

**AGH**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI

Kraków, 13.02.2026

Dr hab. inż. Aleksandra Jung, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Fizyki Medycznej i Biofizyki

**Recenzja pracy doktorskiej
mgr Magdaleny Dobrowolskiej
„Muon Scattering Tomography as a Tool For Inspection of Large
and Reinforced Concrete Structures”**

Praca doktorska pani mgr Magdaleny Dobrowolskiej „Muon Scattering Tomography as a Tool For Inspection of Large and Reinforced Concrete Structures”, wykonana pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Daniela Kikoły, prof. uczelni oraz promotora pomocniczego prof. dr. Jaapa Velthuisa, dotyczy opracowania i weryfikacji metod tomografii rozproszeniowej mionów jako nieniszczącego narzędzia do detekcji i obrazowania stalowego zbrojenia w dużych konstrukcjach betonowych. Rozprawa podejmuje istotny problem badawczy związany z niedestrukcyjną diagnostyką konstrukcji żelbetonowych. Autorka omawia dotychczas stosowane metody wraz z ich ograniczeniami i na tym tle proponuje oryginalne rozwiązanie oparte na tomografii rozproszeniowej mionów i dopasowane narzędzia analityczne. W pracy zaprezentowano zarówno wyniki symulacji jak i badań eksperymentalnych. Zbudowano i uruchomiono prototypowy układ detekcyjny oparty na rezystywnych komorach płytowych (RPC), przystosowany do pracy z CO₂ jako gazem roboczym zamiast gazu cieplarnianego, jakim jest freon. Charakterystyka układu jest zgodna z parametrami użytymi w symulacjach.

Praca składa się z 11 rozdziałów, spisu 114 rysunków, 5 tabel oraz spisu literatury zawierającego 105 pozycji bibliograficznych związanych z tematyką rozprawy.



Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Fizyki Medycznej i Biofizyki
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 4424, fax +48 12 634 00 10
www.fis.agh.edu.pl,

**AGH****AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

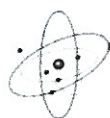
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI

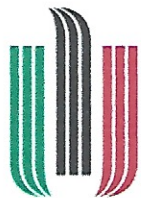
Rozdział pierwszy przedstawia dorobek naukowy Autorki, jasno podzielony na kategorie. Doktorantka jest pierwszym Autorem 3 publikacji bezpośrednio związanych z rozprawą doktorską i współautorem kolejnych dwóch spoza tematyki pracy. Uczestniczyła w sześciu konferencjach naukowych, z czego podczas dwóch wydarzeń o charakterze międzynarodowym prezentowała swoje wyniki badań w formie wystąpień ustnych. Ponadto, w deklaracji poprzedzającej spis treści, Autorka jasno definiuje swój udział w opisanych badaniach.

W rozdziale drugim opisano konieczność monitorowania stanu technicznego konstrukcji inżynierskich, tak aby uniknąć katastrof budowlanych, w szczególności dużych i starzejących się obiektów żelbetowych i podkreślono w tym kontekście znaczenie metod niedestrukcyjnych. Porównano aktualnie stosowane techniki takie jak georadary, aktywną termografię podczerwoną, metody ultradźwiękowe oraz radiografię. Przedstawiono fizyczne zasady działania powyższych metod i ich ograniczenia, uwzględniając w szczególności głębokość wnikania. Rozdział kończy się wytypowaniem nierozwiązanych problemów, takich jak obrazowanie obiektów o bardzo dużej objętości i detekcja wielu warstw zbrojenia, co Autorka wskazuje jako główny temat swojej pracy przy zastosowaniu tomografii mionowej. Szkoda, że cele pracy nie zostały bardziej sprecyzowane tak jak to wynika potem z pracy, czyli opracowanie, rozwinięcie i zweryfikowanie metod tomografii rozproszeniowej mionów jako nieniszczącego narzędzia do detekcji, lokalizacji i obrazowania stałego zbrojenia w dużych konstrukcjach betonowych, przy jednoczesnym określeniu granic wykrywalności tej techniki, z uwzględnieniem zarówno części symulacyjnej jak i eksperymentalnej przeprowadzonych badań.

