

prof. dr hab. Karol Szałowski

Katedra Fizyki Ciała Stałego

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Uniwersytet Łódzki

Łódź, dn. 08.08.2025 r.

Recenzja pracy doktorskiej

Pana MSc Tanmaya Thakura

pod tytułem *Electron States Confined in Electrostatic Quantum Dots Defined within Phosphorene*

przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Bartłomieja Szafrana

Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (pismo WFilS-b.510-30/266/24).

Podstawa prawna: art. 187 ustawy z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce¹.

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

1. Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie nauki fizyczne;
2. Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
3. Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

¹ t.j. Dz. U. z 2024 r., poz. 1571 ze zm.

Charakterystyka i opis rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska powstała na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Całość rozprawy napisana jest w języku angielskim; rozprawę zaopatrzono w wymagane streszczenie w języku polskim i angielskim. Składa się na nią 5 artykułów (numerowanych dalej w recenzji jako [I]–[V]), opublikowanych w latach 2022–2024 w czasopismach z listy Journal Citation Reports (znajdujących się również w wykazie, o którym mowa w art. 186 ust. 1 ustawy z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – por. komunikat Ministra Edukacji i Nauki z dnia 5 stycznia 2024 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych). Rozprawa przyjmuje zatem formę zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, czym spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 3 i 4 ustawy z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

We wszystkich pracach Kandydat jest pierwszym autorem; w 4 publikacjach drugim współautorem jest Promotor rozprawy, a w 1 współautorem jest również François Peeters z Uniwersytetu w Antwerpii. Dwie spośród publikacji Doktorant opublikował w prestiżowym czasopiśmie *Physical Review B* (o Impact Factorze równym 3,7 za rok 2024), o uznanej i wysokiej renomie w społeczności fizyków materii skondensowanej (95 centyl w fizyce materii skondensowanej wg. bazy *Scopus*). Pozostałe trzy publikacje ukazały się w wielodyscyplinowym czasopiśmie o otwartym dostępie *Scientific Reports* (IF równy 3,9 za 2024 r.), sytuującym się w 89 centylu wśród takich czasopism i często wybieranym do komunikowania wyników z obszaru nauk fizycznych. Warto wspomnieć również o umieszczeniu preprintów prac opublikowanych później w *Physical Review B* na serwerze *arXiv*. Całość zatem dorobku składającego się na rozprawę doktorską została udostępniona w ramach otwartego dostępu. Oceniam wybór czasopism jako trafny i dobrze służący upowszechnianiu uzyskanych wyników, odpowiadający ich jakości i w pełni odpowiedni z punktu widzenia podjętej tematyki.

Przedmiotem rozważań teoretycznych stanowiących temat rozprawy uczynił Autor kropki kwantowe zbudowane na bazie fosforenu – dwuwymiarowego materiału o strukturze czarnego fosforu, zdefiniowane elektrostatycznie przez zadany potencjał uwięzienia. Właściwości fosforenu wykazują silną anizotropię w płaszczyźnie, która to anizotropia stanowi kluczowy aspekt rozważań w rozprawie i najważniejszy czynnik kształtujący fizykę analizowanych układów. Na poziomie struktury elektronowej anizotropia dotyczy masy efektywnej elektronów w paśmie przewodnictwa, która jest znacznie większa w kierunku *zigzag* niż w kierunku *armchair*.

Przedstawiony jako rozprawa cykl publikacji został poprzedzony przez Autora dość obszernym i dobrze skonstruowanym wstępem, co czyni całość dzieła spójnym i zdecydowanie ułatwia lekturę oraz rozumienie rozważań przedstawianych w poszczególnych publikacjach.

