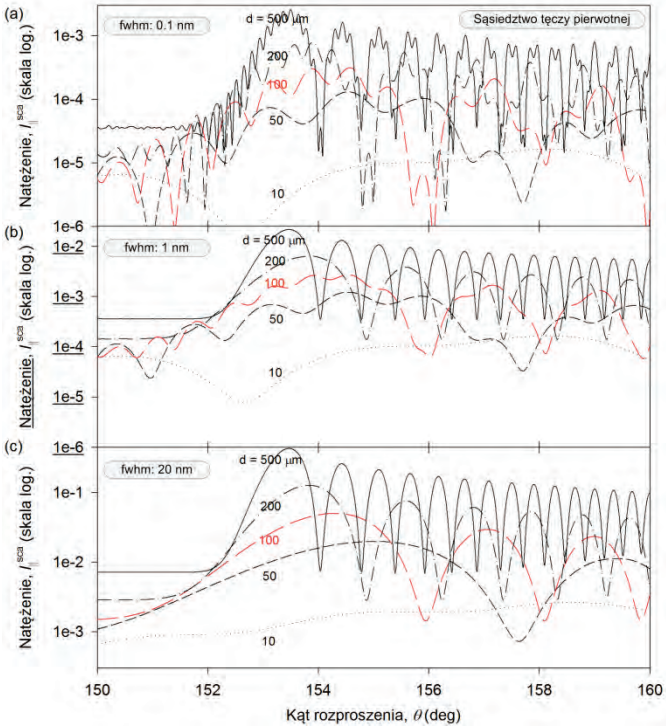
Rys. 3.6. Unormowane natężenie w polu dalekim w sąsiedztwie tęczy pierwotnej powstającej na homogenicznym włóknie SiO_2 w funkcji bardzo małych zmian średnicy (Δd = 0,0001 μm) dla przypadku: (a) monochromatycznej fali padającej (λ = 0,6328 μm), (b) promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej (λ_0 = 0,6328 μm, *fwhm* = 20 nm, $\Delta\lambda$ = 0,5656÷0,7 μm, 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 nm, (c) *fwhm* = 40 nm, wystąpienie rozpraszania rezonansowego (λ_0 = 0,6328 μm, $\Delta\lambda$ = 0,5748÷0,6908 μm, pol. TM, κ = 1E-8)

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° (rozdzielczość symulacji kąta rozproszenia).

Według 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 μm ($x \approx 250$ przy $\lambda = 0{,}6328$ μm) i oświetlonej promieniowaniem o szerokości widmowej 20 nm (Rys. 3.8c).

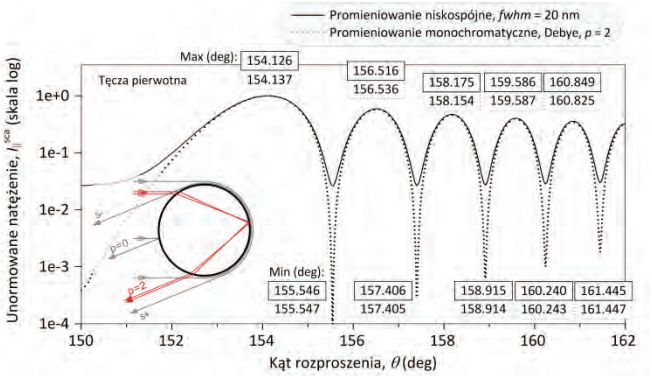


Rys. 3.8. Natężenie rozproszone w obszarze tęczy pierwotnej powstającej na szklanym, homogenicznym włóknie o średnicy d i szerokości ½ linii widmowej wynoszącej: (a) 0,1 nm, (b) 1 nm, (c) 20 nm. ($\lambda_0 = 0{,}6328$ μm, $\Delta\lambda = 0{,}5656 \div 0{,}7$ μm, pol. TM, szkło SiO_2, $\kappa = 1E\text{-}8$)

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 zakresie optyki geometrycznej. Na Rys. 3.9 zestawiono wykresy natężenia pola rozproszonego, obliczone dla zakresu kątowego 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 μm. Przyjmując za kryterium porównawcze położenia kolejnych maksimów i minimów okazuje się, że większość prążków ciemnych ma zgodną pozycję z dokładnością równą rozdzielczości symulacji kąta rozproszenia (0,001°), natomiast położenia prążków jasnych są mniej zgodne i pokrywają się w dokładnością do 0,024°.

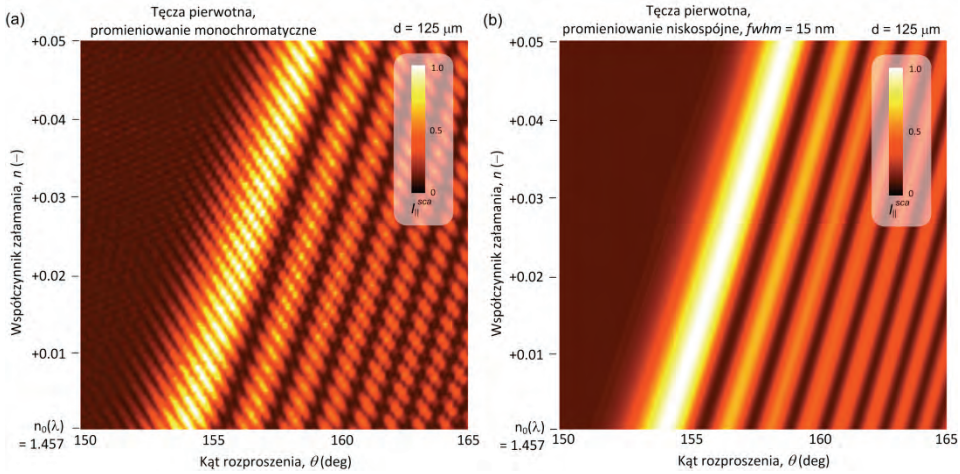


Rys. 3.9. Unormowane natężenie w polu dalekim w sąsiedztwie tęczy pierwotnej powstającej na homogenicznym włóknie SiO_2 według: (–) kompleksowego modelu rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności, *fwhm* = 20 nm, (···) rozpraszania promieniowania monochromatycznego, jako wynik koherentnej superpozycji komponentów rzędu $p = 2$, uzyskany metodą dekompozycji w szeregi Debye'go

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.

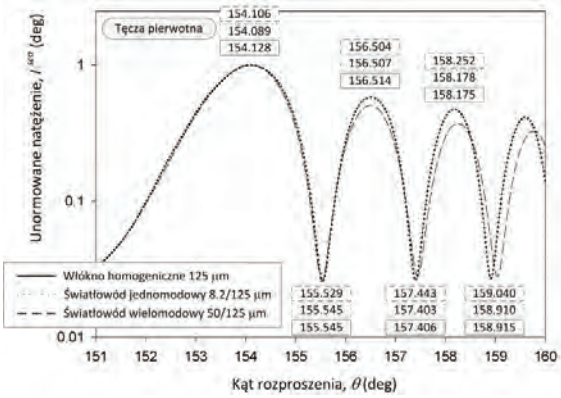
Tęcza jest zjawiskiem powstającym w wyniku załamania promieniowania przez nisko tłumiącą cząsteczkę, zatem pozycja tęczy w polu rozproszonym oraz ułożenie kątowe jej prążków zależą od profilu refrakcyjnego tej cząstki. Na Rys. 3.10 przed-

stawiono wykres poziomicowy unormowanego natężenia tęczy pierwotnej w funkcji kąta rozproszenia i współczynnika załamania homogenicznego włókna o średnicy 125 μm, wykonany dla (a) źródła spójnego i (b) o niskim stopniu spójności czasowej (λ_0 = 0,6328 μm). Bezwzględne położenia prążków w znacznym stopniu zależą od współczynnika załamania, a w dużo mniejszym stopniu – ich położenia wzajemne. W konsekwencji, inwersyjne wnioskowanie o średnicy włókna rozpraszającego promieniowanie korzystnie jest oprzeć na danych pomiarowych wynikających z częstotliwości przestrzennej funkcji natężenia, np. odległości pomiędzy sąsiadującymi prążkami.



Rys. 3.10. Wpływ współczynnika załamania na tęczę pierwotną powstającą na szklanym (SiO_2), homogenicznym włóknie o średnicy 125 μm w warunkach oświetlenia promieniowaniem: (a) monochromatycznym (λ = 0,6328 μm, pol. TM), (b) o umiarkowanym poszerzeniu widmowym aproksymowanym krzywą Gaussa (λ_0 = 0,6328 μm, *fwhm* = 15 nm, $\Delta\lambda$ = 0,6056÷0,66 μm, pol. TM)

Na Rys. 3.11 ukazano tęczę pierwotną powstającą w świetle o niskim stopniu spójności na trzech różnych włóknach o tej samej średnicy (125 μm), ale odmiennych profilach refrakcyjnych. Obecność nawet niewielkiej niehomogeniczności – 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 tęcz[76-78]. Dodatkowo, pole rozproszone wstecznie zależy w silnym stopniu od komponentów jednokrotnie załamanych przez cząstkę, warunkujących powstanie zjawiska glorii[79-81].



Rys. 3.11. Wpływ profilu refrakcyjnego szklanego włókna o średnicy 125 μm na tęczę pierwotną, powstającą w wyniku rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej, normalny kształt widma (λ_0 = 0,6328 μm, *fwhm* = 15 nm, $\Delta\lambda$ = 0,6056÷0,66 μm, pol. TM)

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 położeń 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]:

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

gdzie: *Ai* jest funkcją (całką) Airy[83], I_0 – natężeniem padającej fali płaskiej θ – 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,

$$\Delta \equiv \theta - \theta^D, \tag{3.2}$$

θ^D jest tzw. kątem Kartezjusza tęczy pierwotnej, wyrażonym dla tęczy pierwotnej jako:

$$\theta^D = \pi + 2\theta_i^D - 4\theta_t^D, \tag{3.3}$$

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

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

$$\sin\left(\theta_t^D\right) = n^{-1}\sin\left(\theta_i^D\right), \tag{3.5}$$

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 θ^D jest funkcją współczynnika załamania cząstki, ale nie zależy od jej średnicy. Fakt ten słuszny jest w dziedzinie praw optyki geometrycznej. Czynnik *F* w równaniu (3.1) wynika z równań Fresnela i reprezentuje zamianę amplitudy promienia Kartezjusza w wyniku kolejnych odbić i załamań na drodze propagacji:

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

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 pierwotniej w polu rozproszonym i zdefiniowany jest następująco:

$$h = 9\left(4 - n^2\right)^{1/2} \Big/ 4\left(n^2 - 1\right)^{3/2}. \tag{3.7}$$

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'):

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

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

$$u(\Delta) = 1 + B\Delta + \mathrm{O}\left(\Delta^2\right), \tag{3.9}$$

$$w(\Delta,x) = 1 + \mathrm{O}(\Delta) + \mathrm{O}\left(x^{-1}\right), \tag{3.10}$$

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

przy czym:

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

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

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

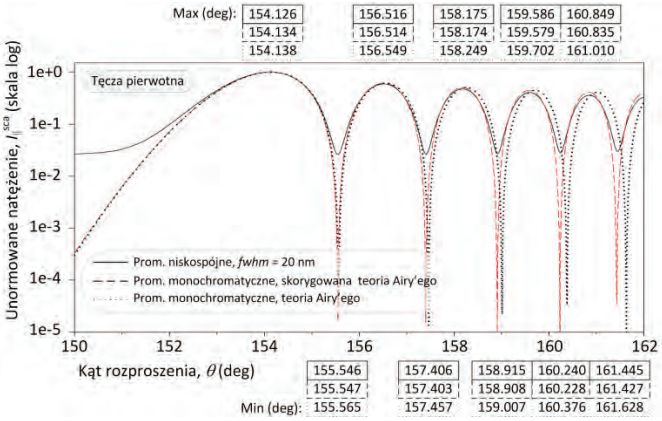
Korekcja jądra we wzorze Airy'ego (3.1), mająca na celu poprawę położenia prążków tęczy w polu rozproszonym, polega na przyjęciu współczynników $v(\Delta, x) = 0$, $w(\Delta, x) = 1$ oraz uwzględnieniu czynnika $u(\Delta)$, ograniczonego do dwóch pierwszych wyrazów:

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

Na Rys. 3.12 przedstawiono porównanie natężenia pola rozproszonego w obszarze tęczy pierwszego rzędu, powstającej na włóknie SiO_2 o średnicy 125 μm w wyniku rozproszenia promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej (λ_0 = 0,6328 μm, *fwhm* = 20 nm) oraz natężeń obliczonych według klasycznej i skorygowanej teorii Airy'ego (λ_0 = 0,6328 μm). Widoczna jest poprawa aproksymacji położeń 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_2 według: (–) kompleksowego modelu rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności, λ_0 = 0,6328 μm *fwhm* = 20 nm, (--) teorii Airy'ego z korekcją jądra całkowego jako modelu rozpraszania promieniowania monochromatycznego (λ = 0,6328 μm), (···) klasycznej teorii Airy'ego jako modelu rozpraszania promieniowania monochromatycznego (λ = 0,6328 μm)

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

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

gdzie:

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

Położenia ciemnych prążków determinują zera funkcji 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:

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

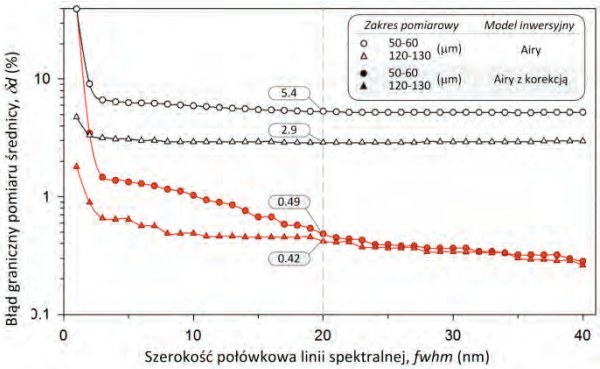
W celu walidacji powyższej formuły inwersyjnej, dokonano symulacji tęczy powstającej na homogenicznym włóknie szklanym (SiO_2), oświetlonym wiązką o niskim stopniu spójności, przyjmując jako parametr symulacji średnicę włókna *d*, zmienianą w dwóch zakresach pomiarowych: 50÷60 i 120÷130 μm z krokiem 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 odstępu kątowego pomiędzy dwoma pierwszymi (począwszy od kąta Kartezjusza) ciemnymi prążkami tęczy, 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 δd w funkcji szerokości połówkowej linii widmowej promieniowania padającego, *fwhm*. Błąd δd zdefiniowany jest jako:

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

gdzie: **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 kątowego 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÷60 μm jaki i 120÷130 μm. Nie zaobserwowano nadmiernych skoków wartości błędu, których wystąpienie świadczyłoby o wystąpieniu rozpraszania rezonansowego.



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

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 bezwzględnego 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 całkowe 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.

Warto zauważyć, ze 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.

Literatura

[1] **MROCZKA J.**, *Metrologiczne problemy wykorzystywania światła rozproszonego do badań rozkładu wielkości cząstek w roztworach dyspersyjnych*, Warszawa 1990.

[2] **MROCZKA J.**, *Metrologia – nowe wyzwania*, [w:] **J. MROCZKA** (red.), *Metrologia wczoraj, dziś, jutro*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.

[3] **MROCZKA J.**, *The cognitive process in metrology*, Measurement, 2013, 46, 2896–2907.

[4] **MROCZKA J.**, *Turbidimetric methods in particle sizing*. Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO), Beijing, China, 1991.

[5] **MROCZKA J.**, *Integral transform technique in particle sizing*. Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO), Beijing, China, 1991.

[6] **MROCZKA J.**, *Method of Moments in Light Scattering Data Inversion in the Particle Size Distribution*, Optics Communications, 1993, 99, 147–151.

[7] **MROCZKA J.**, SZCZUCZYŃSKI D., *Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements*, Metrology and Measurement Systems, 2009, 16, 333–357.

[8] **MROCZKA J.**, SZCZUCZYŃSKI D., *Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements*, Applied Optics, 2010, 49, 4591–4603.

[9] **MROCZKA J.**, SZCZUCZYŃSKI D., *Simulation research on improved regularized solution of inverse problem in spectral extinction measurements*, Applied Optics, 2012, 51, 1715–1723.

[10] **MROCZKA J.**, SZCZUCZYŃSKI D., *Improved technique of retrieving particle size distribution from angular scattering measurements*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 129, 48–59.

[11] ONOFRI F., KRZYSIEK M., BARBOSA S., MESSAGER V., REN K.F., **MROCZKA J.**, *Near-critical-angle scattering for the characterization of clouds of bubbles: particular effects*, Applied Optics, 2011, 50, 5759–5769.

[12] CZERWIŃSKI M., **MROCZKA J.**, GIRASOLE T., GOUESBET G., GRÉHAN G., *Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions. Pt. 1. Direct problem: hybrid-method approximation*, Applied Optics, 2001, 40, 1514–1524.

[13] CZERWIŃSKI M., **MROCZKA J.**, GIRASOLE T., GOUESBET G., GRÉHAN G., *Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions*. Part 2. *Inverse problem: particle size determination*, Applied Optics, 2001, 40, 1525–1531.

[14] GUSZKOWSKI T., **MROCZKA J.**, *Metoda inwersyjna wykorzystująca sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej*. Metrologia wspomagana komputerowo. MWK 2003. VI Szkoła – konferencja, Instytut Podstaw Elektroniki Wydział Elektroniki WAT, Waplewo 2003.

[15] GIRASOLE T., BULTYNCK H., GOUESBET G., GRÉHAN G., LE MEUR F., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, REN K.F., ROZE C., WYSOCZAŃSKI D., *Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering*. Part 1. *Numerical aspects*, Particle & Particle Systems Characterization, 1997, 14, 163–174.

[16] GIRASOLE T., GOUESBET G., GRÉHAN G., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, REN K.F., WYSOCZAŃSKI D., *Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering*. Part 2. *Experimental aspects*, Particle & Particle Systems Characterization, 1997, 14, 211–218.

[17] GIRASOLE T., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, WYSOCZAŃSKI D., *Fiber orientation and concentration analysis by light scattering: experimental setup and diagnosis*, Review of Scientific Instruments, 1997, 68, 2805–2811.

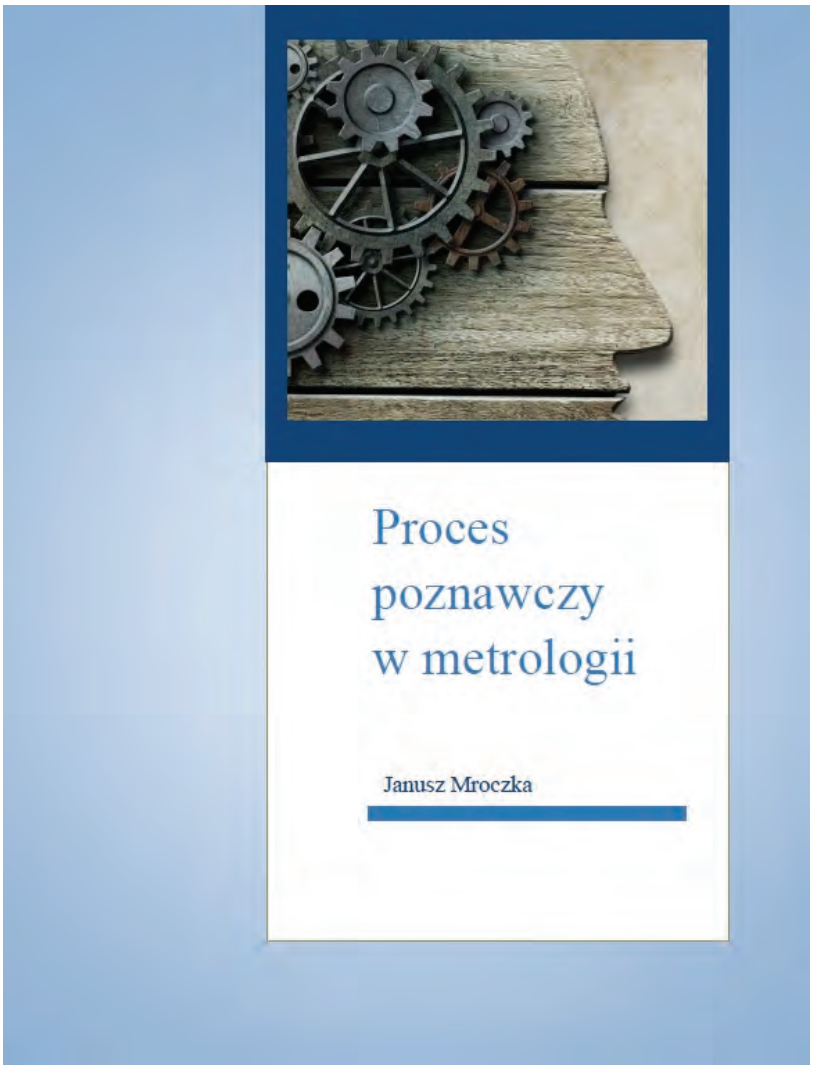
[18] **MROCZKA J.**, WYSOCZAŃSKI D., ONOFRI F., *Optical parameters and scattering properties of red blood cells*, Optica Applicata, 2002, 32, 691–700.

[19] ONOFRI F., BARBOSA S., WOŹNIAK M., TOURE O., **MROCZKA J.**, *Optical characterization of nanoparticles and aggregates: light extinction spectrometry*. 15th International Symposium on Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2010.
[20] SKORUPSKI K., **MROCZKA J.**, RIEFLER N., OLTMANN H., WILL S., WRIEDT T., *Impact of morphological parameters onto simulated light scattering patterns*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 119, 53–66.
[21] WOŹNIAK M., ONOFRI F., BARBOSA S., YON J., **MROCZKA J.**, *Comparison of methods to derive morphological parameters of multi-fractal samples of particle aggregates from TEM images*, Journal of Aerosol Science, 2012, 47, 12–26.
[22] WOJTASZEK T., **MROCZKA J.**, *Light scattering simulations of spheroids using three beams phase Doppler system*. XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil, 2006.
[23] ŚWIRNIAK G., *Diffraction of incoherent light for thin, glass fibre diameter characterization*, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 1a, 276–280.
[24] ŚWIRNIAK G., *On the use of Airy fringes for indirect measurement of glass fibre diameter*, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 3a, 207–211.
[25] ŚWIRNIAK G., GŁOMB G., *Optical characterization of a glass fibre with the use of low coherent light (LED).* [In:] C. GORECKI, A.K. ASUNDI, W. OSTEN (Eds.), *Optical Micro- and Nanometrology IV*, SPIE, Brussels, Belgium, 2012, 843017.
[26] ŚWIRNIAK G., GŁOMB G., *Small angle light scattering for a glass fibre diameter characterization.* [In:] P.H. LEHMANN (Ed.), *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*, SPIE, Munich, Germany, 2013, 87882N-1–87882N-8.
[27] GUPTA P.K., *Glass Fibers for Composite Materials*. [In:] A.D. BUNSELL (Ed.), *Fiber Reinforcements for Composite Materials*, Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands, 1988.
[28] DOROSZ J., *Technologia światłowodów włóknistych*, Polskie Towarzystwo Ceramiczne PAN, Kraków 2005.
[29] ONOFRI F., LENOBLE A., BULTYNCK H., GUÉRING P.-H., *High-resolution laser diffractometry for the on-line sizing of small transparent fibres*, Optics Communications, 2004, 234, 183–191.
[30] JABŁOŃSKI R., FOTOWICZ P., *New generation of lasermike*. [In:] A.J. ALBERTAZZI (Ed.), Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry, SPIE, Florianopolis, Brazil, 2001, 91–98.
[31] JABŁOŃSKI R., KRETKOWSKI M., FOTOWICZ P., *Simple Lasermike for Measurement of Dimension, Form and Position of Cylindrical Elements*, Engineering Mechanics, 2005, 12, 299–305.
[32] MARSHALL G.F. *Handbook of Optical and Laser Scanning*, Marcel Dekker, New York 2004.
[33] BARTON G.W., LAW S.H., PHAN T.N., *Limitations to the Manufacture of Specialty Optical Fiber*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127, 663–669.
[34] COHEN L.G., GLYNN P., *Dynamic measurement of optical fiber diameter*, Review of Scientific Instruments, 1973, 44, 1749–1752.
[35] HARDALUPAS Y., HISHIDA K., MAEDA M., MORIKITA H., TAYLOR A.M.K.P., WHITELAW J.H., *Shadow Doppler technique for sizing particles of arbitrary shape*, Applied Optics, 1994, 33, 8417–8426.
[36] ALBRECHT H.-E., BORYS M., DAMASCHKE N., TROPEA C., *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*, Springer-Verlag, Berlin 2005.
[37] SCHAUB S.A., NAQWI A.A., HARDING F.L. *Design of a phase/Doppler light-scattering system for measurement of small-diameter glass fibers during fiberglass manufacturing*, 1988, 37, 573–585.
[38] JASAPARA J.C., *Non-invasive characterization of microstructured optical fibers using Fourier domain optical coherence tomography*, Optics Express, 2005, 13, 1228–1233.
[39] JASAPARA J.C., MONBERG E., DIMARCELLO F., NICHOLSON J.W., *Accurate noncontact optical fiber diameter measurement with spectral interferometry*, Optics Letters, 28, 2003, 601–603.

[40] JASAPARA J.C., WIELANDY S., *Characterization of coated optical fibers by Fourier-domain optical coherence tomography*, Optics Letters, 30, 2005, 1018–1020.
[41] JASAPARA J.C., WIELANDY S., YABLON A., *Fourier Domain Optical Coherence Tomography – a new platform for measurement of standard and microstructured fiber dimensions*. [In:] IEE Optoelectronics, 2006, 229–234.
[42] KOKHANOVSKY A. (Ed.), *Light Scattering Reviews: Single and Multiple Light Scattering*, Springer, 2006.
[43] SADIKU M.N.O., *Numerical Techniques in Electromagnetics*, CRC Press, 2001.
[44] KAHNERT F.M., *Numerical methods in electromagnetic scattering theory*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2003, 79–80, 775–824.
[45] DEVANEY A.J., *Nonuniqueness in the inverse scattering problem*, Journal of Mathematical Physics, 1978, 19, 1526–1535.
[46] DEVANEY A.J., SHERMAN G.C., *Nonuniqueness in Inverse Source and Scattering Problems*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30, 1034–1037.
[47] VAN DE HULST H.C., *Light scattering by small particles*, Dover Publications, New York 1981.
[48] ŚWIRNIAK G., *Wybrane zagadnienia pomiaru średnicy włókna optycznego w procesie produkcji z wykorzystaniem światła rozproszonego*, [w:] **J. MROCZKA** (red.), *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
[49] LEBRUN D., BELAID S., ÖZKUL C., REN K.F., GRÉHAN G., *Enhancement of wire diameter measurements: comparison between Fraunhofer diffraction and Lorenz–Mie theory*, Optical Engineering, 1996, 4, 946–950.
[50] BARBER P.W., OWEN J.F., CHANG R.K., *Resonant scattering for characterization of axisymmetric objects*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30, 168–172.
[51] OWEN J.F., BARBER P.W., MESSINGER B.J., CHANG R.K., *Determination of optical-fiber diameter from resonances in the elastic scattering spectrum*, Optics Letters, 1981, 6, 272–274.
[52] BACH H., NEUROTH N. (Eds.), *The Properties of Optical Glass*, Springer-Verlag, Berlin 1998.
[53] FLEMING J.W., *Dispersion in GeO_2-SiO_2 glasses*, Applied Optics, 1984, 23, 4486–4493.
[54] BUTOV O.V., GOLANT K.M., TOMASHUK A.L., VAN STRALEN M.J.N., BREULS A.H.E., *Refractive index dispersion of doped silica for fiber optics*, Optics Communications, 2002, 213, 301–308.
[55] GOODMAN J.W., *Statistical optics*, Wiley, 2000.
[56] BOHREN C.F., HUFFMAN D.R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, John Wiley & Sons, New York 1983.
[57] ONOFRI F., *Diagnostics optiques des milieux multiphasiques*, HDR, Université de Provence, 2005.
[58] LI R., HAN H., JIANG H., REN K.F., *Debye series of normally incident plane-wave scattering by an infinite multilayered cylinder*, Applied Optics, 2006, 45, 6255–6262.
[59] WEMPLE S.H., *Material dispersion in optical fibers*, Applied Optics, 1979, 18, 31–35.
[60] ADAM J.A., *The mathematical physics of rainbows and glories*, Physics Reports, 2002, 356, 229–365.
[61] LEE R.L., FRASER A.B., *The Rainbow Bridge: Rainbows in Art, Myth and Science*, Pennsylvania State University Press, 2001.
[62] AIRY G.B., *On the intensity of light in the neighbourhood of a caustic*, Transactions of the Cambridge Philosophical Society, University Press, 1838.
[63] VAHALA K.J., *Optical microcavities*, Nature, 2003, 424, 839–846.
[64] KÖNNEN G.P., DE BOER J.H., *Polarized rainbow*, Applied Optics, 1979, 18, 1961–1965.
[65] NG P.H., TSE M.Y., LEE W.K., *Observation of high-order rainbows formed by a pendant drop*, Journal of optical Society of America B, 1998, 15, 2782–2787.
[66] VAN BEECK J.P.A.J., RIETHMULLER M.L., *Rainbow phenomena applied to the measurement of droplet size and velocity and to the detection of nonsphericity*, Applied Optics, 1996, 35, 2259–2266.

[67] ROTH N., ANDERS K., FROHN A., *Refractive-index measurements for the correction of particle sizing methods*, Applied Optics, 1991, 30, 4960–4965.
[68] HAN X., REN K.F., WU Z., CORBIN F., GOUESBET G., GRÉHAN G., *Characterization of initial disturbances in a liquid jet by rainbow sizing*, Applied Optics, 1998, 37, 8498–8503.
[69] MÈÉS L., GOUESBET G., GRÉHAN G., *Scattering of laser pulses (plane wave and focused gaussian beam) by spheres*, Applied Optics, 2001, 40, 2546–2550.
[70] MÈÉS L., GRÉHAN G., GOUESBET G., *Time-resolved scattering diagrams for a sphere illuminated by plane wave and focused short pulses*, Optics Communications, 2001, 194, 59–65.
[71] MÈÉS L., REN K.F., GRÉHAN G., GOUESBET G., *Scattering of a Gaussian beam by an infinite cylinder with arbitrary location and arbitrary orientation: numerical results*, Applied Optics, 1999, 38, 1867–1876.
[72] LOCK J.A., *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, 1997, 14, 653–661.
[73] VAN BEECK J., ZIMMER L., RIETHMULLER M.L., *Global Rainbow Thermometry for Mean Temperature and Size Measurement of Spray Droplets*, Particle & Particle Systems Characterization, 2001, 18, 196–204.
[74] VERTRANO M.R., VAN BEECK J.P.A.J., RIETHMULLER M.L., *Global rainbow thermometry: improvements in the data inversion algorithm and validation technique in liquid-liquid suspension*, Applied Optics, 2004, 43, 3600–3607.
[75] VERTRANO M.R., VAN BEECK J., RIETHMULLER M.L., *Assessment of refractive index gradients by standard rainbow thermometry*, Applied Optics, 2005, 44, 7275–7281.
[76] PRESBY H.M., MARCUSE D., *Refractive Index and Diameter Determinations of Step Index Optical Fibers and Preforms*, Applied Optics, 1974, 13, 2882–2885.
[77] ADLER C., LOCK J.A., NASH J.K., SAUNDERS K.W., *Experimental observation of rainbow scattering by a coated cylinder: twin primary rainbows and thin-film interference*, Applied Optics, 2001, 40, 1548–1558.
[78] ADLER C.L., LOCK J.A., RAFFERTY I.P., HICKOK W., *Twin-rainbow metrology*. I. *Measurement of the thickness of a thin liquid film draining under gravity*, Applied Optics, 2003, 42, 6584–6594.
[79] KHARE V., NUSSENZVEIG H.M., *Theory of the Rainbow*, Physical Review Letters, 1974, 33, 976–980.
[80] NUSSENZVEIG H.M., *High-Frequency Scattering by a Transparent Sphere*. II. *Theory of the Rainbow and the Glory*, Journal of Mathematical Physics, 1969, 10, 125–176.
[81] LAVEN P., *How glories are formed?*, Applied Optics, 2005, 44, 5675–5683.
[82] LOCK J.A., *Supernumerary spacing of rainbows produced by an elliptical-cross-section cylinder*. I. *Theory*, Applied Optics, 2000, 39, 5040–5051.
[83] ABRAMOWITZ M., STEGUN I.A., *Handbook of Mathematical Functions*, Washington DC, National Bureau of Standards, 1970.
[84] BORN M., WOLF E., *Principles of optics*, Pergamon Press Ltd., Oxford, UK, 1980.
[85] NUSSENZVEIG H.M., *Complex angular momentum of the rainbow and the glory*, Journal of Optical Society of America, 1979, 69, 1068–1079.
[86] NUSSENZVEIG H.M., *Diffraction Effects in Semiclassical Scattering*, Cambridge University Press, Cambridge 1992.
[87] WANG R.T., VAN DE HULST H.C., *Rainbows: Mie computations and the Airy approximation*, Applied Optics, 1991, 30, 106–117.

Proces poznawczy w metrologii



Spis treści

1. Wprowadzenie
2. Postrzegana rzeczywistość
3. Opis cech materii
4. Zasada przyczynowości
5. Determinizm i indeterminizm
6. Zasada nieoznaczoności Heisenberga
7. Zagadnienie pomiaru w mikroświecie
8. Przyczynowość a indeterminizm w metrologii
9. Modelowanie i symulacja w procesie poznania
    9.1. Model i modelowanie
    9.2. Symulacja
10. Proces poznawczy w metrologii
11. Zakończenie
12. Literatura

1. Wprowadzenie

Zawsze najbardziej przyciąga naszą ciekawość to,
co znajduje się poza granicą naszej wiedzy.

(M. Heller)

Pomiary praktyczne używane są od tysięcy lat. Celem ich jest ustalenie wartości właściwości realnych obiektów podlegających porównaniu i wymianie. W tym celu właściwości te porównuje się z właściwościami przyjętych wzorców, ustala się granice, w których właściwości te leżą na skutek błędów pomiarowych. Pomiary praktyczne obejmują więc przyjęcie wzorców, porównanie ich właściwości z właściwościami obiektów badanych, ustalenie prawdopodobnych granic popełnianych przy tym błędów i metody ich liczenia.

Pomiary stanowiły podstawę rozrachunków międzyludzkich i tak wrastały w nasze praktyczne życie, że nie widzieliśmy potrzeby tworzenia ich ogólnej nadbudowy teoretycznej, a tym samym rozwiązywania problemów podstawowych nauki o mierzeniu. Nie można chyba zapomnieć o tej nagromadzonej wielopokoleniowej wiedzy empirycznej miernictwa.

Nauka o pomiarach, metrologia, musi spełniać nieco inne zadania. Jak każda nauka zajmuje się nie obiektami materialnymi, lecz abstrakcjami obejmującymi całe klasy właściwości obiektów. Metrologia jest nauką stosunkowo młodą, rodzącą się na naszych oczach. Jej istotą jest teoretyczne, głównie matematyczne, ustalenie zasad całego miernictwa, bez ograniczenia się do opisu konkretnych jego części[1-5].

Jesteśmy w XXI wieku, gdzie technika i technologia oparte będą również na przepływie informacji, a nie jak dotąd, tylko energii. Ta jakościowa zmiana pociąga za sobą rzeczową i metodologiczną zmianę w wielu naukach. Jakościowa i ilościowa zmiana dopływającej informacji z otaczającego nas świata w nowym świetle stawia dotychczasowe problemy oraz wymusza tworzenie nowych koncepcji. Te nowe sytuacje wymagają rozwoju badań o charakterze interdyscyplinarnym. Do takich należy metrologia.

Życie codzienne uświadamia nam, że otacza nas świat realny, materialny od nas niezależny, który jest dla nas obiektem poznania. Nasza świadomość odwzorowuje ten świat w postaci słów i zdań, obrazów, liczb i tym podobnych abstrakcji stworzonych przez nas samych, jako odbiorców procesu poznawczego. Ten fakt uświadamia nam,

że musi istnieć ogniwo, tłumaczące materialną rzeczywistość na abstrakcję obrazów naszej świadomości.

Metodami poznawczymi mogą być obserwacje życia codziennego, w których zmysły wyzyskane są jako środki poznania. To my jesteśmy zespołem narzędzi poznania jak i odbiorcą wyników ich pracy. Ten dualizm ukazuje nam słabość bezpośredniej obserwacji jako metody poznawczej, ponieważ wyniki jej zależą w istotny sposób od indywidualnych cech obserwatora.

Metrologia należy do nauk poznawczych, stworzonych w celu uzyskania w świadomości człowieka obrazu otaczającego go świata. Jak w każdej gałęzi nauki, proces poznawczy przebiega co najmniej przez dwa ogniwa: przedmiot poznania i odbiorcę wyników procesu poznawczego. Przedmiotem poznania jest otaczający nas świat zbudowany z rzeczy martwych i wypełniony istotami żywymi. Na podstawie doświadczenia życia codziennego przyjmujemy, że świat ten jest realny, od nas niezależny.

Chwilowym stanom rzeczy i istot odpowiadają określone stany energetyczne otaczających je pól elektrycznych, cieplnych, optycznych i innych. W procesie poznawczym czerpiemy informacje o obiektach tego świata za pomocą sygnałów powstających przy zmianach tych pól[6-9].

Często w rozważaniach pojawia się pytanie: jakie metody i środki i kiedy mogą być wykorzystane do tworzenia naukowego poglądu na świat? Nauka jest to zbiór twierdzeń prawdziwych lub aktualnie powszechnie za prawdziwe uważanych, sprawdzonych doświadczalnie. Czy więc wyniki obserwacji bezpośredniej spełniają warunek powszechności, czy sprawdzalności doświadczalnej? Nie możemy udowodnić prawdziwości naszych poglądów na świat; możemy jedynie przyjąć aktualnie najprawdopodobniejszy stan ich interpretacji.

Metrologia w procesie swojego ciągłego rozwoju odkrywa nowe problemy pomiarowe, a nawet nieznane dotychczas zagadnienia poznawcze. Każde takie odkrycie prowadzi do powstania nowego kierunku. Oprócz tradycyjnych działów metrologii jak: podstawy metrologii, wzorce, metody pomiarowe, obróbka danych pomiarowych w celu znajdywania błędów, pojawiają się działy nowe jak: miernictwo stochastyczne, rozpoznawanie obrazów, technika systemów pomiarowych i wiele innych. Szczególne zainteresowania i doświadczenia autora obejmują metody nieinwazyjnej metrologii optycznej, fotonicznej i nanometrologii obiektów złożonych, w tym m.in. problematykę pomiarów wielkości cząstek ośrodków dyspersyjnych metodami optycznymi[10-17], w tym hybrydowe metody w opisie transmitancji światła w warunkach rozproszenia wielokrotnego dla monodyspersyjnego rozkładu wielkości cząstek[18, 19] oraz metody inwersyjne wykorzystujące sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej[20], wyko-

rzystanie spektralnych i polaryzacyjnych właściwości laserowego promieniowania rozproszonego w nieinwazyjnym badaniu materiałów kompozytowych[21-23], nieinwazyjną diagnostykę parametrów optycznych i właściwości rozproszeniowych pełnej krwi i erytrocytów[24], modelowania matematycznego rozproszenia światła przez cząstki niesferyczne i ich agregaty[25-27], modelowania i symulacji matematycznych przepływów wielofazowych, modelowania matematycznego trójwiązkowej anemometrii dopplerowskiej w określaniu położenia i prędkości cząstek w ośrodkach wielofazowych[28], a także nieinwazyjny pomiar *in situ* średnicy homogenicznych i niehomogenicznych, przezroczystych włókien wykorzystywanych m.in. w materiałach kompozytowych i jako światłowody telekomunikacyjne i pomiarowe[29-31].

Ten proces wewnętrznego zróżnicowania się metrologii sprawia wrażenie, że metrologia jako całość nie istnieje. Taki sposób postrzegania jest powierzchowny. Metrologia nie tylko różnicuje się i specjalizuje, ale również integruje poszczególne wąsko wyspecjalizowane swoje działy w ramach koncepcji ogólniejszych. Wynika to stąd, że za bardziej szczegółową analizą rzeczywistości postępuje pełniejsza synteza pojęciowa. Fakt ten umacnia charakter poznawczy metrologii.

Istotnym w metrologii jest to, że modele fizyczny i matematyczny są tylko hipotezami tak długo, aż zostaną zweryfikowane doświadczalnie, co ostatecznie dokonywane jest za pomocą pomiarów; wtedy stają się twierdzeniami i prawami. W swoim procesie poznawczym metrologia posługuje się analizą i syntezą w dziedzinie abstrakcji na obrazach rzeczywistości wyrażonych przez modele fizyczny i matematyczny. To właśnie na tych modelach zauważamy przykłady analogii „formalnych" między różnymi od strony zjawiskowej zagadnieniami, a podobnymi od strony pojęciowej.

Taki sposób myślenia leży u podstaw działalności metrologii, w której zagadnienia modelowania fizycznego rzeczywistych zjawisk dają się opisać za pomocą pojęć materii, energii (entropii), czasu i informacji (negentropii). Głównym celem metrologii jest przekształcenie modeli fizycznych zbudowanych z pojęć materii, energii, czasu, w modele metrologiczne i doświadczalna weryfikacja ich poprawności, w których to modele fizyczne uzupełniane są pojęciami informacji, tak by dostarczały wiadomości jakościowych (obserwacja) i ilościowych (pomiar). Podstawowy schemat działania metrologii odpowiada schematowi procesu poznawczego stanowiącego połączenia badanego obiektu, będącego celem poznania, z jego modelem fizycznym i modelami matematycznymi i metrologicznymi, pomiędzy którymi występują sprzężenia zwrotne, stanowiące odzwierciedlenie procesów weryfikacyjnych poszczególnych modeli [32, 33].

Droga powstania modelu fizycznego i matematycznego badanego zjawiska może mieć charakter:

- dedukcyjny, pozwalający poznać logiczne związki przyczynowo-skutkowe właściwości danego obiektu;
- indukcyjny, gdzie eksperyment może być podstawą uogólnionej hipotezy o cechach analogicznych do wnioskowania dedukcyjnego wyróżniającego dane zjawisko.

Weryfikacja modeli ma w fizyce zawsze charakter doświadczalny z tym jednak, że sprawdzenie doświadczalne w określonym przypadku nie jest jeszcze dowodem prawdziwości, a ujemny wynik weryfikacji doświadczalnej, nawet w pojedynczym przypadku, falsyfikuje hipotezę.

Metrologia jak każda samodzielna dyscyplina nauki ma swoje problemy podstawowe, tj. takie zagadnienia, bez rozwiązywania których nie mogłaby być nauką i rozwijać się. Do problemów tych należy przede wszystkim tworzenie schematów zastępczych rzeczywistości, jej modeli formalnych, odtwarzających rzeczywistość ze znanym i wystarczającym przybliżeniem. Modele te winna charakteryzować jasność i przystępność pozwalająca na doświadczalne sprawdzenie poprawności odtworzenia przez nie rzeczywistości, jak i pomiarowe ustalenie konkretnych wartości ich elementów.

Metrologia to rezultat przekształceń łączących w sobie wątki naukowe wielu istniejących dyscyplin teoretycznych jak i nauk inżynierskich.

Dowodem odrębności dziedziny jaką jest metrologia są:

- instytucje programowo nastawione na uprawianie tej dyscypliny,
- nowo powstające czasopisma, wydawnictwa, towarzystwa naukowe związane z pomiarami,
- zawiązana wspólnota ludzi nauki uprawiających tę dyscyplinę,
- określona problematyka i tematyka zbudowana na bazie teorii poznania z wynikającymi dla niej metodami i technikami badawczymi,
- fascynacja dziedziną i napływ nowych adeptów jak i specjalistów z innych dziedzin.

Warunki określające status metrologii jako dziedziny nauki nie mogą być spełnione od razu, nie stanowią więc one obecnie zamkniętego zbioru. Warunki te kształtują się w czasie trwania rozwoju dyscypliny, ulegają one modyfikacji bądź to na skutek nowo powstałych teorii, bądź też przeniesienia i wykorzystania schematów myślowych z innych dziedzin.

Interdyscyplinarny charakter metrologii wymaga czynnika integrującego zagadnienia wywodzące się z odrębnych dziedzin. Czynnikiem tym jest język opisu, podający związki jednoznacznie definiowane za pomocą prostych formuł[9, 34].

Krótko mówiąc miernictwo jest techniką wartościowania naszych spostrzeżeń świata materialnego, metrologia natomiast jest nauką o zasadach tego wartościowania. Chcąc mówić o pomiarach, trzeba wyodrębnić dziedzinę, w której mają być stosowane; mając mówić o metrologii trzeba określić prawa nauki i cele postrzegania, obserwacji oraz możliwości i potrzeby poznawania otaczającego świata. W obu przypadkach podmiotem jest człowiek, przedmiotem właściwości otaczającego świata. Ostatecznie zatem właściwości człowieka warunkują użyteczność wyników pomiarów i wyników dociekań metrologii.

Ostatnio coraz większą część działalności człowieka w pomiarach przejmują coraz to doskonalsze przyrządy i systemy pomiarowe; w metrologii natomiast człowieka uzupełniają urządzenia informacyjne [35]. Procesy te zmieniają szybko tworzywo i treść dotychczasowego mierzenia jak i zakres dotychczasowej metrologii. Znacznie trwalszy jest udział człowieka tak w technice pomiarowej jak i w nauce o mierzeniu, w metrologii. Od niego więc trzeba zacząć przy omawianiu zasad pomiarów.

Dlatego na początek rozważań omówmy jak postrzegamy rzeczywistość.

2. Postrzegana rzeczywistość

Obraz świata, który każdy z nas tworzy w swojej świadomości nie jest tym ostatecznym, bowiem nie jest on dany nam w sposób bezpośredni, a tworzony jest stopniowo w długim okresie czasu na podstawie naszych subiektywnych przeżyć. Przeżyciami tymi są nasze doświadczenia, na które składa się szereg czynników takich jak: nasza osobowość, inteligencja, sposób postrzegania, sposób przyjmowania i interpretowania informacji itp. Upływający czas i nowe nasze doświadczenie zmieniają postrzegany przez nas obraz świata. Ta „absolutna" rzeczywistość o świecie jest przedmiotem poznania, który my, przy niedoskonałości swoich zmysłów, budujemy w naszej świadomości.

Proces tego budowania to nic innego jak proces poznawczy. W procesie tym dokonujemy przyporządkowania rzeczywistym właściwościom obiektów (zjawisk) abstrakcyjne symbole – najczęściej matematyczne. Ten sposób przyporządkowania stanowi różnicę pomiędzy myśleniem naukowym, a codziennym, wynikającą nie ze swego charakteru, lecz swej kompletności. Wiedząc, że jesteśmy zespołem środków poznania oraz odbiorcą i interpretatorem jego wyników stawiamy sobie pytanie, jaka jest ta rzeczywistość, którą poszukujemy, jeżeli budowana jest ona na wrażeniach zmysłowych i zaprezentowana (zinterpretowana) w sposób osobniczo-subiektywny. Można tu przyjąć, że rzeczywistość zbudowana na wrażeniach zmysłowych jest tą rzeczywistością zmysłową, na której budowane są nauki ścisłe.

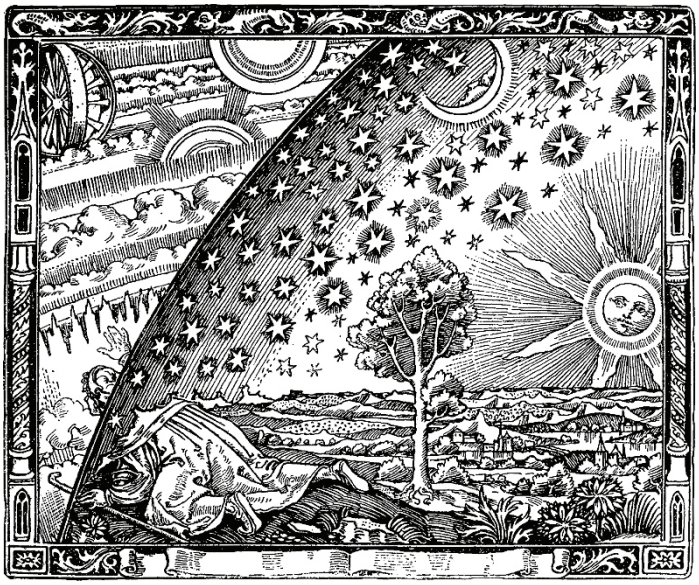
Jak w tworzeniu nauki eliminować ten element interpretatorski, który jest subiektywny i rzadko powtarzalny, bowiem każdy wynik obserwacji nie spełnia warunku powszechności? Jak w tworzeniu nauki rozumieć więc jej cel, którym jest osiągnięcie wiedzy obiektywnej?

W metrologii mamy do czynienia z tymi wrażeniami zmysłowymi, które można przedstawić w sposób ilościowy. Istotnym w metrologii jest to, że dowolność interpretatorską jak i upływający czas można eliminować poprzez wskazanie pewnych „poziomów" odniesienia wspólnych dla obserwatorów i niezależnych od nich. Te poziomy to wielkości (zjawiska) uznane za wzorcowe. Czy znalezienie wzorców (zjawisk powtarzalnych itp.) wprowadza porządek i prawidłowość w tak olbrzymiej różnorodności przeżyć wynikających z różnych dziedzin świata zmysłów?

Czy te wzorce to realne elementy tworzące ten świat? Czy sposoby komparacji, spełniające szereg wymogów co do stacjonarności komparacji, dokładności etc. są obiek-

tywne? I tak w tej zawiłej i długiej drodze mnożą się tego typu pytania. Wraz z doskonaleniem środków poznania część z nich eliminuje się, ale jesteśmy świadomi, że pojawiają się nowe. Istotnym jest w tym fakt, że człowiek będący głównym obserwatorem kieruje się w procesie poznania ciekawością, dociekliwością, zdumieniem, które to elementy wyzwalają żądzę poznania.

To człowiek stawia sobie za zadanie stworzenie obrazu świata nie wymagającego żadnych udoskonaleń i przedstawiającego ostateczną jego realność. Ten mechanizm kieruje procesem postępu i ciągłym usubtelnianiem obrazu świata. Bogacąc i doskonaląc obraz świata mamy świadomość ograniczoności tego, że cel ten można osiągnąć, albo przynajmniej udowodnić, że został on osiągnięty. Jestem przekonany, że żądza poznania nie pozwala nam zwątpić w to, że doskonalenie obrazu świata idzie w parze z poznaniem świata realnego.



Ryt przedstawiający obserwatora, odkrywającego piękno Wszechświata ponad firmamentem (C. Flammarion, 1888), jest metaforyczną ilustracją nieustannej ciekawości, dociekliwości i zdumienia człowieka, wyzwalających żądzę poznania w procesie poznawczym

Jak widzimy, to u podstaw poszukiwań naukowych leży idea oparcia ich na czymś, co byłoby ostateczną realnością, która wymyka się pełnemu poznaniu. I chyba ten realny świat jest zawsze celem dla coraz to doskonalszych metod pracy naukowej. Wynika stąd wniosek, że i metrologia należy do nauk poznawczych i przenika w sposób ciągły w inne gałęzie nauki, tworząc tym samym problemy interdyscyplinarne. Wkracza

ona w dziedzinę fizyki, fizjologii, psychologii i filozofii. Jest to chyba zjawisko naturalne, bowiem ostatecznym ogniwem procesu pomiarowego jest zawsze człowiek, a metrologia nie może istnieć bez metrologów.

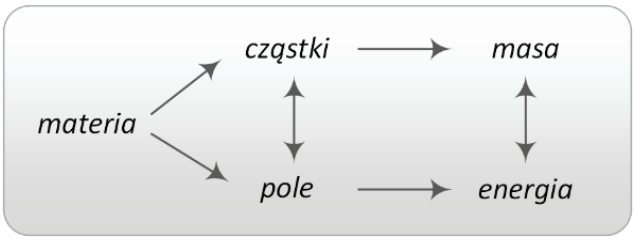
To, co wyodrębnia metrologię od innych gałęzi nauki to specyficzny sposób modelowania przez nią rzeczywistości – i to chyba jest ta jej swoistość. Rozwój metrologii stawia przed człowiekiem pytanie o możliwości techniczne i teoretyczne modelowania otaczającej go rzeczywistości, tej martwej i żywej materii.

3. Opis cech materii

Otaczająca nas rzeczywistość to materia, cząstki, atomy i molekuły, z których zbudowane są ciała martwe jak i organizmy żywe. Osiągnięcia fizyki atomowej, jądrowej i kwantowej w istotny sposób zmieniły pojęcia o budowie materii. Dziś cząstki elementarne nie są uważane za ściśle elementarne, mogą okazać się czymś złożonym. Te elementarne cząstki można dzisiaj zaszeregować w grupy: leptony, nukleony, hiperony i mezony. Wzajemne współoddziaływanie między cząstkami tworzy złożoność struktury świata.

Są to oddziaływania jądrowe, elektromagnetyczne i słabe. Obowiązują w nich zasady zachowania ładunku, liczby cząstek ciężkich, energii, pędu, spinu. Oddziaływanie cząstek na siebie jak i na inne cząstki dokonujące się za pośrednictwem wytworzonego przez siebie pola (elektromagnetycznego, nukleonowego, mezonowego) wiąże się z pewną energią zgodnie z równaniem Einsteina, a więc i z pewną masą. W myśl teorii Lorenza zarówno energia jak i masa cząstki w ruchu będzie odpowiednio większa od masy cząstek będących w bezruchu. Wzór Einsteina oznacza, że masa i energia są równoważne i mogą przechodzić jedna w drugą. Stąd cząstka wypromieniowująca energię traci równocześnie wskutek tego masę. Ten fakt pozwala zrozumieć materialną istotę promieniowania.

W teorii kwantów promieniowanie posiada strukturę cząsteczkową, rozchodzi się w przestrzeni w postaci fotonów o energii $h\nu$, gdzie h – stała Plancka, ν – częstość. Wprowadzenie przez de Broglie'a teorii ruchu falowego do mechaniki kwantowej pozwoliło przyporządkować każdej cząstce określone zjawisko falowe. E. Schrödinger wykorzystał te cechy kwantowo-falowe do określenia stanu kwantowego elektronów w atomie, a tym samym ukazał możliwość określenia parametrów ruchu elektronów w dowolnym miejscu pola. Powyżej zasygnalizowane relacje można obrazowo przedstawić następującym schematem:



będącym strukturalną prezentacją otaczającej nas rzeczywistości. Jeżeli uświadomimy sobie, że pomiędzy poszczególnymi elementami tego schematu występują określone relacje zapisane już znanymi prawami teorii klasycznej, jak również teorii kwantowej, to ta rzeczywistość, którą postrzegamy bezpośrednio i którą zapisaliśmy w sposób deterministyczny wymyka się nam w sposób nie zawsze dla nas zrozumiały. Przyczyną tego jest fakt, że obiekty postrzeganej przez nas rzeczywistości występują w postaci cząstek i pól; cząstki opisujemy trzema współrzędnymi i trzema pędami, natomiast pola nieskończoną liczbą parametrów (nieskończoną liczbą stopni swobody).

Mamy też świadomość tego, że rozróżnienie między cząstką i falą istnieje raczej w sposobie obserwacji i opisu przyjętego modelu matematycznego niż w samej cząstce czy fali. To dualne ujęcie materii dobrze tłumaczy wiele faktów tworzonych przez nas modeli abstrakcji otaczającej nas rzeczywistości. Układ współistniejących pól i cząstek w otaczającej nas rzeczywistości nie może trwać w określonej stabilności. Przykład takiej niestabilności prześledzimy na zjawisku promieniowania ciała doskonale czarnego.

W zakresie promieniowania widzialnego, w którym to my obserwujemy rzeczywistość, różne długości fali odbierane są jako różne barwy. Pod koniec XIX wieku uwagę uczonych zwróciło tzw. ciało doskonale czarne – ciało całkowicie pochłaniające padające na nie promieniowanie. Wskutek wielokrotnego odbicia na częściowo pochłaniających i rozpraszających ściankach „wnęki" obserwator zewnętrzny nie zaobserwuje wydostającego się z wnętrza światła i odniesie wrażenie „absolutnej" czerni.

Po podgrzaniu tak skonstruowanej „wnęki", jej ścianki zaczną promieniować. To właśnie promieniowanie nazywamy promieniowaniem ciała doskonale czarnego. Badanie empiryczne ilości energii emitowanego ciała doskonale czarnego zapoczątkowano w 1879 roku, kiedy to D. Stefan na podstawie analizy danych empirycznych sformułował tezę, że całkowita zdolność emisyjna dowolnego ciała jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej.

W 1884 roku L. Boltzmann stosując metody termodynamiki udowodnił, że teza ta jest prawdziwa. W wyniku tego powstało prawo Stefana-Boltzmanna oraz określono w wyniku wielu doświadczeń współczynnik $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m^2 K^4 zwany stałą Stefana-Boltzmanna.

W dalszych naszych rozważaniach rozpatrzymy rozkład widmowy promieniowania ciała doskonale czarnego, czyli przeanalizujemy właściwości funkcji Kirchhoffa.

Funkcje te są krzywymi empirycznymi, które opisał Kirchhoff. Rozkład ten próbowano odtworzyć w teorii klasycznej. Model taki przedstawili Rayleigh i Jeans. W swoich rozważaniach założyli, że ścianki naczynia, w którym zamknięte jest promieniowanie

składają się z oscylatorów (elementów materii), które w sposób ciągły pochłaniają i emitują to promieniowanie, pozostając z nim w stanie równowagi termodynamicznej. Każdy oscylator ma przyporządkowaną sobie falę o określonej długości i polaryzacji, reprezentuje więc jeden stopień swobody układu. W myśl zasady ekwipartycji energii określili oni, jaka część energii przypada na jeden oscylator, a następnie wyznaczyli zdolność emisyjną ciała doskonale czarnego:

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{\mathrm{c}^2}\mathrm{k}T \tag{3.1}$$

Tak uzyskany model był zgodny z danymi eksperymentu w obszarze małych częstości promieniowania ν. Wyrażenie (3.1) pokazuje nam monotoniczny charakter zmian emisyjności ciała w funkcji częstości, co wskazuje, że całkowita zdolność emisyjna ciała doskonale czarnego dąży do nieskończoności. Ten to fakt pokazał, że stosowanie zasad fizyki klasycznej w badaniach rozkładu widmowego ciała doskonale czarnego daje wyniki sprzeczne z zasadą zachowania energii. Wyjaśnienie tego zjawiska przedstawił 14 grudnia 1900 na posiedzeniu Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego Max Planck. Zaproponowany, a następnie wyprowadzony wzór:

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{\mathrm{c}^2}\frac{\mathrm{h}\nu}{\mathrm{e}^{\mathrm{h}\nu/\mathrm{k}T} - 1} \tag{3.2}$$

poprawnie opisuje wyniki doświadczalne. Wprowadzając go Planck zrobił założenie, że promieniujące elementy materii – nazywane wówczas oscylatorami – mają swoje charakterystyczne częstości drgań ν, że oscylator może pochłaniać lub tracić energię tylko określonymi porcjami $h\nu$, gdzie h jest stałą Plancka. Ten grudniowy dzień w roku 1900 stał się dniem narodzin fizyki kwantowej.

To wydarzenie ukazuje nam, że struktura cząstkowo-polowa materii pozwala na dokładniejsze poznanie właściwości materii, jej indywidualności i różnorodności. Prawo Plancka utorowało drogę dalszym odkryciom praw kwantowych, szczególnie bohrowskiemu modelowi atomu oraz einsteinowskiemu pojęciu fotonu, jako kwantu promieniowania elektromagnetycznego.

Te fakty uświadamiają nam, że atom we wszystkich stanach kwantowych poza stanem podstawowym jest układem nietrwałym, który może rozpaść się na atom o niższym stanie energetycznym oraz foton zmierzając do stanu podstawowego. Istotnym z punktu widzenia pomiaru jest tutaj problem czasu, jakim dysponujemy w stanie nietrwałym. Czas ten jest ograniczony i jest rzędu średniego czasu życia układu w tym stanie. Istotnym jest, że chcąc mieć pewność, że układ znajduje się w stanie o ustalonej energii musielibyśmy go obserwować nieskończenie długo.

Stąd przy pomiarze energii popełniamy pewien błąd, jeżeli dokonujemy pomiarów w czasie skończonym. A takim czasem dysponujemy w układzie nietrwałym – oczywiście skończonym. Stąd masa stanu nietrwałego nie może być, z przyczyn zasadniczych, określona w sposób dokładny. Tylko stan podstawowy zapewnia dokładny pomiar energii (masy).

4. Zasada przyczynowości

Zasada przyczynowości określa nam relację pomiędzy przyczyną działającą na obiekt w dokładnie określonym stanie, a skutkiem powiązanym związkiem jednoznacznym z tą przyczyną. Ta jednoznaczność pozwala nam nie tylko przewidywać stany przyszłe obiektu fizycznego, ale również rekonstruować przeszłość.

W ujęciu ogólnym zasada przyczynowości wyraża pogląd, że w otaczającej nas rzeczywistości panuje określony porządek. Znaczy to, że nic nie dzieje się bez przyczyny, jak również to, że określonym przyczynom towarzyszą określone skutki. Pierwsza myśl odnosi się do przyrody, w której nie ma zjawisk izolowanych i dotyczy materii ożywionej i nieożywionej. Druga myśl dotyczy tylko materii nieożywionej w skali makroskopowej.

Mówiąc o przyczynowości, zawsze nasuwa się pytanie: czy związek przyczynowy jest czymś absolutnym, nienaruszalnym?

Jak było dawniej?

„Według Rene Descartes'a, którego często się nazywa ojcem nowoczesnej filozofii, Bóg stworzył wszystkie prawa natury i ducha na mocy swej własnej decyzji, zgodnie z celami tak wzniosłymi, że umysł ludzki nie jest zdolny pojąć ich w pełni. Dlatego też z punktu widzenia systemu Descartes'a istnienie cudów i tajemnic nie jest bynajmniej wykluczone.

W przeciwieństwie do tego Bóg Barucha Spinozy jest Bogiem harmonii i porządku, przenika cały świat, tak że samo prawo powszechnego związku przyczynowego należy uważać za boskie, a więc za wszechobejmujące i absolutnie nienaruszalne. Dlatego też w świecie Spinozy nie ma żadnego przypadku ani cudu.

Czy związek przyczynowy jest czymś absolutnym, nienaruszalnym?

Według Gottfrieda Wilhelma Leibniza, Bóg zbudował pierwotnie cały świat zgodnie z jednolitym planem, odpowiadającym jego najwyższej mądrości i z góry raz na zawsze podporządkował każdą poszczególną rzecz swoistym prawom, które nią rządzą, tak że de facto zachowuje się ona i rozwija w sposób niezależny od wszystkich pozostałych rzeczy – zgodnie tylko z własną istotą. Dlatego też u Leibniza wzajemne oddziaływanie między dwiema rzeczami jest tylko pozorne. – Jak widzimy: ilu filozofów, tyle teorii. Tą drogą naprawdę nie można daleko zajść."[*]

Czym są więc prawa przyczynowe? Jak wiemy zasada przyczynowości stwierdza ogólnie o przyczynie i skutku, natomiast prawa określają cechy reakcji skutku i przyczyny ze szczególnym określeniem co za skutek i przyczynę rozpatrujemy, np. rzecz, właściwość materii, zdarzenia.

Warunek ten ukazuje nam, że prawa przyczynowe w różnych naukach są odrębne. Jakie one są w metrologii? Myślę, że każdy pomiarowiec, przyczynowość pojmuje w kontekście określonego stanu układu (obiektu, pola zjawiska) w danej chwili z uwzględnieniem czynników wpływających, który to stan w następstwie chwili zmienia się w inny stan tegoż układu. Stan poprzedni układu wraz z czynnikami wpływającymi jest przyczyną, stan późniejszy – skutkiem.

Tak podana definicja może być w wielu przypadkach zbyt ogólnikowa. Uświadamiamy sobie, że w świecie realnym nie może być zupełnych powtórzeń, bowiem zjawiska przyrody są nieodwracalne, zgodnie z drugą zasadą termodynamiki. Przyczynowość w tym znaczeniu klasycznym nazywana jest jednoznaczną. To ona występuje w stosowanych przez fizykę klasycznych prawach Newtona, Maxwella itp. To dla tego rodzaju związków przyczynowych istnieje postulat ciągłości procesów przyrody w czasie i przestrzeni.

Jak ta przyczynowość wygląda w pojęciach fizyki współczesnej tj. w fizyce atomowej, mechanice kwantowej? Traci ona sens w stosunku do indywidualnych zdarzeń atomowych, zachowując jednak ograniczoną, w znaczeniu statystycznym ważność dla zjawisk zbiorowych, w których uczestniczy wielka ilość jednakowych składników świata atomowego.

Znamienną jest tu myśl, którą J. V. Neumann podał w swoim dziele *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*: *„niemożliwe jest sprowadzenie przewidywania procesów atomowych do jednoznaczności bez naruszenia podstaw mechaniki kwantowej; jak również zawarł w nim myśl, że obecnie nie ma powodu ani usprawiedliwienia, abyśmy mówili o przyczynowości w naturze, żadne bowiem doświadczenie nie stwier-*

[*] Max Planck, odczyt wygłoszony w Pruskiej Akademii Nauk 17 lutego 1923.

dza jej istnienia: makroskopowe doświadczenia są do tego celu zasadniczo nieprzydatne, jedna zaś znana teoria, która jest w zgodzie z naszymi doświadczeniami nad procesami elementarnymi, mianowicie mechanika kwantowa jej przeczy".

Problem przyczynowości jest tematem licznych dyskusji od kilku stuleci. Dyskusje te ożywiły się z chwilą powstania mechaniki kwantowej. Zasada przyczynowości była poddana ostrej krytyce przez wielu filozofów (Hume, Mili, Wittgenstein...), a głównym argumentem było twierdzenie, że nie można poznać związku przyczynowego między przyczyną i skutkiem, lecz jedynie można stwierdzić następstwo czasowe skutku po przyczynie.

Mówiąc o przyczynowości zwykle utożsamiamy to z determinizmem mechaniki klasycznej. Mówiąc o zjawiskach kwantowych twierdzimy, że przyczynowość traci swój sens. Czy jest to prawdziwe? Czy funkcja falowa w mechanice kwantowej nie podlega prawom deterministycznym? Chyba trzeba przyjąć, że przy przejściu z mechaniki klasycznej do mechaniki kwantowej przyczynowość zmienia swoje znaczenie. To nowe rozumienie przyczynowości wyrażone jest rozróżnieniem między przyczynowością jednoznaczną i wieloznaczną.

Zgodnie z zasadą przyczynowości jednoznacznej zawsze z *A* wynika *B*. W przypadku przyczynowości wieloznacznej z *A* wynika *B1* z prawdopodobieństwem *P1*, lub *B2* z prawdopodobieństwem *P2* lub *B3* z prawdopodobieństwem *P3*... itd., przy czym suma wszystkich prawdopodobieństw, *P1* + *P2* + *P3* +..., musi być równa jedności. Jak możemy zauważyć, przyczynowość zarówno jednoznaczna jak i wieloznaczna, sprowadza się do żądania ażeby stan układu materialnego był związany ze stanem bezpośrednio poprzedzającym czy to na mocy konieczności, czy prawdopodobieństwa; to następstwo stanów nie przeszkadza w łączeniu się poszczególnych układów w całości hierarchiczne.

Mechanika kwantowa ustanawia między częściami składowymi układu atomowego związek bardziej wielostronny i ścisły, aniżeli fizyka klasyczna. Całość układu jest nadrzędna do samych części, o czym świadczy równanie, w którym funkcja stanu reprezentuje cały układ i służy do opisu wszystkich jego właściwości. Istotnym jest to, że w mechanice kwantowej stan układu nie jest opisany modelem matematycznym, który określałby go w sposób jednoznaczny, lecz opisany jest wyrażeniem ukazującym probabilistyczną charakterystykę rozważanego układu.

5. Determinizm i indeterminizm

Nieustający rozwój nauk obejmujący większość zjawisk fizycznych, chemicznych i biologicznych wciąga nas w skomplikowaną sieć przyczyn i skutków sięgających nie tylko Ziemi, ale już przestrzeni kosmicznej i Wszechświata. Ten fakt wyzwala w nas uczucie zwątpienia, czy to co poznaliśmy i to co robimy w pełni rozumiemy? Czy pojęcia energii, materii, czasu, przestrzeni itp. są tymi samymi pojęciami, które poznawaliśmy ucząc się mechaniki klasycznej? Pomocnym w wyjaśnieniu tego jest pogląd deterministyczny oraz indeterministyczny, które są nierozłączne w tworzonych od wieków koncepcjach świata. Mamy świadomość, że pojęcia te należą do filozofii. Czy można daną dziedzinę nauki łączyć z filozofią oraz czy można rozwijać naukę bez filozofii [36]?

Akceptując taki pogląd prześledźmy jak kształtowały się deterministyczne i indeterministyczne koncepcje świata pod wpływem rozwoju nauki. Determinizm jest poglądem zakładającym we wszechświecie określoną zależność stanów późniejszych od poprzedzających go stanów wcześniej. Ta maksyma stanowi podstawę formułowania teorii fizycznych, chemicznych, socjologicznych itp. gdzie postulowane jest jednoznaczne przewidywanie zjawisk i to zarówno w sensie poznawczym jak i metodologicznym. To u podstaw determinizmu leży przekonanie o istnieniu ścisłych i powszechnych praw rzeczywistości. Z dziejów znamy, że ta rzeczywistość determinowana jest przez bogów. W średniowieczu analizowano przyczynową zależność bytów od siebie i wskazywano wzajemne ich relacje. To ze średniowiecza pochodzą koncepcje, że zjawiska wszelkiego typu są ściśle ze sobą powiązane przyczynowo i tak zależne, że przyjęto w świecie brak wolności, a w przypadku człowieka odpowiedzialności.

Czasy nowożytne, kiedy to deterministyczna koncepcja świata kształtowała się pod wpływem rozwoju nauk, utorowały drogę koncepcji, gdzie świat jest mechanizmem, w którym zdarzenia raz na zawsze ustalone dokonują się według zawsze obowiązujących praw. To w prawach Galileusza widzimy determinizm wynikający z obserwacji zjawisk wskazujących na istnienie praw przyczynowych. W tym to czasie R. Descartes zastępuje koncepcję mechanistyczną, dynamiczną koncepcją przyrody, w której ciała ulegają zmianom mechanicznym pod wpływem zewnętrznych oddziaływań.

B. Spinoza teorią powszechnego porządku przyrody, gdzie mogą istnieć tylko układy przyczynowo-skutkowe, eliminował przypadek i wolność z otaczającej rzeczywistości, która jest mechanizmem, a człowiek i jego działania tworem mechanicz-

nie rozwijającego się otoczenia. Ten deterministyczny pogląd potwierdzali swoimi wywodami B. Pascal, P.S. Laplace, I. Newton, I. Kant, G.W.F. Hegel, J. Lachelier stwarzając tym samym deterministyczną koncepcję świata, którą można również opisywać sferę psychiczną człowieka.

