

Janusz Mroczka

Doktor honoris causa
Politechniki Gdańskiej



Gdańsk 2019

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Gdańskiej

Skład i projekt okładki

Beata Podwojska

© Copyright by Politechnika Gdańska

Gdańsk 2019

ISBN 978-83-7348-766-6



Słowo od Rektora Politechniki Gdańskiej

Dzień 23 stycznia 2019 roku zaznaczy się w historii Politechniki Gdańskiej dzięki uroczystości, w której uczestniczymy – nadaniu akademickiej godności doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej. Tym zaszczytnym wyróżnieniem środowisko naszej Alma Mater uhonoruje wybitnego uczonego, Profesora Politechniki Wrocławskiej Janusza Mroczkę, członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk.

W długoletniej tradycji, sięgającej XV wieku tytuł doktora honoris causa, jest najwyższą godnością, jaką uczelnie na świecie obdarzają wyróżnione osoby w dowód uznania za ich szczególne zasługi w dziedzinie nauki, wzorowej postawy moralnej, wkładu pracy w rozwój kadry i działalności organizacyjnej. W duchu tego przesłania, również społeczność akademicka Politechniki Gdańskiej na dzisiejszej uroczystości honoruje Profesora Janusza Mroczkę za Jego wkład w rozwój naszej uczelni, budując tym samym jej prestiż wśród ośrodków akademickich w kraju i za granicą. Laudacja, poparta wnikliwymi pozytywnymi recenzjami, ukazuje wiele informacji o osiągnięciach doktora honorowego, przybliża i uwypukla Jego zasługi naukowe, świadczy o Jego najważniejszych osiągnięciach i dokonaniach badawczych.

Na każdym etapie w rozwoju społeczeństw motorem postępu są wybitne jednostki oddane nauce, badacze i twórcy o nieprzeciętnych umysłach, osobowości o silnych charakterach i wielkich sercach. Kolejne pokolenia zawdzięczają im rozwój cywilizacyjny i poprawę poziomu życia.

Odczuwam wielką satysfakcję, że to my – środowisko akademickie Politechniki Gdańskiej – wskazujemy i pragniemy uhonorować Profesora Janusza Mroczkę, tak zasłużoną postać dla nauki polskiej tym najwyższym zaszczytem akademickim.

Nadanie akademickiego tytułu doktora honoris causa jest aktem o doniosłym znaczeniu w misji uczelni. Wskazuje młodym pokoleniom wzorce właściwych postaw moralnych, cnót i walorów etycznych. Wybór osoby pretendującej do tego wyróżnienia stanowi publiczną deklarację dochowania wierności autorytetom z grona najbardziej znamienitych przedstawicieli środowiska nauki, kultury i życia społecznego.

O nadanie tego zaszczytnego tytułu wstąpił Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, a rola promotora przypadła dziekanowi tego wydziału profesorowi Jerzemu Wtorkowi. W dniu 12 grudnia 2018 roku Senat Politechniki Gdańskiej, po uwzględnieniu

jednoznacznie pozytywnych opinii recenzentów, profesorów Andrzeja Materki, Macieja Ogorzałka oraz Bogdana Macieja Wilamowskiego, podjął uchwałę o nadaniu prof. dr. hab. inż. Januszowi Mrocze, członkowi korespondentowi PAN, tytułu doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej.

Zaszczyt to dla nas i honor szczególny, że możemy w ten sposób wyrazić naszą wdzięczność i szacunek dla Jego dokonań. Jestem głęboko przekonany, że tę godność otrzymuje wybitny naukowiec, autorytet moralny, przyjaciel Politechniki Gdańskiej.

prof. Jacek Namieśnik
Rektor Politechniki Gdańskiej

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. Namieśnik', written in a cursive style.



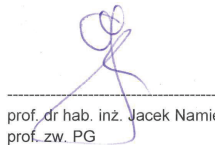
**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

**Uchwała Senatu PG
nr 219/2018/XXIV
z 12 grudnia 2018 r.**

w sprawie: nadania tytułu i godności doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej prof. dr. hab. inż. Januszowi Mrocze.

Senat PG, na podstawie §8 ust. 3 Statutu PG oraz §8 Regulaminu nadawania tytułu doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej stanowiącego załącznik nr 2 do Statutu PG postanawia nadać prof. dr. hab. inż. Januszowi Mrocze z Politechniki Wrocławskiej tytuł i godność doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej.

Przewodniczący Senatu
Rektor PG



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

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 INFORMATICAЕ
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 CONDUCTA 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

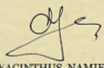
TECHNICARUM GEDANENSIS FRUCTOSE VERSABATUR,


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 JANUARI ANNO MMXIX

Laudacja z okazji nadania
Profesorowi Januszowi Mrocze
tytułu i godności doktora honoris causa
Politechniki Gdańskiej,
wygłoszona przez
prof. dr. hab. inż. Jerzego Wtorka

Magnificencjo Rekorze,
Wysoki Senacie,
Wielce Szanowny Doktorze Honorowy,
Szanowni Państwo!

Mamy dzisiaj zaszczyt gościć w murach Politechniki Gdańskiej wielu znamienitych gości. Przybyli tu, aby być uczestnikami i świadkami wyjątkowej uroczystości, jaką jest nadanie przez Senat Politechniki Gdańskiej tytułu i godności doktora honoris causa Profesorowi Januszowi Mrocze – wybitnej postaci świata nauki, zwłaszcza nauk technicznych, wybitnemu metrologowi, profesorowi zwyczajnemu, członkowi korespondentowi Polskiej Akademii Nauk, uczonemu o międzynarodowym uznaniu, wychowawcy wielu pokoleń naukowców i inżynierów, osobie konsekwentnej i skutecznej w swoich działaniach, ale także osobie, co należy podkreślić, o dużym poczuciu humoru i jednocześnie krytycznie oceniającej swoje osiągnięcia.

Tytułem i godnością doktora honoris causa wyróżnia się wybitnych przedstawicieli nauki, kultury i życia publicznego. Osoby cieszące się autorytetem naukowym, nie-naganną postawą moralną i etyczną, jednym słowem szacunkiem. 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 Mrocza, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk, profesor zwyczajny Politechniki Wrocławskiej, doktor honoris causa Politechnik Lubelskiej i Opolskiej, spełnia te wymagania z nadmiarem, skupiając w swojej osobowości wszystkie wymienione cechy i wartości. Jak już wspomniałem wręczony dzisiaj doktorat honorowy będzie dla profesora Janusza Mroczy trzecim z kolei. Zatem dzisiejsza uroczystość jest jednocześnie dowodem uznania środowiska Politechniki Gdańskiej dla Jego osiągnięć, ale także kolejnym potwierdzeniem słuszności obranej przez niego drogi naukowca, wychowawcy, nauczyciela i organizatora nauki.

Wartym podkreślenia jest również to, że ważne jest nie tylko kto godność doktora honorowego odbiera, ale także również kto ją nadaje. Dzisiaj ten tytuł i godność nadamy z inicjatywy Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki. Wydziału, który istnieje i rozwija się od ponad 66 lat oraz skupia w swoich szeregach zarówno metrologów elektronicznych, optycznych, jak i biomedycznych. I co więcej, we wszystkich tych obszarach nauki posiada znaczące osiągnięcia. Można więc śmiało stwierdzić, że wyróżnienie to zostało zaakceptowane przez naukowców zajmujących się podobnymi zagadnieniami i problemami naukowymi oraz konstrukcyjnymi, tym większa jego wartość.

Wyrazy uznania zyskują na wartości i znaczeniu także dzięki znamienitym, o uznanych osiągnięciach i znanym nie tylko w Polsce, recenzentom oceniającym dorobek Profesora, których recenzje, jednoznacznie pozytywnie, zostały zaakceptowane przez Senaty Politechniki Łódzkiej, Uniwersytetu Jagiellońskiego i Rektora Auburn University. Profesor Janusz Mroczka dołączy do nielicznej grupy laureatów tej godności wnioskowanych przez Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, do której należą Profesorowie Janusz Groszkowski, Dieter A. Mlynski, Ignacy Malecki, Jan Węglarz oraz Michał Białko.

Profesor Janusz Mroczka urodził się 27 kwietnia 1952 roku w Dębicy. W mieście tym ukończył, w 1971 roku, I Liceum Ogólnokształcące im. Króla Władysława Jagiełły. Szkoła ta szczyti się takimi absolwentami jak: Tadeusz Łomnicki, Krzysztof Penderecki i oczywiście Janusz Mroczka. Dyplom ukończenia studiów wyższych uzyskał w 1976 roku na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, otrzymując jednocześnie tytuł zawodowy magistra inżyniera elektronika. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 1980 roku, na podstawie dysertacji zatytułowanej „Zagadnienie pomiaru mętności wody oraz wielkości cząstek roztworów koloidalnych za pomocą światła rozproszonego”. Stopień doktora habilitowanego został mu nadany w 1991 roku na podstawie monografii pt. „Metrologiczne wykorzystanie światła rozproszonego do badań cząstek w roztworach dyspersyjnych”. Po uzyskaniu stopnia doktora habilitowanego, w latach 1991–1996, pełnił funkcję dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej. Jest inicjatorem powołania Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, która nieprzerwanie funkcjonuje od 1998 roku. Dzięki spójności tematycznej, wypracowanemu dużemu potencjałowi badawczemu i imponującemu dorobkowi naukowemu, założona i kierowana przez Profesora Katedra postrzegana jest jako renomowana szkoła naukowa, znana na arenie międzynarodowej. Tytuł naukowy profesora otrzymał w 1996 roku. Od 1999 roku zatrudniony jest na stanowisku profesora zwyczajnego Politechniki Wrocławskiej. W latach 2001–2007 pełnił funkcję wiceprzewodniczącego Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk, natomiast w latach 2007–2015, przez dwie kadencje, funkcję przewodniczącego tego Komitetu. Pod Jego kierownictwem Komitet zajął I miejsce w przeprowadzonej ocenie spośród wszystkich komitetów naukowych PAN. W roku 2010 został wybrany na członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk. Od 2013 roku pełni z wyboru funkcję członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów. Profesor ponadto należy do Polskiego Towarzystwa Fizycznego od 1986 roku a od 1992 roku jest stałym członkiem SPIE – The

International Society for Optical Engineering, i od 1994 roku członkiem International Technical Working Group on Penetrating Radiation.

Dorobek naukowy Profesora Janusza Mroczi jest bogaty, a jego struktura zróżnicowana. Jest On autorem łącznie 420 publikacji. W tej liczbie znajdują się publikacje z listy filadelfijskiej (118), artykuły w czasopismach (131), monografie i książki (4), rozdziały w monografiach i książkach (13), referaty konferencyjne (145), patenty i zgłoszenia patentowe (8).

Przegląd głównych wątków tematycznych aktywności naukowej prof. J. Mroczi pozwala zauważyć, że obok zagadnień wysoce teoretycznych pojawiają się kwestie praktyczne związane z zastosowaniem metod pomiarowych w systemach monitoringu środowiska naturalnego, medycznego i przemysłowego. Obok zagadnień sprzętowych rozważane są kwestie czysto matematyczne. Profesor wykorzystuje pomiary fotoniczne do badania obiektów dyspersyjnych szczególnie za pomocą metod analizy promieniowania rozproszonego. Swoją naukową przygodę w obszarze fotoniki rozpoczął oceniając optyczne właściwości wody dla zastosowań w ochronie środowiska. Jednym z aspektów prowadzonych wówczas prac były tak podstawowe zagadnienia jak eliminacja niejednoznaczności pomiaru mętności za pomocą metody turbidymetrycznej. Była to podstawowa przeszkoda uniemożliwiająca praktyczne wykorzystanie tej techniki pomiarowej. Za tym osiągnięciem mogły pójść następne, szczególnie te mające praktyczną wartość, nowe rozwiązania konstrukcyjne mętnościomierzy. Praktyczne wykorzystanie proponowanych rozwiązań musiało doprowadzić do zauważenia potrzeby opracowania nowych modeli matematycznych opisujących rozpraszanie promieniowania na cząstkach fazy rozproszonej. W dalszej kolejności, już dokładniejsze modele mogły być podstawą do precyzyjniejszych analiz mierzonych parametrów opisujących ośrodki dyspersyjne, takich jak całkowity współczynnik osłabienia czy objętościowa funkcja rozproszenia.

Rozwinął zastosowania metody momentów dla celów metrologii optycznej, rozwijał deterministyczne i statystyczne metody przetwarzania danych pomiarowych, a także zastosowania transformacji czasowo-częstotliwościowych w przetwarzaniu sygnałów pomiarowych. Opracowane metody wykorzystał w wydawałoby się odległych od siebie obszarach techniki i wiedzy, poczynawszy od wspomnianych już ośrodków dyspersyjnych, poprzez badania zjawisk zachodzących w krwi, a na systemach energetycznych skończywszy.

Zainteresowania naukowe Profesora Janusza Mroczi dotyczą metodologii procesu poznawczego, algorytmizacji problemu odwrotnego w pomiarach pośrednich i zastosowania zaawansowanych metod analizy do pozyskiwania nowej, dokładniejszej wiedzy o badanych obiektach. Szczególnie interesujące są wyniki uzyskane w zakresie nowych możliwości wykorzystania informacji zawartej w pomiarach pośrednich i tzw. metrologii odwrotnej. Profesor Janusz Mroczi jest światowym pionierem tej technologii, a jego osiągnięcia w tym zakresie są możliwe do wykorzystania w wielu odległych wydawałoby się obszarach zastosowań metrologii.