Wstęp sytuuje fosforen wśród innych materiałów dwuwymiarowych, podkreślając m. in. jego wysoką stabilność. Autor wyjaśnia dalej strukturę fosforenu (tu przydałoby się uzupełnienie Rys. 1 o schemat komórki elementarnej, tak aby ułatwić zrozumienie geometrii) oraz szczegółowo

i obszernie przedstawia jego właściwości fizyczne (w tym te mające bezpośrednie znaczenie dla zastosowań), dokonując wartościowego porównania z grafenem oraz heksagonalnym azotkiem boru. Interesujący jest przegląd i dyskusja wpływu anizotropii na owe właściwości i na potencjał aplikacyjny wybranego do rozważań materiału. Wstęp kończy przedstawienie motywacji rozprawy doktorskiej – zawiera ono kompetentną dyskusję zalet kropek kwantowych zdefiniowanych elektrostatycznie w stosunku do układów nanokrystalicznych oraz wymienia zjawiska fizyczne warte analizy w kropkach opartych na fosforenie, jak oscylacje Aharonowa-Bohma, krystalizacja Wignera (zwłaszcza tworzenie molekuł Wignera) czy ferromagnetyzm Nagaoki, stanowiące temat poszczególnych publikacji tworzących cykl. Uważam, że część ta jest dobrze napisana i przekonująca.

Kolejny rozdział Autor poświęcił dyskusji zjawiska uwięzienia kwantowego jako kluczowego efektu z punktu widzenia tematu rozprawy. W szczególności, Autor omawia eksperymentalne aspekty układów z uwięzieniem kwantowym oraz dokonuje przeglądu rodzajów układów wykazujących takie uwięzienie. Rozdział zawiera prezentację kropek kwantowych, uwzględniając możliwości metod eksperymentalnych służących charakteryzacji ich stanów elektronowych. Omówione zostają także zjawiska fizyczne charakterystyczne dla kropek kwantowych. W pierwszej kolejności przedstawiona zostaje krystalizacja Wignera (tu: tworzenie molekuł Wignera). Dalej Autor wprowadza całkowity i ułamkowy kwantowy efekt Halla omawiając jego specyfikę w kontekście stanu molekuły Wignera w silnym polu magnetycznym w kropkach kwantowych. Kolejno zaprezentowane zostają pierścienie kwantowe i wielokrotne kropki kwantowe oraz możliwy w nich ferromagnetyzm Nagaoki, a finalnie manipulacja spinem elektronu przy wykorzystaniu zmiennego w czasie pola elektrycznego.

Ogólnie rozdział ten oceniam jak bardzo dobrze napisany i szczególnie wartościowy. Autor obszernie wykorzystuje literaturę, aby osadzić swoje rozważania w kontekście znanych wyników oraz dyskutuje dogłębnie i wyczerpująco rozmaite aspekty rozważanych zjawisk. Podoba mi się również szerokie odnoszenie się do wyników eksperymentalnych, ilustrowanie rozważań przykładowymi realizacjami badanych układów oraz świadomość ograniczeń i wyzwań spotykanych w eksperymencie. Dobrze to świadczy o dojrzałości spojrzenia.

Następny rozdział rozprawy poświęcony jest modelom teoretycznym właściwości elektronowych badanych obiektów oraz sposobom ich rozwiązywania. Autor używa bądź modelu ciasnego wiązania (w przestrzeni rzeczywistej) bądź też modelu opartego na przybliżeniu masy efektywnej dla pasma przewodnictwa. Tu można wspomnieć o pracy Promotora: B. Szafran, *Physical Review B* **101** (2020) 235313; [DOI:10.1103/PhysRevB.101.235313](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.235313), w której zademonstrowano zgodność wyników uzyskanych w ramach obu podejść zachodzącą z wyjątkiem sytuacji szczególnie silnego potencjału uwięzienia. Dalej omówiona zostaje metoda oddziaływania konfiguracji, stanowiąca sposób numerycznie dokładnego rozwiązywania modeli dla przypadków wieloelektronowych. Ostatni podrozdział dedykowany jest podejściu do rozwiązywania równania Schrödingera zawierającego czas. Uważam, że rozdział ten jest zwięzły, ale w zasadniczej części wystarczająco obszernie przedstawia zastosowane modele i metody ich rozwiązywania.

Rozdział czwarty tworzą skrótowe, ale bardzo przydatne charakterystyki poszczególnych publikacji [I]–[V] składających się na rozprawę, zawierające wyjaśnienie podejmowanych problemów badawczych i podsumowanie uzyskanych wyników.