To J.F. Herbert twierdził, że psychiczne życie człowieka jest tworem wzajemnie oddziaływujących elementów określonych przez prawa, a osiągnięcia człowieka (jego odkrycia), to twory materialne podlegające zdeterminowanemu mechanizmowi wyobrażeń. W wieku dziewiętnastym, zdominowanym przez rozwój nauki, utrwalił się mechanistyczny model otaczającej rzeczywistości. J. Lachelier uważał, że przyroda byłaby całkowicie niezrozumiała, gdyby nie panował powszechny determinizm. To H. Spencer twierdził, że obserwowane zjawiska różnią się złożonością, a nie naturą, którą należy odczytywać w sposób mechanistyczny w relacjach materii, siły i ruchu.

Te i inne poglądy nie były przyjmowane bezkrytycznie. Reakcją na tak dynamiczny rozwój determinizmu były pojawiające się poglądy ograniczające jego zasięg, a niekiedy zgoła je odrzucające. Determinizm wg H. Bergsona należy odczytywać jako konstrukcję intelektualną, a otaczającą nas rzeczywistość jako samoistny i twórczy twór kierowany siłami wewnętrznymi, dla których to otaczająca bezwładna materia jest elementem hamującym.

Można przytoczyć tu różne punkty widzenia negacji np. Ch. Dumana, P. Ferriera, H. Reichenbacha, E. Macka; czy bardzo skrajne stanowisko B. Russella uznającego, że determinizm jest prymitywny i nienaukowy, a każda przyczyna może wywołać różne skutki. Fascynacja determinizmu jak i jego nieakceptacja przybierały różne formy i jak widzimy dyktowane były nowymi wynikami badań.

To badania świata mikrocząstek stanowiły tu przełomowy moment i dały początek rodzącego się indeterminizmu, gdzie zasada przyczynowości i jej sposób stosowania pozostał pod znakiem zapytania. Aby lepiej ukierunkować nasze rozważania i prowadzoną tu systematykę przypomnijmy, że ze względu na dziedzinę wyjściową wyróżniamy:

- determinizm przyrodniczy,
- determinizm filozoficzny,
- determinizm psychospołeczny,
- determinizm teologiczny.

To, czym się zajmujemy tworząc coraz to doskonalsze narzędzia pomiarowe, uzupełniające nasze zmysły w poznaniu otaczającej nas rzeczywistości, określa determinizm przyrodniczy, a w szczególności determinizm mechanistyczny, w myśl którego

formułowano prawa fizyki klasycznej przyjmując, że w świecie panuje powszechna przyczynowość i stąd wszelkie zdarzenia mogą być przewidywalne w myśl stworzonych i zapisanych praw przyrody. To pod wpływem tych postulatów determinizmu powszechnego rozciągano je na świat biologii i socjologii, traktując tym samym życie jako nieprzerwany ciąg zjawisk opartych na mechanizmie podziału komórki, a istotę żywą jako maszynę fizyko-chemiczną.

Wracając do indeterminizmu poznajmy ważniejsze fakty z historii fizyki współczesnej, aby móc głębiej zastanowić się nad znaczeniem tak zasadniczej zmiany punktu widzenia. To N. Bohr, M. Planck, W.C. Heisenberg, Cz. Białobrzeski oraz P.A.M. Dirac w duchu indeterminizmu zinterpretowali nieprzydatność pojęć i praw mechaniki klasycznej do opisu zjawisk kwantowych. I tak:

- Bohr twierdził, że zasada determinizmu nie ma zastosowania w fizyce kwantowej, ponieważ cząstka elementarna nie jest ściśle zlokalizowana w czasie i przestrzeni, a tym samym nie może być określony jej stan początkowy, a tym bardziej następny.
- Planck utrzymywał, że światem mikrofizyki rządzą odrębne prawa, gdzie np. czas pozostawienia atomu w stanie stacjonarnym jest nieokreślony jak i nie można przewidzieć zmiany danego stanu.
- Heisenberg twierdził, że wyniki obserwacji nie pozwalają na wyznaczenie położenia i pędu cząstki niezależnie od błędów przypadkowych. To rozwój mechaniki kwantowej kwestionował zasady deterministycznego opisu zjawisk – bowiem jednoznaczne scharakteryzowanie układów mikroskopowych jest niemożliwe.

Aby zrozumieć tę zasadniczą zmianę punktu widzenia, która stała się niezbędna w fizyce współczesnej należy prześledzić ważniejsze fakty z mechaniki kwantowej.

„Bóg nie tylko gra w kości, ale czasami rzuca je tam gdzie nie mogą być widziane" (S. Hawking). Czy model Wszechświata według mechaniki kwantowej tłumaczy fundamenty budowy i funkcjonowania rzeczywistości?

6. Zasada nieoznaczoności Heisenberga

Korpuskularno-falowa natura cząstek w mechanice kwantowej oraz statystyczny charakter funkcji falowej określającej położenie cząstki w przestrzeni rodzi wątpliwości i stawia pytanie, gdzie jest granica stosowalności pojęć fizyki klasycznej w mikroświecie.

Pytanie o stosowalności przyjętych pojęć nie jest niczym nowym w nowo tworzonej dziedzinie, bowiem w samej fizyce klasycznej znamy takie problemy. I tak np. temperatury jednej cząstki, czy punktowej lokalizacji w przypadku fali elektromagnetycznej.

Właściwości falowe mikrocząstek wprowadzają ograniczenia co do możliwości określenia równocześnie współrzędnych cząstki oraz jej pędu stosując klasyczne pojęcie pędu i położenia[37, 38].

W fizyce klasycznej można wykazać, że występowanie w przestrzeni Δx ciągu fal jest związane z faktem, że musi on zawierać fale o częstościach z określonego Δw tzn. o liczbach falowych z przedziału Δk, a tym samym pomiędzy tymi wielkościami istnieje związek $\Delta x \cdot \Delta k \geq 1$. Zależność ta jest prawdziwa dla wszystkich zjawisk falowych, czyli również fali de Broglie'a cząstki poruszającej się wzdłuż osi x z pędem $p_x = k\hbar$. Stąd możemy zapisać:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar \tag{6.1}$$

Biorąc pod uwagę trójwymiarową przestrzeń, w której porusza się cząstka możemy zapisać:

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar \tag{6.2}$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar \tag{6.3}$$

Wyrażenia (6.1)–(6.3) opisują tzw. zasadę nieoznaczoności Heisenberga. Werner Heisenberg wykazał w sposób ogólny, że kwantowo-mechaniczny opis stanu cząstki nie może jednocześnie określać położenia i pędu cząstki. Zgodnie z mechaniką kwantową może istnieć stan odpowiadający określonemu pędowi cząstki, ale jej położenie będzie wówczas nieokreślone. I odwrotnie, gdy kwantowy opis cząstki zawiera informację o określonym położeniu cząstki, wówczas nie może on zawierać informacji o określonym pędzie.

W stanach pośrednich, gdzie położenie jest określone przedziałem Δx i pęd Δp, związkiem łączącym te wielkości jest zależność (6.1).

Zasada nieoznaczoności w mechanice kwantowej narzuca ograniczenie na możliwość opisu toru, po którym porusza się cząstka. W mechanice klasycznej poruszająca się cząstka ma określone w dowolnej chwili swoje współrzędne x, y, z oraz pęd p_x, p_y i p_z. Taki przypadek jest możliwy w mechanice kwantowej i dotyczy on przebywania cząstki w makroskopowej przestrzeni. Wówczas istnieje możliwość zarejestrowania cząstki na kliszy fotograficznej. Położenie elektronu ustalone jest z dokładnością wynikającą z liniowych rozmiarów ziarna emulsji fotograficznej ($\Delta x \approx 10^{-6}$ m). Stąd niedokładność określenia prędkości w myśl równania (6.1) wynosi $\Delta v = 10^2$ m/s. W praktyce rejestrowane są ślady prędkich elektronów, których prędkość v jest rzędu 10^6 m/s.

Błąd rejestracji torów takich elektronów jest rzędu 10^{-2}% więc w praktyce makroskopowej można mówić o ruchu elektronu po określonym torze z dokładnie znaną w każdym punkcie swego toru prędkością. Gdy ten ruch elektronu rozpatrujemy w atomie, gdzie $\Delta x = 10^{-10}$ m, to nieoznaczoność prędkości elektronu wówczas wynosi $\Delta v_x = 10^6$ m/s, co odpowiada realnym prędkościom elektronów, czyli $v \approx \Delta v_x$. Stąd nie można mówić o ruchu elektronu w atomie po ściśle określonym torze z dokładnie znaną prędkością w każdym jego punkcie. Zwróćmy uwagę, że dla obiektów makroskopowych, dla których właściwości falowe (fale de Broglie'a) nie ujawniają się, zasada nieoznaczoności nie odgrywa żadnej roli [39].

Zasada nieoznaczoności dotyczy nie tylko położenia i pędu. W formalizmie mechaniki kwantowej występują i inne pary tzw. wielkości kanonicznie sprzężone. Przykładem może być tu czas t i energia E, które spełniają zasadę nieoznaczoności:

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar \tag{6.4}$$

W praktyce oznacza to, że na wykonanie jakiegokolwiek pomiaru w stanie nietrwałym mamy ograniczony czas – rzędu średniego czasu życia układu w tym stanie. Widzimy, że chcąc mieć pewność, że układ znajduje się w stanie o ustalonej energii winniśmy obserwować go nieskończenie długo. Podobnie chcąc przekonać się, że fala jest falą płaską winniśmy ją obserwować w całej nieskończonej przestrzeni.

Stany nietrwałe muszą więc charakteryzować się pewnym rozmyciem energii, które w ich układzie spoczynkowym odpowiada rozmyciu ich masy. Widzimy więc, że tylko stan podstawowy będzie stanem nierozmytym, natomiast wszystkie stany wzbudzone nie będą miały dokładnie określonej wartości energii. Stąd, też linie emitowane przez atom mają pewną naturalną szerokość, co oznacza, że zwiększając dokładność pomiaru nie uczynimy tą linię węższą.

7. Zagadnienie pomiaru w mikroświecie

Rozważania poprzedniego rozdziału ukazały nam raczej formalną stronę zasady nieoznaczoności. Jakie są zatem związki z rzeczywiście prowadzonymi doświadczeniami? Sam Heisenberg uważał, że zasada nieoznaczoności wyznacza doświadczalną granicę dokładności, z jaką można wykonywać równocześnie pomiary wielkości kanonicznie sprzężonych. Jego eksperymenty myślowe potwierdziły jego tezę[40].

Heisenberg wiązał ten fakt z przekonaniem, że żaden pomiar wykonany w mikroświecie nie może pominąć oddziaływania mierzonego obiektu z urządzeniem pomiarowym. W miernictwie wielkości fizyki klasycznej zagadnienie to minimalizowane jest drogą doskonalenia urządzeń pomiarowych, które ukazywane jest przez wnikliwszą analizę przyjętych modeli, czy to badanego zjawiska fizycznego, czy już skonstruowanego przyrządu pomiarowego. W świecie mikrofizyki ograniczenia pomiarowe nie wynikają z technicznej niedoskonałości przyrządów.

Mówiąc o pomiarze w mikroświecie winniśmy uzmysłowić sobie dwa fakty. Pierwszy – istnienie związków nieoznaczoności, który podsuwa nam wątpliwość świadomego stosowania pojęć fizyki klasycznej do opisu stanu mikroobiektów. Drugi – że przeprowadzane doświadczenia informujące nas o stanie mikroobiektów mają charakter makroskopowy (np. rejestracja drogi elektronu na kliszy fotograficznej), a tym samym muszą być one oparte o zasady tych teorii, które ją stworzyły tzn. mechanikę klasyczną, elektrodynamikę itp., a otrzymywane z nich informacje muszą być opisane pojęciami fizyki klasycznej.

Mamy świadomość, że proces oddziaływania urządzenia pomiarowego z badanym obiektem jest procesem obiektywnym. W przypadku oddziaływania z obiektem makroskopowym jest to oddziaływanie pomiędzy dwoma układami makroskopowymi, a w przypadku obiektów mikroskopowych w wyniku obiektywnie istniejącej dwoistości natury mikroobiektów sama czynność wykonania pomiaru np. położenia mikrocząstki powoduje zmianę jego pędu.

Zmiany tej nie możemy technicznie zmierzyć, ale możemy ją wyznaczyć ze związku nieoznaczoności Heisenberga. Nie możemy, tym samym pominąć oddziaływania urządzenia pomiarowego na badany obiekt, czyli stosować pojęcia przedmiotu badanego w oderwaniu od badającego przedmiotu.

Wyniki pomiarów zależne są więc od obserwatora. Tej roli obserwatora i aparatury nie można było tak doceniać dopóki badania ograniczały się do skali makroskopowej. To badania w skali mikroskopowej ujawniły jej „zaskakującą" dla nas rolę[41].

Mechanika kwantowa nie może dostarczyć nam informacji, gdzie w przestrzeni znajduje się cząstka. Może natomiast za pomocą swojego formalizmu jakim jest równanie Schrödingera wyliczyć ewolucję czasową funkcji falowej cząstki w przestrzeni. Akt pomiaru zmienia funkcję falową w sposób nieciągły. Spośród wszystkich możliwych wartości dopuszczalnych przez funkcję falową, pomiar określa tę jedną możliwość, która rzeczywiście zachodzi[42, 43].

Ciekawa jest myśl, którą wypowiedział Heisenberg: *„Tak więc przejście od tego co możliwe do tego co rzeczywiste, dokonuje się podczas aktu obserwacji. Jeżeli chcemy opisać przebieg zdarzenia w świecie atomów, musimy zdać sobie sprawę z tego, że słowo 'zachodzi' może dotyczyć tylko aktu obserwacji, nie zaś sytuacji między dwiema obserwacjami"*.

Myślę, że każde zdarzenie zachodzące w rzeczywistości na skutek wpływu wielu wzajemnie oddziaływujących na siebie procesów, nie może być określone zupełnie ściśle. Dają się podporządkować wyidealizowane zdarzenia w fizycznym obrazie świata, odosobnione od otoczenia i uwolnione od nie dających się skontrolować wpływów czynników ubocznych.

Stąd jak widzimy w obrazie świata fizycznego są obecne nadto twory czysto umysłowe, nie występujące w realnym świecie jak np. układ współrzędnych kartezjańskich. Tego rodzaju twór (model) odgrywa rolę pomocniczą. Wyniki rzeczywistych naszych obserwacji pomiarów wyrażamy w symbolach obrazu „przenosząc" go tym samym ze świata rzeczywistego do modelu. Następnie na tych symbolach dokonujemy operacji arytmetycznych w celu uzyskania możliwych następstw, wyniki wyrażone symbolicznie określają nam te wielkości, które obserwowaliśmy i mierzyliśmy.

To te rozważania tworzyły niekończące się dyskusje, które szukały odpowiedzi na pytanie, czy koncepcja fizycznego obrazu świata może ułatwić wyjście z sytuacji, jaka wytworzyła się wskutek odkrytej przez Heisenberga zasady nieoznaczoności. Wśród filozofów rodzą się pytania, czy nieoznaczoność Heisenberga ma charakter ontologiczny, tzn. cząstka sama w sobie po prostu nie ma jednoznacznie określonego równocześnie położenia i pędu, czy też ma ona charakter epistemologiczny, tzn. nieoznaczoność istnieje nie w niej samej, lecz stworzonej przez nas wiedzy o niej?

8. Przyczynowość a indeterminizm w metrologii

Przytoczone elementy pojęciowe mechaniki kwantowej, a w szczególności zasada nieoznaczoności powoduje, że w świecie cząstek zasady determinizmu nie mogą być stosowane. Zanim zaczniemy rozwijać problem przyczynowości w tych nowych warunkach omówimy jeszcze pojęcie komplementarności, którą wprowadził Niels Bohr. Przez wielkości komplementarne (dopełniające się) w fizyce współczesnej nazywamy te wielkości, które nie mogą być poznane jednocześnie. Należą do nich np.: położenie – prędkość, czas – energia, fala – cząstka itp. Próba czasoprzestrzennego opisu elektronu jako zlokalizowanej cząstki jest komplementarna względem opisu deterministycznego.

To znaczy, że chcąc określić położenie elektronu w czasoprzestrzeni, możemy to zrobić wykonując odpowiedni pomiar, wiedząc jednocześnie, że tracimy informację o czasowej ewolucji badanego układu. Jeżeli natomiast interesuje nas czasowa ewolucja układu to badamy ją za pomocą deterministycznie zachowującej się funkcji falowej, ale wtedy mamy prawdopodobieństwo, a nie dokładne położenie elektronu. Niech innym przykładem poznania będzie ta sama cząstka, która w określonych warunkach obserwacji, przy określonych urządzeniach pomiarowych, postrzegana jest jako fala, w innych zaś warunkach i przy zastosowaniu odmiennej aparatury pomiarowej – jako cząstka.

Nasuwa się pytanie czy może ona jako przedmiot poznania być poznana naraz w obu postaciach. Biorąc pod uwagę fakt, że obserwatorem i eksperymentatorem dobierającym stosowne urządzenia pomiarowe winien być metrolog, zachodzi pytanie czy wobec wyżej przedstawionych przykładów ma on zachować stanowisko realistyczne i wnioskować na podstawie tego, co obserwowalne i mierzalne.

Myślę, że ten problem jest istotny z filozoficznego punktu widzenia i chyba znajduje odpowiedź na pytanie: czy w nauce można utożsamiać otaczającą, dostępną naszym zmysłom w sposób jakościowy przyrodę, z niezależną od podmiotów poznających rzeczywistością. Przed metrologiem są do wyboru dwa stanowiska poznawcze: realizmu krytycznego oraz radykalnego pozytywizmu lub fenomenalizmu.

Myślę, że metrolog przyjmując stanowisko realisty krytycznego nie sądzi, że elektron jest „rzeczą w sobie", podobnie jak łyżka czy but, cząstka elementarna fizyki współczesnej jest chyba dla nas przejawem rzeczywistości obiektywnej, niezależnej od poznających podmiotów. Metrolog może być realistą, nie będąc metafizykiem,

bowiem w nauce stanowisko realistyczne jest racjonalniejsze od idealistycznego czy fenomenalistycznego.

Z chwilą rozwoju indeterminizmu zasada przyczynowości była krytykowana, bowiem rozpowszechniła się opinia utożsamiająca przyczynowość z determinizmem mechaniki klasycznej. Jako argument podnoszono kwestię, że nie możemy poznać związku przyczynowego między przyczyną i skutkiem, lecz stwierdzamy jedynie następstwo czasowe skutku po przyczynie.

Wprowadzenie pojęcia przyczynowości jednoznacznej i wieloznacznej będącej przejawem realizmu naukowego pozwala sądzić przy przejściu od mechaniki klasycznej do mechaniki kwantowej, że przyczynowość nie zostaje wyeliminowana, lecz zmienia się jej rozumienie. W myśl przyczynowości jednoznacznej zachowuje się funkcja falowa, natomiast zasadę przyczynowości wieloznacznej stosuje się do stanów cząstek. Istotnym jest również to, że termin „indeterminizm" nie oznacza braku przyczyny.

W metrologii przyczynowość przy przejściu z mechaniki klasycznej do mechaniki kwantowej zmienia swoje znaczenie, wyraża się ono w sposobie oddziaływania przyrządu pomiarowego z badanym obiektem. I tak dla obiektów makroskopowych stosowane są pojęcia klasyczne jak pojęcie współrzędnych i pędu, a proces oddziaływania zachodzi w przestrzeni i czasie i jest określany jednoznacznie przez przyjęte modele (teorie). Mamy świadomość, że sposób oddziaływania przyrządu pomiarowego w przypadku ośrodka makroskopowego jest oddziaływaniem pomiędzy dwoma układami makroskopowymi i dysponujemy wystarczającym aparatem pojęć fizyki klasycznej do jego pełnego opisu.

W przypadku mechaniki kwantowej oddziaływanie przyrządu z mikroobiektem (cząstką, elektronem itp.) jest zupełnie odmienne. Wynika to z faktu dwoistej natury mikroobiektów. I tak w procesie pomiaru położenia mikrocząstki ulega zmianie pęd cząstki.

Granicę zmniejszania tego oddziaływania określa związek nieokreśloności $\Delta p \geq \hbar/\Delta x$, który ukazuje, że sposób oddziaływania urządzenia pomiarowego na badany obiekt nie można pominąć, czy go zaniedbać. W mechanice kwantowej pomiar zmienia stan obiektu i w procesie pomiarowym określenie jakiejś wielkości charakteryzującej cząstkę jest możliwe tylko z dokładnością określaną przez związek nieoznaczoności.

Ta zależność wyników pomiaru od przyrządu pomiarowego (rzeczywistego obserwatora) może być interpretowana jako stanowisko idealizmu subiektywnego i prowadzić do idealistycznych wniosków opartych na związkach nieoznaczoności, które odrzucają zasadę przyczynowości w świecie mikrocząstek. Czy tak jest w rzeczywistości?

W mechanice kwantowej pojęcie stanu układu jest zupełnie odmienne niż w mechanice klasycznej.

Opisem stanu w mikroświecie jest funkcja falowa cząstki Ψ. Znając wartości funkcji Ψ w czasie t_0 można określić przez rozwiązanie równania Schrödingera jej wartość w chwili $t > t_0$. Ta ewolucja czasowa funkcji falowej ma charakter deterministyczny i jest otrzymana z równania matematycznego mającego cechy równania deterministycznego. Musimy pamiętać, że funkcja falowa nie opisuje toru cząstki, lecz wyraża prawdopodobieństwo znalezienia się cząstki w danym obszarze przestrzeni. Stąd można powiedzieć, że zdeterminowane są prawdopodobieństwa, a nie stany cząstki.

Zasada nieoznaczoności Heisenberga zmusza nas do innego spojrzenia na fakt, że gdy znamy położenie i prędkość wszystkich mas układu odosobnionego to możemy przewidzieć ich przyszłe położenie i prędkość (to nasze myślenie wynikające z zasady przyczynowości). Zasada nieoznaczoności nie stwierdza, że powyższe stwierdzenie jest nieprawdziwe, ale uświadamia nam, że nie jest zawsze użyteczne.

I tak w mikroświecie nie możemy przewidzieć dokładnie położenia pojedynczego elektronu lub atomu i nie ma tu miejsca na układy odosobnione. Nasuwa się tutaj pytanie. Czy niemożliwość zmierzenia danej wielkości eliminuje poczynania metrologa w mikroświecie?

Czy to, co jest niedostępne pomiarom nie zależy od metrologii? Metrolog ma świadomość tego, że pomiar położenia cząstki w mikroświecie zakłóca jej ruch i uświadamia sobie, że taki skutek pomiaru pozbawia go właśnie możliwości przewidywania jej dalszego położenia. Metrolog przeprowadzający badania doświadczalne coraz to doskonalszymi urządzeniami nie musi zadręczać się zasadą nieoznaczoności, ale musi zawsze odróżnić ograniczenia od ograniczeń fundamentalnych, z których wynikać może np. nieużyteczność danego urządzenia pomiarowego.

Jak widzimy w mikroświecie rola obserwacji za pomocą urządzeń pomiarowych odgrywa istotne znaczenie w procesie interpretacyjnym szeregu zjawisk. Okazuje się, że sposób interpretacji i opisu oddziaływania urządzenia pomiarowego z układem kwantowym może być bardzo ważny.

9. Modelowanie i symulacja w procesie poznania

Istotnym dla nauki, a zarazem ważnym punktem wyjścia dla licznych zagadnień o charakterze metodologicznym każdej jej dyscypliny są czynności modelowania i symulacji. To właśnie modelowanie i symulacja pobudzają ludzką wyobraźnię oraz kierują naszą uwagę na podstawowy czynnik określający poznanie jakim jest jego przybliżony charakter w stosunku do rzeczywistości. Poznanie nasze jest wybiórcze, aspektowe, ale również w istotny sposób przybliżone i ma charakter aproksymacyjny. Celem naszych poczynań jest uzyskanie poznania wiernego w stosunku do otaczającej nas rzeczywistości.

Ideał ten chcemy osiągnąć drogą kolejnych przybliżeń w oparciu o ciągle modyfikowane eksperymenty doświadczalne i wnikliwą analizę błędów, które stanowią elementy weryfikacji teorii naukowych. Jesteśmy świadomi, że żaden eksperyment doświadczalny nie jest w stanie udowodnić teorii w sposób bezwzględny, ale jedynie w mniejszym lub większym stopniu ją potwierdza, bowiem przybliżony charakter poznania wynika z posługiwania się w badaniu opracowanymi modelami rzeczywistości.

Wykorzystywanie modeli w poznaniu świata rzeczywistego ukazuje nam drugą cechę poznania, czyli jej charakter zastępczy [44]. W naszym postępowaniu naukowym idziemy od jednego modelu do drugiego, tworząc tym samym coraz to bardziej adekwatne modele, z których wyciągamy wnioski i konfrontujemy je z doświadczeniem. Mamy świadomość tego, że model w poznaniu jest ogniwem pośredniczącym między badaczem a rzeczywistością i jest on tylko środkiem a nie celem, bo w poznaniu chodzi przecież o możliwie najwierniejsze odzwierciedlenie obiektywnej rzeczywistości[45].

9.1. Model i modelowanie

Modelowaniem nazywamy czynność, którą posługujemy się w opisie naukowym rzeczywistości polegającą na badaniu jej modeli, stanowiących jej przybliżenie. Modelowanie to nie tylko otrzymanie konkretnego modelu, lecz to cały cykl badawczy od utworzenia modelu poczynając przez jego weryfikację, interpretację, kończąc na jego kolejnym przybliżeniu. Modelowanie jako czynność jest z reguły niezakończona[46, 47].

Chcąc uchwycić przybliżony charakter poznania należy rozpatrywać obiekty (pola zjawiska), których parametry mają charakter przybliżony, bowiem wtedy mogą one reprezentować rzeczywistość dostępną nam w eksperymencie[35].

W kontekście aproksymacyjnego charakteru poznania w naszym procesie myślowym zaczynamy używać pojęć – oryginał, model. Celem poznania naukowego jest poznanie oryginału. Model jest środkiem tego poznania[48, 49].

Z praktyki wiemy, że w zależności od przyjętego punktu widzenia posługujemy się różnymi rodzajami modeli. Wynika to z wielu możliwych punktów widzenia. W metrologii generalnie przyjmujemy modele fizyczne i matematyczne. Modele fizyczne stanowią przedstawienie fizyczne postrzeganej przez nas rzeczywistości, natomiast matematyczne będące częścią ogólniejszej dziedziny modeli symbolicznych, przedstawiają myślowy opis oryginału. Wśród modeli fizycznych, w zależności od obserwowanego pola zjawiska możemy wyróżnić modele mechaniczne, termiczne, radiacyjne, optyczne, chemiczne.

Pomiędzy wymienionymi modelami istnieją różnego rodzaju powiązania wynikające ze względności pojęcia oryginału i modelu. Między oryginałem a modelem może zachodzić relacja homomorfizmu i izomorfizmu. Wyróżnienie i przyjęcie w opisie rzeczywistości konkretnego modelu jest czynnością podyktowaną przyjętym punktem widzenia, który jest względny, subiektywny i warunkowany czasowo. Istnieje wiele systematyk dotyczących modeli, co prezentuje specjalistyczna literatura. Jedną z nich jest ta, która wyróżnia modele operacyjne, modele syntaktyczne oraz modele semantyczne. A w przypadku modeli fizycznych np. modele strukturalne, funkcjonalne.

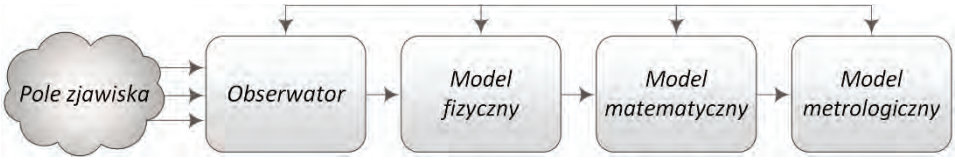
9.2. Symulacja

Pojęcie „symulacja” jest ściśle związane z badanym przez nas obiektem i występuje tam, gdzie nie mamy możliwości bezpośredniego badania oryginału. Wówczas nasze czynności związane są bezpośrednio z modelem. I tu odróżniamy obiekt symulowany – czyli ten nasz oryginał oraz obiekt symulujący – czyli nasz model. Również odróżniamy symulację od badań symulacyjnych. Badania symulacyjne to nic innego jak stosowanie symulacji, która jest procesem opisującym stany modelu – a więc czynnością, (procesem) konstruowania stanów przeszłych modelu. Może ona być stosowana do obiektów (zjawisk) istniejących, jak i tych planowanych nieistniejących, w przypadku których badania symulacyjne falsyfikują wysuniętą hipotezę.

10. Proces poznawczy w metrologii

Ta droga od jednego modelu do drugiego, gdzie kolejne jej kroki to następne przybliżenia, stanowi proces poznawczy danej dziedziny nauki.

Relacje i wzajemne powiązania modelu fizycznego, matematycznego i metrologicznego mierzonego zjawiska, zastosowanej metody pomiarowej i użytych do tego celu urządzeń pomiarowych można przedstawić w postaci schematu procesu myślowego, który jest procesem poznawczym w metrologii. Schemat przyporządkowania dokonywanym obserwacjom wyrażonym przez wrażenia w świadomości obserwatora zjawiskom fizycznym, będącym wynikiem przemian energetycznych w otaczającej nas rzeczywistości można graficznie przedstawić jak na Rys. 10.1.



Rys. 10.1. Schemat procesu poznawczego w metrologii

Tak przedstawiony schemat procesu poznawczego ma charakter formalny (myślowy). Cechą modeli myślowych jest forma ich prezentacji. Należy do nich postać symboli logicznych, równań – wyrażeń matematycznych, wykresów, tabel itp. Forma i budowa procesu poznawczego w metrologii jest podstawą systematyki podjętej przez autora w niniejszej pracy. Przykładem tego jest rodzaj opisów tu prezentowanych modeli słownych, numerycznych, analitycznych czy graficznych.

W zaprezentowanym tu schemacie procesu poznawczego metrologii występuje szeregowe połączenie badanego obiektu (pola zjawiska) będącego celem poznania z jego układem fizycznym, matematycznym i metrologicznym, pomiędzy którymi występują sprzężenia zwrotne stanowiące odzwierciedlenie procesów weryfikacyjnych poszczególnych modeli, uwarunkowane zewnętrznymi kryteriami oceny.

Droga powstawania modeli w procesie prawnym metrologii przyjmuje założenie, że metody indukcyjne i dedukcyjne przeplatają się wzajemnie i stanowią procedurę tworzenia uogólnionej systematyki metrologii.

Prawa fizyki, które są dla nas modelem fizycznym wyrażamy zwykle w postaci równań modelujących przyczynowe zależności między wielkościami, które my przy

pomocy swoich zmysłów lub za pomocą doskonałych przyrządów pomiarowych potrafimy wyodrębnić z pola zjawiska, mają postać przyczynowych zależności.

W klasycznych pomiarach wielkości fizycznych proces przyczynowo – skutkowy jest gwarantem poprawnie postawionej hipotezy. W procesie tym o przyczynie dowiadujemy się na podstawie analizy skutków. Złożoność współczesnych metod pomiarowych pociąga za sobą wnikliwą analizę procesu przyczynowo-skutkowego obejmującą również szeroko rozumianą analizę modelu matematycznego metody pomiarowej.

Problem ten w literaturze nazywany jest *forward problem* i ukazuje on model matematyczny, odzwierciedlający obserwowane przez nas wielkości, charakteryzujący zachowanie lub stan pola zjawiska w relacji innych wielkości będącymi przyczynami tego zachowania lub stanu.

W przypadku kiedy obserwowane przez nas wielkości tworzące zachowanie lub stan pola zjawiska są skutkiem oddziaływania innych wielkości powodujących taki stan lub zachowanie, mamy do czynienia z *inverse problem*.

W metrologii klasycznym problemem „wprost" jest to pomiar dokonywany z wykorzystaniem wzorca danej wielkości. Z problemem odwrotnym mamy do czynienia wówczas kiedy nie posiadamy wzorca badanej przez nas właściwości (cechy) badanego obiektu, a jedynie opis (model matematyczny) właściwości związanych (pokrewnych) z daną właściwością[13].

Wówczas na podstawie skutków wnioskujemy o przyczynie. Ponieważ przeważająca większość problemów rozwiązywanych obecnie przez metrologów dotyczy pomiaru właściwości nie posiadających wzorców, stąd obecnie zagadnienie problemu odwrotnego jest bardzo istotne. Pomocnym w rozwiązaniu problemu odwrotnego jest fakt, że algorytmizacja, symulacja przenika już do każdej dziedziny nauki, a coraz to szybsze komputery pozwalają na ukazanie i eliminację błędnych koncepcji pomiaru[14, 15].

11. Zakończenie

Do podstawowych założeń naszej nauki należy to, że o pomiarach mówimy językiem mającym zasadniczo taką samą strukturę jak ten, którym mówimy o doświadczeniach życia powszedniego. Nauczyliśmy się, że język ten jest bardzo niedoskonałym instrumentem orientacji i porozumienia. Instrument ten jest jednak jednocześnie założeniem naszej nauki.

(N. Bohr)

Metrologia mimo, że skrywa w gąszczu swoich różnych zbiorów terminologicznych nie zawsze łatwe do zrozumienia dla nas fakty, to swoimi koncepcjami ukazuje intelektualne uroki naszej działalności. Upływający czas ukazuje nam, że niektóre metrologiczne koncepcje były niepełne lub wręcz chybione. Ciągłe poszukiwanie nowych systematyk (uogólnień), celem których jest prostsze, a zarazem pełniejsze ukazanie otaczającej nas rzeczywistości jest tym wtórnym myśleniem, dzięki któremu każda nauka może żyć.

Metrologia, jako zbiór faktów teoretycznych i empirycznych weryfikujących ludzkie hipotezy, jest nauką łączącą w sobie osiągnięcia wielu nauk podstawowych od fizyki, matematyki poczynając, a na cybernetyce, informatyce, teorii chaosu kończąc[50, 46, 47, 9, 8, 32, 13, 33, 34, 5].

Istotnym jest fakt, że jest ona tworem ludzkiego umysłu niosącego w sobie wartości kulturowe, w których nieograniczona żądza poznania, estetyka, pomysłowość, wyobraźnia, pedanteria, skromność stanowią elementy twórczego myślenia. Przewaga intelektualnych osiągnięć w danej dziedzinie nauki nad jej rutynowymi badaniami i technicznymi osiągnięciami stanowi podstawowy element jej cywilizacyjnego rozwoju.

W pracy tej pragnąłem pokazać, że metrologia ma swoje zagadnienia podstawowe i że jest ona tą intelektualną nadbudową miernictwa, dzięki której może się ono rozwijać i swoimi technicznymi wynalazkami przenikać do nowych osiągnięć nauki.

Jestem przekonany, że czas zweryfikuje i zastąpi prezentowane tu koncepcje innym, głębszym i ogólniejszym spojrzeniem na miarę intelektualnych osiągnięć kolejnego stulecia.

Literatura

[1] ELLIS B., *Basic Concepts of Measurement*, Cambridge University Press, Cambridge 1966.

[2] FINKELSTEIN L., *Fundamental Concepts of Measurement*. [In:] Acta IMEKO VI, 1973 IMEKO, Budapest 1973, 11–18.

[3] FINKELSTEIN L., *Representation by symbols as an extension of the concept of measurement*, Kybernetes, 1972, 4, 215–223.

[4] FINKELSTEIN L., *Fundamental concepts of measurement: definition and scales*, Measurement and Control, 1975, 8, 105–111.

[5] SUPPES P., ZINNES J.L., *Basic measurement theory*. [In:] R.D. Luce, R.R. Bush, E. Galanter (Eds.), *Handbook of Mathematical Psychology*, Wiley, New York 1965.

[6] FINKELSTEIN L., *Instrument science: introductory article*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1977, 10, 566–572.

[7] FINKELSTEIN L., EL-HAMI M., GINGER R., *Conceptual design of instrument systems utilizing physical laws*, Measurement, 1998, 23, 9–13.

[8] HUTTEN E., *The Ideas of Physics*, Oliver and Boyd, London 1967.

[9] HUTTEN E., *The Language of Modern Physics*, George Allen And Unwin, Ltd., 1956.

[10] **MROCZKA J.**, *Turbidimetric methods in particle sizing*. Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO), Beijing, China, 1991.

[11] **MROCZKA J.**, *Integral transform technique in particle sizing*. Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO), Beijing, China, 1991.

[12] **MROCZKA J.**, *Method of Moments in Light Scattering Data Inversion in the Particle Size Distribution*, Optics Communications, 1993, 99, 147–151.

[13] **MROCZKA J.**, SZCZUCZYŃSKI D., *Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements*, Metrology and Measurement Systems, 2009, 16, 333–357.

[14] **MROCZKA J.**, SZCZUCZYŃSKI D., *Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements*, Applied Optics, 2010, 49, 4591–4603.

[15] **MROCZKA J.**, SZCZUCZYŃSKI D., *Simulation research on improved regularized solution of inverse problem in spectral extinction measurements*, Applied Optics, 2012, 51, 1715–1723.

[16] **MROCZKA J.**, SZCZUCZYŃSKI D., *Improved technique of retrieving particle size distribution from angular scattering measurements*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 129, 48–59.

[17] ONOFRI F., KRZYSIEK M., BARBOSA S., MESSAGER V., REN K.F., **MROCZKA J.**, *Near--critical-angle scattering for the characterization of clouds of bubbles: particular effects*, Applied Optics, 2011, 50, 5759–5769.

[18] CZERWIŃSKI M., **MROCZKA J.**, GIRASOLE T., GOUESBET G., GRÉHAN G., *Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions*. Part 1. *Direct problem: hybrid-method approximation*, Applied Optics, 2001, 40, 1514–1524.

[19] CZERWIŃSKI M., **MROCZKA J.**, GIRASOLE T., GOUESBET G., GRÉHAN G., *Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions*. Part 2. *Inverse problem: particle size determination*, Applied Optics, 2001, 40, 1525–1531.

[20] GUSZKOWSKI T., **MROCZKA J.**, *Metoda inwersyjna wykorzystująca sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej*. Metrologia wspomagana komputerowo. MWK 2003. VI Szkoła – konferencja. Instytut Podstaw Elektroniki Wydział Elektroniki WAT, Waplewo 2003.

[21] GIRASOLE T., BULTYNCK H., GOUESBET G., GRÉHAN G., LE MEUR F., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, REN K.F., ROZE C., WYSOCZAŃSKI D., *Cylindrical fibre orientation analysis*

by light scattering. Part 1. *Numerical aspects*, Particle & Particle Systems Characterization, 1997, 14, 163–174.

[22] GIRASOLE T., GOUESBET G., GRÉHAN G., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, REN K.F., WYSOCZAŃSKI D., *Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering: Part 2: Experimental aspects*, Particle & Particle Systems Characterization, 1997, 14, 211–218.

[23] GIRASOLE T., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, WYSOCZAŃSKI D., *Fiber orientation and concentration analysis by light scattering: experimental setup and diagnosis*, Review of Scientific Instruments, 1997, 68, 2805–2811.

[24] **MROCZKA J.**, WYSOCZAŃSKI D., ONOFRI F., *Optical parameters and scattering properties of red blood cells*, Optica Applicata, 2002, 32, 691–700.

[25] SKORUPSKI K., **MROCZKA J.**, *Effect of the necking phenomenon on the optical properties of soot particles*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 141, 40–48.

[26] SKORUPSKI K., **MROCZKA J.**, RIEFLER N., OLTMANN H., WILL S., WRIEDT T., *Impact of morphological parameters onto simulated light scattering patterns*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 119, 53–66.

[27] WOŹNIAK M., ONOFRI F., BARBOSA S., YON J., **MROCZKA J.**, *Comparison of methods to derive morphological parameters of multi-fractal samples of particle aggregates from TEM images*, Journal of Aerosol Science, 2012, 47, 12–26.

[28] WOJTASZEK T., **MROCZKA J.**, *Light scattering simulations of spheroids using three beams phase Doppler system*. XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil, 2006.

[29] ŚWIRNIAK G., GŁOMB G., **MROCZKA J.**, *Inverse analysis of the rainbow for the case of low-coherent incident light to determine the diameter of a glass fiber*, Applied Optics, 2014, 53, 4239–4247.

[30] ŚWIRNIAK G., GŁOMB G., **MROCZKA J.**, *Inverse analysis of light scattered at a small angle for characterization of a transparent dielectric fiber*, Applied Optics, 2014, 53, 7103–7111.

[31] ŚWIRNIAK G., **MROCZKA J.**, *Approximate solution for optical measurements of the diameter and refractive index of a small and transparent fiber*, Journal of the Optical Society of America A, 2016, 33, 667–676.

[32] KAPP R.O., *The Presentation of Technical Information*, Constable and Co., London 1948.

[33] NELSON J.E., *Trends in instrumentation*. WESCON 76 Conference, Session 24, 1976.

[34] STEVENS S.S., *On the theory of the scales of measurement*, Science, 1946, 103, 677–680.

[35] **MROCZKA J.**, *The cognitive process in metrology*, Measurement, 2013, 46, 2896–2907.

[36] RUSSELL B., *Human Knowledge, Its Scope and Limits*, Simon and Schuster, New York 1948.

[37] PFANZAGL J., *Theory of Measurement*, Physica-Verlag, Würzburg–Wien 1968.

[38] PIRON C., *Foundations of Quantum Physics*, W.A. Benjamin, Inc., 1976.

[39] VON NEUMANN J., *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton 1955.

[40] HEISENBERG W., *Wandlungen in der Grundlagen der Naturwissenschaft*, Hirzel Verlag, Leipzig 1943.

[41] ROBERTS F.S., *Measurement Theory, with Applications to Decisionmaking, Utility, and the Social Sciences*, Addison Wesley, Reading, MA, 1979.

[42] PRIMAS H., *Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism*, Springer-Verlag, Heidelberg 1981.

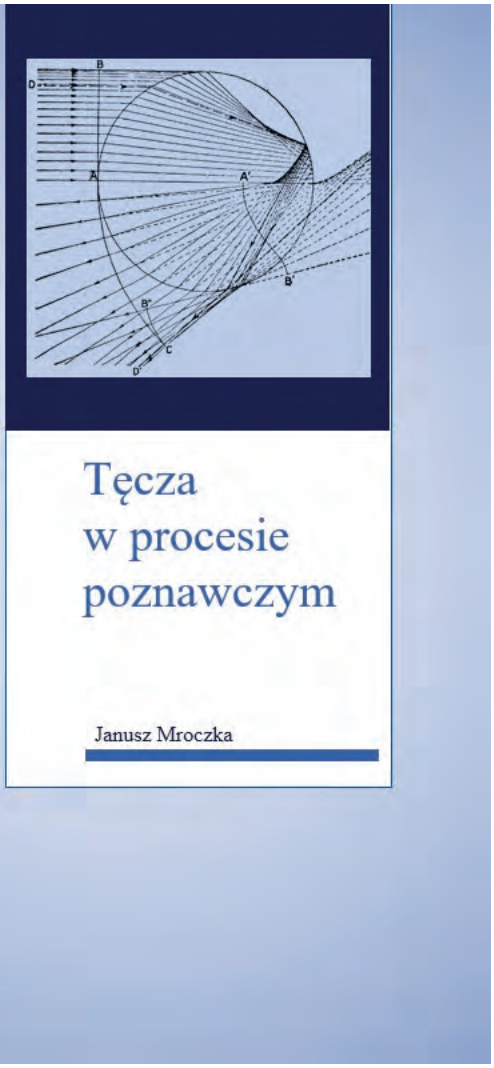
[43] PRUGOVEČKI E., *Quantum Mechanics in Hilbert Space*, Academic Press New York 1981.

[44] BARZYKOWSKI J. (Ed.), *Współczesna metrologia: zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo--Techniczne, Warszawa 2004.

[45] MORAWSKI R.Z., *Application-oriented approach to mathematical modelling of measurement processes*, Joint International IMEKO Symposium, Jena, Germany, 2011.

[46] COOMBS C.H., RAIFFA H., THRALL R.M., *Some views on mathematical models and measurement theory*, Psychological Review, 1954, 61, 132–144.
[47] FINKELSTEIN L., WATTS R.D., *Mathematical models of instruments-fundamental principles*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1978, 11, 841–855.
[48] SCHWARTZ J., *The Pernicious Influence of Mathematics on Science*. [In:] E. NAGEL, P. SUPPES, A. TARSKI (Eds.), Journal of Philosophy, Stanford 1962, 356–360.
[49] STEGMÜLLER W., *Theorie und Erfahrung*, Springer-Verlag, Berlin 1970.
[50] CHURCHMAN C.W., RATOOSH P. (Eds.), *Basic Concept of Measurements*, Cambridge University Press, Cambridge 1959.

Tęcza w procesie poznawczym



Spis treści

Wprowadzenie

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

1.1. Tęcza w ujęciu optyki geometrycznej

1.2. Tęcza w ujęciu optyki falowej

1.3. Elektromagnetyczna teoria tęczy

2. Tęcze wielokrotne powstające w wyniku rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej. Część I: *Analiza DFT*

2.1. Model rozproszenia

2.2. Homogeniczne włókno szklane

2.3. Światłowód o skokowym profilu refrakcyjnym

2.3.1. Tęcze wielokrotne i ich transformacje

2.3.2. Analiza rozproszenia z wykorzystaniem szeregów Debye'go

2.3.3. Geometryczna interpretacja jednokrotnego wewnętrznego odbicia

2.3.4. Interpretacja DFT tęcz wielokrotnych powstających w wyniku rozpraszania polichromatycznej wiązki światła

2.3.5. Inwersyjna charakterystyka rdzenia – analiza przygotowawcza

2.4. Światłowód o gradientowym profilu refrakcyjnym

3. Tęcze wielokrotne powstające w wyniku rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej. Część II: *Analiza w dziedzinie czasu*

3.1. Model rozproszenia

3.2. Homogeniczne włókno szklane

3.3. Światłowód o skokowym i gradientowym profilu refrakcyjnym

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

4.1. Analiza przyczynowa

4.2. Analiza inwersyjna

4.3. Analiza rozproszenia światła na włóknie o eliptycznym przekroju

5. Podsumowanie

Literatura

Wprowadzenie

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

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

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

Wykorzystanie tęczy w procesie poznawczym w metrologii[1-3] ma wiele korzyści. Według teorii morfogenezy (inaczej – teorii katastrof lub przejść nieciągłych)[4, 5] tęcza jest strukturalnie stabilną, rzeczywistą kaustyką, co oznacza że niewielkie zmiany geometrii cząstki rozpraszającej światło wywołują lokalne transformacje sygnału prążkowego (przesunięcia w kącie rozproszenia, rozciągnięcia, etc.) lecz nie doprowadzają do jej destrukcji. Tęcza powstaje w wyniku propagacji światła przez transparentne cząstki, a więc zawiera informację o ich morfologii. Co więcej, rejestracja tęczy może odbywać się przy użyciu konwencjonalnych instrumentów pomiarowych, ponieważ natężenie światła rozproszonego w jej obszarze jest relatywnie duże.

Zarówno fascynacja tęczą jak i ogromy postęp w dziedzinie symulacji i numerycznego modelowania pól optycznych doprowadziły do utworzenia wyrafinowanej, wąskiej tematycznie dziedziny metrologii optycznej jaką jest metrologia tęczy. Klasyczny układ pomiarowy posługuje się tzw. tęczą monochromatyczną, powstającą w wyniku ugięcia wysokospójnej wiązki promieniowania na cząstce (lub zbiorze cząsteczek) w odróżnieniu od tęczy wielobarwnej, powstającej w warunkach naturalnych. Studia nad wykorzystaniem tęczy do celów pomiarowych zostały zapoczątkowane przez Presby'ego i Marcusa[6], którzy zbadali możliwość wykorzystania tego zjawiska do oceny cech geometrycznych światłowodów i preform światłowodowych. Prace Rotha i in[7] oraz Sankara i in[8] stanowią z kolei debiut w zakresie pomiaru współczynnika załamania i temperatury strumienia rozgrzanych kropel na podstawie oceny przesunięcia kątowego tzw. tęczy Airy'ego. Integracja techniki tęczy z anemometrem dopple-

rowskim umożliwiła jednoczesny pomiar rozmiaru, temperatury i prędkości transparentnych cząsteczek[9, 10]. Bardziej aktualne badania poruszają problematykę tęczy powstającej na cząstkach o zaburzonej symetrii osiowej[11-14], cząstkach o niejednorodnej strukturze refrakcyjnej[15-19], a także na układach polidyspersyjnych cząsteczek[20-23].

Znanym problemem metrologii tęczy posługującej się wysokospójnym promieniowaniem laserowym jest złożona interpretacja danych pomiarowych, mająca na celu charakterystykę obiektu rozpraszającego falę na podstawie zarejestrowanego i przetworzonego w odpowiednim zakresie kątowym sygnału tęczy (analiza inwersyjna). Złożoność ta wynika przede wszystkim ze skomplikowanej natury pola rozproszonego, będącego superpozycją różnorodnych zjawisk fizycznych, takich jak dyfrakcja, załamanie, absorpcja, fale powierzchniowe, etc. Wykorzystanie kompleksowych modeli fizyko-matematycznych opisujących rozproszenie światła monochromatycznego, np. teorii Lorenza-Mie[24] w celu rozwiązania zagadnienia odwrotnego jest ograniczone, ze względu problemy niejednoznaczności rozwiązania wskutek kolinearności parametrów w strukturze rozbudowanej modelu, nieliniowości pola od cząstki rozpraszającej falę oraz złych uwarunkowań numerycznych wymienionych modeli, prowadzących do powstania błędów obliczeń uniemożliwiających poprawną interpretację wyników[25, 26]. Odmienne podejście do inwersyjnej analizy stanu pola zjawisk tęczy zostało zaprezentowane w pracach zespołu naukowego autora[27-29] i polega na aranżowaniu eksperymentu pomiarowego w taki sposób, aby pole rozproszone posiadało łatwiejszą makroskopową interpretację fizyczną w porównaniu z rozpraszaniem światła wysokospójnego. Wykorzystanie do tego celu promieniowania cechującego się niskim stopniem spójności czasowej powoduje, że możliwe staje się wykorzystanie przyczynowych i inwersyjnych aproksymacyjnych modeli rozproszenia światła.

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

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

Dotychczasowe doświadczenia autora w zakresie optycznej i nieinwazyjnej charakterystyki obiektów złożonych obejmują m.in.: problematykę pomiarów wielkości cząstek ośrodków dyspersyjnych metodami optycznymi[30-37], w tym hybrydowe metody w opisie transmitancji światła w warunkach rozproszenia wielokrotnego dla monodyspersyjnego rozkładu wielkości cząstek[38, 39] oraz metody inwersyjne wykorzystujące sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej[40], wykorzystanie spektralnych i polaryzacyjnych właściwości laserowego promieniowania rozproszonego w nieinwazyjnym badaniu materiałów kompozytowych [41-43], nieinwazyjną diagnostykę parametrów optycznych i właściwości rozproszeniowych pełnej krwi i erytrocytów[44], modelowania matematycznego rozproszenia światła przez cząstki niesferyczne i ich agregaty[45-48], modelowania i symulacji matematycznych przepływów wielofazowych, modelowania matematycznego trójwiązkowej anemometrii dopplerowskiej w określaniu położenia i prędkości cząstek w ośrodkach wielofazowych[49], a także nieinwazyjny pomiar *in situ* średnicy homogenicznych i niehomogenicznych, przezroczystych włókien wykorzystywanych m.in. w materiałach kompozytowych i jako światłowody telekomunikacyjne i pomiarowe[27, 50, 28, 29].

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

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

(Newton, 1676)

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

1.1. Tęcza w ujęciu optyki geometrycznej

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

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

czynnika załamania kropel wody (n = 1.33), wynosi około 42°. Pomiary tego kąta zostały dokonane przez franciszkanina i empirystę Rogera Bacona w 1266 roku.

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

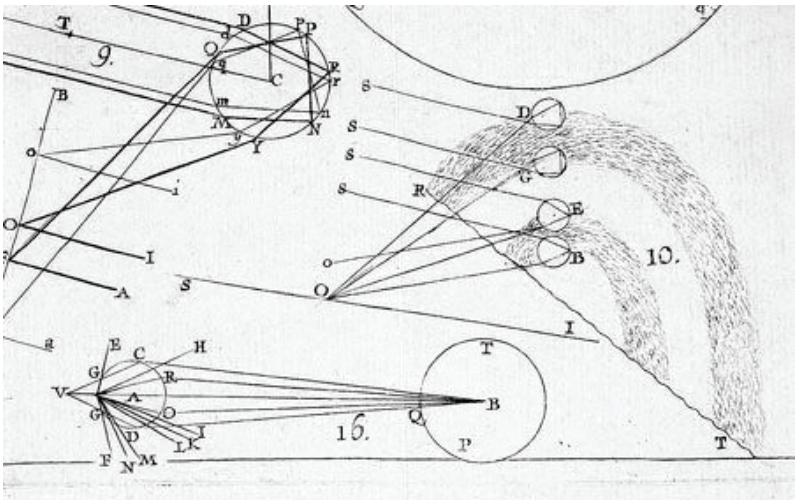
Tęcza wtórna znajduje się nieco wyżej, około 9° ponad tęczą pierwotną[†]. Arystotelejski pogląd na naturę tęczy został zrewidowany w XIV wieku niezależnie przez dwóch badaczy – niemieckiego teologa i fizyka Teodoryka z Freibergu w pracy zatytułowanej *De iride et radialibus impressionibus*[‡] (1304) oraz perskiego fizyka i matematyka Kamala al-Din al-Farisi w *Tanqih al-Manazir*[§] (1309). Oboje uczeni dowodzili, że tęcza powstaje w wyniku ugięcia światła na indywidualnych kroplach wody, nie zaś w wyniku odbicia światła od deszczowych chmur, jak przypuszczał Arystoteles. Swoje wnioski poparli eksperymentami – perski uczony prowadził doświadczenia z rozproszeniem światła na szklanej kuli wypełnionej wodą, a Teodoryk eksperymentował ze szklaną, sferyczną kolbą. Co więcej, zarówno Teodoryk z Freibergu jak i Kamal

[†] W obecnej konwencji położenie kątowe tęczy wyraża się określając dewiację promieni słonecznych w odniesieniu do ich pierwotnego biegu, czyli tęcza pierwotna występuje w kącie rozproszenia równym 180°–42° = 138°, zaś wtórna w kącie ok. 129°.

[‡] Tłum.: *O tęczy i wrażeniach wywołanych promieniowaniem*.

[§] Tłum.: *Przegląd optyki*.

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



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

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

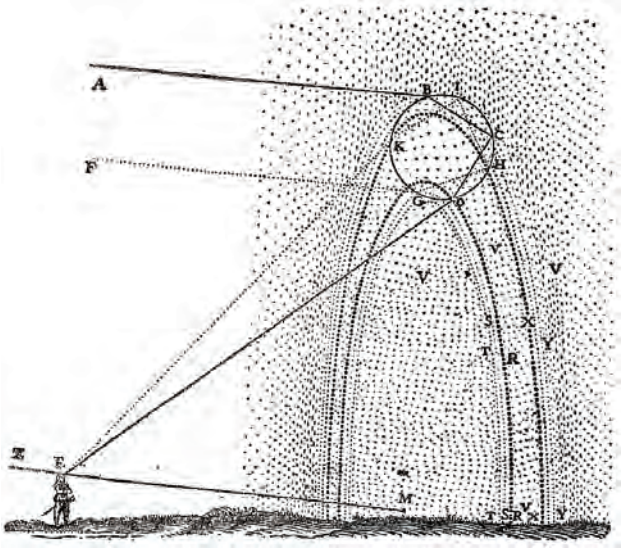
[**] Pierwsze prawo refrakcji, ograniczone do dużych kątów, sformułował Klaudiusz Ptolomeusz w II wieku n.e.

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

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

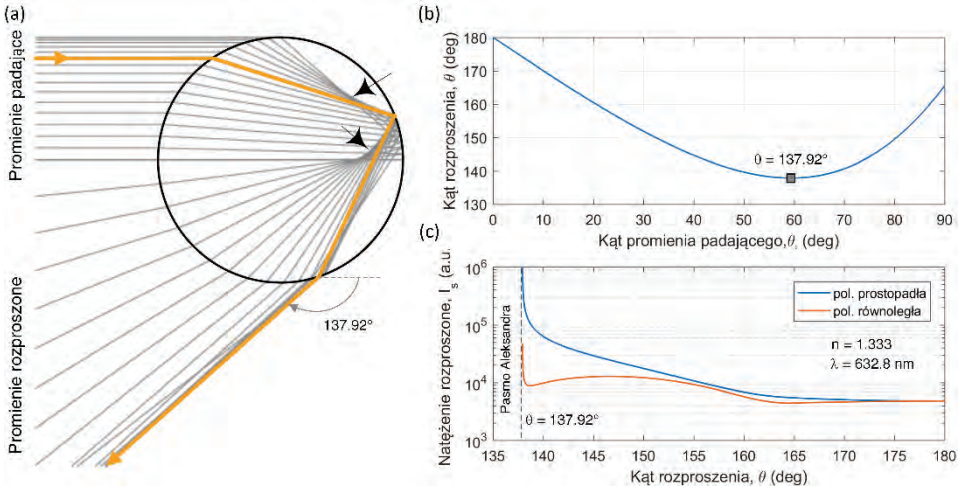
$$n_i \sin\theta_i = n_r \sin\theta_r, \tag{1.1}$$

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



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

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



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

tęczy pierwotnej), jest następujący:

$$\theta = \pi + 2\theta_i - 4\theta_r, \tag{1.2}$$

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

Natężenie promienia Kartezjusza wymaga kilka zdań odrębnego komentarza. Aby je wyznaczyć, należy posłużyć się amplitudowymi współczynnikami odbicia i załamania *fali* przechodzącej przez granicę dwóch ośrodków. Takowe współczynniki zostały sformułowane w 1823 roku przez Augustina Fresnela, blisko 200 lat po dokonaniach Kartezjusza. Wyprzedzając nieco epokę Kartezjusza (ale wciąż trzymając się ram optyki geometrycznej) przeanalizujmy krótko Rys. 1.4c, ilustrujący zmianę natężenia promienia Kartezjusza w funkcji kąta rozproszenia. Wykres ten został sporządzony dla dwóch odmiennych – ortogonalnych stanów polaryzacji fali padającej o długości 632.8 nm na kroplę wody o średnicy 100 μm. Promień Kartezjusza wyznacza nagłe przejście pomiędzy ciemnym pasmem Aleksandra i jasnym regionem tęczy i tej granicy odpowiada natężenie światła dążące ku nieskończoności. Taka nieskończona koncentracja światła nie jest oczywiście możliwa i wynika z uproszczonego modelowania propagacji światła przy użyciu geometrycznych promieni. Odmienność polaryzacyjna wskazuje natomiast, że tęcza jest zjawiskiem silnie spolaryzowanym, co wynika ze spełnienia warunku Brewstera podczas wewnętrznego odbicia[54].

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

1.2. Tęcza w ujęciu optyki falowej

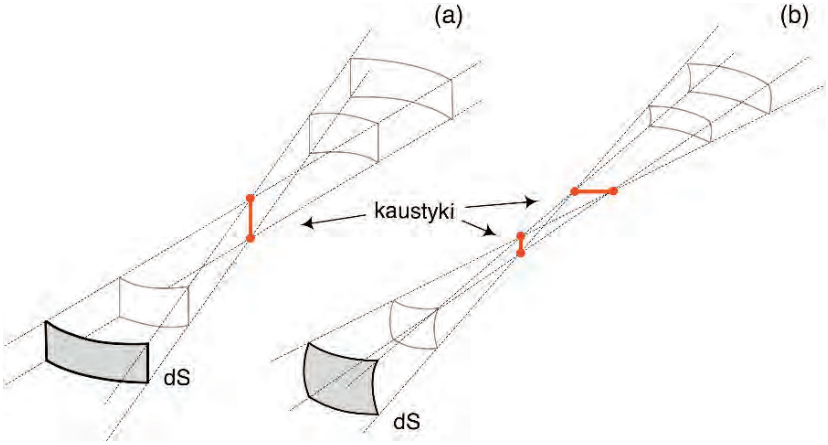
W szczególnych warunkach tęcza pierwotna (znacznie rzadziej również tęcza wtórna) ukazuje falowe oblicze światła ulegającego załamaniu na kropelkach wody w postaci tzw. łuków nadliczbowych, powstających w sąsiedztwie głównego łuku tęczy, Rys. 1.5. Ich pochodzenie można było wytłumaczyć wraz z nadejściem ery fal elektromagnetycznych i odkryciem interferencji światła przez Thomasa Younga w 1801 roku. Young w swoim artykule[55] z 1804 roku dochodzi do wniosku, że to interferencja dwóch wiązek światła wywołuje „Repetycje kolorów zauważalne czasami w zwykłej tęczy (…)”. Pochodzenie tych dwóch wiązek światła, do których odwołuje się Young jest łatwo zrozumieć, analizując ponownie Rys. 1.4b. Jako, że wykres ten posiada lokalne minimum, to istnieją dwa niestacjonarne promienie światła, które opuszczają cząstkę pod tym samym kątem.

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

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

Analiza interferencji geometrycznych promieni światła w polu dalekim wymaga rozważenia wpływu obszarów kaustycznych na fazę każdego z nich. W rozumieniu optyki geometrycznej kaustyka jest hiperpowierzchnią, w której dochodzi do przecięcia się nieskończenie blisko położonych względem siebie promieni światła[5, 4]. Wiązka światła może tworzyć wiele kaustyk w zależności od jej geometrii (zbieżna, rozbieżna) i jak i morfologii cząsteczki rozpraszającej światło, czyli jej kształtu (sfera, cylinder, etc.) i profilu refrakcyjnego. Dla przykładu, wiązka światła cechująca się dywergencją w jednej płaszczyźnie (posiadająca jeden promień krzywizny) jak na Rys. 1.6a, ma pojedynczą kaustykę, podczas gdy wiązka o dywergencji w dwóch płaszczyznach (o dwóch promieniach krzywizny), Rys. 1.6b, tworzy dwie kaustyki. Prace Gouya[56] z 1890 roku wskazały, że faza promienia w kaustyce zmienia się o $-\pi/2$ co *de facto* oznacza skrócenie drogi optycznej o wartość $\lambda/4$. Gdy promień styczny jest do *m* kaustyk, wypadkowe przesunięcie fazowe wynosi $m(-\pi/2)$. Jak pokazuje Rys. 1.4a wiązka światła propagująca się przez kroplę wody tworzy dwie wewnętrzne kaustyki zaznaczone strzałkami. Więcej o propagacji promieni w obszarze tych kaustyk w ujęciu interferencyjnej teorii Younga zawiera praca Lavena[57].

Young we wspomnianej pracy abstrahuje od formalnego modelu tęczy na rzecz obserwacji i interpretacji zjawiska interferencji, ujawniającego się w rozmaitych eksperymentach. Dopiero późniejsze doświadczenia Fresnela, pokazujące że światło jest falą poprzeczną, czy pomiary Fizeau i Foucaulta prędkości światła w ośrodkach o różnych gęstościach, a także prawa dyfrakcji sformułowane przez Huygensa i Fresnela przekonały środowisko naukowe do nowej jakości, do falowej teorii światła.



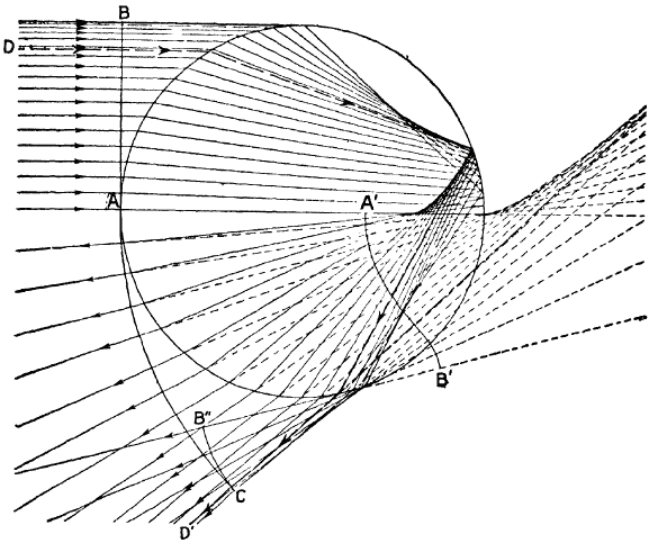
Rys. 1.6. Geometria astygmatycznych wiązek światła, powstających na elementach *dS*: (a) dywergencja w jednej płaszczyźnie, (b) dywergencja w dwóch płaszczyznach

Prace Younga zostały rozwinięte przez dwóch naukowców uniwersytetu w Cambridge – chemika Richarda Pottera i astronoma Sir Georgea Biddella Airy'ego. Potter studiował m.in. kształty kaustyk powstających w kropli wody. Airy poszedł o krok dalej – zauważył, że w ujęciu falowym skokowa zmiana natężenia światła, czyli taka jaka ma miejsce w sąsiedztwie promienia Kartezjusza, jest w istocie łagodzona przez zjawisko dyfrakcji światła. To spostrzeżenie wnosi bardzo wiele do ówczesnego pojmowania tęczy – Airy przewiduje bowiem, że obszar Aleksandra pomiędzy tęczą pierwotną i wtórną nie jest pozbawiony światła, w czym zaprzecza poglądom wyrażonym przez Kartezjusza, Newtona i Younga. Na podstawie obserwacji Pottera, Airy dokonuje lokalnej – w zakresie kąta Kartezjusza, aproksymacji frontu falowego o kształcie litery S, Rys. 1.7, z wykorzystaniem równania algebraicznego trzeciego stopnia w kartezjańskim układzie współrzędnych[58]:

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

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

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



Rys. 1.7. Geometryczne promienie światła rozproszone na kropli wody i opuszczające ją po dwukrotnym załamaniu i jednokrotnym wewnętrznym odbiciu i tworzące kaustykę rzeczywistą (linie ciągłe) i pozorną (linie przerywane). Aproksymacja Airy'ego frontu falowego *A'B'* o kształcie litery *S* w obszarze promienia Kartezjusza *D'* posługuje się równaniem algebraicznym trzeciego stopnia. Promienie opuszczające cząstkę tworzą stożek kaustyczny o wierzchołku w punkcie *C*. Źródło: Humphreys[58]

Funkcja ta została nazwana całką Airy'ego[60] w uznaniu osiągnięć tego astronoma w optyce falowej. Natężenie światła rozproszonego w obszarze stożka kaustycznego jest proporcjonalne do $f^2(z)$. Dla ujemnych wartości argumentu, czyli dla obszaru tęczy pierwotnej, funkcja ta ma postać gasnących oscylacji o malejącym okresie wraz z oddalaniem się w kącie rozproszenia od promienia Kartezjusza. Dla pozytywnych wartości argumentu – czyli w zakresie ciemnego pasma Aleksandra, $f(z)$ maleje wykładniczo do zera. Aproksymacja Airy'ego ma charakter lokalny, co powoduje, że jej dokładność jest największa w sąsiedztwie promienia Kartezjusza. Dokładność ta zależy także od wymiarów cząsteczki, a ściślej rzecz biorąc od tzw. parametru rozmiarowego $x = 2\pi a / \lambda$; czym większy *x*, tym wzór Airy'ego dokładniej opisuje tęczę.

1.3. Elektromagnetyczna teoria tęczy

Wiek XIX przynosi rozwój elektrodynamiki klasycznej. Zbiór praw elektrodynamiki zapisany w 1861 roku pod postacią czterech równań przez Maxwella, rozwiniętych przy wykorzystaniu rachunku wektorowego w 1885 roku przez Heaviside'a, ukazuje

że światło jest poprzeczną falą elektromagnetyczną, którą cechuje polaryzacja i która może rozchodzić się w próżni. Ostateczne potwierdzenie istnienia fal elektromagnetycznych przez Hertza w 1887 roku w słynnym eksperymencie z oscylatorem otwiera drogę do nowych teorii, mogących wyjaśnić naturę tęczy.

Pierwszy, kompleksowy opis interakcji fali elektromagnetycznej i sferycznej cząsteczki wykorzystujący elektrodynamikę Maxwella publikuje w 1908 roku Mie[61]. Ekwiwalentne rozwiązanie, ale abstrahujące od równań Maxwella, pojawiło się jednak wcześniej w 1898 roku za przyczyną Lorenza[62], dlatego dzisiaj mówimy o teorii Lorenza-Mie[§§]. Rozwiązanie zaproponowane przez Mie ma niekonwencjonalną formę – padająca fala elektromagnetyczna o płaskim froncie zostaje zapisana w postaci szeregu harmonik sferycznych, następnie dokonywane jest obliczenie amplitudy pola rozproszonego dla każdej z harmonik osobno, aby w końcowym etapie dokonać superpozycji rozproszonych fal cząstkowych. Rozwiązaniem są tzw. funkcje amplitudowe mające postać nieskończonych, ale zbieżnych szeregów, wyrażone dla dwóch ortogonalnych polaryzacji 1 i 2 fali padającej[63]:

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

przy czym π_n, τ_n to pochodne funkcji Legendre'a pierwszego rodzaju[63], θ jest kątem rozproszenia, zaś a_n i b_n są zespolonymi współczynnikami rozwinięcia fali elektromagnetycznej zależnymi od parametrów cząsteczki (wielkość, kształt, budowa) i padającego promieniowania, które wynikają z zapisu warunków brzegowych dla równań Maxwella na powierzchni sfery:

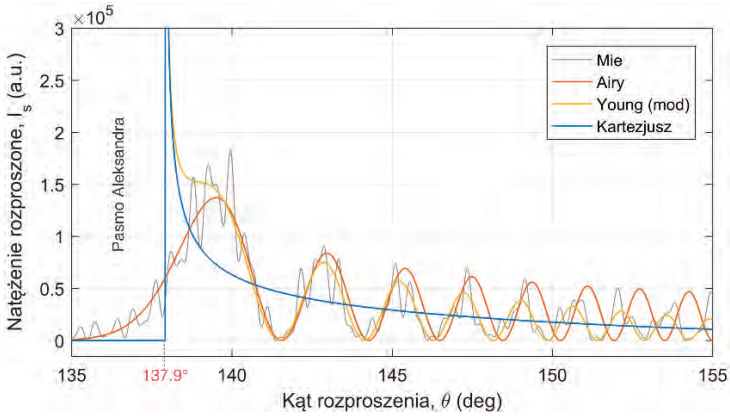
$$\begin{aligned} a_n &= \frac{m^2 j_n(mx)[x j_n(x)]' - j_n(x)[mx j_n(mx)]'}{m^2 j_n(mx)[x h_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x)[mx j_n(mx)]'}, \\ b_n &= \frac{j_n(mx)[x j_n(x)]' - j_n(x)[mx j_n(mx)]'}{j_n(mx)[x h_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x)[mx j_n(mx)]'}, \end{aligned} \tag{1.6}$$

gdzie $x = 2\pi a / \lambda$ to parametr rozmiarowy sfery o promieniu *a*, *m* jest jej zespolonym współczynnikiem załamania, zaś $j_n(z), h_n^{(1)}(z)$ to sferyczne funkcje odpowiednio

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

Bessela i Hankela pierwszego rodzaju[60]. Natężenie rozproszone jest proporcjonalne do $S \cdot S^*$ gdzie (*) oznacza sprzężenie zespolone. Praktyczne zastosowanie rozwiązania Mie w XIX wieku było praktycznie niemożliwe, ponieważ obliczenie rozproszenia na kroplach deszczu wymaga zsumowania nawet kilkunastu tysięcy wyrazów[64]. Dopiero rozwój technik obliczeniowych w drugiej połowie XX wieku ukazał potencjał teorii Lorenza-Mie w kompleksowym, dokładnym opisie zjawisk towarzyszących rozproszeniu światła, w tym tęczy. Współczesne wersje teorii Lorenza-Mie zostały zoptymalizowane pod kątem komputerowego zapisu i wykonania[63-66].

