



Kraków, 22 lipca 2020 r.

dr hab. Jakub Szlachetko
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
Zakład Spektroskopii Stosowanej
telefon: +48 12 662 8223
www: <https://www.ifj.edu.pl/oddzialy/no5/nz53/>
email: jakub.szlachetko@ifj.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Katarzyny Marii Sowy
pt: „X-ray plenoptic microscopy”
przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. Pawła Koreckiego

Od ponad 100 lat, techniki obrazowania obiektów w skali mikro- i nanometrycznej z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego są w ciągły sposób rozwijane i udoskonalane. Dzięki penetracyjnym właściwościom promieniowania rentgenowskiego, naukowcy mają unikalne możliwości badawcze, a rozwijane przez nich metody eksperymentalne posiadają jednocześnie bardzo istotny potencjał aplikacyjny. Chęć obrazowania coraz mniejszych obiektów z coraz lepszą jakością kontrastu i idealną ostrością czy głębią obrazu, motywuje naukowców do rozwijania nowych kierunków w budowie układów pomiarowych wykorzystujących mikroskopy, tomografy i kamery rentgenowskie. Pojawiające się nowe rozwiązania technologiczne w zakresie optyki rentgenowskiej, detektorów czy źródeł promieniowania rentgenowskiego umożliwiają testowanie nowych metod badawczych oraz budowę wyrafinowanych i zaawansowanych technologicznie układów eksperymentalnych. Wyniki badań przedstawionych w pracy doktorskiej pani magister Katarzyny Sowy w pełni wpisują się w opisany powyżej, a bardzo ważny trend rozwoju metod mikroskopii rentgenowskiej.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska, której autorką jest pani magister Katarzyna Sowa, powstała na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego pod kierunkiem prof. dr. hab. Pawła Koreckiego. Praca opisuje opracowanie metody plenoptycznej mikroskopii rentgenowskiej oraz budowę i uruchomienie układu eksperymentalnego pozwalającego na pierwsze, na skalę światową, obrazowanie plenoptyczne w zakresie promieniowania rentgenowskiego z wykorzystaniem rentgenowskiej optyki polikapilarnej. Wybudowana rentgenowska kamera plenoptyczna jest wyjątkowym i unikatowym urządzeniem,



pozwalającym na obrazowanie obiektów z sub-mikronową przestrzenną zdolnością rozdzielczą z jednoczesną możliwością rekonstrukcji głębi obrazu. Skonstruowany układ eksperymentalny został szeroko przetestowany pod względem wydajności i zdolności rozdzielczej wraz z wyznaczeniem i optymalizacją najistotniejszych parametrów układu. Prezentacja układu eksperymentalnego została uzupełniona badaniami aplikacyjnymi, które demonstrują możliwości plenooptycznej mikroskopii rentgenowskiej. Zademonstrowano również możliwość łączenia tej techniki z innymi konwencjonalnymi metodami pomiarowymi. Zakres badań przedstawionych w pracy doktorskiej jest na bardzo wysokim poziomie naukowym, a opracowany i uruchomiony układ rentgenowskiej kamery plenooptycznej opiera się na nowatorskich i unikatowych rozwiązaniach stosowanych po raz pierwszy w badaniach z zakresu mikroskopii rentgenowskiej.

Wyjątkowość techniki obrazowania plenooptycznego polega na jednoczesnej rejestracji zarówno intensywności, jak i kierunku światła padającego na detektor. W wyniku takiego pomiaru możliwe jest dostosowanie ostrości pomiaru po rejestracji obrazu z jednoczesną możliwością wyznaczenia obrazu na dowolnej głębokości badanego obiektu. W zakresie optycznym pomiary z wykorzystaniem mikroskopów plenooptycznych są stosunkowo łatwe do zrealizowania ze względu na dostępność odpowiednich soczewek o dużych aperturach kątowych. Własności promieniowania rentgenowskiego, a w szczególności relatywnie wąski zakres kątowy, w którym następuje ugięcie fal promieniowania rentgenowskiego na optyce rentgenowskiej, w znaczący sposób ogranicza możliwości zbudowania wydajnego rentgenowskiego mikroskopu plenooptycznego. Nowatorskie podejście zaproponowane przez Autorkę w pracy doktorskiej polega na wykorzystaniu rentgenowskiej optyki polikapilarnej, która charakteryzuje się dużą aperturą kątową, i jednocześnie wykorzystuje mechanizm całkowitego wewnętrznego odbicia wiązki rentgenowskiej do kontroli kierunku propagacji promieniowania rentgenowskiego. Należy podkreślić, że odpowiednie podejście metodologiczne oraz jednoczesne wykorzystanie optyki polikapilarnej i nowoczesnych detektorów pikselowych było kluczem do pomyślnej realizacji projektu plenooptycznej mikroskopii rentgenowskiej.