Elementem spajającym wszystkie wątki jest autorski schemat poznawczy, opierający się na transformacji abstrakcyjnych modeli fizycznych – opisanych za pomocą pojęć materii, energii i czasu – w weryfikowalne doświadczalnie modele metrologiczne, odwołujące się do teorii informacji. Wynikiem procesu poznawczego są modele matematyczne zarówno obiektów jak i narzędzi pomiaru, a istotą ich wykorzystania w metrologii jest ich zastosowanie w tzw. zagadnieniu odwrotnym. Jest tak dlatego, że celem pomiaru jest docieranie do przyczyn na podstawie informacji o skutkach – estymacja interesujących nas wielkości na podstawie surowych danych pomiarowych. Metody rozwiązywania problemów odwrotnych, to jest wyznaczania parametrów modeli fizykochemicznych, są integralnym elementem dorobku Prof. J. Mroczi, zarówno w obszarze dotyczącym pomiarów wielkości cząstek, jak i w części dotyczącej systemów biologicznych. Ze względu na złe uwarunkowanie należą one do najtrudniejszych zadań obliczeniowych i wymagają od badaczy zajmujących się nimi wysokich umiejętności matematycznych. Nadbudowa teoretyczna opracowana przez prof. J. Mroczkę wnosi istotny wkład do nauk podstawowych, szczególnie w zakresie algorytmizacji problemu odwrotnego w przypadku źle uwarunkowanych zadań w złożonych pomiarach pośrednich.

Należy podkreślić, że z metodologicznego punktu widzenia, istotną wartością dorobku naukowego Prof. J. Mroczi jest kompleksowość oraz głębokie osadzenie tego dorobku w szerokim kontekście teoretycznym – z jednej strony – i aplikacyjnym z drugiej. Jego osiągnięcia publikacyjne powiązane z głęboką wiedzą zapewne były powodem, dla którego był wielokrotnie zapraszany przez redakcje renomowanych czasopism zagranicznych jako recenzent. Opracowywał również liczne recenzje monografii i książek. O jakości publikacji prof. J. Mroczi świadczy liczba ich cytowań, która rocznie waha się wokół wartości 250 (wg GoogleScholar). Jest to liczba, którą w przypadku wielu pracowników nauki osiągnąć jest przez wiele lat, jeśli nie przez całe naukowe życie.

Wartym podkreślenia jest fakt, że ponad czterdziestoletnia działalność naukowa Prof. J. Mroczi charakteryzuje się spójnością tematyczną i konsekwencją metodologiczną. Dotyczy ona problematyki metrologicznej, a w zasadniczym i dominującym nurcie, zadań badawczych związanych z wykorzystaniem zjawisk optycznych do celów pomiarowych. Należy zauważyć, że prowadzone badania skutkowały nie tylko publikacjami, ale także patentami, spośród których 4 zostały wdrożone do praktycznego stosowania.

Nie mniejsze osiągnięcia ma Profesor w kształceniu młodych naukowców. W przypadku Profesora możemy mówić o szkole naukowej zarówno biorąc pod uwagę liczbę wypromowanych doktorów jak i drogę dochodzenia do promocji. Profesor uważa, że podstawową formą realizacji zadań badawczych wynikających z rozwiązywania problemów naukowych są projekty badawcze. Aktywność ta dotyczy wszystkich rodzajów grantów. Praktycznie każda praca doktorska i habilitacyjna realizowana w zespole prof. J. Mroczi była rezultatem prac prowadzonych w grantach. Tak wypracowana forma pozwalała nie tylko na realizację tzw. doktoratów *co-tutelle* we Francji, ale także na staże krótkoterminowe innych doktorantów, czy na wyjazdy i udział w specjalistycznych konferencjach międzynarodowych. Korzyści dla osób współpracujących z Profesorem są zatem wieloaspektowe. Po pierwsze, rozpoczynający swoją przygodę z nauką doktoranci zo-

bowiązani są do efektywnego definiowania celów do osiągnięcia. Po drugie, wdrażani są do systematycznej pracy, której ramy wyznaczane są przez wymagania realizowanego grantu. Po trzecie, mają możliwość nawiązania wielu międzynarodowych kontaktów. W rezultacie osoby uzyskujące stopnie są dobrze przygotowane do prowadzenia prac naukowych, posiadają dobrze ugruntowaną wiedzę i umiejętności. Jest to wynikiem działalności dydaktycznej i wychowawczej, w której Profesor na pierwszym miejscu stawia na rozwój naukowy młodych pracowników i traktuje to jako kluczowy warunek rozwoju nauki. Jego aktywność na tym polu została zauważona i nagrodzona przez Fundację Nauki Polskiej w 2005 roku subsydiem profesorskim „Mistrz”. Profesor wypromował łącznie 24 doktorów (w tym 4 doktoraty *co-tutelle* we Francji), sprawował opiekę naukową nad 7 habilitantami, jest autorem 3 recenzji doktoratów honoris causa, 56 recenzji wniosków profesorskich, 52 recenzje w przewodach habilitacyjnych oraz 19 monografii doktorskich. Za osiągnięcia naukowe dwóch wychowanków Profesora Janusza Mroczi otrzymało stypendium Fundacji Nauki Polskiej: „Nobel dla młodych”, jeden został wyróżniony nagrodą Wydziału IV PAN, a trzynastu obroniło z wyróżnieniem prace doktorskie. Ośmiu z nich jest już samodzielnymi pracownikami nauki. Zatem mówienie o szkole nie jest żadną przesadą a jedynie stwierdzeniem faktu.

Prof. Janusz Mroczi pierwsze kontakty z pracownikami Politechniki Gdańskiej nawiązał jeszcze w latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku. Wówczas z zespołem naukowym, w którym pracował Janusz Mroczi współpracę nawiązał dr hab. inż. Ludwik Spiralski, późniejszy kierownik Zakładu Elektronicznej Aparatury Pomiarowej wówczas na wydziale Elektroniki. Jednak ściślejsza współpraca i kontakty z Wydziałem ETI PG mają miejsce po 2005 roku. Szczególne zasługi prof. Janusz Mroczi ma w obszarze wspierania Wydziału w budowaniu silnego zespołu naukowego w dyscyplinie Elektronika. Opracował liczne recenzje rozpraw doktorskich i habilitacyjnych oraz wniosków o nadanie tytułu profesora pracownikom naukowym Politechniki Gdańskiej, ale także pracowników innych Uczelni, którzy wskazali Wydział ETI PG jako jednostkę przeprowadzającą procedury. W sumie uczestniczył w ponad 23 różnorodnych procedurach (habilitacyjnych, profesorskich) pracowników WETI. Nie ulega wątpliwości, że pozytywnie zakończone procedury są zasługą przede wszystkim osób ubiegających się o stopień lub tytuł, a nie przeprowadzających procedury komisji. Niemniej jednak należy zauważyć, że dogłębna analiza dorobku i warsztatu naukowego kandydatów do stopnia czy tytułu przedstawiana przez Prof. J. Mroczi każdorazowo była bardzo rzetelna i zawierała zarówno opis mocnych i słabych procedowanych wniosków. Wpływało i wpływa to istotnie na sposób i jakość prac prowadzonych przez znaczną część pracowników Wydziału.

Wspiera nasze starania o odpowiednią reprezentację środowiska naukowego Politechniki Gdańskiej w komitetach naukowych PAN, czego wynikiem jest między innymi liczna reprezentacja naszych pracowników w Komitecie Metrologii i Aparatury Naukowej PAN (trzy osoby z Politechniki Gdańskiej). Nie do przecenienia jest Jego aktywne wsparcie w promocji osiągnięć Wydziału ETI PG w gremiach PAN co doprowadziło, między innymi, do wzrostu liczby członków PAN zatrudnionych na naszym Wydziale. Obecnie, spośród

pracowników Wydziału (zarówno byłych i obecnych) wśród członków PAN mamy szczęście przedstawicieli. Prof. Janusz Mrocza bierze aktywny udział we wspólnych konferencjach i seminariach, a także rozwinął szeroką i owocną współpracę Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej oraz Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej.

Wspierał Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej w uzyskaniu praw doktoryzowania w dyscyplinie Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, a wcześniej w założeniu kierunku kształcenia Inżynieria Biomedyczna na Politechnice Gdańskiej – jako przewodniczący Zespołu Integryjno-Ekspertyzacyjnego do spraw Inżynierii Biomedycznej PAN.

Nie do przecenienia jest także wpływ prof. Janusza Mroczy na rozwój Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki wynikający z jego merytorycznego udziału w pracach Międzynarodowego Komitetu Programowego czasopisma Metrology and Measurement Systems. Jego współpraca z redaktorami naczelnymi (początkowo z prof. R. Zielonko, a następnie z prof. Januszem Smulko) doprowadziła do przekształcenia pisma o zasięgu krajowym, w pismo o dystrybucji międzynarodowej i indeksowane w 37 bazach, w tym najbardziej rozpoznawalnych oraz do istotnego podniesienia jego rangi, czego widocznym dowodem jest wartość indeksu Hirscha (jedna z najwyższych wśród polskich czasopism naukowych). Przyczynia się to istotnie wzrostowi rozpoznawalności Wydziału ETI w społeczności metrologów, zarówno krajowej i międzynarodowej.

Profesor J. Mrocza uczestniczy w działaniach organizacyjnych Wydziału mających na celu podnoszenie umiejętności i kompetencji pracowników naukowo-dydaktycznych w zakresie prowadzenia badań, pozyskiwania środków i ogólnie rzecz ujmując w kształtowaniu efektywnej kariery akademickiej. Przykładem takiej działalności mogą być wykłady, które wygłaszał dla doktorantów i młodych pracowników nauki, a dotyczące wymagań stawianych pracownikom nauki przez Centralną Komisję ds. Stopni i Tytułów, czy też metodologii oceny i recenzowania prac naukowych. Profesor J. Mrocza prowadził także wykłady dla studentów, m.in. inauguracyjny wykład w ramach przedmiotów humanistycznych dla studentów drugiego stopnia.

Wszystkie te działania przyczyniły się do rozwoju kadry naukowej Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, ale także, co uważam za szczególnie istotne, kreują wizerunek Politechniki Gdańskiej w kraju i za granicą jako znaczącej, dynamicznej uczelni technicznej.

Profesor Janusz Mrocza, za działalność naukowo-badawczą i dydaktyczną otrzymał wiele wyróżnień i prestiżowych nagród, między innymi ponad 30 Nagród JM Rektora Politechniki Wrocławskiej. Otrzymał również Nagrodę Indywidualną II stopnia MEN (1989), Nagrodę Wydziału IV PAN (1993). Wyróżniony był Nagrodą Professor Opollensis (2014), Nagrodą Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia w opiece naukowej i dydaktycznej (2014) oraz Nagrodą Prezesa PAN za stworzenie szkoły naukowej w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej wraz z cykliczną serią wydawniczą „Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej” oraz czasopismem specjalistycznym

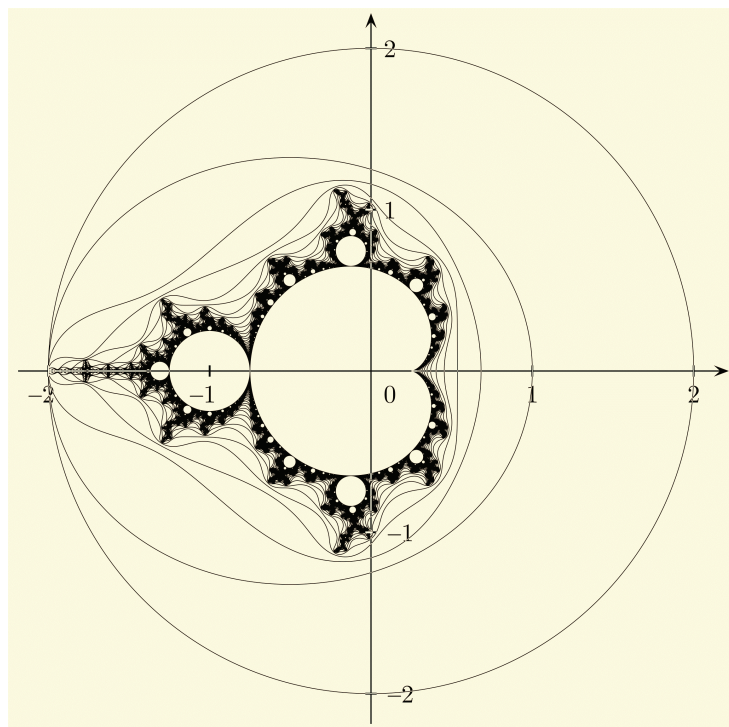
indeksowanym w JCR Metrology and Measurement Systems (2015). Otrzymał również Nagrodę Naukową im. prof. Mariana Suskiego, Złotą Odznakę Politechniki Wrocławskiej z Brylantem, Medal im. prof. Kazimierza Idaszewskiego oraz Medal im. Prof. Włodzimierza Krukowskiego. Jest odznaczony Krzyżem Oficerskim Orderu Odrodzenia Polski, Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski, Złotym, Srebrnym i Brązowym Krzyżem Zasługi oraz Medalem Komisji Edukacji Narodowej.

