

OPINIA

o dorobku naukowym, dydaktycznym i organizacyjnym
doktora Artura T. Krzyżaka w związku z ubieganiem się o nadanie stopnia doktora
habilitowanego

A) Ocena rozprawy habilitacyjnej

Rozprawa habilitacyjna doktora Artura T. Krzyżaka pod tytułem „Charakterystyka układów porowatych metodami obrazowania magnetyczno-rezonansowego ze szczególnym uwzględnieniem analizy rozkładów tensora dyfuzji wody i czasów relaksacji T_1 i T_2 ”, wskazana jako osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 16 pkt 2 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami, jest jedno-tematycznym zbiorem zawierającym następujące siedem artykułów w recenzowanych czasopismach naukowych opublikowanych przez Habilitanta w latach 2005-2016 oraz patent przyznany w roku 2014:

[H1] **A. Krzyżak**, Z. Olejniczak. Improving the accuracy of PGSE DTI experiments using the spatial distribution of b matrix. *Magnetic Resonance Imaging*, **33** (2015) 286–295, IF = 2.09

[H2] K. Kłodowski, **A. Krzyżak**. Innovative anisotropic phantoms for calibration of diffusion tensor imaging sequences. *Magnetic Resonance Imaging*, **34** (2016) 404-409, IF = 2.09

[H3] W. Węglarz, **A. Krzyżak**, M. Stefaniuk. ZTE imaging of tight sandstone rocks at 9.4T - comparison with standard NMR analysis at 0.05 T. *Magnetic Resonance Imaging*. **34** (2016) 492-495, IF = 2.09

[H4] **A. Krzyżak**, A. Jasiński, W. Węglarz, D. Adamek, P. Sagnowski, M. Baj. Visualisation of the extent of damage in a rat spinal cord injury model using MR microscopy of the water diffusion tensor. *Acta neurobiologiae experimentalis* **65** (2005) 255-264, IF=1.43.

[H5] **A. Krzyżak**, A. Jasiński, D. Adamek. Qualification of the most statistically “sensitive” diffusion tensor imaging parameters for detection of spinal cord injury. *Acta Physica Polonica A*, **108** (2005) 207-210, IF=0.53.

[H6] **A. Krzyżak**, A. Jasiński, S. Kwieciński, P. Kozłowski, D. Adamek. Quantitative Assessment of Injury in Rat Spinal Cords In Vivo by MRI of Water Diffusion Tensor. *Applied Magnetic Resonance*, **34** (2008) 3-20, IF=0.748

[H7] **A. Krzyżak**, I. Habina. Low field ^1H NMR characterization of mesoporous silica MCM-41 and SBA-15 filled with different amount of water. *Microporous and Mesoporous Materials*, **231** (2016) 230-239, IF=3.45

[H8] **A. Krzyżak**. Anisotropic diffusion phantom for calibration of diffusion tensor imaging pulse sequence used in MRI. Patent, Ref. No: US8643369 B2 (2014).

Zbiór ten zawiera siedem oryginalnych prac wielo-autorskich (od dwóch do sześciu autorów) opublikowanych w czasopismach notowanych w bazie *Journal Citation Reports* i patent amerykański, którego Habilitant jest jedynym autorem. Wszystkie siedem prac, liczących łącznie 60 stron, ukazało się w renomowanych czasopismach naukowych o międzynarodowym zasięgu, a patent został przyznany w USA.