Pierwsza spośród prac tworzących rozprawę [I], ujęta w niej w całości jako rozdział 5 [T. Thakur, B. Szafran, *Aharonov-Bohm oscillations in phosphorene quantum rings: Mass anisotropy compensation by confinement potential*, *Physical Review B* **105** (2022) 165309], dotyczy badania zjawiska Aharonowa-Bohma w pierścieniach kwantowych o rozmiarach kilkudziesięciu nm opartych na fosforenie, zdefiniowanych przez potencjał uwięzienia, którego linie ekwipotencjalne mają kształt eliptyczny. Taka definicja pozwalała analizować współgranie anizotropii struktury elektronowej fosforenu w płaszczyźnie oraz anizotropii potencjału uwięzienia. W obliczeniach używany był zarówno model ciasnego wiązania, jak i przybliżenie masy efektywnej; zwraca uwagę staranna dyskusja zależności energii od promienia obciążenia dla tego drugiego przypadku. Dla kolistego i eliptycznego potencjału uwięzienia porównano wartości energii własnych w funkcji pola magnetycznego uzyskane w ramach obu przybliżeń, stwierdzając w dominującej części przypadków ich znakomitą zgodność. W badanym układzie anizotropia masy efektywnej powoduje, że gęstość ładunku dla stanu podstawowego w kolistym potencjale uwięzienia jest zlokalizowana w rozłącznych obszarach, co uniemożliwia obserwację prądu trwałego. Użycie geometrii eliptycznej przywraca taką możliwość, powodując delokalizację elektronów; w szczególności potencjał eliptyczny o stosunku półosi równym stosunkowi mas efektywnych prowadzi do jednorodnego rozkładu gęstości ładunku w stanie podstawowym; opis układu odpowiada wtedy opisowi układu o symetrii radialnej. Autor przeanalizował zależność energii stanów jednoelektronowych od pola magnetycznego i warunki zachodzenia oscylacji Aharonowa-Bohma. Przeskalowanie współrzędnych doprowadziło do zdefiniowania obserwowalnej komutującej z hamiltonianem – uogólnionego momentu pędu. Ponadto stwierdzono, że dla silnego uwięzienia opis układu jest pseudojednowymiarowy i istnieje wyrażenie analityczne na poziomy energetyczne. Autor przeprowadził również analizę stanów dwuelektronowych (bazując na wyznacznikach Slatera w ramach ograniczonej metody oddziaływania konfiguracji). Uzyskane wyniki Autor obszernie odnosi do rezultatów znanych w literaturze oraz nawiązuje do możliwości eksperymentalnych.

Następna z prac [II], stanowiąca rozdział szósty rozprawy [T. Thakur, B. Szafran, *Wigner molecules in phosphorene quantum dots*, *Physical Review B* **106** (2022) 205304], poświęcona jest zagadnieniu formowania się molekuł Wignera – stanów wykazujących przestrzenną separację ładunku dla każdego z elektronów w ramach stanu wieloelektronowego w kropce kwantowej, wynikającą z kulombowskiego odpychania elektronów (analog krystalizacji Wignera w układach o nieskończonej rozciągłości przestrzennej). Znaczący czynnik wpływający na pojawianie się stanów molekuły Wignera stanowi silna anizotropia masy efektywnej w fosforenie. Metodologia obliczeń stanów kilkuelektronowych dla badanego układu była tu oparta o przybliżenie masy efektywnej oraz metodę oddziaływania konfiguracji. Wybór potencjału uwięzienia nawiązuje do starannie dobranej geometrii eksperymentalnej. Autor poświęca znaczącą uwagę zagadnieniom związanym z optymalizacją procedur obliczeniowych – doбором bazy oraz parametrów gwarantujących jak

najmniejsze zużycie zasobów przy odpowiednio szybkiej zbieżności, przekonująco i obszernie ilustrując etapy tej procedury. Do badanych wielkości fizycznych należała gęstość ładunku oraz funkcja korelacji dla gęstości ładunku (z ustalonym położeniem jednego z elektronów); przebadano także widmo energii, jako że jego postać i czułość na przyłożone pole magnetyczne są powiązane z formowaniem stanów molekuly Wignera. W badanym potencjale uwięzienia o symetrii radialnej, stany molekuly Wignera pojawiają się dla 2 i 4 elektronów, nie znaleziono ich natomiast dla 3 elektronów (przypadek 5 nośników ładunku jest ciekawy i mniej jednoznaczny). Przedmiot dalszych rozważań stanowiły kropki o wydłużonym kształcie potencjału uwięzienia, dla których wykazano nierównoważne zachowanie wzdłuż kierunków *zigzag* i *armchair*; ten pierwszy kierunek faworyzuje formowanie stanów molekuly Wignera. Autor odnosi się do obserwowalności dyskutowanych stanów w eksperymencie w oparciu o metody spektroskopii transportu nośników ładunku.