Na Rysunku 1.8 ukazano wykresy natężeń rozproszonych w obszarze tęczy pierwotnej powstającej na kropli wody (n = 1.333) o średnicy 100 μm oświetlonej falą o długości 632.8 nm, obliczone według przedstawionych wcześniej teorii: Kartezjańskiej, Younga uwzględniającej zmianę fazy o $-\pi/2$ w kaustyce (par. 1.2), Airy'ego oraz Lorenza-Mie. Zgodnie z oczekiwaniami, teoria Kartezjusza i Younga przewidują natężenie dążące ku nieskończoności w kącie Kartezjusza (137.9°) i brak światła w paśmie Aleksandra, podczas gdy teoria Airy'ego wykazuje łagodne przejście natężenia w kącie Kartezjusza i maksimum natężenia tęczy położone na prawo od tego kąta. Tęcza według Mie ujawnia szereg zawiłych nieliniowości, które świadczą o tym, że jej natura jest znacznie bardziej skomplikowana niż przewidywali wcześniejsi badacze. Trudno oprzeć się wrażeniu, że to komputer skrupulatnie przetwarzający szeregi funkcji amplitudowych Mie wciąż wie więcej o tęczy!

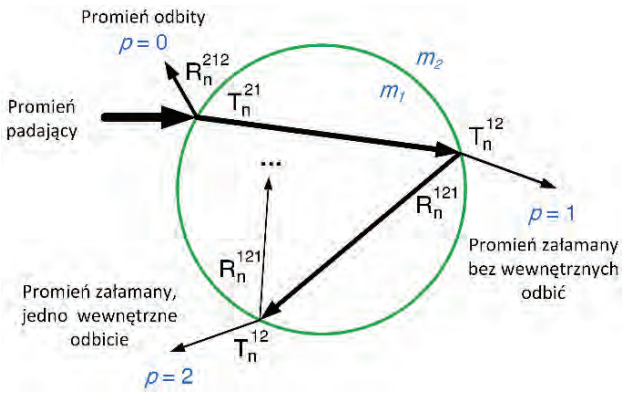


Rys. 1.8. Natężenie rozproszone w obszarze tęczy pierwotnej powstającej na kropli wody (n = 1.333) o średnicy 100 μm oświetlonej falą o długości 632.8 nm, obliczone według różnych teorii: Kartezjańskiej, Younga uwzględniającej zmianę fazy o $-\pi/2$ w kaustyce (par. 1.2), Airy'ego oraz Lorenza-Mie. Kąt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

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

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

przy czym p = 0, 1, 2… to tzw. rząd rozproszenia. Znaczenie tych parametrów ilustruje Rys. 1.9. Obliczenie współczynników T_n^j i R_n^j odbywa się na zasadzie rozwiązania skalarnego równania propagacyjnego przy uwzględnieniu warunków brzegowych na granicy sąsiadujących ze sobą ośrodków m_1 i m_2 [68, 65]. Zapis Debye'go ma bardzo duże znaczenie informacyjne, bowiem pozwala na analizę wpływu na pole rozproszone indywidualnych jego składowych – promieniowania ulegającego ugięciu i odbiciu od powierzchni cząstki (p = 0), promieniowania załamanego bez wewnętrznych odbić (p = 1), promieniowania załamanego po jednokrotnym (p = 2), dwukrotnym (p = 3) wewnętrznym odbiciu, itd.

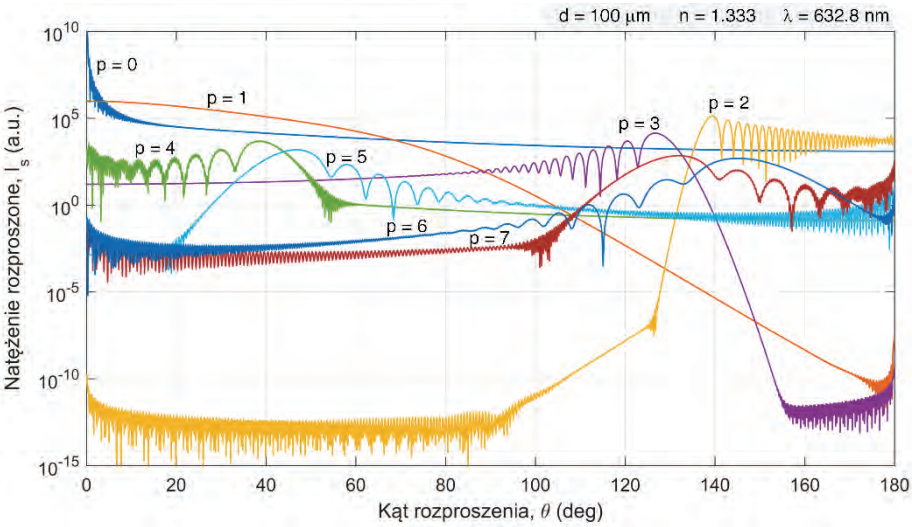


Rys. 1.9. Szkic ilustrujący znaczenie parametrów T_n^j, R_n^j oraz p w rozwinięciu Debye'go

Rysunek 1.10 ujawnia składowe Debye'go rzędu p = 0, 1, ...7, czyli skromną część bogactwa różnorodnych mechanizmów światła wstępujących podczas rozproszenia na

kropli wody o średnicy 100 μm. W zakresie tęczy pierwotnej największy wpływ mają komponenty $p = 2$ oraz $p = 0$. Faktycznie, to interferencja promieni jednokrotnie wewnętrznie odbitych, opuszczających cząsteczkę pod tym samym kątem ale charakteryzujących się odmiennymi drogami optycznymi, prowadzi do powstania tęczy Younga i Airy'ego z Rys. 1.8. Wpływ promieniowania odbitego ($p = 0$) niewątpliwie przyczynia się do postania form nieliniowych na wykresie Mie.

Warto nadmienić, że zsumowanie dostatecznie dużej liczby wyrazów szeregu Debye'go (1.7) prowadzi do rozwiązania tożsamego szeregom funkcji harmonicznych według teorii Lorenza-Mie[68].



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

W zakończeniu dyskusji o fizycznych i matematycznych interpretacjach tęczy należy przytoczyć jeszcze jedną, interesującą teorię tęczy. Bardzo duża ilość wyrazów funkcji amplitudowej (1.5) w teorii Lorenza-Mie, wymagana do wygenerowania zbieżnego szeregu funkcji harmonicznych, zainspirowała Nussenzveiga w latach 60. XX wieku do stworzenia teorii CAM[69-73] (*Complex Angular Momentum*). Ideą CAM jest osobliwa transformacja funkcji amplitudowej cząstki rozpraszającej monochromatyczną falę elektromagnetyczną przedstawionej w postaci Poissona, do postaci całkowej z zastosowaniem zmodyfikowanej transformaty Watsona. Tak sformułowane

zagadnienie jest następnie rozwiązywane poprzez zastosowanie metod aproksymacyjnych, a rozwiązanie ma postać sumy dominujących, asymptotycznych i szybkozbieżnych rozwinięć.

2. Tęcze wielokrotne powstające w wyniku rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej. Część I: Analiza DFT

Szczególna słabość do problemu tęczy przenika nawet najcięższe obliczenia.

(H.C. van de Hulst, 1957)

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

2.1. Model rozproszenia

Na potrzeby niniejszej dyskusji przyjmuje się, że rozproszenie światła dokonuje się na nieskończenie długim, osiowosymetrycznym cylindrze o warstwowej budowie. Każdą z warstw opisuje parametr rozmiarowy $x_j = 2\pi r_j / \lambda$ oraz zespolony współczynnik załamania $m_j(\lambda) = n_j(\lambda) + \mathrm{i}\kappa$, j = 1, 2, … J, gdzie J oznacza ilość warstw, r_j jest promieniem warstwy j, λ jest długością fali padającego promieniowania, zaś $i = (-1^{1/2})$. Przyjmuje się, że część rzeczywista współczynnika załamania zmienia się wraz z długością fali (wykazuje dyspersję chromatyczną), natomiast część urojona jest stała, co jest słuszne w zakresie dyspersji normalnej dla większości szkieł w paśmie optycznym[74]. Konfigurację eksperymentu definiuje prawoskrętny układ współrzędnych, w którym oś symetrii cylindra pokrywa się z osią z jak na Rys. 2.1a.

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

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

gdzie λ_0 jest długością fali maksimum emisyjnego, I_0 jest natężeniem tego maksimum, zaś FWHM jest szerokością połówkową. Kąt rozproszenia θ określa położenie punktowego detektora natężenia światła względem kierunku propagacji padającej wiązki światła. Ogólna dyskusja na temat rozpraszania promieniowania quasi-monochromatycznego i polichromatycznego zawarta jest w pracy[24]. Pole padające rozpatrywane jest jako wektorowa superpozycja *N* wzajemnie niekoherentnych monochromatycznych pól elektromagnetycznych o częstotliwościach z zakresu $\Delta\omega = [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ i propagujących się w tym samym kierunku[24]:

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

gdzie $\mathbf{E}_n^{\mathbf{inc}}(t)$ jest zespoloną amplitudą pola elektrycznego, która fluktuuje w czasie z okresem relatywnie długim względnie zespolonego czynnika $\exp(-\mathrm{i}\,\omega_n t)$, zaś k_n^{inc} jest rzeczywistym wektorem falowym. Wyrażenie dla zespolonego pola magnetycznego $\mathbf{H}^{\mathbf{inc}}$ otrzymuje się poprzez zamianę $\mathbf{E}$ na $\mathbf{H}$ w równaniu (2.2). Rozpraszanie każdej fali monochromatycznej ze zbioru *N* fal rozpatrywane jest jako odrębne zdarzenie. Transformacja pola padającego $[\mathbf{E}^{\mathbf{inc}}, \mathbf{H}^{\mathbf{inc}}]$ w pole rozproszone $[\mathbf{E}^{\mathbf{sca}}, \mathbf{H}^{\mathbf{sca}}]$ w wyniku interakcji z włóknem, rozpatrywana jest w ujęciu kompleksowym z wykorzystaniem rozwiązania równań Maxwell'a przy użyciu metody rozdzielenia zmiennych (*Separation of Variables Method*, SVM)[75] oraz rozwinięcia pola elektromagnetycznego w szeregi Debye'go[76]. Obie metody analizy formułują ekwiwalentne, kompleksowe rozwiązanie problemu rozproszenia. W odróżnieniu od metody SVM, metoda Debye'go ma postać szeregu, składającego się z wyrazów, które mają czytelną interpretację fizyczną. I tak, wyrazy rzędu $p = 0$ odpowiadają promieniowaniu ulegającemu ugięciu na włóknie (dyfrakcji) i odbiciu, $p = 1$ to promieniowanie rozproszone bez wewnętrznych odbić, $p = 2$ oznacza rozproszenie po jednokrotnym wewnętrznym odbiciu itd. Wektorowa suma odpowiednio dużej ilości wyrazów*** prowadzi do rozwiązania tożsamego metodzie SVM. Zakładając, że interakcja światła z włóknem ma charakter liniowych oddziaływań, to uśredniony w czasie wektor Poynting'a światła rozproszonego w punkcie **r** przestrzeni opisuje reguła addytywna[24]:

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

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

przy czym <<…>> oznacza uśrednianie w czasie, natomiast $\mathbf{S}_{\mathbf{n}}^{\mathbf{sca}}$ to zespolony wektor Poyntinga odpowiadający *n*-tej fali monochromatycznej z zakresu $\Delta\omega = [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$:

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

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

$$\ll I^{sca}(\mathbf{r}) \gg = \sum_{n=1}^{N} I_n^{sca}(\mathbf{r}), \tag{2.5}$$

gdzie I_n^{sca} jest natężeniem *n*-tej rozproszonej fali monochromatycznej. Nieskomplikowana heurystyka zastosowana w równaniach (2.3) i (2.5) nie wynika wprost z równań Maxwella, ale jej słuszność została potwierdzona empirycznie w opisie pola rozproszonego, gdy zakres częstotliwości $\Delta\omega$ padającej wiązki promieniowania wyniósł 0.2 częstotliwości maksimum emisyjnego[28]. Na potrzebę dalszych obliczeń widmo emisyjne według (2.1) podzielono na $N = 2945$ składowych oddalonych co 0.1 nm, zaś zakres widmowy $\Delta\lambda$ stanowi 0.47 maksimum emisyjnego λ_0 równego 0.6328 μm.

2.2. Homogeniczne włókno szklane

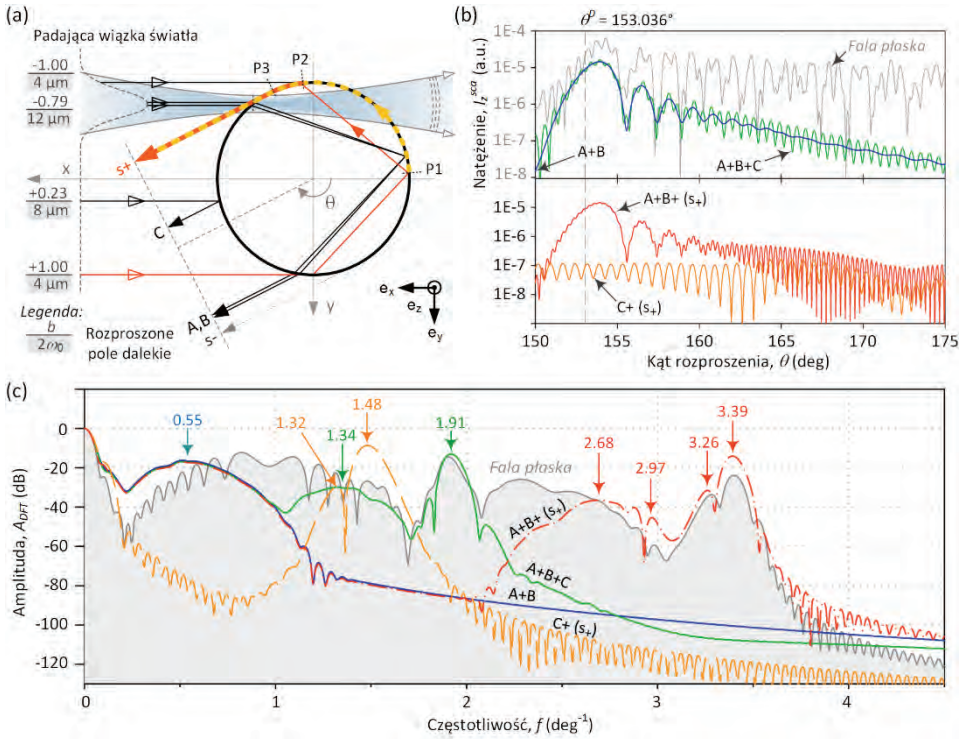
Na początku rozważmy rozpraszanie świtała na homogenicznym włóknie wykonanym ze szkła kwarcowego (SiO_2). Współczynnik załamania włókna opisuje formuła interpolacyjna Sellmeier'a:

$$m_{SiO2}(\lambda) = \left[1 + \sum_{i=1}^{3} A_i \lambda^2 / (\lambda^2 - \ell_i^2)\right]^{1/2} + \mathrm{i}\kappa, \tag{2.6}$$

gdzie A_i = (0.6961663, 0.4079426, 0.8974794), ℓ_i = (0.0684043, 0.1162414, 9.896161 są empirycznymi współczynnikami Sellmeier'a[77] oraz κ=1E-08 wyraża niskie tłumienie szła w paśmie optycznym.

Analizę widma promieniowania rozproszonego dogodnie jest rozpocząć od przypadku oświetlenia wiązką monochromatyczną, czyli gdy FWHM → 0. Narzędziem analizy będzie model rozpraszania na cylindrze Gaussowskiej wiązki światła sformułowany przez Mèésa i in.[78]. Dobierając odpowiednio parametry geometryczne tej

wiązki oraz miejsce jej oddziaływania, jak pokazano na Rys. 2.1a, możliwe jest uzyskanie quasi-selektywnej generacji składowych rozproszonych, oddziałujących na pole rozproszone w sąsiedztwie tęczy pierwotnej w kącie θ, tj.: dwóch promieni A i B ulegających jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu na granicy włókno-otoczenie różniących się nieznacznie drogami optycznymi, promienia C odbitego od powierzchni włókna oraz promieni stycznych do powierzchni włókna, oznaczonych jako $s+$ i $s-$. Pozycję wertykalną wiązki światła definiuje współczynnik oddziaływania $b = [-1, +1]$.



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

Na Rys. 2.1b ukazano natężenia rozproszone w obszarze tęczy pierwotnej, odpowiadające promieniom A, B, C oraz $s+/s-$ z Rys. 2.1a oraz ich wektorowej superpozy-

cji. Dla porównania zamieszczono również wykres natężenia obliczony dla przypadku fali padającej o płaskim froncie falowym (obliczony z wykorzystaniem teorii Lorenza-Mie), który ujmuje w sposób kompleksowy proces rozproszenia światła. Przekształcając następnie te sygnały do dziedziny częstotliwości, otrzymano Rys. 2.1c. Dobór parametrów analizy DFT decyduje przy tym o możliwości jakościowej analizy natury tęczy na podstawie jej reprezentacji w dziedzinie częstotliwości. Zakres kątowy analizy DFT ma swój początek w kącie Kartezjusza tęczy pierwotnej powstającej na włóknie o średnicy 125 μm, wynoszącym 153.036°. Koniec przedziału próbkowania ustalono arbitralnie na 175°, unikając analizy sygnału rozproszonego wstecz i przyczyniającego się do powstania optycznej glorii[79, 80]. Oryginalny zbiór próbek oddalonych w kącie rozproszenia o 0.002° został następnie przeskalowany z wykorzystaniem okna Hanna minimalizującego przeciek widma, a następnie uzupełniony zerami do $2^{16} = 65536$ próbek. Dla tak sformułowanych warunków analizy DFT, rozdzielczość widmowa wynosi około 0.0076 $\deg^{-1}$. Okno Hanna, cechujące się względnie dużym tłumieniem listków bocznych oraz poszerzonym listkiem głównym[81], umożliwia rozróżnienie sygnałów w widmie o zróżnicowanych amplitudach (silny udział interferencji promieni *A* i *B* i znacznie mniejszy wpływ fal powierzchniowych *s*+, por. Rys. 2.1b. Druga cecha tego okna pogarsza możliwość wykrycia słabych komponentów widmowych w sąsiedztwie prążka odpowiadającego interferencji promieni *A* i *B*.

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

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

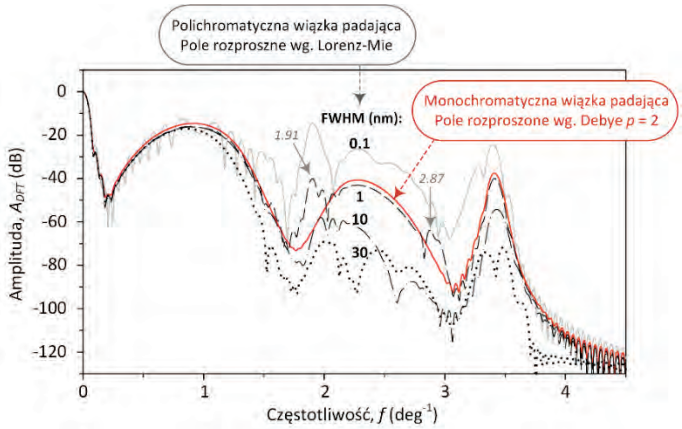
Jak ukazuje Rys. 2.1a, promień o współczynniku oddziaływania $b = +1$ może zostać załamany do wnętrza cylindra, a po osiągnięciu powierzchni granicznej w punkcie P1 propagować się w dalszym etapie już jako fala powierzchniowa. Warto podkreślić, że optyka geometryczna nie uzasadnia powstawania i propagacji fal powierzchniowych. Wyniki analizy numerycznej Lavena[82] z wykorzystaniem szeregów Debye'go dostarczają jednak przekonujących argumentów potwierdzających istnienie wyżej zarysowanych mechanizmów propagacyjnych. Fale powierzchniowe *s*+ interferują również z parą promieni *A* i *B*, co skutkuje powstaniem maksimów widmowych przy 2.68, 2.97, 3.26 oraz 3.39 $\deg^{-1}$.

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

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

Rysunek 2.2 ilustruje wpływ szerokości połówkowej widma promieniowania padającego na włókno na DFT natężenia rozproszonego w obszarze tęczy pierwotnej. Struktura DFT dla wiązki promieniowania o najmniejszym FWHM jest bardzo podobna do tej zaobserwowanej dla przypadku monochromatycznej fali płaskiej z Rys. 2.1c. Wzrostowi FWHM towarzyszy stopniowa redukcja amplitud składowych o największych częstotliwościach na skutek superpozycji natężeń rozproszonych w kącie rozproszenia o długościach fal zawartych w widmie padającego promieniowania[27-29]. Rysunek 2.2 zawiera również jeszcze jeden wykres DFT, odpowiadający tęczy która powstaje w wyniku wektorowej superpozycji komponentów ulegających tylko jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu wewnątrz włókna i przy oświetleniu falą *monochromatyczną* o takiej długości, która odpowiada maksimum emisyjnemu w eksperymencie z wiązką polichromatyczną (0,6328 μm). Taką selektywną tęczę uzyskano wykorzystując wyrazy rzędu $p = 2$ w rozwinięciu pola rozproszonego metodą Debye'go. Podobieństwo wykresu sporządzonego dla źródła polichromatyczngo o FWHM = 1 nm do wykresu według rozwinięcia Debye'go nasuwa następującą konkluzję:

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



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

Wśród różnic należy wymienić dwa maksima widmowe zlokalizowane przy częstotliwościach 1.91 i 2.87 deg^{-1} (por. Rys. 2.1c). Amplituda obu tych maksimów silnie jednak maleje wraz ze wzrostem FWHM. Warto również nadmienić, że powyższa konkluzja jest słuszna pod warunkiem symetrycznego rozkładu energii promieniowania względem maksimum w widmie emisyjnym źródła światła[27] (λ_0).

2.3. Światłowód o skokowym profilu refrakcyjnym

2.3.1. Tęcze wielokrotne i ich transformacje

Rozproszenie światła na cząstce o niejednorodnej strukturze refrakcyjnej może skutkować powstaniem wielokrotnych tęcz pierwotnych w polu dalekim w wyniku jednokrotnego wewnętrznego odbicia światła[83]. Niniejszy paragraf poświęcono analizie roz-

praszania światła w obszarze wielokrotnych tęcz pierwotnych powstających na światłowodzie o średnicy zewnętrznej d_{clad} oraz średnicy rdzenia d_{core}, który cechuje się skokowym profilem refrakcyjnym według wzoru:

$$m(r,\lambda) = \begin{cases} m_{SiO2}(\lambda) + D; & r < a \\ m_{SiO2}(\lambda); & r \geq a \end{cases}, \tag{2.7}$$

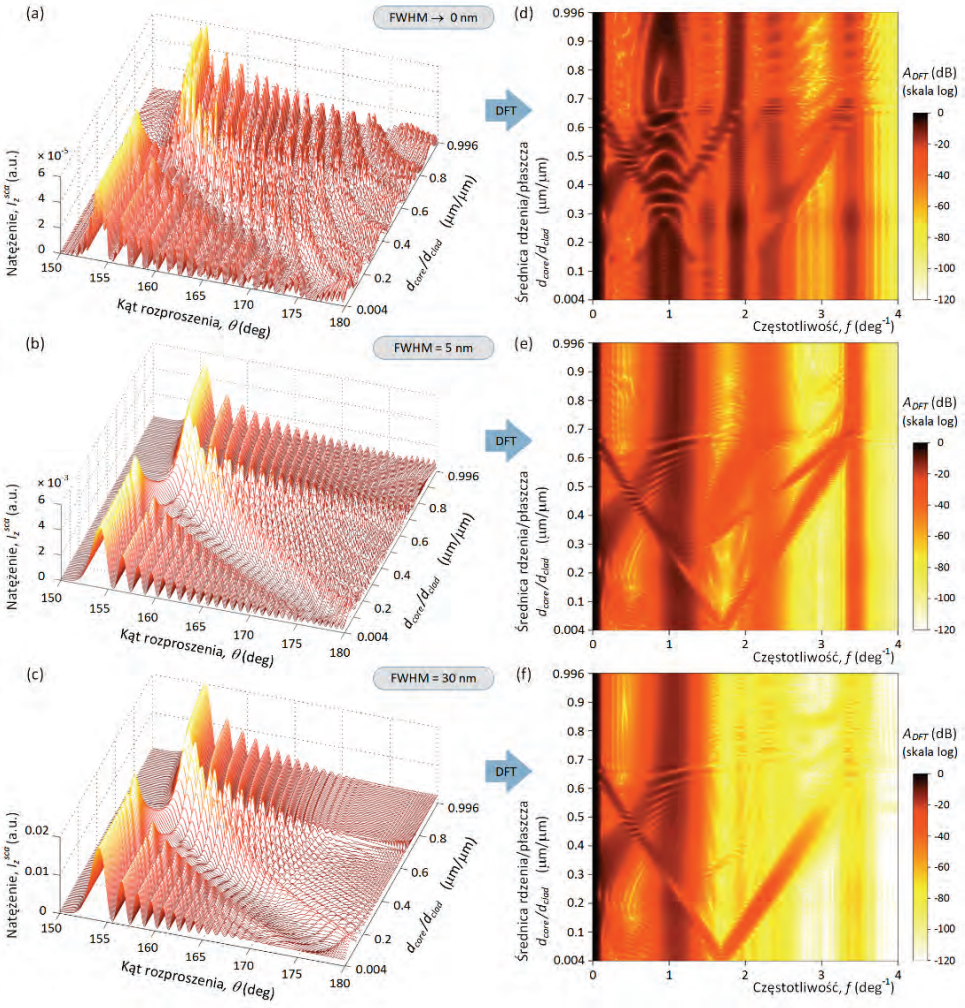
gdzie r jest współrzędną radialną, $m_{SiO2}(\lambda)$ definiuje równanie (2.6), $a = d_{core}/2$ jest promieniem światłowodu, a D = +0.014 jest stałą korekcyjną, wyrażającą obecność domieszki w rdzeniu. Domieszkowanie stosowane w klasycznych światłowodach nie modyfikuje kształtu krzywej dyspersyjnej[84] $m_{SiO2}(\lambda)$.

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

Na Rys. 2.3d–f ukazano przekształcenia DFT rozkładów natężenia światła rozproszonego z Rys. 2.3a–c, dokonane dla zakresu kątowego 160–175° z rozdzielczością 0.002°. W porównaniu z analizą przeprowadzoną dla włókna homogenicznego (Rozdz. 2.2), punkt początkowy analizy przesunięto z θ = 153.036° (kąt Kartezjusza tęczy pierwotnej) do 160°, co pozwoliło na redukcję silnego wpływu interferencji promieni A i B na wynik DFT w zakresie 0…~1 deg^{-1} (kosztem pogorszenia rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości). Wierszowe porównanie Rys. 2.3d–f ilustruje wpływ rodzaju padającego promieniowania na wynik DFT. Warto zauważyć, że DFT z Rys. 2.3d ujawnia komponenty stacjonarne, charakterystyczne dla włókna homogenicznego (por. Rys. 2.1c), ale również słabo wyróżnialne maksima, które zmieniają się wraz z progresją rdzenia światłowodu i tworzą charakterystyczne struktury w kształcie litery V. Rysunek 2.3e pokazuje, że wzrost FWHM źródła światła polepsza zdolność do odróżnienia tych

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

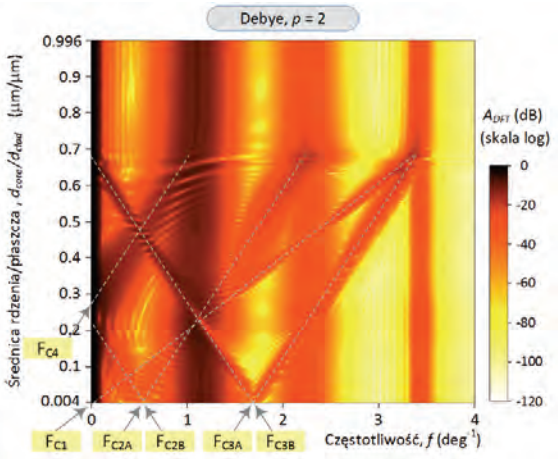
struktur od innych form widmowych (w znaczeniu kryterium Rayleigha). Dalsze poszerzanie widma promieniowania padającego, Rys. 2.3f, prowadzi do degradacji amplitudy maksimów widmowych, wynikających z obecności rdzenia.



Rys. 2.3. ***Lewa kolumna***: pseudotrójwymiarowe rozkłady natężenia światła rozproszonego w zakresie dużych kątów (w obszarze wielokrotnych tęcz pierwotnych) w funkcji średnicy rdzenia światłowodu o średnicy płaszcza 125 µm, oświetlonego wiązką światła monochromatycznego (a) oraz wiązką polichromatyczną: (b) FWHM = 5 nm, (c) FWHM = 30 nm. ***Prawa kolumna***: DFT rozkładów natężenia z Rys. 2.3a–c ($\lambda_0 = 0.6328$ µm, $m_{clad}(\lambda_0) = 1.45702 + i1E\text{-}08$, $m_{core}(\lambda_0) = m_{clad}(\lambda_0) + 0.014$. Parametry DFT: zakres kątowy analizy 153.036–175°, okres próbkowania: 0.002°, ilość punktów DFT: 65536 (uzupełnione zerami), okno Hanna

2.3.2. Analiza rozproszenia z wykorzystaniem szeregów Debye'go

W celu wyjaśnienia natury promieniowania rozproszonego w obszarze wielokrotnych tęcz pierwotnych przeanalizujmy Rys. 2.4, przedstawiający diagram DFT analogiczny do tych ukazanych na Rys. 2.3d–f, lecz pokazujący udział tylko promieniowania ulegającego jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu w światłowodzie. Diagram ten powstał w drodze symulacji rozkładu natężenia światła rozproszonego w funkcji ilorazu średnicy rdzenia i płaszcza (analogicznie do Rys. 2.3a–c), lecz przy wykorzystaniu modelu Debye'go rozproszenia promieniowania monochromatycznego dla komponentów rzędu p = 2, a następnie został przekształcony do dziedziny częstotliwości z zachowaniem takich samych reguł jak dla Rys. 2.3d–f. Nawet pobieżna, jakościowa ocena wskazuje na podobieństwo Rys. 2.3e i Rys. 2.4, a wśród jawnych różnic należy wskazać: i) obecność maksimów o niewielkiej amplitudzie o częstotliwościach ~1.5 i ~1.9 deg^{-1} na Rys. 2.3e, które są charakterystyczne dla DFT promieniowania rozproszonego na homogenicznym włóknie z Rys.2.1c, ii) położenia prążków DFT powyżej granicy $d_{core} / d_{clad} \approx 0.65$ na Rys. 2.3e ulegają silnym oscylacjom pod wpływem zmian średnicy rdzenia (efekt ten nie występuje na Rys. 2.4), iii) na Rys. 2.3e widoczne są dwa maksima przy $f \approx 3$ deg^{-1}, zmieniające swoje położenie wraz ze zmianą średnicy rdzenia powyżej granicy $d_{core} / d_{clad} \approx 0.65$ (również nieobecne na Rys. 2.4).



Rys. 2.4. DFT natężenia rozproszonego z obszaru wielokrotnych tęcz pierwotnych powstających na światłowodzie o średnicy 125 μm i skokowym profilu refrakcyjnym, w funkcji ilorazu średnicy rdzenia i płaszcza. Natężenie rozproszone obliczono z wykorzystaniem rozwinięcia Debye'go pola rozproszonego dla komponentów ulegających jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu (p = 2) i dla przypadku monochromatycznej fali padającej (λ_0 = 0.6328 μm, $m_{clad}(\lambda_0)$ = 1.45702 + i1E-08, $m_{core}(\lambda_0) = m_{clad}(\lambda_0)$ + 0.014. Parametry DFT jak dla Rys. 2.3)

To podobieństwo obu transformacji skłania do przeprowadzenia dalszych analiz, zmierzających do poznania natury pola rozproszonego, w kategorii zjawisk fizycznych odwołujących się do jednokrotnego wewnętrznego odbicia światła.

2.3.3. Geometryczna interpretacja jednokrotnego wewnętrznego odbicia

Natura oddziaływań rzędu $p = 2$ zależy od morfologii światłowodu. Rysunek 2.5 identyfikuje dominujące oddziaływania rzędu $p = 2$, które przyczyniają się do powstania wielokrotnych tęcz pierwotnych (α, β_1, β_2), a także fale powierzchniowe powstające na granicy pomiędzy rdzeniem i płaszczem (*c*+, *c*–) oraz płaszczem i otoczeniem (*s*+). Analizę podzielono na cztery przypadki, różniące się średnicą rdzenia światłowodu o średnicy zewnętrznej wynoszącej 125 μm: (a) 8.2 μm, (b) 50 μm, (c) 89.79 μm i (d) 100 μm. W każdym z tych przypadków naszkicowano odrębnie geometryczne promienie światła odpowiadające za powstanie tęcz pierwotnych i promienie światła symbolizujące fale powierzchniowe. Sposób oznaczania tęcz generowanych w drodze wewnętrznego odbicia na granicy rdzeń-płaszcz (α) oraz płaszcz-otoczenie (β) jest zgodny z systematyką Locka i in.[85]. Kropki obecne na płaszczyznach $\Gamma_\alpha, \Gamma_{\beta 1}, \Gamma_{\beta 2}$ symbolizują punkty oddziaływania w polu dalekim, w których natężenie w kącie rozproszenia θ jest największe (*glare points*)[86].

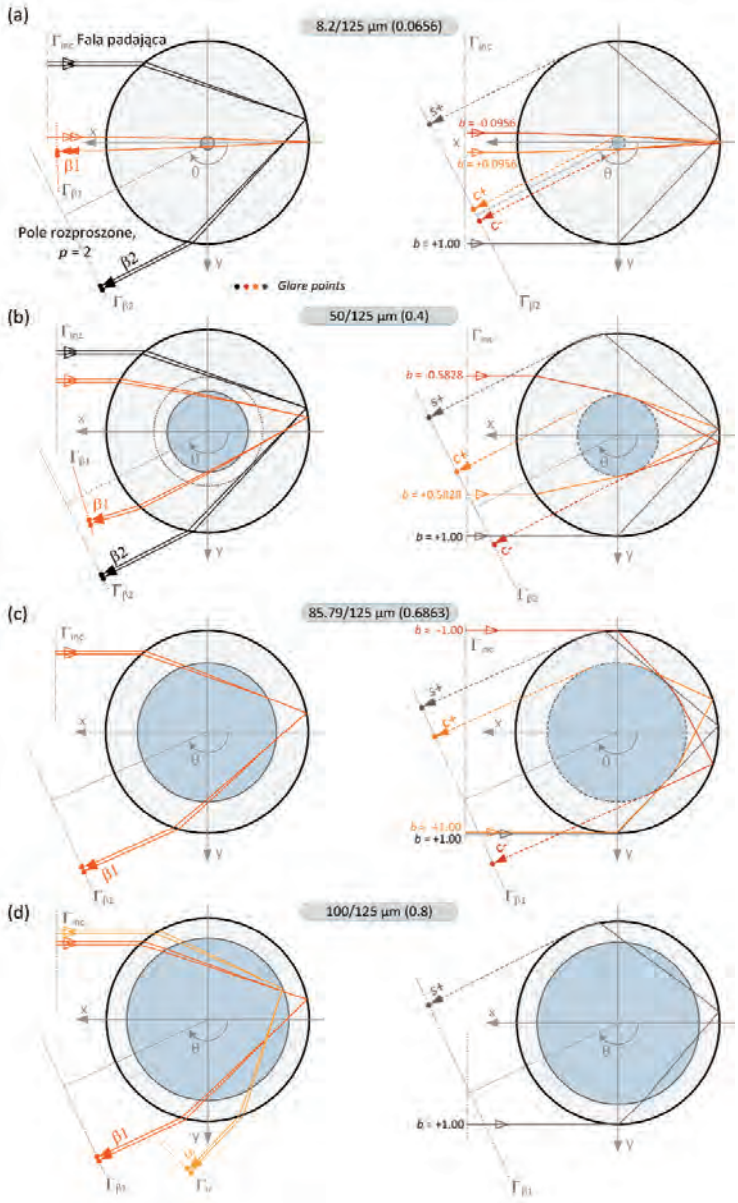
Analizę Rys. 2.5 dogodnie jest rozpocząć od światłowodu o najmniejszym rdzeniu, $d_{core} = 0.0656 \cdot d_{clad}$ (Rys. 2.5a). W wyniku wewnętrznego odbicia światła na granicy pomiędzy płaszczem i otoczeniem, dochodzi do powstania pary promieni rozproszonych, opuszczających światłowód pod takim samym kątem. Para ta interferuje w polu dalekim, tworząc tęczę pierwotną β_2 o kącie Kartezjusza wynoszącym 153.036°. Niewielka część promieniowania propaguje się także przez płaszcz i rdzeń, ulega odbiciu na granicy płaszcz-otoczenie, a następnie propaguje się wstecznie przechodząc ponownie przez płaszcz i rdzeń światłowodu. Para promieni, które rozpraszają się według tego scenariusza tworzy drugą – bliźniaczą tęczę pierwotną β_1 o kącie Kartezjusza wynoszącym 179.18°, a więc zlokalizowanym w zakresie rozpraszania wstecz. Obecność rdzenia wywołuje także inne osobliwe oddziaływania w postaci dwóch fal powierzchniowych *c*+ i *c*–, które powstają wówczas, gdy promieniowanie propagujące się przez płaszcz jest styczne do rdzenia. Tego typu fale wzbudzane są przez promieniowanie padające o niedużym współczynniku oddziaływania *b* wynoszącym ±0.0956. Wzrost średnicy rdzenia (przy zachowaniu rozmiaru płaszcza) prowadzi do relokacji tęczy β_1 w kącie rozpraszania w kierunku tęczy β_2, Rys. 2.5b. Obie tęcze β mają porównywalne natężenia, a oddziela je charakterystyczny obszar przejściowy jak na Rys. 2.3b. Dalsze powiększanie średnicy rdzenia do ok. $0.5376 \cdot d_{clad}$ powoduje wykluczenie przez rdzeń pary promieni propagujących się przez płaszcz, co prowadzi do powstania tylko tęczy β_1. Porównanie Rys. 2.5a

i 2.5b pokazuje również, że ewolucja średnicy rdzenia prowadzi do oddalania się punktów oddziaływania fal powierzchniowych *c*+ i *c*– na płaszczyźnie $\Gamma_{\beta 2}$.

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

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

Optyka geometryczna jest niewątpliwie prostym i intuicyjnym narzędziem w analizie niektórych zjawisk towarzyszących rozproszeniu światła, ma jednak ograniczone zastosowanie do opisu propagacji fal powierzchniowych. Należy zaznaczyć, że styczne ścieżki propagacji ukazane na Rys. 2.5a–d, tłumaczą powstanie fal powierzchniowych *c*–, *c*+ i *s*+ o *dominującym* udziale w polu dalekim. Innym znanym mechanizmem generacji fal powierzchniowych rzędu *p* = 2 (i innych rzędów) jest tzw. *efekt tunelowania*[71, 89, 90]. Efekt ten zachodzi, gdy fala elektromagnetyczna nie ulega stycznej interakcji z powierzchnią rdzenia czy płaszcza, lecz propaguje się w bliskim jej sąsiedztwie. Oddziaływanie fali z tą powierzchnią jest słabe i dokonuje się poprzez barierę potencjału tworzącą się na styku dwóch ośrodków, podobnie jak cząsteczki, które pokonują barierę potencjału o wysokości większej niż energia cząstki według mechaniki kwantowej. Efekt tunelowania również prowadzi do powstania fal elektromagnetycznych, które propagują się cyrkularnie na styku rdzenia i płaszcza oraz płaszcza i otoczenia. Te dwa mechanizmy generacji fal powierzchniowych, czyli styczne oddziaływanie padających promieni światła oraz efekt tunelowania, powinny być rozważane *de facto* jako niepodzielny proces fizyczny[91, 92]. Warto w tym miejscu zauważyć, że płaszcz stanowiący wąską otulinę rdzenia jak na Rys. 2.5d, funkcjonuje jak falowód o pierścieniowym kształcie[85].



Rys. 2.5. Dominujące oddziaływania rzędu $p = 2$, które przyczyniają się do powstania wielokrotnych tęcz pierwotnych (α , β_1 , β_2), a także fale powierzchniowe powstające na granicy pomiędzy rdzeniem i płaszczem (c+, c–) oraz płaszczem i otoczeniem (s+). Monochromatyczna fala płaska rozpraszana jest na światłowodzie o skokowym profilu refrakcyjnym i o średnicy zewnętrznej 125 µm. Parametrem analizy jest średnica rdzenia, odpowiednio: (a) 8.2 µm, (b) 50 µm, (c) 89.79 µm i (d) 100 µm. (λ_0 = 0.6328 µm, $m_{clad}(\lambda_0) = 1.45702 + i1E\text{-}08$, $m_{core}(\lambda_0) = m_{clad}(\lambda_0) + 0.014$)

2.3.4. Interpretacja DFT tęcz wielokrotnych powstających w wyniku rozpraszania polichromatycznej wiązki światła

W próbie połączenia wyników geometrycznej analizy rozproszenia światła z Rys. 2.5 oraz rezultatów analizy DFT z Rys. 2.4, warto przytoczyć intuicyjną metodę interpretacji widma zastosowaną przez van Beecka i Reithmullera w analizie widma tęczy powstającej na kropli wody[93]. W analogii do eksperymentu Younga z dwiema szczelinami wykazali oni, że każde maksimum widmowe jest wynikiem interferencji pomiędzy dwoma, geometrycznymi promieniami światła. Punkty oddziaływania (*glare points*) tych promieni w polu dalekim mogą być interpretowane jako spójne, punktowe źródła promieniowania. Podobnie jak w eksperymencie Younga, źródła te interferują a wynik tej interakcji ma postać obrazu prążkowego.

Uważna analiza zmian położenia punktów oddziaływania fal powierzchniowych *c*+ i *c*– wraz ze wzrostem średnicy światłowodu na Rys. 2.5a–c wskazuje, że interferencja tych fal ujawnia się w postaci maksimum DFT oznaczonym jako F_{C1} na Rys. 2.4. Gdy średnica rdzenia jest najmniejsza, jak na Rys. 2.5a, punkty oddziaływania fal powierzchniowych *c*+ i *c*– znajdują się blisko siebie, co skutkuje powstaniem maksimum widmowego o relatywnie niedużej częstotliwości. To maksimum ujawnia się na Rys. 2.4 wówczas, gdy średnica rdzenia d_{core} osiągnie wartość około $0.2 \cdot d_{clad}$, ponieważ w zakresie częstotliwości 0 do ~1.2 deg^{-1} dominują silne komponenty widmowe związane z interferencją promieni tworzących tęczę β_2. Wzrost średnicy rdzenia przyczynia się do zwiększenia odstępu punktów oddziaływania fal powierzchniowych *c*+ i *c*– w polu dalekim, czemu towarzyszy przesuwanie się maksimum F_{C1} w stronę wyższych częstotliwości.

Geometria oddziaływań rzędu $p = 2$ przedstawiona na Rys. 2.5a i b sugeruje, że DFT natężenia rozproszonego z obszaru tęcz pierwotnych powinno zawierać komponenty wynikające z interferencji elektromagnetycznych fal powierzchniowych *c*+, *c*– oraz promieni ulegających wewnętrznemu odbiciu od granicy pomiędzy płaszczem i otoczeniem. Każdy z promieni tworzących tęczę β_2 interferuje z jedną z fal powierzchniowych *c*+ i *c*–, dlatego DFT natężenia rozproszonego na Rys. 2.4 zawiera cztery maksima odpowiadające tej interferencji, oznaczone jako F_{C2A}, F_{C2B}, F_{C3A} i F_{C3B}. Zmiany położeń tych maksimów wraz ze średnicą światłowodu tworzą charakterystyczne struktury w kształcie litery V, o wierzchołkach umiejscowionych przy częstotliwościach ~0.50 i 1.68 deg^{-1}. Wraz ze wzrostem średnicy światłowodu obie pary maksimów DFT oddalają się od siebie, ponieważ rosną odległości pomiędzy punktami oddziaływań fal powierzchniowych *c*+, *c*– w polu dalekim przy zachowaniu kąta Kartezjusza promieni tworzących tęczę β_2 (do chwili, gdy rdzeń o średnicy

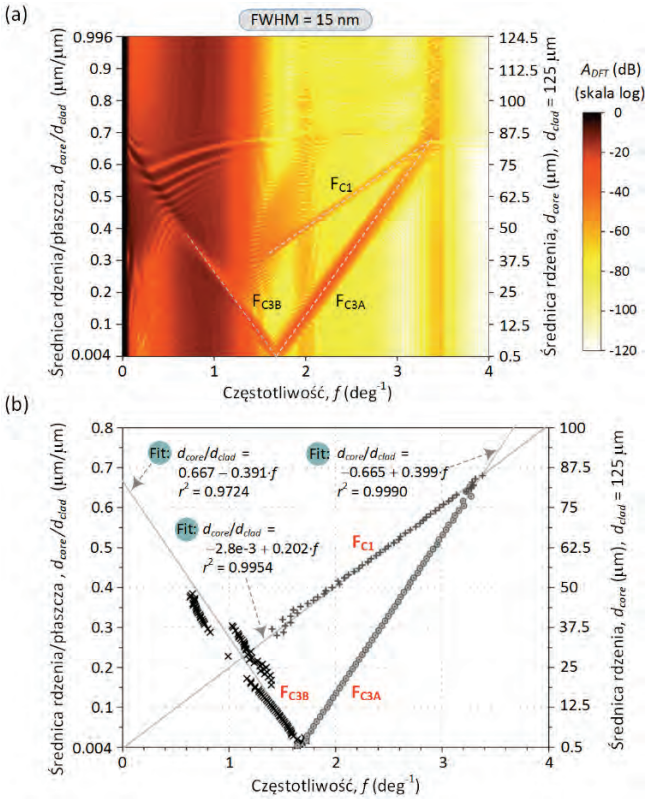
ok. $0.5376 \cdot d_{clad}$ wykluczy parę promieni propagujących się przez płaszcz, co prowadzi do powstania tylko tęczy β_1). Warto również zauważyć, że maksima DFT na Rys. 2.4, które wynikają z istnienia fal powierzchniowych *c*+ i *c*– zanikają, gdy rdzeń osiągnie średnicę $d_{core} \approx 0.69 \cdot d_{clad}$, czyli gdy promienie padające na światłowód o współczynniku oddziaływania *b* bliskim 1 nie tworzą stycznych do rdzenia, a tym samym – nie generują fal *c*+ i *c*– (jak na Rys.2.5c). Nie można oczywiście wykluczyć istnienia rdzeniowych fal powierzchniowych powyżej granicy $d_{core} \approx 0.69 \cdot d_{clad}$ posługując się prostymi regułami optyki geometrycznej. Jak wspomniano wcześniej, powstanie fal rdzeniowych dokonuje się również na zasadzie zjawiska tunelowania energii promieniowania propagującego się w sąsiedztwie rdzenia, ale nie mającego punktu stycznego z tym rdzeniem w rozumieniu optyki geometrycznej. Zjawisko to tłumaczy obecność licznych wąskich ekstremów na Rys. 2.3d–f powyżej granicy $d_{core} / d_{clad} \approx 0.69$.

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

2.3.5. Inwersyjna charakterystyka rdzenia – analiza przygotowawcza

Wyniki analizy DFT przedstawione na Rys. 2.3e i 2.3f sugerują możliwość pośredniej oceny średnicy włókna na podstawie położenia wybranych maksimów DFT. Na Rys. 2.6a przedstawiono diagram DFT analogiczny do tych ukazanych na Rys. 2.3e i f, lecz wykonany dla padającej wiązki polichromatycznej o szerokości połówkowej widma emisyjnego (FWHM) równej 15 nm, co jest typową wartością dla jednobarwnych diod LED o umiarkowanym poszerzeniu widmowym. Oknem analizy objęto natężenie rozproszone w polu dalekim w zakresie kątowym 153.036–175° z krokiem co 0.002°. Poszerzony zakres analizy, w porównaniu do warunków zastosowanych dla Rys. 2.3e i f, umożliwił zwiększenie rozdzielczości częstotliwościowej kosztem pogorszenia widoczności komponentów widmowych o niewielkiej amplitudzie w zakresie częstotliwości 0…~1 deg^{-1}, w którym dominuje interferencja promieni tworzących obie tęcze β. Rodowód trzech wyróżnionych maksimów oznaczonych jako F_{C1}, F_{C3A} i F_{C3B} na Rys. 2.6a wynika z opisanych wcześniej oddziaływań rdzeniowych fal powierzchniowych *c*+ i *c*–. Na Rys. 2.6b przedstawiano wyniki analizy położenia widmowego tych maksimów w szerokim zakresie zmian średnicy rdzenia (0.5–124.5 μm) wraz z regresją liniową otrzymanych zbiorów danych. Warto zauważyć, że położenie maksimum F_{C3A} jest liniową funkcją średnicy rdzenia w szerokim zakresie jej zmian, obejmują-

cym standardowe, telekomunikacyjne światłowody jednomodowe (rdzeń o średnicy 8.2–10 μm) oraz wielomodowe światłowody o skokowym profilu refrakcyjnym (rdzeń 50 lub 62.5 μm). Praktyczne wykorzystanie tych szczególnych cech widmowych, które mogą posłużyć do identyfikacji średnicy światłowodu w procesie pomiarowym wymaga jednak dalszych analiz. Przede wszystkim należy poznać wpływ różnorodnych niedoskonałości geometrycznych światłowodu (niewspółosiowość oraz eliptyczność rdzenia i płaszcza) na maksima F_{C1}, F_{C3A} i F_{C3B}. Warto zauważyć, że taka analiza może być zredukowana do badania rozproszenia komponentów ulegających jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu (p = 2), bez potrzeby posługiwania się pełnym,



Rys. 2.6. (a) DFT natężenia rozproszonego z obszaru wielokrotnych tęcz pierwotnych powstających na światłowodzie o średnicy 125 μm i skokowym profilu refrakcyjnym w funkcji ilorazu średnicy rdzenia i płaszcza. Światłowód oświetlony jest wiązką promieniowania polichromatycznego o FWHM = 15 nm. (b) wyniki analizy położenia maksimów F_{C1}, F_{C3A} i F_{C3B} z Rys. 2.6a. ($\lambda_0 = 0.6328$ μm, $m_{clad}(\lambda_0) = 1.45702$ + i1E-08, $m_{core}(\lambda_0) = m_{clad}(\lambda_0)$ + 0.014. Parametry DFT: zakres kątowy analizy 153.036–175°, okres próbkowania: 0.002°, ilość punktów DFT: 65536 (uzupełnione zerami), okno Hanna

kompleksowym rozwiązaniem wynikającym z równań Maxwella. Budowanie formalnych analogii łączących widmo tęczy i cechy światłowodu napotyka również na liczne trudności, ponieważ wynik DFT zależy od konfiguracji układu eksperymentalnego (właściwości emisyjne źródła promieniowania, pochylenie włókna względem padającej wiązki promieniowania, etc.) jak i również parametrów tej transformacji (zakres kątów analizy, częstotliwość próbkowania sygnału natężenia, kształt funkcji okna).

2.4. Światłowód o gradientowym profilu refrakcyjnym

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

$$m(r,\lambda) = \begin{cases} m_{core0}(\lambda)[1-2\Delta(r/a)^{\alpha}]^{1/2}; & r < a \\ m_{\mathrm{SiO}_2}(\lambda); & r \geq a \end{cases}, \tag{2.8}$$

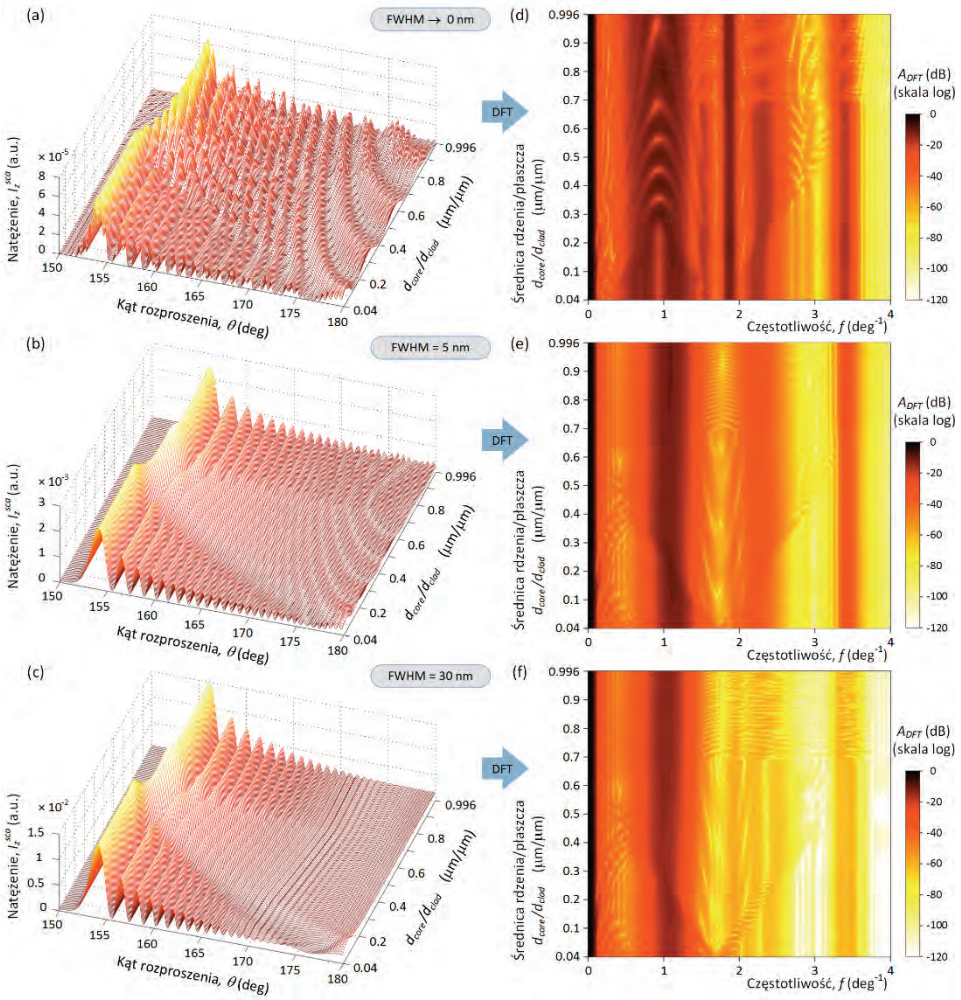
gdzie $m_{core0}(\lambda) = m_{SiO2}(\lambda) + D$ jest współczynnikiem załamania w osi rdzenia, D = +0.014 jest stałą korekcyjną, wyrażającą obecność domieszki w rdzeniu, $m_{SiO2}(\lambda)$ wyraża wzór (2.6), $\Delta = (m_{core}^2 - m_{SiO2}^2)/2m_{core}^2$ jest względną różnicą współczynników załamania w osi rdzenia i płaszcza, r jest współrzędną radialną, $a = d_{core}/2$ jest promieniem rdzenia, natomiast $\alpha = 2$ jest współczynnikiem kształtu profilu refrakcyjnego (profil paraboliczny). Na potrzeby analizy numerycznej, profil refrakcyjny rdzenia aproksymowano serią osiowosymetrycznych warstw, każda o grubości 0.1 μm.

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

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

symulacji z Rys. 2.7d–f do wyników analizy światła rozproszonego na światłowodzie o skokowym profilu, ujętych na Rys. 2.3e i Rys. 2.4.

Ocena wyników analizy DFT pod kątem pośredniego pomiaru średnicy rdzenia światłowodu gradientowego wydaje się ograniczona, ponieważ Rys. 2.7d–f zawierają informację, którą trudno jest ocenić zarówno w sposób jakościowy jak i ilościowy. Te subtelne



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

oddziaływania fal powierzchniowych na pole dalekie zostaną znacznie bardziej czytelnie rozpoznane w rozdziale 3, który prezentuje analizę odpowiedzi impulsowej badanego włókna, pozwalającą na czasową separację interferujących ze sobą komponentów rozproszonych.

3. Tęcze wielokrotne powstające w wyniku rozpraszania promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej. Część II: Analiza w dziedzinie czasu

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

(M. Konopnicka, *Tęcza*)

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

3.1. Model rozproszenia

Ogólna metodyka analizy odpowiedzi impulsowej centrum rozpraszającego falę elektromagnetyczną jest przedmiotem prac[94-96]. Rozważmy impuls fali elektromagnetycznej o płaskim froncie, propagujący się w kierunku $-x$ i padający normalnie na włókno jak na Rys. 2.1a (Rozdz. 2.1). Wektor elektryczny tej fali oscyluje równolegle względem osi z tego włókna:

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

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

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

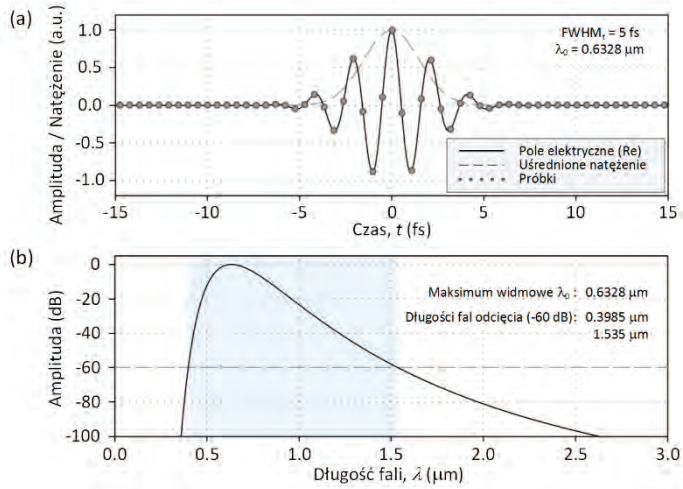
gdzie $\mathcal{F}$ oznacza transformację Fouriera. Maksimum funkcji $E^{inc}(\omega)$ przypada na dodatnią częstotliwość ω_0. Zakładając, że interakcja światła i włókna jest liniowa, to odpowiedź czasowa $\mathbf{E}^{\mathbf{sca}}(\mathbf{r},t)$ w polu dalekim w punkcie **r** może być wyrażona jako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

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

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

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

gdzie E_0 jest amplitudą pola elektrycznego, $\sigma_t = \mathrm{FWHM_t} / [2(2\ln 2)^{1/2}]$ jest odchyleniem standardowym, zaś $\mathrm{FWHM_t}$ – szerokością połówkową rozkładu normalnego. Rysunek 3.1a ilustruje oscylację rzeczywistej części wektora pola elektrycznego impulsu fali elektromagnetycznej w funkcji czasu oraz natężenie $\mathbf{E}^{\mathbf{inc}} \cdot \mathbf{E}^{\mathbf{inc*}}$, przyjmując $\lambda_0 = 0.6328$ μm oraz $\mathrm{FWHM_t} = 5$ fs w równaniach (3.1) i (3.4). Czas $t = 0$ pokrywa się z maksimum obwiedni impulsu. Punkty na Rys. 3.1a reprezentują zbiór N_{DFT} = 8192 próbek oddalonych od siebie w równych odstępach czasu $\Delta t = 1/f_s \approx 0.53$ fs, gdzie $f_s = 4.0c/\lambda_0$ jest częstotliwością próbkowania. Rysunek 3.1b ukazuje ciągłe widmo



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

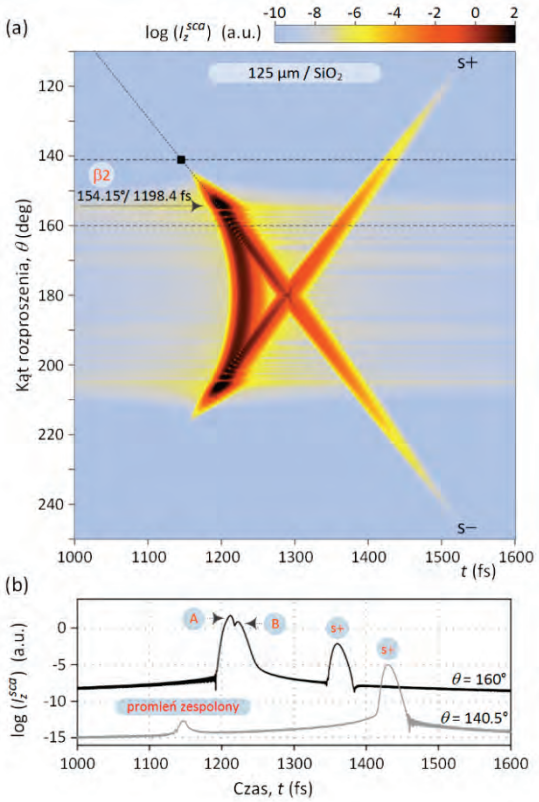
impulsu światła z Rys. 3.1a, obliczone z wykorzystaniem równania (3.2). W świetle wniosków płynących z analizy DFT o możliwości interpretacji tęcz polichromatycznych jako superpozycji komponentów ulegających jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu (Rozdz. 2), analiza odpowiedzi impulsowej $\mathbf{E}^{\delta}(\mathbf{r},\omega)$ będzie oparta na kompleksowym modelu Debye'go rozproszenia promieniowania monochromatycznego[76] dla komponentów rzędu p = 2.Ciągłe widmo emisyjne z Rys. 3.1b ograniczono do zakresu (0.3985, 1.535 μm), wyznaczonego przez –60 dB poziom względem maksimum widmowego (0 dB). Dyspersyjne zmiany współczynnika załamania definiują równania (2.6), (2.7) i (2.8) odpowiednio dla włókna ze szkła kwarcowego i światłowodu o skokowym i gradientowym profilu refrakcyjnym.

3.2. Homogeniczne włókno szklane

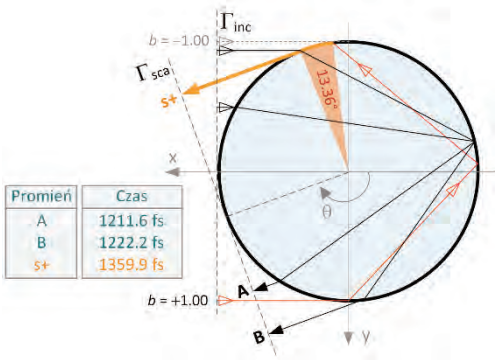
W analizie odpowiedzi impulsowej homogenicznego włókna kwarcowego (SiO_2) o średnicy 125 μm zostaną wykorzystane tzw. diagramy Lavena[82], ukazujące odpowiedź impulsową badanej cząstki w wybranym zakresie kątów rozproszenia. Rysunek 3.2a prezentuje diagram Lavena dla promieniowania ulegającego jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu (p = 2) w zakresie kątowym $110° \leq \theta \leq 225°$ w krokach co 0.05°. Natężenie rozproszone wyrażono w skali logarytmicznej, a interwał czasowy pomiędzy kolejnymi punktami wykresu wynosi $\Delta t = 1/f_s \approx 0.53$ fs. Czas „0" odnosi się do chwili, gdy impuls światła dociera do płaszczyzny Γ_{inc}, która jest normalna do powierzchni włókna, a rejestracja natężenia rozproszonego odbywa się w płaszczyźnie Γ_{sca} jak ukazano na Rys. 3.3.

Wśród osobliwych form widocznych na Rys. 3.2a należy wyróżnić maksimum natężenia pojawiające się dla $\theta \approx 154.15°$ i $t \approx 1198.4$ fs, odpowiadające maksimum natężenia tęczy β_2, o kącie Kartezjusza przypadającym na 153.036°. Dwa pojawiające się w bliskim sąsiedztwie impulsy światła odpowiadają geometrycznym promieniom światła A i B, które ulegają wewnętrznemu odbiciu na granicy pomiędzy włóknem i otoczeniem jak na Rys. 3.3. Interferencja obu tych promieni w polu dalekim objawia się w postaci tęczy Airy'ego, por. Rys. 2.1b (Rozdz. 2). Wraz ze wzrostem kąta rozproszenia począwszy od kąta Kartezjusza (153.036°), te dwa impulsy światła stają się coraz bardziej odseparowane w czasie, co jest wynikiem powiększającej się różnicy ich dróg optycznych pomiędzy dwiema płaszczyznami referencyjnymi Γ_{inc} i Γ_{sca}. W chwili $t \approx 1230.1$ fs jeden z promieni ulega rozproszeniu wstecz (θ = 180°) po dotarciu do granicy pomiędzy włóknem i otoczeniem. Drugi impuls światła pojawiający się przy θ = 180° i $t \approx 1287.6$ fs wynika z geometrycznego promienia światła, który pada na włókno niemal stycznie do jego krawędzi (b = +0.998). Impuls ten

kontynuuje propagację osiągając $\theta_c \approx 173.36°$ i $t \approx 1263.9$ fs. Kąt θ_c jest tzw. kątem krytycznym, dla którego padający stycznie promień światła ($b = +1$) ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu na granicy włókno-otoczenie, jak ukazano na Rys. 3.3. Impuls światła odpowiadający tej ścieżce na Rys. 3.2a kontynuuje jednak swoją propagację poza granicę wynikającą ze stycznego padania światła w wyniku powstania fali powierzchniowej $s+$[71, 68, 91, 82]. Warto zauważyć, że Rys. 3.2a jest symetryczny względem $\theta = 180°$, dzięki czemu tęczy, która ujawnia się w kącie $\theta \approx 154.15°$ towarzyszy druga, identyczna tęcza pierwotna widoczna w $\theta \approx 360°–154.15° = 205.85°$ i $t \approx 1198.4$ fs. Rysunek 3.2a ukazuje również obecność fali powierzchniowej $s–$, propagującej się zgodnie z ruchem wskazówek zegara, która powstaje w wyniku stycznego padania światła, ale ze współczynnikiem oddziaływania $b = –1$. Geometryczny promień światła, który zostaje załamany do wnętrza włókna w takich warunkach, ulega



Rys. 3.2. (a) Diagram Lavena – odpowiedź homogenicznego, szklanego (SiO_2) włókna na impuls światła o połówkowym czasie trwania 5 fs w funkcji kąta rozproszenia θ. (b) odpowiedź impulsowa w $\theta = 140.5°$, 160° ($\lambda_0 = 0.6328$ µm, $m(\lambda_0) = 1.45702 + i1E-08$)



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

wewnętrznemu odbiciu w kącie krytycznym $\theta_c \approx 360°–173.36° = 186.64°$ w chwili $t \approx$ 1263.9 fs zanim rozpocznie propagację w postaci fali powierzchniowej s–. Fala ta stopniowo traci energię w drodze propagacji, dlatego jej wpływ w kącie θ = 160° jest niewidoczny.

Ograniczona dynamika barw Rys. 3.2a nie pozwala na wykrycie subtelnych komponentów rozproszonych. Interesujące fakty ujawnia Rys. 3.2b, pokazujący odpowiedź impulsową badanego włókna w dwóch wyróżnionych kątach rozproszenia: θ = 140.5° oraz 160°. Dwa sąsiadujące ze sobą maksima natężenia światła występujące w kącie θ = 160° reprezentują geometryczne promienie światła A i B z Rys. 3.3. Fala powierzchniowa s+ manifestuje swój udział w postaci dwóch, relatywnie silnych impulsów światła występujących w czasie $t \approx$ 1359.7 fs (θ = 160°) oraz $t \approx$ 1430.6 fs (θ = 140.5°). Natężenie rejestrowane w kącie obserwacji θ = 140.5° ujawnia ponadto impuls światła o niewielkim natężeniu w chwili $t \approx$ 1146.7 fs. Jest to oznaka tzw. zespolonego promienia światła[68] (*complex ray*), wynikającego z subtelnych oddziaływań falowych mających miejsce poniżej kąta Kartezjusza tęczy pierwotnej β_2.

3.3. Światłowód o skokowym i gradientowym profilu refrakcyjnym

Cztery diagramy Lavena przedstawione na Rys. 3.4a–d umożliwiają analizę natury promieniowania ulegającego jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu (p = 2) w zakresie kątowym 0–180°. Każdy z tych wykresów został wykonany dla odmiennej średni-

cy rdzenia światłowodu o skokowym profilu refrakcyjnym: (a) 1.25 μm, (b) 8.2 μm, (c) 50 μm, (d) 100 μm. Natężenie rozproszone wyrażono w skali logarytmicznej.

Rysunek 3.4a pokazuje, że obecność nawet niewielkiego rdzenia o średnicy niewiele większej od maksimum widmowego padającego promieniowania (0.6328 μm) powoduje powstanie dwóch następujących po sobie impulsów światła, zaznaczających swoją obecność w całym zakresie kątów rozpraszania. Oba impulsy zbiegają się w kącie rozpraszania wstecz (180°) w chwili $t \approx 1230$ fs, sąsiadując z impulsem światła pochodzącym od promienia *B* i współtworzącego tęczę pierwotną β_2. Genezę tych impulsów wyjaśnia geometria rozproszenia z Rys. 2.5 (Rozdz. 2). Światło, które pada na włókno z niewielkim współczynnikiem oddziaływania (*b*), propaguje się zarówno przez płaszcz jak i rdzeń światłowodu, ulegając wewnętrznemu odbiciu od granicy płaszcz-otoczenie. Ten geometryczny udział ulega płynnemu przekształceniu w fale powierzchniowe *c*–/*c*+ wówczas, gdy promieniowanie załamane w płaszczu propaguje się stycznie do rdzenia. W światłowodzie, w którym rdzeń ma średnicę równą 1.25 μm taka sytuacja zachodzi gdy współczynnik oddziaływania wynosi zaledwie ±0.0146, skutkując powstaniem fal powierzchniowych propagujących się w przeciwnych kierunkach po obwodzie rdzenia począwszy od kątów krytycznych wynoszących 149.3° (*c*+) i 210.7° (*c*–).