W publikacji [H1] przedstawione zostały założenia teoretyczne metody BSD-DTI (B-matrix Spatial Distribution in Diffusion Tensor Imaging – rozkład przestrzenny macierzy \mathbf{b} w obrazowaniu tensora dyfuzji) poprawiającej znacząco precyzję określania tensora dyfuzji w eksperymencie. Opiera się ona na bezpośrednim pomiarze przestrzennego rozkładu współczynników macierzy gradientowej \mathbf{b} przy wykorzystaniu specjalnie skonstruowanych fantomów będących wzorcami dla tensora dyfuzji. Metoda ta została przetestowana na komercyjnym układzie firmy Bruker dla wodnego fantomu izotropowego i anizotropowego, pokazując prawie rząd wielkości wyższą dokładność pomiaru tensora dyfuzji. W pracy [H2] prezentowane są wyniki zastosowania nowo opracowanych fantomów do badań na klinicznym skanerze MRI, pokazując kilkukrotnie wyższą dokładność nowej metody w określaniu tensora dyfuzji dla fantomu izotropowego, ze szczególną poprawą uzyskaną dla orientacji koronalnej, co było dotychczas słabym punktem tomografów komercyjnych.

Praca [H3] przedstawia analizę lokalnego stopnia nasycenia wodą zwięzłych skał piaskowcowych przy pomocy wysokopolewego skanera MRI 9.4 T (nowa metoda ZTE- Zero Echo Time) oraz układu niskopolewego 0.05 T. Specjalnie opracowana i wykonana cewka RF do skanera wysokopolewego o niskim czasie martwym umożliwia badanie układów mezoporowych i mikroporowych z rozdzielczością przestrzenną poniżej pół milimetra. Układ niskopolewy pozwolił otrzymać rozkłady czasów relaksacji, które są źródłem informacji o rozkładach porów. Potwierdzona została zależność liniowa między sygnałem zarejestrowanym dla piaskowców metodą ZTE i porowatością całkowitą wyznaczoną z rozkładów czasów T_2 otrzymanych przy pomocy sekwencji CPMG na układzie o polu 0.05T.

Trzy kolejne prace [H4-H6] dotyczą obrazowania tensora dyfuzji w tkankach nerwowych rdzenia kręgowego, które są biologicznymi układami porowatymi. W pierwszej z nich przedstawiono analizę dla próbki referencyjnej i po uszkodzeniu w ściśle określony sposób. Składowe tensora dyfuzji oraz jego ślad, współczynnik izotropii i współczynniki dyfuzji poprzecznej oraz wzdłużnej analizowano dla różnych ścieżek wzdłuż rdzenia kręgowego. Obserwacje pokazały istnienie ścisłego powiązania między zmianami tensora dyfuzji wody oraz zmianami urazowymi tkanki nerwowej rdzenia kręgowego. W publikacji [H5] przeanalizowano kilkadziesiąt wyników badań *in vitro* i *in vivo* dla rdzenia kręgowego szczura w stanie kontrolnym oraz po urazie, wykonanych na skanerze 6.4T. Pokazały one,

że ślad tensora dyfuzji ma niewielką czułość w detekcji zmian pourazowych, w przeciwieństwie do współczynników dyfuzji poprzecznej, podłużnej, izotropii, czy anizotropii frakcyjnej. Praca [H6] przedstawia wyniki eksperymentów *in vivo*, w których analizowano zmiany współczynników tensora dyfuzji tkanki nerwowej rdzenia kręgowego szczura w grupie kontrolnej i po urazie. Pokazują one możliwości obrazowania *in vivo* zmian pourazowych rdzenia kręgowego przy pomocy tensora dyfuzji. Ponieważ zaburzenia dyfuzji w tkance nerwowej występują znacznie wcześniej niż obrzęki i krwawienia, stwarza to możliwość wcześniejszej diagnostyki i skuteczniejszej terapii urazów rdzenia kręgowego.

Publikacja [H7] przedstawia wyniki badań dwóch mezoporowych związków silikatowych metodą MRJ w polu 0.05 T. Otrzymane czasy relaksacji poprzecznej T_2 i podłużnej T_1 , ich ilorazy oraz mapy T_1 - T_2 dla różnych stopni napełnienia porów pokazują między innymi różnicę siły wiązania cząsteczek wody pomiędzy dwoma badanymi materiałami. Ważnym osiągnięciem pracy jest zaobserwowanie i rozdzielenie sygnałów rezonansu jądrowego wodoru zarówno od wody wolnej wypełniającej przestrzenie porów, przestrzeni między porami, jak i od wody związanej z powierzchnią cząstek silikatowych, a także od grup hydroksylowych na powierzchni badanych układów.

