

## **Recenzja osiągnięć naukowych i istotnych elementów aktywności naukowej dra Pawła Krukowskiego w sprawie postępowania habilitacyjnego**

Niniejszą recenzję wykonałem na zlecenie Rady Doskonałości Naukowej (decyzja nr DRKN.Z6.400.339.2023 z dnia 3 stycznia 2024 r.) przekazane przez prof. Ilonę Zasadę, Przewodniczącą Komisji Uniwersytetu Łódzkiego ds. stopni naukowych w dyscyplinie nauki fizyczne (pismo z dnia 15 stycznia 2024 r.) w sprawie postępowania habilitacyjnego dra Pawła Krukowskiego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne. Recenzję wykonano na podstawie dokumentacji dostarczonej w formie elektronicznej:

1. Wniosku Kandydata z dnia 30 września 2023 r.
2. Poświadczonych kopii dyplomu uzyskania przez Kandydata stopnia naukowego doktora nauk fizycznych.
3. Autoreferatów w języku polskim i języku angielskim.
4. Wykazu osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład Kandydata w rozwój określonej dyscypliny, w języku polskim i języku angielskim.
5. Kopii 6 publikacji wchodzących w skład zgłoszonego przez Kandydata osiągnięcia naukowego.
6. Oświadczeń współautorów publikacji osiągnięcia naukowego określających ich udział w powstanie pracy.
7. Kopie dodatkowych dokumentów potwierdzających zatrudnienia Kandydata oraz kierowanie projektami badawczymi.
8. Analiza bibliometryczna dorobku naukowego i oświadczenie RODO.

### **Przebieg pracy naukowej**

Studia magisterskie i doktorskie oraz dotychczasowa działalność naukowa w kraju dra Pawła Krukowskiego związana jest z Wydziałem Fizyki i Informatyki Stosowanej (wcześniej Wydziałem Fizyki i Chemii) Uniwersytetu Łódzkiego. W 2004 r. Kandydat ukończył tam studia magisterskie uzyskując stopień magistra fizyki w zakresie fizyki doświadczalnej. Rozprawę doktorską pt. „Badania warstw molekularnych organicznych zawierających stabilne wolne rodniki osadzonych na podłożu Au(111) i HOPG (0001)” obronił w 2009 r. uzyskując stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki. Zarówno prace magisterską, jak i dysertację doktorską wykonał pod kierunkiem dra hab. Wielisława Olejniczaka. Dr Krukowski, po kilkumiesięcznym okresie

pracy jako nauczyciel fizyki w Liceum Ogólnokształcącym w Łodzi, rozpoczął w 2010 roku długi okres, bo blisko sześćoletni, działalności naukowej w Japonii. Najpierw Kandydat odbył dwuletni staż podoktorski w Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo w grupie prof. Fumio Komori, finansowany w ramach prestiżowego stypendium Japońskiego Towarzystwa Promocji Nauki. Następnie przez okres blisko trzech lat był zatrudniony na stanowisku badawczym, Specially Appointed Researcher, w Department of Precision Science and Technology, Osaka University w grupie kierowanej przez prof. Yuji Kuwaharę. W grudniu 2016 r. powrócił do macierzystej uczelni Uniwersytetu w Łodzi, gdzie pracuje do dnia dzisiejszego w Katedrze Fizyki Ciała Stałego Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej. Po kilkumiesięcznym okresie pracy jako fizyk w grupie pracowników naukowo-technicznych od 2017 roku jest zatrudniony na stanowisku adiunkta.

### **Dorobek naukowy, dydaktyczny i organizacyjny**

Główne zainteresowania badawcze dra Krukowskiego dotyczą formowania się cząsteczkowych warstw adsorpcyjnych, w większości organicznych, na powierzchniach metalicznych, w szczególności procesu samoorganizacji cząsteczek i właściwości fizykochemicznych warstw. Tematyki dotychczas podejmowanych przez Kandydata badań są różne i obejmują, np. proces samoorganizacji: cząsteczek zawierających rodniki TEMPO, BDPA, pochodnych kwasu stearynowego na powierzchni Au(111) i HOPG, wysp CrN na Cu(001), chiralnych pochodnych perylenu oraz pochodnych helicyny na powierzchniach różnych metali Au(111), Ag(111), Cu(001) oraz NiAl(110). Interesującą część badań stanowią również warstwy tlenków metali przejściowych na powierzchni grafenu formowane pod kątem zmiany i optymalizacji pracy wyjścia otrzymanej powierzchni oraz warstwy buforowe mające na celu odizolowanie zaadsorbowanych cząsteczek organicznych od metalicznego podłoża Au(111) oraz NiAl(110). Kandydat badania wykonuje na poziomie molekularnym stosując wysokorozdzielcze metody mikroskopii bliskich oddziaływań wsparte metodami komplementarnymi, takimi jak: spektroskopia fotoelektronów (XPS, UPS), spektroskopia Ramana wzmocniona powierzchnią oraz lokalnie sondą mikroskopu (odpowiednio SERS i TERS), dyfrakcja niskoenergetycznych elektronów (LEED) oraz obliczenia DFT. Po zapoznaniu się z dorobkiem naukowym dra Krukowskiego chciałbym podkreślić wyraźnie obserwowany rozwój naukowy i badawczy Kandydata, ewoluujący od badań mikroskopowych STM w powietrzu i cieczy, następnie w warunkach ultra wysokiej próżni i temperatur kriogenicznych, do badań w tych warunkach przy użyciu sprzężonych metod STM z pomiarem emisji światła (STM-LE) oraz ze spektroskopią Ramana (TERS-STM).