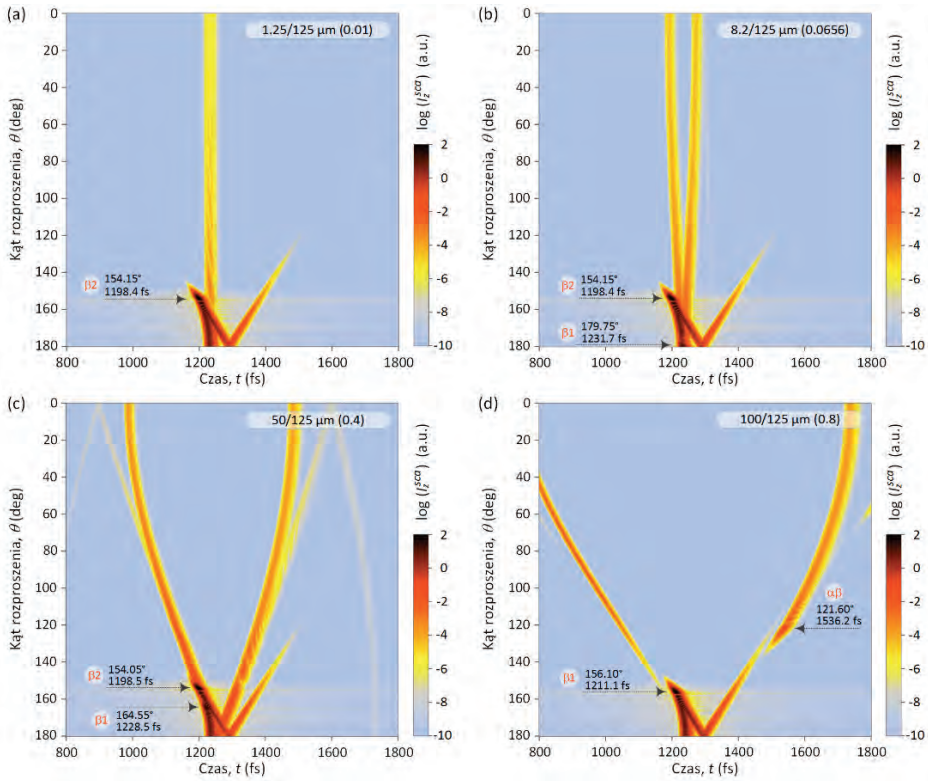
Rysunki 3.4b i 3.4c ilustrują zmiany zachodzące w odpowiedzi impulsowej światłowodu wraz ze wzrostem średnicy rdzenia. Struktura w kształcie litery V ulega rozszerzeniu w kącie rozproszenia, co wynika z powiększenia drogi optycznej komponentów generujących fale powierzchniowe *c*–/*c*+. Wierzchołek tej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

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

Uważna analiza Rys. 3.4c ujawnia także impuls światła, rozpoczynający swoją propagację w kącie $\theta = 180°$, tworzący odwróconą strukturę w kształcie litery V

o wierzchołku w punkcie $t \approx 897$ fs i dołączający do fal powierzchniowych $c-/c+$ począwszy od $t \approx 1000$ fs. Źródłem tego impulsu jest promieniowanie, które penetruje płaszcz i ulega wewnętrznemu odbiciu od rdzenia światłowodu. Udział promieniowania odbitego od rdzenia jest trudniej zaobserwować wówczas, gdy średnica rdzenia jest znacznie mniejsza, jak dla przypadku zilustrowanego na Rys. 3.4b, bowiem optyczne drogi propagacji promieniowania odbitego od rdzenia i tworzącego fale powierzchniowe $c-/c+$ są zbliżone. Maksymalna amplituda impulsu światła odbitego od rdzenia jest około 220 dB mniejsza od amplitudy maksimum tęczy β_2, co tłumaczy niezauważalny wpływ tego promieniowania na DFT natężenia rozproszonego w obszarze tęczy pierwotnej (Rozdz. 2.3).

Diagram Lavena z Rys. 3.4d prezentuje odpowiedź impulsową światłowodu, w którym płaszcz jest cienką otuliną pokrywającą rdzeń o średnicy $d_{core} = 0.8 \cdot d_{clad}$. Tęcza

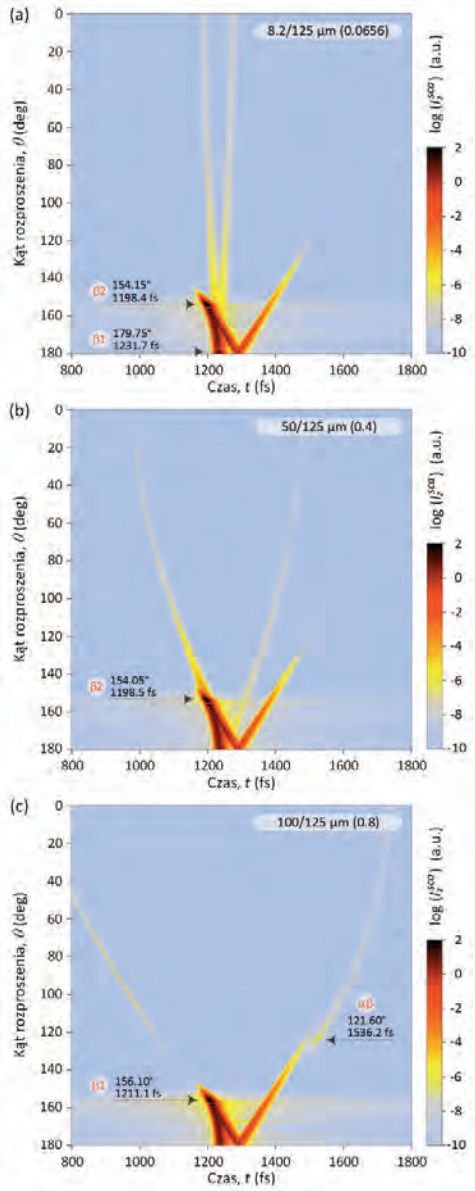


Rys. 3.4. Diagramy Lavena dla światłowodu o skokowym profilu refrakcyjnym i rdzeniem o średnicy: (a) 1.25 µm, (b) 8.2 µm, (c) 50 µm, (d) 100 µm, w odpowiedzi na impuls światła o $FWHM_t = 5$ fs. Średnica płaszcza światłowodu wynosi 125 µm. Strzałkami zaznaczono maksymalne wartości natężeń tęcz pierwotnych ($\lambda_0 = 0.6328$ µm, $m_{clad}(\lambda_0) = 1.45702 + i1E\text{-}08$, $m_{core}(\lambda_0) = m_{clad}(\lambda_0) + 0.014$)

pierwotna β_2, która powstaje w drodze ugięcia promieniowania w płaszczu, została wykluczona z pola rozproszonego, ponieważ wszystkie geometryczne promienie światła, które propagują się w płaszczu muszą również pokonać rdzeń. Zmiana średnicy rdzenia w odniesieniu do Rys. 3.4c spowodowała także przesunięcie maksimum natężenia tęczy β_1 do puntu $\theta \approx 156.10°$, $t \approx 1211.1$ fs oraz przemieszczenie kąta Kartezjusza do 155.01°. Diagram z Rys. 3.4d nie ujawnia przy tym obecności tęczy α, powstającej w wyniku wewnętrznego odbicia promieniowania od granicy pomiędzy rdzeniem i płaszczem. Wprawdzie mechanizm powstawania takiej tęczy o kącie Kartezjusza wynoszącym 133.42° opisano w Rozdz. 2.3, to energia promieniowania odbitego od powierzchni stycznej pomiędzy tymi dwoma ośrodkami, cechującymi się niewielką różnicą potencjałów refrakcyjnych, jest mała w odniesieniu do innych komponentów rozproszonych. Diagram Lavena z Rys. 3.4d uwidacznia inną formę rozproszoną, która ma postać osobliwej tęczy oznaczonej jako $\alpha\beta$ o maksimum natężenia występującym w punkcie $\theta \approx 121.60°$, $t \approx 1536.2$ fs. Maksimum to (a więc i również kąt Kartezjusza tej tęczy) przemieszcza się w stronę większych wartości czasu propagacji i mniejszych kątów rozproszenia pod wpływem dalszego powiększania rdzenia. Analiza Locka i Lavena[90], dokonana przy użyciu zmodyfikowanych szeregów Debye'go, udowodniła że tęcza tego rodzaju powstaje w wyniku *zdegenerowanego* udziału promieniowania rzędu $p = 3$ (ulegającego dwóm wewnętrznym odbiciom na powierzchniach granicznych pomiędzy rdzeniem i płaszczem oraz płaszczem i otoczeniem) w rozpraszaniu promieniowania rzędu $p = 2$ (podlegającego jednokrotnemu wewnętrznemu odbiciu). Tęcza $\alpha\beta$ zanika gdy $d_{core} \to d_{clad}$.

Ostatni fragment niniejszego rozdziału poświęcono analizie odpowiedzi impulsowej światłowodu z rdzeniem o gradientowym profilu refrakcyjnym. Model profilu refrakcyjnego przyjętego w analizie numerycznej odpowiada typowym światłowodom telekomunikacyjnym; współczynnik załamania w osi rdzenia jest większy o +0.014 od współczynnika załamania krzemionkowego płaszcza i maleje w kierunku osiowym według zależności (2.8) przedstawionej w Rozdz. 2.4. Na Rys. 3.5a–c przedstawiono diagramy Lavena dla światłowodu gradientowego, analogiczne do diagramów z Rys. 3.4b–d, ilustrujących odpowiedź impulsową światłowodu o skokowym profilu refrakcyjnym. Profile refrakcyjne rdzeni o średnicach (a) 8.2, (b) 50 oraz (c) 100 μm aproksymowano serią koncentrycznych warstw, każda o średnicy równej 0.1 μm. Analiza porównawcza diagramów z Rys. 3.4b–d oraz Rys. 3.5a–c pozwala na wyróżnienie podobnych efektów rozproszenia światła w obu typach światłowodów i mechanizmów fizycznych, które je wywołują, aczkolwiek ich natężenie jest w obu przypadkach odmienne. Wśród znaczących różnic należy wymienić niewykrywalny udział tęczy β_1 na Rys. 3.5b w wyniku słabego potencjału refrakcyjnego rdzenia. Monotoniczne zmiany współczynnika załamania rdzenia w kierunku osiowym przyczyniają się również do degradacji natężenia

innych komponentów rozproszonych o naturze zależnej od parametrów fizycznych rdzenia, w tym tęczy $\alpha\beta$ oraz fal powierzchniowych $c-/c+$.



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

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

Niedowiarkom ręczę,
Że jednak można oprzeć się o tęczę.

(J. Sztaudynger)

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

4.1. Analiza przyczynowa

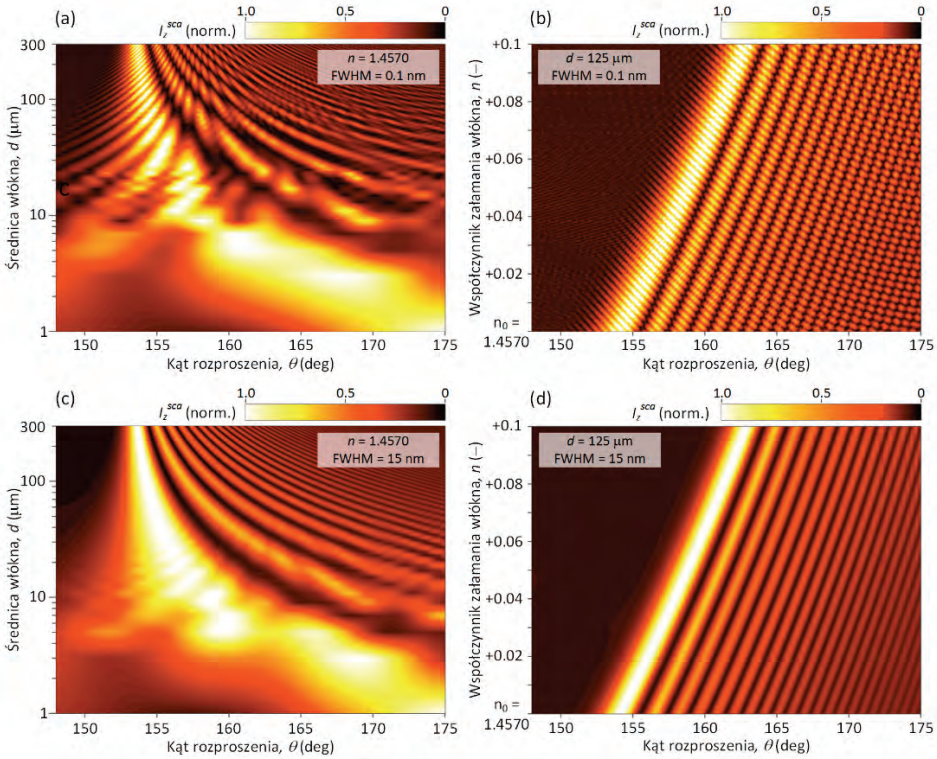
Ogólna analiza rozpraszania promieniowania cechującego się niskim stopniem spójności czasowej pod dużym kątem rozproszenia i przy wykorzystaniu kompleksowego, makroskopowego modelu rozpraszania według Lorenza-Mie (LMT) została zawarta w pracy[27]. W niniejszej analizie rozważa się rozpraszanie skolimowanej wiązki światła o płaskim froncie falowym i linii emisyjnej aproksymowanej przez funkcję Gaussa o maksimum λ_0 w 632.8 nm i szerokości połówkowej FWHM. Wiązka światła pada na badane włókno normalnie. Osiowosymetryczne włókno o średnicy d charakteryzuje zespolony współczynnik załamania $n(\lambda) + i1E-8$, który ulega zmianom wraz z długością fali padającego promieniowania według formuły Sellmeiera[77]. Wektor elektryczny padającej fali płaskiej oscyluje wzdłuż osi symetrii włókna (polaryzacja magnetyczna TM). Według teorii LMT, stan polaryzacyjny rozproszonego pola elektrycznego jest zachowany (włókno nie zmienia polaryzacji fali padającej w warunkach padania normalnego) i opisany wzorem[66]:

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

gdzie E_0 jest amplitudą padającego pola elektrycznego, b_n jest współczynnikiem rozwinięcia pola rozproszonego[66], $H_n^{(1)}$ jest funkcją Hankela pierwszego rodzaju, $k = 2\pi/\lambda$ jest liczbą falową, θ jest kątem rozproszenia, zaś r jest zmienną radialną. Przyjmuje się, że fala padająca jest kompozycją fal monochromatycznych o wzajemnie losowych zależnościach fazowych. Przy warunku liniowości rozproszenia na włóknie, natężenie pola rozproszonego w dalekim zakresie ($kr \gg 1$) jest niekoherentną superpozycją monochromatycznych fal rozproszonych:

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

gdzie $k_i = 2\pi/\lambda_i$, N jest liczbą fal z widma emisyjnego promieniowania padającego uwzględnionych w obliczeniach pola rozproszonego, a symbol (*) oznacza sprzężenie



Rys. 4.1. Natężenie pola rozproszonego na homogenicznym włóknie szklanym (SiO_2) w sąsiedztwie tęczy pierwotnej, oświetlonym wiązką promieniowania o niskim stopniu spójności czasowej: (a), (b) w funkcji średnicy włókna dla FWHM odpowiednio 0.1 i 15 nm, (c), (d) w funkcji współczynnika załamania włókna dla FWHM odpowiednio 0.1 i 15 nm. (λ_0 = 0.6328 µm, $m(\lambda_0)$ = 1.45702 + i1e-8)

zespolone. Na potrzeby dalszej analizy numerycznej, z widma promieniowania padającego wyodrębniono N = 1345 dyskretnych składowych rozmieszczonych symetrycznie co 0.1 nm względem λ_0.

Rysunki 4.1a i 4.1c ilustrują wpływ średnicy włókna na natężenie pola rozproszonego w obszarze tęczy pierwszego rzędu dla FWHM odpowiednio 0.1 i 15 nm. Dla pierwszego przypadku widoczne są wyraźne formy nieliniowe, które uniemożliwiają odczytanie pozycji kątowych maksimów i minimów tęczy Airy'ego. Efekt ten ulega redukcji, gdy włókno jest oświetlone promieniowaniem o poszerzonym widmie, o FWHM typowym dla diod elektroluminescencyjnych. Dla małych średnic widoczny jest udział oscylacji rezydualnych. Podobne obserwacje dotyczą wykresów ilustrujących wpływ współczynnika załamania włókna na natężenie rozproszone w polu dalekim, Rys. 4.1b i 4.1d. Oba rysunki potwierdzają obserwacje Wanga i Hulsta, według których zmiany współczynnika załamania wpływają w głównej mierze na bezwzględne pozycje kątowe jasnych i ciemnych prążków, a w małym stopniu na ich wzajemne odległości[97]. Ta druga dana pomiarowa może być wykorzystana do inwersyjnego pomiaru średnicy, co ilustrują Rys. 4.1a i 4.1c.

Jak wykazano w pracy[27], model przyczynowy według Airy'ego opisujący *monochromatyczne* promieniowanie rozproszone w obszarze tęczy pierwotnej jest adekwatny w opisie rozproszenia promieniowania o poszerzonym widmie przez szklane, homogeniczne włókno.

4.2. Analiza inwersyjna

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

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

Współczynnik $(1+B\Delta)$ poprawia jakość aproksymacji maksimów i minimów tęczy[27, 99, 17] i wynika z porównania rozwiązania na natężenie rozproszone według teorii

Airy'ego oraz teorii CAM tęczy pierwotnej, sformułowanej przez Nussenzveiga[70, 69]. W powyższym równaniu $\mathrm{Ai}^2(-z)$ oznacza całkę Airy'ego[60], θ jest kątem rozproszenia, $\Delta \equiv \theta - \theta^D$, zaś θ^D jest kątem Kartezjusza, czyli kątem geometrycznego promienia światła rozproszonego pod możliwie najmniejszym kątem w odniesieniu do kierunku padania:

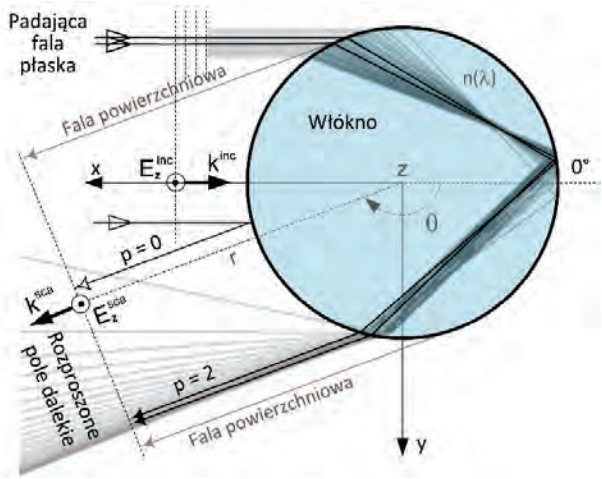
$$\theta^D = \pi + 2\theta_i^D - 4\theta_t^D, \tag{4.4}$$

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

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

Współczynnik B w równaniu (4.3) jest funkcją współczynnika załamania[70, 69],

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



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

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

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

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

- W pierwszym kroku wyznacza się $\hat{n}$ na podstawie dwóch bezwzględnych pozycji kątowych prążków $\{\theta_i, \theta_j\}$, realizując tym samym pomiar pośredni bez znajomości średnicy włókna.
- W drugim kroku dokonuje się obliczenia $\hat{d}$ na podstawie $\hat{n}$ oraz odstępu kątowego pomiędzy θ_i oraz θ_j. Pomiar średnicy na podstawie odstępu kątowego pomiędzy dwoma prążkami jest mało wrażliwy na zmiany współczynnika załamania[27].

Niech $\{z_i, z_j\}$ będą argumentami funkcji Airy'ego w równaniu (4.3), dla których osiąga ona ekstrema $\{\theta_i, \theta_j\}$. Jasne i ciemne prążki natężenia rozproszonego pojawiają się w punktach krytycznych funkcji Airy'ego. Dla pierwszych pięciu ekstremów z_i = (1.018793161, 2.33810741, 3.248197582, 4.087949444, 4.820099211), gdzie i = 1 dla prążka głównego, i = 3, 5 dla kolejnych prążków jasnych oraz i = 2, 4 dla kolejnych prążków ciemnych[60]. Niech $\Delta_{i,j} = \theta_{i,j} - \theta^D$ gdzie θ^D wynika z równania (4.4). Sformułowanie układu równań dla każdego z argumentów $\{z_i, z_j\}$ prowadzi do następującego wyrażenia:

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

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

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

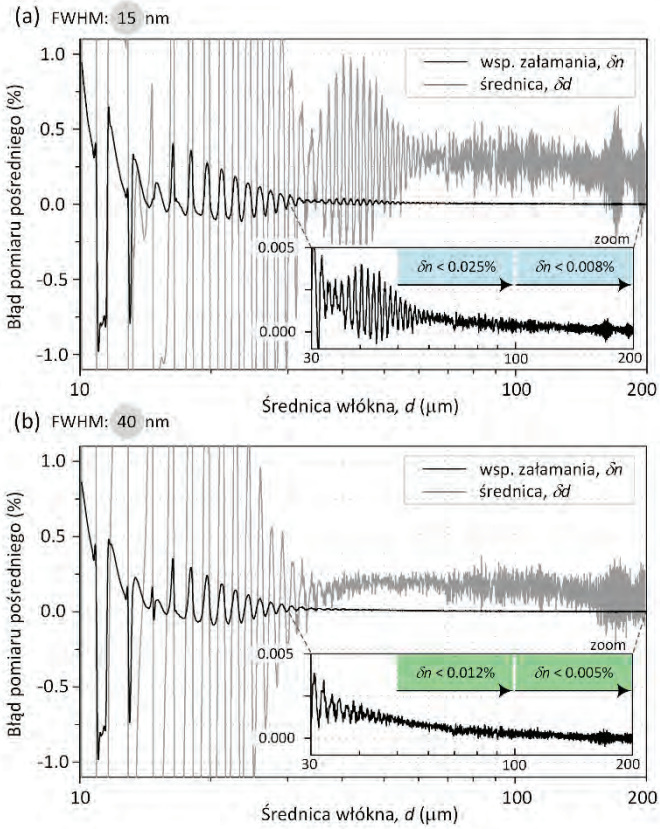
przy czym h obliczane jest na podstawie równania (4.7), zaś $\hat{n}$ jest wynikiem procedury iteracyjnej opisanej powyżej. Przekształcenie powyższego wzoru ze względu na d prowadzi finalnie do następującego wzoru:

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

Walidacja przedstawionej powyżej procedury inwersyjnej będzie dokonywana przy wykorzystaniu informacji o położeniach kątowych dwóch pierwszych minimów natężenia rozproszonego, czyli $\{\theta_i, \theta_j\} = \{\theta_2, \theta_4\}$. Wybór ten wynika z faktu, że ciemne prążki są mniej podatne na oscylacje rezydualne niż prążki jasne[27]. Co więcej, aproksymacja Airy'ego pogarsza się wraz z odległością od kąta Kartezjusza[97], co z kolei uzasadnia wybór danych pomiarowych leżących w jego sąsiedztwie. Referencyjne dane pomiarowe uzyskano w drodze symulacji pola rozproszonego na homogenicznym włóknie oświetlonym promieniowaniem cechującym się niskim stopniem spójności czasowej przy wykorzystaniu modelu matematycznego zjawiska przedstawionego w rozdziale 4.1.

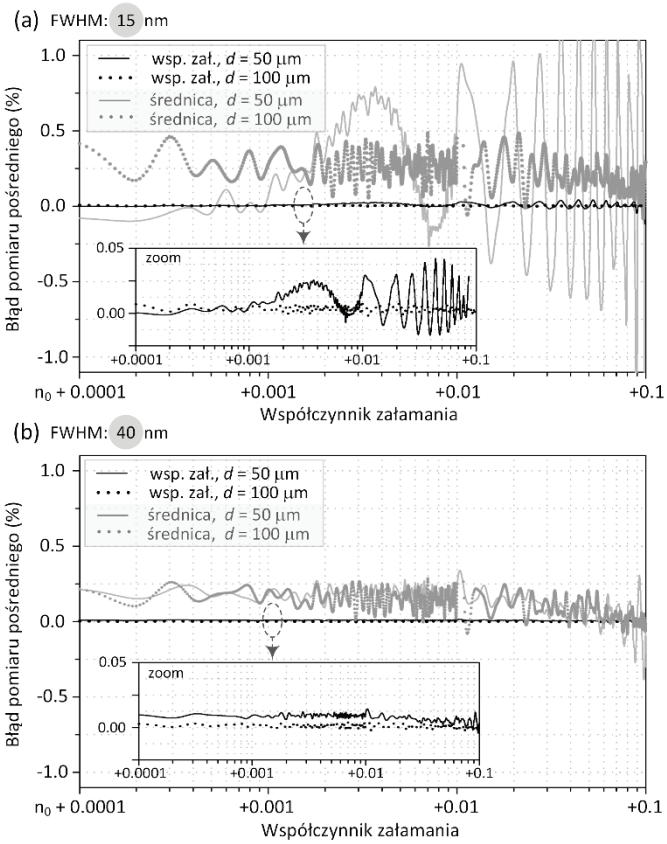
Wyniki analizy inwersyjnej w pomiarze $\hat{n}$ oraz $\hat{d}$ przedstawiono na Rys. 4.3a i 4.3b w postaci błędu względnego tych wielkości w funkcji rzeczywistej średnicy d. Rysunki te sporządzono dla odmiennych FWHM padającego promieniowania, odpowiednio 15 i 40 nm. Pozycje danych pomiarowych (dwóch pierwszych ciemnych prążków) wyznaczono z dokładnością równą 0.001°. Przyjęto *a priori*, że zakres możliwych rozwiązań równania (4.8) dla współczynnika załamania zawiera się w przedziale 1.40000–1.60000, co pozwoliło na otrzymanie jednoznacznego wyniku. Zakres ten należy uznać za szeroki biorąc pod uwagę fakt, że współczynnik załamania krzemionki (SiO_2) w paśmie widzialnym (0.390–0.700 μm) zmienia się w granicach od 1.4713 do 1.4553 [77]. Rysunki 4.3a i 4.3b ilustrują ogólne fakty na temat rozpraszania promieniowania cechującego się niskim stopniem spójności czasowej. Wpływ form nieliniowych, ujawniających się w postaci oscylacji wykresów błędów, ulega redukcji wraz ze wzrostem FWHM. Dla niewielkich d oscylacje te są bardziej znaczące, ponieważ częstotliwość i amplituda form nieliniowych jest podobna oscylacji tęczy Airy'ego. Uważna analiza wskazuje również, że błędy pomiaru obu wielkości maleją wraz ze wzrostem średnicy włókna, co jest wynikiem poprawiającej się aproksymacji frontu falowego w sąsiedztwie tęczy pierwotnej przez model rozproszenia Airy'ego[65]. Na wyniki pomiaru ma również wpływ ograniczona rozdzielczość odczytu położenia

kątowego dwóch minimów tęczy (dane pomiarowe θ_2, θ_4), co wyraża się powiększającą się niepewnością pomiaru *d* wraz ze wzrostem rozmiaru włókna.



Rys. 4.3. Wyniki inwersji danych pomiarowych: błąd względny pomiaru pośredniego współczynnika załamania δn i średnicy δd włókna w funkcji rzeczywistej średnicy *d*. FWHM = (A) 15 nm, (B) 40 nm (λ_0 = 0.6328 μm, $m(\lambda_0)$ = 1.45702 + *i*1e-8)

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



Rys. 4.4. Wyniki inwersji danych pomiarowych: błąd względny pomiaru pośredniego współczynnika załamania δn i średnicy δd włókna w funkcji rzeczywistego współczynnika załamania n. FWHM = (a) 15 nm, (b) 40 nm (λ_0 = 0.6328 μm, $m(\lambda_0)$ = 1.45702 + i1e-8)

4.3. Analiza rozproszenia światła na włóknie o eliptycznym przekroju

Kompleksowy opis rozproszenia promieniowania na cząstkach o kształcie odbiegającym od osiowej symetrii dostarcza teoria macierzy przejścia T-Matrix[100, 101], dedykowana cząstkom o dowolnym kształcie, oraz uogólniona teoria Lorenza-Mie (GLMT) dla cylindrów o eliptycznym przekroju[102-104]. Obie teorie powstały na gruncie rozwiązania równań Maxwella dla odpowiednio sformułowanych warunków brzegowych zagadnienia. Wykorzystanie T-Matrix oraz GLMT jest jednak ograniczone do badań cząstek o wymiarach porównywalnych z długością fali promieniowania lub nieznacz-

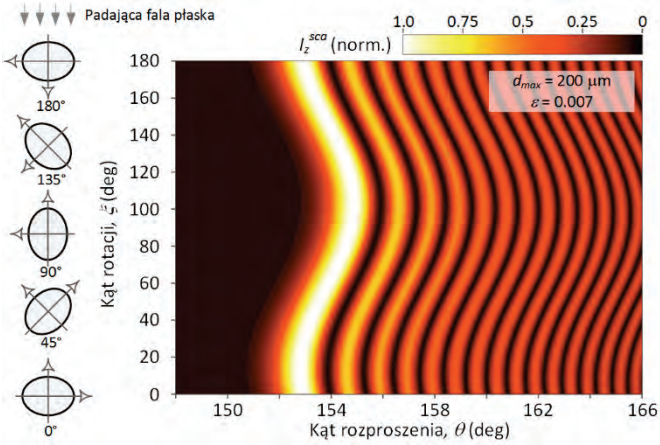
nie ją przewyższających, co jest związane ze stabilnością znanych algorytmów numerycznych implementujących te modele rozproszenia. Alternatywne metody symulacji pola rozproszonego funkcjonują na rozwiązaniach przybliżonych. W niniejszym rozdziale zostanie wykorzystany model rozproszenia na eliptycznym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

Natężenie pola rozproszonego na cylindrze o eliptycznym przekroju rozproszenia według aproksymacji Locka i in opisuje następująca zależność[99]:

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

gdzie $x_{ave} = [(\pi d_{\min}/\lambda)+(\pi d_{\max}/\lambda)]/2$ jest średnim współczynnikiem rozmiarowym, $d_{\min}, d_{\max}$ oznaczają odpowiednio średnice krótszej i dłuższej osi elipsy przekroju, zaś ξ oznacza kąt rotacji włókna względem kierunku propagacji fali padającej, jak pokazano na Rys. 4.5. Rotacja włókna wpływa zarówno na kąt Kartezjusza θ^D jak i również na parametr *h*, co jest przedmiotem szczegółowej analizy w pracy[99]. Kąt rozproszenia θ wyraża odchylenie od kierunku propagacji fali padającej w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara. Eliptyczność włókna wyraża parametr $\varepsilon = 1 - d_{\min}/d_{\max}$. Równanie (4.11) jest adekwatne w opisie rozproszenia dla $\varepsilon \ll 1$, $1.25 \le n \le 1.7$ oraz $x_{ave} \sim 1000$ lub większych[99]. Należy zauważyć, że funkcja natężenia według równania (4.11) nie może być uzupełniona o współczynnik korekcyjny $(1+B\Delta)$ w analogii do wzoru (4.3), ponieważ parametr *B* staje się również funkcją kąta orientacji, gdy cylinder ma eliptyczny przekrój osiowy. Dla oceny wpływu symetrii osiowej na pomiary pośrednie współczynnika załamania i średnicy badanego włókna należy więc wyzerować parametr *B* w równaniach inwersyjnych (4.8) i (4.10).

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

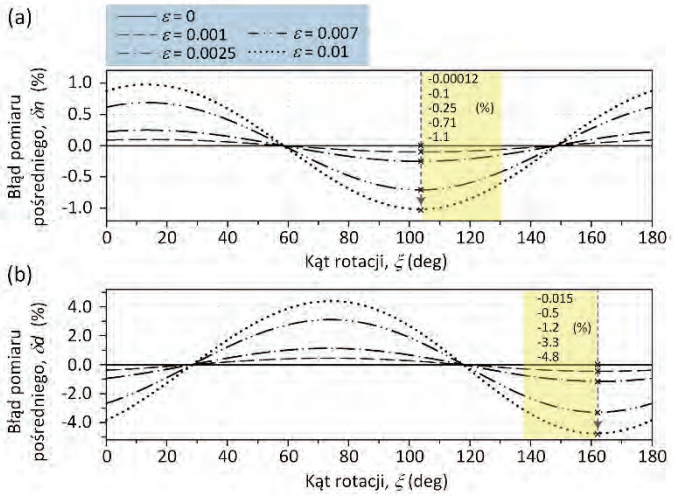


Rys. 4.5. Wpływ kąta rotacji ξ włókna o przekroju eliptycznym względem kierunku propagacji fali padającej na natężenie pola rozproszonego w sąsiedztwie tęczy pierwotnej. Średnica dłuższej osi przekroju d_{max} wynosi 200 µm, zaś współczynnik eliptyczności ε = 0.007. (λ = 0.6328 µm, $n(\lambda)$ = 1.45702)

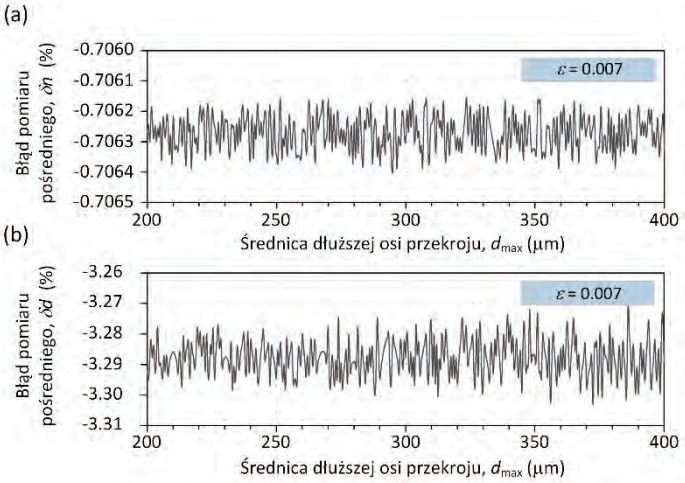
Rysunki 4.6a i 4.6b umożliwiają obserwację wpływu kąta rotacji ξ na wyniki pomiarów pośrednich współczynnika załamania i średnicy włókna, wyrażonych w postaci błędów względnych tych wielkości. Błąd względny pomiaru średnicy zdefiniowano jako $\delta d = 100 \cdot (1 - \hat{d} / d_{ave})$ (%), gdzie $d_{ave} = (d_{\min} + d_{\max}) / 2$ jest średnią z dłużej i krótszej osi przekroju włókna, zaś błąd pomiaru pośredniego współczynnika załamania to $\delta n = 100 \cdot (1 - \hat{n} / n)$ (%). Wartości obu błędów zmieniają się periodycznie wraz z kątem rotacji. Przykładowo, największy wzrost błędu pomiaru współczynnika załamania z -0.00012% do około –0.71% przy deformacji przekroju z osiowej symetrii (ε = 0) na elipsę o ε = 0.007 występuje w kącie $\xi = 103.5°$. Taka deformacja wywołuje największy przyrost błędu pomiaru średnicy z –0.015% do blisko –3.3% dla kąta $\xi = 162.5°$. Warto również zauważyć, że dla specyficznych wartości ξ eliptyczność nie wpływa na błędy pomiaru współczynnika załamania i średnicy. Podobne obserwacje poczyniono na gruncie pomiarów cech fizycznych kropli wody[105]. Położenie tych szczególnych punktów zależy od współczynnika załamania i, generalnie, jest ono odmienne dla wykresów δn i δd .

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

$\xi = 162.5°$ (por. Rys. 4.6b). Oba wykresy ukazują słaby wpływ rozmiaru badanego włókna na błędy inwersji danych pomiarowych.



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



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

5. Podsumowanie

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

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

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

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

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

[‡‡‡] Cyt. M. Heller „Filozofia nauki. Wprowadzenie” Petrus, Kraków 2009.

Literatura

[1] **MROCZKA J.**, *Metrologiczne Problemy Wykorzystywania Światła Rozproszonego do Badań Rozkładu Wielkości Cząstek w Roztworach Dyspersyjnych*, Warszawa (1990).

[2] **MROCZKA J.**, *Metrologia – nowe wyzwania*. In: J. MROCZKA (Ed.), *Metrologia wczoraj, dziś, jutro*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (1997).

[3] **MROCZKA J.**, *The cognitive process in metrology*, Measurement, 46, 2896–2907 (2013).

[4] BERRY M.V., *Exuberant Interference: Rainbows, Tides, Edges, (De)Coherence...*, Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 360, 1023–1037 (2002).

[5] BERRY M.V. & UPSTILL C., *Catastrophe optics: morphologies of caustics and their diffraction patterns*. In: E. WOLF (Ed.), *Progress in Optics*, Elsevier, Amsterdam (1980).

[6] PRESBY H.M. & MARCUSE D., *Refractive Index and Diameter Determinations of Step Index Optical Fibers and Preforms*, Applied Optics, 13, 2882–2885 (1974).

[7] ROTH N., ANDERS K. & FROHN A., *Refractive-index measurements for the correction of particle sizing methods*, Applied Optics, 30, 4960–4965 (1991).

[8] SANKAR S.V., BUERMANN D.H. & BACHALO W.D., *An advanced rainbow signal processor for improved accuracy in droplet temperature measurements*. In: 8th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 1996 Lisbon, Portugal, 9.3.1–9.3.9 (1996).

[9] SANKAR S.V., BUERMANN D.H. & BACHALO W.D., *Application of Rainbow Thermometry to the Study of Fuel Droplet Heat-Up and Evaporation Characteristics*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 119, 573–584 (1997).

[10] HARDALUPAS Y. & LIU C.H., *Backscatter phase-Doppler anemometry for transparent non-absorbing spheres*, Experiments in Fluids, 14, 379–390 (1993).

[11] ADLER C., LOCK J. A. & STONE B.R., *Rainbow scattering by a cylinder with a nearly elliptical cross section*, Applied Optics, 37, 1540–1550 (1998).

[12] LOHNER H., LEHMANN P. & BAUCKHAGE K., *Detection based on rainbow refractometry of droplet sphericity in liquid–liquid systems*, Applied Optics, 38, 1127–1132 (1999).

[13] ADLER C., PHIPPS D., SAUNDERS K.W., NASH J.K. & LOCK J.A., *Supernumerary spacing of rainbows produced by an elliptical-cross-section cylinder*. II. *Experiment*, Applied Optics, 40, 2535–2545 (2001).

[14] JIANG K., HAN X.E. & REN K.F., *Scattering from an elliptical cylinder by using the vectorial complex ray model*, Applied Optics, 51, 8159–8168 (2012).

[15] ANDERS K., ROTH N. & FROHN A., *Influence of Refractive Index Gradients within droplets on rainbow position and implications for rainbow refractometry*, Particle & Particle systems Characterization, 13, 125–129 (1996).

[16] MASSOLI P., *Rainbow refractometry applied to radially inhomogeneous spheres: the critical case of evaporating droplets*, Applied Optics, 37, 3227–3235 (1998).

[17] SAENGKAEW S., CHARINPANITKUL T., VANISRI H., TANTHAPANICHAKOON W., BISCOS Y., GARCIA N., LAVERGNE G., MÈÉS L., GOUESBET G. & GREHAN G., *Rainbow refractometry on particles with radial refractive index gradients*, Experiments in Fluids, 43, 595–601 (2007).

[18] ADAM J.A. & LAVEN P., *Rainbows from inhomogeneous transparent spheres: a ray-theoretic approach*, Applied Optics, 46, 922–929 (2007).

[19] SONG F., XU C., WANG S. & ZHENFENG L., *Measurement of temperature gradient in a heated liquid cylinder using rainbow refractometry assisted with infrared thermometry*, Optics Communications, 380, 179–185 (2016).

[20] VAN BEECK J., ZIMMER L. & RIETHMULLER M.L., *Global Rainbow Thermometry for Mean Temperature and Size Measurement of Spray Droplets*, Particle & Particle Systems Characterization, 18, 196–204 (2001).

[21] VERTRANO M.R., VAN BEECK J. & RIETHMULLER M.L., *Assessment of refractive index gradients by standard rainbow thermometry*, Applied Optics, 44, 7275–7281 (2005).

[22] LEMAITRE P., PORCHERON E., GRÉHAN G. & BOUILLOUX L., *Development of a global rainbow refractometry technique to measure the temperature of spray droplets in a large containment vessel*, Measurement Science and Technology, 17, 1299–1306 (2006).

[23] SAENGKAEW S., GODARD G., BLAISOT J.B. & GRÉHAN G., *Experimental analysis of global rainbow technique: sensitivity of temperature and size distribution measurements to non-spherical droplets*, Experiments in Fluids, 47, 839–848 (2009).

[24] MISHCHENKO M.I., *Electromagnetic Scattering by Particles and Particle Groups: An Introduction*, Cambridge University Press, New York (2014).

[25] DEVANEY A.J., *Nonuniqueness in the inverse scattering problem*, Journal of Mathematical Physics, 19, 1526–1535 (1978).

[26] DEVANEY A.J. & SHERMAN G.C., *Nonuniqueness in Inverse Source and Scattering Problems*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 30, 1034–1037 (1982).

[27] ŚWIRNIAK G., GŁOMB G. & **MROCZKA J.**, *Inverse analysis of the rainbow for the case of low-coherent incident light to determine the diameter of a glass fiber*, Applied Optics, 53, 4239–4247 (2014).

[28] ŚWIRNIAK G. & **MROCZKA J.**, *Approximate solution for optical measurements of the diameter and refractive index of a small and transparent fiber*, Journal of the Optical Society of America A, 33, 667–676 (2016).

[29] ŚWIRNIAK G. & **MROCZKA J.**, *Numerical analysis of primary rainbows from a homogeneous cylinder and an optical fiber for incident low-coherent light*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 195, 176–188 (2017).

[30] **MROCZKA J.**, *Turbidimetric methods in particle sizing*, Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO). Beijing, China (1991).

[31] **MROCZKA J.**, *Integral transform technique in particle sizing*, Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO). Beijing, China (1991).

[32] **MROCZKA J.**, *Method of Moments in Light Scattering Data Inversion in the Particle Size Distribution*, Optics Communications, 99, 147–151 (1993).

[33] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements*, Metrology and Measurement Systems, 16, 333–357 (2009).

[34] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements*, Applied Optics, 49, 4591–4603 (2010).

[35] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Simulation research on improved regularized solution of inverse problem in spectral extinction measurements*, Applied Optics, 51, 1715–1723 (2012).

[36] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Improved technique of retrieving particle size distribution from angular scattering measurements*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 129, 48–59 (2013).

[37] ONOFRI F., KRZYSIEK M., BARBOSA S., MESSAGER V., REN K.F. & **MROCZKA J.**, *Near--critical-angle scattering for the characterization of clouds of bubbles: particular effects*, Applied Optics, 50, 5759–5769 (2011).

[38] CZERWIŃSKI M., **MROCZKA J.**, GIRASOLE T., GOUESBET G. & GRÉHAN G., *Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions*, Pt. 1. *Direct problem: hybrid-method approximation*, Applied Optics, 40, 1514–1524 (2001).

[39] CZERWIŃSKI M., **MROCZKA J.**, GIRASOLE T., GOUESBET G. & GRÉHAN G., *Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions*. Pt. 2. *Inverse problem: particle size determination*, Applied Optics, 40, 1525–1531 (2001).
[40] GUSZKOWSKI T. & **MROCZKA J.**, *Metoda inwersyjna wykorzystująca sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej*, Metrologia wspomagana komputerowo. MWK '2003. VI Szkoła – konferencja. Instytut Podstaw Elektroniki Wydział Elektroniki WAT, Waplewo (2003).
[41] GIRASOLE T., BULTYNCK H., GOUESBET G., GRÉHAN G., LE MEUR F., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, REN K.F., ROZE C. & WYSOCZAŃSKI D., *Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering*. Part 1. *Numerical aspects*, Particle & Particle Systems Characterization, 14, 163–174 (1997).
[42] GIRASOLE T., GOUESBET G., GRÉHAN G., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, REN K.F. & WYSOCZAŃSKI D., *Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering*. Part 2. *Experimental aspects*, Particle & Particle Systems Characterization, 14, 211–218 (1997).
[43] GIRASOLE T., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.** & WYSOCZAŃSKI D., *Fiber orientation and concentration analysis by light scattering: experimental setup and diagnosis*, Review of Scientific Instruments, 68, 2805–2811 (1997).
[44] **MROCZKA J.**, WYSOCZAŃSKI D. & ONOFRI F., *Optical parameters and scattering properties of red blood cells*, Optica Applicata, 32, 691–700 (2002).
[45] SKORUPSKI K. & **MROCZKA J.**, *Effect of the necking phenomenon on the optical properties of soot particles*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 141, 40–48 (2014).
[46] SKORUPSKI K., **MROCZKA J.**, RIEFLER N., OLTMANN H., WILL S. & WRIEDT T., *Impact of morphological parameters onto simulated light scattering patterns*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 119, 53–66 (2013).
[47] WOŹNIAK M., ONOFRI F., BARBOSA S., YON J. & **MROCZKA J.**, *Comparison of methods to derive morphological parameters of multi-fractal samples of particle aggregates from TEM images*, Journal of Aerosol Science, 47, 12–26 (2012).
[48] SKORUPSKI K., HELLMERS J., FENG W., **MROCZKA J.**, WRIEDT T. & MÄDLER L., *Influence of sintering necks on the spectral behaviour of ITO clusters using the Discrete Dipole Approximation*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 159, 11–18 (2015).
[49] WOJTASZEK T. & **MROCZKA J.**, *Light scattering simulations of spheroids using three beams phase Doppler system*, XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development. Rio de Janeiro, Brazil (2006).
[50] ŚWIRNIAK G., GŁOMB G. & **MROCZKA J.**, *Inverse analysis of light scattered at a small angle for characterization of a transparent dielectric fiber*, Applied Optics, 53, 7103–7111 (2014).
[51] LEE R.L. & FRASER A.B., *The Rainbow Bridge: Rainbows in Art, Myth and Science*, Pennsylvania State University Press (2001).
[52] BOYER C.B., *The Rainbow: From Myth to Mathematics*, Princeton University Press (1987).
[53] SMITH M.A., *Descartes's Theory of Light and Refraction: A Discourse on Method*, Transactions of the American Philosophical Society, 77, i–viii + 1–92 (1987).
[54] KÖNNEN G.P. & DE BOER J.H., *Polarized rainbow*, Applied Optics, 18, 1961–1965 (1979).
[55] YOUNG T., *The Bakerian Lecture: Experiments and Calculations Relative to Physical Optics*, Phil. Trans. R. Soc. Lond., 94, 1–16 (1804).
[56] GOUY G., *Sur une propriété nouvelle des ondes lumineuses*, C. R. Acad. Sci. Paris, 110 (1890).
[57] LAVEN P., *Supernumerary arcs of rainbows: Young's theory of interference*, Applied Optics, 56, G104–G112 (2017).
[58] HUMPHREYS W.J., *Physics of the Air*, McGraw-Hill, New York–London (1929).
[59] AIRY G.B., *On the intensity of light in the neighbourhood of a caustic*, Transactions of the Cambridge Philosophical Society, University Press (1838).

[60] ABRAMOWITZ M. & STEGUN I.A., *Handbook of Mathematical Functions*, National Bureau of Standards, Washington, DC (1970).
[61] MIE G., *Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen*, Ann. Phys., 330, 377–445 (1908).
[62] LORENZ L., *Sur la lumière réfléchie et réfractée par une sphère transparente, Œuvres scientifiques*. Lehmann & Stage, Copenhagen (1898).
[63] BOHREN C.F. & HUFFMAN D.R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, John Wiley & Sons, New York (1983).
[64] WISCOMBE W.J., *Improved Mie scattering algorithms*, Applied Optics, 19, 1505–1509 (1980).
[65] VAN DE HULST H.C., *Light scattering by small particles*, Dover Publications, New York (1981).
[66] BARBER P.W. & HILL S.C., *Light Scattering by Particles: Computational Methods*, World Scientific Publishing, Singapore (1990).
[67] DEBYE P., *Der lichtdruck auf kugeln von beliebigem material*, Annals of Physics, 30, 57–136 (1909).
[68] HOVENAC E.A. & LOCK J.A., *Assessing the contributions of surface waves and complex rays to far-field Mie scattering by use of the Debye series*, Journal of Optical Society of America A, 9, 781–795 (1992).
[69] KHARE V. & NUSSENZVEIG H.M., *Theory of the Rainbow*, Physical Review Letters, 33, 976–980 (1974).
[70] NUSSENZVEIG H.M., *High-Frequency Scattering by a Transparent Sphere*. II. *Theory of the Rainbow and the Glory*, Journal of Mathematical Physics, 10, 125–176 (1969).
[71] NUSSENZVEIG H.M., *High-Frequency Scattering by a Transparent Sphere*, I. *Direct Reflection and Transmission*, Journal of Mathematical Physics, 10, 82–124 (1969).
[72] NUSSENZVEIG H.M., *Complex angular momentum of the rainbow and the glory*, Journal of optical Society of America, 69, 1068–1079 (1979).
[73] NUSSENZVEIG H.M., *Diffraction Effects in Semiclassical Scattering*, Cambridge University Press, Cambridge (1992).
[74] BACH H. & NEUROTH N. (Eds.), *The Properties of Optical Glass*, Springer-Verlag, Berlin (1998).
[75] GURWICH I., SHILOAH N. & KLEIMAN M., *The recursive algorithm for electromagnetic scattering by tilted infnite circular multilayered cylinder*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 63, 217–229 (1999).
[76] LI R., HAN H., JIANG H. & REN K.F., *Debye series of normally incident plane-wave scattering by an infinite multilayered cylinder*, Applied Optics, 45, 6255–6262 (2006).
[77] FLEMING J.W., *Dispersion in GeO_2-SiO_2 glasses*, Applied Optics, 23, 4486–4493 (1984).
[78] MÈÉS L., REN K.F., GRÉHAN G. & GOUESBET G., *Scattering of a Gaussian beam by an infinite cylinder with arbitrary location and arbitrary orientation: numerical results*, Applied Optics, 38, 1867–1876 (1999).
[79] LAVEN P., *Simulation of rainbows, coronas, and glories by use of Mie Theory*, Applied Optics, 42, 436–444 (2003).
[80] LAVEN P., *How glories are formed?*, Applied Optics, 44, 5675–5683 (2005).
[81] HARRIS F.J., *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform*, Proceedings of the IEEE, 66, 51–83 (1978).
[82] LAVEN P., *Time domain analysis of scattering by a water droplet*, Applied Optics, 50, F29–F38 (2011).
[83] WALKER J.D., *Multiple rainbows from a single drops of water and other liquids*, American Journal of Physics, 44, 421–433 (1976).
[84] BUTOV O.V., GOLANT K.M., TOMASHUK A.L., VAN STRALEN M.J.N. & BREULS A.H.E., *Refractive index dispersion of doped silica for fiber optics*, Optics Communications, 213, 301–308 (2002).
[85] LOCK J.A., JAMISON M.J. & LIN C.-Y., *Rainbow scattering by a coated sphere*, Applied Optics, 33, 4677–4690 (1994).

[86] VAN DE HULST H.C. & WANG R.T., *Glare points*, Applied Optics, 30, 4755–4763 (1991).
[87] ADLER C., LOCK J.A., NASH J.K. & SAUNDERS K.W., *Experimental observation of rainbow scattering by a coated cylinder: twin primary rainbows and thin-film interference*, Applied Optics, 40, 1548–1558 (2001).
[88] ADLER C.L., LOCK J.A., RAFFERTY I.P. & HICKOK W., *Twin-rainbow metrology*. I. *Measurement of the thickness of a thin liquid film draining under gravity*, Applied Optics, 42, 6584–6594 (2003).
[89] WISCOMBE W.J. & NUSSENZVEIG H.M., *Diffraction as tunneling*, Physical Review Letters, 59, 1667–1670 (1987).
[90] LOCK J.A. & LAVEN P., *Understanding light scattering by a coated sphere Part 1: Theoretical considerations*, Journal of the Optical Society of America A, 29, 1489–1497 (2012).
[91] LOCK J.A. & LAVEN P., *Mie scattering in the time domain*, Part I. *The role of surface waves*, Journal of the Optical Society of America A, 28, 1086–1095 (2011).
[92] LOCK J.A. & LAVEN P., *Mie scattering in the time domain*. Part II. *The role of diffraction*, Journal of Optical Society of America, 28, 1096–1106 (2011).
[93] VAN BEECK J.P.A.J. & RIETHMULLER M.L., *Rainbow phenomena applied to the measurement of droplet size and velocity and to the detection of nonsphericity*, Applied Optics, 35, 2259–2266 (1996).
[94] CHOWDHURY D.Q., HILL S.C. & BARBER P.W., *Time dependence of internal intensity of a dielectric sphere on and near resonance*, Journal of the Optical Society of America A, 9, 1364–1373 (1992).
[95] KHALED E.E.M., CHOWDHURY D.Q., HILL S.C. & BARBER P.W., *Internal and scattered time-dependent intensity of a dielectric sphere illuminated with a pulsed Gaussian beam*, Journal of the Optical Society of America A, 11, 2065–2071 (1994).
[96] GOUESBET G. & GRÉHAN G., *Generic Formulation of a Generalized Lorenz-Mie Theory for a Particle Illuminated by Laser Pulses*, Particle & Particle Systems Characterization, 17, 213–224 (2000).
[97] WANG R.T. & VAN DE HULST H.C., *Rainbows: Mie computations and the Airy approximation*, Applied Optics, 30, 106–117 (1991).
[98] ADAM J.A., *The mathematical physics of rainbows and glories*, Physics Reports, 356, 229–365 (2002).
[99] LOCK J.A., *Supernumerary spacing of rainbows produced by an elliptical-cross-section cylinder*. I. *Theory*, Applied Optics, 39, 5040–5051 (2000).
[100] NELSON A. & EYGES L., *Electromagnetic scattering from dielectric rods of arbitrary cross section*, Journal of the Optical Society of America, 66, 254–259 (1976).
[101] MISHCHENKO M.I. & TRAVIS L.D., *Capabilities and limitations of a current FORTRAN implementation of the T-matrix method for randomly oriented, rotationally symmetric scatterers*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 60, 309–324 (1998).
[102] GOUESBET G. & MÉÈS L., *Generalized Lorenz–Mie theory for infinitely long elliptical cylinders*, Journal of the Optical Society of America A, 16, 1333–1341 (1999).
[103] GOUESBET G., MÉÈS L. & GRÉHAN G., *Partial-wave expansions of higher-order Gaussian beams in elliptical cylindrical coordinates*, Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 1, 121–132 (1998).
[104] GOUESBET G. & GRÉHAN G., *Generalized Lorenz–Mie Theories*, Springer-Verlag Berlin–Heidelberg (2011).
[105] VAN BEECK J.P.A.J. & RIETHMULLER M.L., *Nonintrusive measurements of temperature and size of single falling raindrops*, Applied Optics, 34, 1633–1639 (1995).

Wybrane zagadnienia modelowania agregatów fraktalnych

Spis treści

Wprowadzenie

1. Geometria fraktalna

2. Agregaty fraktalne

2.1. Algorytmy modelujące proces agregacji

2.1.1. Algorytmy PC / Cząstka-Klaster

2.1.2. Algorytmy CC / Klaster-Klaster

2.2. Modyfikacje algorytmów uwzględniające złożone geometrie

2.2.1. Polidyspersja

2.2.2. Połączenia międzycząstkowe

2.2.3. Cząstki niesferyczne

2.2.4. Materiały kompozytowe

2.3. Techniki pomiaru wymiarów fraktalnych agregatów cząstek

2.3.1. Właściwości fraktalne

2.3.2. Wielkość i liczba cząstek

2.3.3. Promień bezwładności

3. Modelowanie rozpraszania światła na agregatach fraktalnych

3.1. Metoda T-Matrix

3.2. Aproksymacja DDA

4. Podsumowanie

Literatura

Wprowadzenie

Księga przyrody zapisana jest językiem matematyki.

(Galileusz)

Trudno dziś zaprzeczyć poglądowi Galileusza, o czym świadczy fakt że nauki matematyczno-przyrodnicze jak i techniczne odnalazły swoją tożsamość w drodze fenomenalnego rozwoju. Zaszczytną rolą nauki i naukowców jest odkrywanie kolejnych zdań tej księgi. Motywacją takiego działania powinna być pasja odkrywania piękna przyrody, czyli działanie wpisujące się w zarówno w etykę jak i estetykę naukowego bytu.

Proces poznawczy w naukach nowożytnych łączy obserwację tej Galilejskiej „matematycznej przyrody”[*] z jej formalnymi reprezentacjami, czyli modelami fizycznymi, matematycznymi, metrologicznymi oraz komputerowymi[1, 2]. Weryfikacja poprawności tych struktur oraz łączących ich relacji dokonuje się naturalnie w drodze empirycznych poczynań, bowiem „zdanie, dla którego nie ma metody sprawdzania, sensu nie ma”[†]. Jest rzeczą naturalną, że matematyczne predykcje muszą być sprawdzone w eksperymentach, a więc to modele kształtują byt przyrządów pomiarowych. Niewątpliwie, metrologia w swoim procesie poznawczym łączy dokonania matematyki, fizyki teoretycznej i doświadczalnej, teorii pomiarów, inżynierii, co czyni z niej naukę interdyscyplinarną.

Wspomniany rozwój nauk wytycza nowe i coraz bardziej złożone zagadnienia poznawcze. Te z kolei stymulują rozwój metod i narzędzi pomiarowych. Moje osobiste zainteresowania i doświadczenia przesądziły o tym, że niniejsza praca poświęcona jest wybranym zagadnieniom matematycznego modelowania agregatów fraktalnych i wykorzystania tych modeli do nieinwazyjnej, optycznej metrologii ich cech. Agregaty powstają w drodze łączenia się cząsteczek, np. sadzy, w większe struktury co prowadzi do powstania skomplikowanych geometrii. W wielu przypadkach proces powstawania takich agregatów oraz ich parametry morfologiczne mogą być opisywane przy wykorzystaniu metod geometrii fraktalnej. Jakościowa oraz ilościowa analiza cech agregatów może być dokonywana przy wykorzystaniu światła jako narzędzia po-

[*] Ks. M. Heller, abp. J. Życiński „Matematyczność przyrody” Wyd. Petrus (2011).
[†] R. Ingarden [w:] J. M. Bocheński „Wspomnienia”, Wyd. Antyk (2008).

znawczego, które umożliwia realizację pomiaru nieinwazyjnego w czasie rzeczywistym, z potencjalnie dużą czułością i selektywnością.

Nie zamierzam streszczać ogromnej już dziedziny jaką jest metrologia układów dyspersyjnych, w którą wpisuje się analiza agregatów cząstek, byłaby to śmieszna ambicja. Moją intencją jest przede wszystkim ukazanie roli matematyczno-empirycznej metody w opisie morfologii skomplikowanych cząsteczek, mających zastosowanie w świecie mikro- i nantotechnologii.

Dotychczasowe doświadczenia autora w zakresie optycznej i nieinwazyjnej charakterystyki obiektów złożonych obejmują m.in.: problematykę pomiarów wielkości cząstek ośrodków dyspersyjnych metodami optycznymi[3-12], w tym hybrydowe metody w opisie transmitancji światła w warunkach rozproszenia wielokrotnego dla monodyspersyjnego rozkładu wielkości cząstek [13, 14], metody inwersyjne wykorzystujące sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej[15] oraz w spektroskopii absorpcyjnej[16], wykorzystanie spektralnych i polaryzacyjnych właściwości laserowego promieniowania rozproszonego w nieinwazyjnym badaniu materiałów kompozytowych[17-19], nieinwazyjną diagnostykę parametrów optycznych i właściwości rozproszeniowych pełnej krwi i erytrocytów[20], modelowanie matematyczne rozproszenia światła przez cząstki niesferyczne i ich agregaty[21-24], modelowanie matematyczne trójwiązkowej anemometrii dopplerowskiej w określaniu położenia i prędkości cząstek w ośrodkach wielofazowych[25], nieinwazyjny pomiar *in situ* średnicy homogenicznych i niehomogenicznych, przezroczystych włókien wykorzystywanych m.in. w materiałach kompozytowych i jako światłowody telekomunikacyjne i pomiarowe[26-29], a także praktyczne aspekty wykorzystania światła o niskiej spójności czasowej jako narzędzia w pomiarach[30, 31].

1. Geometria fraktalna

Fraktal jest sposobem widzenia nieskończoności okiem duszy.

(James Gleick)

Pojęcie „fraktal" do powszechnego użycia wprowadził w 1975 roku Benoît Mandelbrot. Po raz pierwszy pojawiło się w książce *Les objets fractals: forme, hasard et dimension*[32]. Ma ono dwojakie znaczenie. Łaciński przymiotnik *fractus* oznacza „nieregularny". Natomiast francuski czasownik *franger* znaczy „rozbijać" lub „tworzyć fragmenty". Jest to przeciwieństwo słowa „algebra", wywodzącego się od arabskiego *al jerb*, oznaczającego „łączyć w całość". Mandelbrot nie był pierwszą osobą zajmującą się tego typu, nieskończonymi geometriami. Przed nim ogromny wkład w tą dziedzinę nauki wniosły takie osoby jak Gottfried Leibniz, Karl Weierstrass, Georg Cantor, Giuseppe Peano, David Hilbert czy Wacław Sierpiński. Osiągnięciem Mandelbrota było zebranie, opisanie i rozwinięcie ich badań. Książką *The Fractal Geometry of Nature*[33] udało mu się wypromować ten rodzaj geometrii oraz uzyskać honorowy tytuł ojca geometrii fraktalnej.

Nie istnieje ścisła definicja pojęcia „fraktal". Jest to pojęcie intuicyjne, które w większości prac jest opisywane jako geometria nieskończona, tworzona w sposób rekurencyjny, samopodobna, a także charakteryzująca się niecałkowitą liczbą wymiarów. Pierwsze pojęcie, czyli samopodobność, dotyczy geometrii która w dowolnym powiększeniu wykazuje cechy oryginału. Nie jest to jednak warunek wystarczający do nazwania omawianej geometrii fraktalem. Przykładem jest prosta, spełniająca warunek samopodobieństwa (jak również niezależności od skali), niezaliczająca się jednak do tej grupy. Fraktale powstają poprzez wykonywanie pewnych czynności w nieskończoność. Algorytm jest najczęściej prosty, aczkolwiek wystarczający do generowania nieskończenie skomplikowanych geometrii. Co więcej, w wielu aplikacjach np. grafice komputerowej, algorytm tworzenia podstawowych geometrii takich jak koło, bywa znacznie bardziej skomplikowany. Z kolei wymiar określa przestrzeń, jaką zajmuje figura w otoczeniu każdego punktu wchodzącego w jej skład[34]. Nie jest prawdą, że wymiar fraktalny musi być niecałkowity (np. dla prawdopodobnie najpopularniejszego fraktala, jakim jest zbiór Mandelbrota wynosi on dokładnie dwa[35]), aczkolwiek jest to powszechne zjawisko. Podczas kryzysu matematycznego w XIX wieku, głównie za sprawą pojawienia się geometrii, dla których topologiczny (klasyczny) wymiar nie ma

zastosowania, pojawiła się potrzeba określenia nowego, niecałkowitego rodzaju wymiaru. Jedną z pierwszych, jak również najbardziej intuicyjnych definicji przedstawił Felix Hausdorff. Uznał on, że w przypadku doboru złej wartości wymiaru do pomiaru *n*-wymiarowych geometrii, wynik nie da wartościowych informacji. Przykładowo, objętość kwadratu (figury dwuwymiarowej) wyniesie zero, a długość jego wnętrza będzie nieskończona. Jedyny parametr, który może zostać zmierzony to powierzchnia. Miara Hausdorffa dana jest zależnością:

$$H_{\delta}^{s}(F) = inf\left\{\sum_{i=1}^{\infty}\left|U_i\right|^{s}\right\}, \quad |U_i| < \delta, \tag{1.1}$$

w której *n*-wymiarowa geometria F pokryta jest *n*-wymiarowymi podzbiorami U o wielkości liniowej nie większej niż δ. Przy założeniu, że δ dąży do zera, otrzymamy *s*-wymiarową miarę Hausdorffa:

$$H^{s}(F) = \lim_{\delta \to 0} H_{\delta}^{s}(F). \tag{1.2}$$

Mającą zastosowanie dla wszystkich możliwych geometrii. Wynik jest uogólnieniem takich wielkości jak długość, powierzchnia, czy objętość. Każda geometria może zostać scharakteryzowana określoną wartością *s*, prowadzącą do niezerowego i skończonego wyniku. Oznacza to, że *s*-wymiarowa miara Hausdorffa może opisywać geometrie ilościowo pod warunkiem, że dobrane zostaną poprawne parametry. Biorąc to pod uwagę, wymiar Hausdorffa przedstawia się następująco[34]:

$$\dim_h F = \inf\left\{s : H^{s}(F) = 0\right\} = \sup\left\{s : H^{s}(F) = \infty\right\}. \tag{1.3}$$

Wymiar Hausdorffa był i w dalszym ciągu jest obiektem zainteresowań naukowców na całym świecie. Do jego lepszego zrozumienia przyczynił się rosyjski matematyk Abraham Bezikowicz. W ramach uznania jego wkładu w rozwój danej gałęzi nauki, wymiar Hausdorffa również można spotkać pod nazwą wymiaru Hausdorffa–Beizkowicza. Niestety, w wielu przypadkach niezwykle trudno jest obliczyć jego wartość. Z tego powodu powstały alternatywne definicje wymiaru fraktalnego. Najpopularniejsza z nich to wymiar pudełkowy (Minkowskiego):

$$\dim_m F = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{-\log(\varepsilon)}, \tag{1.4}$$

w którym $\log N(\varepsilon)$ to liczba hipersześcianów o długości boku ε, potrzebnych do przykrycia geometrii. Jeżeli granica nie istnieje, dokonujemy podziału na wymiar

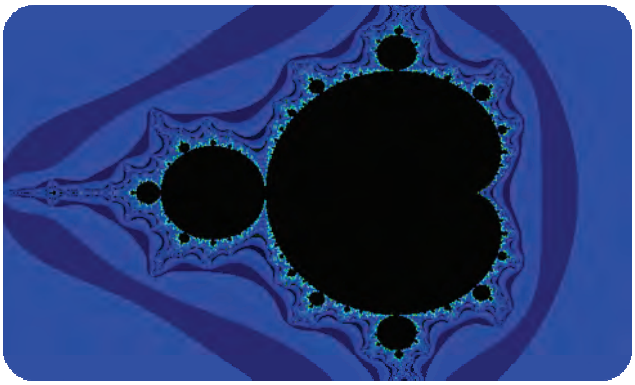
górny i dolny. Chociaż wymiar Hausdorffa i Minkowskiego są zwykle identyczne, w niektórych przypadkach nieznacznie się różnią, przez co nie mogą zostać uznane za tożsame.

Do popularnych fraktali matematycznych można zaliczyć krzywe pokrywające przestrzeń, np. Peano lub Hilberta. Ich wymiar fraktalny wynosi $\dim_h F = 2$ natomiast topologiczny $\dim_t F = 1$. Mogą one zostać w prosty sposób rozszerzone do przestrzeni *n*-wymiarowych, przez co stanowią swoisty pomost pomiędzy wymiarami i są wykorzystywane, między innymi, do ich redukcji i kompresji danych. Inną, znaną geometrią jest zbiór Mandelbrota, przedstawiony na Rys. 1.1. Opisany jest on następującą zależnością:

$$z_0 = 0, \tag{1.5}$$

$$z_{n+1} = z_n^2 + c_m, \tag{1.6}$$

w której c_m oznacza punkt w przestrzeni zespolonej. Jeżeli ciąg jest ograniczony, oznacza to, że badany punkt znajduje się w zbiorze Mandelbrota. Najczęściej jest to sprawdzane w taki sposób, że jeżeli przez *n* iteracji wartość z_n w dalszym ciągu znajduje się w przestrzeni ograniczonej promieniem o długości 2, to można dołączyć punkt do zbioru. W wielu przypadkach (również w niniejszej pracy) kolory dobrane są na podstawie ilości iteracji potrzebnych do zbadania punktu.



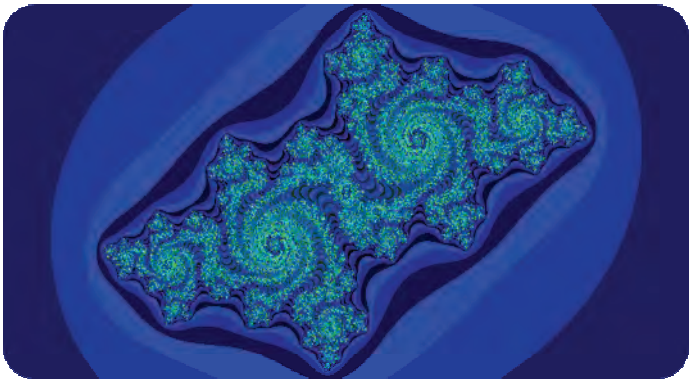
Rys. 1.1. Zbiór Mandelbrota

Inne równanie powszechnie wykorzystywane do generowania fraktali jest następujące:

$$z_0 = c_m, \tag{1.7}$$

$$z_{n+1} = z_n^2 + p. \tag{1.8}$$

Ta postać równania rekurencyjnego opisuje tzw. zbiór Julii. Algorytm określania przynależności punktu jest identyczny jak poprzednio. Jedynym nowym elementem jest parametr zespolony p. Określa on kształt generowanego fraktalu. Przykład dla $p = -0.5125 + 0.5212i$ przedstawiony jest na Rys. 1.2. Algorytm dobierania kolorów pozostał niezmieniony.



Rys. 1.2. Kwadratowy zbiór Julii

Jednym z ważniejszych fraktali w historii badań była funkcja zdefiniowana przez Karla Weierstrassa. Jej postać zaprzeczała powszechnemu w XVIII i XIX wieku przekonaniu, że funkcje ciągłe są różniczkowalne (przynajmniej w pewnej części swej dziedziny). Opisana jest ona w następujący sposób:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x), \tag{1.9}$$

$$ab > 1 + \frac{3}{2}\pi, \tag{1.10}$$

gdzie a jest zawarte w przedziale od 0 do 1, natomiast b jest dodatnią liczbą całkowitą. Przykładami fraktali generowanych metodą iteracyjnych odwzorowań (IFS – *Iterated Function System*) może być trójkąt Sierpińskiego (Rys. 1.3) lub pył Cantora (Rys. 1.4). Ich wymiar fraktalny wynosi odpowiednio $\dim_h F = 1.58$ i $\dim_h F = 0.63$.