W rozdziale trzecim omówiono podstawy fizyczne metod obrazowania wykorzystującego miony - mechanizmy ich powstawania w atmosferze, podstawowe własności i oddziaływanie z materią z uwzględnieniem zjawisk wykorzystywanych w tomografii rozproszeniowej. Opisano także dwie główne techniki obrazowania mionowego: radiografię mionową i tomografię rozproszeniową mionów (MST) oraz zastosowane algorytmy rekonstrukcji: PoCA (Point of Closest Approach) i algorytm dyskryminatora opracowany w Bristolu, bardziej zaawansowaną technikę stanowiącą podstawę dalszych badań



Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Fizyki Medycznej i Biofizyki
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 4424, fax +48 12 634 00 10
www.fis.agh.edu.pl

**AGH****AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

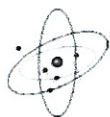
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI

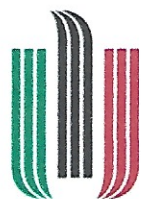
zaprezentowanych w rozprawie. Rozdział kończy się omówieniem ograniczeń takich jak niski strumień mionów i długi czas akwizycji danych.

Kolejny rozdział, czwarty, poświęcony jest symulacjom Monte Carlo, które stanowią podstawę testowania metod tomografii rozproszeniowej mionów przedstawionych w dalszej części pracy. Podkreślono, że ze względu na niski strumień mionów kosmicznych oraz statystyczny charakter algorytmów rekonstrukcji, symulacje są kluczowe dla optymalizacji geometrii detektora i metod analizy. Do symulacji wykorzystano pakiet Geant4, powszechnie stosowany w fizyce cząstek do śledzenia oddziaływań cząstek z materią, a jako źródło mionów użyto bazy danych CRY. Opisano także geometrię prototypowego systemu detektorów podkreślając, że parametry użyte w symulacjach odpowiadają rzeczywistemu systemowi w celu umożliwienia porównania wyników symulacyjnych z danymi eksperymentalnymi.

Rozdział piąty przedstawia zastosowanie tomografii rozproszeniowej mionów do detekcji i obrazowania prętów zbrojeniowych w betonie opartej na symulacjach Monte Carlo dla trzech konfiguracji geometrycznych: pojedynczy pręt zbrojeniowy w betonie o zmiennych wymiarach, pojedynczy pręt w betonie o stałym rozmiarze, regularna siatka zbrojeniowa. Wykorzystując algorytm określony jako metoda metryczna przeprowadzono ekstrakcję sygnału pochodzącego od pręta zbrojeniowego, analizę zależności sygnału od średnicy i objętości pręta, rekonstrukcję objętości zbrojenia oraz przeprowadzono obrazowanie zarówno pojedynczych prętów, jak i całych układów zbrojenia. Wyniki wykazały, że możliwa jest detekcja pojedynczego pręta o średnicy $33,7 \pm 7,3$ mm i długości 100 cm, a dla prętów o objętości powyżej 2500 cm^3 objętość może być odtworzona z rozdzielczością $5,4 \pm 0,3\%$, co pozwoliłoby na jakościowe i ilościowe obrazowanie wnętrza betonowego obiektu. Rozdział kończy się wnioskiem, że czułość metody dla cienkich prętów jest jednak nadal ograniczona.

W rozdziale szóstym Autorka wprowadza ulepszenia obejmujące usuwanie tła pochodzącego od betonu oraz analizę sygnału w przestrzeni częstotliwości przy użyciu transformaty Fouriera. Dzięki temu wykazano możliwość obniżenia wykrywalnej średnicy pręta o długości 100 cm do 6 mm, jeśli pręt jest częścią regularnej siatki zbrojeniowej. Przeanalizowano wpływ rozdzielczości metody



**AGH****AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI

z uwzględnieniem liczby warstw detekcyjnych, geometrii układu pomiarowego i wzajemnego ustawienia prętów. Wykazano, że odpowiednia optymalizacja układu detektorów poprawia jakość rekonstrukcji.