Zgodnie z załączoną dokumentacją, stan z bazy Web of Science z dnia 18 sierpnia 2023 r., dr Krukowski opublikował 30 prac w czasopiśmie z tzw. "listy filadelfijskiej". Prace te były cytowane 241 razy (200 razy z wyłączeniem autocytowań), co daje wartość współczynnika Hirscha 9. Ponadto jest współautorem dwóch zgłoszeń patentowych. Warto podkreślić w

aspekcie spełnienia warunku istotnej aktywności naukowej Kandydata w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, iż w dużej części publikacji dr Krukowski jest współautorem wspólnie z przełożonymi w trakcie działalności w ośrodkach japońskich: prof. Yujiem Kuwaharą z Uniwersytetu w Osace (10 artykułów) oraz prof. Fumio Komori z Uniwersytetu w Tokyo (2 artykuły). Analizując dane bibliometryczne należy zwrócić uwagę, iż dorobek naukowy Kandydata znacznie powiększył się po uzyskaniu stopnia doktora (2009 r.). Wcześniej był współautorem 6, a więc 4-krotnie mniejszej liczby publikacji niż po doktoracie. Kolejna uwaga dotyczy liczby cytowań publikacji. Zestawienie roczne liczby publikacji wskazuje, iż blisko połowa wymienionego dorobku publikacyjnego Kandydata, dokładnie 13 artykułów, zostało wydanych stosunkowo niedawno w okresie ostatnich pełnych czterech lat (w 2000 r. i później). Są to więc artykuły stosunkowo nowe. Jest więc uzasadnione wnioskowanie, iż roczna liczba cytowań publikacji Kandydata powinna istotnie wzrastać w najbliższych latach. Tak zresztą się dzieje i w ostatnich dwóch pełnych latach jest ona na stosunkowo dobrym poziomie ok. 50 cytowań rocznie. W opinii recenzenta jest to jeden z argumentów potwierdzających zarówno aktualność podejmowanych przez Kandydata tematów badawczych, jak i znaczącą wartość naukową realizowanych badań. Dr Krukowski wygłosił dotychczas 10 wykładów, w tym 4 na zaproszenie, oraz osobiście prezentował 18 plakatów na konferencjach krajowych i zagranicznych. Ponadto jest współautorem 73 doniesień konferencyjnych prezentowanych przez innych współautorów. Aktualnie jest kierownikiem jednego realizowanego projektu badawczego NCN (Sonata Bis) oraz wykonawcą w dwóch innych projektach badawczych NCN (Opus). W przypadku projektów już zakończonych kierował jednym projektem NCN (Opus) oraz był wykonawcą w czterech projektach finansowanych przez następujące instytucje: MNiSW, NCN, NCBiR oraz Japońskie Towarzystwo Promocji Nauki.

Kandydat jest aktualnie pracownikiem znaczącej jednostki akademickiej jakim jest Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego. Na podkreślenie zasługuje zaangażowanie dra Krukowskiego w działalność akademicką w tym dydaktykę. Omawiając osiągnięcia dydaktyczne należy rozpocząć od działalności Kandydata na Uniwersytecie w Osace. Poza pracą badawczą był opiekunem laboratoryjnym 6 studentów wykonujących prace licencjackie, magisterskie lub doktorskie. Ponadto, w macierzystej uczelni Uniwersytecie Łódzkim prowadził ćwiczenia informatyczne dla studentów na kierunku Informatyka z 3 przedmiotów: Administrowanie systemami, Sieci komputerowe oraz Sterowanie komputerowe i robotyka. Był promotorem dwóch prac magisterskich na kierunku Informatyka (Marcela Tomczaka oraz Pauliny Tomaszewskiej) oraz jednej pracy licencjackiej na kierunku Fizyka (Patryka Krępińskiego). Aktualnie jest promotorem jednej pracy magisterskiej na kierunku Informatyka (Marcina Skawińskiego) oraz promotorem pomocniczym jednej pracy doktorskiej z fizyki (Michała Piskorskiego, promotor: dr hab. Witold Kozłowski). Kandydat jest również zaangażowany w opiekę naukową polskich i zagranicznych studentów i doktorantów zewnętrznych odbywających staże naukowe w Katedrze Fizyki Ciała Stałego Uniwersytetu Łódzkiego.