Rys. 1.3. Trójkąt Sierpińskiego

Rys. 1.4. Pył Cantora

Geometria fraktalna może być użyta do pomiaru rzeczywistych geometrii. Jednym z pierwszych badaczy zainteresowanych samopodobnością był Lewis Richardson. Zauważył on, że długość brzegu (lub granicy państwa) może znacząco się różnić w zależności od publikacji. Paradoksalnie, każda aproksymacja może zostać uznana za poprawną, bowiem długość linii brzegowej zależy od tego, jaką metodą się ją mierzy. Aproksymując linię brzegową odcinkami linii prostych różnych długości ε uzyskuje się zatem różne wyniki. Richardson zaproponował następujące równanie do estymacji mierzonej długości[33]:

$$L(\varepsilon) \sim k\varepsilon^{1-D}, \tag{1.11}$$

gdzie L jest badaną długością, natomiast k i D są stałymi, dobieranymi adekwatnie do kształtu aproksymowanej linii brzegowej. Mandelbrot zasugerował, że D może być traktowane jako rzeczywisty wymiar brzegu[36]. Rzeczywiste kształty nie są całkowicie niezależne od skali. Długość miarki nie może być dłuższa niż cały badany brzeg. Co więcej, nie powinna być ona zbytnio zmniejszona do skali gdzie parametry, takie jak długość, są trudne lub wręcz niemożliwe do zmierzenia. Te dwie granice nazywają się zewnętrznym i wewnętrznym odcięciem. Definiują przedział, w którym badana geometria wykazuje właściwości fraktalne. Gdy badany jest wymiar pudełkowy i długość boku jest mniejsza niż wewnętrzne odcięcie, samopodobność ulega załamaniu i badany wymiar wzrasta do 3 (w rzeczywistości agregaty fraktalne, omawiane w późniejszej części pracy, są trójwymiarowe i ich złożoność jest skończona). Analogicznie, gdy zewnętrzne odcięcie jest większe niż badana geometria, wyłącznie jeden sześcian jest potrzebny do jego pokrycia. Jeżeli pod uwagę brane są rzeczywiste geometrie, różnica między dwoma odcięciami może być niewielka. Ponadto, nie są one „nieskończone” z czysto matematycznego punktu widzenia, dlatego w niektórych publikacjach można zetknąć się z określeniem „geometrie pseudo-fraktalne”.

2. Agregaty fraktalne

Fraktale są wszędzie wokół nas. Można je znaleźć w budowie drzew, gałęzi i paproci, w których każda część wydaje się być mniejszym obrazem całości. Występują one w przypominających gałęzie układach rzecznych, błyskawicach i naczyniach krwionośnych. Można je zobaczyć w płatkach śniegu, muszlach, kryształach i pasmach górskich. Możemy nawet zobaczyć holograficzną i fraktalistyczną naturę rzeczywistości w strukturze samego Wszechświata (…).

(Joseph P. Kauffman)

Małe cząstki łączą się ze sobą, co prowadzi do powstania większych geometrii, zwanych agregatami. Pomimo tego, że ten proces jest uznawany za uniwersalny[37], parametry morfologiczne powstałych geometrii, które są zależne od warunków środowiskowych oraz sposobu przeprowadzania eksperymentu, mogą się znacząco różnić. W najprostszym podejściu agregaty mogą być modelowane jako kule o jednakowej objętości. Niestety, takie uproszczenie może skutkować błędnymi lub bardzo nieprecyzyjnymi wynikach symulacji. Omawiane geometrie są samopodobne, a ich skomplikowany kształt może zostać określony za pomocą wymiaru fraktalnego D_f, np. według następującej zależności[33, 38, 39]:

$$N_p = k_f \left(\frac{R_g}{r_p} \right)^{D_f}, \tag{2.1}$$

w której N_p jest liczbą monodyspersyjnych cząstek o promieniu r_p, zaś k_f to współczynnik fraktalny[40, 41], znany jako stała skalująca lub stała strukturalna (należy pamiętać, że w niektórych publikacjach zamiast r_p wykorzystuje się średnicę cząstki $d = 2r_p$, co prowadzi do znacznych zmian k_f). Współczynnik fraktalny wraz z wymiarem fraktalnym opisują właściwości fraktalne agregatu[42]. R_g jest promieniem bezwładności zdefiniowanym najczęściej jako[43, 44]:

$$R_g^2 = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (\overline{r_l} - \overline{r_0})^2 = \frac{1}{2N_p^2} \sum_{i,j} (\overline{r_l} - \overline{r_j})^2, \tag{2.2}$$

$$\overline{r_0} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{N_p} \overline{r_l} m_i. \tag{2.3}$$

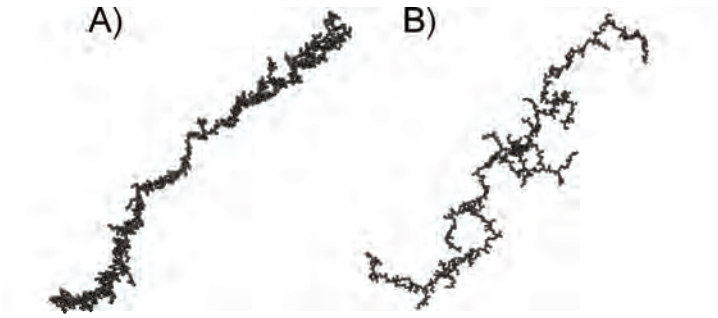
gdzie $\overline{r_0}$ jest środkiem masy geometrii, $\overline{r_i}$ określa pozycję *i*-tej cząstki, M jest całkowitą masą geometrii, natomiast m_i masą *i*-tej cząstki. Przytoczone równanie jest uproszczeniem mającym zastosowanie w przypadku monodyspersyjnych agregatów zbudowanych ze średniej lub dużej ilości cząstek. Gdy N_p jest małe, to wartość R_g może zostać niedoszacowana. Jedno z rozwiązań tego problemu, które pod uwagę bierze promień bezwładności pojedynczej cząstki, przedstawione zostało przez grupę Sorensena[45]:

$$R_{g,Sorensen}^2 = R_g^2 + 0.6r_p^2. \tag{2.4}$$

Inne rozwiązanie zaproponowane przez grupę Filippova ma następującą postać[46, 47]:

$$R_{g,Filippov}^2 = R_g^2 + r_p^2. \tag{2.5}$$

Niestety, nawet gdy geometria spełnia przytoczone równanie fraktalne, nie zawsze może zostać uznana za rzeczywisty fraktal, np. z powodu braku zachowania samopodobieństwa. Omawiane zjawisko jest ściśle związane ze sposobem tworzenia modelu, co zostało zilustrowane na Rys. 2.1. Geometrie stworzone algorytmem typu CC (zostaną one omówione w dalszej części pracy) są znacznie bardziej podobne do rzeczywistych agregatów fraktalnych.



Rys. 2.1. Przykładowe modele agregatów fraktalnych, o tych samych parametrach morfologicznych, wygenerowane za pomocą innych metod: A) PC, B) CC

Wymiar fraktalny D_f może przyjąć dowolną nieujemną wartość[48]. Jednakże w bardziej realistycznych modelach agregacji zawiera się on w przedziale od 1 do 3 i opisuje „zbicie" geometrii, co zostało przedstawione na Rys. 2.2. Gdy pod uwagę brane są agregaty fraktalne, wartość D_f jest nierozerwalnie związana z algorytmem agregacji. Obliczone wartości współczynnika fraktalnego k_f nie są tak precyzyjne jak w przy-

padku D_f i, w zależności od publikacji, mogą się różnić nawet o kilkaset procent[49, 50]. Według Oh i Sorensena to niepożądane zjawisko związane jest z kształtem i wielkością połączeń międzycząstkowych, ponieważ w naturze nie są one ułożone w idealnym kontakcie punktowym[45]. Ilość cząstek wchodzących w skład pojedynczego agregatu waha się od kilku do kilku tysięcy. Są one zazwyczaj modelowane jako monodyspersyjne kule. Przytoczone założenie upraszcza zarówno algorytmy modelujące proces agregacji jak również algorytmy modelujące proces rozpraszania światła na omawianych geometriach. Przykładowo, zamiast wymagającego algorytmu DDA (ang. *Discrete Dipole Approximation*) można zastosować znacznie szybszy program oparty na metodzie T-Matrix[51-53]. Promień bezwładności określa względną wielkość geometrii i jest ściśle zależny od N_p (pozostałe parametry morfologiczne, t.j. r_p, k_f i D_f, są zazwyczaj uznawane za stałe podczas całego procesu agregacji).

Rys. 2.2. Przykładowe modele agregatów o odmiennym wymiarze fraktalnym, kolejno od lewej: $D_f = 1.3$, $D_f = 2.0$, $D_f = 2.8$

Algorytmy modelujące proces agregacji można podzielić na dwie grupy: PC (ang. *Particle-Cluster*) i CC (ang. *Cluster-Cluster*). Należy mieć na uwadze, że przytoczone wartości D_f dla metod niedostrajalnych są wyłącznie uśrednieniem. W rzeczywistości mogą się one różnić w zależności od badanej geometrii[54].

2.1. Algorytmy modelujące proces agregacji

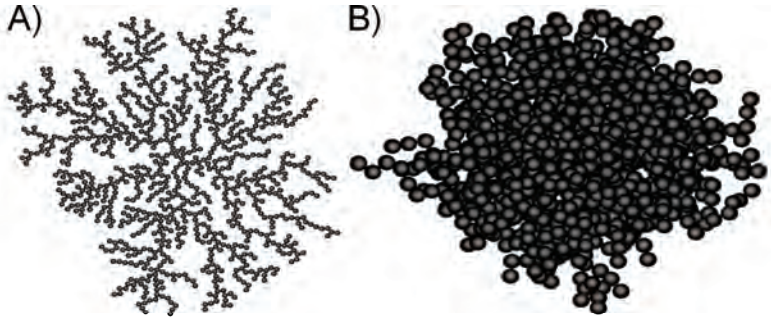
2.1.1. Algorytmy PC / Cząstka-Klaster

W każdym kroku procesu agregacji do rosnącej geometrii dodana zostaje wyłącznie jedna cząstka. Opisywane algorytmy są szybkie, wydajne i względnie proste do implementacji. Ich największą zaletą jest to, że wymiar fraktalny może być bardzo duży,

np. $D_f \sim 3$. Niestety, mniej „zbite” geometrie, np. $D_f \sim 1$ mogą nie wykazywać właściwości fraktalnych[55, 56]. W niektórych przypadkach algorytmy PC mogą zostać wykorzystane jako baza dla bardziej zaawansowanych algorytmów CC. Najbardziej popularne algorytmy PC to:

Agregacja balistyczna

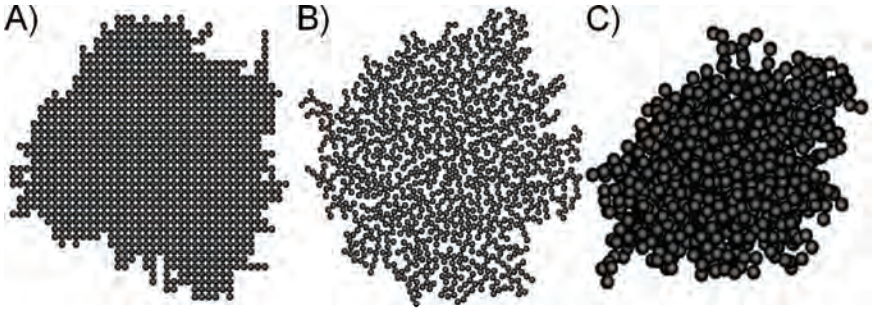
W najprostszej wersji algorytmu cząstki poruszają się po ścieżkach balistycznych w kierunku rosnącej geometrii i „przyklejają” się do niej za każdym razem gdy nastąpi zderzenie. Modele agregatów są bardzo „zbite” i wymiar fraktalny jest zbliżony do wymiaru topologicznego przestrzeni agregacji, tj. $D_f \sim 3$ dla trójwymiarowej i $D_f \sim 2$ dla dwuwymiarowej przestrzeni[56]. Przykłady modeli agregatów fraktalnych tego typu zaprezentowane są na Rys. 2.3.



Rys. 2.3. Dwu- i trójwymiarowe agregaty stworzone za pomocą algorytmu balistycznego PC

Agregacja limitowana reakcją RLA

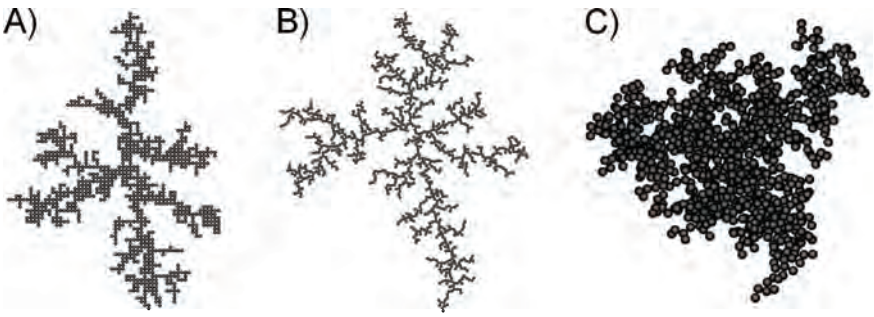
Metoda została zaproponowana w 1958 roku przez Edena i jej celem było modelowanie rozrostu kolonii komórek[57]. W każdym kroku agregacji do rosnącej geometrii dołączona zostaje pojedyncza cząstka. Jej pozycja jest losowana w taki sposób, żeby miała kontakt z obrysem geometrii. Oryginalna wersja algorytmu wykorzystywała dwuwymiarową siatkę, co znacząco skracało czas jego działania. Obecnie wyróżniamy dwa rodzaje algorytmów: *on-grid* (środki cząstek znajdują się na *n*-wymiarowej siatce) i *off-grid* (środki cząstek znajdują się w wolnej przestrzeni). Metoda RLA tworzy bardzo „zbite” geometrie, tj. $D_f \sim 2$ (przestrzeń 2D) i $D_f \sim 3$ (przestrzeń 3D)[56], co jest szczególnie widoczne w przypadku dwuwymiarowych algorytmów *on-grid*, co zilustrowano na Rys. 2.4.



Rys. 2.4. Modele agregatów fraktalnych stworzone za pomocą algorytmu RLA: A) *on-grid* (2D), B) *off-grid* (2D) , C) *off-grid* (3D)

Agregacja limitowana dyfuzją DLA

Metoda została zaproponowana w 1981 roku przez Wittena i Sandera[58]. Pojedyncze cząstki poruszają się po *n*-wymiarowej przestrzeni wykorzystując ruchy Browna. W przypadku wystąpienia kolizji, cząstki „przyklejają" się do rosnącej geometrii. Pomimo tego, że metoda jest czasochłonna, prowadzi do powstania bardziej realistycznych modeli agregatów fraktalnych. Mają one wymiar $D_f \sim 2.50$ i $D_f \sim 1.71$ dla trój- i dwuwymiarowej przestrzeni agregacji. Początkowo algorytmy wykorzystywały *n*-wymiarową siatkę (*on-grid*), obecnie dostępne są również wersje agregacji w wolnej przestrzeni (*off-grid*)[56]. Przykładowe modele agregatów przedstawione są na Rys. 2.5.



Rys. 2.5. Modele agregatów fraktalnych stworzone za pomocą algorytmu DLA: A) *on-grid* (2D), B) *off-grid* (2D), C) *off-grid* (3D)

Algorytmy dostrajalne PC

W wielu przypadkach wymagana jest ściśle określona wartość D_f . Większość algorytmów typu PC może zostać dostrojona. Proces jest prosty – po dodaniu pojedynczej

cząstki równanie fraktalne musi zostać sprawdzone. Jeżeli nie jest zgodne, rozwiązanie jest odrzucane, a krok agregacji powtarzany. Istnieją również specjalistyczne metody agregacji PC. Grupa Filippova zaproponowała procedurę polegającą na obliczeniu odległości pomiędzy środkami masy dwóch klastrów i następnie złączeniu ich z uwzględnieniem otrzymanej wartości[46]. Równanie agregacji przedstawia się następująco:

$$N_p^2 R_g^2 = N_p (N_{1p} R_{1g}^2 + N_{2p} R_{2g}^2) + N_{1p} N_{2p} \Gamma^2. \tag{2.6}$$

R_{ig} oraz N_{1p} są związane z *i*-tym klastrem. N_p określa całkowitą liczbę cząstek:

$$N_p = N_{1p} + N_{2p} \tag{2.7}$$

R_g jest przewidywanym promieniem bezwładności połączonych klastrów. Jeżeli pod uwagę brana jest agregacja typu PC równanie upraszcza się do następującej postaci:

$$\Gamma^2 = \frac{N_p^2 r_p^2}{N_p - 1}\left(\frac{N_p}{k_f}\right)^{\frac{2}{D_f}} - \frac{N_p r_p^2}{N_p - 1} - N_p r_p^2 \left(\frac{N_p - 1}{k_f}\right)^{\frac{2}{D_f}}. \tag{2.8}$$

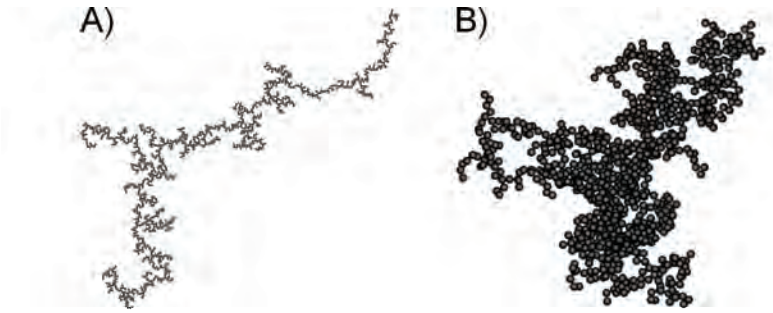
Przykładowy model agregatu, otrzymanego omawianą metodą, widoczny jest na Rys. 2.1A.

2.1.2. Algorytmy CC / Klaster-Klaster

Bardziej zaawansowane algorytmy biorą pod uwagę możliwość połączenia dwóch klastrów podczas każdego kroku agregacji. Pojedyncza cząstka może być uznana za osobny klaster, dlatego niektóre kroki agregacji mogą przypominać te z metod PC. Metody CC generują znacznie bardziej realistyczne modele agregatów. Niestety, są z reguły znacznie bardziej skomplikowane i przez to czasochłonne. Bardzo trudno (lub jest to wręcz niemożliwe) wygenerować agregat charakteryzujący się skrajnymi wielkościami wymiaru fraktalnego, np. $D_f \sim 1$ lub $D_f \sim 3$. Najpopularniejsze algorytmy CC to:

Agregacja balistyczna

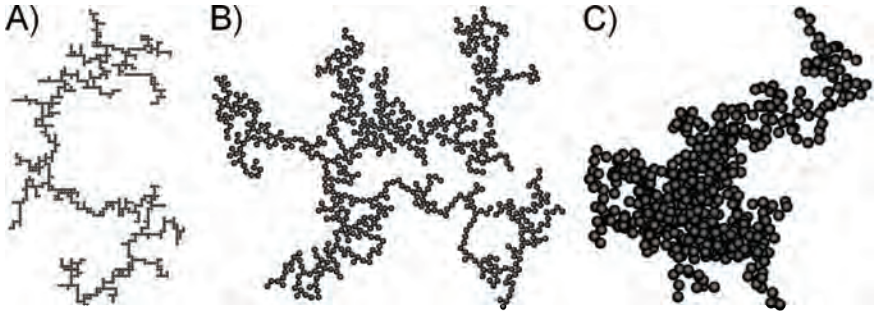
Podczas każdego kroku agregacji wybierane dwa klastry (zwykle o tej samej lub zbliżonej wielkości). Następnie zderzają się ze sobą, co prowadzi do ich połączenia. Przytoczony mechanizm jest powtarzany dopóki nie pozostanie pojedynczy klaster. Jego wymiar fraktalny jest mniejszy niż w przypadku metody PC, tj. $D_f \sim 1.89$ (agregacja 3D) i $D_f \sim 1.51$ (agregacja 2D)[56]. Przykładowe modele agregatów przedstawione są na Rys. 2.6.



Rys. 2.6. Dwu- i trójwymiarowe agregaty stworzone za pomocą algorytmu balistycznego CC

Agregacja limitowana dyfuzją DLCA

Zbiór cząstek rozmieszczany jest w losowy sposób w *n*-wymiarowej przestrzeni. Cząstki poruszają się w losowy sposób i łączą się w klastry przy każdym zderzeniu. Proces kończy się, gdy powstanie klaster o zakładanej wielkości. Powstałe modele agregatów charakteryzują się następującym wymiarem fraktalnym: $D_f \sim 1.78$ (przestrzeń 3D) i $D_f \sim 1.51$ (przestrzeń 2D). W celu przyspieszenia obliczeń niektóre implementacje wykorzystują *n*-wymiarową siatkę (*on-grid*), a inne odbywają się w wolnej przestrzeni (*off-grid*)[56]. Modele DLCA przedstawione są na Rys. 2.7, natomiast przestrzeń agregacji na Rys. 2.8.

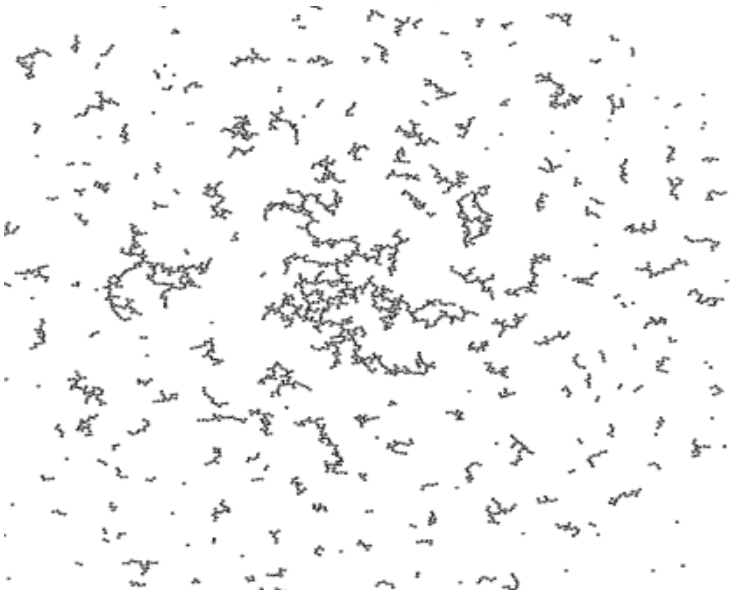


Rys. 2.7. Modele agregatów fraktalnych stworzone za pomocą algorytmu DLCA: A) *on-grid* (2D), B) *off-grid* (2D) , C) *off-grid* (3D)

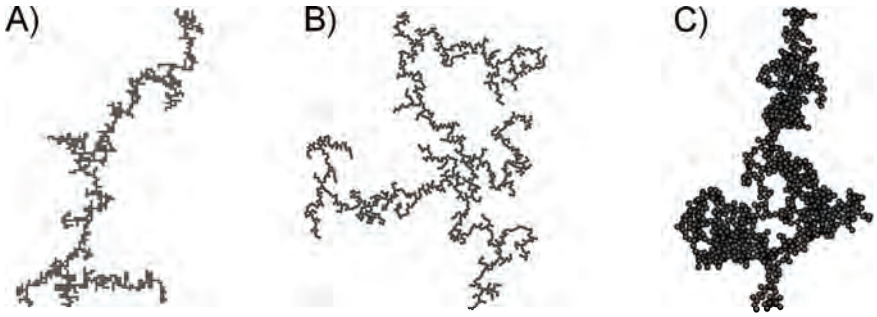
Agregacja limitowana reakcją RLCA

Proces RLCA może być modelowany za pomocą DLCA pod warunkiem, że prawdopodobieństwo połączenia cząstek jest bardzo małe (nie łączą się one przy każdym zderzeniu). Algorytmy DLCA mogą być bardzo czasochłonne, a wprowadzenie przytoczonej

modyfikacji znacznie wydłuża ich działanie. W 1984 roku Jullien i Kolb stworzyli algorytm bardzo podobny do metody RLA[59], jednakże wich wersji w każdym kroku agregacji łączyły się ze sobą dwa klastry o tej samej wielkości. Obecnie dostępne są implementacje typu *on-grid* i *off-grid*. Wymiar fraktalny jest mniejszy niż w przypadku agregacji RLA, tj. $D_f \sim 1.99$ (przestrzeń 3D) i $D_f \sim 1.53$ (przestrzeń 2D)[56]. Przykładowe modele agregatów widoczne są na Rys. 2.9.



Rys. 2.8. Trójwymiarowa przestrzeń agregacji wykorzystana w algorytmie DLCA. Ilość cząstek to $N_p \sim 3750$. Przynajmniej jeden klaster jest zbudowany z min. $N_p \sim 500$ cząstek



Rys. 2.9. Modele agregatów fraktalnych stworzone za pomocą algorytmu RLCA: A) *on-grid* (2D), B) *off-grid* (2D) , C) *off-grid* (3D)

Algorytmy dostrajalne CC

Podobnie jak w przypadku algorytmów typu PC wymiar fraktalny D_f może zostać dostrojony w wielu wersjach algorytmów CC. Promień bezwładności musi zostać sprawdzony po każdym kroku agregacji. Jeżeli nie spełnia on warunku równania fraktalnego, to krok musi zostać powtórzony. Algorytmy dostrajalne mogą bazować na różnych założeniach, np. grupa Filippova określiła, że dystans między środkami masy dwóch klastrów może zostać określony na podstawie następującej zależności[46]:

$$\Gamma^2 = \frac{N_p^2 r_p^2}{N_{1p} N_{2p}} \left(\frac{N_p}{k_f} \right)^{\frac{2}{D_f}} - \frac{N_p}{N_{2p}} R_{1g}^2 - \frac{N_p}{N_{1p}} R_{2g}^2 . \tag{2.9}$$

Następnie dwa wybrane klastry (o tej samej wielkości) muszą zostać rozsunięte i obrócone w taki sposób aby utworzyło się przynajmniej jedno połączenie. Model agregatu stworzony tą metodą ukazano na Rys. 2.1B.

Przedstawione powyżej algorytmy generacji modeli agregatów fraktalnych nie tworzą zamkniętej listy, przedstawiono jedynie te najpopularniejsze. Do dnia dzisiejszego wprowadzono wiele zmian i wciąż istnieje miejsce na kolejne ulepszenia. Algorytmy agregacji nie muszą polegać wyłącznie na jednym algorytmie PC lub CC. Mogą one być mieszane lub występować szeregowo. Z powodu dużej wartości współczynnika powierzchnia/objętość, agregaty fraktalne nie są stabilne i zapadają się krótko po zakończeniu procesu agregacji[60]. Efekt restrukturyzacji został uwzględniony np. w modelu grupy Brasila[55]. W tym algorytmie po każdym kroku agregacji klastry są obracane dookoła ich środka masy w taki sposób, aby utworzyć przynajmniej jeszcze jedno połączenie. Dodatkowo, agregaty fraktalne zmieniają się z wiekiem, zapadają się, połączenia międzycząstkowe zmieniają się (np. przez proces spiekania) i mogą oddziaływać z innymi materiałami[61-63]. Ponadto, nie wszystkie cząstki mogą być modelowane jako kule (np. erytrocyty)[64, 65].

2.2. Modyfikacje algorytmów uwzględniające złożone geometrie

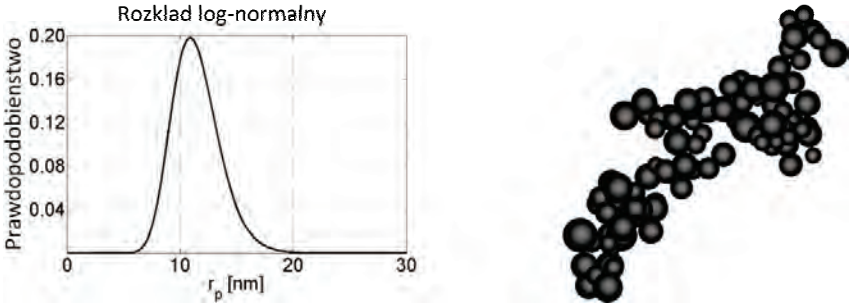
Pomimo tego, że modele agregatów są zazwyczaj złożone z monodyspersyjnych cząstek ułożonych w kontakcie punktowym, możliwe są różne modyfikacje algorytmów prowadzące do powstania bardziej realistycznych geometrii.

2.2.1. Polidyspersja

W rzeczywistości agregaty monodyspersyjne są bardzo rzadkie. Są one zazwyczaj złożone z cząstek, których wielkość można opisać np. rozkładem logarytmicznie nor-

malnym[60, 66]. W tym celu badane są dwa parametry: średnia geometryczna (ewentualnie mediana) i geometryczne odchylenie standardowe. Wartość drugiego parametru jest mniejsza w przypadku, gdy tylko jeden agregat jest brany pod uwagę. W przeciwnym przypadku (porównywanych jest wiele agregatów) różnica w wielkości cząstek jest bardziej widoczna[60]. Przykładowy model agregatu dwutlenku krzemu zbudowanego ze 100 cząstek, charakteryzujący się logarytmicznie normalnym rozkładem wielkości cząstek o maksimum $r_{p,g} = 11.25$ nm pokazano na Rys. 2.10, Ref.[60]. Parametry fraktalne to $D_f = 1.86$ i $k_f = 1.65$. Gdy nie są wykorzystywane algorytmy dostrajalne, to polidyspersja nieznacznie zwiększa przewidywany wymiar fraktalny[56]. Agregaty polidyspersyjne mogą być opisane za pomocą równania fraktalnego pod warunkiem, że r_p zostanie zmienione na średnią geometryczną (lub medianę). Jeżeli wartość $r_{p.g}$ jest duża, standardowe równanie promienia bezwładności może prowadzić do błędów w obliczeniach. Zalecany jest wtedy wzór[54]:

$$R^2_{g,polidyspersja} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} m_i(\overline{r_i} - \overline{r_0})}{M}. \tag{2.10}$$



Rys. 2.10. Logarytmicznie normalny rozkład wielkości cząstek dla pojedynczego modelu agregatu dwutlenku krzemu

Inną metodą opisu wielkości cząstek jest wykorzystanie rozkładu normalnego, wykorzystującego wartość średnią i odchylenie standardowe. Niestety, w wielu przypadkach nie jest on w stanie dokładnie opisać gwałtownych zmian r_p. Oprócz wielkości promienia cząstki, rozkład logarytmicznie normalny jest wykorzystywany do opisu ich ilości. Często wartość N_p jest mała, jednakże w rzeczywistości można spotkać agregaty zbudowane nawet z tysięcy cząstek. Rozkład logarytmicznie normalny, w przeciwieństwie do rozkładu normalnego, jest w stanie uwzględnić taki rozrzut. Promień

bezwładności jest zależny od ilości cząstek, dlatego równie często jest opisywany rozkładem logarytmicznie normalnym.

2.2.2. Połączenia międzycząstkowe

Opisane algorytmy PC i CC tworzą modele agregatów zbudowanych z cząstek w kontakcie punktowym. Jest to tylko uproszczenie, ponieważ w rzeczywistości między cząstkami występują różne połączenia. Przykładowo, ma na nie wpływ proces spiekania. Składa się on z wielu zjawisk, które można podzielić na dwie główne kategorie[63]:

Densyfikacja

W wyniku densyfikajcji środki cząstek zbliżają się do siebie, co prowadzi do zmniejszenia wielkości agregatu[60]. Efekt może być modelowany za pomocą przenikających się sfer. Współczynnik przenikania jest zdefiniowany w następujący sposób[55]:

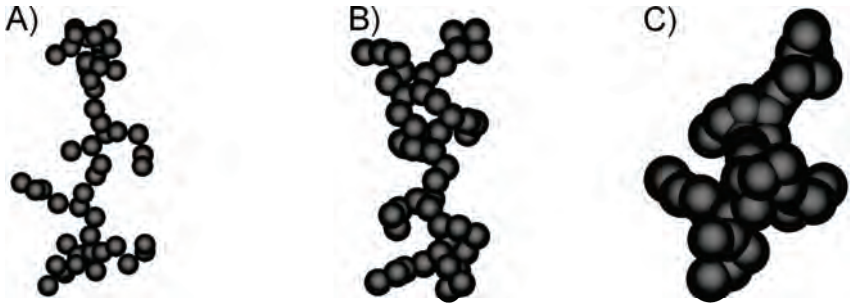
$$C_{ov} = 1 - \frac{l}{r_{1p} + r_{2p}}, \tag{2.11}$$

gdzie l jest odległością pomiędzy środkami dwóch, zwykle monodyspersyjnych, cząstek. W badaniach numerycznych przeprowadzonych przez zespół Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej wykorzystane zostały dwa parametry. Pierwszy z nich, C_a, określa średnią wartość przenikania cząstek w agregacie. Jeżeli cząstka posiada kilka połączeń, tylko największe z nich jest brane pod uwagę. Konsekwentnie, niepołączone cząstki są odrzucane (wartość C_a nigdy nie jest ujemna). Drugi parametr, C_m, definiuje największy współczynnik przenikania jaki występuje w agregacie. Geometrie zbudowane z przenikających się cząstek przedstawione są na Rys. 2.11 i Rys. 2.12.

Rys. 2.11. Klaster złożony z dwóch cząstek. Współczynnik przenikania to (od lewej) $C_a = 0.0$, $C_a = 0.5$

Połączenia międzycząstkowe zmieniają parametry morfologiczne agregatów fraktalnych. Geometrie stają się bardziej „zbite” i z tego powodu wzrasta ich wymiar

fraktalny D_f, Ref.[45]. Ostatecznie, gdy $C_a = 1$, to środki cząstek znajdują się w jednej pozycji i agregat przypomina kulę o wymiarze fraktalnym (jak również topologicznym) $D_f = 3$. Grupa Brasila zasugerowała, że dla małych połączeń (w ich pracy współczynnik przenikania nie przekroczył wartości $C_a < 0.3$) wymiar fraktalny może zostać uznany za stałą, aczkolwiek współczynnik fraktalny już nie wykazuje takich właściwości i zmienia się według równania[55]:



Rys. 2.12. Modele agregatów fraktalnych złożonych z przenikających się cząstek: A) $C_a = 0.0$, B) $C_a = 0.25$, C) $C_a = 0.5$. W każdym przypadku $C_a = c_m$

$$k_f = k_{f,init} e^{2.2C_a}, \tag{2.12}$$

gdzie $k_{f,init}$ jest początkowym współczynnikiem fraktalnym dla cząstek ułożonych w kontakcie punktowym, czyli $C_m = 0$. Z drugiej strony Oh i Sorensen stwierdzili, ze zmiany D_f powinny być uwzględnione nawet w przypadku niewielkich połączeń[45]. Wyjątkiem jest sytuacja gdy promień cząstek jest dużo mniejszy niż wielkość agregatu, tj. $N_p \to \infty$. Gdy przytoczony warunek jest spełniony, to C_a nie ma wpływu na D_f. Zmiana współczynnika bezwładności może być aproksymowana w następujący sposób[55]:

$$\frac{R_g}{R_{g,init}} = 1 - C_a, \tag{2.13}$$

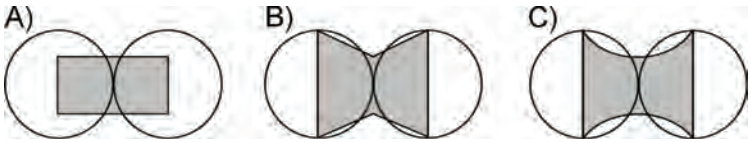
gdzie $R_{g,init}$ jest początkowym promieniem bezwładności dla cząstek ułożonych w kontakcie punktowym, czyli $C_a = 0$. Nawet jeżeli $C_a > 0$ to agregaty nie tracą swoich właściwości fraktalnych i mogą zostać zapisane przy pomocy równania fraktalnego[45]. Jeżeli $C_a = 1$ to środki cząstek znajdują się w tym samym miejscu i początkowa geometria nie może zostać odtworzona. Niewielkie przenikanie cząstek może również modelować wczesne fazy procesu spiekania[55].

Adhezja

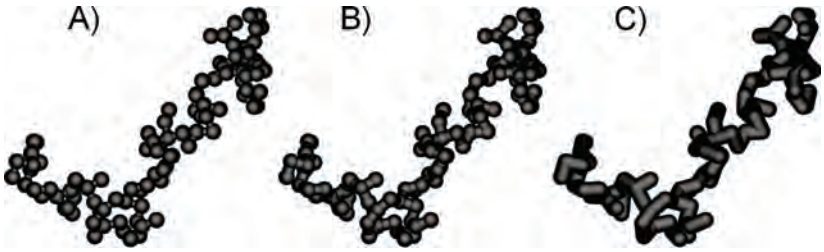
Adhezja polega na tym, że pomimo tego, że cząstki nie zmieniają swoich pozycji, to masa jest transportowana do punktu styku[63]. W badaniach numerycznych przeprowadzonych przez zespół Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej wykorzystano trzy różne typy połączeń. Pierwsze z nich może zostać przedstawione jako cylinder umieszczony między dwiema cząstkami, co zostało przedstawione na Rys. 2.13A. Drugie z nich bazuje na obrocie funkcji liniowej i może zostać przedstawione jako dwa przenikające się stożki, Rys. 2.13B. Najbardziej zaawansowane połączenie polega na obrocie funkcji kwadratowej, Rys. 2.13C. Bez względu na typ połączenia jego wielkość opisana jest następującą zależnością:

$$Y_{con} = \frac{r_c}{r_{p,min}}, \tag{2.14}$$

gdzie r_c jest najmniejszą możliwą powierzchnią przekroju połączenia, a $r_{p,min}$ jest promieniem mniejszej cząstki. W niektórych przypadkach, zwłaszcza gdy $C_a > 0$, małe połączenia mogą być niewidoczne. Wielkość połączeń międzycząstkowych zmienia się od $Y = 0$ (brak połączenia) do $Y = 1$ (pełne połączenie). Dla tych skrajnych wartości każdy typ połączenia wygląda tak samo. Badania dowodzą, ze różnica między typami połączeń jest niewielka i mogą one być wykorzystywane zamiennie. Z tego powodu zalecane jest najprostsze z nich, tj. cylindryczne[21]. Przykładowy model agregatu z połączonymi cząstkami przedstawiony jest na Rys. 2.14. Wymiar fraktalny



Rys. 2.13. Różne modele połączeń: A) Cylindryczny, B) Liniowy, C) kwadratowy. W każdym przypadku $Y = 0.5$

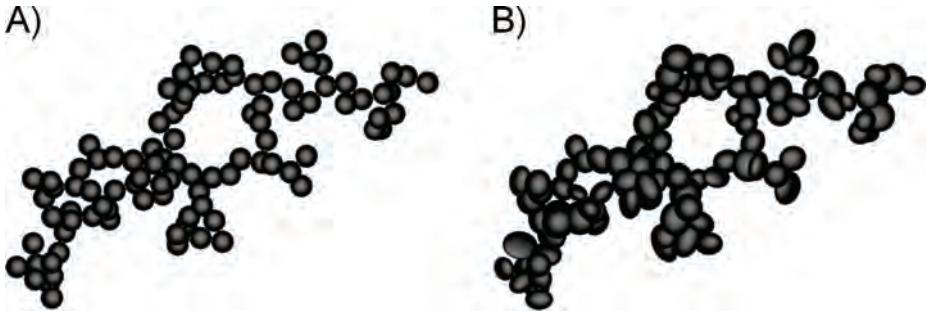


Rys. 2.14. Modele agregatów fraktalnych złożonych z połączonych cząstek. Wielkość połączenia to A) $Y = 0.5$, B) $Y = 0.75$, C) $Y = 1.0$

i promień bezwładności nie powinny znacznie się zmieniać pod wpływem wielkości połączeń, aczkolwiek badania, które by tego dowodziły, nie zostały jeszcze przeprowadzone. Małe połączenia sprawiają, że geometria staje się bardziej realistyczna. Ponadto, tworzą one jej szkielet. Nawet po modyfikacji modelu agregatu (np. wprowadzeniu polidyspersji) gwarantowana jest jego ciągłość.

2.2.3. Cząstki niesferyczne

Agregaty fraktalne są zazwyczaj modelowane jako zbiór cząstek. Chociaż to założenie może być w wielu przypadkach wystarczające, niektóre cząstki charakteryzują się unikalnym kształtem, na przykład czerwone krwinki, a modele ich agregatów mogą być tworzone przy użyciu metod PC/CC i opisane za pomocą równania fraktalnego[67]. Niestety, sam proces agregacji jest bardziej skomplikowany, głównie ze względu na znacznie bardziej skomplikowane algorytmy wykrywania kolizji występujących pomiędzy cząstkami. Alternatywnie, kształt cząstek może zostać zmodyfikowany po zakończeniu procesu agregacji. Aby uniknąć braku ciągłości geometrii, należy implementować niewielkie połączenia międzycząstkowe, czyli $Y > 0$. Przykładowy agregat złożony z eliptycznych cząstek pokazano na Rys. 2.15.

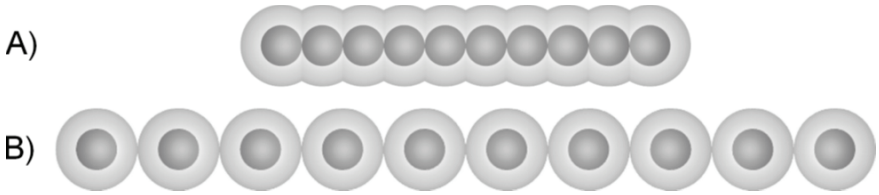


Rys. 2.15. Modele agregatów fraktalnych złożone z różnych modeli cząstek: A) sferycznych, B) eliptycznych

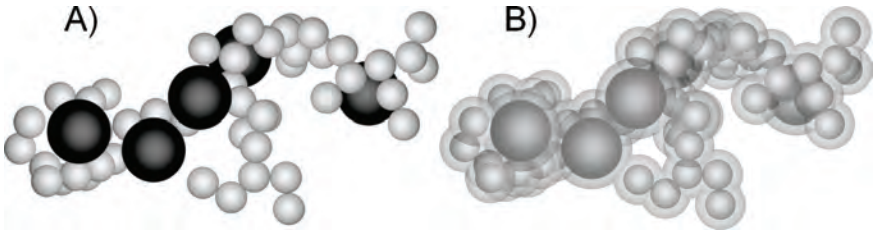
2.2.4. Materiały kompozytowe

Niektóre agregaty fraktalne łączą się z innymi materiałami, co może skutkować np. powstaniem zewnętrznych płaszczy[62]. Zjawisko to zostało zaprezentowane na Rys. 2.16A. W wielu badaniach cząstki otoczone płaszczem traktowane są jako osobne geometrie występujące w kontakcie punktowym, Rys. 2.16B. Takie założenie jest przydatne np. podczas potrzeby szybkiego modelowania procesu rozpraszania światła. Niektóre

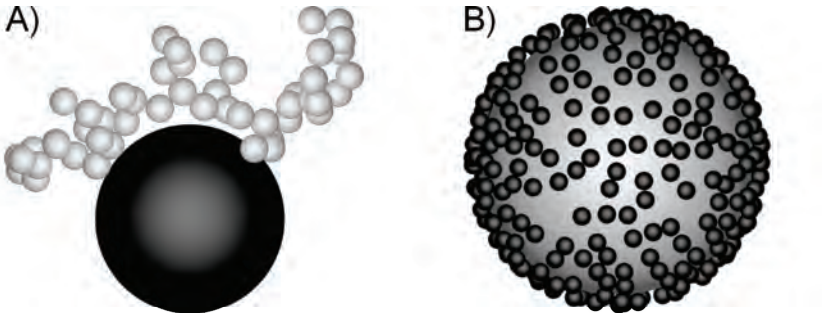
agregaty charakteryzują się znacznie bardziej skomplikowaną geometrią. Troposferyczna sadza jest złożona z materii organicznej i nieorganicznej[62]. Przykładowy model agregatu czarnego węgla wzbogacony o cząstki siarczanów pokazuje Rys. 2.17A (cząstki różnych materiałów mogą wykazywać inne parametry rozkładu). Ten sam model otoczony płaszczem organicznym przedstawia Rys. 2.17B. W niektórych przypadkach wielkość poszczególnych cząstek znacznie się różni. Na przykład, jedna cząstka może być większa niż reszta agregatu[68], Rys. 2.18A. Co więcej, niektóre zbiory cząstek nie wykazują właściwości fraktalnych. Rysunek 2.18B przedstawia cząstkę dwutlenku tytanu otoczoną mniejszymi cząstkami złota[69].



Rys. 2.16. Ułożone liniowo cząstki otoczone płaszczem, np. wodnym. A) Agregat otoczony płaszczem. B) Agregat złożony z cząstek otoczonych płaszczem



Rys. 2.17. Modele troposferycznych agregatów sadzy. A) czarny węgiel (biały) i siarczany (czarny), B) Ten sam model agregatu otoczony płaszczem z kwasów organicznych



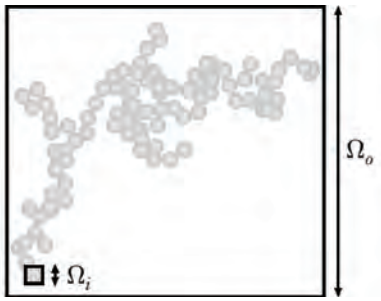
Rys. 2.18. A) Agregat czarnego węgla (biały) i siarczan (czarny), B) Dwutlenek tytanu (biały) otoczony cząstkami złota (czarny)

2.3. Techniki pomiaru wymiarów fraktalnych agregatów cząstek

Aby stworzyć realistyczne modele agregatów fraktalnych, ich parametry morfologiczne muszą być uzyskane na podstawie prawdziwych geometrii. Poniższy rozdział przedstawia skrócony opis najpopularniejszych technik ich pomiaru.

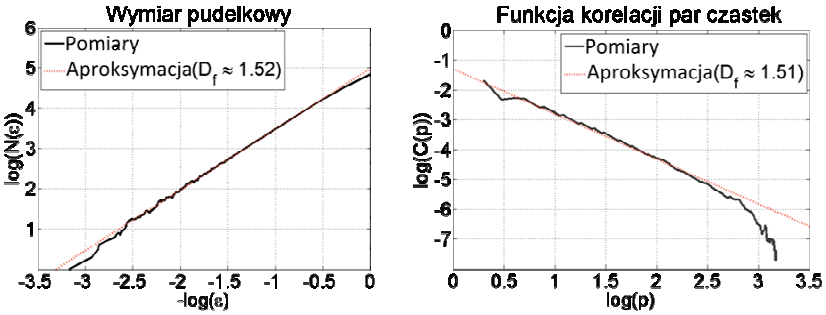
2.3.1. Właściwości fraktalne

Jedną z metod pomiaru wymiaru fraktalnego agregatów jest wykorzystanie metody pudełkowej, opisanej w rozdziale 1. Na potrzeby niniejszej dyskusji stworzono model agregatu z wykorzystaniem dostrajalnego algorytmu typu CC. Ilość cząstek to 16384, a zakładany wymiar fraktalny to 1.5, co powoduje że odcięcie zewnętrzne jest dużo większe niż odcięcie wewnętrzne. Należy pamiętać, że nie jest precyzyjnie określone od ilu cząstek agregat można uznawać za fraktal. Co więcej, obliczanie wymiaru fraktalnego metodą pudełkową w przypadku małych agregatów jest bardzo problematyczne lub wręcz niemożliwe, co zilustrowano na Rys. 2.19. Następnie wymiar fraktalny jest estymowany na podstawie zbocza funkcji, co zostało zaprezentowane na Rys. 2.20A.



Rys. 2.19. Przykładowe wartości zewnętrznego i wewnętrznego odcięcia

Metoda pudełkowa daje zadowalające wyniki dla trójwymiarowych modeli agregatów[70]. Procedura jest jednak znacznie bardziej złożona, gdy operujemy wyłącznie dwuwymiarowym rzutem geometrii na płaszczyznę, np. obrazem TEM[40, 23]. Brak jednego wymiaru może znacznie zmienić wyniki, co zobrazowano na Rys. 2.21. Najprostsze rozwiązanie polega na modyfikacji uzyskanego wyniku z wykorzystaniem, np. zależności liniowej[40]. Powstały również inne sposoby odtworzenia brakującego wymiaru. Jeden z nich polega na badaniu zbocza następującej funkcji[42, 43]:



Rys. 2.20. Wymiar fraktalny trójwymiarowego modelu agregatu obliczony na podstawie A) metody pudełkowej, B) analizy funkcji korelacji par cząstek

$$D_f = \frac{\log(N_p / k_l)}{\log(L_p / 2r_p)}, \tag{2.15}$$

gdzie k_l jest współczynnikiem korelacji a L_p jest największą długością rzutu geometrii. Następnie, współczynnik fraktalny może zostać odtworzony z wykorzystaniem następującego równania[41]:

$$k_f = k_l (L_p / 2R_g)^{D_f}. \tag{2.16}$$

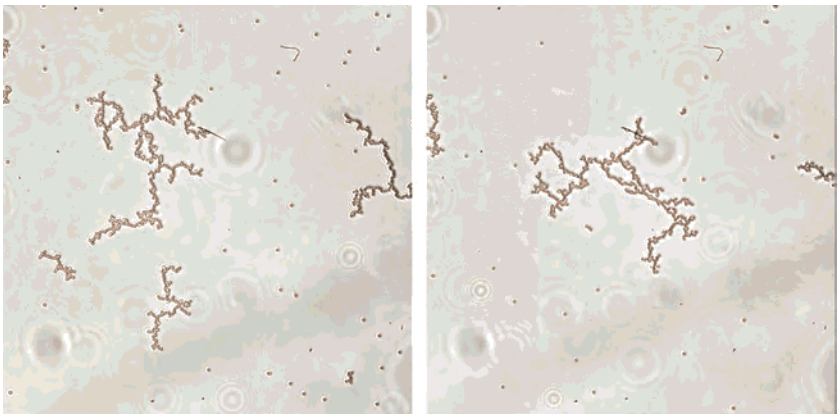
Co ważne, problem nie występuje, gdy badane obrazy przedstawiają dwuwymiarowy agregat. Przykład takiego agregatu w postaci warstwy polistyrenu stworzonego w VKI (The von Karman Institute for Fluid Dynamics) w Belgii, przedstawiono na Rys. 2.22. Chociaż przytoczone geometrie nie są idealnie dwuwymiarowe, mogą zostać zbadane z wykorzystaniem metody pudełkowej i korekta wyników nie jest wymagana.

Rys. 2.21. Dwa obrazy tego samego modelu agregatu z innej perspektywy

Metoda pudełkowa nie jest jedyną techniką do określania wymiaru fraktalnego. Istnieje kilka alternatywnych sposobów. Przykładowo, może być on zbadany z wykorzystaniem funkcji korelacji par cząstek[46]:

$$C(p) = \frac{n(p)}{4\pi p^2 h N_p}, \tag{2.17}$$

w której $n(p)$ jest gęstością par cząstek, oddalonych od siebie o $p \pm h/2$. Znormalizowana funkcja ma następującą postać:



Rys. 2.22. Prawie dwuwymiarowe agregaty polistyrenu stworzone w VKI

$$\int_0^\infty C(p) 4\pi p^2 dp = \frac{N_p - 1}{2}. \tag{2.18}$$

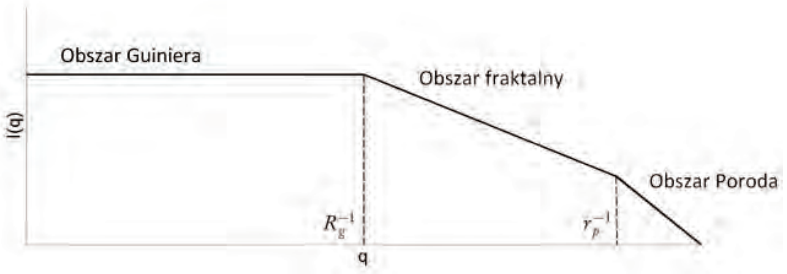
Następnie, wymiar fraktalny może zostać estymowany na podstawie zbocza liniowej części funkcji, co zostało przedstawione na Rys. 2.20B. W pomiarach została wykorzystana ta sama geometria analizowana przy użyciu metody pudełkowej, czyli $N_p = 16384$ i $D_f = 1.5$.

Wymiar fraktalny może być również estymowany bezpośrednio z wykorzystaniem równania fraktalnego. Przykład zaprezentowano na Rys. 2.23. W tym badaniu model zbudowano z 4096 cząstek, wykorzystując metodę DLA. Wymiar fraktalny został określony na podstawie zbocza funkcji. Niestety, w tym przypadku musimy dokładnie znać proces agregacji i być świadomym jak zmieniły się parametry morfologiczne w każdym jej kroku.

Inną techniką jest zastosowanie diagramów światła rozproszonego. Metoda daje poprawne wyniki pod warunkiem, że $D_f < 2$, Ref.[71]. Wektor rozpraszania dany jest zależnością[39]:

$$q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \tag{2.19}$$

gdzie λ jest długością fali a θ kątem rozproszenia. Natężenie promieniowania I w funkcji q zostało przedstawione na Rys. 2.24. Wykres składa się z trzech części: obszaru Guiniera, obszaru fraktalnego oraz obszaru Poroda. Wymiar fraktalny może zostać odczytany ze zbocza funkcji występującego w drugim przedziale[39].



Rys. 2.24. Natężenie promieniowania I w funkcji wektora rozpraszania q

2.3.2. Wielkość i liczba cząstek

W wielu przypadkach r_p jest znane *a priori*, nawet gdy są badane rzeczywiste agregaty. Przykładowo, cząstki przedstawione na Rys. 2.22 charakteryzują się promieniem $r_p = 500$ nm i wąskim rozkładem (aby uprościć obliczenia w niniejszej pracy przyjęto założenie $r_{p,g} \sim 0$ nm). Estymacja N_p może być trudniejszym zadaniem, ponieważ na pojedynczym obrazie może być widocznych nawet kilkaset (lub tysięcy) cząstek. N_p może być aproksymowane na podstawie następującego wzoru[55]:

$$N_p = k_a (A_a / A_p)^{\alpha}, \tag{2.20}$$

w którym A_a i A_p są powierzchniami projekcji odpowiednio całego agregatu i pojedynczej cząstki. $k_a \sim 1.10$ i $\alpha \sim 1.08$ są stałymi, aczkolwiek ich wartość może być inna w zależności od publikacji. Gdy badane są diagramy światła rozproszonego (Rys. 2.24), to N_p zależy od natężenia w następujący sposób: $I(q=0) \sim N_p^2$. Obszar Poroda jest natomiast zależny od wielkości cząstek[39, 44].

2.3.3. Promień bezwładności

Promień bezwładności może zostać oszacowany na podstawie analizy dwuwymiarowych obrazów agregatów cząstek na podstawie równania:

$$L/(2R_g) \approx \beta, \tag{2.21}$$

gdzie L jest największą długością rzutu, a $\beta = 1.5$ jest stałą, mogącą różnić się w zależności od publikacji. Gdy badane są diagramy światła rozproszonego, to R_g może być aproksymowane na podstawie obszaru Guiniera[41]:

$$\frac{I(q=0)}{I(q)} \approx\sim 1 + \frac{R_g^2 q^2}{3}, \tag{2.22}$$

zakładając, że $R_g q < 1$, Ref.[39, 44].

3. Modelowanie rozproszenia światła na agregatach fraktalnych

Uproszczenie: ignorancja wobec tego, co złożone.
Prostota: rozwiązanie trudności.

(Éric-Emmanuel Schmitt)

Parametry morfologiczne agregatów fraktalnych mają bardzo duży wpływ na sposób, w jaki rozprasza się na nich światło. Do dnia dzisiejszego powstało wiele metod modelujących to zjawisko. W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną dwie z nich.

3.1. Metoda T-Matrix

Jest to jedna z najpopularniejszych metod modelowania rozpraszania światła na agregatach fraktalnych. Nazwa najczęściej odnosi się do metody *Null-Field* zaproponowanej w 1965 roku przez Petera Watermana. Pole fali padającej jak i rozproszonej mogą zostać opisane następującymi zależnościami:

$$\mathbf{E}_{inc}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-1}^{n} a_{mn}\mathbf{M}_{mn}^{1}(k\mathbf{r}) + b_{mn}\mathbf{N}_{mn}^{1}(k\mathbf{r}), \tag{3.1}$$

$$\mathbf{E}_{sca}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-1}^{n} f_{mn}\mathbf{M}_{mn}^{3}(k\mathbf{r}) + g_{mn}\mathbf{N}_{mn}^{3}(k\mathbf{r}), \tag{3.2}$$

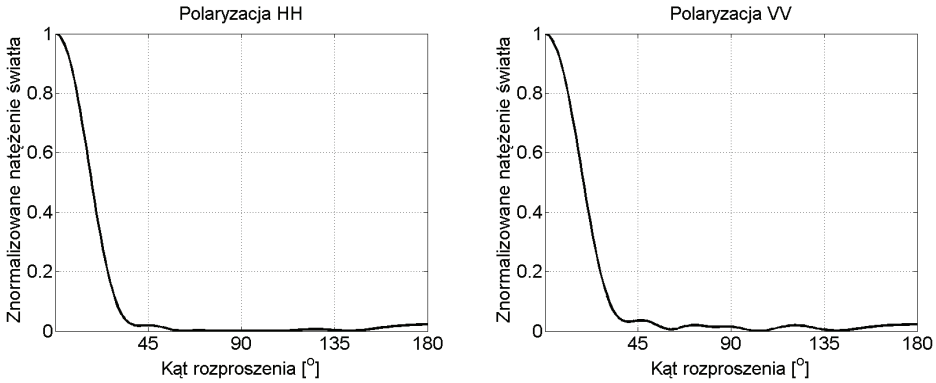
gdzie $\mathbf{r}$ jest wektorem określającym pozycję detektora względem początku układu współrzędnych, zaś $\mathbf{M}_{mn}^{1}, \mathbf{N}_{mn}^{1}, \mathbf{M}_{mn}^{3}, \mathbf{N}_{mn}^{3}$ są wektorowymi funkcjami sferycznymi. Macierz przejścia T zdefiniowana jest następująco:

$$\begin{bmatrix} f_{mn} \\ g_{mn} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a_{mn} \\ b_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{11} & T^{12} \\ T^{21} & T^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{mn} \\ b_{mn} \end{bmatrix}. \tag{3.3}$$

Przytoczona metoda została wykorzystana do określenia znormalizowanych diagramów światła rozproszonego na agregacie dwutlenku tytanu, zbudowanego z $N_p = 500$

cząstek o promieniu $r_p = 25$ nm. Parametry fraktalne to $D_f = 1.8$ i $k_f = 1.3$. Długość padającej fali wynosi $\lambda = 600$ nm. Wyniki nie zostały uśrednione. Wykorzystany został algorytm T-Matrix napisany przez Dana Mackowskiego[51]. Kolejne symulacje zostały przeprowadzone dla kuli o tej samej objętości. Geometria agregatu dwutlenku tytanu przedstawiona jest na Rys 3.1, natomiast wyniki na Rys. 3.2 i Rys. 3.3. Analiza porównawcza Rys. 3.2 i Rys. 3.3 dowodzi, że aproksymacja agregatu fraktalnego kulą, w wielu aplikacjach, może być zbyt daleko idącym uproszczeniem.

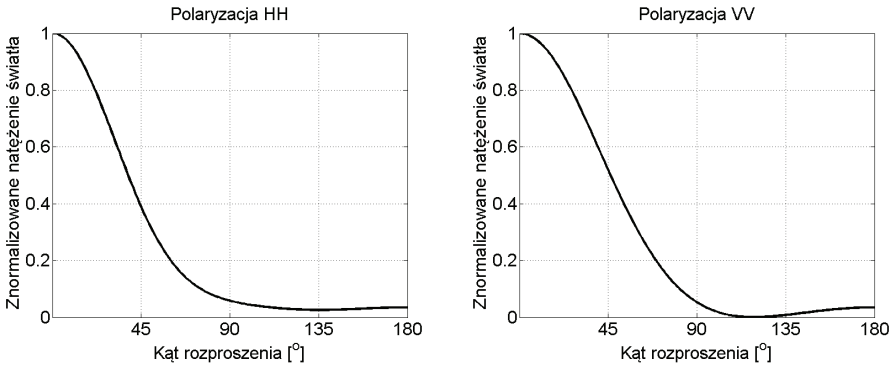
Rys. 3.1. Agregat dwutlenku tytanu



Rys. 3.2. Znormalizowane diagramy światła rozproszonego dla agregatu dwutlenku tytanu

3.2. Aproksymacja DDA

Metoda DDA daje poprawne wyniki pod warunkiem, że geometria składa się z odpowiedniej ilości elementów objętościowych (dipoli). Po raz pierwszy pojawiła



Rys. 3.3. Znormalizowane diagramy światła rozproszonego dla kuli z dwutlenku tytanu

się w pracy Howarda DeVoe z 1964 roku, następnie została rozwinięta przez Edwarda Purcella i Carltona Pennypackera w 1973 roku[72]. Aby przyspieszyć jej działanie, elementy objętościowe (dipole) umieszczone są w stałej odległości od siebie, co pozwala to na wykorzystanie algorytmów FFT. Zastosowanie metody wiąże się ze spełnieniem następujących warunków[73]:

$$d = \frac{\lambda}{10\,|m|}, \tag{3.4}$$

gdzie d jest odległością między elementami objętościowymi (dipolami), λ długością fali, natomiast m zespolonym współczynnikiem załamania światła. Ponadto:

$$|m-1| < 2. \tag{3.5}$$

Moment dipolowy jest wyliczany z zależności:

$$\mathbf{P}_j = \alpha_j \mathbf{E}_j, \tag{3.6}$$

w której α_j to polaryzowalność, natomiast $\mathbf{E_j}$ jest polem elektrycznym w punkcie $\mathbf{r}_j$. Polaryzowalność wyraża równanie Clausiusa-Mossotiego:

$$\alpha_j^{CM} = \frac{3d^3}{4\pi}\frac{\varepsilon_j - 1}{\varepsilon_j + 2}, \tag{3.7}$$

w którym ε_j oznacza funkcję dielektryczną. Pole elektryczne w punkcie $\mathbf{r}_j$ dane jest zależnością:

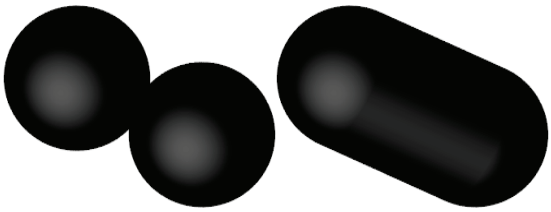
$$\mathbf{E}_j = \mathbf{E}_{inc,j} - \sum_{k \neq j} \mathbf{A}_{jk} \mathbf{P}_k, \tag{3.8}$$

$$\mathbf{A}_{jk} = \frac{\exp(ikr_{jk})}{r_{jk}} \times \left[k^2 (\hat{r}_{jk}\hat{r}_{jk} - \mathbf{1}_3) + \frac{ikr_{jk} - 1}{r_{jk}^2} (3\hat{r}_{jk}\hat{r}_{jk} - \mathbf{1}_3) \right], \; j \neq k, \tag{3.9}$$

gdzie $\mathbf{1}_3$ jest macierzą jednostkową w wymiarach 3×3, $r_{jk} \equiv \left| \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k \right|$ to odległość między dipolami, natomiast $\hat{r}_{jk} \equiv (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k) / \hat{r}_{jk}$ jest wektorem kierunkowym. Przy założeniu, że $\mathbf{A}_{jj} \equiv \alpha_j^{-1}$, problem rozpraszania redukuje się do poszukiwania momentów dipolowych $\mathbf{P}_j$, które spełniają układ $3N$ liniowych równań zespolonych w postaci:

$$\sum_{k=1}^{N} \mathbf{A}_{jk} \mathbf{P}_k = \mathbf{E}_{inc,j}. \tag{3.10}$$

W pracach zespołu Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej zbadano wpływ połączeń międzycząstkowych dwóch cząstek dwutlenku tytanu o promieniu $r_p = 25$ nm, znajdujących się w kontakcie punktowym $(Y = 0)$ oraz z połączeniem cylindrycznym ($Y = 1$), na właściwości optyczne. Zastosowano do tego celu kod ADDA[74], implementujący metodę aproksymacji dyskretnymi dipolami. Analizowane geometrie przedstawiono na Rys. 3.4. Symulacje wykazały, że diagramy światła rozproszonego są podobne, co wynika z podobnej wielkości liniowej tych cząsteczek. Rodzaj połączenia międzycząsteczkowego wpływa jednak na wartość ekstynkcji, która dla omawianych przypadków jest różna o około 10%.



Rys. 3.4. Geometrie wykorzystane przy badaniu wpływu połączeń międzycząstkowych na diagramy światła rozproszonego

4. Podsumowanie

Piękno naukowej przygody polega na tym,
że nigdy nie zabraknie dalszych znaków zapytania.

(M. Heller)

Każda próba zrozumienia otaczającej nas rzeczywistości rodzi nowe pytania i refleksje. Jest to największa wartość, a zarazem i urok poznania naukowego. Odkrywanie naukowe, mające swój wyraz w ciekawości, przekształcającej się w tworzenie strukturalnych modeli rzeczywistości i ich empirycznych potwierdzeń, stanowi przedziwną symbiozę, ontologiczną harmonię człowieka i natury. Na szczęście granice nauki leżą poza horyzontem naszych wyobrażeń, a „to co my wiemy, to tylko kropelka. Czego nie wiemy, to cały ocean"[‡].

W retrospekcji własnej naukowej aktywności stwierdzam, że każdy kto poświęcił się pracy naukowej, odkrywa swoją podmiotowość. Rozumienie jest nobilitacją, która nie byłaby możliwa bez pięknej obecności mistrzów w naszym życiu. Relacja mistrz-uczeń powinna zaś opierać się na wzajemnej otwartości, empatii i sympatii, szacunku, entuzjazmowi w dążeniu do wspólnego celu, chęci pomocy i współpracy i to nie tylko na naukowym polu.

Żywię głęboką nadzieję, że przedstawione w niniejszym opracowaniu „akcenty" naukowe staną się podstawą dalszych, nowych idei i działań naukowych w zakresie mikro- i nanotechnologii agregatów cząsteczek. Rozwój w tym zakresie stanowi bez wątpienia o jakości produkcji przemysłowej, a ta zaś jest kluczowym elementem rywalizacji na międzynarodowej arenie.

[‡] Newton [w:] „Przekrój", wyd. 36–42, Krakowskie Wydawnictwo Prasowe, 2004, s. 57.

Literatura

[1] **MROCZKA J.**, *Metrologia – nowe wyzwania*. In: J. MROCZKA (Ed.), *Metrologia wczoraj, dziś, jutro*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (1997).

[2] **MROCZKA J.**, *The cognitive process in metrology*, Measurement, 46**,** 2896-2907 (2013).

[3] **MROCZKA J.**, *Turbidimetric methods in particle sizing*. Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO). Beijing, China (1991).

[4] **MROCZKA J.**, *Integral transform technique in particle sizing*. Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO). Beijing, China (1991).

[5] **MROCZKA J.**, *Method of Moments in Light Scattering Data Inversion in the Particle Size Distribution*, Optics Communications, 99**,** 147–151 (1993).

[6] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements*, Metrology and Measurement Systems, 16**,** 333–357 (2009).

[7] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements*, Applied Optics, 49**,** 4591–4603 (2010).

[8] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Simulation research on improved regularized solution of inverse problem in spectral extinction measurements*, Applied Optics, 51**,** 1715–1723 (2012).

[9] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Improved technique of retrieving particle size distribution from angular scattering measurements*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 129**,** 48–59 (2013).

[10] ONOFRI, F., KRZYSIEK, M., BARBOSA, S., MESSAGER, V., REN, K. F. & **MROCZKA, J.** Near-critical-angle scattering for the characterization of clouds of bubbles: particular effects. *Applied Optics,* 50**,** 5759-5769 (2011).

[11] ONOFRI F., KRZYSIEK M. & **MROCZKA J.**, *Critical angle refractometry and sizing of bubble clouds*, Optics Letters, 32**,** 2070–2072 (2007).

[12] ONOFRI F., KRZYSIEK M., **MROCZKA J.**, REN K.F., RADEV S. & BONNET J.-P., *Optical characterization of bubbly flows with a near-critical-angle scattering technique*, Experiments in Fluids, 47**,** 721–732 (2009).

[13] CZERWIŃSKI M., **MROCZKA J.**, GIRASOLE T., GOUESBET G. & GRÉHAN G., *Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions*. Pt. 1. *Direct problem: hybrid-method approximation*, Applied Optics, 40, 1514–1524 (2001).

[14] CZERWIŃSKI M., **MROCZKA J.**, GIRASOLE T., GOUESBET G. & GRÉHAN G., *Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions*. Pt. 2. *Inverse problem: particle size determination*, Applied Optics, 40**,** 1525–1531 (2001).

[15] GUSZKOWSKI T. & **MROCZKA J.,** *Metoda inwersyjna wykorzystująca sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej*. Metrologia wspomagana komputerowo. MWK ’2003. VI Szkoła – konferencja. Instytut Podstaw Elektroniki Wydział Elektroniki WAT, Waplewo (2003).

[16] ONOFRI F., BARBOSA S., WOŹNIAK M., **MROCZKA J.**, VREL D. & GRISOLIA C., *In Situ Characterization of Dust Mobilized by Laser Cleaning Methods and Loss of Vacuum Accidents*, Fusion Science and Technology, 62, 39–45 (2012).

[17] GIRASOLE T., BULTYNCK H., GOUESBET G., GRÉHAN G., LE MEUR F., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, REN K.F., ROZE C. & WYSOCZAŃSKI D., *Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering*. Part 1. *Numerical aspects*, Particle & Particle Systems Characterization, 14**,** 163–174 (1997).

[18] GIRASOLE T., GOUESBET G., GRÉHAN G., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, REN K.F. & WYSOCZAŃSKI D., *Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering*. Part 2. *Experimental aspects*, Particle & Particle Systems Characterization, 14**,** 211–218 (1997).