W rozdziale siódmym zaprezentowano wyniki uzyskane dla typowego układu dwóch warstw siatki zbrojeniowej położonych na różnych głębokościach. Wykazano, że zastosowany algorytm umożliwia separację sygnałów pochodzących z różnych głębokości, dzięki czemu możliwe jest rozróżnienie obecności jednej lub dwóch warstw zbrojenia. Wyniki symulacji dowiodły, że tomografia rozproszeniowa mionów może dostarczać informacji trójwymiarowej o złożonych układach zbrojenia, a nie jedynie sygnału zintegrowanego z całej objętości.

W rozdziale ósmym opisano prototypową konstrukcję toru mionowego opartego na rezystywnych komorach płytowych z gazem roboczym CO_2 jako alternatywą dla freonu. Znaczną część rozdziału poświęcono opisom przetwarzania danych eksperymentalnych, sposobom wyznaczania szumów i ich korekcji, rekonstrukcji torów mionów, ocenie rozdzielczości przestrzennej i efektywności detektorów. Przeprowadzono również obrazowanie betonowego obiektu, jednocześnie wykazując, że przy zastosowaniu CO_2 nie udało się osiągnąć wymaganej rozdzielczości i wydajności detekcji, co chwilowo ogranicza jakość obrazowania w porównaniu do wyników symulacyjnych.

W ostatnim rozdziale prezentującym wyniki opisano potencjalne możliwości medycznych zastosowań tomografii rozproszeniowej mionów, w szczególności do obrazowania na potrzeby terapii protonowej. Symulacje Monte Carlo były prowadzone pod kątem rozróżniania materiałów o różnej gęstości i składzie atomowym: tkanki miękkiej, kości, powietrza oraz uranu. Zasympulowano także ludzki fantom, wskazując na potencjalne możliwości rozwojowe, które choć pokazane w sposób krytyczny, są jednak nazbyt optymistyczne w zakresie diagnostyki medycznej.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono perspektywy dalszego rozwoju metod tomografii rozproszeniowej mionów opracowanych w pracy, zarówno w obszarze sprzętowym, jak i algorytmicznym, utrzymując, że dalszy postęp w technologii detektorów oraz w metodach przetwarzania danych może



**AGH****AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI

znacząco zwiększyć czułość i praktyczną użyteczność opisywanej metody w zastosowaniach przemysłowych i medycznych. Rozdział ma charakter syntetyczny a Autorka puentuje, że przedstawione badania stanowią etap rozwoju metody, a nie jej ostateczną formę.

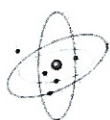
Ostatni, jedenasty rozdział pracy to streszczenie.

Do najważniejszych osiągnięć pracy należy zaliczyć:

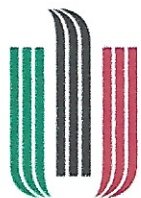
- Rozwój i adaptację algorytmów rekonstrukcyjnych opartych na analizie rozproszenia mionów do problemów charakterystycznych dla inżynierii lądowej.
- Udoskonalenie metody detekcji poprzez wykorzystanie okresowej struktury siatek zbrojeniowych oraz analizę sygnału w przestrzeni częstotliwości.
- Określenie granic wykrywalności minimalnej średnicy i objętości prętów możliwych do detekcji, a następnie ich obniżenie dzięki wykorzystaniu transformaty Fouriera.
- Rozszerzenie metody na bardziej złożone układy, w szczególności konstrukcje zawierające wiele warstw zbrojenia położonych na różnych głębokościach.
- Eksperymentalną weryfikację opracowanych metod z wykorzystaniem prototypowego systemu detektorów mionowych.

