



Prof. dr hab. Piotr Salabura
Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego
ul. Prof. Łojasiewicza 11
Uniwersytet Jagielloński
30-348 Kraków

15.05. 2022
Kraków

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Łacha "Rozwój systemu detekcyjnego do obrazowania przestrzennego rozkładu pierwiastków metodą fluorescencji rentgenowskiej "

Praca doktorska pana mgr inż. Bartłomieja Łacha „Rozwój systemu detekcyjnego do obrazowania przestrzennego rozkładu pierwiastków metodą fluorescencji rentgenowskiej” przedstawia bardzo dobry przykład zastosowania nowoczesnych detektorów promieniowania oraz powiązanych z nimi dedykowanych systemów odczytu stosowanych w fizyce cząstek w zupełnie innych dziedzinach nauki. Przedstawiona metoda badawcza oparta na fluorescencji promieniowania X (XRF X-ray Fluorescence) umożliwia w sposób nieinwazyjny skanować warstwy farb i określać ich skład pierwiastkowy na dużym obszarze (powierzchnia użytego detektora to około $10 \times 10 \text{ cm}^2$) z bardzo dobrą przestrzenną zdolnością rozdzielczą, co jest ważne dla historii sztuki. Zastosowany system detekcyjny oparto na detektorach gazowych zbudowanych z 3 folii typu GEM (Gas Electron Multiplier) z dwuwymiarową macierzą sensorów o rozdzielczości $400 \mu\text{m}$, odczytywaną za pomocą dedykowanego analogowego układu scalonego typu ASIC. Układ detekcyjny DETART (DETECTOR for ART) został umieszczony w specjalnej konstrukcji która jest precyzyjnie pozycjonowana względem analizowanego dzieła przez ramię robota przemysłowego. Cały system ma charakter nowatorski a samo zastosowanie do badań dzieł sztuki interdyscyplinarne. Przedstawione w pracy praktyczne zastosowanie do analizy pokryć malarskich w dziełach sztuki obejmuje: obrazy (3) i trójwymiarowe obiekty (2). Natomiast sam układ pomiarowy został zastosowany do analizy 18

obiektów historycznych przeprowadzonych wspólnie z Laboratorium Analiz i Nieniszczących Badań Obiektów Zabytkowych Muzeum Narodowego w Krakowie, co w pełni dowodzi jego potencjału.

Praca doktorska prezentuje wyniki które są uwieńczeniem długoletniego procesu rozwoju detektora GEM, opartego na opracowaniu dla eksperymentu COPMPASS w CERN, oraz dedykowanego 64-kanalowego układu scalonego ARTROC w technologii AMS 0.35 μ m (CMOS) opracowanego przez grupę z katedry Oddziaływań i Detekcji cząstek z Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Oba komponenty są sercem detektora DETART który przy pomocy kamery otworkowej oraz lamp rentgenowskich umożliwia pomiar promieniowania fluorescencji X z badanego obiektu. Udział autora pracy w projekcie został jasno określony i polegał na: (i) wkładzie w projektowaniu układu ARTROC a w szczególności, co zostało opisane w rozdziale 2.2.1, w wyznaczeniu szczegółowych charakterystyk toru szybkiego i wolnego: wzmocnień, napięć niezrównoważania i ich rozrzutów pomiędzy kanałami oraz szumów (ENC) (ii) testów i optymalizacji zdolności rozdzielczej detektora DETART (osiągnięto 17% FWHM dla linii 5.9 KeV) (rozdział 3) (iii) w wykonaniu oprogramowania układu sterowania robotem Kawasaki RS020N wraz z systemem bezobsługowej kontroli przesuwu i pozycji detektora DETART względem badanego obiektu z zabezpieczeniami przed kolizjami z badanym obiektem (rozdział 2.5) oraz (iv) pomiarów parametrów zewnętrznych (temperatura, ciśnienie, wilgotność) (rozdział 2.6). Zastosowanie detektora DETART do pomiarów ekspozycji 5 obiektów muzealnych (3 obrazów, jednej rzeźby i modelu globusa) oraz analiza otrzymanych danych została przedstawiana w rozdziałach 4 i 5.

W opisanych osiągnięciach chciałbym podkreślić systematyczne badania optymalizacyjne systemu detekcyjnego polegające na: kalibracji rozrzutów wzmocnienia gazowego w funkcji pozycji na powierzchni detektora (rozdział 3.2), określeniu zależności wzmocnienia od intensywności promieniowania indukowanego przez ładowanie foli GEM i elektrody dryfowej (rozdział 3.3) oraz redukcji niepożądanych wkładów od linii ucieczki zależnych od typu mieszanki gazowej (rozdział 3.4) i promieniowania charakterystycznego miedzi z foli GEM i elektrody dryfowej. Ten ostatni efekt udało się efektywnie zmniejszyć przez specjalną konstrukcję foli GEM o zmniejszonym do minimum wkładzie miedzi. Natomiast użyta w pomiarach mieszanka gazowa na bazie Argonu, głównie z powodów ekonomicznych, może w zostać w przyszłości zastąpiona mieszankami opartymi na kryptonie który eliminuje wkład linii ucieczki. Czasowy efekt ładowania foli GEM został wyeliminowany przez odpowiednią strategię polegającą na naświetlaniu detektora przed właściwym pomiarem a efekt intensywności jest kalibrowany przez dedykowane pomiary z referencyjną płytką PCB (z miedzią). W tej kwestii nasuwa się pytanie czy efekt częstotliwościowy może być monitorowany/kalibrowany „on-line” w czasie rzeczywistego pomiaru poprzez natężenie

zrekonstruowanych ilość klastrow. Inne pytanie które nasuwa się po lekturze rozdziału 3 to jaką rolę w uzyskaniu bardzo dobrej zdolności rozdzielczej miało monitorowanie parametrów środowiskowych (temperatury, ciśnienia). W pracy nie znalazłem wyników ilustrujących ich wpływ a domyślałem się że był dość istotny. Inna kwestią które mogła być szerzej opisana jest analiza szumów elektroniki po podłączeniu do detektora (rysunek 2.10 przedstawia ENC, ale jak rozumiem bez podłączenia do sensora).