W zakresie działalności organizacyjnej dra Krukowskiego należy wymienić funkcję Koordynatora Wydziału ds. rekrutacji kandydatów z zagranicy, a od 2022 r. udział w Radzie Wydziału jako przedstawiciel nauczycieli akademickich bez stopnia profesora bądź doktora habilitowanego. Wielokrotnie brał udział w przygotowywaniu wniosków o przyznanie środków finansowych dla Wydziału. Był zastępcą przewodniczącego komitetu organizacyjnego dużej, prestiżowej konferencji międzynarodowej European Conference on Surface Science, oraz członkiem komitetu organizacyjnego konferencji krajowej. W 2022 r. był współautorem specyfikacji technicznej na dostawę dla Wydziału zestawu UHV z mikroskopem STM pracującym w temperaturach helowych. Dodatkowo powierzono Kandydatowi odpowiedzialność za przygotowanie odpowiedniego pomieszczenia z instalacją antywibracyjnej płyty fundamentowej. Kolejnym przykładem jest uzyskanie w ramach darowizny przez Wydział w 2017 r. zestawu UHV wyposażonego w STM, LEED oraz kwadrupolowy spektrometr masowy. Powyższa darowizna pochodziła od prof. Yujia Kuwahary z Uniwersytetu w Osace, byłego przełożonego dra Krukowskiego, z którym współpracuje do dnia dzisiejszego. Należy podkreślić, iż oba ostatnie przykłady działalności organizacyjnej wynikają i równocześnie potwierdzają uznanie doświadczenia badawczego i poziomu naukowego dra Krukowskiego. O tym uznaniu świadczy również udział Kandydata w zespołach eksperckich: programu regionalnego Fundusze Europejskie dla Łodzi, konkursie na doktoranckie granty badawcze w Uniwersytecie Łódzkim, oraz jako recenzent prac naukowych w renomowanych czasopismach Królewskiego Towarzystwa Chemicznego (RSC) oraz Amerykańskiego Towarzystwa Chemicznego (ACS). Podsumowując ocenę całościowego dorobku naukowego należy stwierdzić, iż dr Krukowski spełnia podstawowe wymagania warunkujące uzyskanie stopnia doktora habilitowanego jakim są: posiadanie stopnia doktora oraz wykazanie istotnej działalności naukowej, organizacyjnej i dydaktycznej. W świetle przytoczonych faktów oczywistym jest również spełnienie wymagania istotnej działalności naukowej w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej.

### **Ocena osiągnięć naukowych stanowiących podstawę wniosku**

Na wstępie oceny tej części wniosku muszę zwrócić uwagę i wyjaśnić pewną rozbieżność w określeniu zgłoszonych przez Kandydata osiągnięć naukowych w różnych dokumentach wniosku. Zarówno we *Wniosku przewodnim* jak i *Wykazie osiągnięć naukowych* osiągnięcie stanowi cykl publikacji wspólnie zatytułowany „Chiralne molekuly na podłożach metalicznych: badania w nanoskali”. W *Autoreferacie* natomiast poza tą częścią badań Kandydat rozszerzył wykaz osiągnięć o dwie dodatkowe tematyki badań dotyczące: modyfikacji pracy wyjścia grafenu za pomocą tlenków metali przejściowych oraz wytwarzania i charakteryzacji samoorganizujących się wysp CrN na powierzchni Cu(001). W swojej ocenie zgłoszonego osiągnięcia będącego podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego biorę pod uwagę jedynie pierwsze z wymienionych, to jest spójny tematycznie cykl 6 publikacji zatytułowany „Chiralne molekuly na

podłożach metalicznych: badania w nanoskali”. Pozostałe dwa dodatkowe osiągnięcia traktuję jedynie jako potwierdzenie udziału Kandydata w pracach badawczych o innej tematyce o istotnym znaczeniu dla dyscypliny. Jestem przekonany, że taka była intencja Kandydata, co potwierdza zbiór dołączonych do wniosku oświadczeń współautorów, które dotyczą jedynie publikacji z pierwszego z wymienionych osiągnięć.