W pracy doktorskiej możemy wyróżnić trzy główne etapy w jakich projekt został rozwijany i zrealizowany. Pierwsza część polegała na opracowaniu metodologii wielowiązkowej mikroskopii rentgenowskiej, która stanowi podstawę plenooptycznej mikroskopii rentgenowskiej. Opracowana geometria obrazowania bazuje na wytworzeniu matrycy wtórnych źródeł promieniowania rentgenowskiego o rozmiarach sub-mikrometrycznych z wykorzystaniem optyki polikapilarnej. Tak wytworzone wiązki promieniowania rentgenowskiego są wykorzystane do oświetlenia badanego obiektu pod różnymi kątami. Geometria wielowiązkowa została przetestowana zarówno w przypadku próbek silnie absorbujących, jak również dla obiektów częściowo transparentnych dla promieniowania rentgenowskiego. W drugim etapie pracy opracowana geometria wielowiązkowej mikroskopii rentgenowskiej została wykorzystana w plenooptycznym mikroskopie rentgenowskim. Autorka zademonstrowała, że trójwymiarowe obrazowanie obiektów jest możliwe z przestrzenną zdolnością rozdzielczą rzędu 0.5 mikrometrów oraz głębokościową zdolnością rozdzielczą na poziomie 10 mikrometrów. Zademonstrowano także, że zaproponowany układ eksperymentalny pozwala na dwuwymiarowe obrazowanie z bardzo dużym polem widzenia w przypadku wykonania pomiarów dla obiektu umieszczonego poza płaszczyzną ogniskowej. W trzecim etapie pracy Autorka zastosowała



plenoptyczny mikroskop rentgenowski do obrazowania obiektów biologicznych oraz zademonstrowała możliwość łączenia opracowanej metody z mikrotomografią oraz fluorescencyjną spektroskopią rentgenowską.

Od strony edytorskiej rozprawa doktorska została przygotowana starannie, struktura pracy stanowi zwartą i logiczną całość, a otrzymane wyniki zostały zaprezentowane w przejrzysty sposób. Praca zawiera 119 stron i została podzielona na pięć rozdziałów. Zawiera spis wykorzystanej literatury obejmujący 99 pozycji. W krótkim wstępie Autorka przedstawia cel oraz strukturę pracy, podkreślając znaczenie obrazowania plenoptycznego. We wstępie opisane są także wyzwania badawcze, które należało zaadresować i rozwiązać, aby pomyślnie zrealizować projekt plenoptycznego mikroskopu rentgenowskiego.

W rozdziale pierwszym opisany jest koncept obrazowania plenoptycznego wraz z krótkim zarysem historycznym i wstępem teoretycznym. Rozdział zawiera wyniki plenoptycznego obrazowania w zakresie widzialnym, które zostały otrzymane komercyjną kamerą plenoptyczną Lytro. Rozdział kończy się opisem związku między obrazowaniem plenoptycznym a tomografią rentgenowską oraz zawiera opis konceptu plenoptycznego mikroskopu w zastosowaniu soczewek Fresnela do pomiarów w zakresie tzw. "miękkiego" promieniowania rentgenowskiego.