Wartym podkreślenia istotnym praktycznym osiągnięciem pracy jest wykonanie profesjonalnego automatycznego systemu pomiarowego wraz przydatnym dla użytkownika interfejsem graficznym umożliwiającym podział całego obszaru skanu na szereg, częściowo przekrywających się, ramek z definiowanymi przez użytkownika czasami naświetleń. Do każdej ramki dołączane jest zdjęcie obszaru które umożliwia wizualną inspekcję badanego obszaru. System uzupełnia interfejs do nastawień parametrów pracy lamp RTG służących do naświetlania płaszczyzny obiektu oraz interfejs do akwizycji danych pomiarowych.

Wyniki pomiarów obiektów, identyfikacji składu pierwiastkowego oraz rozkłady przestrzenne promieniowania fluorescencji przedstawiono w rozdziale 4 dla 3 metod: ROI (Region Of Interest) opartej na identyfikacji poprzez linie charakterystyczne i metod (2) faktoryzacji macierzy obrazu przez metodę głównych składowych (PCA-Principal Component Analysis) i algorytmu nieujemnej faktoryzacji (NMF-Non-negative Matrix Factorization). Główna analiza jest poprzedzona przygotowaniem macierzy obrazu, składającego się z elementów (powstających po zsumowaniu 4x4 pikseli), zawierających widma energetyczne fluorescencji z uwzględnieniem w.w. kroków kalibracji wzmocnień gazowych oraz poprawki uwzględniającej zmianę kąta bryłowego (tzw efekt winietowania). Następnie dokonywana jest identyfikacja pozycji pików, przypisywanie ich pozycji do energii poprzez dedykowany algorytm oraz lokalna korekcja kalibracji energetycznych. Pytanie które się nasuwa do przedstawionego algorytmu kalibracji (rysunek 4.5) to czy w mierze dopasowania uwzględnia się zdolność rozdzielczą detektora oraz czy uzyskane wartości wsp. korekcji, które domyślałem się związane także z efektem częstotściowym, są kompatybilna z zmierzoną intensywnością elementów obrazu (moja uwaga powyżej).

Analiza zasadnicza oparta na metodach PCA i NMF które są opisane w rozdziale 4.3, opis metod jest dość pobieżny i chętnie widziałbym w pracy ich głębsze omówienie. W szczególności komentarza wymaga procedura przypisania określonych rozkładów do pierwiastków oraz interpretacja uzyskanych metodami PCA/NMF rozkładów intensywności pierwiastków z widocznymi licznymi strukturami. Np. na rysunku 4.7 przedstawiono rozkłady intensywności względnej pierwiastków po dekompozycji metodami NMF (b) i PCA(c). Jak należy interpretować np. wkłady w rozkładach przypisanych Pb które są poniżej oczekiwanych

linii charakterystycznych (np. około 8 keV) lub dla Hg które są powyżej oczekiwanych linii (około 12 keV).? Na stronie 74 podana jest uwaga że metody faktoryzacji nie wykazują żadnej wrażliwości na piki ucieczki. Jak to należy rozumieć? przecież ten wkład w istotny sposób kontrybuuje do mierzonego widma. Autor wykazuje iż metody faktoryzacji są bardziej zaawansowane i skuteczne niż ROI, gdzie ewidentnie ograniczeniem jest przekrywanie się linii pochodzących od poszczególnych pierwiastków. Jednakże, jak wykazano w pracy, ostateczna interpretacja wymaga dużego wyczucia oraz uważnej analizy wszystkich 3 metod oraz wiedzy z zakresu historii sztuki z zwłaszcza składu chemicznego farb. Jej duża zaletą jest wykrycie elementów które nie są w oczywisty sposób widoczne w widmie skumulowanym ROI, co zostało zademonstrowane w pracy. Interpretacja wyników pomiarów (kompozycji pierwiastków i rozkładów przestrzennych) przedstawiona w rozdziałach 4 i 5 jest mocną stroną pracy. Autor wykazuje się w niej dużym zrozumieniem użytych metod, własności detektora oraz krytycznym podejściem do wyników starając się przedstawić konsystentną interpretację wyników wszystkich metod która bierze także epod uwagę przypuszczalne składniki farb.

Podsumowując, stwierdzam iż przedstawiona do recenzji praca mgr. inż. Bartłomieja Łacha w pełni spełnia warunki ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym doktora. Prace przedstawia bardzo ciekawe zastosowania nowoczesnego systemu detekcyjnego do badań w historii sztuki o dużym potencjale zastosowań. Dlatego też wnoszę do Rady Dyscypliny Nauk Fizycznych AGH o dopuszczenie mgr. inż. Bartłomieja Łacha do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. dr hab.

Piotr Salabura