W pracy [H8] przedstawiony jest opis patentu USA przyznanego w 2014 roku przedstawiający metodę kalibracji dowolnej dyfuzyjnej sekwencji obrazowania MR - DTI oraz sposób kalibracji dowolnego tomografu MR przy pomocy anizotropowych wzorców dyfuzji. Kalibracja jest prowadzona w oparciu o macierz \mathbf{b} , która jest charakterystyczna dla danej sekwencji obrazowania i danego tomografu MR i ma zastosowanie do badań ciał stałych i ciekłych oraz tkanek biologicznych. Dla różnych tomografów i różnych sekwencji obrazujących uzyskane wyniki były dotychczas trudne do porównywania ze względu na błędy i brak możliwości precyzyjnego określenia wartości macierzy \mathbf{b} . Sposób kalibracji dowolnego tomografu MR według wynalazku Habilitanta eliminuje te niedogodności, pozwalając na precyzyjne określenie wartości macierzy \mathbf{b} oraz ich rozkładu przestrzennego dla dowolnego tomografu i dowolnej sekwencji obrazowania, w szczególności dla DTI.

W pięciu z prac wchodzących w skład rozprawy habilitacyjnej dr Krzyżak jest pierwszym autorem [H1, H4-H7], a w jednej, [H2], pierwszym autorem jest doktorant, nad którym sprawuje On opiekę naukową jako promotor pomocniczy. W przypadku patentu, [H8], Habilitant jest jego jedynym autorem. Ten fakt oraz załączone oświadczenia współautorów pozwalają stwierdzić, że **doktor Artur T. Krzyżak ma dominujący udział w sześciu pracach i patencie oraz znaczący wkład w powstanie jednej z prac stanowiących Jego osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 16 pkt 2 Ustawy.** Biorąc pod uwagę przeanalizowane powyżej osiągnięcia naukowe zawarte w przedstawionym zbiorze prac [H1-H8] stwierdzam, że stanowią one znaczny wkład Habilitanta w **poznanie procesów fizycznych i rozwój narzędzi do badania układów porowatych i dyfuzji wody w tych układach, wypełniając kryterium art. 16 pkt 2 Ustawy odnośnie rozprawy habilitacyjnej.**

B) Ocena osiągnięć naukowo-badawczych, dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej.

Dr Artur T. Krzyżak jest absolwentem Uniwersytetu Jagiellońskiego, gdzie ukończył studia fizyki. Rozprawę doktorską przygotował pod opieką prof. A. Jasińskiego i obronił z wyróżnieniem w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Po obronieniu doktoratu uzyskał stanowisko asystenta, a następnie adiunkta w Pracowni Tomografii Magnetycznego Rezonansu Jądrowego w IFJ PAN. Od 2013 roku pracuje na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, gdzie obecnie prowadzi utworzone przez siebie Laboratorium Tomografii i Spektroskopii Magnetycznego Rezonansu Jądrowego.

Według danych na czas złożenia dokumentacji wniosku jest współautorem 19 prac opublikowanych w czasopismach notowanych na liście Journal Citation Reports, w tym 8 prac opublikowanych przed uzyskaniem stopnia doktora, a 11 – po jego uzyskaniu. Oprócz tego jest współautorem 20 innych prac, opublikowanych w wydawnictwach o międzynarodowym zasięgu. Sumaryczny współczynnik wpływu (Impact Factor) wszystkich Jego publikacji wynosi 40.79, współczynnik Hirscha 6, a liczba cytowań 77, w tym 52 bez autocytowań.