Dr Krukowski w swoim Autoreferacie uzasadnił spójność tematyczną publikacji ze zgłoszonego cyklu i opisał zakres podjętych w nich badań. Tematem scalającym publikacje była preparatyka cienkich warstw wybranych cząsteczek o właściwościach chiralnych na podłożach metalicznych i lokalne badanie właściwości cząsteczek w warstwie w rozdzielczości nanometrycznej. Przedmiotem badań w większości publikacji były 4 różne pochodne heteroheliceny, w przypadku jednej publikacji była to inna chiralna cząsteczka zawierająca dwie pochodne perylenu PTCDI. Wszystkie badane cząsteczki charakteryzowała chiralność osiowa wynikająca z helikalnie skręconej struktury. Dominującą metodą badawczą stosowaną przez Kandydata była mikroskopia tunelowa w warunkach temperatur kriogenicznych. Dużym atutem i nowością były sprzężone pomiary STM-LE umożliwiające jednoczesny pomiar topologii powierzchni i emisji światła indukowanego w złączu tunelowym, oraz TERS-STM (sprzężona spektroskopia Ramana wzmocniona lokalnie ostrzem mikroskopu) dająca możliwość chemicznej identyfikacji poprzez rejestrację modów wibracyjnych zaadsorbowanej cząsteczki. Kandydat stosował również komplementarne techniki badawcze, jak: XPS, SERS, dodatkowo wsparte obliczeniami DFT.

Wszystkie artykuły osiągnięcia naukowego zostały opublikowane w okresie 2015-2022 w uznanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym (cztery publikacje w J.Phys.Chem.C, i po jednej w Appl.Surf.Sci. oraz Int.J.Mol.Sci.). Lata publikacji artykułów świadczą, iż prace powstały po uzyskaniu stopnia doktora w okresie zarówno działalności Kandydata na Uniwersytecie w Osace w grupie prof. Yujiego Kuwahary, jak również działalności na Uniwersytecie Łódzkim, w ramach kontynuowanej współpracy naukowej. Sumaryczny współczynnik oddziaływania czasopism powyższych artykułów wynosi 30,0, co daje średnią wartość 5 na jedną pracę. Pomimo stosunkowo krótkiego okresu od publikacji znaczącej części prac z cyklu były one cytowane już 49 razy (zgodnie z danymi z Autoreferatu wg bazy Web of Science z dnia 18 sierpnia 2023 r.). Jak już napisałem artykuły ocenianego cyklu są opublikowane w uznanych czasopismach naukowych, były więc przedmiotem oceny recenzentów, specjalistów w dziedzinie o renomie międzynarodowej. Pozostaje mi zgodzić się z wnioskami recenzentów co do znaczącej wartości naukowej wyników prezentowanych przez Kandydata i innych współautorów, potwierdzonej decyzjami o ich publikacji. Ograniczę się do szczegółowszego wymienienia ważniejszych osiągnięć naukowych zawartych w ocenianych pracach.

Pierwsza publikacja z cyklu [H1] dotyczy samoorganizacji dwóch pochodnych heteroheliceny na powierzchni Ag(111) różniących się liczbą pierścieni aromatycznych w cząsteczce ([5]TH oraz [7]TH). W przypadku obu pochodnych przedmiotem badań była samoorganizacja cząsteczek mieszaniny racemicznej zawierającej oba enancjomery. Obserwacje mikroskopowe w

rozdzielczości cząsteczkowej umożliwiły precyzyjny opis ewolucji uporządkowania tych cząsteczek w funkcji pokrycia, w zakresie do pełnej monowarstwy. Warto podkreślić, iż były to struktury racemiczne charakteryzujące się naprzemienną lokalizacją różnych enancjomerów w warstwie. Ważnym wnioskiem z tych badań było pokazanie silnego wpływu wielkości cząsteczki (liczonej liczbą pierścieni aromatycznych) na organizację supramolekularną. Warty podkreślenia są również pomiary spektroskopowe SERS zaadsorbowanych cząsteczek. Badania te wykonano porównawczo na dwóch różnych podłożach: metodą klasyczną na chropowatej powierzchni srebra, oraz lokalnie na przygotowanej rysie na atomowo gładkiej powierzchni Ag(111). Wyniki doświadczalne były zgodne z obliczeniami DFT modów wibracyjnych cząsteczek potwierdzając ich identyfikację.