W przypadku Prof. Janusza Mroczi mamy do czynienia z modelem kariery naukowej, który w dobie pogoni za szybkimi i bezpośrednimi korzyściami materialnymi czy zaszczytami staje się coraz rzadszy. Z modelem kariery opartym na żmudnym doskonaleniu warsztatu badawczego, na harmonijnym łączeniu teorii z praktyką, matematyki z inżynierią, osobistego zaangażowania w czynności badawcze, na rozumnej i efektywnej opiece naukowej oraz na skutecznym i sprawnym kierowaniu zespołami badawczymi oraz jednostkami naukowymi. Profesor Janusz Mrocza jest otwarty na merytoryczną krytykę twórczości własnej, ale nie stroni od życzliwej krytyki dokonań innych badaczy. Prof. J. Mrocza realizuje model kariery naukowej podporządkowanej imperatywowi etycznemu, który w badaniach naukowych – jak zresztą w każdej etyce zawodowej – stanowi najcenniejszy element.

Konkludując, chcę z głębokim przekonaniem stwierdzić, że rzadkie przymioty osobiste i akademickie, a także zasługi dla rozwoju nauki, szczególnie metrologii, w Polsce a także wpływ na rozwój Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej w sposób szczególny predestynują prof. J. Mroczkę do wyróżnienia Go doktorem honoris causa Politechniki Gdańskiej. Uważam, że zaszczytem będzie przyjęcie Profesora Janusza Mroczi do naszej wspólnoty akademickiej.

Wybrane zagadnienia modelowania agregatów fraktalnych

Janusz Mroczka



Wprowadzenie

Księga przyrody zapisana jest językiem matematyki.
Galileusz

Trudno dziś zaprzeczyć pogładowi 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 galileuszowej „matematycznej przyrody”^{*} z jej formalnymi reprezentacjami, czyli modelami fizycznymi, matematycznymi, metrologicznymi oraz komputerowymi [39, 40]. Weryfikacja poprawności tych struktur oraz łączących ich relacji dokonuje się naturalnie w drodze empirycznych poczynąń, 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 poznawczego, które umożliwia realizację pomiaru nieinwazyjnego w czasie rzeczywistym, z potencjalnie dużą czułością i selektywnością.

* Ks. M. Heller, abp. J. Życiński „Matematyczność przyrody”, Wyd. Petrus (2011).

** R. Ingarden [w:] J. M. Bocheński „Wspomnienia”, Wyd. Antyk (2008).

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 nanotechnologii.

Dotychczasowe doświadczenia autora w zakresie optycznej i nieinwazyjnej charakterystyki obiektów złożonych obejmują m.in.: problematykę pomiarów wielkości cząstek ośrodków dyspersyjnych metodami optycznymi [36–38, 42–45, 51–53], w tym hybrydowe metody w opisie transmitancji światła w warunkach rozproszenia wielokrotnego dla monodispersyjnego rozkładu wielkości cząstek [9, 10], metody inwersyjne wykorzystujące sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej [21] oraz w spektroskopii absorpcyjnej [50] wykorzystanie spektralnych i polaryzacyjnych właściwości laserowego promieniowania rozproszonego w nieinwazyjnym badaniu materiałów kompozytowych [18–20], nieinwazyjną diagnostykę parametrów optycznych i właściwości rozproszeniowych pełnej krwi i erytrocytów [47], modelowanie matematyczne rozproszenia światła przez cząstki niesferyczne i ich agregaty [59–61, 72], modelowanie matematyczne trójwiązkowej anemometrii dopplerowskiej w określaniu położenia i prędkości cząstek w ośrodkach wielofazowych [71], nieinwazyjny pomiar in situ średnicy homogenicznych i niehomogenicznych, przezroczystych włókien wykorzystywanych m.in. w materiałach kompozytowych i jako światłowody telekomunikacyjne i pomiarowe [63, 64, 65, 66], a także praktyczne aspekty wykorzystania światła o niskiej spójności czasowej jako narzędzia w pomiarach [35, 41].

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 dwojake 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 tę dziedzinę nauki wniosły takie osoby jak: Gottfried Leibniz, Karl Weierstrass, Georg Cantor, Giuseppe Peano, David Hilbert czy Waclaw 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 [15]. Nie jest prawdą, że wymiar fraktalny musi być niecałkowity (np. dla prawdopodobnie najpopularniejszego fraktala, jakim jest zbiór Mandelbrota wynosi on dokładnie dwa [57]), 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:

$$H_\delta^s(F) = \inf \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} |U_i|^s, \quad |U_i| < \delta, \right\}, \quad (1.1)$$

w której n -wymiarowa geometria F pokryta jest n -wymiarowymi podzbiarami U o wielkości liniowej nie większej niż δ . Przy założeniu, że δ dąży do zera, otrzymamy s -wymiarową miarę Hausdorffa:

$$H^s(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} H_\delta^s(F). \quad (1.2)$$

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 [15]:

$$\dim_h F = \inf \{s : H^s(F) = 0\} = \sup \{s : H^s(F) = \infty\}. \quad (1.3)$$

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):

$$\dim_m F = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{-\log(\varepsilon)}, \quad (1.4)$$

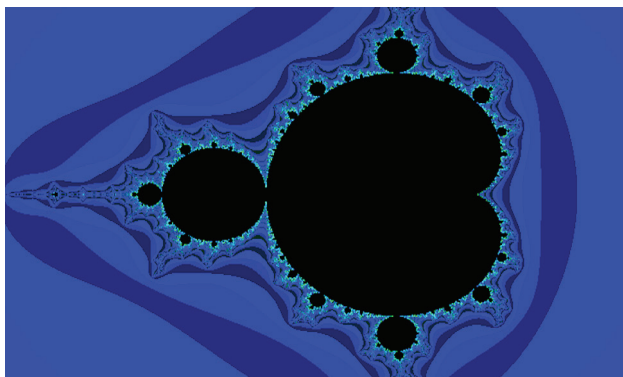
w którym $\log N(\varepsilon)$ to liczba hipersześcianów o długości boku ε , potrzebnych do przykrycia geometrii. Jeżeli granica nie istnieje, dokonujemy podziału na wymiar górny i dolny. Chociaż wymiar Hausdorffa i Minkowskiego są zwykle identyczne, w niektórych przypadkach nieznacznie się różnią, przez 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 $\dim F = 1$. 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:

$$z_0 = 0, \quad (1.5)$$

$$z_{n+1} = z_n^2 + c_m, \quad (1.6)$$

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 niniejszym tekście) kolory dobrane są na podstawie ilości iteracji potrzebnych do zbadania punktu.



rys. 1.1. Zbiór Mandelbrota

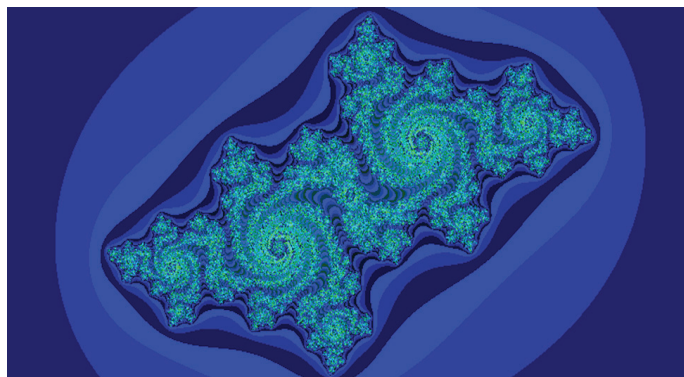
Inne równanie powszechnie wykorzystywane do generowania fraktali jest następujące:

$$z_0 = c_m, \quad (1.7)$$

$$z_{n+1} = z_n^2 + p. \quad (1.8)$$

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 niezmienny.



rys. 1.2. Kwadratowy zbiór Julii

Jednym z ważniejszych fraktali w historii badań była funkcja zdefiniowana przez Karla Weierstrassa. Jej postać zaprzeczła powszechnemu w XVIII i XIX wieku przekonaniu, że funkcje ciągłe są różniczkowalne (przynajmniej w pewnej części swej dziedziny). Opisana jest ona w następujący sposób:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x), \quad (1.9)$$

$$ab > 1 + \frac{3}{2} \pi, \quad (1.10)$$

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]:

$$L(\varepsilon) \sim k\varepsilon^{1-D} \quad (1.11)$$

gdzie L jest badaną długością, natomiast k i D są stałymi, dobieranymi adekwatnie do kształtu aproksymowanej linii brzegowej. Mandelbrot zasugerował, że może być traktowane jako rzeczywisty wymiar brzegu [31]. Rzeczywiste kształty nie są całkowicie niezależne od skali. Długość miarki nie może być dłuższa niż cały badany brzeg. Co więcej, nie powinna być ona zbyt 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 sześciąt 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 pseudofraktalne”.

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 [27], 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 wynikami symulacji. Omawiane geometrie są samopodobne, a ich skomplikowany kształt może zostać określony za pomocą wymiaru fraktalnego D_f , np. według następującej zależności [33, 62, 69]:

$$N_p = k_f \left(\frac{R_g}{r_p} \right)^{D_f}, \quad (2.1)$$

w której N_p jest liczbą monodispersyjnych cząstek o promieniu r_p , zaś k_f to współczynnik fraktalny [4, 8], 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 [26]. R_g jest promieniem bezwładności zdefiniowanym najczęściej jako [28, 46]:

$$R_g^2 = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (\bar{r}_i - \bar{r}_0)^2 = \frac{1}{2N_p^2} \sum_{i,j} (\bar{r}_i - \bar{r}_j)^2, \quad (2.2)$$

$$\bar{r}_0 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{N_p} \bar{r}_i m_i, \quad (2.3)$$

gdzie \bar{r}_0 jest środkiem masy geometrii, \bar{r}_i określa pozycję i-tej cząstki, M jest całkowitą masą geometrii, natomiast m_i masą i-tej cząstki. Przytoczone równanie jest uprosz-

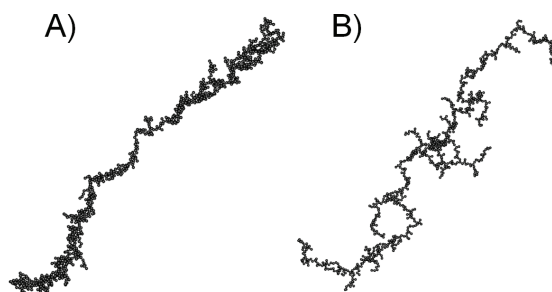
zeniem mającym zastosowanie w przypadku monodispersyjnych agregatów zbudowanych ze średniej lub dużej ilości cząstek. Gdy N_p jest małe, to wartość R_g może zostać niedoszacowana. Jedno z rozwiązań tego problemu, które pod uwagę bierze promień bezwładności pojedynczej cząstki, przedstawione zostało przez grupę Sorensena [48]:

$$R_{g,Sorensen}^2 = R_g^2 + 0.6r_p^2. \quad (2.4)$$

Inne rozwiązanie zaproponowane przez grupę Filippova ma następującą postać [16, 17]:

$$R_{g,Filippov}^2 = R_g^2 + r_p^2. \quad (2.5)$$

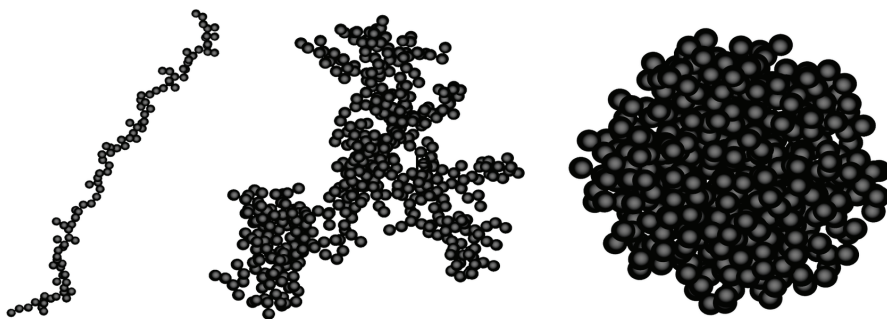
Niestety, nawet gdy geometria spełnia przytoczone równanie fraktalne, nie zawsze może zostać uznana za rzeczywisty fraktal, np. z powodu braku zachowania samopodobieństwa. Omawiane zjawisko jest ściśle związane ze sposobem tworzenia modelu, co zostało zilustrowane na rys. 2.1. Geometrie stworzone algorytmem 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 [67]. 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 nierozdzielnie związana z algorytmem agregacji. Obliczone wartości współczynnika fraktalnego k_f nie są tak precyzyjne jak w przypadku D_f i, w zależności od publikacji, mogą się różnić nawet o kilkaset procent [2, 7]. 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 [48]. Ilość cząstek wchodzących w skład pojedynczego agregatu waha się od kilku do kilku tysięcy. Są one zazwyczaj modelowane jako monodispersyjne kule. Przytoczone założenie upraszcza zarówno algorytmy modelujące proces agregacji jak również algorytmy modelujące proces rozpraszania światła na omawianych geo-

metriach. Przykładowo, zamiast wymagającego algorytmu DDA (ang. *Discrete Dipole Approximation*) można zastosować znacznie szybszy program oparty na metodzie T-Matrix [30, 54, 73]. Promień bezwładności określa względną wielkość geometrii i jest ściśle zależny od N_p (pozostałe parametry morfologiczne, tj. 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 [25].

