



Prof. dr hab. Tomasz Matulewicz
Zakład Fizyki Jądrowej
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

Warszawa, 2 lutego 2026

Recenzja rozprawy doktorskiej
zatytułowanej:
Muon Scattering Tomography as a Tool
for Inspection of Large and Reinforced Concrete Structures
autor: **Magdalena Dobrowolska**
promotor: dr hab. Daniel Kikoła (Politechnika Warszawska)
promotor pomocniczy: prof. dr Jaap Velthuis (University of Bristol)

Mgr Magdalena Dobrowolska przedstawiła napisaną po angielsku pracę zawierającą jedenaście rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku angielskim i polskim. Pierwszy rozdział przedstawia publikacje naukowe Autorki rozprawy, nie tylko te związane z tematem dysertacji. Podsumowanie zawarte jest w ostatnim rozdziale. Rozprawę uzupełnia spis rysunków, tablic i spis literatury. Razem rozprawa liczy 141 stron. Strona 7 rozprawy to streszczenie w języku polskim, toteż spełniony jest wymóg ustawy¹, która w Artykule 187 ust. 4 stwierdza: *Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim.*

Temat badawczy opisany w recenzowanej dysertacji jest świadectwem wkładu badań fizycznych o charakterze fundamentalnym do zastosowań technologicznych. Autorka rozprawy podjęła się badań nad wykorzystaniem rozpraszania mionów w zbrojonych konstrukcjach betonowych. Nie ulega wątpliwości, że temat badawczy jest ambitny i może mieć poważne zastosowania przy badaniu stanu dużych konstrukcji ze zbrojonego betonu. Dokumentacja techniczna takich obiektów powstałych przed laty mogła zaginać, a wiedza o ich stanie może być ważna przy ocenie ich stabilności i bezpieczeństwa dalszej eksploatacji. Autorka rozprawy przypomina o katastrofach obiektów drogowych, do których doszło w minionej dekadzie, co jednoznacznie wskazuje na znaczenie i aktualność podjętego tematu badawczego.

Wprowadzeniem do rozprawy są Rozdziały 2-4. Na początku autorka przedstawiła obecnie znane metody nieniszczących badań konstrukcji betonowych, które jednak są ograniczone w głębokości penetracji (Rysunek 1). Należy docenić omówienie podstaw fizycznych stosowanych metod oraz wynikające z tego ograniczenia. W kolejnym rozdziale Autorka dobrze przedstawiła podstawy fizyki mionów kosmicznych, celnie podkreślając ich zalety wobec innych cząstek penetrujących, jak i wady związane głównie z ograniczoną dostępnością i niekorzystnym rozkładem kątowym, preferującym kierunki pionowe. Podstawy techniki obrazowania przy użyciu rozpraszania mionów dobrze ilustruje Rys. 10. Autorka opisuje też rozwój algorytmów używanych do opisu tego procesu. Krótki Rozdział 4 przedstawia program

¹ Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, tekst jednolity: Dz. U. 2023 poz.742

symulacyjny GEANT oraz podstawy układu do detekcji mionów użytego w obliczeniach typu Monte-Carlo.

Kolejne trzy rozdziały (5-7) zawierają opis przeprowadzonych symulacji. Autorka rozprawy systematycznie przedstawiła w nich wyniki obliczeń, poczynając od najprostszych przypadków geometrii zbrojenia i geometrii bloku, prowadzonych w odniesieniu do układu bez zbrojenia. Trzeba przyznać, że wrażenie robi precyzja odtworzenia objętości zbrojenia (Rys. 23), zwłaszcza dla dużych objętości. Tym niemniej, Autorka przyznaje, że minimalne rozmiary zbrojenia wykrywane tomografią mionową są większe, niż używane typowo pręty zbrojeniowe. Warto w tym miejscu zauważyć, że każdy z rozdziałów zawierających wyniki rozprawy, Autorka kończy krótkim podsumowaniem. To bardzo cenne uzupełnienie pokazujące, że Autorka potrafi wyłonić najważniejsze rezultaty prowadzonych badań.

Następny rozdział wykazuje, że w przypadku okresowej struktury konstrukcji zbrojenia można zastosować techniki Fourierowskie. Widmo Fourierowskie dostarcza wtedy informacji o rozmiarach siatki i średnicy prętów. Stwierdzenie możliwości wykrycia siatki prętów o średnicy nie mniejszej niż 7 mm, odległych o 10 cm, uważam za najważniejszy wynik przedstawiony w rozprawie. Uzupełnieniem tego wyniku jest stwierdzenie (Rozdział 7), że osiągalna jest precyzja kilku cm w wyznaczaniu odległości pomiędzy równoległymi siatkami prętów.