Rozdział drugi poświęcony jest metodzie obrazowania rentgenowskiego opartej na propagacji i skupia się na teoretycznych modelach przedstawiających powstawanie obrazu oraz algorytmy rekonstrukcji obrazu. Druga część rozdziału poświęcona jest opisowi optyki rentgenowskiej wykorzystywanej w układach eksperymentalnych do ogniskowania promieniowania rentgenowskiego, ze szczególnym uwzględnieniem optyki kapilarnej i polikapilarnej. Rozdział zawiera zwięzły opis zasady działania optyki oraz prezentuje główne parametry charakteryzujące opisywane elementy optyczne.

Rozdział trzeci adresuje zagadnienie wielowiązkowej mikroskopii rentgenowskiej i rozpoczyna się od omówienia mikroskopii rentgenowskiej wspomaganej defektem z optyką polikapilarną. Warto podkreślić, że metoda mikroskopii wspomagana defektem była tematem pracy magisterskiej Autorki i w konsekwencji stanowiła podstawę badań prowadzonych w ramach niniejszego projektu doktorskiego. Moje szczególne uznanie znalazł podrozdział prezentujący formowanie obrazu w geometrii wielopunktowej, wraz z opisem układu eksperymentalnego i przedstawieniem wyników eksperymentalnych. Cała metoda opiera się na rozszerzeniu mikroskopii rentgenowskiej wspomaganej defektem o układ szczelin pozwalający na bardziej kontrolowane wprowadzanie zaburzeń w mikroskopie rentgenowskim wykorzystującym optykę polikapilarną. Przeprowadzone pomiary skupiają się na obrazowaniu dwuwymiarowym obiektów referencyjnych w celu określenia podstawowych parametrów mikroskopu oraz są uzupełnione przykładem obrazowania obiektów o niskim współczynniku pochłaniania promieniowania rentgenowskiego.

Końcowy koncept oraz sposób realizacji plenoptycznego mikroskopu rentgenowskiego jest przedstawiony w rozdziale czwartym. Rozdział rozpoczyna opis formowania obrazu w układzie plenoptycznym oraz szczegółowe omówienie wpływu położenia badanego obiektu względem ogniska na otrzymaną zdolność rozdzielczą. Rozdział zawiera również krótki opis układu eksperymentalnego wraz z podstawowymi parametrami pomiarów. W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki eksperymentów, w których po raz pierwszy zademonstrowano możliwość obrazowania



plenoptycznego w twardym zakresie promieniowania rentgenowskiego z wykorzystaniem optyki polikapilarnej. W pomiarach wykorzystano próbki referencyjne pozwalające określić przestrzenną zdolność rozdzielczą mikroskopu oraz zbadano wpływ położenia obiektu względem płaszczyzny ogniskowej. Pokazano, że skonstruowany przez Autorkę plenoptyczny mikroskop rentgenowski może rejestrować obrazy w trzech reżimach, modulując zdolność rozdzielczą w osi głębi oraz obszar, z którego rejestrowany jest obraz. W ostatniej części rozdziału 4 wykazano, że plenoptyczną mikroskopię rentgenowską można skutecznie łączyć z konwencjonalnymi metodami tomograficznymi oraz rentgenowską spektroskopią fluorescencyjną do jednoczesnej analizy składu pierwiastkowego badanego materiału.

Ostatni, piąty rozdział, kończy rozprawę i zawiera podsumowanie pracy oraz przedstawia perspektywy związane m.in. do zastosowań na linii wiązki PolyX, która jest budowana w Narodowym Centrum Promieniowania Synchronotronowego SOLARIS.

Rozprawa doktorska jest napisana przejrzysto, z odpowiednimi i wyczerpującymi odniesieniami do literatury. Należy zwrócić uwagę, że praca jest zwięzła i zawiera tylko informacje, które są konieczne do zrozumienia omawianego zakresu badań, bez niepotrzebnego przedstawiania mniej istotnych zagadnień. Dlatego też, poza wartością merytoryczną nowatorskich wyników badań, które są przedstawione w pracy, na pochwałę zasługuje spójny i logiczny układ rozprawy doktorskiej. Wyniki zaprezentowane w pracy wymagały zaawansowanej obróbki danych, a wyciągnięte wnioski zostały poparte bardzo metodyczną analizą. Autorka nie ustrzegła się jednak przed kilkoma drobnymi błędami czy niedociągnięciami. Jednocześnie podczas przygotowywania niniejszej recenzji pracy nasunęło mi się także kilka istotnych pytań. Moje uwagi, poprawki i komentarze wypunktowane są poniżej:

1. Praca zawiera kilka bardzo drobnych błędów językowych i literówek, np:

- na stronie 14 czytamy – „The Thesis is organized into 6 chapters” a następnie opisanych jest 5 rozdziałów pracy
- strona 19 jest „labolatory” – powinno być „laboratory”
- strona 26 jest „arccos” – powinno być „across”
- strona 30 jest „left to tight” – powinno być „left to right”
- strona 39 jest „eb” – powinno być „be”
- strona 39, równanie 2.35 opisuje transmisję promieniowania rentgenowskiego przez materiał. W równaniu zgubiony jest znak minus przy eksponentie.
- strona 47 jest „the the” – powinno być „the”
- strona 53 jest „fibres” – powinno być „fibers”
- strona 57, rysunek 3.6 jest „simulatation” – powinno być „simulation”
- strona 85, rysunek 4.8 jest „lhe” – powinno być „The”.

2. Strona 47: Na podstawie równania 2.53 stwierdzono, że ze względu na zależność opisującą wartość kąta krytycznego od energii promieniowania rentgenowskiego, optyka polikapilarna może być wykorzystana jako filtr energetyczny. Widma energetyczne przedstawione na rysunku 3.12 pokazują wycięcie niskoenergetycznych fotonów przy użyciu polikapilarnej optyki kolimującej, natomiast efekt jest odwrotny przy dodaniu polikapilarnej optyki ogniskującej (sygnał niskoenergetyczny jest wzmacniony). Dodatkowo można zaobserwować istotne zmiany w rozkładzie energetycznym



zmierzonych widm dla testowanych konfiguracji. Efekt ten nie jest do końca wyjaśniony i zaadresowany w pracy, a nasuwa następujące pytanie: czy rozkład energetyczny promieniowania rentgenowskiego może mieć wpływ (lub nie) na jakość (zdolność rozdzielczą lub czułość pomiaru) w eksperymentach z wykorzystaniem plenoptycznego mikroskopu rentgenowskiego i dlaczego?

3. Strona 63/64: Przedstawione widma energetyczne zostały zmierzone po bardzo szerokim zakresie energetycznym promieniowania rentgenowskiego. Czy przedstawione widma oraz liczba fotonów w Tabeli 3.1 uwzględniają wydajność detektora FitPix?

4. Strona 98: Zastosowana notacja do określenia linii emisyjnych w widmach rentgenowskich nie jest jednolita. Według notacji Siegbahna używamy liter i symboli greckich (tj. $K\alpha$ lub $L\beta$) lub notacji UPAC określającej poziomy pomiędzy którymi zachodzi przejście elektronowe prowadzące do fluorescencji (tj. $L_{III} - K$, lub $L_3 - K$). Dlatego też z opisu oraz z rysunku 2.26 trudno jest wywnioskować jakiemu przejściu odpowiada linia emisyjna oznaczona jako $Sb L_1$ czy $L_{1,2}$ dla W? Chciałbym także zwrócić uwagę, że detekcja linii oznaczonej jako $Sn L_1$, powinna w konsekwencji być powiązana z detekcją linii emisyjnych $L\alpha$ i $L\beta$ które są dużo bardziej intensywne (tak jak w przypadku linii W na rys. 4.26b). Linie $Sb L\alpha$ i $L\beta$ powinny być zarejestrowane przy energiach 3.6keV i 3.85keV – jak można wytłumaczyć ich brak w widmie rentgenowskim?