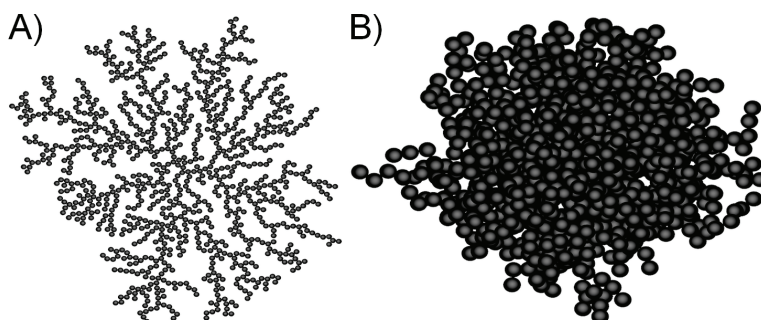
2.1. Algorytmy modelujące proces agregacji

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 [5, 34]. W niektórych przypadkach algorytmy PC mogą zostać wykorzystane jako baza dla bardziej zaawansowanych algorytmów CC. Najbardziej popularne algorytmy PC to:

Agregacja balistyczna

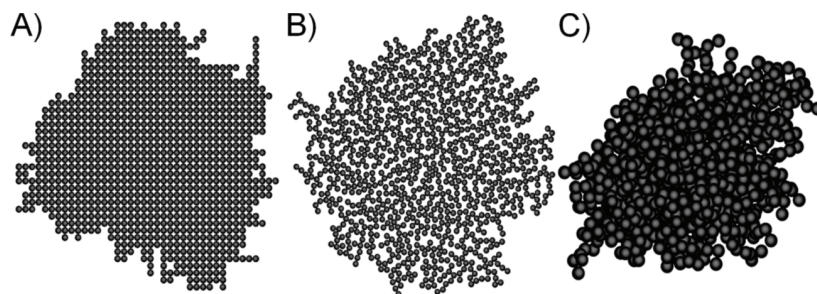
W najprostszej wersji algorytmu cząstki poruszają się po ścieżkach balistycznych w kierunku rosnącej geometrii i „przyklejają” się do niej za każdym razem gdy nastąpi zderzenie. Modele agregatów są bardzo „zbite” i wymiar fraktalny jest zbliżony do wymiaru topologicznego przestrzeni agregacji, tj. $D_f \sim 3$ dla trójwymiarowej i $D_f \sim 2$ dla dwuwymiarowej przestrzeni [34]. 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

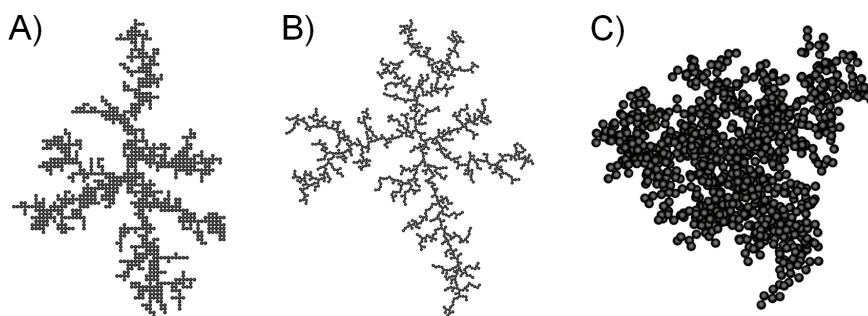
Metoda została zaproponowana w 1958 roku przez Edena i jej celem było modelowanie rozrostu kolonii komórek [12]. W każdym kroku agregacji do rosnącej geometrii dołączona zostaje pojedyncza cząstka. Jej pozycja jest losowana w taki sposób, żeby miała kontakt z obrysem geometrii. Oryginalna wersja algorytmu 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) [34], 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 [70]. Pojedyncze cząstki poruszają się po n -wymiarowej przestrzeni wykorzystując ruchy Browna. W przypadku wystąpienia kolizji, cząstki „przyklejają” się do rosnącej geometrii. Pomiędzy tym, 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)³⁴. 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 wartości¹⁷. Równanie agregacji przedstawia się następująco:

$$N_p^2 R_g^2 = N_p (N_{1p} R_{1g}^2 + N_{2p} R_{2g}^2) + N_{1p} N_{2p} \Gamma^2. \quad (2.6)$$

R_{1g} oraz N_{1p} są związane z i -tym klastrem. N_p określa całkowitą liczbę cząstek:

$$N_p = N_{1p} + N_{2p} \quad (2.7)$$

R_g jest przewidywanym promieniem bezwładności połączonych klastrów. Jeżeli pod uwagę brana jest agregacja typu PC równanie upraszcza się do następującej postaci:

$$\Gamma^2 = \frac{N_p^2 r_p^2}{N_p - 1} \left(\frac{N_p}{k_f} \right)^{\frac{2}{D_f}} - \frac{N_p r_p^2}{N_p - 1} - N_p r_p^2 \left(\frac{N_p - 1}{k_f} \right)^{\frac{2}{D_f}}. \quad (2.8)$$

Przykładowy model agregatu, otrzymanego omawianą metodą, widoczny jest na rys. 2.1A.

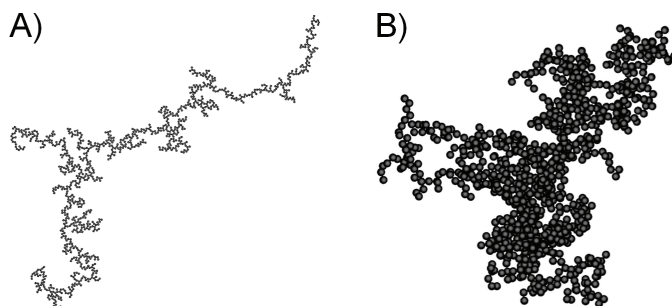
2.1.2. Algorytmy CC / Klaster-Klaster

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

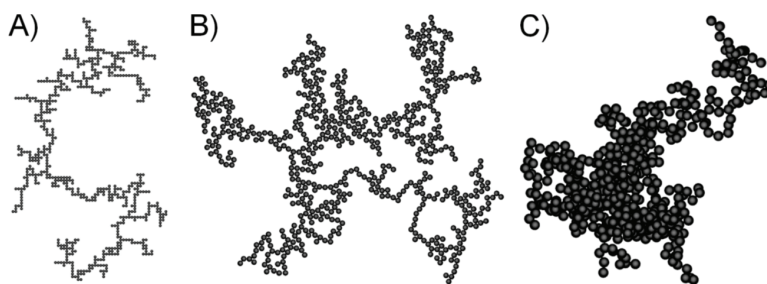
3D) i $D_f \sim 1.51$ (agregacja 2D) [34]. Przykładowe modele agregatów przedstawione są na rys. 2.6.



rys. 2.6. Dwu- i trójwymiarowe agregaty stworzone za pomocą algorytmu balistycznego CC

Agregacja limitowana dyfuzją DLCA

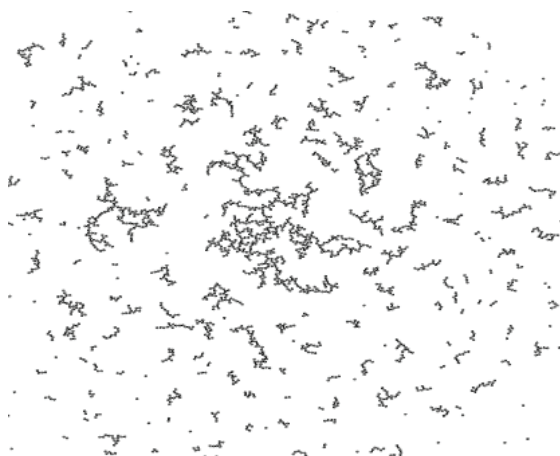
Zbiór cząstek rozmieszczony jest w losowy sposób w n-wymiarowej przestrzeni. Cząstki poruszają się w losowy sposób i łączą się w klastry przy każdym zderzeniu. Proces kończy się, gdy powstanie klastry o zakładanej wielkości. Powstałe modele agregatów charakteryzują się następującym wymiarem fraktalnym: $D_f \sim 1.78$ (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*) [34]. 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)

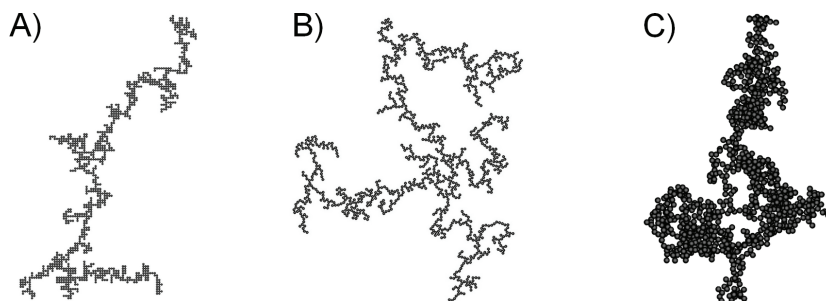
Agregacja limitowana reakcją RLCA

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



rys. 2.8. Trójwymiarowa przestrzeń agregacji wykorzystana w algorytmie DLCA. Ilość cząstek to $N_p \sim 3750$. Przynajmniej jeden klastery jest zbudowany z min. $N_p \sim 500$ cząstek

Jullien i Kolb stworzyli algorytm bardzo podobny do metody RLA [23], jednakże w ich 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) [34]. Przykładowe modele agregatów widoczne są na rys. 2.9.



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 dostrajony 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 [17]:

$$\Gamma^2 = \frac{N_p^2 r_p^2}{N_{1p} N_{2p}} \left(\frac{N_p}{k_f} \right)^{\frac{2}{D_f}} - \frac{N_p}{N_{2p}} R_{1g}^2 - \frac{N_p}{N_{1p}} R_{2g}^2. \quad (2.9)$$

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 powierzchni/objętość, agregaty fraktalne nie są stabilne i zapadają się krótko po zakończeniu procesu agregacji [3]. Efekt restrukturyzacji został uwzględniony np. w modelu grupy Brasila [5]. 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 [1, 22, 56]. Ponadto, nie wszystkie cząstki mogą być modelowane jako kule (np. erytrocyty) [13, 14].

2.2. Modyfikacje algorytmów uwzględniające złożone geometrie

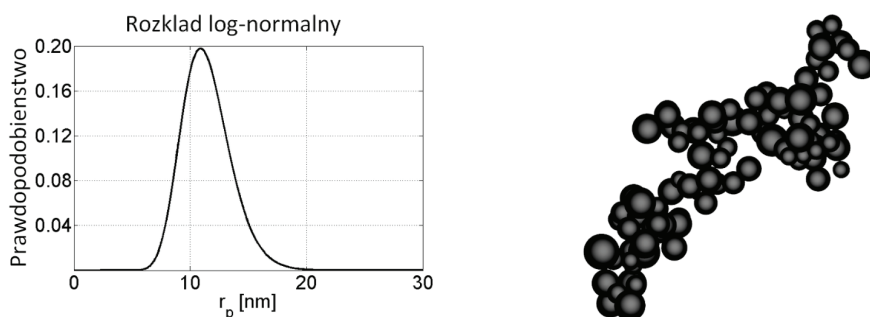
Pomimo tego, że modele agregatów są zazwyczaj złożone z monodispersyjnych cząstek ułożonych w kontakcie punktowym, możliwe są różne modyfikacje algorytmów prowadzące do powstania bardziej realistycznych geometrii.

2.2.1. Polidispersja

W rzeczywistości agregaty monodispersyjne są bardzo rzadkie. Są one zazwyczaj złożone z cząstek, których wielkość można opisać np. rozkładem logarytmicznie normalnym [3, 49]. 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 widoczna³. 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. [3]. Parametry fraktalne to $D_f = 1.86$ i $k_f = 1.65$. Gdy nie są wykorzystywane algorytmy dostrajalne, to polidispersja nieznacznie zwiększa przewidywany wymiar fraktalny [34]. Agregaty polidispersyjne 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 [25]:

$$R_{g,\text{polidispersja}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} m_i (\bar{r}_i - \bar{r}_0)}{M}. \quad (2.10)$$



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

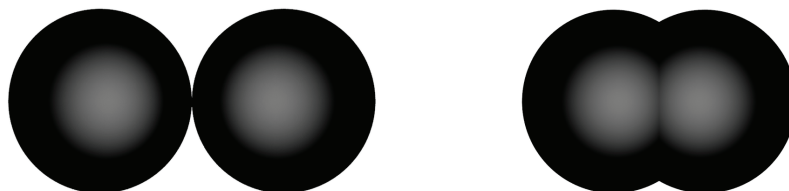
Opisane algorytmy PC i CC tworzą modele agregatów zbudowanych z cząstek w kontakcie punktowym. Jest to tylko uproszczenie, ponieważ w rzeczywistości między cząstkami występują różne połączenia. Przykładowo, ma na nie wpływ proces spiekania. Składa się on z wielu zjawisk, które można podzielić na dwie główne kategorie [56]:

Densyfikacja

W wyniku densyfikacji środki cząstek zbliżają się do siebie, co prowadzi do zmniejszenia wielkości agregatu [3]. Efekt może być modelowany za pomocą przenikających się sfer. Współczynnik przenikania jest zdefiniowany w następujący sposób [5]:

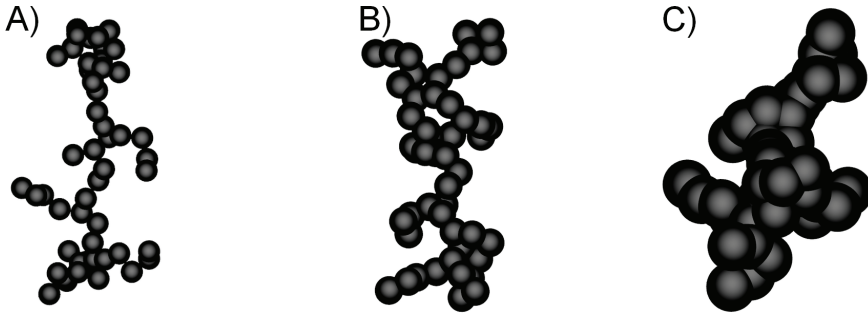
$$C_{ov} = 1 - \frac{l}{r_{1p} + r_{2p}}, \quad (2.11)$$

gdzie l jest odległością pomiędzy środkami dwóch, zwykle monodispersyjnych, 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. [48]. Ostatecznie, gdy $C_a = 1$, to środki cząstek znajdują się w jednej pozycji i agregat przypomina kulę o wymiarze fraktalnym (jak również topologicznym) $D_f = 3$.