W kolejnych dwóch publikacjach z cyklu [H2, H3] przedmiotem badań były mieszanina racemiczna pochodnej heteroheliceny funkcjonalizowanej grupami aldehydowymi ([7]TH-dial). Badania porównawcze z zastosowaniem trzech różnych podłoży Au(111), Cu(001) oraz NiAl(110) pokazały silny wpływ podłoża zarówno na organizację supramolekularną tej cząsteczki, jak również na emisję światła z cząsteczki w warstwie lokalnie indukowaną sondą STM [H2]. Ponadto, rozszerzenie pomiarów o metodę TERS-STM umożliwiło rejestrację dodatkowego modu wibracyjnego zaadsorbowanych cząsteczek, nie występującego w obliczeniach DFT cząsteczki w fazie gazowej. Ta interesująca obserwacja wskazuje na obecność potrójnego wiązania pomiędzy atomami węgla i jest tłumaczona odwodornieniem pierścienia benzenowego zaadsorbowanej cząsteczki wywołanym wpływem pomiaru TERS-STM [H3]. Ta obserwacja i jej dyskusja jest zdaniem recenzenta jednym z najważniejszych osiągnięć w ocenianym cyklu publikacji.

Przedmiotem badań w dwóch kolejnych publikacjach [H4, H5] jest czysty (lewoskrętny) enancjomer pochodnej heteroheliceny funkcjonalizowanej grupami hydroksylowymi ((M)-[7]TH-diol). Istotnym osiągnięciem jest obserwacja wpływu pokrycia i temperatury na właściwości supramolekularne tej cząsteczki na powierzchni Au(111). Autorom udało się w konsekwencji optymalizacji warunków preparatyki warstwy uzyskać relatywnie duże obszary jednorodnie uporządkowanych cząsteczek. Na podkreślenie zasługuje również zastosowanie spektroskopii tunelowej do lokalnego pomiaru przerwy energetycznej w wybranym miejscu warstwy (lub wybranej cząsteczce) [H4]. Powyższe zastosowanie daje możliwość precyzyjnej analizy wpływu miejsca adsorpcji lub otoczenia na przerwę energetyczną badanego półprzewodnika. W drugiej pracy badania rozszerzono na pomiar emisji światła. Interesujące badania porównawcze wykazały wpływ warstwy buforowej (fuleren C<sub>60</sub>) na emisję światła badanego enancjomeru na podłożu Au(111) [H5].

W ostatniej publikacji z cyklu [H6] przedmiotem badań była chiralna cząsteczka innego typu zawierająca dwie pochodne perylenu PTCDI. Ważnym osiągnięciem jest uzyskanie i opisanie warstw o jednorodnym uporządkowaniu tak dużych i rozbudowanych cząsteczek na powierzchni Au(111). Ponadto badania porównawcze z zastosowaniem dwóch różnych podłoży Au(111) oraz

NiAl(110) wykazały istotny wpływ podłoża zarówno na stopień uporządkowania, jak i na emisję światła z tej cząsteczki w warstwie.

Istotnym końcowym punktem recenzji jest ocena udziału Kandydata w realizacji badań i opracowaniu wyników opublikowanych w cyklu prac przedstawionych do habilitacji. Wszystkie powyższe publikacje są wieloautorskie. W tym miejscu należy jednak podkreślić, iż dr Krukowski jest w czterech z nich pierwszym autorem i autorem wiodącym „corresponding author”. Nie budzi więc wątpliwości dominujący udział Kandydata w powstaniu tych publikacji, co potwierdzają również deklarowane udziały współautorów. W dwóch kolejnych pracach jest trzecim i drugim autorem. Swoją udział deklaruje odpowiednio jako bardzo duży i wiodący uwzględniający zarówno przygotowanie koncepcji badań, przeprowadzenie i dyskusję pomiarów, jak i prace nad manuskryptem. Z załączonego opisu wynika że prace powstały na Uniwersytecie w Japonii, w części we współpracy z doktorantem, którego był opiekunem uczącym pracy eksperymentalnej. Ze szczegółowych oświadczeń wszystkich współautorów należy wnioskować, iż dr Krukowski był rzeczywiście w tych pracach autorem koncepcji i realizacji badań jedynie w części wykonującym pomiary.

#### **Wniosek końcowy**

Na podstawie przeprowadzonej oceny należy stwierdzić, iż dotychczasowa aktywność naukowa, dydaktyczna i organizacyjna, jak również zgłoszone osiągnięcia naukowe dra Pawła Krukowskiego spełniają wymagania stawiane osobom ubiegającym się o nadanie stopnia doktora habilitowanego określone w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.). W związku z powyższym rekomenduję nadanie dr. Pawłowi Krukowskiemu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.



Warszawa, dn. 31 marca 2024 r.