Weryfikacja eksperymentalna przewidywań przedstawionych w poprzednich rozdziałach jest ważna i wymaga odpowiedniego układu eksperymentalnego pozwalającego mierzyć tory mionów z odpowiednią dokładnością pozycyjną. Autorka opisuje budowę i własności detektora budowanego w technologii RPC (resistive plate chamber) w Rozdziale 8. Jest to bardzo dokładny opis funkcjonowania i obsługi tego detektora, w tym także układu zbierania danych. Przedstawione są wyniki procedury korygowania sygnału pozycyjnego, jeśli jeden z pasków nie funkcjonował. Niestety, używana mieszanka gazowa (zamiast niedozwolonych obecnie gazów) nie pozwoliła na osiągnięcie sub-milimetrowej pozycyjnej zdolności rozdzielczej, niezbędnej przy planowanych pomiarach. Stąd też czytelnik rozprawy pani Magdaleny Dobrowolskiej może być zawiedziony, że nie znajdzie tam wyników eksperymentalnych weryfikujących rezultaty symulacyjne. Bez znaczącej poprawy pozycyjnej zdolności rozdzielczej detektora, przeprowadzenie tych pomiarów nie jest możliwe.

Rozdział 9 zawiera propozycję zastosowania metody tomografii do badania ciała przy użyciu protonów o maksymalnej energii dostępnej w akceleratorach medycznych. Celem tych rozważań jest lepsze wyznaczenie względnej zdolności hamującej, wielkości niezbędnej przy planowaniu protonoterapii. Przykład uranu jako materiału rozproszeniowego w ciele nie jest jednak najlepiej dobrany.

Rozprawę zamyka omówienie perspektyw badawczych (Rozdział 10) i Podsumowanie (Rozdział 11).

Podsumowując, praca zawiera nowe wyniki badawcze, które pozwalają liczyć na wyznaczenie struktury zbrojenia konstrukcji betonowych podczas tygodniowych pomiarów, dzięki mierzeniu odchylenia toru mionów promieniowania kosmicznego. Symulacje zostały przeprowadzone dla realistycznych układów, wykazując największą czułość dla siatek prętów zbrojeniowych. Przedstawiono budowę prototypowego detektora mionów, który jednak nie spełnia wymaganych założeń i wymaga ulepszeń, stąd w pracy brak porównania symulacji z wynikami eksperymentalnymi. Praca jest napisana bardzo starannie, z obfitą dokumentacją w

postaci ponad 100 rysunków. Podsumowanie każdego rozdziału pracy wskazuje, że Autorka umie wskazać najważniejsze wyniki swoich badań. Nie mam wątpliwości, że mgr Magdalena Dobrowolska posiada odpowiednią wiedzę teoretyczną dotyczącą prowadzonych badań, oraz potrafi je prowadzić i wyciągać odpowiednie wnioski

Pytanie, które nasunęło mi się w trakcie lektury dotyczy sprawy precyzji siatki prętów zbrojeniowych i wpływu odchylen na czułość wyników. Porównanie rachunków programem GEANT dla idealnej siatki i dla siatki, w której pręty byłyby losowo przesunięte względem nominalnego położenia, mogłoby odpowiedzieć na to pytanie.

Zastanawiam się także nad ewentualnym wykorzystaniem opracowanych algorytmów nie dla mierzenia stalowych zbrojeń, ale do poszukiwania ewentualnych pustek w betonie. Można też rozważać badanie jednorodności absorberów mionowych w eksperymentach fizycznych (przykładowo w pomiarach torów prostych² albo mierzących zakrzywienie toru w polu magnetycznym³).

Poprawienie jednostki w oporności powierzchniowej (strona 85), gdzie jest „500 kΩ/?”, byłoby wskazane.

Stwierdzam, że rozprawa przedstawiona przez mgr Magdalenę Dobrowolską jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania, a tym samym stawiam wniosek o dopuszczenie pani magister Magdaleny Dobrowolskiej do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

² A. Senger, P. Senger, *Particles* **2021**, 4(2), 205-213; <https://doi.org/10.3390/particles4020019>

³ <https://cms.cern/detector/detecting-muons>