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 $C_a = c_m$.

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 [5]:

$$k_f = k_{f,init} e^{2.2C_a}, \quad (2.12)$$

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, że zmiany D_f powinny być uwzględnione nawet w przypadku niewielkich połączeń [48]. Wyjątkiem jest sytuacja gdy promień cząstek jest dużo mniejszy niż wielkość agregatu, tj. $N_p \rightarrow \infty$. Gdy przytoczony warunek jest spełniony, to C_a nie ma wpływu na D_f . Zmiana współczynnika bezwładności może być aproksymowana w następujący sposób [5]:

$$\frac{R_g}{R_{g,init}} = 1 - C_a, \quad (2.13)$$

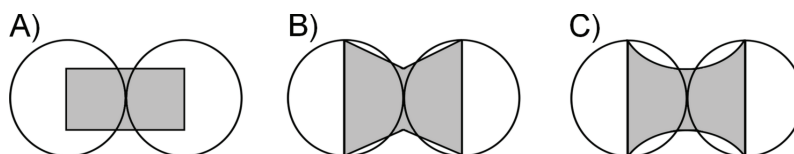
gdzie $R_{g,init}$ jest początkowym promieniem bezwładności dla cząstek ułożonych w kontakcie punktowym, czyli $C_a = 0$. Nawet jeżeli $C_a > 0$ to agregaty nie tracą swoich właściwości fraktalnych i mogą zostać zapisane przy pomocy równania fraktalnego [48]. Jeżeli $C_a = 1$ to środki cząstek znajdują się w tym samym miejscu i początkowa geometria nie może zostać odtworzona. Niewielkie przenikanie cząstek może również modelować wczesne fazy procesu spiekania [5].

Adhezja

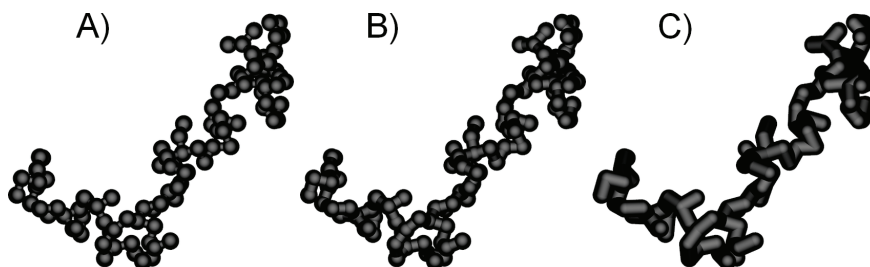
Adhezja polega na tym, że pomimo tego, że cząstki nie zmieniają swoich pozycji, to masa jest transportowana do punktu styku [56]. W badaniach numerycznych przeprowadzonych przez zespół Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej wykorzystano trzy różne typy połączeń. Pierwsze z nich może zostać przedstawione 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:

$$Y_{con} = \frac{r_c}{r_{p,min}}, \quad (2.14)$$

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, że różnica między typami połączeń jest niewielka i mogą one być wykorzystywane zamiennie. Z tego powodu zalecane jest najprostsze z nich, tj. cylindryczne [60]. Przykładowy model agregatu z połączonymi cząstkami przedstawiony



rys. 2.13. Różne modele połączeń: A) cylindryczny, B) liniowy, C) kwadratowy.
W każdym przypadku $Y = 0.5$

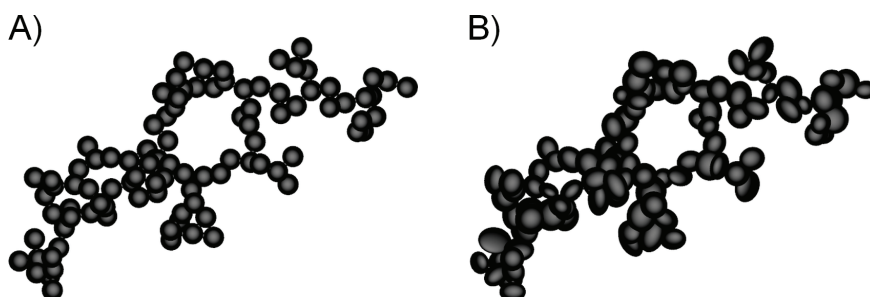


rys. 2.14. Modele agregatów fraktalnych złożonych z połączonych cząstek. Wielkość połączenia to
A) $Y = 0.5$, B) $Y = 0.75$, C) $Y = 1.0$

jest na rys. 2.14. Wymiar fraktalny 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 poldispersji) 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 [24]. 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.

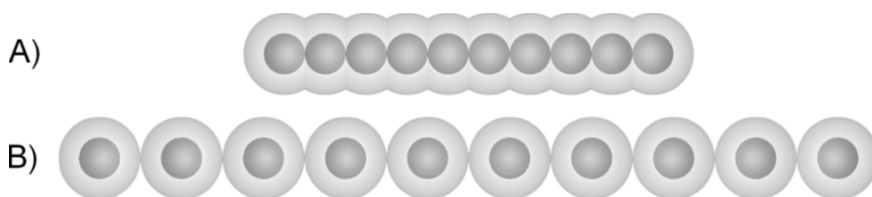


rys. 2.15. Modele agregatów fraktalnych złożone z różnych modeli cząstek:
A) sferycznych, B) eliptycznych

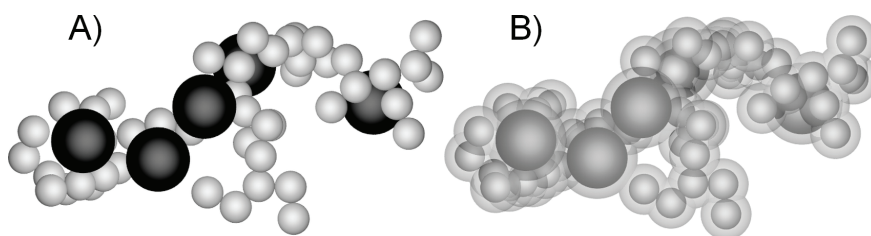
2.2.4. Materiały kompozytowe

Niektóre agregaty fraktalne łączą się z innymi materiałami, co może skutkować np. powstaniem zewnętrznych płaszczy [1]. 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 [1]. Przykładowy model agregatu czarnego węgla wzbogacony o cząstki siarczanów pokazuje rys. 2.17A (cząstki róż-

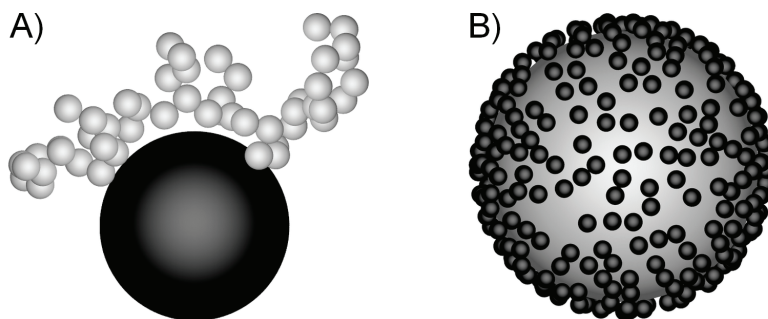
nych materiałów mogą wykazywać inne parametry rozkładu). Ten sam model otoczony płaszczem organicznym przedstawia rys. 2.17B. W niektórych przypadkach wielkość poszczególnych cząstek znacznie się różni. Na przykład, jedna cząstka może być większa niż reszta agregatu²⁹, rys. 2.18A. Co więcej, niektóre zbiory cząstek nie wykazują właściwości fraktalnych. Rysunek 2.18B przedstawia cząstkę dwutlenku tytanu otoczoną mniejszymi cząstkami złota [58].



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



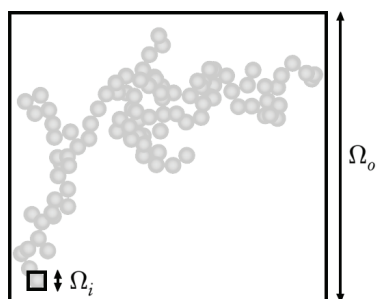
rys. 2.18. A) Agregat czarnego węgla (biały) i siarczan (czarny), B) Dwutlenek tytanu (biały) otoczony cząstkami złota (czarny)

2.3. Techniki pomiaru wymiarów fraktalnych agregatów cząstek

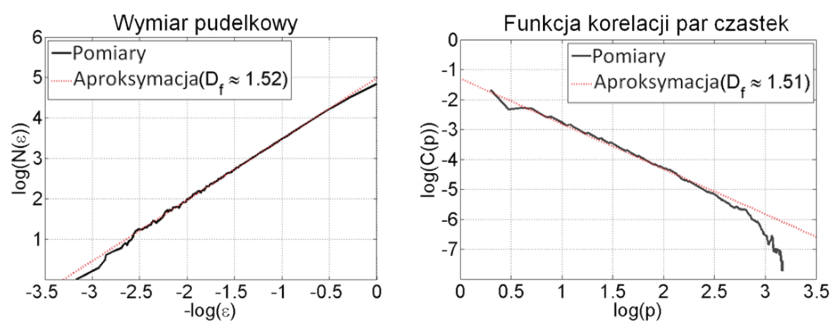
Aby stworzyć realistyczne modele agregatów fraktalnych, ich parametry morfologiczne muszą być uzyskane na podstawie prawdziwych geometrii. Poniższy rozdział przedstawia skrócony opis najpopularniejszych technik ich pomiaru.

Właściwości fraktalne

Jedną z metod pomiaru wymiaru fraktalnego agregatów jest wykorzystanie metody pudełkowej, opisaney 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 uznać 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 z na podstawie zbocza funkcji, co zostało zaprezentowane na rys. 2.20A.



rys. 2.19. Przykładowe wartości zewnętrznego i wewnętrznego odcięcia



rys. 2.20. Wymiar fraktalny trójwymiarowego modelu agregatu obliczony na podstawie
A) metody pudełkowej, B) analizy funkcji korelacji par cząstek

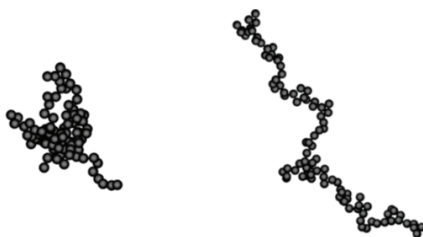
Metoda pudełkowa daje zadowalające wyniki dla trójwymiarowych modeli agregatów [68]. Procedura jest jednak znacznie bardziej złożona, gdy operujemy wyłącznie dwuwymiarowym rzutem geometrii na płaszczyznę, np. obrazem TEM [8, 72]. Brak jednego wymiaru może znacznie zmienić wyniki, co zobrazowano na rys. 2.21. Najprostsze rozwiązanie polega na modyfikacji uzyskanego wyniku z wykorzystaniem, np. zależności liniowej [8]. Powstały również inne sposoby odtworzenia brakującego wymiaru. Jeden z nich polega na badaniu zbocza następującej funkcji [26, 28]:

$$D_f = \frac{\log(N_p / k_l)}{\log(L_p / 2r_p)}, \quad (2.15)$$

gdzie k_l jest współczynnikiem korelacji a L_p jest największą długością rzutu geometrii. Następnie, współczynnik fraktalny może zostać odtworzony z wykorzystaniem następującego równania [4]:

$$k_f = k_l(L_p / 2R_g)^{D_f}. \quad (2.16)$$

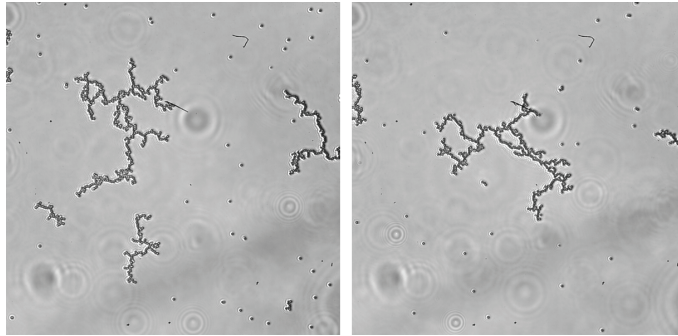
Co ważne, problem nie występuje, gdy badane obrazy przedstawiają dwuwymiarowy agregat. Przykład takiego agregatu w postaci warstwy polistyrenu stworzonego w VKI (The von Karman Institute for Fluid Dynamics) w Belgii, przedstawiono na rys. 2.22. Choć przytoczone geometrie nie są idealnie dwuwymiarowe, 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 [17]:

$$C(p) = \frac{n(p)}{4\pi p^2 h N_p}, \quad (2.17)$$



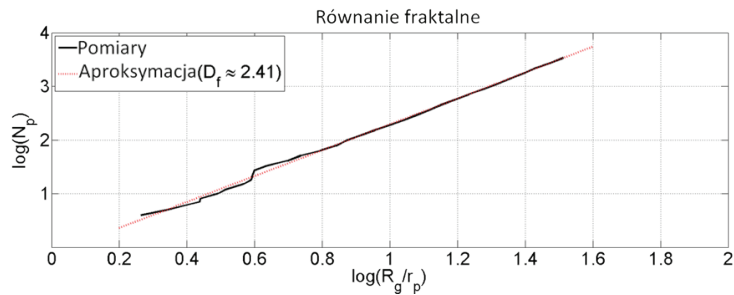
rys. 2.22. Prawie dwuwymiarowe agregaty polistyrenu stworzone w VKI

w której $n(p)$ jest gęstością par cząstek, oddalonych od siebie o $p \pm h/2$. Znormalizowana funkcja ma następującą postać:

$$\int_0^{\infty} C(p) 4\pi p^2 dp = \frac{N_p - 1}{2}. \quad (2.18)$$

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



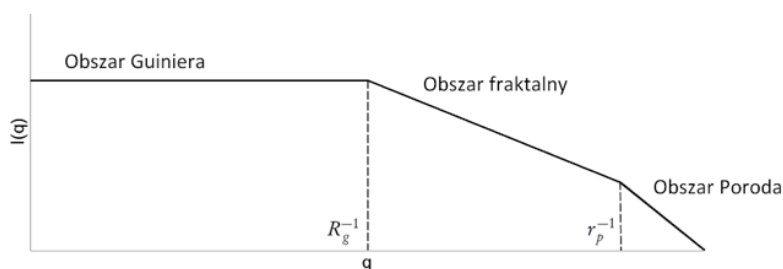
rys. 2.23. Wymiar fraktalny trójwymiarowego modelu agregatu typu DLA określony na podstawie równania fraktalnego

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. [6]. Wektor rozpraszania dany jest zależnością [62]:

$$q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (2.19)$$

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 [62].