[19] GIRASOLE T., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.** & WYSOCZAŃSKI D., *Fiber orientation and concentration analysis by light scattering: experimental setup and diagnosis*, Review of Scientific Instruments, 68, 2805–2811 (1997).
[20] **MROCZKA J.**, WYSOCZAŃSKI D. & ONOFRI F., *Optical parameters and scattering properties of red blood cells*, Optica Applicata, 32, 691–700 (2002).
[21] SKORUPSKI K. & **MROCZKA J.**, *Effect of the necking phenomenon on the optical properties of soot particles*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 141, 40–48 (2014).
[22] SKORUPSKI K., **MROCZKA J.**, RIEFLER N., OLTMANN H., WILL S. & WRIEDT T., *Impact of morphological parameters onto simulated light scattering patterns*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 119, 53–66 (2013).
[23] WOŹNIAK M., ONOFRI F., BARBOSA S., YON J. & **MROCZKA J.**, *Comparison of methods to derive morphological parameters of multi-fractal samples of particle aggregates from TEM images*, Journal of Aerosol Science, 47**,** 12–26 (2012).
[24] SKORUPSKI K., HELLMERS J., FENG W., **MROCZKA J.**, WRIEDT T. & MÄDLER L., *Influence of sintering necks on the spectral behaviour of ITO clusters using the Discrete Dipole Approximation*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 159**,** 11–18 (2015).
[25] WOJTASZEK T. & **MROCZKA J.**, *Light scattering simulations of spheroids using three beams phase Doppler system*, XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development. Rio de Janeiro, Brazil (2006).
[26] ŚWIRNIAK G., GŁOMB G. & **MROCZKA J.**, *Inverse analysis of the rainbow for the case of low-coherent incident light to determine the diameter of a glass fiber*, Applied Optics, 53, 4239–4247 (2014).
[27] ŚWIRNIAK G., GŁOMB G. & **MROCZKA J.**, *Inverse analysis of light scattered at a small angle for characterization of a transparent dielectric fiber*, Applied Optics, 53**,** 7103–7111 (2014).
[28] ŚWIRNIAK G. & **MROCZKA J.,** *Approximate solution for optical measurements of the diameter and refractive index of a small and transparent fiber*, Journal of the Optical Society of America A, 33, 667–676 (2016).
[29] ŚWIRNIAK G. & **MROCZKA J.,** *Numerical analysis of primary rainbows from a homogeneous cylinder and an optical fiber for incident low-coherent light*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 195, 176–188 (2017).
[30] **MROCZKA J.,** *Temperature stabilisation of light-emitting diode radiation*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 21, 306–309 (1988).
[31] **MROCZKA J.** & PAROL M., *Methods of temperature stabilization of light-emitting diode radiation*, Review of Scientific Instruments, 65, 803–806 (1994).
[32] MANDELBROT B., *Les objets fractals: forme, hasard et dimension*, Flammarion, Paris (1975).
[33] MANDELBROT B., *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman and Company, New York (1982).
[34] FALCONER K., *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*, John Wiley & Sons, Chichester (2005).
[35] SHISHIKURA M., *The Hausdorff dimension of the boundary of the Mandelbrot set and Julia sets*, Annals of Mathematics, 147**,** 225-267 (1998).
[36] MANDELBROT B., *How long is the coast of britain? Statistical self-similarity and fractional dimension*, Science, 156, 636–638 (1967).
[37] LIN M.Y., LINDSAY H.M., WEITZ D.A., BALL R.C., KLEIN R. & MEAKIN P., *Universality of fractal aggregates as probed by light scattering*, Proceedings of the Royal Society of London Series A, 423**,** 71–87 (1989).
[38] WEITZ D.A. & OLIVERIA M., *Fractal structures formed by kinetic aggregation of aqueous gold colloids*, Physical Review Letters, 52**,** 1433–1436 (1984).

[39] SORENSEN C.M., *Light Scattering by Fractal Aggregates: A Review*, Aerosol Science and Technology, 35, 648–687 (2010).
[40] CHAKRABARTY R.K., GARRO M.A., GARRO B.A., CHANCELLOR S., MOOSMÜLLER H. & HERALD C.M., *Simulation of Aggregates with Point-Contacting Monomers in the Cluster-Dilute Regime*. Part 1. *Determining the Most Reliable Technique for Obtaining Three-Dimensional Fractal Dimension from Two-Dimensional Images*, Aerosol Science and Technology, 45– 75–80 (2011).
[41] BRASIL A.M., FARIAS T.L. & CARVALHO M.G., *A Recipe for Image Characterization of Fractal-Like Aggregates*, Journal of Aerosol Science, 30, 1379–1389 (1999).
[42] KOEYLUE U., XING Y. & ROSNER D.E., *Fractal Morphology Analysis of Combustion-Generated Aggregates Using Angular Light Scattering and Electron Microscope Images*, Langmuir, 11**,** 4848–4854 (1995).
[43] LIU L. & MISHCHENKO M.I., *Effects of aggregation on scattering and radiative properties of soot aerosols*, Journal of Geophysical Research, 110 (2005).
[44] **MROCZKA J.**, WOŹNIAK M. & ONOFRI F., *Algorithms and Methods for Analysis of the Optical Structure Factor of Fractal Aggregates*, Metrology and Measurement Systems, 19, 459–470 (2012).
[45] OH C. & SORENSEN C.M., *The Effect of Overlap between Monomers on the Determination of Fractal Cluster Morphology*, Journal of Colloid and Interface Science, 193, 17–25 (1997).
[46] FILIPPOV A.V., ZURITA M. & ROSNER D.E., *Fractal-like Aggregates: Relation between Morphology and Physical Properties*, Journal of Colloid and Interface Science, 229**,** 261–273 (2000).
[47] FILIPPOV A.V., *Drag and Torque on Clusters of N Arbitrary Spheres at Low Reynolds Number*, Journal of Colloid and Interface Science, 229, 184–195 (2000).
[48] TOLMAN S. & MEAKIN P., *Off-lattice and hypercubic-lattice models for diffusion-limited aggregation in dimensionalities 2-8*, Physical Review A, 40, 428–437 (1989).
[49] CAI J., LU N. & SORENSEN C.M., *Analysis of Fractal Cluster Morphology Parameters: Structural Coefficient and Density Autocorrelation Function Cutoff*, Journal of Colloid and Interface Science, 171, 470–473 (1995).
[50] ADACHI K., CHUNG S.H., FRIEDRICH H. & BUSECK P.R., *Fractal parameters of individual soot particles determined using electron tomography: implications for optical properties*, Journal of geophysical research, 112 (2007).
[51] MACKOWSKI D.W. & MISHCHENKO M.I., *A multiple sphere T-Matrix Fortran code for use on parallel computer clusters*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 112, 2182–2192 (2011).
[52] PENTTILÄ A., ZUBKO E., LUMME K., MUINONEN K., YURKIN M.A., DRAINE B., RAHOLA J., HOEKSTRA A.G. & SHKURATOV Y., *Comparison between discrete dipole implementations and exact techniques*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 106**,** 417–436 (2007).
[53] YURKIN, M. A. & HOEKSTRA, A. G. The discrete dipole approximation: an overview and recent developments. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer,* 106**,** 558-589 (2007).
[54] KÄTZEL U., BEDRICH R., STINTZ M., STINTZ M., KETZMERICK R., GOTTSCHALK-GAUDIG T. & BARTHEL H., *Dynamic Light Scattering for the Characterization of Polydisperse Fractal Systems*. I. *Simulation of the Diffusional Behavior*, Particle & Particle Systems Characterization, 25**,** 9–18 (2008).
[55] BRASIL A.M., FARIAS T.L., CARVALHO M.G. & KOYLU U.O., *Numerical characterization of the morphology of aggregated particles*, Journal of Aerosol Science, 32, 489–508 (2001).
[56] MEAKIN P., *A Historical Introduction to Computer Models for Fractal Aggregates*, Journal of Sol-Gel Science and Technology, 15, 97–117 (1999).
[57] EDEN M., *A Two-dimensional Growth Process*, Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 4, 223–239 (1961).
[58] WITTEN T.A., Jr. & SANDER L.M., *Diffusion-Limited Aggregation, a Kinetic Critical Phenomenon*, Physical Review Letters, 47, 1400–1403 (1981).

[59] JULLIEN R. & KOLB M., *Hierarchical model for chemically limited cluster-cluster aggregation*, Journal of Physics A: Mathematical and General, 17, 639–643 (1984).

[60] BAHADUR J., MAZUMDER S., SEN D. & RAMANATHAN S., *Evolution of a fractal system with conserved order parameter under thermal annealing*, Journal of Physics: Condensed Matter, 22 (2010).

[61] HELLMERS J., RIEFLER N., WRIEDT T. & EREMIN Y., *Light scattering simulation for the characterization of sintered silver nanoparticles*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 109**,** 1363–1373 (2008).

[62] ADACHI K., CHUNG S.H. & BUSECK P.R., *Shapes of soot aerosol particles and implications for their effects on climate*, Journal of Geophysical Research, 115 (2010).

[63] SHIMOSAKA A., UEDA Y., SHIRAKAWA Y. & HIDAKA J., *Sintering Mechanism of Two Spheres Forming a Homogeneous Solid Solubility Neck*, KONA Powder and Particle Journal, 21, 219–233 (2003).

[64] EREMINA E., HELLMERS J., EREMIN Y. & WRIEDT T., *Different shape models for erythrocyte: Light scattering analysis based on the discrete sources method*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 102**,** 3-10 (2006).

[65] EREMINA E., EREMIN Y. & WRIEDT T., *Analysis of light scattering by erythrocyte based on discrete sources method*, Optics Communications, 244, 15–23 (2005).

[66] OLTMANN H., REIMANN J. & WILL S., *Single-shot measurement of soot aggregate sizes by wide-angle light scattering (WALS)*, Applied Physics B, 106, 171–183 (2012).

[67] KANG M.-Z., ZENG Y.-J. & LIU J.-G., *Fractal research on red blood cell aggregation*, Clinical Hemorheology and Microcirculation, 22, 229–236 (2000).

[68] LIU L. & MISHCHENKO M.I., *Scattering and radiative properties of complex soot and soot-containing aggregate particles*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 106**,** 262–273 (2007).

[69] SKORUPSKI K., *Optical properties of TiO_2:Ag composites*. Proc. SPIE 9125, Metamaterials IX, 9125, 91251J-1 (2014).

[70] VAN POPPEL L.H., FRIEDRICH H., SPINSBY J., CHUNG S.H., SEINFELD J.H. & BUSECK P.R., *Electron tomography of nanoparticle clusters: Implications for atmospheric lifetimes and radiative forcing of soot*, Geophysical Research Letters, 32, L24811 (2005).

[71] BUSHELL C., YAN Y.D., WOODFIELD D., RAPER J. & AMAL R., *On techniques for the measurement of the mass fractal dimension of aggregates*, Advances in Colloid and Interface Science, 95, 1–50 (2002).

[72] PURCELL E.M. & PENNYPACKER C.R., *Scattering and Absorption of Light by Nonspherical Dielectric Grains*, Astrophysical Journal, 186, 705–714 (1973).

[73] DRAINE B.T. & FLATAU P.J., *Discrete-Dipole Approximation For Scattering Calculations*, Journal of the Optical Society of America A, 11, 1491–1499 (1994).

[74] YURKIN M.A. & HOEKSTRA A.G., *The discrete-dipole-approximation code ADDA: Capabilities and known limitations*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 112, 2234–2247 (2011).

Matematyczne uwarunkowania problemu odwrotnego w pośrednich pomiarach rozkładu wielkości cząstek układów dyspersyjnych

Spis treści

Wprowadzenie

1. Pomiary pośrednie wielkości fizycznych

1.1. Zagadnienie wprost i odwrotne

1.2. Równanie całkowe Fredholma

2. Zarys analizy wielkości cząstek układów dyspersyjnych

2.1. Rozpraszanie światła w układach dyspersyjnych

2.2. Opis cząsteczek fazy zdyspergowanej

2.3. Metody pomiarowe

2.4. Modele matematyczne pomiarów nefelometrycznych i turbidymetrycznych

3. Zagadnienie odwrotne w analizie optycznej wielkości cząstek układów dyspersyjnych

3.1. Niewłaściwe postawienie zagadnienia odwrotnego

3.2. Słabe uwarunkowanie zagadnienia odwrotnego

4. Numeryczne metody rozwiązywania zagadnienia odwrotnego w analizie optycznej wielkości cząstek układów dyspersyjnych

4.1. Dyskretyzacja zagadnienia odwrotnego

4.2. Rozwiązanie NK z minimalną normą zagadnienia odwrotnego w dyskretnej postaci

4.3. Słabe uwarunkowanie zagadnienia odwrotnego w dyskretnej postaci

4.4. Regularyzacja zagadnienia odwrotnego w dyskretnej postaci

4.4.1. Regularyzacja Tichonowa

4.4.2. Regularyzacja Tichonowa z ograniczeniami

4.4.3. Obcięty rozkład na wartości osobliwe

4.4.4. Dobór parametru regularyzacji

- *Zasada rozbieżności*

- *Kryterium krzywej L*
- *Uogólniona walidacja wzajemna*

4.5. Nieliniowe iteracyjne metody inwersyjne

4.5.1. Metoda Twomey'a

4.5.2. Metoda Twomey'a–Markowskiego

4.6. Bayesowska metoda rozwiązania zagadnienia odwrotnego w postaci dyskretnej wykorzystująca procedurę Monte-Carlo

5. Podsumowanie

Literatura

Wprowadzenie

Najpiękniejszą rzeczą, jakiej możemy doświadczyć jest oczarowanie tajemnicą. Jest to uczucie, które stoi u kolebki prawdziwej sztuki i prawdziwej nauki. Ten, kto go nie zna i nie potrafi się dziwić, nie potrafi doznawać zachwytu, jest martwy, niczym zdmuchnięta świeczka.

(Albert Einstein)

Kierując się moją osobistą pasją naukową i praktycznymi doświadczeniami, postanowiłem poświęcić karty niniejszego opracowania wybranym matematycznych i fizycznych aspektom metody posługującej się światłem rozproszonym w nieinwazyjnych badaniach wielkości cząstek układów dyspersyjnych. Układy dyspersyjne to dwu- lub wielofazowe substancje złożone z fazy ciągłej, zwanej fazą rozpraszającą lub ośrodkiem dyspersyjnym, i zawieszonych w niej drobnych cząstek stanowiących fazę rozproszoną, zwaną też fazą zdyspergowaną[1-3]. Układy dyspersyjne są bardzo powszechne w przyrodzie. Są to np. wody naturalne z zawieszonym w nich planktonem oraz cząstkami nieorganicznymi, krew i kolonie bakteryjne, unoszące się w powietrzu pyły, dymy i mgły, masa perłowa oraz minerały. Układami dyspersyjnymi są również liczne produkty przemysłowe – od artykułów spożywczych takich, jak mleko i majonez poprzez leki i kosmetyki w postaci past, kremów, żeli i pianek po materiały budowlane takie, jak beton, farby emulsyjne i pianki, a także niektóre materiały kompozytowe. Analiza wielkości cząstek fazy zdyspergowanej ma ogromne znaczenie praktyczne, zaś jakościowa oraz ilościowa analiza cząsteczek fazy zdyspergowanej może być dokonywana przy wykorzystaniu światła jako narzędzia poznawczego, które umożliwia realizację pomiaru nieinwazyjnego w czasie rzeczywistym, z potencjalnie dużą czułością i selektywnością.

Nie zamierzam streszczać ogromnej już dziedziny jaką jest metrologia układów dyspersyjnych, w którą wpisuje się analiza agregatów cząstek, byłaby to śmieszna ambicja. Moją intencją jest przede wszystkim ukazanie roli matematyczno-empirycznej metody w tej dziedzinie. W tym celu pragnę przedyskutować modele matematyczne pomiarów nefelometrycznych i turbidymetrycznych, złe postawienie i słabe uwarunkowanie zagadnienia odwrotnego w analizie wielkości cząstek układów dyspersyjnych w oparciu o pomiary nefelometryczne i turbidymetryczne oraz przedyskutować numeryczne

metody rozwiązywania tego problemu wykorzystujące różne formy wiedzy apriorycznej o rozwiązaniu.

Moje dotychczasowe doświadczenia w zakresie optycznej i nieinwazyjnej charakterystyki obiektów złożonych obejmują m.in.: problematykę pomiarów wielkości cząstek ośrodków dyspersyjnych metodami optycznymi[4, 5, 2, 6-8, 3, 9-11], w tym hybrydowe metody w opisie transmitancji światła w warunkach rozproszenia wielokrotnego dla monodyspersyjnego rozkładu wielkości cząstek[12, 13], metody inwersyjne wykorzystujące sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej[14] oraz w spektroskopii absorpcyjnej[15], wykorzystanie spektralnych i polaryzacyjnych właściwości laserowego promieniowania rozproszonego w nieinwazyjnym badaniu materiałów kompozytowych[16-18], nieinwazyjną diagnostykę parametrów optycznych i właściwości rozproszeniowych pełnej krwi i erytrocytów[19], modelowanie matematyczne rozproszenia światła przez cząstki niesferyczne i ich agregaty[20-23], modelowanie matematyczne trójwiązkowej anemometrii dopplerowskiej w określaniu położenia i prędkości cząstek w ośrodkach wielofazowych[24], nieinwazyjny pomiar *in situ* średnicy homogenicznych i niehomogenicznych, przezroczystych włókien wykorzystywanych m.in. w materiałach kompozytowych i jako światłowody telekomunikacyjne i pomiarowe[25-29], a także praktyczne aspekty wykorzystania światła o niskiej spójności czasowej jako narzędzia w pomiarach[30, 31].

1. Pomiary pośrednie wielkości fizycznych

Często mówię, że gdy potrafisz zmierzyć to, o czym mówisz
i wyrazić to liczbowo, wiesz coś o tym;
ale gdy nie możesz tego zmierzyć, gdy nie możesz wyrazić tego liczbowo,
twoja wiedza jest skromna i niezadowalająca (...).

(Lord Kelvin)

Pomiar jest empirycznym procesem poznawczym, pozwalającym na obiektywne odwzorowanie wielkości fizycznych charakteryzujących obiekt pomiaru w dziedzinę liczb[32]. Pomiar polega na porównaniu wielkości mierzonej ze wzorcem. W *pomiarach bezpośrednich* wielkość porównywana i wzorcowa są tego samego rodzaju, a wynik pomiaru podawany jest w jednostkach wielkości mierzonej[32].

Proces pomiarowy można zapisać za pomocą formalizmu matematycznego następująco:

$$y = f_0(y_0, \mathbf{w}, \mathbf{z}), \tag{1.1}$$

gdzie y oznacza wynik pomiaru, f_0 jest prawdziwym przetwarzaniem realizowanym przez przyrząd, y_0 to wartość prawdziwa wielkości mierzonej oddziałującej na wejście miernika, a $\mathbf{w}$ i $\mathbf{z}$ są wektorami wielkości wpływających kontrolowanych i zakłócających. Ponieważ rzeczywiste odwzorowanie f_0 (tak jak i wartość prawdziwa y_0) nie jest znane, producent przypisuje działaniu przyrządu pewien model matematyczny f_m i zgodnie z nim dokonuje procesu wzorcowania[32]. Najczęściej stosowane jest odwzorowanie tożsamościowe, tj. $\boldsymbol{f_m}(\xi) = \xi$.

Dodatkowe znaczenie modeli matematycznych uwidacznia się podczas *pomiarów pośrednich*. Bezpośrednie pomiary wielu procesów zachodzących wewnątrz złożonych obiektów naturalnych są niemożliwe. Powodem może być brak odpowiednich elementów pomiarowych (zwłaszcza czujników), fizyczna niemożność umieszczenia elementów systemu pomiarowego w odpowiednich miejscach obiektu, bądź też uwarunkowania etyczne takich pomiarów. W opisanej sytuacji nieodzowne staje się stosowanie nowoczesnej mikroprocesorowej aparatury elektronicznej, która za pośrednictwem wyspecjalizowanych czujników rejestruje dostępne sygnały fizyczne, przetwarza je na postać cyfrową, a następnie, zgodnie z zaimplementowanymi algorytmami numerycznymi, przelicza na wartości poszukiwanych wielkości.

Pomiary pośrednie polegają zatem na wykorzystaniu związku pomiędzy wielkościami niedostępnymi i tymi, które mogą być mierzone bezpośrednio, dokonaniu pomiaru wielkości dostępnych i obliczeniu wartości wielkości analizowanych. Obliczenia wykonywane są zgodnie z modelem matematycznym h_m związku pomiędzy wielkościami mierzonymi bezpośrednio, $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \ldots, y_n]$, a wielkością poszukiwaną θ:

$$\theta = h_m(\mathbf{y}). \tag{1.2}$$

Najczęściej jest to model matematyczny badanego obiektu lub jego części składowej. Szczególnym przypadkiem są takie pomiary, w których wynikiem obliczeń nie jest jedna liczba, lecz cały szereg wartości. Nazywane są one *pomiarami pośrednimi złożonymi*[32]. W takim przypadku stosowane są odpowiednio opracowane algorytmy numeryczne, omówione w dalszych częściach opracowania.

1.1. Zagadnienie wprost i odwrotne

Istotą interpretacji wyników pomiarów jest założenie związku przyczynowo-skutkowego między stanem badanego obiektu a wskazaniami miernika. Tylko wtedy uzyskiwana w wyniku tego procesu liczba (lub liczby) może być traktowana jako źródło wiarygodnej informacji o obiekcie. Zatem rola nawet najprostszych przyrządów pomiarowych polega na wytworzeniu takiego związku i zapewnieniu jego jednoznaczności.

Zaobserwowany lub wytworzony związek przyczynowo-skutkowy, jak to ma miejsce w przypadku urządzeń pomiarowych, stanowi ważny element wnioskowania w nauce, a tym samym w metrologii. Wnioskowanie ilościowe wymaga zastosowania sformalizowanego opisu tej relacji – stanowią go równania matematyczne. Równania tworzą strukturę modelu matematycznego wyrażającego związek między pobudzeniem (przyczyną) i reakcją (skutkiem). Pobudzenie u traktowane jest jako wejście modelu, a reakcja y_m jako jego wyjście. Wtedy model matematyczny obiektu SISO może być przedstawiony następująco:

$$y_m = f_m(u, \boldsymbol{\theta}) \quad \text{lub} \quad y_m = g_m(u, \boldsymbol{\theta}), \tag{1.3}$$

gdzie f_m jest modelem toru przetwarzania przyrządu pomiarowego, zaś g_m to model badanego obiektu o wartościach parametrów $\boldsymbol{\theta}$.

Modele matematyczne stosowane w procesie poznawczym w metrologii można podzielić na fizykomatematyczne modele przyczynowe i modele odwrotne. Podczas opracowywania modelu przyczynowego (*forward model*) analizuje się strukturę obiektu i identyfikuje zachodzące w nim zjawiska. Pozwala to na zaproponowanie równań

matematycznych ujmujących jakościowo i ilościowo zaobserwowane związki przyczynowo-skutkowe. Kompleksowe modele przyczynowe obiektów złożonych cechują się zazwyczaj dużym poziomem skomplikowania (uwidaczniającym się w dużej ilości równań i parametrów) i stosowane są przede wszystkim w celu przewidywania zachowań obiektu w określonych warunkach, jak i w analizie zjawisk zachodzących w nim samym (*badania symulacyjne*). Znajdują też zastosowanie jako narzędzie pomocnicze podczas opracowywania modeli odwrotnych. Model odwrotny (*inverse model*) strukturalnie jest o wiele prostszy i umożliwia ilościowe wyznaczanie przyczyn obserwowanych zjawisk na podstawie zarejestrowanych skutków. Z tego powodu stosowany jest przede wszystkim w pośrednich pomiarach właściwości badanych obiektów, jak i w procesie rekonstrukcji sygnałów pomiarowych.

W metrologii o wiele większe znaczenie niż rozwiązywanie zadania wprost ma proces odwrotny, czyli wnioskowanie o przyczynach na podstawie skutków. Proces ten zwany *zadaniem odwrotnym* (*inverse problem*) może przyjmować mniej lub bardziej formalną formę. W tym kontekście warto zauważyć, że wszelkie pomiary nieodłącznie związane są z rozwiązywaniem zadania odwrotnego, gdyż odczyt z miernika (powiązany z wartością wejściową funkcją przetwarzania nośnika informacji) jest podstawą wnioskowania o stanie wielkości mierzonej. Zasadniczo jednak zadanie odwrotne polega na ilościowym wyznaczeniu przyczyn, gdy znane są skutki (y_m) i struktura modelu obiektu (f_m lub g_m). Stąd powyższy termin obejmuje w metrologii dwa różne zagadnienia: rekonstrukcję sygnałów i estymację parametrów.

Zadaniem *rekonstrukcji* jest odtworzenie sygnału wejściowego u na podstawie sygnału wyjściowego y_m i pełnego modelu związku przyczynowo-skutkowego (tj. struktury f_m i wartości parametrów $\boldsymbol{\theta}$). Wymaga to dokonania przekształcenia odwrotnego modelu względem pobudzenia:

$$u = f_m^{-1}\left(y_m, \boldsymbol{\theta}\right). \tag{1.4}$$

W technice pomiarowej zadanie to rozwiązywane jest najczęściej w celu rekonstrukcji sygnału pomiarowego podanego na wejście miernika mikroprocesorowego na podstawie odpowiadających mu próbek zgromadzonych w pamięci urządzenia. Wtedy f_m jest modelem matematycznym toru przetwarzania, a zadanie rekonstrukcji przyjmuje charakter dyskretny.

Drugi rodzaj zadania odwrotnego to *estymacja* parametrów modelu (zwana też identyfikacją parametryczną) polegająca na wyznaczaniu ich wartości w sytuacji, gdy znane jest pobudzenie u, odpowiedź y_m oraz struktura matematyczna g_m. Ponownie wymagane jest dokonanie przekształcenia odwrotnego modelu, tym razem względem $\boldsymbol{\theta}$:

$$\boldsymbol{\theta} = g_m^{-1}\left(u, y_m\right). \tag{1.5}$$

W metrologii estymacja parametrów jest równoznaczna z pośrednimi pomiarami złożonymi: g_m jest fizykomatematycznym modelem badanego obiektu, u zarejestrowanym pobudzeniem a y_m to tzw. „surowe" dane pomiarowe uzyskiwane zazwyczaj w pomiarach bezpośrednich. Wektor parametrów $\boldsymbol{\theta}$ reprezentuje mierzone wielkości fizyczne charakteryzujące obiekt pomiaru.

1.2. Równanie całkowe Fredholma

Obszerną klasę problemów odwrotnych w analizie właściwości układów dyspersyjnych stanowią zagadnienia, w których struktura modelu obiektu może być wyrażona za pomocą liniowego równania całkowego Fredholma pierwszego rodzaju[33, 34]:

$$g_m = \int_{\Omega} K(y,a)\, f(a)\, da, \tag{1.6}$$

gdzie $f(a)$ to poszukiwana funkcja rozkładu wielkości cząstek fazy zdyspergowanej, $K(y,a)$ to jądro całkowe, zaś Ω to obszar całkowania w przestrzeni $\mathbb{R}^N$, przy czym punkt $y \in \Omega$. Rozwiązanie równania (1.6) jest złożonym problemem. W szczególności, zagadnienie odwrotne dla (1.6) przy przyjęciu określonych warunków granicznych jest z natury źle postawione i słabo uwarunkowane[35, 34].

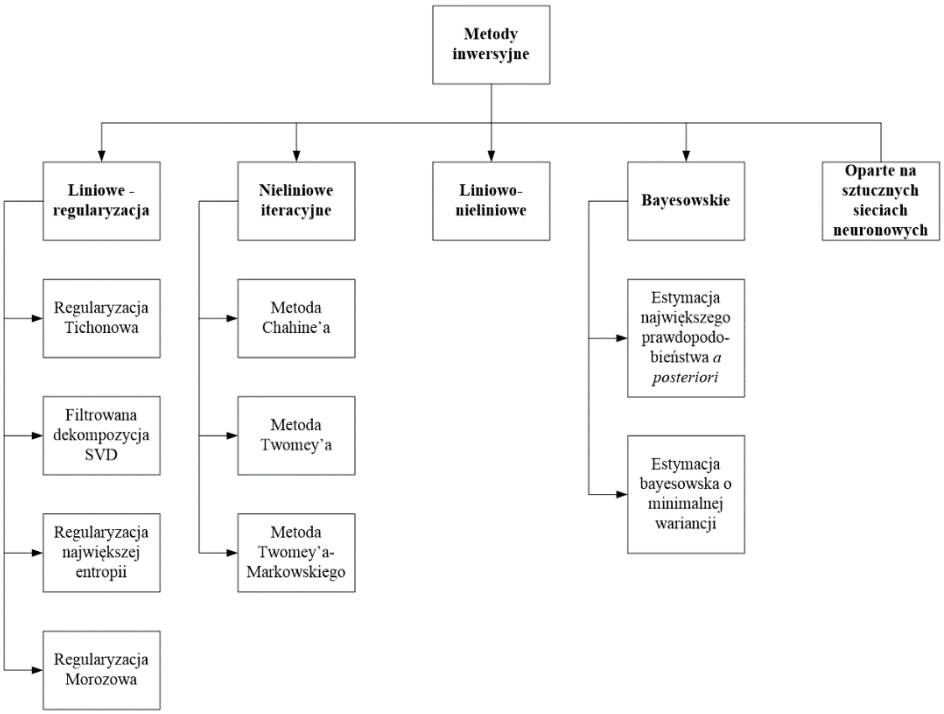
Analityczne rozwiązania równania całkowego Fredholma pierwszego rodzaju znalezione zostały tylko dla nielicznych szczególnych postaci funkcji jądra całkowego $K(y,a)$[1], dlatego zagadnienie odwrotne rozwiązuje się typowo z zastosowaniem metod numerycznych. W tym celu równanie (1.6) poddaje się dyskretyzacji, której rezultatem jest układ algebraicznych równań liniowych. W następstwie złego postawienia i słabego uwarunkowania (1.6), otrzymywany układ równań wykazuje bardzo słabe uwarunkowanie numeryczne[33, 34, 36, 1].

Dotychczas opracowano wiele numerycznych technik rozwiązywania problemów odwrotnych wyrażonych równaniem całkowym Fredholma pierwszego rodzaju. Każda z tych metod zwanych algorytmami lub procedurami inwersyjnymi wykorzystuje określoną formę wiedzy apriorycznej o poszukiwanym rozwiązaniu w celu minimalizacji efektów słabego uwarunkowania zagadnienia. Ogólną klasyfikację metod inwersyjnych prezentuje Rys. 1.1 [33, 34, 36].

Metody liniowe poszukują najlepszej aproksymacji operatora odwrotnego do operatora odwzorowującego dyskretną reprezentację funkcji $f(a)$ w dyskretną reprezen-

tację funkcji g_m. Techniki te znajdują uzasadnienie teoretyczne na gruncie analizy funkcjonalnej i algebry liniowej. Są one reprezentowane przez różne odmiany regularyzacji[32, 33, 35].

Iteracyjne metody nieliniowe znajdują rozwiązanie w toku iteracyjnych poprawek założonego *a priori* rozwiązania początkowego. Korekty te mają charakter nieliniowy. Ich kierunek i wielkość dobierana jest w taki sposób, aby rozwiązania uzyskiwane w kolejnych iteracjach wykazywały coraz lepszą zgodność z danymi pomiarowymi. Dzięki temu proces poprawek jest zbieżny do prawdziwego rozwiązania problemu[36].



Rys. 1.1. Ogólna klasyfikacja metod inwersyjnych wraz z przykładami technik należących do poszczególnych grup

W rozwiązywaniu zagadnienia odwrotnego stosuje się również sztuczne sieci neuronowe. Sieć uczona jest (poprzez korekcję współczynników wagowych) odwzorowania dyskretnej reprezentacji funkcji $f(a)$ w dyskretną reprezentację funkcji g_m, czyli modelu pomiarów (1.6). Nauczona sieć funkcjonuje jak model odwrotny, tzn. po podaniu na jej wejście dyskretnej reprezentacji funkcji g_m, na jej wyjściu otrzymuje się dyskretną reprezentację funkcji $f(a)$ [37].

Osobną grupę metod inwersyjnych stanowią techniki bayesowskie. W odróżnieniu od wcześniej omówionych procedur nie dokonuje się tu jawnego rozwiązywania zagadnienia odwrotnego. W metodach tych zakłada się pewien rozkład prawdopodobieństwa *a priori* rozwiązania, odzwierciedlający niepewność wiedzy apriorycznej o rozwiązaniu. Następnie rzeczywiste dane pomiarowe wykorzystuje się do skorygowania wiedzy apriorycznej o rozwiązaniu. Odbywa się to poprzez wyznaczenie w oparciu o twierdzenie Bayesa warunkowego rozkładu prawdopodobieństwa rozwiązania pod warunkiem, że w rezultacie pomiarów uzyskane zostały określone dane pomiarowe. Ten wynikowy rozkład prawdopodobieństwa rozwiązania, zwany rozkładem *a posteriori*, stanowi probabilistyczną informację o rozwiązaniu. Na jego podstawie możliwe jest wyznaczenie różnych estymatorów rozwiązania[36]. Estymator największego prawdopodobieństwa *a posteriori* oznacza rozwiązanie najbardziej prawdopodobne pod warunkiem zarejestrowania określonych wyników pomiarów[36]. Estymator bayesowski o minimalnej wariancji stanowi natomiast wartość oczekiwaną rozwiązania pod warunkiem zarejestrowania określonych danych pomiarowych[36]. Techniki bayesowskie realizowane są praktycznie z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo. W tym przypadku w celu uzyskania rozkładu prawdopodobieństwa *a posteriori* rozwiązania dokonuje się analizy statystycznej wielkiej liczby rozwiązań zagadnienia wprost otrzymywanych dla dyskretnych reprezentacji funkcji $f(a)$ losowanych z założonego rozkładu prawdopodobieństwa *a priori*[36].

Przy odpowiednich założeniach upraszczających, rozwiązanie równania całkowego Fredholma pierwszego rodzaju może posłużyć do wyznaczenia rozkładu wielkości cząstek fazy zdyspergowanej układu dyspersyjnego na podstawie mierzonych charakterystyk rozpraszania światła w układzie dyspersyjnym[1]. Do charakterystyk tych należą: zależność objętościowej funkcji rozpraszania od kąta rozpraszania $\beta(\theta)$ będąca przedmiotem pomiarów nefelometrycznych oraz zależność całkowitego współczynnika osłabienia światła od długości fali rozpraszanego światła $c(\lambda)$, która jest rezultatem pomiarów turbidymetrycznych[1]. Przyjmuje się przy tym, że w układzie dyspersyjnym zachodzi jednokrotne i niekoherentne rozpraszanie światła będącego niespolaryzowaną falą płaską. Dzięki temu możliwe staje się sformułowanie modeli matematycznych pomiarów nefelometrycznych i turbidymetrycznych przy użyciu znanych teorii rozpraszania światła na pojedynczej cząstce fazy zdyspergowanej, np. teorii rozpraszania Mie czy dyfrakcji Fraunhofera[1, 38, 39].

2. Zarys analizy wielkości cząstek układów dyspersyjnych

Co my wiemy, to tylko kropelka.
Czego nie wiemy, to cały ocean.

(Newton)

Układy dyspersyjne są to układy dwu- lub wielofazowe złożone z fazy ciągłej, zwanej fazą rozpraszającą lub ośrodkiem dyspersyjnym, i zawieszonych w niej drobnych cząstek stanowiących fazę rozproszoną, zwaną też fazą zdyspergowaną[1].

2.1. Rozpraszanie światła w układach dyspersyjnych

Rozpraszanie światła jest zjawiskiem fizycznym polegającym na zmianie przestrzennego rozkładu wiązki światła na skutek oddziaływania z ośrodkiem, w którym to światło propaguje[37, 13, 12].

Mechanizm rozpraszania fal elektromagnetycznych polega na pochłanianiu promieniowania padającego przez atomy lub cząsteczki ośrodka, co prowadzi do ich wzbudzenia, a następnie na wtórnym promieniowaniu fal elektromagnetycznych przez te atomy lub cząsteczki przy ich powrocie do niższych poziomów energetycznych. Promieniowanie wtórne stanowi promieniowanie rozproszone w ośrodku[38, 1]. Część pochłoniętej energii elektromagnetycznej może zostać przekształcona w inne formy energii takie, jak energia cieplna. Zjawisko to nosi nazwę absorpcji.

Promieniowanie rozproszone przez cały układ zawierający olbrzymią liczbę atomów lub cząsteczek jest sumarycznym efektem wtórnego promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez wszystkie atomy lub cząsteczki wzbudzone przez falę padającą[38, 1]. W ośrodkach, w których odległości pomiędzy miedzy atomami lub cząsteczkami są znacznie mniejsze od długości fali światła padającego, każdy atom lub cząsteczka poddana jest oddziaływaniu nie tylko fali padającej, lecz również wypadkowej wtórnych fal wypromieniowanych przez wszystkie pozostałe atomy lub cząsteczki w układzie. Jednocześnie jednak wtórne promieniowanie każdej molekuły zależne jest od całkowitego działającego na nią promieniowania. W efekcie mamy do

czynienia z wzajemnym sprzężeniem molekuł, co prowadzi do elektromagnetycznego problemu wielu ciał[38]. Ścisły opis tego zjawiska, określanego jako rozproszenie wielokrotne, jest niezwykle skomplikowany[38, 40].

Jeżeli odległości miedzy atomami lub cząsteczkami w ośrodku są większe, można zaniedbać ich wzajemne sprzężenie, przyjmując przybliżenie rozproszenia jednokrotnego. W tej sytuacji wypadkowe pole elektryczne wewnątrz i na zewnątrz ośrodka obliczane jest jako superpozycja pól elektrycznych wtórnych fal elektromagnetycznych emitowanych przez wszystkie wzbudzone molekuły oraz pola elektrycznego fali padającej. Sumowanie pól uwzględnia różnice faz poszczególnych fal. Zakłada się przy tym, że różnice te są stałe w czasie, czyli fale są ze sobą spójne[38, 1].

Można wykazać, że w idealnie jednorodnym ośrodku wynikiem superpozycji fal wtórnych jest pojedyncza fala propagująca w ośrodku w kierunku zgodnym z kierunkiem propagacji fali padającej z prędkością c/n, gdzie c jest prędkością światła w próżni, a n współczynnikiem załamania ośrodka. Fala padająca zostaje w ośrodku całkowicie wygaszona. Zatem w przypadku ośrodka jednorodnego mimo występowania molekularnego mechanizmu rozpraszania, nie zachodzi rozpraszanie w skali makroskopowej, przejawiające się zmianą kierunku propagacji światła. Ścisły opis oddziaływań światła z układami jednorodnymi prowadzi do zależności współczynnika załamania od właściwości ośrodka – liczby molekuł w jednostce objętości oraz ich polaryzowalności, czyli skłonności do zmiany rozkładu ładunku elektrycznego pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego[38].

Rozpraszanie światła rozumiane jako zmiana przestrzennego rozkładu wiązki występuje wyłącznie w ośrodkach niejednorodnych, tj. takich, w których współczynnik załamania nie jest jednakowy we wszystkich punktach, lecz zmienia się od punktu do punktu[38, 1, 12, 13]. W rzeczywistości nawet układy jednorodne z makroskopowego punktu widzenia są określonej skali niejednorodne, ponieważ można w nich wyróżnić pojedyncze atomy lub cząsteczki. Rozważania teoretyczne prowadzą jednak do wniosku, że ośrodki, w których odległości między molekułami są znacznie mniejsze od długości fali światła, można uznać za optycznie jednorodne[12, 13, 38, 1].

Przyczyną niejednorodności optycznej ośrodka może być obecność w nim niewielkich cząstek innej substancji[12, 13, 38, 1]. Przez cząstkę rozumie się agregat wielkiej liczby atomów lub cząsteczek jednego rodzaju. W przypadku, gdy liczba ta jest wystarczająco duża, właściwości optyczne materiału, z którego cząstka jest zbudowana, opisuje współczynnik załamania światła. Niejednorodność optyczna tego typu występuje w przypadku układów dyspersyjnych, gdyż faza zdyspergowana tych układów stanowi zbiór cząstek o współczynniku załamania różniącym

się od współczynnika załamania ośrodka dyspersyjnego, w którym te cząstki są zawieszone[1].

Podobnie, jak w omawianym wcześniej przypadku atomów lub cząsteczek, jeżeli średnie odległości między cząstkami fazy zdyspergowanej są znacznie mniejsze od długości fali światła padającego, następuje wzajemne sprzężenie cząstek za pośrednictwem pola elektromagnetycznego, co prowadzi do zjawiska rozproszenia wielokrotnego[38, 1]. Jeżeli średnie odległości cząstek są większe, można zastosować przybliżenie rozproszenia jednokrotnego[38, 1]. W tej sytuacji pole elektryczne fali rozproszonej przez zbiór cząstek fazy zdyspergowanej stanowi superpozycję pól fal rozproszonych przez poszczególne cząstki (z uwzględnieniem faz), z których każda poddana jest oddziaływaniu wyłącznie pola elektrycznego fali padającej tak, jakby stanowiła pojedynczą cząstkę rozpraszającą w całym ośrodku dyspersyjnym.

Jeżeli dodatkowo założy się, że liczba cząstek w układzie dyspersyjnym jest bardzo duża, a ich położenie i orientacja przestrzenna – losowa i zmienna w czasie, fazy fal rozproszonych przez poszczególne cząstki w dowolnym punkcie obserwacji są również losowe (nie związane żadną systematyczną zależnością) oraz zmienne w czasie. Dzięki temu cząstki fazy zdyspergowanej można traktować jako niespójne względem siebie źródła promieniowania rozproszonego. W związku z tym natężenia fal rozproszonych przez poszczególne cząstki mogą być bezpośrednio sumowane. Rozpraszanie światła przez cały zbiór cząstek fazy zdyspergowanej określa się w tym przypadku jako rozproszenie niespójne lub niekoherentne[1, 38].

Dzięki założeniom o rozpraszaniu jednokrotnym i niekoherentnym możliwe jest łatwe sformułowanie opisu rozpraszania światła w układzie dyspersyjnym na podstawie wyników analizy rozpraszania światła na pojedynczej cząstce fazy zdyspergowanej.

2.2. Opis cząsteczek fazy zdyspergowanej

Jedną z najważniejszych właściwości fizycznych układów dyspersyjnych jest wielkość cząstek fazy zdyspergowanej, ponieważ ma ona zasadniczy wpływ na pozostałe własności układu[1].

Cząstki fazy zdyspergowanej mogą posiadać różny, często nieregularny kształt. Wymaga to sprecyzowania miar wielkości (rozmiaru) cząstek, gdyż w tych warunkach średnica w znaczeniu dosłownym nie może być stosowana jako parametr charakteryzujący wielkość cząstek[1].

W wielu procesach fizycznych zachowanie rzeczywistych cząstek układu dyspersyjnego opisuje się geometriami przybliżonymi, np. cząsteczkami kulistymi o okre-

ślonej średnicy nazywanej średnicą zastępczą[1]. Przybliżenie kształtu rzeczywistej cząstki kulą o odpowiedniej średnicy zastępczej redukuje liczbę parametrów koniecznych do scharakteryzowania cech geometrycznych cząstki do jednego parametru – średnicy zastępczej, co stanowi istotne uproszczenie opisu matematycznego zjawisk fizycznych zachodzących z udziałem cząstek fazy zdyspergowanej[1].

W analizie wielkości cząstek fazy zdyspergowanej z zastosowaniem rozpraszania światła, jako średnicę zastępczą przyjmuje się średnicę objętości, która stanowi średnicę kuli o objętości takiej samej, jak badana cząstka[1]. W analogiczny sposób określić można promień objętości. Przybliżenie rzeczywistych cząstek za pomocą cząstek kulistych o tej samej objętości uzasadniają wyniki wielu prac doświadczalnych i teoretycznych, które wykazały, że w warunkach naturalnych cząstki fazy zdyspergowanej, charakteryzujące się dużą różnorodnością kształtów i chaotyczną orientacją w przestrzeni, rozpraszają światło tak, jak jednorodne kule o identycznej objętości [1]. W dalszej części niniejszego opracowania jako promień cząstki rozumiany będzie zawsze jej promień objętości a_v.

Fazę zdyspergowaną tworzoną przez cząstki o różnej wielkości opisuje się za pomocą funkcji rozkładu wielkości cząstek. Rozkład wielkości cząstek jest funkcją promienia cząstek a, określającą liczbę cząstek dN_v w jednostce objętości układu dyspersyjnego, których promienie leżą w przedziale $(a, a+da)$ [1]:

$$dN_v = N_v f(a) da \tag{2.1}$$

gdzie N_v to całkowita liczba cząstek w jednostce objętości układu dyspersyjnego. Całkowitą liczbę cząstek o promieniu $a_1 \le a \le a_2$ w jednostce objętości układu określa wzór[1]:

$$N_v(a_1, a_2) = N_v \int_{a_1}^{a_2} f(a) da. \tag{2.2}$$

Rozkład wielkości spełnia warunek unormowania do jedności:

$$\int_0^\infty f(a) da = 1. \tag{2.3}$$

2.3. Metody pomiarowe

Do klasycznych metod pomiaru wielkości cząstek fazy zdyspergowanej zalicza się:

- przesiewanie,
- pomiary mikroskopowe,

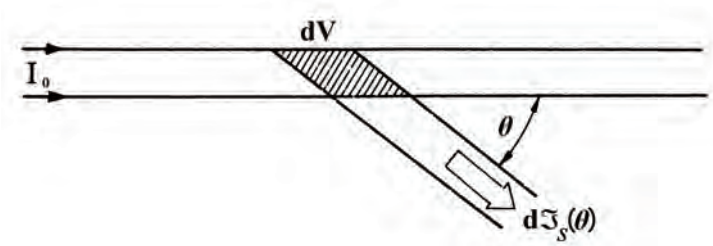
- metodę grawimetryczną,
- sedymentację,
- metodę centryfugi,
- konduktometrię.

Zasadniczą wadą tych technik jest inwazyjność, która wyraża się koniecznością wstępnego przygotowania próbki, co często nierzadko prowadzi do zmiany jej pierwotnych właściwości[1]. Wady tej pozbawione są optyczne metody pomiarowe oparte na zjawisku rozpraszania światła. Przewaga technik optycznych wynika z ich bezinwazyjności, szybkości działania oraz możliwości prowadzenia pomiarów *in situ*[1].

Optyczne techniki analizy wielkości cząstek układów dyspersyjnych należą do klasy pomiarów pośrednich. Bezpośrednim pomiarom poddawane są wielkości fizyczne opisujące rozpraszanie światła na cząstkach fazy zdyspergowanej układu dyspersyjnego, a następnie na podstawie wyników tych pomiarów wyznaczany jest rozkład wielkości cząstek fazy zdyspergowanej przy wykorzystaniu związku matematycznego pomiędzy mierzonymi wielkościami a szukaną funkcją rozkładu. Wnioskowanie o rozkładzie wielkości cząstek na podstawie wyników pomiarów wielkości fizycznych opisujących rozpraszanie światła w układzie dyspersyjnym jest przykładem zagadnienia odwrotnego. Do powszechnych technik optycznych zalicza się nefelometrię i turbidymetrię[39, 1].

Pomiary nefelometryczne

W nefelometrycznej technice analizy wielkości cząstek układów dyspersyjnych dokonuje się pomiaru zależności objętościowej funkcji rozpraszania od kąta rozpraszania $\beta(\theta)$ [1]. Jej wyznaczenie wymaga dokonania pomiaru natężenia promieniowania rozproszonego pod kątem θ przez elementarną objętość układu $dV - d\Im_s(\theta)$ [1]. Zasadę pomiaru funkcji $\beta(\theta)$ w nefelometrii ilustruje Rys. 2.1.



Rys. 2.1. Zasada pomiaru objętościowej funkcji rozpraszania w nefelometrii[1]

Wyznaczenie rozkładu wielkości cząstek fazy zdyspergowanej $f(a)$ na podstawie zależności całkowej wiążącej funkcję $\beta(\theta)$ z funkcją $f(a)$ wymaga znajomości przebiegu $\beta(\theta)$ w pewnym przedziale kąta rozpraszania θ. Dlatego w ramach pomiarów nefelometrycznych wyznaczane są wartości funkcji $\beta(\theta)$ dla wielu kątów θ. Pomiar objętościowej funkcji rozpraszania omówioną metodą nastręcza wielu problemów technicznych, wśród których najistotniejszymi są[1]: dokładne wyznaczenie kąta rozpraszania θ oraz zmiana rozważanej objętości ośrodka dV wraz ze zmianą θ.

Pomiary turbidymetryczne

Metoda turbidymetryczna obejmuje pomiar całkowitego współczynnika osłabienia (ekstynkcji) w funkcji długości fali promieniowania $C(\lambda)$ [1].

Pomiar całkowitego współczynnika osłabienia c funkcjonuje przy wykorzystaniu prawa Bougera-Lamberta-Beera[39, 1]. W celu wyznaczenia $C(\lambda)$ mierzony jest spadek natężenia oświetlenia w wiązce światła monochromatycznego o długości fali λ po przebyciu przez nią określonego odcinka drogi w układzie dyspersyjnym. Konieczne jest przy tym spełnienie następujących warunków[1]:

- Osłonięcie wiązki światła od promieniowania rozproszonego docierającego z kierunków innych od kierunku propagacji wiązki, co wymusza zastosowanie wiązki ograniczonej cylindrycznie. Warunek ten spełniony jest zawsze jedynie w przybliżeniu, tym dokładniej, im mniejszy jest stosunek szerokości wiązki do długości jej drogi, czyli im mniejszy jest kąt bryłowy, z którego detektor rejestruje światło. Najkorzystniejsze jest w tym przypadku zastosowanie wiązki promieniowania laserowego z uwagi na jej małą rozbieżność.
- Zapewnienie, by w układzie dyspersyjnym nie występowały pierwotne źródła światła.

Spełnienie tych wymogów gwarantuje, że mierzony spadek natężenia oświetlenia w wiązce światła po przebyciu przez nią określonego odcinka drogi w układzie dyspersyjnym spowodowany jest wyłącznie przez zjawisko osłabienia, co zapewnia poprawną wartość całkowitego współczynnika osłabienia wyznaczonego na podstawie mierzonego spadku. Doświadczalne wyznaczenie współczynnika $C(\lambda)$ polega na:

- pomiarze natężenia oświetlenia $I_0(\lambda)$ w wiązce światła monochromatycznego o długości fali λ w określonym punkcie układu dyspersyjnego,
- pomiarze spadku natężenia oświetlenia $\Delta I_z(\lambda)$ w wiązce światła po przebyciu przez nią możliwie jak najkrótszej drogi Δz w układzie dyspersyjnym,
- obliczeniu współczynnika $C(\lambda)$ w oparciu o następujący wzór[1]:

$$c(\lambda) = -\frac{1}{z}\ln\left[\frac{I_z(\lambda)}{I_0(\lambda)}\right]. \tag{2.4}$$

Wyznaczenie rozkładu wielkości cząstek fazy zdyspergowanej $f(a)$ wiąże się z koniecznością realizacji pomiarów $c(\lambda)$ w pewnym zakresie λ [1].

2.4. Modele matematyczne pomiarów nefelometrycznych i turbidymetrycznych

Podstawowym zagadnieniem problemu rozpraszania światła w złożonych układach dyspersyjnych układ jest zjawisko rozpraszania światła przez elementarną cząsteczkę, a w szczególności natężenie promieniowania rozproszonego w kierunku $\mathbf{r}$. Natężenie to zdefiniowane jest jako iloraz strumienia energii (czyli ilości energii przepływającej w jednostce czasu) promieniowania rozpraszanego przez cząstkę w mały kąt bryłowy wokół kierunku $\mathbf{r} - d\varphi_E(\mathbf{r})$ do wielkości tego kąta bryłowego $d\Omega(\mathbf{r})$:

$$\Im_s(\mathbf{r}) = \frac{d\varphi_E(\mathbf{r})}{d\Omega(\mathbf{r})}. \tag{2.5}$$

Na potrzeby niniejszej pracy przyjmuje się, że w ośrodku dyspersyjnym dochodzi do jednokrotnego i niekoherentnego rozpraszania światła. W konsekwencji, natężenie światła rozproszonego przez elementarną objętość dV w kierunku $\mathbf{r}$ (Rys. 2.1) jest niekoherentną superpozycją natężeń rozproszonych przez cząsteczki fazy zdyspergowanej zgromadzonej w tej objętości.

Można wykazać, że dzięki liniowości rozwiązań równań Maxwella, natężenie rozproszone na cząstce można wyrazić przy pomocy kombinacji tzw. współczynników Stokesa S_{ij} tworzących tzw. macierz Muellera[37-39]. W szczególności, natężenie promieniowania rozproszonego przez cząstkę w płaszczyźnie rozpraszania w kącie θ można wyrazić zależnością[37, 38]:

$$\Im_s(\theta, x, m) = \frac{1}{k^2} S_{11}(\theta, x, m) I_0, \tag{2.6}$$

gdzie $S_{11}(\theta, x, m)$ to element tzw. macierzy Muellera dla cząsteczki, $k = 2\pi / \lambda$ jest liczbą falową dla fali o długości λ. Właściwości optyczne jednorodnej i izotropowej cząstki kulistej umieszczonej w jednorodnym i izotropowym ośrodku dyspersyjnym są w pełni zdeterminowane przez i) względny współczynnik załamania:

$$m = N_1 / N_0 = n + i\kappa, \tag{2.7}$$

gdzie N_0 i N_1 to zespolone współczynniki załamania odpowiednio ośrodka i cząstki[37], ii) tzw. parametr rozmiarowy cząstki:

$$x = ka = 2\pi a N_1 / \lambda, \tag{2.8}$$

gdzie *a* oznacza promień cząsteczki.

Ważnym parametrem z punkt widzenia turbidymetrycznej techniki pomiarowej jest tzw. przekrój czynny cząstki na osłabienie (ekstynkcję) światła. Osłabienie oznacza ubytek strumienia energii promieniowania padającego będący łącznym efektem rozpraszania promieniowania padającego w kierunkach odmiennych od kierunku promieniowania padającego oraz absorpcji promieniowania padającego przez cząstkę. Przekrój czynny elementarnej cząstki na osłabienie określa się jako stosunek ubytku strumienia energii promieniowania padającego w wyniku osłabienia (ekstynkcji) $\varphi_{E,ext}$ do natężenia oświetlenia cząstki przez falę padającą[37, 38]:

$$C_{ext}(x,m) = \frac{\varphi_{E,ext}}{I_0}. \tag{2.9}$$

Rozwiązania dla funkcji $S_{11}(\theta,x,m)$ oraz $C_{ext}(x,m)$ są formułowane językiem aproksymacyjnych i kompleksowych teorii rozpraszania światła. W niniejszym opracowaniu wykorzystywany jest model rozpraszania Lorenza-Mie, wynikający z rozwiązania zagadnienia rozpraszania fali na sferycznej cząstce przy użyciu metody rozdzielenia zmiennych[41] (SVM, *Separation of Variables*) dla ustalonych warunków brzegowych[37, 38]:

$$S_{11}(\theta,x,m) = \frac{1}{2}\left[\left|S_1(\theta,x,m)\right|^2 + \left|S_2(\theta,x,m)\right|^2\right], \tag{2.10}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} S_1(\theta,x,m) &= \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2n+1}{n(n+1)}\left(a_n\pi_n + b_n\tau_n\right), \\ S_2(\theta,x,m) &= \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2n+1}{n(n+1)}\left(a_n\tau_n + b_n\pi_n\right). \end{aligned} \tag{2.11}$$

Powyższe równania stanowią rozwinięcia funkcji odpowiednio $S_1(\theta, x, m)$ i $S_2(\theta, x, m)$ w nieskończone szeregi funkcji specjalnych π_n i τ_n [37, 38]:

$$\pi_n = \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta}, \quad \tau_n = \frac{dP_n^1(\cos\theta)}{d\theta}, \tag{2.12}$$

przy czym $P_n^1(\cos\theta)$ to funkcja Legendre'a pierwszego rodzaju stopnia *n*. Wielkości a_n i b_n są tzw. zespolonymi współczynnikami rozwinięcia fali elektromagnetycznej

zależnymi od parametrów cząsteczki (wielkość, kształt, budowa) i padającego promieniowania, które wynikają z zapisu warunków brzegowych dla równań Maxwella na powierzchni sfery[37]:

$$a_n = \frac{m\psi_n(mx)\psi_n'(x) - \psi_n(x)\psi_n'(mx)}{m\psi_n(mx)\xi_n'(x) - \xi_n(x)\psi_n'(mx)},$$
$$b_n = \frac{\psi_n(mx)\psi_n'(x) - m\psi_n(x)\psi_n'(mx)}{\psi_n(mx)\xi_n'(x) - m\xi_n(x)\psi_n'(mx)}, \tag{2.13}$$

przy czym $\psi_n(\rho)$ i $\xi_n(\rho)$ to funkcje Ricatti-Bessela[37, 42].

Formalna postać funkcji $C_{ext}(x,m)$ ma również postać nieskończonych, ale zbieżnych szeregów[37, 38]:

$$C_{ext}(x,m) = \frac{2\pi}{k^2}\mathrm{Re}\left\{\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)(a_n + b_n)\right\}. \tag{2.14}$$

Numeryczne aspekty praktycznej implementacji funkcji $S_1(\theta,x,m)$ i $C_{ext}(x,m)$ przedstawia praca Adena i in [43].

Pomiary nefelometryczne

W modelu nefelometrycznym liniowego równania całkowego Fredholma (1.6) zachodzą następujące tożsamości:

$$y \equiv \theta, \quad g_m \equiv \beta(\theta), \tag{2.15}$$

zaś jadro równania całkowego (1.6) ma postać[1]:

$$K(y,a) \equiv K(\theta,a) = N_v \frac{1}{k^2} S_{11}(x,m,\theta), \tag{2.16}$$

gdzie N_v to liczba cząstek fazy zdyspergowanej przypadająca na jednostkę objętości układu dyspersyjnego.

Pomiary turbidymetryczne

W modelu turbidymetrycznym liniowego równania całkowego Fredholma (1.6) zachodzą następujące tożsamości:

$$y \equiv \lambda, \quad g_m \equiv C(\lambda), \tag{2.17}$$

zaś jadro równania całkowego (1.6) ma postać[1]:

$$K(y,a) \equiv K(\lambda,a) = N_v C_{ext}(x,m). \tag{2.18}$$

3. Zagadnienie odwrotne w analizie optycznej wielkości cząstek układów dyspersyjnych

Prawdziwa wiedza to znajomość przyczyn.

(Arystoteles)

Zagadnienie odwrotne w optycznej analizie wielkości cząstek układów dyspersyjnych polega na pośrednim pomiarze rozkładu wielkości cząstek fazy zdyspergowanej $f(a)$ na podstawie wyników pomiarów funkcji g_m wynikającej z pomiarów rozpraszania światła w układzie dyspersyjnym. Pomiar ten opiera się na wykorzystaniu związku matematycznego pomiędzy funkcją g_m a poszukiwanym rozkładem wielości cząstek $f(a)$, który w przypadku obu rozważanych technik pomiarowych – nefelometrii oraz turbidymetrii, wyraża się równaniem całkowym Fredholma pierwszego rodzaju o ogólnej postaci (1.6), czyli modelem matematycznym pomiarów[1].

Z matematycznego punktu widzenia, rozwiązanie rozpatrywanego problemu odwrotnego sprowadza się do rozwiązania liniowego równania całkowego o jądrze wyrażonym funkcją $K(y,a)$ mającym postać adekwatną do jednej z rozważanych tutaj technik eksperymentalnych. Niestety z uwagi na złożoną postać $K(y,a)$, rozwiązania analityczne znane są wyłącznie dla szczególnych i najczęściej prostych przypadków.

3.1. Niewłaściwe postawienie zagadnienia odwrotnego

Jednym w podstawowych problemów rozwiązania zagadnienia odwrotnego w analizie wielkości cząstek układów dyspersyjnych jest tzw. niewłaściwe postawienie (*ill--posedness*). Według definicji Hadamarda, niewłaściwe postawienie oznacza niespełnienie co najmniej jednego z trzech warunków[44, 33, 35]:

- rozwiązanie $f(a)$ istnieje dla każdej funkcji g_m,
- rozwiązanie $f(a)$ jest jednoznaczne,
- rozwiązanie $f(a)$ jest stabilne, tzn. zależy w sposób ciągły od funkcji g_m.

Warunek stabilności rozwiązania można również sformułować jako żądanie, by dla każdego dążącego do zera ciągu zaburzeń funkcji g_m odpowiadający mu ciąg zaburzeń rozwiązania $f(a)$ także dążył do zera[35].

Zakładając, że jądro całkowe $K(y,a)$ jest całkowalne oraz funkcja $f(a)$ jest rozwiązaniem równania (1.6) określonego i ciągłego na przedziale $(0,\infty)$:

$$g_m = \int_0^\infty K(y,a) f(a) da, \tag{3.1}$$

to funkcja $f(a) + \delta f_n(a)$, gdzie $\delta f_n(a) = A \sin na$, A – stała, spełnia równość[35, 34]:

$$\begin{aligned} &\lim_{n\to\infty} \int_0^\infty K(y,a)\left[f(a) + \delta f_n(a)\right] da = \\ &\lim_{n\to\infty} \int_0^\infty K(y,a)\left[f(a) + A\sin(na)\right] da = \\ &g_m + \lim_{n\to\infty} \int_0^\infty K(y,a) A \sin(na) da. \end{aligned} \tag{3.2}$$

Oznaczając:

$$\delta g_n(y) = \int_0^\infty K(y,a) A \sin(na) da \tag{3.3}$$

oraz uwzględniając związek[35, 34]:

$$\lim_{n\to\infty} \int_0^\infty K(y,a) \sin(na) da = 0, \tag{3.4}$$

otrzymujemy:

$$\lim_{n\to\infty} \delta g_n(y) = 0. \tag{3.5}$$

Oznacza to, że ciąg zaburzeń $\delta g_n(y)$ funkcji g_m taki, że $\delta g_n(y) \to 0$ dla $n \to \infty$ wywołuje ciąg zaburzeń $\delta f_n(a)$ rozwiązania $f(a)$ problemu (1.6) nie dążący do zera dla $n \to \infty$. Wykazuje to, że rozwiązanie problemu odwrotnego (1.6) jest niestabilne, a sam problem jest źle postawiony.

3.2. Słabe uwarunkowanie zagadnienia odwrotnego

Problem słabego uwarunkowania (*ill-conditioning*) polega na tym, że niewielkie nawet zakłócenia danych pomiarowych modelu g_m powodują niezwykle duże zaburzenia rozwiązania $f(a)$.

Wgląd w przyczyny słabego uwarunkowania zagadnienia odwrotnego może być uzasadniony przy użyciu metod analizy funkcjonalnej. Przekształcenie całkowe (1.6) można zapisać w postaci równania operatorowego[33]:

$$g_m(y) = (Kf)(y) = \int_0^\infty K(y,a) f(a) da, \quad y_{\min} \le y \le y_{\max}, \tag{3.6}$$

gdzie K oznacza operator przekształcający funkcję $f(a)$ w funkcję $g_m(y)$.

Niech funkcja $f(a)$ należy do przestrzeni Hilberta H_1, którą stanowi przestrzeń $L_2\lfloor 0,\infty)$ wszystkich funkcji całkowalnych z kwadratem w przedziale $\lfloor 0,\infty)$, z iloczynem skalarnym określonym wzorem:

$$\langle t,u \rangle_{H_1} = \int_0^\infty t(a)u(a)\,da. \tag{7.7}$$

Niech funkcja $g_m(y)$ należy do przestrzeni Hilberta H_2, którą stanowi przestrzeń $L_2\lfloor y_{\min}, y_{\max}\rfloor$ wszystkich funkcji całkowalnych z kwadratem w przedziale $\lfloor y_{\min}, y_{\max}\rfloor$, z iloczynem skalarnym określonym wzorem:

$$\langle t,u \rangle_{H_2} = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} t(y)u(y)\,dy. \tag{3.8}$$

Niech dodatkowo jądro $K(y,a)$ jest całkowalne z kwadratem, tzn.:

$$\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} dy \int_0^\infty K(y,a)\,da < \infty \tag{3.9}$$

oraz operator $K: H_1 \to H_2$ jest operatorem zwartym[33]. Wówczas istnieją funkcje $u_n(y)$ oraz $v_n(a)$, zwane funkcjami osobliwymi, i rzeczywiste liczby dodatnie, zwane wartościami osobliwymi, σ_n takie, że $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \ldots > 0$, $\sigma_n \to 0$, gdy $n \to \infty$ oraz[33, 45]:

$$(Kv_n)(y) = \int_0^\infty K(y,a) v_n(a)\,da = \sigma_n u_n(y), \tag{3.10}$$

$$(K^* u_n)(a) = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} K(y,a) u_n(y)\,dy = \sigma_n v_n(a), \tag{3.11}$$

gdzie (*) oznacza sprzężenie. Funkcje $v_n(a)$ tworzą bazę ortonormalną w dziedzinie operatora K – przestrzeni H_1, natomiast funkcje $u_n(y)$ tworzą bazę ortonormalną w obrazie operatora K – przestrzeni H_2. W związku z tym funkcję $f(a)$ z przestrzeni H_1 oraz funkcję $g_m(y)$ z przestrzeni H_2 przedstawić można odpowiednio w postaci następujących rozwinięć:

$$f(a)=\sum_{n=1}^{\infty} f_n v_n(a), \tag{3.12}$$

$$g_m(y)=\sum_{n=1}^{\infty} g_n u_n(y), \tag{3.13}$$

o współczynnikach Fouriera opisanych wzorami:

$$f_n=\langle f, v_n\rangle_{H_1}=\int_0^{\infty} f(a)v_n(a)\,da, \tag{3.14}$$

$$g_n=\langle g, u_n\rangle_{H_2}=\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} g_m(y)u_n(y)\,dy, \tag{3.15}$$

Podstawiając wyrażenia (3.13) i (3.13) do równania (3.6) oraz stosując (3.10) relację otrzymujemy:

$$g_n=\sigma_n f_n. \tag{3.16}$$

Wynika stąd, że[33, 45]:

$$g_m(y)=(Kf)(y)=\int_0^{\infty} K(y,a)\,f(a)\,da=\sum_{n=1}^{\infty}\sigma_n f_n v_n(y) \tag{3.17}$$

oraz:

$$f(a)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{g_n}{\sigma_n}v_n(a)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\langle g_m(y),u_n(y)\rangle_{H_2}}{\sigma_n}v_n(a). \tag{3.18}$$

Rozwinięcie (3.18), zwane szeregiem Picarda, określa rozwiązanie problemu odwrotnego sformułowanego za pomocą równania (3.6). Warunkiem istnienia tego rozwiązania jest zbieżność szeregu, co ściśle wyrazić można jako[33]:

$$\sum_{n=1}^{\infty}\left|\frac{\langle g_m(y),u_n(y)\rangle_{H_2}}{\sigma_n}\right|^2<\infty. \tag{3.19}$$

Warunek (3.19) określa się jako kryterium Picarda[33].

W przypadku rozważanego zagadnienia odwrotnego jądro $K(y,a)$ ma postać funkcji „gładkiej”, tzn. zmieniającej się stosunkowo wolno wraz ze zmienną a. W związku z tym, z jakościowego punktu widzenia, operator całkowy K powoduje „wygładzenie” funkcji $f(a)$, tzn. ma właściwość filtrowania z niej wielkoczęstotliwościowych

oscylacji oraz gwałtownych zmian wartości[34]. W sposób bardziej ścisły wyrazić to można poprzez dwie ogólne własności często obserwowane w przypadku wygładzających operatorów całkowych[34]:

- wartości osobliwe operatora σ_n bardzo szybko maleją ze wzrostem indeksu n, zbliżając się do zera,
- funkcje osobliwe $u_n(y)$ oraz $v_n(a)$ wraz ze wzrostem n prezentują coraz bardziej oscylacyjny przebieg, tzn. wykazują coraz więcej zmian znaków.

Rozwinięcia fourierowskie (3.13) i (3.13) odpowiednio funkcji $f(a)$ i $g_m(y)$ stanowią ich dekompozycje na ortogonalne składowe oscylacyjne o rosnących częstotliwościach. Zgodnie ze wzorem (3.16), operator całkowy K traktować można jako filtr, który tłumi wielkoczęstotliwościowe oscylacje funkcji $f(a)$, odpowiadające współczynnikom fourierowskim f_n o dużych indeksach n, poprzez ich wymnożenie przez bardzo małe wartości osobliwe σ_n, co powoduje, że w wynikowej funkcji $g_m(y)$ istotne są jedynie wolnozmienne składowe o małych indeksach g_n. Innymi słowy, dane pomiarowe są mało czułe na wielkoczęstotliwościowe oscylacje funkcji $f(a)$ nawet, gdy mają one znaczną amplitudę [34, 36]. Z kolei rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego działa w przeciwną stronę – wiąże się ze znacznym wzmocnieniem wielkoczęstotliwościowych oscylacji funkcji $g_m(y)$, odpowiadających współczynnikom fourierowskim g_n o dużych indeksach n, poprzez ich dzielenie przez bardzo małe wartości osobliwe σ_n, co powoduje, że osiągają one duże amplitudy w rozwiązaniu $f(a)$ [34, 36].

Dotychczasowa analiza nie uwzględniała faktu, że funkcja mierzona podlega zakłóceniom przez losowe błędy pomiarowe oraz błędy zaokrągleń. W rezultacie uzyskana w wyniku pomiarów funkcja $\tilde{g}_m(y)$ różni się od funkcji $g_m(y)$ spełniającej równanie (3.6) wyrażające model matematyczny procesu pomiarowego. Zakładając addytywny charakter błędów losowych, wpływ zakłóceń można uwzględnić przez dodanie członu zakłóceń $e(y)$ do wyjścia idealnego modelu $g_m(y)$ w równaniu (3.6):

$$\tilde{g}(y) = g(y) + e(y) = \left(Kf\right)\left(y\right) + e(y) = \int_0^\infty K(y,a)\, f(a)\, da + e(y). \tag{3.20}$$

Funkcja $\hat{f}(a)$ wyznaczona poprzez rozwiązanie równania (3.6) dla funkcji $\tilde{g}_m(y)$ różni się od rzeczywistej funkcji $f(a)$ i stanowi jedynie pewne jej przybliżenie. Zastępując w wyrażeniu (3.18) funkcję $g_m(y)$ funkcją $\tilde{g}_m(y)$ oraz uwzględniając (3.20), uzyskuje się[33]:

$$\hat{f}(a)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\langle \tilde{g}_m(y),u_n(y)\rangle_{H_2}}{\sigma_n}v_n(a)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\langle g_m(y)+e(y),u_n(y)\rangle_{H_2}}{\sigma_n}v_n(a)=$$
$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\langle g_m(y),u_n(y)\rangle_{H_2}}{\sigma_n}v_n(a)+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\langle e(y),u_n(y)\rangle_{H_2}}{\sigma_n}v_n(a). \tag{3.21}$$

Wynika stąd, że błąd rozwiązania $\ddot{f}(a)$ w stosunku do prawdziwego rozwiązania $f(a)$ stanowi składnik:

$$r(y)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\langle e(y),u_n(y)\rangle_{H_2}}{\sigma_n}v_n(a)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{e_n}{\sigma_n}v_n(a)=\sum_{n=1}^{\infty}r_n v_n(a), \tag{3.22}$$

gdzie:

$$e_n=\langle e,u_n\rangle_{H_2}=\int_{y_{\min}}^{y_{\max}}e(y)u_n(y)\,dy, \tag{3.23}$$

$$r_n=\frac{e_n}{\sigma_n}=\langle r,v_n\rangle_{H_1}=\int_0^{\infty}r(a)v_n(a)\,da. \tag{3.24}$$

Wyrażenie (3.21) można więc zapisać w postaci:

$$\hat{f}(a)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\langle \tilde{g}_m(y),u_n(y)\rangle_{H_2}}{\sigma_n}v_n(a)=f(a)+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\langle e(y),u_n(y)\rangle_{H_2}}{\sigma_n}v_n(a). \tag{3.25}$$

Wprowadzając oznaczenie:

$$\tilde{g}_n=\langle \tilde{g},u_n\rangle_{H_2}=\int_{y_{\min}}^{y_{\max}}\tilde{g}_m(y)u_n(y)\,dy, \tag{3.26}$$

wzór (3.21) przyjmuje postać:

$$\begin{aligned}\hat{f}(a)&=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\tilde{g}_n}{\sigma_n}v_n(a)\\&=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{g_n}{\sigma_n}v_n(a)+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{e_n}{\sigma_n}v_n(a)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{g_n+e_n}{\sigma_n}v_n(a)\\&=\sum_{n=1}^{\infty}\hat{f}_n v_n(a),\end{aligned} \tag{3.27}$$

gdzie:

$$\hat{f}_n=\frac{\tilde{g}_n}{\sigma_n}=\frac{g_n+e_n}{\sigma_n}=f_n+\frac{e_n}{\sigma_n}=f_n+r_n. \tag{3.28}$$

Jak wcześniej wykazano, rozwinięcia fourierowskie funkcji $f(a)$ i $r(a)$ oraz $g_m(y)$ i $e(y)$ na odpowiednie funkcje osobliwe operatora K stanowią ich dekompozycje na ortogonalne składowe oscylacyjne o rosnących częstotliwościach. Szum reprezentowany przez funkcję $e(y)$ charakteryzuje się przebiegiem szybkozmiennym, co powoduje, że współczynniki e_n jego rozwinięcia fourierowskiego (3.23) przyjmują istotne wartości nawet dla znacznych n, bardzo wolno maleją one ze wzrostem n, a często pozostają stałe lub nawet rosną przy zwiększającym się n. Jednocześnie wolna od zakłóceń funkcja $g_m(y)$ jest funkcją gładką, co sprawia, że współczynniki g_n jej rozwinięcia fourierowskiego (3.13) szybko maleją ze wzrostem n. W związku z tym, głównie wielkoczęstotliwościowe oscylacje szumu $e(y)$ zostają silnie wzmocnione w procesie rozwiązywania zagadnienia odwrotnego za sprawą dzielenia we wzorze (3.24) współczynników e_n przez znikomo małe wartości osobliwe σ_n odpowiadające dużym indeksom n. Powoduje to, że jedynie dla małych n wartości współczynników $\hat{f}_n$ określone przez wyrażenie (3.28) są zbliżone do wartości f_n odpowiadających prawdziwemu rozwiązaniu. Dla dużych n wartości współczynników $\hat{f}_n$ w coraz większym stopniu zdominowane są przez wieloczęstotliwościowe składowe błędu r_n, ponieważ współczynniki fourierowskie f_n prawdziwego rozwiązania $f(a)$ szybko maleją ze wzrostem n, gdyż rozwiązanie to jest funkcją gładką. Zjawisko to prowadzi ostatecznie do olbrzymiego wzrostu wielkości błędu rozwiązania $\|r(a)\|$ dla niewielkiej nawet wielkości błędów pomiarowych $\|e(y)\|$, co oznacza słabe uwarunkowanie[33].