Należy podkreślić, że Autorka nie ogranicza się w swoich badaniach do obliczeń symulacyjnych, lecz podejmuje próbę ich eksperymentalnej weryfikacji, a niesatysfakcjonujące wyniki, uzyskane przez niewystarczającą rozdzielczość spowodowaną testowaniem CO₂ jako zastępczego dla freonu gazu, są przedstawione w sposób krytyczny.

Praca jest dobrze napisana od strony edytorskiej, jest przejrzysta, bogato ilustrowana, klarowna. Drobnymi niedociągnięciami są: przypadkowe umieszczanie rysunków w tekście w niektórych częściach pracy, niekompletne jednostki w opisach równań, czy powtórzenia tych samych konstrukcji składniowych.



Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Fizyki Medycznej i Biofizyki
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 4424, fax +48 12 634 00 10
www.fis.agh.edu.pl,

**AGH**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI

Z obowiązku recenzenta przytaczam poniżej kilka pytań, które nasunęły mi się podczas lektury pracy:

- jaki wpływ mają zmienne warunki pogodowe, w szczególności temperatura na wyniki aktywnej termografii w podczerwieni i tomografii rozproszeniowej mionów?

- jak wypada sumaryczne porównanie metody opisanej w pracy z radiografią opartą o wykorzystanie akceleratora liniowego (znacznie szybsza metoda w odniesieniu do radiografii gamma) w kontekście czasu i obszaru skanowania, mobilności i szacunkowej ceny?

- dlaczego przyjęto wydajność detektorów RPC równą 100% (rozdział 4.2)?

- czy zależność zaprezentowana na rysunku 23 ma rzeczywiście charakter liniowy?

- jak były liczone niepewności w rozdziale piątym?

- czy metoda odejmowania tła, opisana w rozdziale szóstym może być stosowana dla danych eksperymentalnych?

- czy heterogeniczność betonu może wpływać na wyniki?

- jakie są ograniczenia zastosowania transformaty Fouriera w opisywanych badaniach?

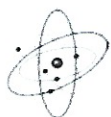
- jakie mogłyby być alternatywne mieszanki gazowe o niskim oddziaływaniu klimatycznym?

- czy granica wykrywalności cienkich prętów zmienia się w funkcji czasu akwizycji?

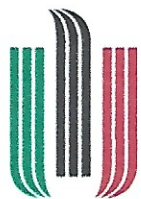
- jak otoczenie materiałowe w rzeczywistych warunkach może wpływać na odpowiedź układu?

Podsumowanie

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi logicznie zbudowaną, metodologicznie spójną pracę badawczą, osadzoną na styku fizyki cząstek elementarnych, metod obrazowania oraz ich zastosowań praktycznych. Autorka podejmuje istotny problem naukowy, dotyczący opracowania skutecznych nieniszczących metod inspekcji dużych, wielowarstwowo zbrojonych konstrukcji betonowych. Zaproponowane rozwiązanie, oparte na tomografii rozproszeniowej mionów, jest oryginalne w kontekście inżynierii lądowej i wykracza poza dotychczasowe, klasyczne zastosowania tej techniki.



Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Fizyki Medycznej i Biofizyki
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 4424, fax +48 12 634 00 10
www.fis.agh.edu.pl,

**AGH**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI

Autorka wykazała się umiejętnościami i wiedzą w zakresie prowadzenia prac eksperymentalnych oraz wykorzystania matematycznych metod modelowania.

Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie i potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w ramach grupy badawczej. Rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w zakresie nauk fizycznych, a przedstawione wyniki stanowią oryginalny wkład w rozwój metod obrazowania mionowego oraz ich zastosowań praktycznych, potwierdzając umiejętność rozwiązywania postawionych problemów naukowych.

Reasumując, stwierdzam iż przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „Muon Scattering Tomography as a Tool For Inspection of Large and Reinforced Concrete Structures” w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnioskuję o dopuszczenie pani mgr Magdaleny Dobrowolskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Dr hab. inż., prof. AGH
Aleksandra Jung