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 [5]:

$$N_p = k_a (A_a / A_p)^\alpha, \quad (2.20)$$

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 [46,62]

2.3.3. Promień bezwładności

Promień bezwładności może zostać oszacowany na podstawie analizy dwuwymiarowych obrazów agregatów cząstek na podstawie równania:

$$L / (2R_g) \approx \beta, \quad (2.21)$$

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 [4]:

$$\frac{I(q=0)}{I(q)} \approx 1 + \frac{R_g^2 q^2}{3}, \quad (2.22)$$

zakładając, że $R_g q < 1$, Ref. [46, 62].

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:

$$\mathbf{E}_{inc}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-1}^n a_{mn} \mathbf{M}_{mn}^1(k\mathbf{r}) + b_{mn} \mathbf{N}_{mn}^1(k\mathbf{r}), \quad (3.1)$$

$$\mathbf{E}_{sca}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-1}^n f_{mn} \mathbf{M}_{mn}^3(k\mathbf{r}) + g_{mn} \mathbf{N}_{mn}^3(k\mathbf{r}), \quad (3.2)$$

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:

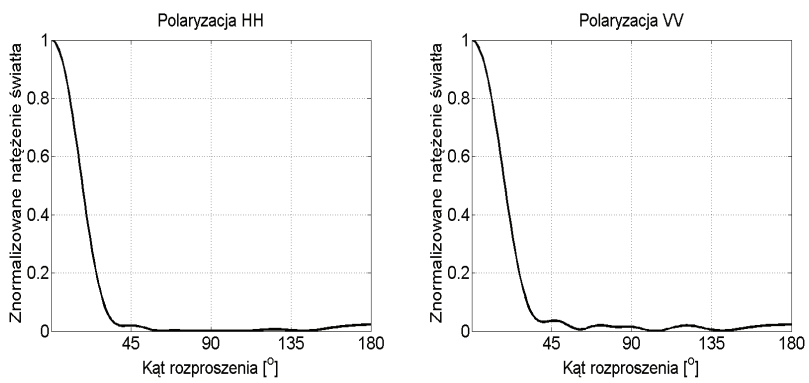
$$\begin{bmatrix} f_{mn} \\ g_{mn} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a_{mn} \\ b_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{11} & T^{12} \\ T^{21} & T^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{mn} \\ b_{mn} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

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 [30]. 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 porównaw-

cza rys. 3.2 i rys. 3.3 dowodzi, że aproksymacja agregatu fraktalnego kulą, w wielu aplikacjach, może być zbyt daleko idącym uproszczeniem.



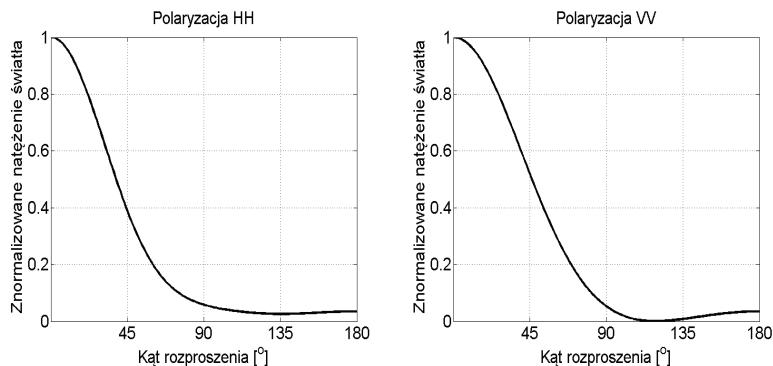
rys. 3.1. Agregat dwutlenku tytanu



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 się w pracy Howarda DeVoe z 1964 roku, następnie została rozwinięta przez Edwarda Purcella i Carltona Pennypackera w 1973 roku [55].



rys. 3.3. Znormalizowane diagramy światła rozproszonego dla kuli z dwutlenku tytanu

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 [11]:

$$d = \frac{\lambda}{10|m|}, \quad (3.4)$$

gdzie d jest odległością między elementami objętościowymi (dipolami), λ długością fali, natomiast m zespolonym współczynnikiem załamania światła. Ponadto:

$$|m - 1| < 2. \quad (3.5)$$

Moment dipolowy jest wyliczany z zależności:

$$\mathbf{P}_j = \alpha_j \mathbf{E}_j, \quad (3.6)$$

w której α_j to polaryzowalność, natomiast \mathbf{E}_j jest polem elektrycznym w punkcie \mathbf{r}_j . Polaryzowalność wyraża równanie Clausiusa-Mossotiego:

$$\alpha_j^{CM} = \frac{3d^3}{4\pi} \frac{\varepsilon_j - 1}{\varepsilon_j + 2}, \quad (3.7)$$

w którym ε_j oznacza funkcję dielektryczną. Pole elektryczne w punkcie \mathbf{r}_j dane jest zależnością:

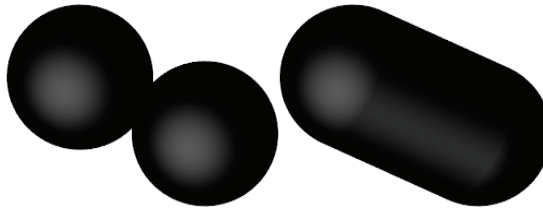
$$\mathbf{E}_j = \mathbf{E}_{inc,j} - \sum_{k \neq j} \mathbf{A}_{jk} \mathbf{P}_k, \quad (3.8)$$

$$\mathbf{A}_{jk} = \frac{\exp(ikr_{jk})}{r_{jk}} \times \left[k^2 (\hat{\mathbf{r}}_{jk} \hat{\mathbf{r}}_{jk} - \mathbf{1}_3) + \frac{ikr_{jk} - 1}{r_{jk}^2} (3\hat{\mathbf{r}}_{jk} \hat{\mathbf{r}}_{jk} - \mathbf{1}_3) \right], j \neq k, \quad (3.9)$$

gdzie $\mathbf{1}_3$ jest macierzą jednostkową w wymiarach 3×3 , $r_{jk} \equiv |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k|$ to odległość między dipolami, natomiast $\hat{\mathbf{r}}_{jk} \equiv (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k) / r_{jk}$ 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:

$$\sum_{k=1}^N \mathbf{A}_{jk} \mathbf{P}_k = \mathbf{E}_{inc,j}. \quad (3.10)$$

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 międzycząstkowego 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

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.

-
- [1] 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).
 - [2] 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).
 - [3] 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).
 - [4] 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).
 - [5] 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).
 - [6] 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).
 - [7] 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).
 - [8] 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).
 - [9] CZERWIŃSKI, M., **MROZKA, 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).
 - [10] CZERWIŃSKI, M., **MROZKA, 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).
 - [11] DRAINE, B. T. & FLATAU, P. J. Discrete-Dipole Approximation For Scattering Calculations. *Journal of the Optical Society of America A*, 11, 1491–1499 (1994).
 - [12] EDEN, M. A Two-dimensional Growth Process. *Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 4, 223–239 (1961).
 - [13] EREMINA, E., EREMIN, Y. & WRIEDT, T. Analysis of light scattering by erythrocyte based on discrete sources method. *Optics Communications*, 244, 15–23 (2005).
 - [14] 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).

- [15] FALCONER, K. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*, Chichester, John Wiley & Sons (2005).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] GUSZKOWSKI, T. & **MROCZKA, J.** Metoda inwersyjna wykorzystująca sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej. *Metrologia wspomagana komputerowo. MWK ,2003. VI Szkoła - konferencja*. Waplewo: Instytut Podstaw Elektroniki Wydział Elektroniki WAT (2003).
- [22] 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).
- [23] JULLIEN, R. & KOLB, M. Hierarchical model for chemically limited cluster-cluster aggregation. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 17, 639–643 (1984).
- [24] KANG, M.-Z., ZENG, Y.-J. & LIU, J.-G. Fractal research on red blood cell aggregation. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*, 22, 229-236 (2000).
- [25] 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).
- [26] 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).
- [27] 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).
- [28] LIU, L. & MISHCHENKO, M. I. Effects of aggregation on scattering and radiative properties of soot aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 110 (2005).
- [29] 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).
- [30] 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).

- [31] MANDELBROT, B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156, 636–638 (1967).
- [32] MANDELBROT, B. *Les objets fractals: forme, hasard et dimension*, Paris, Flammarion (1975).
- [33] MANDELBROT, B. *The Fractal Geometry of Nature*, New York, W.H. Freeman and Company (1982).
- [34] MEAKIN, P. A Historical Introduction to Computer Models for Fractal Aggregates. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 15, 97–117 (1999).
- [35] **MROCZKA, J.** Temperature stabilisation of light-emitting diode radiation. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 21, 306–309 (1988).
- [36] **MROCZKA, J.** Integral transform technique in particle sizing. Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO). Beijing, China: (1991).
- [37] **MROCZKA, J.** Turbidimetric methods in particle sizing. Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO). Beijing, China: (1991).
- [38] **MROCZKA, J.** Method of Moments in Light Scattering Data Inversion in the Particle Size Distribution. *Optics Communications*, 99, 147–151 (1993).
- [39] **MROCZKA, J.** Metrologia - nowe wyzwania. In: **MROCZKA, J.** (ed.) *Metrologia wczoraj, dziś, jutro*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej (1997).
- [40] **MROCZKA, J.** The cognitive process in metrology. *Measurement*, 46, 2896–2907 (2013).
- [41] **MROCZKA, J.** & PAROL, M. Methods of temperature stabilization of light-emitting diode radiation. *Review of Scientific Instruments*, 65, 803–806 (1994).
- [42] **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).
- [43] **MROCZKA, J.** & SZCZUCZYŃSKI, D. Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements. *Applied Optics*, 49, 4591–4603 (2010).
- [44] **MROCZKA, J.** & SZCZUCZYŃSKI, D. Simulation research on improved regularized solution of inverse problem in spectral extinction measurements. *Applied Optics*, 51, 1715–1723 (2012).
- [45] **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).
- [46] **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).
- [47] **MROCZKA, J.**, WYSOCHAŃSKI, D. & ONOFRI, F. Optical parameters and scattering properties of red blood cells. **Optica Applicata**, 32, 691–700 (2002).
- [48] OH, C. & SORESENSE, 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).
- [49] 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).
- [50] 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).

- [51] ONOFRI, F., KRZYSIEK, M., BARBOSA, S., MESSEGER, V., REN, K. F. & **MRO CZKA, J.** Near-critical-angle scattering for the characterization of clouds of bubbles: particular effects. *Applied Optics*, 50, 5759–5769 (2011).
- [52] ONOFRI, F., KRZYSIEK, M. & **MRO CZKA, J.** Critical angle refractometry and sizing of bubble clouds. *Optics Letters*, 32, 2070–2072 (2007).
- [53] ONOFRI, F., KRZYSIEK, M., **MRO CZKA, 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).
- [54] 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).
- [55] PURCELL, E. M. & PENNYPACKER, C. R. Scattering and Absorption of Light by Nonspherical Dielectric Grains. *Astrophysical Journal*, 186, 705–714 (1973).
- [56] 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).
- [57] SHISHIKURA, M. The Hausdorff dimension of the boundary of the Mandelbrot set and Julia sets. *Annals of Mathematics*, 147, 225–267 (1998).
- [58] SKORUPSKI, K. Optical properties of TiO₂:Ag composites. *Proc. SPIE 9125, Metamaterials IX*, 9125, 91251J-1 (2014).
- [59] SKORUPSKI, K., HELLMERS, J., FENG, W., **MRO CZKA, 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).
- [60] SKORUPSKI, K. & **MRO CZKA, J.** Effect of the necking phenomenon on the optical properties of soot particles. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 141, 40–48 (2014).
- [61] SKORUPSKI, K., **MRO CZKA, 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).
- [62] SORENSEN, C. M. Light Scattering by Fractal Aggregates: A Review. *Aerosol Science and Technology*, 35, 648–687 (2010).
- [63] ŚWIRNIAK, G., GŁOMB, G. & **MRO CZKA, J.** Inverse analysis of light scattered at a small angle for characterization of a transparent dielectric fiber. *Applied Optics*, 53, 7103–7111 (2014).
- [64] ŚWIRNIAK, G., GŁOMB, G. & **MRO CZKA, 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).
- [65] ŚWIRNIAK, G. & **MRO CZKA, 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).
- [66] ŚWIRNIAK, G. & **MRO CZKA, 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).