5. W podsumowaniu, Autorka poruszyła temat możliwego zastosowania techniki plenoptycznej mikroskopii rentgenowskiej na źródle synchrotronowym Solaris. Uważam, że zagadnienie jest bardzo ważne i istotne z punktu widzenia dalszego rozwoju tej metody. Aspekt wykorzystania intensywnego źródła promieniowania rentgenowskiego w oczywisty sposób skróci czas akwizycji oraz poprawi jakość sygnału do poziomu tła. Natomiast zastanawia mnie jakie dodatkowe korzyści może przynieść, w porównaniu do polichromatycznego źródła laboratoryjnego, zastosowanie monochromatycznej wiązki promieniowania rentgenowskiego? Czy wykonując pomiary np. dla energii powyżej i poniżej krawędzi absorpcji dla danego pierwiastka otrzymamy obraz trójwymiarowy z czułością zarówno przestrzenną jak i pierwiastkową?

Pomimo wymienionych powyżej drobnych uwag, które w niczym nie umniejszają wartości przedstawionych badań naukowych, chciałbym podkreślić nowatorski charakter otrzymanych wyników, jak również bardzo wysoki poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej. Przedstawione badania oraz zebrane w pracy doktorskiej wyniki stanowią oryginalny i bardzo istotny wkład w rozwój mikroskopii rentgenowskiej. Potwierdzeniem tej tezy są dwie publikacje naukowe, powiązane bezpośrednio z pracą dokorską, a których pani magister Katarzyna Sowa jest pierwszym autorem. Prace zostały opublikowane przez renomowane czasopisma naukowe, które są kluczowe w badaniach z zakresu mikroskopii oraz fizyki stosowanej. Pierwsza praca opublikowana w czasopiśmie *Optica* (K. Sowa, B. Jany, P. Korecki, „Multi-point projection X-ray microscopy”, *Optica* 5, 577 (2018), Impact Factor = 9.26) przedstawia opracowaną w ramach projektu doktorskiego, nową geometrię obrazowania, która wykorzystuje optykę polikapilarną do wielowiązkowej mikroskopii rentgenowskiej. Na obecną chwilę, praca była cytowana 6 razy. Druga praca została opublikowana w czasopiśmie *Applied Physics Letters* (K. Sowa, M. Kujda, P. Korecki, „Plenoptic X-ray microscopy”, *Applied Physics Letters* 116, 014103 (2020), Impact Factor = 3.5) i demonstrowa wykorzystanie wielowiązkowej mikroskopii rentgenowskiej do plenoptycznego mikroskopu pracującego w zakresie



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

twardego promieniowania rentgenowskiego. Wyniki zaprezentowane w pracy doktorskiej, jak i wynikające z tej pracy publikacje naukowe, potwierdzają wyjątkowość przeprowadzonych eksperymentów. Chciałbym jeszcze raz podkreślić nowatorski charakter przedstawionych badań: Autorka wprowadziła do badań z zakresu mikroskopii nową geometrię pomiarową oraz po raz pierwszy zademonstrowała możliwość plenooptycznego obrazowania z wykorzystaniem optyki polikapilarnej. Badania te niewątpliwie stanowią ważny krok w rozwoju metod rentgenowskich. Przedstawiona rozprawa doktorska demonstruje samodzielność Autorki w prowadzeniu badań oraz w rozwiązywaniu trudnych i złożonych problemów naukowych wymagających wprowadzenia i zaadoptowania nowych rozwiązań eksperymentalnych. Pani magister Katarzyna Sowa wykazała, że opanowała bardzo dobrze wiedzę teoretyczną z zakresu mikroskopii oraz zademonstrowała znajomość fizycznych procesów i zjawisk koniecznych do opisu układów optycznych, jak również szeroką wiedzę z zakresu obrazowania i rekonstrukcji obrazu. Bardzo istotnym kluczem do pomyślnej realizacji projektu była umiejętność budowy nowych układów eksperymentalnych i ich systematyczna optymalizacja w połączeniu z równoczesną zdolnością pracy w zaawansowanym środowisku laboratoryjnym.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska w pełni spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pani magister Katarzyny Marii Sowy do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ze względu na wysoki poziom badań naukowych oraz innowacyjny charakter zaprezentowanych wyników, wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej.


dr hab. Jakub Szlachetko