Reasumując, przyczyną złego uwarunkowania jest wygładzające działanie operatora całkowego K przejawiające się bardzo szybkim zmniejszaniem się jego wartości osobliwych σ_n przy wzroście n. Powoduje to, że w rozwiązaniu $\hat{f}(a)$ największemu wzmocnieniu podlegają wielkoczęstotliwościowe składowe szumu $e(y)$ [33, 34, 36].

Formalnym warunkiem istnienia rozwiązania $\hat{f}(a)$ jest kryterium Picarda[33]:

$$\sum_{n=1}^{\infty}\left|\frac{\langle \tilde{g}_m(y), u_n(y)\rangle_{H_2}}{\sigma_n}\right|^2 < \infty. \tag{3.29}$$

Zgodnie z tym kryterium, współczynniki Fouriera funkcji $\tilde{g}_m(y)$ przy wzroście n muszą zanikać szybciej niż wartości osobliwe σ_n operatora całkowego K [33]. Niespełnienie warunku (3.29) oznacza złe postawienie, natomiast im większa wartość wyrażeń pod sumą dla dużych n tym gorsze jest uwarunkowanie zagadnienia odwrotnego[33].

Stopień niewłaściwego postawienia oraz słabego uwarunkowania problemu narasta, gdy zmniejsza się szybkość zmniejszania się wartości osobliwych σ_n przy wzro-

ście n w stosunku do szybkości zmniejszania się współczynników Fouriera funkcji $\tilde{g}_m(y)$ [33, 34]. Przyjmuje się często, że stopień niewłaściwego postawienia oraz słabego uwarunkowania zagadnienia jest[33]:

- umiarkowany, jeżeli $\sigma_n = o(n^{-\alpha})$ dla pewnego $\alpha > 0$,
- poważny w innych przypadkach, na przykład, jeżeli $\sigma_n = o(e^{-n})$.

4. Numeryczne metody rozwiązywania zagadnienia odwrotnego w analizie optycznej wielkości cząstek układów dyspersyjnych

Błądzić jest rzeczą ludzką –
wszystko pogmatwać potrafi tylko komputer.

(Autor nieznany)

Analityczne rozwiązania zagadnienia odwrotnego w pomiarach nefelometrycznych i turbidymetryczych znane są wyłącznie dla prostych przypadków szczególnych, np. modeli opartych na dyfrakcji Fraunhofera[1]. Co więcej, modele uproszczone są słabo uwarunkowane, co powoduje, że w praktycznych zagadnieniach stosuje się techniki numeryczne, wymagające dyskretnej postaci modelu obiektu pomiarowego, czyli równania całkowego Fredholma (1.6).

4.1. Dyskretyzacja zagadnienia odwrotnego

Istnieje wiele metod dyskretyzacji równania całkowego (1.6)[33, 36]. W badaniach prowadzonych w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej wykorzystywano technikę opartą na kolokacji oraz aproksymacji całkowania przez kwadraturę numeryczną[33, 46].

Zakładając, że szukany rozkład wielkości cząstek $f(a)$ ograniczony jest do przedziału $[a_{\min}, a_{\max}]$, a poza tym przedziałem wartości $f(a)$ są zaniedbywalnie małe, to równanie całkowe (1.6) można zapisać w postaci:

$$\int_{\Omega} K(y,a)\, f(a)\, da \approx \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} K(y,a)\, f(a)\, da. \tag{4.1}$$

Podając powyższe równanie kwadraturze numerycznej, otrzymujemy zapis w postaci ważonej sumy wartości funkcji podcałkowej[33]:

$$\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} K(y,a)\, f(a) da \approx \sum_{j=1}^{q} w_j K(y,a_j)\, f(a_j), \tag{4.2}$$

gdzie w_j to współczynniki wagowe, zaś Punkty a_j oraz odpowiadające im wagi wybrać można na różne sposoby.

Stosując tzw. metodę prostokątów (*midpoint rule*) przedział $[a_{\min}, a_{\max}]$ dzielony jest na q równych podprzedziałów, każdy o szerokości[33, 46]:

$$\Delta a = (a_{\max} - a_{\min}) / q. \tag{4.3}$$

Podprzedziałem j -tym jest:

$$[a_{\min} + (j-1)\Delta a, a_{\min} + j\Delta a) \tag{4.4}$$

Każdy z punktów a_j stanowi środek odpowiedniego podprzedziału j:

$$a_j = a_{\min} + (j - 0.5)\Delta a. \tag{4.5}$$

Funkcja podcałkowa aproksymowana jest za pomocą funkcji odcinkami stałej, tzn. przyjmującej w kolejnych podprzedziałach stałe wartości równe wartości funkcji w środkach tych podprzedziałów[33, 46]:

$$\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} K(y,a) f(a) da \approx \sum_{j=1}^{q} K(y,a_j) f(a_j) \Delta a, \tag{4.6}$$

Wynika stąd, że dla metody prostokątów[33, 46]:

$$w_j = \Delta a. \tag{4.7}$$

W metodzie trapezów (*trapezoid rule*) funkcja podcałkowa aproksymowana jest za pomocą funkcji odcinkami liniowej. Odpowiadający temu rozkład punktów a_j określa wzór[33]:

$$a_j = a_{\min} + (j-1)\Delta a, \tag{4.8}$$

gdzie:

$$\Delta a = (a_{\max} - a_{\min}) / (q-1), \tag{4.9}$$

Współczynniki wagowe w metodzie trapezów dane są wzorem:

$$w_j = \begin{cases} \Delta a, & 2 \le j \le p-1 \\ \frac{1}{2}\Delta a, & j = 1, p. \end{cases} \tag{4.10}$$

Dokładność aproksymacji całki przez kwadraturę numeryczną wzrasta wraz ze wzrostem q.

W rzeczywistych pomiarach nie jest możliwe wyznaczenie ciągłej zależności wielkości mierzonej od zmiennej kontrolowanej $g_m(y)$, a jedynie dyskretnego zbioru wartości tej wielkości g_i dla określonych wartości zmiennej kontrolowanej y_i [33, 35, 36]:

$$g_i = g_m(y_i), \qquad y_{\min} \le y_i \le y_{\max}, \qquad i = 1,\ldots,p. \tag{4.11}$$

Punkty pomiarowe y_i zwane są punktami kolokacji[33]. Jeżeli punkty te rozmieszczone są odpowiednio gęsto w przedziale $[y_{\min}, y_{\max}]$, to możliwe jest odtworzenie przebiegu zależności $g_m(i)$ na podstawie wartości g_i. Dokładność aproksymacji funkcji $g_m(i)$ przez zbiór dyskretnych wartości $g_i = g_m(y_i)$ wzrasta wraz ze wzrostem p.

Wyrażając każdą z wartości g_i za pomocą równania (1.6) oraz wykorzystując przybliżenia (4.1) i (4.2), otrzymujemy następujący układ równań[33]:

$$g_i = g(y_i) = \sum_{j=1}^{q} w_j K(y_i, a_j) f(a_j), \qquad i = 1,\ldots,p. \tag{4.12}$$

Wprowadzając wektory kolumnowe:

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \cdots & g_p \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} g(y_1) & g(y_2) & \cdots & g(y_p) \end{bmatrix}^T, \tag{4.13}$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & \cdots & f_q \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} f(a_1) & f(a_2) & \cdots & f(a_q) \end{bmatrix}^T, \tag{4.14}$$

gdzie T oznacza transpozycję, oraz macierz:

$$\mathbf{K} = [K_{ij}], \tag{4.15}$$

której elementy określa wzór:

$$K_{ij} = w_j K(y_i, a_j), \qquad i = 1,\ldots,p, \qquad j = 1,\ldots,q, \tag{4.16}$$

układ równań (4.12) zapisać można w postaci[33, 36, 39, 46]:

$$\mathbf{g} = \mathbf{K}\mathbf{f}. \tag{4.17}$$

Dyskretyzacja równania całkowego Fredholma pierwszego rodzaju (1.6) prowadzi zatem do układu liniowych równań algebraicznych (4.17).

4.2. Rozwiązanie NK z minimalną normą zagadnienia odwrotnego w dyskretnej postaci

Rozpatrywane zagadnienie odwrotne ma postać układu p liniowych i dyskretnych równań algebraicznych z q niewiadomymi (4.17). Jako, że w ogólnym przypadku $p \ne q$, układ

ten może nie posiadać rozwiązania otrzymywanego przez odwrócenie macierzy $\mathbf{K}$. W związku z tym w dalszych rozważaniach przez rozwiązanie układu (4.17) rozumiane będzie rozwiązanie najmniejszych kwadratów (NK) z minimalną normą, które dla układu (4.17) zawsze istnieje[33, 36, 34, 47, 48].

Rozwiązanie najmniejszych kwadratów z minimalną normą wyznaczyć można w oparciu o rozkład macierzy $\mathbf{K}$ na wartości osobliwe (*SVD – Singular Value Decomposition*), który dany jest wzorem[33, 36, 34, 47, 48]:

$$\mathbf{K} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T, \tag{4.18}$$

gdzie $\mathbf{U}$ to macierz ortogonalna o wymiarach $p \times p$, $\mathbf{V}$ to macierz ortogonalna o wymiarach $q \times q$, zaś $\mathbf{S}$ to macierz o wymiarach $p \times q$ mająca postać [33, 36, 34, 47, 48]:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma} & \mathbf{0}_{r,q-r} \\ \mathbf{0}_{p-r,r} & \mathbf{0}_{p-r,q-r} \end{bmatrix}, \tag{4.19}$$

przy czym $\mathbf{\Sigma}$ – macierz diagonalna o wymiarach $r \times r$, gdzie r – rząd macierzy $\mathbf{K}$, czyli maksymalna liczba liniowo niezależnych kolumn lub wierszy macierzy $\mathbf{K}$, $\mathbf{0}_{m,n}$ – macierz o wymiarach $m \times n$ wypełniona samymi zerami. Elementy diagonalne macierzy $\mathbf{\Sigma}$ są dodatnie i ustawione w porządku malejącym: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \ldots \geq \sigma_r > 0$. Zwane są one wartościami osobliwymi macierzy $\mathbf{K}$. Odpowiadające im kolumny macierzy $\mathbf{U}$ oraz $\mathbf{V}$ stanowią wektory osobliwe macierzy $\mathbf{K}$ [33, 36, 34, 47, 48].

Podstawiając wyrażenia (4.18) oraz (4.19) do równania (4.17), uzyskuje się:

$$\mathbf{g} = \mathbf{U}\begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma} & \mathbf{0}_{r,q-r} \\ \mathbf{0}_{p-r,r} & \mathbf{0}_{p-r,q-r} \end{bmatrix}\mathbf{V}^T\mathbf{f}, \tag{4.20}$$

stąd wynika, że:

$$\mathbf{U}^T\mathbf{g} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma} & \mathbf{0}_{r,q-r} \\ \mathbf{0}_{p-r,r} & \mathbf{0}_{p-r,q-r} \end{bmatrix}\mathbf{V}^T\mathbf{f}. \tag{4.21}$$

Oznaczając:

$$\mathbf{g}' = \mathbf{U}^T\mathbf{g} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}'_1 \\ \mathbf{g}'_2 \end{bmatrix}, \tag{4.22}$$

$$\mathbf{f}' = \mathbf{V}^T\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}'_1 \\ \mathbf{f}'_2 \end{bmatrix}, \tag{4.23}$$

gdzie $\mathbf{g}_1'$ – wektor kolumnowy utworzony z pierwszych r elementów wektora $\mathbf{g}'$, $\mathbf{g}_2'$ – wektor kolumnowy utworzony z pozostałych $(p-r)$ elementów wektora $\mathbf{g}'$, $\mathbf{f}_1'$ – wektor kolumnowy utworzony z pierwszych r elementów wektora $\mathbf{f}'$, $\mathbf{f}_2'$ – wektor kolumnowy utworzony z pozostałych $(q-r)$ elementów wektora $\mathbf{f}'$, równanie (4.21) zapisać można w postaci układu[47]:

$$\begin{cases} \mathbf{g}_1' = \mathbf{\Sigma}\mathbf{f}_1' + \mathbf{0}_{r,q-r}\mathbf{f}_2' \\ \mathbf{g}_2' = \mathbf{0}_{p-r,r}\mathbf{f}_1' + \mathbf{0}_{p-r,q-r}\mathbf{f}_2' \end{cases}. \tag{4.24}$$

Ponieważ macierz $\mathbf{\Sigma}$ jest nieosobliwa[47]:

$$\mathbf{f}_1' = \mathbf{\Sigma}^{-1}\mathbf{g}_1', \tag{4.25}$$

co w tym przypadku przyjmuje szczególnie prostą postać:

$$f_{1,n}' = \sigma_n^{-1} g_{1,n}', \qquad n = 1,\ldots,r. \tag{4.26}$$

Wektor $\mathbf{f}_2'$ jest dowolny, co oznacza, że rozwiązanie układu (4.17) jest niejednoznaczne[47]. Natomiast dla każdego wektora $\mathbf{g}_2' \neq \mathbf{0}$ drugie z równań w układzie (4.24) jest sprzeczne, co oznacza sprzeczność układu (4.17)[47].

Zgodnie ze wzorem (4.22) wektor $\mathbf{g}'$ stanowi reprezentację wektora $\mathbf{g}$ w bazie ortonormalnej utworzonej przez kolumny macierzy $\mathbf{U}$, zgodnie zaś ze wzorem (4.23) wektor $\mathbf{f}'$ stanowi reprezentację wektora $\mathbf{f}$ w bazie ortonormalnej utworzonej przez kolumny macierzy $\mathbf{V}$. Niech:

$$\mathbf{g}'^* = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1' \\ \mathbf{0}_{p-r} \end{bmatrix}, \tag{4.27}$$

$$\mathbf{g}_0' = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_r \\ \mathbf{g}_2' \end{bmatrix}, \tag{4.28}$$

$$\mathbf{f}'^* = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1' \\ \mathbf{0}_{q-r} \end{bmatrix}, \tag{4.29}$$

$$\mathbf{f}_0' = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_r \\ \mathbf{f}_2' \end{bmatrix}, \tag{4.30}$$

gdzie $\mathbf{0}_n$ to n-elementowy wektor kolumnowy. Na podstawie wcześniejszych rozważań można stwierdzić, że wektor $\mathbf{g}'^*$ stanowi rzut ortogonalny wektora $\mathbf{g}$ na r-wymiarową przestrzeń kolumnową macierzy $\mathbf{K}$ rozpiętą przez r pierwszych kolumn macierzy $\mathbf{U}$, wektor $\mathbf{g}_0'$ stanowi rzut ortogonalny wektora $\mathbf{g}$ na $(p-r)$-wymiarowe dopeł-

nienie ortogonalne przestrzeni kolumnowej macierzy $\mathbf{K}$ w przestrzeni rozpiętej przez kolumny macierzy, $\mathbf{U}$ oraz że wektor $\mathbf{f}'^{*}$ stanowi rzut ortogonalny wektora $\mathbf{f}$ na r-wymiarową przestrzeń wierszową macierzy $\mathbf{K}$ utworzoną przez r pierwszych kolumn macierzy $\mathbf{V}$, wektor $\mathbf{f}_0'$ stanowi rzut ortogonalny wektora $\mathbf{f}$ na $(q-r)$-wymiarowe dopełnienie ortogonalne przestrzeni wierszowej macierzy $\mathbf{K}$ w przestrzeni rozpiętej przez kolumny macierzy $\mathbf{V}$. Z własności rzutu ortogonalnego wynika, że dla danego wektora $\mathbf{g}'$ należącego do p-wymiarowej przestrzeni euklidesowej, spośród wszystkich wektorów $\mathbf{w}$ należących do r-wymiarowej podprzestrzeni, najmniejszą normę euklidesową wektora $\mathbf{g}_0' = \mathbf{g}' - \mathbf{w}$ zapewnia wektor $\mathbf{w} = \mathbf{g}'^{*}$. Zatem każdy wektor:

$$\begin{aligned}\mathbf{f}' = \mathbf{f}'^{*} + \mathbf{f}_0' &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}^{-1}\mathbf{g}_1' \\ \mathbf{0}_{q-r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_r \\ \mathbf{f}_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}^{-1} & \mathbf{0}_{r,p-r} \\ \mathbf{0}_{q-r,r} & \mathbf{0}_{q-r,p-r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1' \\ \mathbf{g}_2' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_r \\ \mathbf{f}_2' \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}^{-1} & \mathbf{0}_{r,p-r} \\ \mathbf{0}_{q-r,r} & \mathbf{0}_{q-r,p-r} \end{bmatrix} \mathbf{g}' + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_r \\ \mathbf{f}_2' \end{bmatrix},\end{aligned} \tag{4.31}$$

minimalizuje wyrażenie:

$$\|\mathbf{g}_0'\|_2 = \|\mathbf{g}' - \mathbf{g}'^{*}\|_2 = \|\mathbf{U}\mathbf{g}' - \mathbf{U}\mathbf{g}'^{*}\|_2 = \|\mathbf{g} - \mathbf{U}\mathbf{g}'^{*}\|_2 . \tag{4.32}$$

Równość (4.32) wynika z ortogonalności macierzy $\mathbf{U}$ oraz ze związku (4.22). Stosując w wyrażeniu (4.32) kolejno zależności: (4.27), (4.24), (4.23) oraz (4.18)–(4.20) uzyskuje się:

$$\begin{aligned}\|\mathbf{g}_0'\|_2 &= \|\mathbf{g} - \mathbf{U}\mathbf{g}'^{*}\|_2 = \left\| \mathbf{g} - \mathbf{U} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1' \\ \mathbf{0}_{p-r} \end{bmatrix} \right\|_2 = \left\| \mathbf{g} - \mathbf{U} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}\mathbf{f}_1' + \mathbf{0}_{r,q-r}\mathbf{f}_2' \\ \mathbf{0}_{p-r} \end{bmatrix} \right\|_2 \\ &= \left\| \mathbf{g} - \mathbf{U} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{0}_{r,q-r} \\ \mathbf{0}_{p-r,r} & \mathbf{0}_{p-r,q-r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1' \\ \mathbf{f}_2' \end{bmatrix} \right\|_2 = \left\| \mathbf{g} - \mathbf{U} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{0}_{r,q-r} \\ \mathbf{0}_{p-r,r} & \mathbf{0}_{p-r,q-r} \end{bmatrix} \mathbf{V}^T\mathbf{f} \right\|_2 \\ &= \|\mathbf{g} - \mathbf{K}\mathbf{f}\|_2 = \|\boldsymbol{\varepsilon}\|_2 .\end{aligned} \tag{4.33}$$

Uwzględniając wzory (4.22) i (4.23) w wyrażeniu (4.31), można stwierdzić, że każdy wektor:

$$\mathbf{f} = \mathbf{V}\mathbf{f}' = \mathbf{V} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}^{-1} & \mathbf{0}_{r,p-r} \\ \mathbf{0}_{q-r,r} & \mathbf{0}_{q-r,p-r} \end{bmatrix} \mathbf{U}^T\mathbf{g} + \mathbf{V} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_r \\ \mathbf{f}_2' \end{bmatrix} \tag{4.34}$$

minimalizuje normę euklidesową wektora rezyduów, czyli $\|\boldsymbol{\varepsilon}\|_2 = \|\mathbf{g} - \mathbf{K}\mathbf{f}\|_2$. Wobec tego każdy z tych wektorów stanowi rozwiązanie najmniejszych kwadratów układu równań (4.17) [47]. Rozwiązań takich jest nieskończenie wiele, ponieważ wektor $\mathbf{f}_2'$ jest

dowolny. Jak wynika ze wzoru (4.34), przyjmując $\mathbf{f}_2' = \mathbf{0}_{q-r}$, otrzymuje się rozwiązanie najmniejszych kwadratów z minimalną normą euklidesową dane wyrażeniem[48]:

$$\mathbf{f}_{LSMN} = \mathbf{V}\begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma}^{-1} & \mathbf{0}_{r,p-r} \\ \mathbf{0}_{q-r,r} & \mathbf{0}_{q-r,p-r} \end{bmatrix}\mathbf{U}^T\mathbf{g}. \tag{4.35}$$

Przyjmując oznaczenie[48]:

$$\mathbf{K}^+ = \mathbf{V}\begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma}^{-1} & \mathbf{0}_{r,p-r} \\ \mathbf{0}_{q-r,r} & \mathbf{0}_{q-r,p-r} \end{bmatrix}\mathbf{U}^T, \tag{4.36}$$

można zapisać[48]:

$$\mathbf{f}_{LSMN} = \mathbf{K}^+\mathbf{g}. \tag{4.37}$$

Macierz $\mathbf{K}^+$ zwana jest pseudoodwrotnością macierzy $\mathbf{K}$ [48].

Oznaczając kolejne kolumny macierzy $\mathbf{U}$ i macierzy $\mathbf{V}$ odpowiednio $\mathbf{u}_n$ i $\mathbf{v}_n$ oraz zapisując iloczyn skalarny wektorów $\mathbf{t}$ i $\mathbf{u}$ w przestrzeni euklidesowej jako:

$$\langle \mathbf{t}, \mathbf{u} \rangle = \mathbf{t}^T\mathbf{u} = \mathbf{t}\mathbf{u}^T, \tag{4.38}$$

Rozwiązanie (4.35) można wyrazić wzorem[33, 36, 34]:

$$\mathbf{f}_{LSMN} = \sum_{n=1}^{r} \frac{\mathbf{u}_n^T\mathbf{g}}{\sigma_n} v_n = \sum_{n=1}^{r} \frac{\langle \mathbf{g}, \mathbf{u}_n \rangle}{\sigma_n} \mathbf{v}_n. \tag{4.39}$$

W rzeczywistości rząd układu równań (4.17) zwykle wynosi:

$$r = \min(p, q), \tag{4.40}$$

czyli układ charakteryzuje się pełnym rzędem wierszowym $r = p$ lub kolumnowym $r = q$.

Należy zwrócić uwagę na podobieństwo wzoru (4.39) oraz (3.18), jak również podobieństwa par wzorów: (3.12) i (4.23), (3.13) i (4.22) oraz (3.16) i (4.26). Podobieństwa te wynikają z faktu, że macierz $\mathbf{K}$ reprezentuje operator liniowy K_{dyskr} przekształcający wektor $\mathbf{f}$ należący do q-wymiarowej przestrzeni euklidesowej w wektor $\mathbf{g}$ należący do p-wymiarowej przestrzeni euklidesowej zgodnie ze wzorem (4.17). Operator K_{dyskr} oraz operator całkowy K rozważany w punkcie 3.2 różnią się wymiarem oraz rodzajem przestrzeni będących ich dziedzinami i obrazami – dla operatora K dziedzinę i obraz stanowią nieskończeniewymiarowe przestrzenie funkcyjne Hilberta L_2 z iloczynem skalarnym określonym wzorem (3.7) dla dziedziny i (3.8) dla obrazu, natomiast dla operatora K_{dyskr} dziedzinę i obraz stanowią skończeniewymiarowe prze-

strzenie euklidesowe l_2 z iloczynem skalarnym określonym ogólnie wzorem (4.38). Wartości osobliwe i wektory osobliwe macierzy $\mathbf{K}$ są wartościami osobliwymi i wektorami osobliwymi operatora K_{dyskr} reprezentowanego przez tę macierz. Ze wzoru (4.18) wynika bowiem, że:

$$\mathbf{KV} = \mathbf{US}, \tag{4.41}$$

$$\mathbf{K}^T\mathbf{U} = \mathbf{VS}, \tag{4.42}$$

co zapisać można w postaci odpowiednio:

$$\mathbf{Kv}_n = \sigma_n \mathbf{u}_n, \qquad n = 1,\ldots,r, \tag{4.43}$$

$$\mathbf{K}^T\mathbf{u}_n = \sigma_n \mathbf{v}_n, \qquad n = 1,\ldots,r. \tag{4.44}$$

Na podstawie wzorów (4.18) i (4.19) można wyprowadzić następujące związki[48]:

$$\mathbf{K}^T\mathbf{K} = \mathbf{V}\begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma}^2 & \mathbf{0}_{r,q-r} \\ \mathbf{0}_{q-r,r} & \mathbf{0}_{q-r,q-r} \end{bmatrix}\mathbf{V}^T, \tag{4.45}$$

$$\mathbf{KK}^T = \mathbf{U}\begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma}^2 & \mathbf{0}_{r,p-r} \\ \mathbf{0}_{p-r,r} & \mathbf{0}_{p-r,p-r} \end{bmatrix}\mathbf{U}^T. \tag{4.46}$$

Z zależności (4.45) wynika, że jeżeli układ równań (4.17) ma pełen rząd kolumnowy, czyli $q = r$, macierz $\mathbf{K}^T\mathbf{K}$ jest nieosobliwa, a jej wartości własne i wektory własne stanowią odpowiednio: σ_i^2 oraz $\mathbf{v}_i$, $i = 1,\ldots,q$. Mnożąc (4.17) lewostronnie przez $\mathbf{K}^T$, uzyskuje się:

$$\mathbf{K}^T\mathbf{g} = \mathbf{K}^T\mathbf{Kf}, \tag{4.47}$$

skąd:

$$\mathbf{K}^T\mathbf{g} = \mathbf{K}^T\mathbf{Kf}. \tag{4.48}$$

Jest to zwykłe rozwiązanie najmniejszych kwadratów[33, 36, 47, 48].

Z zależności (4.46) wynika, że jeżeli układ równań (4.17) ma pełen rząd wierszowy, czyli $p = r$, macierz $\mathbf{KK}^T$ jest nieosobliwa, a jej wartości własne i wektory własne stanowią odpowiednio: σ_i^2 oraz $\mathbf{u}_i$, $i = 1,\ldots,p$. Przez podstawienie można sprawdzić, że rozwiązanie (4.35) przybiera w tym przypadku postać:

$$\mathbf{f}_{MN} = \mathbf{K}^T\left(\mathbf{KK}^T\right)^{-1}\mathbf{g}. \tag{4.49}$$

Jest to zwykłe rozwiązanie z minimalną normą.

4.3. Słabe uwarunkowanie zagadnienia odwrotnego w dyskretnej postaci

Następstwem słabego uwarunkowania zagadnienia odwrotnego sformułowanego za pomocą równania całkowego (1.6) jest słabe uwarunkowanie numeryczne układu równań (4.17), stanowiącego dyskretną postać równania (1.6) [33, 36, 34, 1].

Macierz $\mathbf{K}$ reprezentuje operator liniowy K_{dyskr} będący dyskretną aproksymacją operatora całkowego K zdefiniowanego równaniem (3.6). W związku z tym operator K_{dyskr} wykazuje własności analogiczne do własności operatora K. Mianowicie operator K_{dyskr} powoduje wygładzanie wektora $\mathbf{f}$, tzn. ma właściwość filtrowania z niego wielkoczęstotliwościowych oscylacji oraz gwałtownych zmian wartości. Ściślej sformułować to można w postaci dwóch ogólnych własności[34]:

- wartości osobliwe σ_n operatora K_{dyskr} bardzo szybko maleją ze wzrostem indeksu *n*, zbliżając się do zera,
- wektory osobliwe $\mathbf{u}_n$ oraz $\mathbf{v}_n$ wraz ze wzrostem indeksu *n* prezentują coraz bardziej oscylacyjny przebieg, tzn. wykazują coraz więcej zmian znaków.

Analogicznie, jak w przypadku operatora K, dane pomiarowe są mało czułe na wielkoczęstotliwościowe oscylacje w wektorze $\mathbf{f}$ nawet, gdy mają one znaczną amplitudę. Z kolei rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego działa w przeciwną stronę – wiąże się ze znacznym wzmocnieniem wielkoczęstotliwościowych oscylacji występujących w wektorze $\mathbf{g}$ [34, 36]. Ponieważ $f'_{1,n}$ i $g'_{1,n}$ stanowią współczynniki rozwinięcia wektorów odpowiednio $\mathbf{f}$ i $\mathbf{g}$ na ortogonalne składowe oscylacyjne o rosnących częstotliwościach zgodnie ze wzorami odpowiednio (4.23) i (4.22), wzmocnienie to wynika z faktu, że współczynniki $f'_{1,n}$ o dużych indeksach *n* są rezultatem dzielenia współczynników $g'_{1,n}$ przez znikomo małe wartości osobliwe σ_n we wzorze (4.26) [34, 36].

Uwzględnienie w analizie addytywnych losowych błędów pomiarowych oraz błędów zaokrągleń zakłócających dane pomiarowe $\mathbf{g}$ następuje poprzez zastąpienie wektora $\mathbf{g}$ będącego wyjściem idealnego modelu (4.17) przez wektor rzeczywistych danych pomiarowych [34, 36]:

$$\tilde{\mathbf{g}} = \mathbf{g} + \mathbf{e}, \tag{4.50}$$

gdzie $\mathbf{e}$ – wektor reprezentujący zakłócenia addytywne (proces stochastyczny). Równanie (4.17) przyjmuje w tej sytuacji postać [34, 36, 39]:

$$\tilde{\mathbf{g}} = \mathbf{K}\mathbf{f} + \mathbf{e}. \tag{4.51}$$

Wektor $\hat{\mathbf{f}}_{LSMN}$ wyznaczony na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$ stanowi jedynie pewne przybliżenie wektora prawdziwego rozwiązania $\mathbf{f}_{LSMN}$ [36]. Zastępując $\mathbf{g}$ przez $\tilde{\mathbf{g}}$ we wzorze (4.39) oraz uwzględniając zależność (4.50) uzyskuje się:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{f}}_{LSMN} &= \sum_{n=1}^{r} \frac{\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle}{\sigma_n} \mathbf{v}_n = \sum_{n=1}^{r} \frac{\langle \mathbf{g} + \mathbf{e}, \mathbf{u}_n \rangle}{\sigma_n} \mathbf{v}_n \\ &= \sum_{n=1}^{r} \frac{\langle \mathbf{g}, \mathbf{u}_n \rangle}{\sigma_n} \mathbf{v}_n + \sum_{n=1}^{r} \frac{\langle \mathbf{e}, \mathbf{u}_n \rangle}{\sigma_n} \mathbf{v}_n .\end{aligned} \tag{4.52}$$

Wynika stąd, że błąd rozwiązania $\hat{\mathbf{f}}_{LSMN}$ w stosunku do prawdziwego rozwiązania $\mathbf{f}_{LSMN}$ stanowi składnik:

$$\mathbf{r} = \sum_{n=1}^{r} \frac{\langle \mathbf{e}, \mathbf{u}_n \rangle}{\sigma_n} \mathbf{v}_n . \tag{4.53}$$

Wyrażenie (4.52) można więc zapisać w postaci:

$$\hat{\mathbf{f}}_{LSMN} = \mathbf{f}_{LSMN} + \mathbf{r}. \tag{4.54}$$

Analogicznie, jak w przypadku operatora całkowego K, szum reprezentowany przez wektor $\mathbf{e}$ charakteryzuje się przebiegiem szybkozmiennym, co powoduje że współczynniki jego rozwinięcia na wektory osobliwe $\mathbf{u}_n - \langle \mathbf{e}, \mathbf{u}_n \rangle$ przyjmują istotne wartości nawet dla znacznych *n*, bardzo wolno maleją one ze wzrostem *n*, a często pozostają stałe lub nawet rosną przy zwiększającym się *n*. Jednocześnie wolny od zakłóceń wektor $\mathbf{g}$ reprezentuje funkcją gładką, co sprawia, że współczynniki jego rozwinięcia na wektory osobliwe $\mathbf{u}_n - \langle \mathbf{g}, \mathbf{u}_n \rangle$ szybko maleją ze wzrostem *n*. W związku z tym, głównie wielkoczęstotliwościowe oscylacje szumu $\mathbf{e}$ zostają silnie wzmocnione w procesie rozwiązywania zagadnienia odwrotnego za sprawą dzielenia we wzorze (4.53) współczynników $\langle \mathbf{e}, \mathbf{u}_n \rangle$ przez znikomo małe wartości osobliwe σ_n odpowiadające dużym indeksom *n*. Powoduje to, że jedynie dla małych *n* wartości współczynników rozwinięcia wektora $\hat{\mathbf{f}}_{LSMN}$ na wektory osobliwe $\mathbf{v}_n - \langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle / \sigma_n$ są zbliżone do wartości $\langle \mathbf{g}, \mathbf{u}_n \rangle / \sigma_n$ odpowiadających prawdziwemu rozwiązaniu $\mathbf{f}_{LSMN}$. Dla dużych *n* wartości współczynników $\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle / \sigma_n$ w coraz większym stopniu zdominowane są przez wielkoczęstotliwościowe składowe błędu $\langle \mathbf{e}, \mathbf{u}_n \rangle / \sigma_n$, ponieważ współczynniki $\langle \mathbf{g}, \mathbf{u}_n \rangle / \sigma_n$ prawdziwego rozwiązania $\mathbf{f}_{LSMN}$ szybko maleją ze wzrostem *n*. Zjawisko to prowadzi ostatecznie do olbrzymiego wzrostu wielkości błędu rozwiązania $\|\mathbf{r}\|$ dla nawet niewielkich wartości błędów pomiarowych $\|\mathbf{e}\|$, co oznacza słabe uwarunkowanie [33, 36, 34].

Reasumując, za słabe uwarunkowanie dyskretnej postaci zagadnienia odwrotnego (4.17) odpowiedzialne jest wygładzające działanie operatora liniowego re-

prezentowanego przez macierz $\mathbf{K}$ przejawiające się bardzo szybkim zmniejszaniem się jego wartości osobliwych σ_n przy wzroście *n*. Sprawia to, że w rozwiązaniu $\mathbf{f}_{LSMN}$ największemu wzmocnieniu podlegają wielkoczęstotliwościowe składowe szumu $\mathbf{e}$ [33, 36, 34].

Stopień słabego uwarunkowania problemu narasta, gdy zwiększa się szybkość zmniejszania się wartości osobliwych σ_n przy wzroście *n* w stosunku do szybkości zmniejszania się współczynników $\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle$ [33,34]. Uwarunkowanie zagadnienia pogarsza się wraz ze zwiększaniem się wartości wyrażenia[33,34]:

$$C_{Picard} = \sum_{n=1}^{r} \left| \frac{\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle}{\sigma_n} \right|^2 . \tag{4.55}$$

Za formalny warunek dobrego uwarunkowania przyjmuje się dyskretne kryterium Picarda, które stwierdza, że aby zagadnienie wykazywało dobre uwarunkowanie, współczynniki fourierowskie $\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle$ muszą zanikać szybciej niż wartości osobliwe σ_n macierzy $\mathbf{K}$ [33,34]. Problem odwrotny w postaci dyskretnej (4.17) spełnia dyskretne kryterium Picarda, jeżeli odpowiadający mu problem ciągły (3.6) spełnia ciągłe kryterium Picarda (3.19) [36].

Liczbową miarą uwarunkowania numerycznego układu równań (4.17) jest liczba warunkowa macierzy $\mathbf{K}$ zdefiniowana jako stosunek największej do najmniejszej wartości osobliwej macierzy $\mathbf{K}$ [36, 49]:

$$\kappa_2(\mathbf{K}) = \sigma_1 / \sigma_r . \tag{4.56}$$

W związku z bardzo szybkim zmniejszaniem się wartości osobliwych σ_n przy wzroście *n* liczba warunkowa osiąga olbrzymie wartości, co jest oznaką bardzo słabego uwarunkowania układu równań (4.17) [36].

Małe wartości osobliwe macierzy $\mathbf{K}$ świadczą o tym, że macierz ta jest bliska macierzy osobliwej, co oznacza, że jej wiersze są wzajemnie niemal liniowo zależne oraz jej kolumny są wzajemnie niemal liniowo zależne[34, 36].

Małe wartości osobliwe σ_n dla dużych *n* powodują, że układ równań (4.17) jest bliski układowi niedookreślonemu[36]. Znaczna niepewność rozwiązania $\mathbf{f}_{LSMN} - \Delta\mathbf{f}_{LSMN}$ przy niewielkiej nawet niepewności danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}} - \Delta\tilde{\mathbf{g}}$ jakościowo traktowana może być jako efekt tego, że warunek spełniania przez wektor $\mathbf{f}_{LSMN}$ układu równań (4.17), czyli warunek jego zgodności z danymi pomiarowymi $\tilde{\mathbf{g}}$, nie określa w sposób dokładny i jednoznaczny tego wektora. Istnieje bowiem cały szeroki przedział wektorów $[\mathbf{f}_{LSMN} - \Delta\mathbf{f}_{LSMN}, \mathbf{f}_{LSMN} + \Delta\mathbf{f}_{LSMN}]$ spełniających układ równań (4.17) z zadaną dobrą dokładnością $\Delta\tilde{\mathbf{g}}$ [36]. Uzyskanie jednoznacznie określonego rozwiązania zagadnienia odwrotnego wymaga uzupełnienia układu równań (4.17), wyrażającego

warunek zgodności rozwiązania z danymi pomiarowymi, przez dodatkowy warunek nałożony *a priori* na poszukiwane rozwiązanie. W procesie rozwiązywania problemu konieczne jest więc zastosowanie dodatkowej informacji apriorycznej o rozwiązaniu[36, 50].

4.4. Regularyzacja zagadnienia odwrotnego w dyskretnej postaci

Jak wykazano w rozdziale 4.3, słabe uwarunkowanie zagadnienia odwrotnego wyrażonego układem równań (4.17) ma swoje źródło w wygładzających właściwościach operatora liniowego reprezentowanego przez macierz $\mathbf{K}$, czego przejawem jest bardzo szybkie zmniejszanie się wartości osobliwych σ_n tego operatora przy wzroście *n*. Powoduje to, że wnoszone przez szum wielkoczęstotliwościowe oscylacje w danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$ podlegają niezwykle silnemu wzmocnieniu w rozwiązaniu $\hat{\mathbf{f}}_{LSMN}$, w efekcie czego rozwiązania te posiadają nierealistycznie oscylacyjny przebieg. W związku z tym, naturalnym warunkiem, który należy nałożyć *a priori* na poszukiwane rozwiązanie w celu jego dookreślenia i przez to poprawy uwarunkowania zagadnienia, jest warunek gładkości funkcji $f(a)$ reprezentowanej przez wektor $\hat{\mathbf{f}}$[33, 34, 36]. Warunek ten wynika z apriorycznej wiedzy, według której funkcje rozkładu wielkości cząstek fazy zdyspergowanej układów dyspersyjnych $f(a)$ są funkcjami gładkimi[36]. Można zastosować różne ilościowe miary gładkości funkcji $f(a)$. Uwzględnienie warunku gładkości rozwiązania $f(a)$ powoduje, że zamiast rozwiązania najmniejszych kwadratów z minimalną normą $\mathbf{f}_{LSMN}$ oryginalnego słabo uwarunkowanego problemu (4.17) znajdowane jest rozwiązanie najmniejszych kwadratów z minimalną normą innego lecz bliskiego mu problemu charakteryzującego się lepszym uwarunkowaniem. Zagadnienie to zwane jest zagadnieniem zregularyzowanym, a jego rozwiązanie – rozwiązaniem zregularyzowanym $\mathbf{f}_{LSMNReg}$[33, 34, 36, 50-53].

Niezależnie od przyjętej miary gładkości funkcji $f(a)$, warunek gładkości uwzględnić można ogólnie poprzez wprowadzenie odpowiednich współczynników wagowych t_n, $n = 1, \ldots, r$ do rozwiązania (4.35) lub równoważnego (4.39), co daje następujące rozwiązanie zregularyzowane[33, 34, 36, 54-56]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{LSMNReg} = \sum_{n=1}^{r} t_n \frac{\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle}{\sigma_n} \mathbf{v}_n . \tag{4.57}$$

Współczynniki wagowe t_n zwane są również współczynnikami filtrującymi[33, 34, 36, 54, 55]. Definiując macierz diagonalną:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & t_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & t_r \end{bmatrix}, \tag{4.58}$$

rozwiązanie zregularyzowane można zapisać w postaci[33]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{LSMNReg} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} \mathbf{T}\boldsymbol{\Sigma}^{-1} & \mathbf{0}_{r,p-r} \\ \mathbf{0}_{q-r,r} & \mathbf{0}_{q-r,p-r} \end{bmatrix} \mathbf{U}^T \tilde{\mathbf{g}}. \tag{4.59}$$

Przyjmując oznaczenie[33]:

$$\mathbf{K}^{\#} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} \mathbf{T}\boldsymbol{\Sigma}^{-1} & \mathbf{0}_{r,p-r} \\ \mathbf{0}_{q-r,r} & \mathbf{0}_{q-r,p-r} \end{bmatrix} \mathbf{U}^T \tag{4.60}$$

można zapisać[33]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{LSMNReg} = \mathbf{K}^{\#} \tilde{\mathbf{g}}. \tag{4.61}$$

Macierz $\mathbf{K}^{\#}$ nazywana jest macierzą regularyzacji[33]. Współczynniki filtrujące często, choć nie zawsze, spełniają warunek[33]:

$$0 \le t_n \le 1, \qquad n = 1, \ldots, r. \tag{4.62}$$

Macierz $\mathbf{T}$ w pełni charakteryzuje daną procedurę regularyzacji.

Operację wygładzania przy wyznaczaniu rozwiązania $\mathbf{f}_{LSMNReg}$ w oparciu o wzór (4.57) realizuje się poprzez odpowiedni dobór współczynników filtrujących t_n. W związku z apriorycznym założeniem o gładkości funkcji $f(a)$ współczynniki rozwinięcia (4.39) prawdziwego rozwiązania $\mathbf{f}_{LSMN}$ na wektory osobliwe $\mathbf{v}_n$ stojące przy wielkoczęstotliwościowych wektorach $\mathbf{v}_n$ o większych indeksach $n - \langle \mathbf{g}, \mathbf{u}_n \rangle / \sigma_n$ powinny posiadać małe wartości. Jak wynika z zależności (4.52), obserwowane w rzeczywistości olbrzymie wartości współczynników rozwinięcia rozwiązania $\mathbf{f}_{LSMN}$ na wektory osobliwe $\mathbf{v}_n$ o większych indeksach $n - \langle \mathbf{g}, \mathbf{u}_n \rangle / \sigma_n$ są zdominowane przez składową $\langle \mathbf{e}, \mathbf{u}_n \rangle / \sigma_n$ pochodzącą od szumu, która dla dużych *n* jest ciągle znaczna w związku z oscylacyjnym przebiegiem szumu i istotnie przewyższa składową $\langle \mathbf{g}, \mathbf{u}_n \rangle / \sigma_n$ pochodzącą od gładkiej nie zakłóconej funkcji $g(y)$. Zatem współczynniki rozwinięcia $\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle / \sigma_n$ dla dużych *n* niosą znikomą informację o prawdziwym rozwiązaniu $\mathbf{f}_{LSMN}$ i reprezentują błąd tego rozwiązania $\mathbf{r}$ pochodzący od szumu $\mathbf{e}$. Stąd odpowiednie wytłumienie – „odfiltrowanie" składników $\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle \mathbf{v}_n / \sigma_n$ dla dużych *n* istotnie zmniejsza niepewność rozwiązania $\mathbf{f}_{LSMN}$, powodując nieznaczną tylko utratę informacji niesionej przez dane pomiarowe $\tilde{\mathbf{g}}$ [36]. Wynika stąd, że współczynniki filtrujące powinny

być dobrane tak, by w największym stopniu tłumione były wielkoczęstotliwościowe wyrazy rozwinięcia (4.52) rozwiązania $\ddot{\mathbf{f}}_{LSMN}$ na wektory osobliwe $\mathbf{v}_n$ odpowiadające większym indeksom *n*, lub równoważnie mniejszym wartościom osobliwym σ_n [36]. Filtracja powinna minimalizować utratę informacji niesionej przez dane pomiarowe $\tilde{\mathbf{g}}$, jednocześnie w jak największym stopniu eliminując z rozwiązania oscylacyjne artefakty, a tym samym zmniejszając niepewność tego rozwiązania[36]. Zaproponowano wiele sposobów doboru współczynników filtracji [33, 34, 36, 54-56].

4.4.1. Regularyzacja Tichonowa

W regularyzacji Tichonowa współczynniki filtrujące określone są przez wyrażenie [33, 34, 36, 51-53]:

$$t_n = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_n^2 + \lambda^2}, \qquad n = 1, \ldots, r, \tag{4.63}$$

gdzie $\lambda > 0$ to parametr regularyzacji.

Można wykazać, że w przypadku, gdy macierz $\mathbf{K}$ posiada pełen rząd kolumnowy, czyli $r = q < p$, rozwiązanie zregularyzowane dane wzorem (4.59) przy współczynnikach filtrujących (4.63) jest wektorem $\ddot{\mathbf{f}}_{LSTich}$ o postaci[33, 34, 36, 51-53]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{LSTich} = \arg\min_{\mathbf{f}} \left\{ \left\| \tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{K}\mathbf{f} \right\|_2^2 + \lambda^2 \left\| \mathbf{f} \right\|_2^2 \right\}. \tag{4.64}$$

Najbardziej ogólną postać zregularyzowanego rozwiązania Tichonowa określa wzór[33, 34, 36, 51-53, 57, 58]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{LSTich} = \arg\min_{\mathbf{f}} \left\{ \left\| \tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{K}\mathbf{f} \right\|_2^2 + \lambda^2 \left\| \mathbf{L}\left(\mathbf{f} - \mathbf{f}^*\right) \right\|_2^2 \right\}, \tag{4.65}$$

gdzie: $\mathbf{L}$ to macierz o liczbie kolumn q, $\mathbf{f}^*$ to rozwiązanie zagadnienia odwrotnego założone *a priori*.

Dla $\mathbf{L} = \mathbf{I}_q$, gdzie $\mathbf{I}_q$ – macierz jednostkowa o wymiarze $q \times q$ oraz $\mathbf{f}^* = \mathbf{0}_q$ rozwiązanie (4.65) przyjmuje szczególną postać (4.64). Stosując odpowiednie transformacje, możliwe jest przekształcenie postaci ogólnej zagadnienia (4.65) w tzw. postać standardową daną wyrażeniem [34]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{LSTich,std} = \arg\min_{\mathbf{f}} \left\{ \left\| \bar{\tilde{\mathbf{g}}} - \bar{\mathbf{K}}\bar{\mathbf{f}} \right\|_2^2 + \lambda^2 \left\| \bar{\mathbf{f}} - \bar{\mathbf{f}}^* \right\|_2^2 \right\}, \tag{4.66}$$

gdzie pozioma kreska nad symbolami wektorów i macierzy oznacza ich postacie po transformacji.

Zagadnienie minimalizacyjne (4.65) można przedstawić jako problem minimalizacji funkcji [36, 57, 58]:

$$J(\mathbf{f}) = \left\| \mathbf{L}\left(\mathbf{f} - \mathbf{f}^*\right) \right\|_2^2 \tag{4.67}$$

z ograniczeniem nierównościowym [58, 57]:

$$\left\| \tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{K}\mathbf{f} \right\|_2^2 < \varepsilon. \tag{4.68}$$

gdzie $\varepsilon > 0$ – zadana niewielka wartość. Zatem:

$$\hat{\mathbf{f}}_{LSTich} = \min_{\mathbf{f}:\left\|\tilde{\mathbf{g}}-\mathbf{K}\mathbf{f}\right\|_2^2<\varepsilon} \left\{ J(\mathbf{f}) \right\}. \tag{4.69}$$

Wyrażenie (4.65) stanowi rezultat przekształcenia zagadnienia minimalizacji z ograniczeniem (4.69) w zagadnienie minimalizacji bez ograniczeń z zastosowaniem metody mnożników Lagrange'a. Rolę mnożnika Lagrange'a spełnia w tym przypadku parametr regularyzacji [58, 57].

Ze wzoru (4.69) wynika, że zregularyzowanym rozwiązaniem zagadnienia odwrotnego (4.17) jest wektor $\mathbf{f}_{LSTich}$, który minimalizuje funkcję $J(\mathbf{f})$, zapewniając jednocześnie ustaloną niewielką wartość odchylenia wyjścia modelu dla rozwiązania $\mathbf{f}_{LSTich} - \mathbf{K}\mathbf{f}_{LSTich}$ od rzeczywistych danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$, zgodnie z warunkiem (4.68). Wyrażenie $\left\| \tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{K}\mathbf{f} \right\|_2^{\varepsilon}$ stanowi wielkość minimalizowaną przez zwykłe rozwiązanie najmniejszych kwadratów (4.48) i stanowi miarę zgodności rozwiązania $\mathbf{f}_{LS}$ z danymi pomiarowymi $\tilde{\mathbf{g}}$. W rezultacie słabego uwarunkowania rozwiązanie $\mathbf{f}_{LS}$ charakteryzuje się olbrzymią niepewnością $\Delta\mathbf{f}_{LS}$, co jakościowo traktować można jako niejednoznaczność rozwiązania $\mathbf{f}_{LS}$, ponieważ istnieje cały szeroki przedział wektorów $[\mathbf{f}_{LS} - \Delta\mathbf{f}_{LS}, \mathbf{f}_{LS} + \Delta\mathbf{f}_{LS}]$ spełniających warunek (4.68), czyli zgodnych z danymi pomiarowymi z dokładnością do ε [36]. W procedurze regularyzacji z całego szerokiego zakresu wektorów $\mathbf{f}_{LS}$ wybiera się ten, który spełnia nałożony *a priori* warunek minimalizacji funkcji $J(\mathbf{f})$. Wyrażenie $J(\mathbf{f})$ stanowi miarę odstępstwa wektora $\mathbf{f}$ od apriorycznie założonego charakteru. Zatem warunek minimalizacji przez poszukiwane rozwiązanie odstępstwa od apriorycznie ustalonej charakterystyki dookreśla to rozwiązanie, zmniejszając jego niepewność. Funkcja $J(\mathbf{f})$ nazywana jest funkcją kary [33, 51-53].

Jak uzasadniono we wcześniejszych rozważaniach, założoną *a priori* charakterystyką poszukiwanego rozwiązania $\mathbf{f}_{LSTich}$ powinna być gładkość funkcji $f_{LSTich}(a)$. Miarę braku gładkości funkcji $f(a)$ ogólnie wyrazić można wzorem (4.67) dla $\mathbf{f}^* = \mathbf{0}_q$, czyli [33, 36, 34 57, 58]:

$$J(\mathbf{f}) = \left\| \mathbf{L}\mathbf{f} \right\|_2^2. \tag{4.70}$$

Najczęściej stosowanymi miarami są [33, 36, 34 57, 58]:

- norma euklidesowa wektora $\mathbf{f}$, której odpowiada macierz:

$$\mathbf{L} = \mathbf{I}_q, \tag{4.71}$$

- norma euklidesowa wektora różnic s-tego rzędu wektora $\mathbf{f}$, której odpowiada macierz pasmowa o wymiarze $(q-s)\times q - \mathbf{L}_{s,(q-s)\times q}$. Dla kilku początkowych s macierz ta przyjmuje następujące postacie [33, 57]:

  - dla $s=1$:

$$\mathbf{L}_{1,(q-1)\times q} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \tag{4.72}$$

  - dla $s=2$:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{2,(q-2)\times q} &= \mathbf{L}_{1,(q-2)\times(q-1)}\mathbf{L}_{1,(q-1)\times q} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{4.73}$$

  - dla $s=3$:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{3,(q-3)\times q} &= \mathbf{L}_{1,(q-3)\times(q-2)}\mathbf{L}_{2,(q-2)\times q} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & -3 & 3 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -3 & 3 & -1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 1 & -3 & 3 & 3 & -1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{4.74}$$

  przy czym:

$$\mathbf{L}_{s,(q-s)\times q} = \mathbf{L}_{1,(q-s)\times(q-s+1)}\mathbf{L}_{s-1,(q-s+1)\times q}. \tag{4.75}$$

Dla $\mathbf{f}^* \neq \mathbf{0}_q$ funkcja kary $J(\mathbf{f})$ stanowi miarę odstępstwa wektora $\mathbf{f}$ od założonego *a priori* rozwiązania $\mathbf{f}^*$. Jeżeli $\mathbf{L} = \mathbf{I}_q$, to odstępstwo mierzone jest normą euklidesową wektora różnicy $(\mathbf{f} - \mathbf{f}^*)$.

Można wykazać, że rozwiązaniem problemu (4.65) jest[57]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{LSTich} = \left(\mathbf{K}^T\mathbf{K} + \lambda\mathbf{L}\right)^{-1}\left(\mathbf{K}^T\tilde{\mathbf{g}} + \lambda\mathbf{L}\mathbf{f}^*\right). \tag{4.76}$$

Należy zauważyć, że dla $\lambda = 0$ zregularyzowane zagadnienie odwrotne (4.65) przechodzi w wyjściowe słabo uwarunkowane zagadnienie wyznaczania zwykłego rozwiązania najmniejszych kwadratów (4.48) układu równań (4.17). Fakt ten uzasadnia nazywanie rozwiązania zregularyzowanego jako rozwiązania najmniejszych kwadratów z karą. Wraz ze wzrostem parametru regularyzacji λ problem zregularyzowany coraz bardziej różni się od problemu oryginalnego, co sprawia, że rozwiązanie zregularyzowane $\hat{\mathbf{f}}_{LSTich}$ wykazuje coraz większe odstępstwo od prawdziwego rozwiązania najmniejszych kwadratów (4.48). Jednocześnie jednak zwiększanie parametru λ powoduje poprawę uwarunkowania numerycznego zagadnienia zregularyzowanego[33, 34, 36]. Wynika to bezpośrednio z następującego rozumowania. Zapisując wzór (4.63) w postaci:

$$t_n = \frac{1}{1 + \left(\dfrac{\lambda}{\sigma_n}\right)^2}, \qquad n = 1, \ldots, r, \tag{4.77}$$

zauważa się, że współczynniki filtrujące t_n maleją wraz ze wzrostem λ w stopniu tym większym im mniejsza jest odpowiadająca temu współczynnikowi wartość osobliwa σ_n. Oznacza to silniejsze tłumienie wyrazów rozwinięcia (4.57) o większych *n*, a w związku z tym – minimalizację wielkości błędu rozwiązania $\|\mathbf{r}\|^2$ przy zadanej wielkości szumu $\|\mathbf{e}\|^2$ w danych pomiarowych.

Reasumując, parametr regularyzacji λ powinien być dobierany w drodze kompromisu pomiędzy zgodnością rozwiązania z danymi pomiarowymi w sensie wielkości $\|\tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{K}\mathbf{f}\|_2^2$ a uwarunkowaniem zregularyzowanego zagadnienia odwrotnego[36].

4.4.2. Regularyzacja Tichonowa z ograniczeniami

Klasyczna regularyzacja Tichonowa nie uwzględnia dwóch ograniczeń fizycznych, które powinna spełniać szukana funkcja rozkładu wielkości cząstek fazy zdyspergowanej układu dyspersyjnego $f(a)$:

- warunku nieujemności funkcji $f(a)$:

$$f(a) \geq 0 \text{ dla każdego } a \in (0, \infty), \tag{4.78}$$

- warunku unormowania funkcji $f(a)$ do jedności:

$$\int_0^\infty f(a)\,da = 1. \tag{4.79}$$

Dyskretnymi odpowiednikami tych ograniczeń są odpowiednio:

- dyskretny warunek nieujemności:

$$\mathbf{f} \geq \mathbf{0}_q, \tag{4.80}$$

- dyskretny warunek unormowania do jedności, który uzyskuje się przez założenie, że funkcja $f(a)$ przyjmuje znaczne wartości jedynie w pewnym ograniczonym przedziale $[a_{\min}, a_{\max}]$, a poza nim jej wartości są zaniedbywalnie małe, co umożliwia zastąpienie występującej w równaniu (4.79) całki w przedziale $[0,\infty)$ za pomocą całki w skończonym przedziale $[a_{\min}, a_{\max}]$:

$$\int_0^\infty f(a)\,da \approx \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} f(a)\,da, \tag{4.81}$$

którą następnie można aproksymować za pomocą kwadratury numerycznej:

$$\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} f(a)\,da \approx \sum_{j=1}^{q} w_j f(a_j). \tag{4.82}$$

Po uwzględnieniu wyrażeń (4.81) i (4.82), dyskretny warunek unormowania do jedności przyjmuje postać:

$$\mathbf{w}^T\mathbf{f} = 1, \tag{4.83}$$

gdzie:

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \cdots & w_q \end{bmatrix}^T. \tag{4.84}$$

Nieuwzględnienie podanych warunków powoduje, że klasyczna regularyzacja Tichonowa nie zapewnia uzyskania rozwiązań posiadających sens fizyczny – nieujemnych i unormowanych do jedności[36].

Zregularyzowane rozwiązanie Tichonowa stanowi rozwiązanie problemu minimalizacji bez ograniczeń (4.65). Uwzględnienie w tym problemie ograniczeń (4.83) oraz (4.84) prowadzi do zagadnienia minimalizacji z ograniczeniami. Dla $\mathbf{f}^* = \mathbf{0}_q$ otrzymuje się następujące wyrażenie określające zregularyzowane rozwiązanie Tichonowa z ograniczeniami, zwane również rozwiązaniem najmniejszych kwadratów z karą i ograniczeniami:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{f}}_{LSTichOgr} &= \arg\min_{\mathbf{f}}\left\{\left(\tilde{\mathbf{g}}-\mathbf{Kf}\right)^T\left(\tilde{\mathbf{g}}-\mathbf{Kf}\right)+\lambda^2\left(\mathbf{Lf}\right)^T\left(\mathbf{Lf}\right)\right\}\\ &= \arg\min_{\mathbf{f}}\left\{\tilde{\mathbf{g}}^T\tilde{\mathbf{g}}-2\tilde{\mathbf{g}}^T\mathbf{Kf}+\mathbf{f}^T\mathbf{K}^T\mathbf{Kf}+\lambda^2\mathbf{f}^T\mathbf{L}^T\mathbf{Lf}\right\}\\ &= \arg\min_{\mathbf{f}}\left\{\mathbf{f}^T\left(\mathbf{K}^T\mathbf{K}+\lambda^2\mathbf{L}^T\mathbf{L}\right)\mathbf{f}-2\tilde{\mathbf{g}}^T\mathbf{Kf}\right\},\end{aligned} \tag{4.85}$$

przy ograniczeniach (4.80) i (4.83) (6.4.2.3). Oznaczając:

$$\mathbf{A} = 2\left(\mathbf{K}^T\mathbf{K}+\lambda^2\mathbf{L}^T\mathbf{L}\right), \tag{4.86}$$

$$\mathbf{b} = -2\mathbf{K}^T\tilde{\mathbf{g}}, \tag{4.87}$$

wyrażeniu (4.85) można nadać postać:

$$\hat{\mathbf{f}}_{LSTichOgr} = \arg\min_{\mathbf{f}}\left\{\tfrac{1}{2}\mathbf{f}^T\mathbf{Af}+\mathbf{b}^T\mathbf{f}\right\}. \tag{4.88}$$

Z postaci wzoru (4.88) oraz ograniczeń (4.80) i (4.83) wynika, że rozważany problem minimalizacji z ograniczeni stanowi zagadnienie programowania kwadratowego[59, 60]. W związku z tym, do wyznaczenia zregularyzowanego rozwiązania Tichonowa z ograniczeniami. można się posłużyć standardowymi technikami programowania kwadratowego. W badaniach prowadzonych przez autora zastosowano metodę aktywnego zbioru.

4.4.3. Obcięty rozkład na wartości osobliwe

Rozwiązanie oparte na obciętym rozkładzie na wartości osobliwe (*Truncated Singular Value Decomposition*, TSVD) uzyskuje się poprzez zastosowanie współczynników filtrujących danych wzorem[33, 34, 36, 56, 61]:

$$t_n = \begin{cases}1, & n \le l,\\ 0, & n > l,\end{cases} \tag{4.89}$$

gdzie $l \le r$ jest ustaloną *a priori* liczbą.

Uwzględniając wzór (4.89) w wyrażeniu (4.63), uzyskuje się zregularyzowane rozwiązanie TSVD[33, 34, 36]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{TSVD} = \sum_{n=1}^{l}\frac{\left\langle\tilde{\mathbf{g}},\mathbf{u}_n\right\rangle}{\sigma_n}\mathbf{v}_n. \tag{4.90}$$

Jak wynika ze wzoru (4.90), rozwiązanie TSVD powstaje poprzez obcięcie rozwinięcia (4.52), określającego rozwiązanie $\hat{\mathbf{f}}_{LSMN}$, na wyrazie *l*. W ten sposób *l* pierwszych wyrazów o indeksach $n = 1,\ldots,l$ pozostaje nie zmienionych, natomiast następne

$(r-l)$ o indeksach $n=l+1,...,r$ zostaje zaniedbanych w rozwiązaniu $\hat{\mathbf{f}}_{TSVD}$ [33, 34, 36]. Zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami powoduje to poprawę uwarunkowania rozwiązania kosztem niewielkiej utraty informacji zawartej w pominiętych wyrazach rozwinięcia (4.52) [36].

Obcięcie rozwinięcia (4.52) wiąże się z wygładzeniem zregularyzowanego rozwiązania $\hat{\mathbf{f}}_{TSVD}$ w stopniu tym większym, im mniejsza jest liczba l uwzględnianych w tym rozwinięciu wyrazów. Procedura obcięcia stanowi więc formę wiedzy apriorycznej dotyczącej gładkości rozwiązania, a liczba l ilościową postać tej informacji.

Wielkość l stanowi parametr regularyzacji dla rozwiązania TSVD. Podobnie, jak parametr λ w regularyzacji Tichnowa, wartość l powinna być dobierana w drodze kompromisu pomiędzy zgodnością rozwiązania z danymi pomiarowymi w sensie wielkości $\|\tilde{\mathbf{g}}-\mathbf{K}\mathbf{f}\|_2$ a uwarunkowaniem zregularyzowanego zagadnienia odwrotnego. Zmniejszanie parametru l powoduje poprawę uwarunkowania kosztem pogorszenia zgodności rozwiązania z danymi pomiarowymi[36, 62].

4.4.4. Dobór parametru regularyzacji

Istnieje wiele procedur doboru parametrów regularyzacji, podejmujących próbę ustalenia kompromisu pomiędzy zgodnością rozwiązania z danymi pomiarowymi a uwarunkowaniem zregularyzowanego zagadnienia odwrotnego[33, 34, 36, 62-64]. Metody te stosowane są do poszukiwania optymalnych wartości zarówno parametrów zmieniających się w sposób ciągły, jak parametr λ w regularyzacji Tichonowa, jak i w sposób skokowy, jak będący liczbą naturalną parametr l w rozwiązaniu TSVD. W dalszych rozważaniach parametr regularyzacji oznaczany będzie ogólnie γ.

Zasada rozbieżności

Zasada rozbieżności (*discrepancy principle*) zakłada, że znana jest estymata błędu pomiarowego[33, 34, 36, 65]:

$$\hat{\varepsilon}=\|\hat{\mathbf{e}}\|_2=\|\tilde{\mathbf{g}}-\mathbf{g}\|_2. \tag{4.91}$$

Metoda polega na doborze takiego parametru regularyzacji γ, że euklidesowa norma wektora rezyduów odpowiadającego rozwiązaniu zregularyzowanemu uzyskanemu dla parametru $\gamma-\mathbf{f}_{Reg,\gamma}$ spełnia warunek[33, 34]:

$$\left\|\tilde{\mathbf{g}}-\mathbf{K}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma}\right\|_2=\hat{\varepsilon}. \tag{4.92}$$

Jeżeli kryterium (4.92) spełniane jest przez więcej niż jedną wartość γ, to wybierana jest ta odpowiadająca większemu stopniowi regularyzacji, ponieważ zapewnia

ona lepsze uwarunkowanie zagadnienia poprzez silniejsze wygładzanie rozwiązania[33, 34].

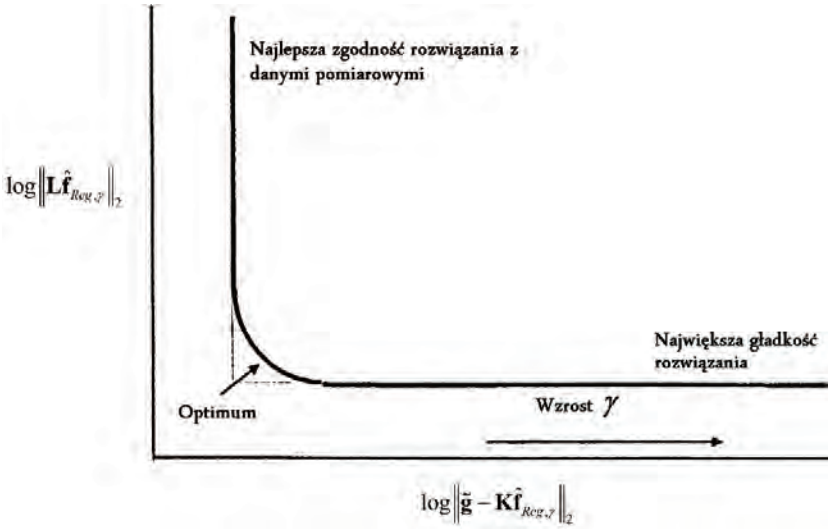
Gdy warunek (4.92) nie jest spełniony w sposób dokładny przez żadną z wartości γ, co typowo ma miejsce w przypadku γ będącego liczbą naturalną (np. w metodzie TSVD), wybierana jest wartość γ minimalizująca różnicę pomiędzy lewą i prawą stroną równania (4.92) [33, 34].

Kryterium krzywej L

Krzywą L (*L-curve*) nazywa się wykres utworzony przez punkty o współrzędnych[33, 34, 36, 63]:

$$\left(\log\left\|\tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{K}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma}\right\|_2, \log\left\|\mathbf{L}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma}\right\|_2\right). \tag{4.93}$$

dla parametru regularyzacji γ zmieniającego się w sposób ciągły lub skokowy w określonym zakresie. Typowy przebieg krzywej L ilustruje Rys. 4.1. Nazwa wykresu wynika z tego, że typowo przybiera on kształt litery „L". Fakt ten wyjaśnić można w oparciu o następujące rozumowanie. Na podstawie wzoru (4.63) dla regularyzacji w postaci standardowej, czyli dla $\mathbf{L} = \mathbf{I}_q$, zachodzi związek[33]:



Rys. 4.1. Typowa postać krzywej *L* [36]

$$\left\|\mathbf{L}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma}\right\|_2^2 = \left\|\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma}\right\|_2^2 = \sum_{n=1}^{r} t_n^2 \frac{\left\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \right\rangle^2}{\sigma_n^2}. \tag{4.94}$$

Ponadto:

$$\mathbf{K}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma} = \mathbf{K}\sum_{n=1}^{r} t_n \frac{\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle}{\sigma_n} \mathbf{v}_n = \sum_{n=1}^{r} t_n \frac{\langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle}{\sigma_n} \mathbf{K}\mathbf{v}_n. \tag{4.95}$$

Uwzględniając zależność (4.43), otrzymuje się:

$$\mathbf{K}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma} = \sum_{n=1}^{r} t_n \langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle \mathbf{u}_n. \tag{4.96}$$

Dla wektora $\tilde{\mathbf{g}}$ można natomiast przedstawić rozwinięcie w bazie ortonormalnej utworzonej przez kolumny macierzy $\mathbf{U}$ pochodzącej z rozkładu macierzy $\mathbf{K}$ na wartości osobliwe:

$$\tilde{\mathbf{g}} = \sum_{n=1}^{p} \langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle \mathbf{u}_n. \tag{4.97}$$

Biorąc pod uwagę wyrażenia (4.96) i (4.97), uzyskuje się:

$$\tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{K}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma} = \sum_{n=1}^{r} (1 - t_n) \langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle \mathbf{u}_n + \sum_{n=r+1}^{p} \langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle \mathbf{u}_n. \tag{4.98}$$

co ostatecznie daje:

$$\left\| \tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{K}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma} \right\|_2^2 = \sum_{n=1}^{r} (1 - t_n)^2 \langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle^2 + \sum_{n=r+1}^{p} \langle \tilde{\mathbf{g}}, \mathbf{u}_n \rangle^2. \tag{4.99}$$

W przypadku, gdy wartości parametru γ odpowiadają niewielkiemu stopniowi regularyzacji, współczynniki filtrujące[33]:

$$t_n \approx 1, \qquad n = 1, \ldots, r. \tag{4.100}$$

W tym zakresie wartości współczynników t_n wyrażenia t_n^2 zmieniają się znacznie szybciej przy niewielkich zmianach t_n niż wyrażenia $(1 - t_n)^2$. Zatem zgodnie ze wzorami (4.94) i (4.99) niewielkie zmiany współczynników t_n wywołane zmianą parametru γ powodują znacznie szybszą zmianę wartości $\log\left\| \tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{K}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma} \right\|_2$ niż wartości $\log\left\| \mathbf{L}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma} \right\|_2$. Odpowiada to niemal pionowemu przebiegowi krzywej L w zakresie wartości parametru γ wiążących się z niewielkim stopniem regularyzacji[33].