- [67] 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).
- [68] 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).
- [69] WEITZ, D.A. & OLIVERIA, M. Fractal structures formed by kinetic aggregation of aqueous gold colloids. *Physical Review Letters*, 52, 1433–1436 (1984).
- [70] WITTEN, T.A., JR. & SANDER, L. M. Diffusion-Limited Aggregation, a Kinetic Critical Phenomenon. *Physical Review Letters*, 47, 1400–1403 (1981).
- [71] 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).
- [72] 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).
- [73] 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).
- [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).

Opinia w sprawie nadania prof. dr. hab. inż. Januszowi Mroczce tytułu doktora honoris causa

prof. dr hab. inż. Andrzej Materka
Instytut Elektroniki
Politechnika Łódzka

Łódź, 1 września 2018 r.

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 Janusza Mroczki został opisany w ponad 400 różnorodnych publikacjach. Są wśród nich artykuły z listy Web of Science (118), monografie (4) 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 metodologiczna właściwa dla metrologii, profesor Janusz 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 Janusza 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 Janusza Mroczki.

Praca dydaktyczna i wychowawcza

Mam niewątpliwą przyjemność i zaszczyt od kilku lat blisko współpracować z Profesorem J. 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 zapomnianym 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. Píše 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 J. Mroczi. Są to dojrzałe badacze, odpowiedzialni, ambitni i rzetelni profesjonalści. 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 ciepłe sławy” ich mentora.

Profesor Janusz Mrocza 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 todzie, z uśmiechniętą twarzą Profesora J. Mroczi – uważnie i bystro obserwującego spektatorów.

Działalność organizacyjna

Profesor Mrocza odbył roczny staż naukowy w Institut National des Sciences Appliquées w Rouen 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 wysokiego 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 subsyduum 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, 56 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 naukowych 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.

Opinia w sprawie nadania prof. dr. hab. inż. Januszowi Mrocze tytułu doktora honoris causa

Prof. zw. dr hab. inż. Bogdan M. Wilamowski
Członek Zagraniczny PAN, IEEE Fellow
Auburn University
Department of Electrical Engineering

Auburn, 1 października 2018 r.

Profesor Janusz Mrocza urodził się 27.04.1952 r. w Dębicy. Ukończył Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej w 1976 r. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w Instytucie Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej w 1980 r., a doktora habilitowanego w 1991 r. na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Na stanowisko profesora nadzwyczajnego został powołany w 1994 r. Tytuł naukowy profesora otrzymał w 1996 r., a na stanowisko profesora zwyczajnego został powołany w 1999 r. Funkcję dyrektora Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej pełnił z wyboru w latach 1991–1996. W 1998 r. założył Katedrę Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, którą kieruje do chwili obecnej.

Profesor Mrocza jest autorem/współautorem 415 publikacji naukowych, jego prace były cytowane ponad 1801 razy i indeks $h=27$ (wg Google Scholar). Opublikował 4 monografie naukowe, posiada 8 patentów. Wykonał 20 recenzji doktoratów, 52 recenzje habilitacji i 56 opinii wniosków profesorskich. Był promotorem ponad 24 przewodów doktorskich. Wychował ośmiu doktorów habilitowanych. Jest członkiem korespondentem Polskiej Akademii Nauk i członkiem Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych. Profesor Mrocza prowadził swoje badania naukowe we współpracy z wieloma zagranicznymi ośrodkami naukowymi takimi jak:

- Institut National des Sciences Appliquées, Rouen, CNRS unite 6614 DS10, Francja,
- Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, Preston, Wielka Brytania,
- Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels, Marsylia, UMR CNRS 6595, Francja,

- Department of Biomedical Engineering, Boston University, Boston, USA,
- Biomedical Physics Laboratory, 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,
- Dipartimento di Ingegneria Dell'innovazione , University of Salento, Lecce, Włochy,
- Centre for Modelling and Information in Medicine, City University, Londyn, Wielka Brytania,
- Dipartimento de Elettronica e Informatica, University of Padova, Padwa, Włochy,
- Royal Brompton National Heart and Lung Hospital, Londyn, Wielka Brytania,
- Physiologie Respiratoire et Sportive, Hopital Charles Nicolle, Rouen, Francja.

Współpraca profesora z Polską Akademią Nauk trwa nieprzerwanie od 1993 roku, kiedy został wybrany do Komitetu Metrologii i Aparatury PAN, a w 2010 roku został jego szefem. Pod jego kierownictwem Komitet ten jest najbardziej sprawnym komitetem w Polskiej Akademii Nauk.

Zainteresowania naukowe Profesora Janusza Mroczki dotyczą metodologii procesu poznawczego, algorytmizacji problemu odwrotnego w pomiarach pośrednich. Szczególnie interesujące są problemy pomiarów pośrednich i odwrotnej meteorologii. Profesor Mroczka jest światowym pionierem tej technologii. Problem polega na tym, że czasami bardzo trudne lub kosztowne jest przeprowadzenie bezpośrednich pomiarów. Jednym z przykładów może być optymalne sterowanie silników elektrycznych, gdzie istotna jest znajomość chwilowego pola elektrycznego wewnątrz silnika i chwilowej wartości momentu obrotowego. Wymaga to umieszczenia dodatkowych przetworników, których koszt często przekracza wartość samego silnika. Obecnie problem ten rozwiązuje się w ten sposób, że zamiast pomiarów bezpośrednich wykonuje się pomiary parametrów łatwych do zmierzenia, takich jak chwilowe pomiary prądów, napięć i fazy na zaciskach silnika. Na tej podstawie, z wykorzystaniem dobrego modelu silnika można precyzyjnie oszacować chwilowe wartości momentu obrotowego i pola magnetycznego. W ten sposób można precyzyjnie sterować silnikiem bez dodatkowych przetworników. Dziedzina ta znana jest obecnie jako „sensorless control” i dominuje w sterowaniu wysokosprawnych silników elektrycznych. Innym przykładem, którym się zajmowałem, była ocena stanu zaworów w pompach ropy naftowej. Zawory te często znajdują się na głębokości kilku kilometrów pod powierzchnią ziemi, gdzie temperatura przekracza kilkaset stopni Celsjusza i praktyczne żadne ze znanych elektronicznych przyrządów nie jest w stanie pracować w tak wysokich temperaturach. Zaś wyciągnięcie z ziemi mechanizmów pompy w celu ich oceny trwałoby kilka tygodni i byłoby bardzo kosztowne. Okazało się jednak, że stosunkowo precyzyjne informacje o stanie obydwu zaworów można oszacować na podstawie pomiarów zaciskowych silnika pompy znajdującego się na powierzchni ziemi.

Profesor Mrocza rozpoczął pracę naukową na światowym poziomie w dziedzinie optoelektroniki. Pierwsza poważna publikacja naukowa prof. Mroczy ukazała się w 1988 roku w *Journal of Physics E: Scientific* i dotyczyła temperaturowej stabilizacji diody LED w celu zapewnienia stałego strumienia światła. Praca ta cytowana była przez 20 autorów. Rozszerzona wersja tej metody została opublikowana w *Review of Scientific Instruments* w 1994 roku (11 cytowań). Kolejna praca została opublikowana na konferencji IEEE MTC'92 (cytowana 15 razy) dotycząca oceny wielkości cząsteczek na podstawie rozproszenia światła. Rok 1997 był bardzo udany dla Profesora Mroczy. W tym roku opublikował on trzy, bardzo ważne artykuły naukowe cytowane 40, 38, i 36 razy. Wszystkie trzy artykuły naukowe dotyczyły rozproszenia światła w światłowodach. Miało to istotny wpływ na modyfikacje procesów produkcji światłowodów. W 2000 roku prof. Mrocza opublikował pracę w *Optical Engineering* (cytowana 37 razy). Praca ta dotyczyła teoretycznego porównania modeli rozpraszania światła w cylindrycznych światłowodach. W 2001 roku Prof. Mrocza opublikował dwie prace w *Applied Optics* (cytowane 36 i 30 razy). Prace te dotyczyły transmisji światła w warunkach wielu mechanizmów rozpraszania. W 2007 roku w *Optics Letters* (35 cyt.) a w 2009 r. w *Experiments in Fluids* (45 cyt.) opublikował dwie prace dotyczące krytycznego kąta refraktometrycznego i jego powiązania z gęstością pęcherzyków powietrza w wodzie.

W 2012 roku opublikował w *Journal of Aerosol Science* (67 cyt.) metodę oceny wymiarów fraktali z dwuwymiarowej analizy obrazów uzyskanych za pomocą Transmisyjnego Mikroskopu Elektronowego i wykazał, że rzeczywiste średnie wymiary fraktali są o 12% mniejsze niż oceny otrzymane klasyczną metodą multiskalowania. W 2013 r. opublikował dwie prace w *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* (27 i 34 cytowań) dotyczące wpływu morfologicznych parametrów na proces rozpraszania oraz ulepszoną metodę oceny wymiaru cząsteczek z kąтового pomiaru rozproszenia.

Od 2000 roku Prof. Mrocza poświęcił dużo czasu dla wykorzystania reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnałów w przetwarzaniu danych pomiarowych. W 2002 roku opublikował pracę w *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurements* (32 cyt.) dotyczącą wykorzystania liniowej interpolacji dyskretnej transformacji Fouriera (LIDFT) do oceny błędu transmisji i charakterystyk częstotliwościowych. Rozszerzoną wersję tego problemu opublikował w 2010 r. w *Measurement* (31 cyt.). W tym samym roku opublikował w *IEEE Power Delivery* artykuł (72 cyt.) przedstawiający nową metodę analizy spektralnej sygnałów w systemach energetycznych. W innym artykule z tego roku w *Metrology and Measurement Systems* (65 cyt.) porównał szereg metod stosowanych do oceny jakości przebiegu sygnałów mocy w systemach energetycznych. W marcu i grudniu 2012 r. opublikował w *Metrology and Measurement Systems* dwa artykuły (33 i 31 cyt.) przedstawiające modyfikacje algorytmu Prony'ego do precyzyjnego testowania harmonicznych i interharmonicznych.

Prof. Mrocza posiada również znaczny dorobek w elektromedycynie. W 2006 roku opublikował prace w *Biocybernetics and Biomedical Engineering* (14 cyt.) i w *Computers in Biology and Medicine* (49 cyt.) dotyczące sztucznej wentylacji płuc. W 2011 r. opublikował w *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (26 cyt.) model systemu oddychania.

Prof. Mroczka posiada też znaczne zasługi w rozwiązaniu wspomnianego wcześniej problemu odwrotnego w pomiarach pośrednich. W 2009 r. opublikował artykuł w *Metrology and Measurement Systems* (73 cyt.) opisującą przegląd stanu badań nad problemem odwrotnym. W 2010 r. przedstawił w *Applied Optics* (51 cyt.) rozwiązanie problemu transformacji odwrotnej dla systemów turbidymetrycznych. W 2012 r. opublikował w *Applied Optics* (51 cyt.) rozwiązanie dla problemu odwrotnego w turbidymetrycznym systemie spektralnym. W 2014 r. w *Physica A: Statistical Mechanics and its Application* (34 cyt.) przedstawił szybką i dokładną metodę adaptacyjnych algorytmów do tworzenia modeli fraktalnych. W 2013 pokusił się w *Measurement* (60 cyt.) o kompleksową ocenę procesów poznawczych w meteorologii.

W systemach energetycznych kluczowym zagadnieniem jest synchronizowanie generatorów z siecią energetyczną. Jest to szczególnie ważne w przypadku elektrowni wiatrowych lub fotowoltaicznych. Metoda pomiaru częstotliwości musi być bardzo szybka i bardzo dokładna. W 2014 r. Borkowski, Kania i Mroczka opublikowali w *IEEE Trans. on Industrial Electronics* (45 cyt.) metodę, która pozwala mierzyć częstotliwość sygnału na podstawie obserwacji w oknie 5ms z dokładnością do $4 \cdot 10^{-11}$ Hz. (10-10%) Periodyk ten od kilku lat posiada najwyższy w *IEEE Eigenfactor Score* (obecnie 0.09030) i jako taki jest powszechnie uważany za najbardziej prestiżowy periodyk organizacji IEEE.

Dlatego uznając w pełni niezwykłą pozycję i zasługi Profesora Janusza Mroczki oraz Jego wkład w rozwój metrologii i instrumentacji w Polsce rekomenduję Senatowi Politechniki Gdańskiej wyrażenie pełnego poparcia dla przyznania Profesorowi Januszowi Mroczce tytułu doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej.

Opinia w sprawie nadania
prof. dr. hab. inż. Januszowi Mroczce
tytułu doktora honoris causa

Prof. dr hab. inż. Maciej Ogorzałek
Zakład Technologii Informatycznych
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Jagielloński w Krakowie
Członek korespondent Polskiej Akademii Nauk

Kraków, 10 września 2018

Profesor Janusz Mroczka urodził się 27 kwietnia 1952 r. w Dębicy. Studia wyższe ukończył w 1976 roku 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 wykorzystanie światła rozproszonego do badań cząstek w roztworach dyspersyjnych”. Tytuł naukowy profesora otrzymał w 1996 r. Kolejno piastowane stanowiska i godności wskazują na wielkie uznanie i zaufanie, jakim kandydat cieszy się w środowisku naukowym. Od 1999 roku jest zatrudniony na stanowisku profesora zwyczajnego Politechniki Wrocławskiej. W roku 2010 został wybrany na członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk. Od 2013 roku pełni z wyboru funkcję członka Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów. W latach 2001–2007 pełnił funkcję wiceprzewodniczącego Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk, natomiast w latach 2007–2015, przez dwie kadencje, funkcję przewodniczącego tego Komitetu. Profesor jest stałym członkiem SPIE – The International Society for Optical Engineering (od 1992 roku), International Technical Working Group on Penetrating Radiation, USA (od 1994 roku), Polskiego Towarzystwa Fizycznego (od 1986 r.) oraz wielu komisji na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Był także członkiem Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego KBN (10 konkursów), przewodniczącym Sekcji Miernictwa Interdyscyplinarnego KBN (5 konkursów), członkiem Senatu Politechniki Wrocławskiej (l. 1999–2005).