W zakresie opracowywania dokumentacji prac badawczych i patentów dr Krzyżak jest autorem dokumentacji wynalazku z dziedziny Magnetycznego Rezonansu Jądrowego chronionego zgłoszeniami patentowymi (polskie, europejskie i japońskie) oraz patentem [H8] zawierającej opracowania założeń technologii budowy fantomów anizotropowych i wdrożenia metody BSD-DTI na komercyjnych skanerach MRI, a także nowych rozwiązań teoretycznych, koncepcji i algorytmów oprogramowania do analizy danych w metodach standardowych oraz nowo wprowadzonych przez Habilitanta. Dotyczą one budowy modeli fantomów anizotropowych o strukturach laminarnych i kapilarnych będących wzorcami tensora dyfuzji, metody BSD-DTI obliczania rzeczywistego przestrzennego rozkładu gradientu pola magnetycznego oraz macierzy \mathbf{b} w eksperymentach DWI i DTI, a także sposobu kalibracji sekwencji obrazowania dyfuzyjnego w tomografach MR oraz metody wyznaczania rozkładu współczynników dyfuzji i tensora dyfuzji. Jest również autorem koncepcji i algorytmów oprogramowania do przechowywania i analizy wielu danych laboratoryjnych oraz modelu biznesowego wykorzystania wynalazku i założeń dla spółki spin-off. Dla dwóch innych zgłoszeń patentowych (polskiego oraz polskiego i międzynarodowego) jest także autorem nowych rozwiązań teoretycznych i publikacji założeń chronionych tymi zgłoszeniami.

W dziedzinie popularyzacji wyników swoich badań naukowych i rozwojowych Habilitant ma znaczący dorobek wyrażony liczbą 108 prezentacji na 49 konferencjach międzynarodowych i 27 krajowych, w tym ośmiu osobiście wygłoszonych referatów ustnych: czterech na konferencjach międzynarodowych i czterech - krajowych.

W zakresie kierowania międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udziału w takich projektach dr Krzyżak ma znaczący dorobek wyrażony m. in. kierowaniem projektem NCBiR w ramach Programu Badań Stosowanych pod tytułem „Opracowanie

innowacyjnej metody wykorzystującej zjawisko Magnetycznego Rezonansu Jądrowego oraz jej zastosowanie do estymacji parametrów petrofizycznych skał łupkowych, terygenicznych i węglanowych z formacji naftowych Polski” (2013-2017), kierowaniem grantami MNiSW: Opracowanie metody istotnej poprawy stosunku sygnału do szumu w badaniach fMRI-DTI mózgu i rdzenia kręgowego człowieka, (2010-2013) i „Opracowanie kompleksowej metody określania wartości składowych macierzy \mathbf{b} za pomocą obrazowania MR tensora dyfuzji” (2006-2008). Jest także koordynatorem zadań AGH projektu NCBiR STRATEGMED (2015-2018) pod tytułem „Regeneracja uszkodzeń niedokrwiennych układu sercowo-naczyniowego z wykorzystaniem Galarety Whartona jako nieograniczonego źródła terapeutycznego komórek macierzystych”. Tematem realizowanym w AGH jest „Rozwój metod obrazowania wykorzystujących zjawisko Magnetycznego Rezonansu Jądrowego w celu ilościowego określenia potencjału regeneracyjnego WJMSC w badaniach mięśni sercowych i szkieletowych. Był również kierownikiem zadania w granicie MNiSW w ramach programu Patent Plus realizowanym w latach 2010-2012, dotyczącym opracowania studium wykonalności i zgłoszeń krajowych wynalazku. Uczestniczy jako wykonawca w projektach Blue Gas I pt.: „Badania sejsmiczne i ich zastosowanie dla detekcji stref występowania gazu z łupków - dobór optymalnych parametrów akwizycji i przetwarzania w celu odwzorowania budowy strukturalnej oraz rozkładu parametrów petrofizycznych i geomechanicznych skał” (2013-2017) i Blue Gas II pt. „Rozpoznanie, lokalizacja i udostępnianie optymalnych stref występowania niekonwencjonalnych akumulacji węglowodorów typu *shale gas* w Karpatach fliszowych oraz technologiczne aspekty eksploatacji” (2014-2017).