W przypadku, gdy wartości parametru γ odpowiadają znacznemu stopniowi regularyzacji, współczynniki filtrujące[33]:

$$t_n \approx 0, \qquad n = 1, \ldots, r. \tag{4.101}$$

W tym zakresie wartości współczynników t_n wyrażenia t_n^2 zmieniają się znacznie wolniej przy niewielkich zmianach t_n niż wyrażenia $(1-t_n)^2$. Zatem zgodnie ze wzorami (4.94) i (4.99) niewielkie zmiany współczynników t_n wywołane zmianą parametru γ powodują znacznie wolniejszą zmianę wartości $\log\|\tilde{\mathbf{g}}-\mathbf{K}\mathbf{f}_{Reg,\gamma}\|_2$ niż wartości $\log\|\mathbf{L}\mathbf{f}_{Reg,\gamma}\|_2$. Odpowiada to niemal poziomemu przebiegowi krzywej L w zakresie wartości parametru γ wiążących się ze znacznym stopniem regularyzacji[33].

Metoda krzywej L poszukuje optymalnej wartości parametru regularyzacji γ jako wartości γ odpowiadającej punktowi leżącemu w rogu krzywej L, tzn. punktowi opowiadającemu maksymalnej krzywiźnie[33, 34, 36, 63].

W przypadku gdy parametr γ jest liczbą naturalną (np. w metodzie TSVD), otrzymuje się wykres złożony z izolowanych punktów, czyli tzw. dyskretną krzywą L. W celu wyznaczenia optymalnej wartości parametru γ, znajduje się ciągłą krzywą L dopasowaną do punktów dyskretnej krzywej L, a następnie wyznacza róg krzywej ciągłej. Punkt dyskretnej krzywej L najbliższy wyznaczonemu rogowi krzywej ciągłej uznaje się za róg dyskretnej krzywej L, a odpowiadającą mu wartość γ za optymalną wartość parametru regularyzacji[34].

Uogólniona walidacja wzajemna

Metoda uogólnionej walidacji wzajemnej (*Generalized Cross-Validation, GCV*) opiera się na spostrzeżeniu, że jeżeli usunięty zostałby dowolnie wybrany element $\tilde{g}_n$, $n=1,\ldots,p$, wektora danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$, rozwiązanie zregularyzowane $\mathbf{f}_{Reg,\gamma}$ powinno umożliwiać poprawne przewidzenie tego elementu[34, 36, 64]. Dodatkowo w podejściu GCV postuluje się, że wybór parametru regularyzacji ma być niezależny od transformacji ortogonalnych wektora $\tilde{\mathbf{g}}$ [34]. Prowadzi to do uznania za optymalną wartość parametru regularyzacji takiej wartości γ, która minimalizuje funkcję[33, 34]:

$$G(\gamma)=\frac{\left\|\tilde{\mathbf{g}}-\mathbf{K}\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma}\right\|_2^2}{\left(\mathrm{tr}\left(\mathbf{I}_p-\mathbf{K}\mathbf{K}_\gamma^{\#}\right)\right)^2}, \tag{4.102}$$

gdzie: $\mathrm{tr}(\mathbf{A})$ to operator wyznaczania śladu macierzy kwadratowej $\mathbf{A}$, $\mathbf{K}_\gamma^{\#}$ to macierz regularyzacji dana wzorem (4.60) dla parametru regularyzacji γ, stosowana do obliczania rozwiązania zregularyzowanego $\mathbf{f}_{Reg,\gamma}$ na podstawie danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$ zgodnie ze wzorem[33, 34]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{Reg,\gamma}=\mathbf{K}_\gamma^{\#}\tilde{\mathbf{g}}. \tag{4.103}$$

Wzór (4.102) używany może być dla parametrów regularyzacji zmieniających się zarówno w sposób ciągły, jak i skokowy[33, 34].

W kategoriach jakościowych uzasadnieniem przyjętej postaci (4.102) minimalizowanej funkcji $G(\gamma)$ jest fakt, że licznik stanowi kwadrat normy euklidesowej wektora rezyduów, będący miarą braku zgodności rozwiązania γ $\mathbf{f}_{Reg,\gamma}$ z danymi pomiarowymi $\tilde{\mathbf{g}}$, natomiast mianownik stanowi miarę stopnia regularyzacji zagadnienia – zwiększa się wraz ze wzrostem stopnia regularyzacji[33]. Minimalizacja funkcji $G(\gamma)$ odpowiada więc osiągnięciu jak najlepszej zgodności rozwiązania $\mathbf{f}_{Reg,\gamma}$ z danymi pomiarowymi $\tilde{\mathbf{g}}$ (minimalizacja licznika) przy jednoczesnym jak najwyższym stopniu regularyzacji (maksymalizacja mianownika)[33]. Wyznaczana w ten sposób wartość parametru regularyzacji, stanowi kompromis pomiędzy zapewnieniem zgodności rozwiązania z danymi pomiarowymi a poprawą uwarunkowania zregularyzowanego zagadnienia odwrotnego.

4.5. Nieliniowe iteracyjne metody inwersyjne

Omawiane dotąd różne odmiany regularyzacji zagadnienia odwrotnego należą do liniowych technik inwersyjnych, ponieważ rozwiązanie zależy w nich w sposób liniowy od wektora danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$ [36, 66-69].

W nieliniowych iteracyjnych metodach inwersyjnych przyjmowane jest pewne rozwiązanie początkowe $\mathbf{f}^{(0)}$ oparte zwykle na posiadanej wiedzy apriorycznej o rozważanym problemie. Następnie rozwiązanie początkowe poddawane jest sukcesywnym udoskonaleniom polegającym na mnożeniu tego rozwiązania w kolejnych iteracjach przez czynniki korekcyjne $c^{(1)}, c^{(2)}, \ldots, c^{(k_{iter})}$, gdzie k_{iter} jest liczbą wszystkich iteracji [36, 66-69]. Zatem rozwiązanie w k-tej iteracji, $\mathbf{f}^{(k)}$, uzyskiwane jest przez pomnożenie rozwiązania z iteracji $(k-1)$-szej, $\mathbf{f}^{(k-1)}$, przez obliczony w iteracji k-tej czynnik korekcyjny $c^{(k)}$ zgodnie z zależnością[36, 66-69]:

$$\mathbf{f}^{(k)} = c^{(k)}\mathbf{f}^{(k-1)} \tag{4.104}$$

Czynniki korekcyjne $c^{(k)}$ wyznaczane są w poszczególnych iteracjach na podstawie danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$, bieżącego rozwiązania $\mathbf{f}^{(k-1)}$ oraz stosowanej informacji apriorycznej. Procedura iteracyjna powinna być zbieżna, czyli rozwiązania otrzymywane w kolejnych iteracjach powinny cechować się coraz lepszą zgodnością z danymi pomiarowymi $\tilde{\mathbf{g}}$ oraz z założoną *a priori* charakterystyką. Rozwiązania $\mathbf{f}^{(k)}$ powinny zbiegać do prawdziwego rozwiązania $\mathbf{f}$ [36, 66-69].

Z uwagi na multiplikatywny charakter iteracyjnych poprawek przebiegających zgodnie ze wzorem (4.104) oraz zależnością czynników korekcyjnych $c^{(k)}$ od bieżącego rozwiązania, metody te określane są jako nieliniowe[36, 66-69].

W badaniach prowadzonych przez zespół Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej stosowane były następujące nieliniowe procedury iteracyjne:

- metoda Twomey'a,
- metoda Twomey'a-Markowskiego.

4.5.1. Metoda Twomey'a

W metodzie Twomey'a poprawki iteracyjne przebiegają według wzoru[36, 67, 69, 68]:

$$\begin{aligned} f_j^{(k+1)} &= \left(1 + r_i^{(k)} K\left(y_i, a_j\right)\right) f_j^{(k)} \\ &= \left(1 + r_i^{(k)} w_j^{-1} K_{ij}\right) f_j^{(k)}, \qquad i = 1,\ldots,p, \qquad j = 1,\ldots,q, \end{aligned} \tag{4.105}$$

gdzie:

$$r_i^{(k)} = \frac{\tilde{g}_i}{\sum_{j=1}^{q} K_{ij} f_j^{(k)}} - 1 = \frac{\tilde{g}_i}{\mathbf{k}_i \mathbf{f}^{(k)}} - 1, \tag{4.106}$$

przy czym $\mathbf{k}_i$ oznacza i-ty wiersz macierzy $\mathbf{K}$.

Jak wynika z zależności (4.106), współczynniki $r_i^{(k)}$ są równe pomniejszonym o jeden stosunkom rzeczywistych wyników pomiarów $\tilde{g}_i$ do odpowiadających im wartości teoretycznych g_i obliczanych jako wyjście modelu matematycznego (4.17) dla bieżącego rozwiązania $\mathbf{f}^{(k)}$ [36, 67, 69, 68]:

$$g_i = \mathbf{k}_i \mathbf{f}^{(k)}. \tag{4.107}$$

Na początku każdej iteracji obliczane są współczynniki $r_i^{(k)}$ w oparciu o wzór (4.106) dla $i = 1,\ldots,p$ na podstawie bieżącego rozwiązania $\mathbf{f}^{(k)}$. Następnie wyznaczone współczynniki wykorzystywane są w danej iteracji do poprawek wartości $f_j^{(k)}$ przebiegających według wzoru (4.105) dla $i = 1,\ldots,p$, $j = 1,\ldots,q$ [67, 68].

Stosowane są różne kryteria zatrzymania dla procedury iteracyjnych poprawek w metodzie Twomey'a. Najczęściej wykorzystuje się jeden z trzech warunków[36, 69, 68]:

1. Osiągnięcie zadowalającej zgodności rzeczywistych danych pomiarowych $\tilde{g}_i$ z odpowiednimi wartościami teoretycznymi g_i obliczonymi dla bieżącego rozwiązania $\mathbf{f}^{(k)}$ w oparciu o wzór (4.107). Przez zadowalającą zgodność rozumie się sytuację, gdy różnice $(\tilde{g}_i - g_i)$ są bliskie niepewnościom pomiarowym wyników $\tilde{g}_i$. Przyjmując za miarę tych niepewności odchylenia standardowe błędów pomiarowych wielko-

ści $\tilde{g}_i$ oznaczone σ_i, rozważany warunek można ściśle sformułować z zastosowaniem wartości statystyki chi-kwadrat [36 69, 68]:

$$\hat{\chi}^2_{(k)} = \frac{1}{p}\sum_{i=1}^{p}\left(\frac{\tilde{g}_i - \mathbf{k}_i\mathbf{f}^{(k)}}{\sigma_i}\right)^2. \tag{4.108}$$

$\hat{\chi}^2_{(k)}$ jest miarą średniej rozbieżności pomiędzy rzeczywistymi danymi pomiarowymi $\tilde{g}_i$ a odpowiednimi wartościami teoretycznymi g_i odniesionej do niepewności pomiarowych. W związku z tym, warunkiem zatrzymania procedury iteracyjnych poprawek jest osiągnięcie etapu, gdy[68]:

$$\hat{\chi}^2_{(k)} < 1. \tag{4.109}$$

2. Osiągnięcie stanu, gdy zmniejszenie wartości $\hat{\chi}^2_{(k)}$ w stosunku do wartości z poprzedniej iteracji $\hat{\chi}^2_{(k-1)}$ jest mniejsze od założonego poziomu[69]. Oznacza to, że kontynuowanie procedury iteracyjnych korekt rozwiązania nie powoduje już znaczącej poprawy zgodności rzeczywistych danych pomiarowych $\tilde{g}_i$ z odpowiednimi wartościami teoretycznymi g_i. Innymi słowy, algorytm osiągnął już rozwiązanie dostatecznie bliskie rozwiązaniu prawdziwemu[69]. Zwykle za warunek zatrzymania algorytmu przyjmuje się stan, gdy procentowe zmniejszenie wartości $\hat{\chi}^2_{(k)}$ w stosunku do wartości $\hat{\chi}^2_{(k-1)}$ jest mniejsze od ustalonej wielkości α wynoszącej np. 5% [69]:

$$\frac{\hat{\chi}^2_{(k)} - \hat{\chi}^2_{(k-1)}}{\hat{\chi}^2_{(k-1)}} \cdot 100 < \alpha. \tag{4.110}$$

3. Osiągnięcie stanu, gdy zmiana rozwiązania $\mathbf{f}^{(k)}$ w stosunku do rozwiązania z poprzedniej iteracji $\mathbf{f}^{(k-1)}$ jest mniejsza od założonego poziomu[35]. Oznacza to, że kolejne iteracje praktycznie nie spowodują już dalszej poprawy rozwiązania, gdyż algorytm osiągnął już rozwiązanie bliskie rozwiązaniu prawdziwemu[35]. Zwykle za warunek zatrzymania algorytmu przyjmuje się stan, gdy[35]:

$$\left\|\mathbf{f}^{(k)} - \mathbf{f}^{(k-1)}\right\|_2^2 < \delta, \tag{4.111}$$

gdzie δ to ustalona mała wartość dodatnia, np. 10^{-6}.

Słabe uwarunkowanie zagadnienia odwrotnego (4.17) powoduje znaczne spowolnienie lub nawet zanik zbieżności algorytmu Twomey'a[35, 68]. Aby zapobiec wpadnięciu algorytmu w nieskończoną pętlę, często wprowadza się dodatkowy warunek za-

kończenia – procedura jest przerywana, gdy liczba iteracji przekroczy z góry ustaloną liczbę k_{max} [68].

Złe uwarunkowanie problemu jest również przyczyną silnej zależności rozwiązania końcowego od apriorycznego rozwiązania początkowego $\mathbf{f}^{(0)}$ [35, 36]. Rozwiązanie ostateczne często ma przebieg bardzo zbliżony do przyjętego rozwiązania wejściowego $\mathbf{f}^{(0)}$. Od rozwiązania $\mathbf{f}^{(0)}$ zależy też szybkość zbieżności algorytmu Twomey'a. Rozwiązanie wejściowe $\mathbf{f}^{(0)}$ stanowi więc formę wiedzy aprioryczne j umożliwiającej minimalizację efektów słabego uwarunkowania zagadnienia odwrotnego (4.17) [36].

Najważniejszym skutkiem złego uwarunkowania problemu są jednak tzw. artefakty w rozwiązaniu. Są to zaburzenia zwykle o charakterze gwałtownych wielkoczęstotliwościowych oscylacji nie występujące w prawdziwym rozwiązaniu $\mathbf{f}^{(0)}$ [35, 36, 68]. Stwierdzono, że przeprowadzenie zbyt dużej liczby iteracyjnych poprawek rozwiązania nie wpływa już praktycznie na poprawę zgodności rozwiązania z danymi pomiarowymi, natomiast znacząco wzmaga oscylacje w rozwiązaniu[68]. W związku z tym, warunek zatrzymania algorytmu powinien zapewniać kompromis pomiędzy zgodnością rozwiązania z danymi pomiarowymi a jego gładkością[68]. Warunek zakończenia procedury stanowi więc drugą – oprócz rozwiązania wejściowego $\mathbf{f}^{(0)}$ – formę informacji aprioryczne j[68].

4.5.2. Metoda Twomey'a–Markowskiego

Środki, którymi posługuje się omawiana w poprzednim punkcie procedura Twomey'a w celu uwzględnienia informacji aprioryczne j o poszukiwanym rozwiązaniu, okazują się niewystarczające, by zapobiec skutkom słabego uwarunkowania zagadnienia odwrotnego. W rezultacie słabe uwarunkowanie problemu (4.17) prowadzi do znacznego spowolnienia lub zaniku zbieżności algorytmu, a uzyskiwane rozwiązania zakłócone są artefaktami w postaci silnych oscylacji wielkoczęstotliwościowych. W związku z tym opracowano wiele modyfikacji metody Twomey'a[35, 36, 69, 68].

Udoskonalenie dokonane w ramach algorytmu Twomey'a–Markowskiego polega na wprowadzeniu do metody Twomey'a procedury wygładzania rozwiązań $\mathbf{f}^{(k)}$, co stanowi jawne uwzględnienie apriorycznego warunku gładkości rozwiązania[68].

W technice Twomey'a-Markowskiego aprioryczne rozwiązanie początkowe $\mathbf{f}^{(0)}$ przekazywane jest na początku na wejście zwykłego algorytmu Twomey'a w celu uzyskania rozwiązania, które trafia następnie na wejście pętli zwanej pętlą wygładzania i obliczeń Twomey'a[68]. W pętli tej przeprowadzane jest iteracyjne udoskonalanie rozwiązania poprzez[68]:

- iteracyjną procedurę wygładzania bieżącego rozwiązania $\mathbf{f}^{(k)}$,
- realizację zwykłego algorytmu Twomey'a, dla którego rozwiązanie wejściowe stanowi wygładzone rozwiązanie otrzymane w poprzednim kroku.

Wymienione dwa działania składają się na pojedynczy przebieg pętli wygładzania i obliczeń Twomey'a.

Celem stosowania algorytmu Twomey'a w ramach procedury Twomey'a–Markowskiego jest poprawa zgodności rozwiązania z danymi pomiarowymi. Odbywa się ona kosztem zmniejszenia gładkości rozwiązania, czyli zwiększenia jego odstępstwa od założonego *a priori* charakteru[68]. Gładkość rozwiązania przywracana jest poprzez iteracyjną procedurę wygładzania rozwiązania. Wygładzanie prowadzi jednak do pogorszenia zgodności rozwiązania z danymi pomiarowymi, co ponownie wymaga użycia algorytmu Twomey'a. Iteracyjne stosowanie naprzemiennie wygładzania oraz algorytmu Twomey'a ma więc na celu uzyskanie rozwiązania o zadowalającej zgodności z danymi pomiarowymi oraz jednocześnie możliwie jak najbardziej gładkiego, czyli zgodnego z założoną apriorycznie charakterystyką[68]. Osiągnięcie kompromisu pomiędzy tymi dwiema właściwościami odbywa się poprzez odpowiedni dobór parametrów działania procedury wygładzania i algorytmu Twomey'a[68].

Procedura wygładzania polega na iteracyjnym wykonywaniu operacji opisanej następującym wzorem[68]:

$$f_j := \begin{cases} \frac{3}{4} f_1 + \frac{1}{4} f_2 & \text{dla } j = 1, \\ \frac{1}{4} f_{j-1} + \frac{1}{2} f_j + \frac{1}{4} f_{j+1} & \text{dla } j = 2, \ldots, q-1, \\ \frac{1}{4} f_{q-1} + \frac{3}{4} f_q & \text{dla } j = q, \end{cases} \tag{4.112}$$

gdzie $:=$ to operator przypisania, czyli nadania nowej wartości. Operacja (4.112) polega na wyznaczaniu średniej ruchomej dla wektora $\mathbf{f}$.

Jako, że każdy kolejny przebieg procedury wygładzania powoduje pogarszanie zgodności rozwiązania z danymi pomiarowymi, iteracyjne wygładzanie rozwiązania przerywane jest w momencie, gdy średnie różnice pomiędzy rzeczywistymi danymi pomiarowymi $\tilde{g}_i$ oraz odpowiadającymi im teoretycznymi wartościami g_i obliczonymi dla bieżącego rozwiązania $\mathbf{f}$ w oparciu o wzór (4.107) odniesione do odchyleń standardowych σ_i będą większe od założonego poziomu. W związku z tym za warunek przerwania iteracyjnej procedury wygładzania przyjęto[68]:

$$\hat{\chi}^2 > \hat{\chi}^2_{limit}, \tag{4.113}$$

gdzie $\hat{\chi}^2_{limit}$ to założona *a priori* wartość graniczna. Często przyjmuje się $\hat{\chi}^2_{limit} = 1$ [68].

Aby zapobiec możliwości wpadnięcia procedury wygładzania w nieskończoną pętlę, dodatkowo wprowadza się awaryjny warunek zatrzymania tej procedury. Jest ona przerywana po wykonaniu założonej liczby s_{max} przebiegów[68].

Iteracyjne udoskonalanie rozwiązania w pętli wygładzania i obliczeń Twomey'a powoduje, że w kolejnych przebiegach pętli charakteryzuje się ono coraz większą gładkością przy zachowanej zgodności z rzeczywistymi danymi pomiarowymi[68]. Algorytm Twomey'a–Markowskiego wykazuje więc zbieżność do rozwiązania zagadnienia odwrotnego (4.17), które jest najbardziej gładkie w znaczeniu przyjętej miary.

Za miarę braku gładkości rozwiązania $\mathbf{f}$ można przyjąć średnią wartość bezwzględną różnicy drugiego rzędu wektora $\mathbf{f}$ [68]:

$$R = \frac{1}{q-2}\sum_{j=2}^{q-1}\left| f_{j+1} - 2f_j + f_{j-1} \right|. \tag{4.114}$$

Po dostatecznie dużej liczbie przebiegów pętli wygładzania i obliczeń Twomey'a wartość R ulega już jedynie bardzo nieznacznemu zmniejszaniu w kolejnych przebiegach, a niekiedy może pozostawać stała lub nawet rosnąć. W związku z tym, za warunek przerwania pętli wygładzania i obliczeń Twomey'a przyjmuje się najczęściej osiągnięcie momentu, gdy[68]:

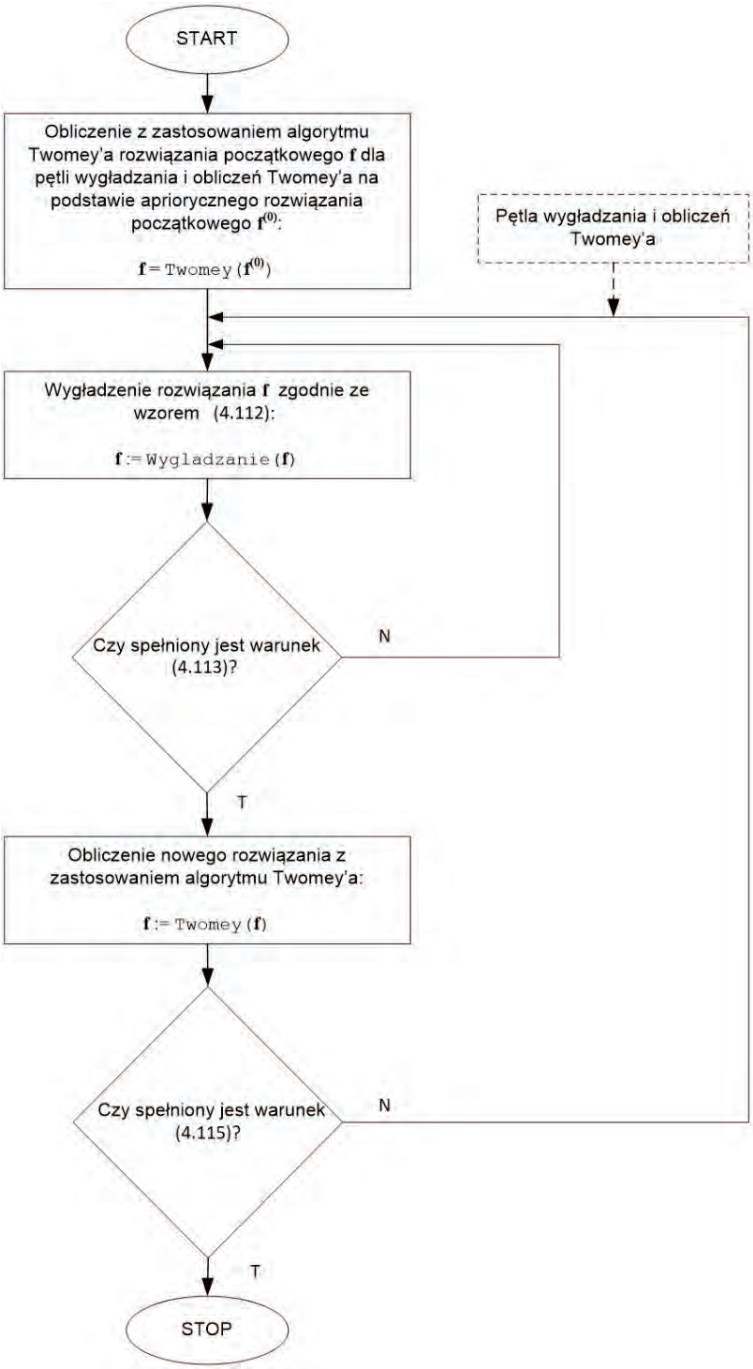
$$R^{(k)} / R^{(k-2)} > \vartheta, \tag{4.115}$$

gdzie $R^{(k)}$ – wartość R po k-tej iteracji, ϑ– wartość graniczna ustalona *a priori* na podstawie wiedzy o rozwiązaniu. Zwykle przyjmuje się $\vartheta = 0{,}95$ lub $\vartheta = 0{,}975$.

Dla pętli wygładzania i obliczeń Twomey'a wprowadza się dodatkowy awaryjny warunek zatrzymania. Pętla jest przerywana po wykonaniu założonej liczby k_{max} przebiegów[68]. Przebieg działań w algorytmie Twomey'a–Markowskiego prezentuje Rys. 4.2.

Dzięki zastosowaniu iteracyjnej procedury wygładzania algorytm Twomey'a-Markowskiego wykazuje znacznie większą odporność na skutki słabego uwarunkowania zagadnienia odwrotnego niż algorytm Twomey'a. Przejawia się to:

- znacznie szybszą zbieżnością procedury Twomey'a-Markowskiego[68],
- mniejszym wpływem apriorycznie przyjętego rozwiązania początkowego $\mathbf{f}^{(0)}$ na ostateczne rozwiązanie[68],
- znacznie mniejszym nasileniem występowania artefaktów w rozwiązaniu w postaci wielkoczęstotliwościowych oscylacji[69, 68] w porównaniu z klasyczną procedurą Twomey'a.



Rys. 4.2. Przebieg działań w algorytmie Twomey'a–Markowskiego

Poprawę odporności na efekty słabego uwarunkowania zagadnienia odwrotnego zawdzięcza się temu, że iteracyjna procedura wygładzania wprowadza do algorytmu aprioryczny warunek gładkości rozwiązania.

4.6. Bayesowska metoda rozwiązania zagadnienia odwrotnego w postaci dyskretnej wykorzystująca procedurę Monte-Carlo

Wszystkie omawiane dotąd metody inwersyjne usiłowały rozwiązać zagadnienie odwrotne w dyskretnej postaci (4.17) w sposób bezpośredni, czyli przez poszukiwanie odpowiedniego operatora odwrotnego lub jego przybliżenia. Zupełnie inne podejście do rozwiązywania problemu odwrotnego prezentują metody bayesowskie[36, 2]. Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego polega na analizie statystycznej powtarzanych wielokrotnie rozwiązań zagadnienia wprost, czyli zadania wyznaczenia wyjścia modelu (4.17) dla danego wektora $\mathbf{f}$. Analiza ta przeprowadzana jest w oparciu o tzw. statystykę bayesowską[36, 2].

W podejściu bayesowskim dokonuje się jawnego założenia probabilistycznego *a priori* na temat szukanego wektora $\mathbf{f}$. Założenie to ma postać łącznej funkcji gęstości prawdopodobieństwa *a priori* wektora $\mathbf{f}$ – $p_0(\mathbf{f})$ [36, 2]. Rzeczywiste dane pomiarowe $\tilde{\mathbf{g}}$ służą do skorygowania apriorycznej wiedzy o szukanym wektorze $\mathbf{f}$ poprzez modyfikacją łącznej funkcji gęstości prawdopodobieństwa wektora $\mathbf{f}$ z zastosowaniem twierdzenia Bayesa[36, 2]. Zgodnie z tym twierdzeniem, łączna warunkowa funkcja gęstości prawdopodobieństwa wektora $\mathbf{f}$ przy założeniu, że w rezultacie pomiaru zarejestrowane zostały dane pomiarowe $\tilde{\mathbf{g}}$, zwana łączną funkcją gęstości prawdopodobieństwa *a posteriori* wektora $\mathbf{f}$, dana jest wzorem[36, 2]:

$$p\left(\mathbf{f}\middle|\tilde{\mathbf{g}}\right)=\frac{p_0\left(\mathbf{f}\right)p_L\left(\tilde{\mathbf{g}}\middle|\mathbf{f}\right)}{p\left(\tilde{\mathbf{g}}\right)}, \tag{4.116}$$

gdzie: $p\left(\tilde{\mathbf{g}}\right)$ to łączna funkcja gęstości prawdopodobieństwa wektora danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$ (funkcja gęstości prawdopodobieństwa tego, że w toku pomiarów uzyskane zostaną wyniki $\tilde{\mathbf{g}}$), $p_L(\tilde{\mathbf{g}}|\mathbf{f})$ – łączna warunkowa funkcja gęstości prawdopodobieństwa wektora danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$, przy założeniu, że prawdziwe rozwiązanie problemu odwrotnego stanowi wektor $\mathbf{f}$ (funkcja gęstości prawdopodobieństwa tego, że w toku pomiarów uzyskane zostaną wyniki $\tilde{\mathbf{g}}$, przy założeniu, że prawdziwe rozwiązanie problemu odwrotnego stanowi wektor $\mathbf{f}$). Funkcja $p_L(\tilde{\mathbf{g}}|\mathbf{f})$ zwana jest również funkcją wiarygodności danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$. Funkcja $p(\mathbf{f}|\tilde{\mathbf{g}})$ stanowi gęstość prawdopodobieństwa tego, że rozwiązaniem zagadnienia odwrotnego jest wektor $\mathbf{f}$ przy założeniu, że w rezultacie pomiarów uzyskano wyniki $\tilde{\mathbf{g}}$ [48]. Jest to więc probabi-

listyczna wiedza o rozwiązaniu problemu $\mathbf{f}$ wynikająca z wiedzy *a priori* o tym rozwiązaniu skorygowanej w oparciu o wyniki pomiarów $\tilde{\mathbf{g}}$ [36, 2].

W rzeczywistości podejście bayesowskie do rozwiązywania problemu odwrotnego realizowane jest przy wykorzystaniu techniki Monte Carlo[36]. Metoda polega na wylosowaniu m wektorów $\mathbf{f}$ oznaczonych $\mathbf{f}_k$, $k = 1,\ldots,m$ z wielowymiarowego rozkładu prawdopodobieństwa opisanego łączną funkcją gęstości prawdopodobieństwa *a priori* $p_0(\mathbf{f})$. Dla każdego z wylosowanych wektorów $\mathbf{f}_k$, $k = 1,\ldots,m$, obliczane jest wyjście modelu (4.17), czyli odpowiadający wektorowi $\mathbf{f}_k$ wektor teoretycznych danych pomiarowych $\mathbf{g}_k$. Obliczenia te często określane są jako symulacja pomiarów. Każdemu wektorowi $\mathbf{f}_k$ oraz odpowiadającemu mu wektorowi $\mathbf{g}_k$ przypisać można prawdopodobieństwo masowe[36]:

$$P(\mathbf{f}_k) = P(\mathbf{g}_k) = \frac{1}{m}, \qquad k = 1,\ldots,m. \tag{4.117}$$

Ze wzoru (4.117) wynika, że:

$$\sum_{k=1}^{m} P(\mathbf{f}_k) = \sum_{k=1}^{m} P(\mathbf{g}_k) = 1. \tag{4.118}$$

Ponadto zdarzenia polegające na uzyskiwaniu w danym przebiegu losowania określonego wektora $\mathbf{f}_k$ i odpowiadającego mu wektora $\mathbf{g}_k$ są zdarzeniami wzajemnie wykluczającymi się.

Dla każdego wektora $\mathbf{g}_k$, $k = 1,\ldots,m$, obliczana jest łączna warunkowa funkcja gęstości prawdopodobieństwa uzyskania w rezultacie rzeczywistych pomiarów wektora danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$ przy założeniu, że w efekcie symulacji pomiaru otrzymany został wektor $\mathbf{g}_k$ – $p(\tilde{\mathbf{g}}|\mathbf{g}_k)$ [36]. Niech wektor błędów pomiarowych:

$$\mathbf{e} = \tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{g} \tag{4.119}$$

posiada p-wymiarowy rozkład normalny:

$$p_e(\mathbf{e}) = \left(\frac{1}{\sigma_e\sqrt{2\pi}}\right)^p \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_e^2}\mathbf{e}^T\mathbf{e}\right), \tag{4.120}$$

odpowiadający założeniu, że elementy wektora $\mathbf{e}$ stanowią wzajemnie nieskorelowane zmienne losowe o rozkładzie normalnym z zerową wartością oczekiwaną i jednakowym odchyleniem standardowym σ_e [36]. Wówczas[36]:

$$p(\tilde{\mathbf{g}}|\mathbf{g}_k) = p_e(\tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{g}_k) = \left(\frac{1}{\sigma_e\sqrt{2\pi}}\right)^p \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_e^2}(\tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{g}_k)^T(\tilde{\mathbf{g}} - \mathbf{g}_k)\right). \tag{4.121}$$

Łączna warunkowa funkcja gęstości prawdopodobieństwa wektora symulowanych danych pomiarowych $\mathbf{g}_k$ przy założeniu, że rzeczywiste dane pomiarowe stanowi wektor $\tilde{\mathbf{g}}$, czyli łączną funkcją gęstości prawdopodobieństwa *a posteriori* wektora $\mathbf{g}_k$, określona jest wzorem Bayesa[36]:

$$p\left(\mathbf{g}_k \middle| \tilde{\mathbf{g}}\right) = \frac{P\left(\mathbf{g}_k\right) p\left(\tilde{\mathbf{g}} \middle| \mathbf{g}_k\right)}{P\left(\tilde{\mathbf{g}}\right)}, \tag{4.122}$$

gdzie $P(\tilde{\mathbf{g}})$ to prawdopodobieństwo uzyskania w wyniku rzeczywistych pomiarów wektora danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$. Ponieważ prawdopodobieństwa $P(\mathbf{g}_k)$ spełniają związek (4.118) oraz zdarzenia polegające na uzyskiwaniu w danym przebiegu losowania określonego wektora $\mathbf{g}_k$ są zdarzeniami wzajemnie wykluczającymi się, prawdopodobieństwo $P(\tilde{\mathbf{g}})$ można obliczyć ze wzoru na prawdopodobieństwo całkowite[36]:

$$P\left(\tilde{\mathbf{g}}\right) = \sum_{k=1}^{m} p\left(\tilde{\mathbf{g}} \middle| \mathbf{g}_k\right) P\left(\mathbf{g}_k\right). \tag{4.123}$$

Po podstawieniu wyrażenia (4.123) do wzoru (4.122) otrzymuje się ostatecznie[36]:

$$p\left(\mathbf{g}_k \middle| \tilde{\mathbf{g}}\right) = \frac{P\left(\mathbf{g}_k\right) p\left(\tilde{\mathbf{g}} \middle| \mathbf{g}_k\right)}{\sum_{k=1}^{m} p\left(\tilde{\mathbf{g}} \middle| \mathbf{g}_k\right) P\left(\mathbf{g}_k\right)}. \tag{4.124}$$

Uwzględniając związek (4.117), wzór (4.124) można uprościć do postaci[36]:

$$p\left(\mathbf{g}_k \middle| \tilde{\mathbf{g}}\right) = \frac{p\left(\tilde{\mathbf{g}} \middle| \mathbf{g}_k\right)}{\sum_{k=1}^{m} p\left(\tilde{\mathbf{g}} \middle| \mathbf{g}_k\right)}. \tag{4.125}$$

Pamiętając, że wektor $\mathbf{g}_k$ odpowiada wektorowi $\mathbf{f}_k$, można zapisać[36]:

$$p\left(\mathbf{f}_k \middle| \tilde{\mathbf{g}}\right) = p\left(\mathbf{g}_k \middle| \tilde{\mathbf{g}}\right). \tag{4.126}$$

Ostatecznie więc[36]:

$$p\left(\mathbf{f}_k \middle| \tilde{\mathbf{g}}\right) = \frac{p\left(\tilde{\mathbf{g}} \middle| \mathbf{g}_k\right)}{\sum_{k=1}^{m} p\left(\tilde{\mathbf{g}} \middle| \mathbf{g}_k\right)}. \tag{4.127}$$

Funkcja $p(\mathbf{f}_k | \tilde{\mathbf{g}})$ stanowi łączną warunkową funkcję gęstości prawdopodobieństwa tego, że na wejście modelu przekazany został wektor $\mathbf{f}_k$, przy założeniu, że w rezultacie rzeczywistych pomiarów uzyskany został wektor danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$, czyli łączną funkcją gęstości prawdopodobieństwa *a posteriori* wektora $\mathbf{f}_k$. Funkcja $p(\mathbf{f}_k | \tilde{\mathbf{g}})$ niesie

probabilistyczną wiedzę o rozwiązaniu problemu $\mathbf{f}$ wynikającą z wiedzy *a priori* o tym rozwiązaniu skorygowanej w oparciu o wyniki pomiarów $\tilde{\mathbf{g}}$ [36]. Liczba symulacji *m* przeprowadzanych w praktyce jest bardzo wielka.

Znajomość funkcji $p(\mathbf{f}_k|\tilde{\mathbf{g}})$ umożliwia wyznaczenie różnych estymatorów szukanego wektora $\mathbf{f}$. Najczęściej stosowane są[36]:

- estymator największego prawdopodobieństwa *a posteriori*,
- estymator bayesowski o minimalnej wariancji.

Estymator największego prawdopodobieństwa *a posteriori* $\hat{\mathbf{f}}_{MAP}$ zdefiniowany jest jako moda łącznej funkcji gęstości prawdopodobieństwa *a posteriori* $p(\mathbf{f}_k|\tilde{\mathbf{g}})$, czyli[36]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{MAP} = \arg\max_{\mathbf{f}_k} \left\{ p\left(\mathbf{f}_k|\tilde{\mathbf{g}}\right) \right\}. \tag{4.128}$$

Estymator bayesowski o minimalnej wariancji $\hat{\mathbf{f}}_{MVBE}$ zdefiniowany jest jako warunkowa wartość oczekiwana wektora $\mathbf{f}$ przy założeniu, że w wyniku pomiarów uzyskany został wektor danych pomiarowych $\tilde{\mathbf{g}}$ [36]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{MVBE} = E\left(\mathbf{f}|\tilde{\mathbf{g}}\right) = \sum_{k=1}^{m} \mathbf{f}_k \, p\left(\mathbf{f}_k|\tilde{\mathbf{g}}\right). \tag{4.129}$$

Podane estymatory traktuje się jako rozwiązania problemu odwrotnego.

5. Podsumowanie

Bądźmy ludźmi,
choćby tak długo, póki nauka nie odkryje, że jesteśmy czym innym.

(Stanisław Jerzy Lec)

Niejednokrotnie w dyskusjach ze swoimi uczniami podejmowałem trud odpowiedzi na pytanie, czy uprawianie nauki jest przeżywaniem wielkiej przygody czy raczej jednym ze sposobów na życie.

Mam przed oczyma posągową twarz mojego lwowsko-wrocławskiego Mistrza, Profesora Andrzeja Jellonka, żywą do dziś w pamięci jego dostojność retoryczną i naukową. Pamiętam przesłanie Ludwika Hirszfelda, któremu hołdował że „jeśli chcesz zapalać innych, sam musisz płonąć". Dziś, w retrospekcji własnych doświadczeń i losów wiem, że nauka musi stać się sposobem na życie, aby mogła dać prawdziwie piękne i pasjonujące owoce. Życie naukowe, jakkolwiek niepoddające się formalnym definicjom, będące źródłem nieustannych „natchnień", wewnętrznego bogactwa, wzruszeń, filozoficznych refleksji i frustracji, intymnym kontaktem z przyrodą, utylitarną studnią bez dna, chęcią i potrzebą jednocześnie dzielenia się własną pracą i doświadczeniem, jest czymś do czego warto dążyć. Dążyć uczciwie, w duchu łacińskiego *Veritas temporis filia est*[*].

Żywię głęboką nadzieję, że przedstawione w niniejszym opracowaniu wątki naukowe staną się podstawą dalszych, nowych działań naukowych w zakresie nieustannie rozwijającej się metrologii układów dyspersyjnych oraz inspiracją dla nowych pokoleń naukowców oddanych swym naukowym pasjom.

[*] Prawda jest córką czasu (z czasem wszystko wychodzi na jaw).

Literatura

[1] **MROCZKA J.**, *Metrologiczne Problemy Wykorzystywania Światła Rozproszonego do Badań Rozkładu Wielkości Cząstek w Roztworach Dyspersyjnych*, Warszawa (1990).

[2] **MROCZKA J.**, *Method of Moments in Light Scattering Data Inversion in the Particle Size Distribution*, Optics Communications, 99, 147–151 (1993).

[3] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Improved technique of retrieving particle size distribution from angular scattering measurements*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 129, 48–59 (2013).

[4] **MROCZKA J.**, *Turbidimetric methods in particle sizing*. Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO). Beijing, China (1991).

[5] **MROCZKA J.**, *Integral transform technique in particle sizing*. Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO). Beijing, China (1991).

[6] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements*, Metrology and Measurement Systems, 16, 333–357 (2009).

[7] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements*, Applied Optics, 49, 4591–4603 (2010).

[8] **MROCZKA J.** & SZCZUCZYŃSKI D., *Simulation research on improved regularized solution of inverse problem in spectral extinction measurements*, Applied Optics, 51, 1715–1723 (2012).

[9] ONOFRI F., KRZYSIEK M., BARBOSA S., MESSAGER V., REN K.F. & **MROCZKA J.**, *Near-critical-angle scattering for the characterization of clouds of bubbles: particular effects*, Applied Optics, 50, 5759–5769 (2011).

[10] ONOFRI F., KRZYSIEK M. & **MROCZKA J.**, *Critical angle refractometry and sizing of bubble clouds*, Optics Letters, 32, 2070–2072 (2007).

[11] ONOFRI F., KRZYSIEK M., **MROCZKA J.**, REN K.F., RADEV S. & BONNET J.-P., *Optical characterization of bubbly flows with a near-critical-angle scattering technique*, Experiments in Fluids, 47, 721–732 (2009).

[12] CZERWIŃSKI M., **MROCZKA J.**, GIRASOLE T., GOUESBET G. & GRÉHAN G., *Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions*. Pt. 1. *Direct problem: hybrid-method approximation*, Applied Optics, 40, 1514–1524 (2001).

[13] CZERWIŃSKI M., **MROCZKA J.**, GIRASOLE T., GOUESBET G. & GRÉHAN G., *Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions*. Pt. 2. *Inverse problem: particle size determination*, Applied Optics, 40, 1525–1531 (2001).

[14] GUSZKOWSKI T. & **MROCZKA J.**, *Metoda inwersyjna wykorzystująca sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej*. Metrologia wspomagana komputerowo. MWK ’2003. VI Szkoła – konferencja. Instytut Podstaw Elektroniki Wydział Elektroniki WAT, Waplewo (2003).

[15] ONOFRI F., BARBOSA S., WOŹNIAK M., **MROCZKA J.**, VREL D. & GRISOLIA C., *In Situ Characterization of Dust Mobilized by Laser Cleaning Methods and Loss of Vacuum Accidents*, Fusion Science and Technology, 62, 39–45 (2012).

[16] GIRASOLE T., BULTYNCK H., GOUESBET G., GRÉHAN G., LE MEUR F., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, REN K.F., ROZE C. & WYSOCZAŃSKI D., *Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering*. Part 1. *Numerical aspects*, Particle & Particle Systems Characterization, 14, 163–174 (1997).

[17] GIRASOLE T., GOUESBET G., GRÉHAN G., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.**, REN K.F. & WYSOCZAŃSKI D., *Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering*. Part 2. *Experimental aspects*, Particle & Particle Systems Characterization, 14, 211–218 (1997).

[18] GIRASOLE T., LE TOULOUZAN J.N., **MROCZKA J.** & WYSOCZAŃSKI D., *Fiber orientation and concentration analysis by light scattering: experimental setup and diagnosis*, Review of Scientific Instruments, 68, 2805–2811 (1997).

[19] **MROCZKA J.**, WYSOCZAŃSKI D. & ONOFRI F., *Optical parameters and scattering properties of red blood cells*, Optica Applicata, 32, 691–700 (2002).

[20] SKORUPSKI K. & **MROCZKA J.**, *Effect of the necking phenomenon on the optical properties of soot particles*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 141, 40–48 (2014).

[21] SKORUPSKI K., **MROCZKA J.**, RIEFLER N., OLTMANN H., WILL S. & WRIEDT T., *Impact of morphological parameters onto simulated light scattering patterns*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 119, 53–66 (2013).

[22] WOŹNIAK M., ONOFRI F., BARBOSA S., YON J. & **MROCZKA J.,** *Comparison of methods to derive morphological parameters of multi-fractal samples of particle aggregates from TEM images*, Journal of Aerosol Science, 47, 12–26 (2012).

[23] SKORUPSKI K., HELLMERS J., FENG W., **MROCZKA J.**, WRIEDT T. & MÄDLER L., *Influence of sintering necks on the spectral behaviour of ITO clusters using the Discrete Dipole Approximation*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 159, 11–18 (2015).

[24] WOJTASZEK T. & **MROCZKA J.**, *Light scattering simulations of spheroids using three beams phase Doppler system*. XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development. Rio de Janeiro, Brazil (2006).

[25] ŚWIRNIAK G., GŁOMB G. & **MROCZKA J.**, *Inverse analysis of the rainbow for the case of low-coherent incident light to determine the diameter of a glass fiber*, Applied Optics, 53, 4239–4247 (2014).

[26] ŚWIRNIAK G., GŁOMB G. & **MROCZKA J.**, *Inverse analysis of light scattered at a small angle for characterization of a transparent dielectric fiber*, Applied Optics, 53, 7103–7111 (2014).

[27] ŚWIRNIAK G. & **MROCZKA J.**, *Approximate solution for optical measurements of the diameter and refractive index of a small and transparent fiber*, Journal of the Optical Society of America A, 33, 667–676 (2016).

[28] ŚWIRNIAK G. & **MROCZKA J.**, *Numerical analysis of primary rainbows from a homogeneous cylinder and an optical fiber for incident low-coherent light*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 195, 176–188 (2017).

[29] ŚWIRNIAK G. & **MROCZKA J.**, *Non-invasive measurements of transparent fibres*, Metrology and Measurement Systems, 27, 19–31 (2020).

[30] **MROCZKA J.**, *Temperature stabilisation of light-emitting diode radiation*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 21, 306–309 (1988).

[31] **MROCZKA J.** & PAROL M., *Methods of temperature stabilization of light-emitting diode radiation*, Review of Scientific Instruments, 65, 803–806 (1994).

[32] SYDENHAM P.H. (Ed.), *Handbook of Measurement Science*. Volume 1. *Theoretical Fundamentals*, John Wiley & Sons, Chichester (1982).

[33] LINGJEARDE O.C. & CHRISTOPHERSEN N., *Regularization Principles: Solving Ill-Posed Inverse Problems*. Lecture notes in INVPAR, Departament of Informatics, University of Oslo (1998).

[34] HANSEN P.C., *Regularization Tools: A Matlab Package for Analysis and Solution of Discrete Ill-Posed Problems*, Numerical Algorithms, 6, 1–35 (1994).

[35] CRUMP J.G. & SEINFELD J.H., *A New Algorithm for Inversion of Aerosol Size Distribution Data*, Aerosol Science and Technology, 1, 15–34 (1981).

[36] KANDLIKAR M. & RAMACHANDRAN G., *Inverse Methods for Analysing Aerosol Spectrometer Measurements: A Critical Review*, Journal of Aerosol Science, 30, 413–437 (1999).

[37] BOHREN C.F. & HUFFMAN D.R., Absorption and Scattering of Light by Small Particles, John Wiley & Sons, New York (1983).

[38] JONES A.R., *Light scattering for particle characterization*, Progress in Energy and Combustion Science, 25, 1–53 (1999).
[39] XU R., *Particle Characterization: Light Scattering Methods*, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2000).
[40] VIERA G. & BOX M.A., *Information content analysis of aerosol remote-sensing experiments using an analytic eigenfunction theory: anomalous diffraction approximation*, Applied Optics, 24, 4525–4533 (1985).
[41] KAHNERT F.M., *Numerical methods in electromagnetic scattering theory*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 79–80, 775–824 (2003).
[42] ABRAMOWITZ M. & STEGUN I.A., Handbook of Mathematical Functions, National Bureau of Standards, Washington DC (1970).
[43] ADEN A.L., *Electromagnetic Scattering from Spheres with Sizes Comparable to the Wavelength*, Journal of Applied Physics, 22, 601–605 (1951).
[44] HADAMARD J., *Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique*, Princeton University Bulletin, 13, 49–52 (1902).
[45] LESNIC D., ELLIOT L. & INGHAM D.B., *A numerical analysis of the data inversion of particle sizing instruments*, Journal of Aerosol Science, 27, 1063–1082 (1996).
[46] BRANDT S., *Analiza danych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (1998).
[47] BJÖRCK A. & DAHLQUIST G., *Metody numeryczne*, PWN, Warszawa (1983).
[48] HANSEN P.C., *Computation of the singular value expansion*, Computing, 40, 185–199 (1988).
[49] VASIN V.V. & AGEEV A.L., *Ill-Posed Problems with a Priori Information*, De Gruyter Utrecht (1995).
[50] TIKHONOV A.N., *Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method*, Soviet Math. Dokl., 4, 1035–1038 (1963).
[51] TIKHONOV A.N. & ARSENIN V.Y., *Solutions of Ill-Posed Problems*, Winston & Sons Washington D.C. (1977).
[52] TIKHONOV A.N. & GONCHARSKY A.V., *Ill-Posed Problems in Natural Sciences*, MIR Publishers, Moscow (1987).
[53] HANSEN P.C., *Regularization,GSVD and truncated GSVD*, BIT Numerical Mathematics, 29, 491–504 (1989).
[54] HANSEN P.C., *Relations between SVD and GSVD of Discrete regularization problems in standard and general form*, Linear Algebra and its Applications, 141, 165–176 (1990).
[55] HANSEN P.C., *The truncated SVD as a method for regularization*, BIT Numerical Mathematics, 27, 534–553 (1987).
[56] HANSEN P.C., *The Modified Truncated SVD Method for Regularization in General Form*, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 13, 1142–1150 (1991).
[57] PHILLIPS D.L., *A Technique for the Numerical Solution of Certain Integral Equations of the First Kind*, Journal of the ACM, 9, 84–96 (1962).
[58] MARTOS B., *Programowanie nieliniowe. Teoria i metody*, PWN, Warszawa (1983).
[59] ZANGWILL W.I., *Programowanie nieliniowe*, PWN, Warszawa (1974).
[60] HANSEN P.C., *Truncated Singular Value Decomposition Solutions to Discrete Ill-Posed Problems with Ill-Determined Numerical Rank*, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 11, 503–518 (1990).
[61] VOGEL C.R., *Optimal Choice of a Truncation Level for the Truncated SVD Solution of Linear First Kind Integral Equations When Data are Noisy*, SIAM Journal on Numerical Analysis, 23, 109–117 (1986).
[62] HANSEN P.C. & O'LEARY P., *The Use of the L-Curve in the Regularization of Discrete Ill-Posed Problems*, SIAM Journal on Scientific Computing, 14, 1487–1503 (1993).

[63] GOLUB G.H., HEATH M. & WAHBA G., *Generalized Cross-Validation as a Method for Choosing a Good Ridge Parameter*, Technometrics, 21, 215–223 (1979).
[64] MOROZOV V.A., *Methods for Solving Incorrectly Posed Problems*, Springer, New York (1984).
[65] CHAHINE M.T., *Determination of the Temperature Profile in an Atmosphere from its Outgoing Radiance*, Journal of the Optical Society of America, 58, 1634–1637 (1968).
[66] TWOMEY S., *Comparison of constrained linear inversion and an iterative nonlinear algorithm applied to the indirect estimation of particle size distributions*, Journal of Computational Physics, 18, 188–200 (1975).
[67] WINKLMAYR W., WANG H.-C. & JOHN W., *Adaptation of the Twomey Algorithm to the Inversion of Cascade Impactor Data*, Aerosol Science and Technology, 13, 322–331 (1990).
[68] SMITH C.R. & GRANDY W. (Eds.), *Maximum-Entropy and Bayesian Methods in Inverse Problems*, Springer Netherlands, Dordrecht (1985).
[69] MARKOWSKI G.R., *Improving Twomey's Algorithm for Inversion of Aerosol Measurement Data*, Aerosol Science and Technology, 7, 127–141 (1986).

Dyplomy doktora honoris causa

SUMMIS AUSPICIIS
SERENISSIMAE REI PUBLICAE POLONORUM
NOS
RECTOR IDEMQUE PROMOTOR RITE CONSTITUTUS
CUM SENATU POLYTECHNICAE LUBLINENSIS
NEC NON
DECANUS FACULTATIS ELECTROTECHNICAE ET INFORMATICAE
CUM
UNANIMO CONSENSU SENATUUM
ACADEMIAE METALLURGICAE-AERARIAE CRACOVIENSIS
ET ACADEMIAE TECHNICAE-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 POLYTECHNICAE LUBLINENSIS,
QUI IN ALBO PROFESSORUM SUNT INSCRIPTI, BENE MERITUM

DOCTORIS HONORIS CAUSA
SCIENTIARUM TECHNICARUM

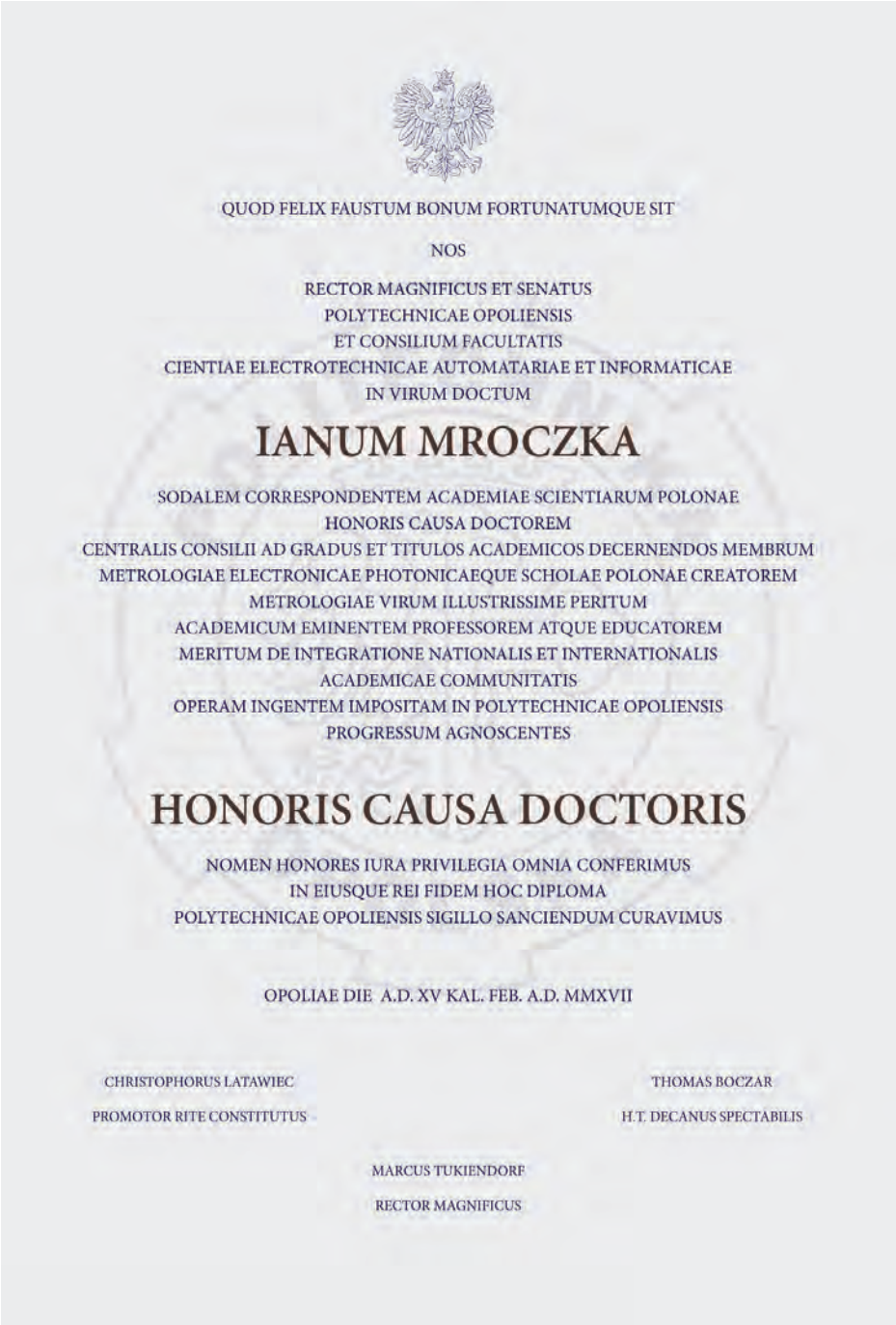
NOMEN AC DIGNITATEM, IURA AC PRIVILEGIA CONTULIMUS IN EIUSQUE REI
FIDEM HOC DIPLOMA SIGILLO POLYTECHNICAE LUBLINENSIS SANCIENDUM
CURAVIMUS

HENRICA D. STRYCZEWSKA
H. T. DECANUS

PETRUS KACEJKO
H. T. RECTOR MAGNIFICUS
AC PROMOTOR

LUBLINI, DIE XIII MENSIS MAII A. D. MMXIV

Dyplom doktora *honoris causa* Politechniki Lubelskiej (2014)



QUOD FELIX FAUSTUM BONUM FORTUNATUMQUE SIT

NOS

RECTOR MAGNIFICUS ET SENATUS
POLYTECHNICAE OPOLIENSIS
ET CONSILIUM FACULTATIS
CIENTIAE ELECTROTECHNICAE AUTOMATARIAE ET INFORMATICAE
IN VIRUM DOCTUM

IANUM MROCZKA

SODALEM CORRESPONDENTEM ACADEMIAE SCIENTIARUM POLONAE
HONORIS CAUSA DOCTOREM
CENTRALIS CONSILII AD GRADUS ET TITULOS ACADEMICOS DECERNENDOS MEMBRUM
METROLOGIAE ELECTRONICAE PHOTONICAEQUE SCHOLAE POLONAE CREATOREM
METROLOGIAE VIRUM ILLUSTRISSIME PERITUM
ACADEMICUM EMINENTEM PROFESSOREM ATQUE EDUCATOREM
MERITUM DE INTEGRATIONE NATIONALIS ET INTERNATIONALIS
ACADEMICAE COMMUNITATIS
OPERAM INGENTEM IMPOSITAM IN POLYTECHNICAE OPOLIENSIS
PROGRESSUM AGNOSCENTES

HONORIS CAUSA DOCTORIS

NOMEN HONORES IURA PRIVILEGIA OMNIA CONFERIMUS
IN EIUSQUE REI FIDEM HOC DIPLOMA
POLYTECHNICAE OPOLIENSIS SIGILLO SANCIENDUM CURAVIMUS

OPOLIAE DIE A.D. XV KAL. FEB. A.D. MMXVII

CHRISTOPHORUS LATAWIEC
PROMOTOR RITE CONSTITUTUS

THOMAS BOCZAR
H.T. DECANUS SPECTABILIS

MARCUS TUKIENDORF
RECTOR MAGNIFICUS

Dyplom doktora *honoris causa* Politechniki Opolskiej (2017)

Q.F.F. F.Q.S.

SUMMIS AUSPICIIS SERENISSIMAE REI PUBLICAE POLONORUM

NOS

HYACINTHUS NAMIEŚNIK

HOC TEMPORE UNIVERSITATIS SCIENTIARUM TECHNICARUM GEDANENSIS
RECTOR MAGNIFICUS

ET

GEORGIUS WTOREK

HOC TEMPORE FACULTATIS ELECTRONICAE, TELECOMMUNICATIONIS ET INFORMATICAE
DECANUS SPECTABILIS ET PROMOTOR RITE CONSTITUTUS,

CONSENSU PLURIUM SENATUS UNIVERSITATIS SCIENTIARUM TECHNICARUM GEDANENSIS,
QUOD DECRETO DIE XII MENSIS DECEMBRIS ANNO MMXVIII FACTO, CONFIRMATUM EST,

IN

DOMINUM CLARISSIMUM

JOANNEM MROCZKA

PROFESSOREM
UNIVERSITATIS SCIENTIARUM TECHNICARUM VRATISLAVIENSIS,

VIRUM DOCTUM, BENE MERITUM PROGRESSUI NOSTRIS TEMPORIBUS SCIENTIARUM,
QUAE AD CONTRARIAM DIFFICULTATEM ET MALE CONDICTA MANDATA
IN INTERDICTIS MENSURIS COMPOSITIS ATTINENT;
CUI AUCTORITAS IN AEQUITATIONIBUS INTEGRALIBUS SOLVENDIS ET IN ELABORATIONE PROPRII
METHODI MOMENTORUM IN ANALYSE DIVISIONIS MAGNITUDINIS PARTICULARUM
DISPERSAE PHASAE DISPERSORUM CENTRORUM DISPERSO LUMINE EST;

HOMINEM, QUI IN COLLABORATIONE CUM UNIVERSITATE SCIENTIARUM
TECHNICARUM GEDANENSI FRUCTOSE VERSABATUR,

DOCTORIS HONORIS CAUSA NOMEN

ET

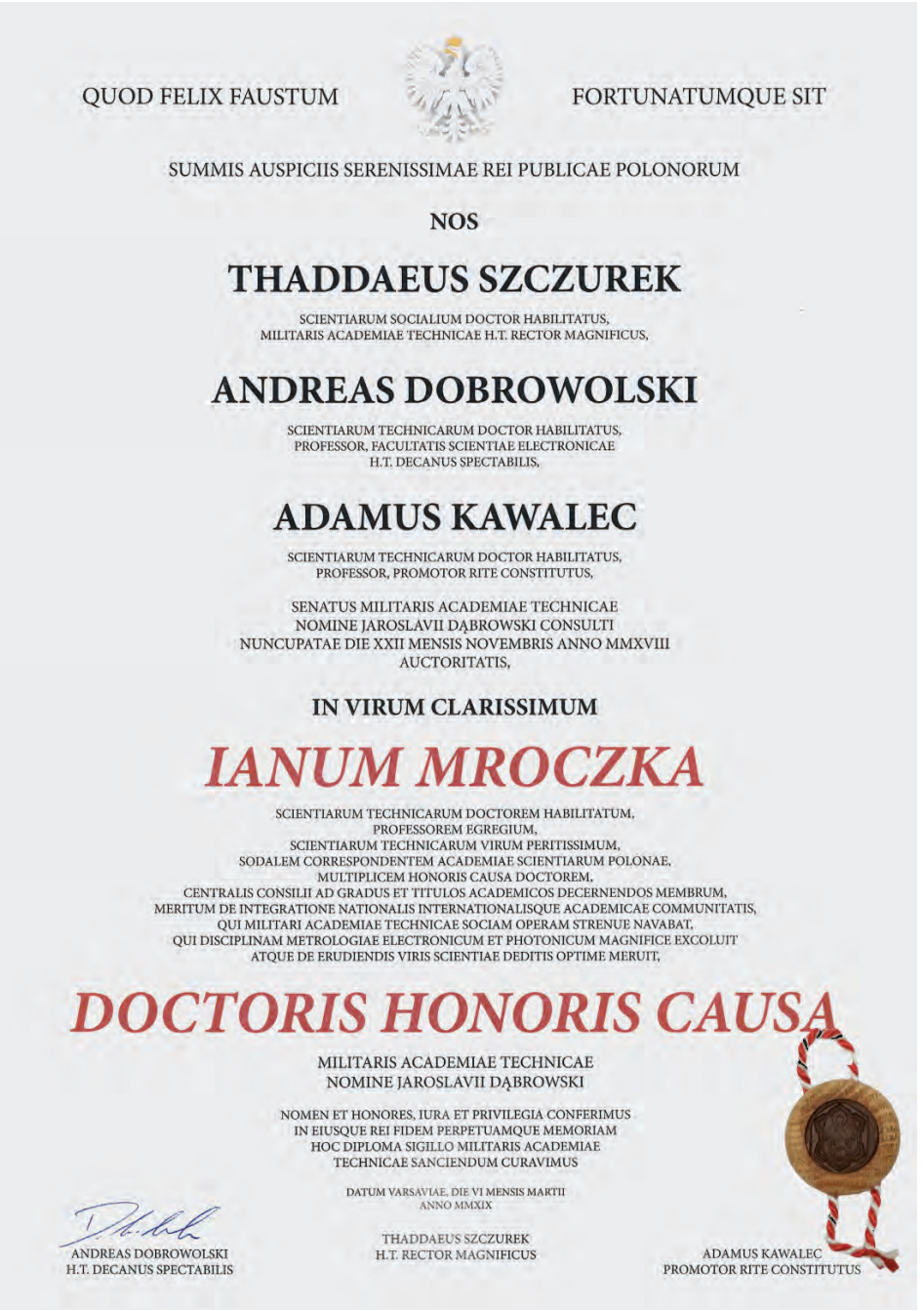
HONORES, IURA ET PRIVILEGIA CONFERIMUS ET, IN EIUS REI FIDEM,
HOC DIPLOMA SANCIENDUM SIGILLO CURAVIMUS.

HYACINTHUS NAMIEŚNIK
RECTOR MAGNIFICUS

GEORGIUS WTOREK
DECANUS ET PROMOTOR

DATUM GEDANI DIE XXIII MENSIS JANUARII ANNO MMXIX

Dyplom doktora *honoris causa* Politechniki Gdańskiej (2019)



QUOD FELIX FAUSTUM FORTUNATUMQUE SIT

SUMMIS AUSPICIIS SERENISSIMAE REI PUBLICAE POLONORUM

NOS

THADDAEUS SZCZUREK

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

ANDREAS DOBROWOLSKI

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

ADAMUS KAWALEC

SCIENTIARUM TECHNICARUM DOCTOR HABILITATUS,
PROFESSOR, PROMOTOR RITE CONSTITUTUS,

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

IN VIRUM CLARISSIMUM

IANUM MROCZKA

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

DOCTORIS HONORIS CAUSA

MILITARIS ACADEMIAE TECHNICAE
NOMINE JAROSLAVII DĄBROWSKI

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

DATUM VARSAVIAE, DIE VI MENSIS MARTII
ANNO MMXIX

ANDREAS DOBROWOLSKI
H.T. DECANUS SPECTABILIS

THADDAEUS SZCZUREK
H.T. RECTOR MAGNIFICUS

ADAMUS KAWALEC
PROMOTOR RITE CONSTITUTUS

Dyplom doktora *honoris causa* Wojskowej Akademii Technicznej
im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie (2019)

SENAT AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
UCHWAŁĄ PODJĘTĄ W DNIU 30 CZERWCA 2021 ROKU NADAŁ TYTUŁ

Doktora Honoris Causa

prof. Janusznowi Mroczce

W UZNANIU WYBITNYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH W OBSZARZE METROLOGII, A W SZCZEGÓLNOŚCI MATEMATYCZNYCH UWARUNKOWAŃ PROBLEMU ODWROTNEGO W ZŁOŻONYCH POMIARACH POŚREDNICH, KTÓRE STAŁY SIĘ PŁASZCZYZNĄ WIELOLETNIEJ, BLISKIEJ WSPÓŁPRACY Z AKADEMIĄ GÓRNICZO-HUTNICZĄ, PROMUJĄC JEJ KADRĘ NAUKOWĄ I DYDAKTYCZNĄ W TYM OBSZARZE WIEDZY, JEDNOCZEŚNIE ROZSŁAWIAJĄC JEJ MERYTORYCZNE OSIĄGNIĘCIA W KRAJU I ZA GRANICĄ.

REKTOR
PROF. DR HAB. INŻ. JERZY LIS

PROMOTOR
PROF. DR HAB. INŻ. JANUSZ GAJDA

DZIEKAN WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ
DR HAB. INŻ. RYSZARD ŚROKA, PROF. AGH

Kraków, dnia 1 grudnia 2021 roku

Dyplom doktora *honoris causa* Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (2021)

Zakończenie

Człowiek jest wielki nie przez to, co posiada,
lecz przez to, kim jest;
nie przez to, co ma,
lecz przez to, czym dzieli się z innymi.

(Św. Jan Paweł II)

Wiele kart można jeszcze zapisać o życiu i osobowości Profesora Mroczki – Jego umiłowaniu nauki, pasjach, poszukiwaniu, radości tworzenia, determinacji, pięknych i trudnych chwilach, wypowiedzianych i niewypowiedzianych słowach.

Profesor Mroczka pokazał nam wszystkim, że nauka jest piękna, a jej uprawianie jest misją, która powinna być realizowana na fundamencie podstawowych wartości akademickiego etosu – prawdy, rzetelności i odpowiedzialności. On pozostaje oddany i wierny tym zasadom, chociaż to wiele kosztuje.

Zapytany o swój największy życiowy sukces, zastanawia się tylko chwilę i odpowiada, jak na Galicjanina przystało: Rodzina. Moi najbliżsi byli, są i pozostaną dla mnie najważniejsi.

Profesor niczego nie musi. Osiągnął w życiu bardzo wiele, może pracować własnym rytmem, spędzać czas w swoim azylu – pięknym przydomowym ogrodzie. Wybiera jednak to w czym jest wybitny – pracę z młodymi ludźmi i na rzecz młodych ludzi. Im dedykuje wiersz „Do młodych" Adama Asnyka:

Do młodych

Szukajcie prawdy jasnego płomienia!
Szukajcie nowych, nie odkrytych dróg...
Za każdym krokiem w tajniki stworzenia
Coraz się dusza ludzka rozprzestrzenia,
I większym staje się Bóg!

Choć otrząśniecie kwiaty barwnych mitów,
Choć rozproszycie legendowy mrok,
Choć mgłę urojeń zedrzecie z błękitów,
Ludziom niebiańskich nie zbraknie zachwytów,
Lecz dalej sięgnie ich wzrok.

Każda epoka ma swe własne cele
I zapomina o wczorajszych snach...
Nieście więc wiedzy pochodnię na czele
I nowy udział bierzcie w wieków dziele,
Przyszłości podnoście gmach!

Ale nie depczcie przeszłości ołtarzy,
Choć macie sami doskonalsze wznieść;
Na nich się jeszcze święty ogień żarzy,
I miłość ludzka stoi tam na straży,
I wy winniście im cześć!

Ze światem, który w ciemność już zachodzi
Wraz z całą tęczą idealnych snów,
Prawdziwa mądrość niechaj was pogodzi
I wasze gwiazdy, o zdobywcy młodzi,
W ciemnościach pogasną znów!

Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w sprzedaży wysyłkowej
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-202-8