Zainteresowania naukowe Profesora Janusza Mroczki to: metodologia procesu poznawczego, algorytmizacja problemu odwrotnego, pomiary pośrednie źle uwarunkowane numerycznie, analiza spektralna i polaryzacyjna promieniowania rozproszonego w opisie

właściwości układów dyspersyjnych, 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.

Jak łatwo zauważyć działalność naukowa obejmuje zarówno bardzo ważne zagadnienia czysto teoretyczne metrologii elektrycznej i optycznej jak i szeroki wachlarz zastosowań w medycynie i ochronie środowiska. Moją szczególną uwagę przyciągnęły prace dotyczące modelowania matematycznego układów pomiarowych oraz środowisk pomiarowych, w tym własności układów dyspersyjnych oraz eliminacja niejednoznaczności pomiarów. Spośród badań stosowanych najciekawsze dotyczą pomiarów własności wody, pomiarów mętności wody czy też pomiarów wielkości cząstek dla zastosowań w ochronie środowiska. Inną znaczącą grupą badań prowadzonych przez prof. Mroczkę i jego zespół są pomiary stosowane w medycynie. Wśród nich należy wymienić pomiary własności krwi, pomiary układu oddechowego. Spektrum jego zainteresowań jest ogromne, poszerzane przez całe życie o kolejne zagadnienia, choć zawsze związane z pomiarami.

Dorobek publikacyjny Janusza Mroczki jest imponujący. Składa się na niego 420 opublikowanych prac. Wśród nich 118 to publikacje z tzw. listy filadelfijskiej. 140 artykułów ukazało się w czasopiśmie – w tym wielu o zasięgu i randze światowej.

Clarivate Analytics podaje 112 rekordów autorstwa J. Mroczki, 1119 cytowań (964 bez autocytaowań) oraz h-indeks=22. Takie dane bibliometryczne w dziedzinie nauk technicznych w Polsce są znakomite.

Na koncie publikacyjnym prof. Mroczki są też cztery książki i monografie, 13 rozdziałów w książkach oraz 145 referatów konferencyjnych, w tym 46 na konferencjach międzynarodowych.

Prof. Janusz Mroczka niezwykle aktywnie prowadzi badania naukowe, uczestniczy jako prowadzący bądź główny wykonawca w wielu projektach krajowych i międzynarodowych. Liczby znów mówią same za siebie: 13 zrealizowanych bądź będących w realizacji projektów własnych NCN, 8 projektów badawczych promotorskich, jeden grant rozwojowy, 2 projekty celowe oraz siedem projektów realizowanych wspólnie z partnerami z Francji. Za swoją działalność naukowo-badawczą i dydaktyczną został wyróżniony wieloma nagrodami i wyróżnieniami: nagrodą indywidualną II stopnia MEN (1989), Nagrodą Wydziału IV PAN (1993), Subsydium Profesorskim Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (2005), Nagrodą Professor Opoliensis (2014), Nagrodą Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia w opiece naukowej i dydaktycznej (2014) oraz Nagrodą Prezesa PAN za stworzenie szkoły naukowej w zakresie metrologii elektronicznej i fotonicznej wraz z cykliczną serią wydawniczą „Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej” oraz czasopiśmie specjalistycznym indeksowanym w JCR „Metrology and Measurement Systems” (2015).

Ponadto otrzymał Nagrodę Naukową im. prof. Mariana Suskiego, Złotą Odznakę Politechniki Wrocławskiej z Brylantem, Medal im. prof. Kazimierza Idaszewskiego oraz Medal im. prof. Włodzimierza Krukowskiego. Jest również odznaczony Krzyżem Oficerskim Orderu Odrodzenia Polski, Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski, Złotym, Srebrnym i Brązowym Krzyżem Zasługi oraz Medalem Komisji Edukacji Narodowej. Otrzymał ponad 30 nagród JM Rektora Politechniki Wrocławskiej.

Profesor dr hab. inż. Janusz Mrocza był w latach 1991–1996 dyrektorem Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, gdzie założył specjalność dydaktyczną aparatura elektroniczna, która do chwili obecnej jest najbardziej popularną wśród studentów na kierunku elektronika i pozostaje kuźnią młodych talentów poszukiwanych na rynku pracy w całej Polsce.

Zespół prof. J. Mroczy realizuje szereg projektów naukowych we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Owocem wspólnych badań z tymi ośrodkami są wspólne publikacje oraz staże naukowe odbyte przez doktorantów i studentów. Współpraca ta dotyczy ośrodków zagranicznych takich jak: Institut National des Sciences Appliquées, Rouen, CNRS, Francja; Department of Engineering and Product Design, University of Central Lancashire, Preston, Wielka Brytania; Institut Universitaire des Systemes Thermiques Industriels, CNRS Marsylia, Francja; Department of Biomedical Engineering, Boston University, Boston, USA; Biomedical Physics Laboratory, Université Libre de Bruxelles, Bruksela, Belgia; Auckland Bioengineering Institute, The University of Auckland, Auckland, Nowa Zelandia; Department of Electrical Engineering, Systems and Automation, Ghent University, Belgia; Dipartimento di Ingegneria Dell'innovazione, University of Salento, Lecce, Włochy. Profesor utrzymuje także kontakty naukowe z: Centre for Modelling and Information in Medicine, City University, Londyn, Wielka Brytania; Dipartimento de Elettronica e Informatica, University of Padova, Padwa, Włochy; Royal Brompton National Heart and Lung Hospital, Londyn, Wielka Brytania; Physiologie Respiratoire et Sportive, Hopital Charles Nicolle, Rouen, Francja.

W ciągu ponad czterdziestoletniej kariery prof. Janusz Mrocza stworzył szkołę naukową rozpoznawalną i cenioną w kraju i za granicą. Był promotorem 24 ukończonych przewodów doktorskich, w tym czterech „podwójnych” (co-tutelle) nadanych wspólnie z uniwersytetami we Francji (Rouen, Marsylia). Był jednym z pionierów tego typu doktoratów nadawanych równoległe przez uczelnię polską i zagraniczną. Czternaście prac doktorskich prowadzonych przez prof. Mroczkę zostało wyróżnionych. Dwa kolejne doktoraty są w przygotowaniu. Ośmiu współpracowników prof. Mroczy ukończyło habilitację.

Profesor opracował także 3 recenzje doktoratów honoris causa (prof. A. Barella z Barcelony, prof. Z. Hotra ze Lwowa, prof. W. Woliński z WAT Warszawa), 40 recenzji wniosków profesorskich, 1 recenzję wniosku profesorskiego za granicą (Preston, Anglia), 47 recenzji przewodów habilitacyjnych oraz 18 recenzji doktoratów.

Wśród opracowanych recenzji doktoratów, habilitacji i wniosków profesorskich wiele miejsca zajmują opinie dotyczące uczonych wywodzących się z Politechniki Gdańskiej. Jego aktywność w promowaniu młodych naukowców i następnej generacji liderów nauki należy uznać za wyróżniającą.

Znakomitą inicjatywą prof. Janusza Mroczi jest wydawana pod jego redakcją seria „Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej”, w której ukazało się dotąd osiem tomów zawierających obszerne prace opracowane w oparciu o najlepsze doktoraty i habilitacje oraz artykuły najlepszych autorytetów w dziedzinie metrologii.

Bardzo istotnym osiągnięciem profesora jest dbałość o jakość publikacji i promocję polskiej nauki. Prof. J. Mrocza poczynił uwieńczone sukcesem starania o wprowadzenie na listę filadelfijską krajowego czasopisma „Metrology and Measurement Systems”. Podkreślić należy jego bliską współpracę z prof. J. Smulko – redaktorem naczelnym tego czasopisma z Politechniki Gdańskiej.

Podsumowując, stwierdzam, że Prof. Janusz Mrocza to jeden z najbardziej znanych w polskim środowisku naukowym elektroników specjalizujących się w dziedzinie pomiarów (metrologii). Jego zainteresowania badawcze i aplikacyjne dotyczą w szczególności pomiarów systemów optoelektronicznych oraz zastosowań w inżynierii środowiska, biologii i medycynie.

Łączy w sobie pasje naukowca, inżyniera i nauczyciela. Jest wychowawcą i mistrzem dla wielu pokoleń młodych adeptów dziedzin związanych z szeroko rozumianą elektrycznością. Jest erudytą, znakomitym wykładowcą i propagatorem nauki widocznym na wielu forach naukowych i popularyzujących naukę. Jego prace naukowe dotyczą zarówno fundamentalnych pytań dotyczących zrozumienia zjawisk, jak i najbardziej zaawansowanych zastosowań. Jest uczonym, który zdobył sobie zasłużone uznanie w kraju i za granicą, zdobył wiele nagród i wyróżnień. Piastowane przez niego funkcje i zajmowane stanowiska świadczą o wielkim uznaniu i zaufaniu, jakim cieszy się w środowisku naukowym. Kolejne uczelnie występują o wyróżnienie Go honorowymi godnościami – został wyróżniony dwoma doktoratami honorowymi: przez Politechnikę Lubelską (2014) oraz Politechnikę Opolską (2016).

Tytuł doktora honoris causa jest szczególnym wyróżnieniem nadawanym osobom szczególnie zasłużonym, o wysokim statusie naukowym, cieszącym się powszechnym szacunkiem i uznaniem w swoim środowisku, w kraju i na świecie.

W mojej opinii zawarłem analizę tylko wybranych najważniejszych osiągnięć i zasług kandydata, które kwalifikują Go do takiego wyróżnienia – lista jego osiągnięć naukowych, dydaktycznych, nagród i wyróżnień oraz zasług na różnych polach jest bardzo długa.

Jestem głęboko przekonany, że prof. Janusz Mrocza w pełni zasłużył na wyróżnienie godnością doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej – wystąpienie Senatu tej uczelni gorąco popieram.

Doktorzy honoris causa Politechniki Gdańskiej

Prof. Maksymilian Tytus Huber – 1950	Prof. Martin Grassnick – 1989
Prof. Zygmunt Ciechanowski – 1957	Prof. Dymitr Rostowcew – 1989
Prof. Witold Minkiewicz – 1960	Prof. Dieter Mlynski – 1991
Prof. Aleksander Rylke – 1965	Prof. Witold Urbanowicz – 1991
Prof. Ewgenij W. Towstych – 1965	Prof. Damazy J. Tilgner – 1992
Prof. Julien Kravtchenko – 1970	Prof. Douglas Faulkner – 1993
Prof. Marian Osiński – 1970	Prof. Adolf Butenandt – 1994
Prof. Witold Nowacki – 1971	Prof. Gerd Gudehus – 1995
Prof. Janusz Groszkowski – 1975	Prof. Fumio Nishino – 1996
Prof. Kazimierz Kopecki – 1975	Prof. Władysław Findeisen – 1997
Prof. Aleksander W. Wawilow – 1975	Prof. Zbigniew Jedliński – 2001
Prof. Michaił G. Woronkow – 1975	Prof. Waclaw Szybalski – 2001
Prof. Robert Szewalski – 1978	Prof. Ignacy Malecki – 2002
Prof. Stanisław Turski – 1980	Prof. Lech Kobyliński – 2004
Prof. Ignacy Adamczewski – 1985	Prof. Leon Kieres – 2004
Prof. John Bernard Caldwell – 1985	Prof. Bolesław Mazurkiewicz – 2008
Prof. Paul Hagenmuller – 1985	Prof. Michał Białko – 2008
Prof. Igor Kisiel – 1985	Prof. Jan Węglarz – 2008
Prof. Franciszek Otto – 1985	Prof. Jan D. Miller – 2010
Prof. Jerzy Doerffer – 1988	Prof. Robert J. Cava – 2014

Spis treści

Słowo od Rektora Politechniki Gdańskiej prof. Jacek Namieśnik, Rektor Politechniki Gdańskiej	5
Uchwała Senatu PG	7
Akt nadania tytułu doktora honoris causa Profesorowi Januszowi Mroczce	9
Laudacja z okazji nadania Profesorowi Januszowi Mroczce tytułu i godności doktora honoris causa Politechniki Gdańskiej prof. dr hab. inż. Jerzy Wtorek	11
Wybrane zagadnienia modelowania agregatów fraktalnych Janusz Mroczka	19
Opinia w sprawie nadania prof. dr. hab. inż. Januszowi Mroczce tytułu doktora honoris causa prof. dr hab. inż. Andrzej Materka	59
Opinia w sprawie nadania prof. dr. hab. inż. Januszowi Mroczce tytułu doktora honoris causa Prof. zw. dr hab. inż. Bogdan M. Wilamowski	65
Opinia w sprawie nadania prof. dr. hab. inż. Januszowi Mroczce tytułu doktora honoris causa Prof. dr hab. inż. Maciej Ogorzałek	69
Doktorzy honoris causa Politechniki Gdańskiej	73