Dorobek Habilitanta w zakresie dydaktyki i popularyzacji nauki obejmuje między innymi przygotowanie i prowadzenie (od 2010) wykładów i ćwiczeń eksperymentalnych popularyzujących zagadnienia z fizyki dla dzieci szkół podstawowych, przygotowanie i przeprowadzenie (od 2000) wykładów seminaryjnych dla studentów, doktorantów i pracowników naukowych IFJ PAN, dotyczących zastosowania tomografii magnetycznego rezonansu jądrowego do obrazowania obejmującego w szczególności dyfuzję i tensor dyfuzji. Przygotował i prowadził również prezentacje (od 2006 do 2012) dotyczące zastosowania tomografii i spektroskopii MRJ w trakcie dni otwartych IFJ PAN, a także (od 2014) pokazowe wykłady i ćwiczenia eksperymentalne popularyzujące zagadnienia z fizyki magnetycznego rezonansu jądrowego dla studentów geologii stosowanej Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH. W styczniu 2017 r. na forum Seminarium Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH przedstawił wykład na temat swoich zainteresowań naukowych, który stał na bardzo wysokim poziomie, zarówno pod względem merytorycznym, jak i popularyzacyjno-dydaktycznym.

W zakresie opieki naukowej nad studentami dr Krzyżak był promotorem trzech ukończonych i jednej rozpoczętej pracy magisterskiej studentów fizyki technicznej i fizyki medycznej Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Jest także promotorem pomocniczym w czterech przewodach doktorskich na WFIS AGH, których zakończenie jest planowane na lata 2017-2019. Warty podkreślenia jest fakt, że dotyczą one tematyki naukowej wprowadzonej przez Niego na AGH.

Habilitant odbył dwa staże naukowe w renomowanych ośrodkach zagranicznych: Institute for Biodiagnostic of National Research Council, Winnipeg, Kanada i FORENAP Institute, Rouffach, Francja. Uczestniczył także w sześciu szkoleniach dotyczących spektroskopii i tomografii MRJ organizowanych przez największe towarzystwa naukowe działające w tej dziedzinie – ESMRMB i ISMRM oraz w dwóch szkoleniach dotyczących wykorzystania MRJ w petrofizyce, zorganizowanych przez NMR Petrophysics INC w Marsylii i przez Magritek GmbH – w Aachen, w 2014 roku.

Jako recenzent prac naukowych Dr Krzyżak kilkakrotnie sporządzał opinie dla czasopism: *NMR in Biomedicine* i *Neuroradiology*.

Bardzo ważnym elementem w dorobku naukowym, dydaktycznym i organizacyjnym Habilitanta jest utworzenie przez Niego i według Jego koncepcji - Laboratorium Tomografii i Spektroskopii Magnetycznego Rezonansu Jądrowego na Wydziale Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, a także pozyskanie do niego najnowszej aparatury do badania układów porowatych w niskich i średnich polach magnetycznych (2014-2016). Dzięki temu jest rozwijana nowoczesna tematyka naukowa w zakresie podstawowym i aplikacyjnym w dziedzinie nauk biologicznych, diagnostyki medycznej, geologii – petrografii, czy nauk materiałowych, czego wyrazem jest między innymi realizacja w tym laboratorium grantów oraz doktoratów pod Jego kierunkiem i opieką.

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej analizę osiągnięć naukowo-badawczych, dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej doktora Artura T. Krzyżaka, a także Jego omówione wcześniej osiągnięcia stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej stwierdzam, że wypełniają one znakomicie wymagania ustawowe na stopień doktora habilitowanego.