Kolejna praca [III]: T. Thakur, B. Szafran, *Vortex structure in Wigner molecules*, *Scientific Reports* **13** (2023) 9707 (siódmy rozdział rozprawy), podnosi problem współgrania wpływu pola magnetycznego i korelacji kulombowskich w fosforenowych kropkach kwantowych, co pozwala na zbadanie stanów realizujących kwantowy ułamkowy efekt Halla, w których pojawiają się klastery wirów. Formalizm obliczeniowy oparty był, jak w pracy [II], na przybliżeniu masy efektywnej i ograniczonej metodzie oddziaływania konfiguracji dla stanów trójelektronowych w potencjale uwięzienia o kształcie eliptycznym. Porównawczo w stosunku do przypadku fosforenu przebadany został przypadek o izotropowej masie efektywnej. Zbadano przypadek trzech elektronów w układzie (minimalna liczba dla której pojawia się stan molekuly Wignera). Przedmiotem zainteresowania stały się miejsca zerowe funkcji falowej dla badanego układu (w otoczeniu których wirowe zachowanie wykazuje faza funkcji falowej); należy podkreślić, że taka analiza postawiła przed Doktorantem szczególne wymagania dotyczące dokładności obliczeń. Określono fizyczne konsekwencje anizotropii potencjału uwięzienia powodujące różnice w zachowaniu wirów dla osi molekuly Wignera zorientowanej w kierunku *zigzag* i *armchair*. Z obowiązku recenzenta zwracam uwagę, że w przypadku tej pracy głównemu tekstowi artykułu towarzyszą materiały dodatkowe (Supplementary materials), które nie zostały niestety reprodukowane w samej rozprawie.

Czwarta z prac [IV]: T. Thakur, B. Szafran, *Nagaoka ferromagnetism in an array of phosphorene quantum dots*, *Scientific Reports* **13** (2023) 18796 (ósmo rozdział rozprawy), dotyczy układu sprzężonych fosforenowych kropek kwantowych i możliwego w takim układzie ferromagnetyzmu Nagaoki. Model teoretyczny zakłada prostokątny układ 4 kropek kwantowych z gaussowskim potencjałem uwięzienia, modelowanych w przybliżeniu masy efektywnej, rozwiązywanym w ramach ograniczonej metody oddziaływania konfiguracji dla stanów trójelektronowych. Autor zoptymalizował geometrię układu aby zmaksymalizować przerwę energetyczną pomiędzy stanem o niskim i wysokim spinie, co odpowiada znalezieniu geometrii sprzyjającej obserwacji doświadczalnej ferromagnetyzmu Nagaoki. Warto nadmienić, że przewidywana największa wartość przerwy sięga ponad 200 μeV , podczas gdy w pracy eksperymentalnej J. P. Dehollain i in., *Nature* **579** (2020) 528 [DOI:10.1038/s41586-020-2051-0](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2051-0)

dotyczącej obserwacji ferromagnetyzmu Nagaoki w kropkach GaAs/AlGaAs była ona rzędu jedynie kilku μeV . Przedmiotem badań Autora stały się także efekty związane z odchyleniem geometrii matrycy kropek kwantowych od kształtu prostokątnego oraz nieidentycznością potencjału kropek, co pozwoliło określić wpływ niedoskonałości układu na obserwowalność zjawiska. Takie podejście jest szczególnie wartościowe z punktu widzenia planowania potencjalnego eksperymentu.

W ostatniej z prac [V]: T. Thakur, F. M. Peeters, B. Szafran, *Electrical manipulation of the spins in phosphorene double quantum dots*, *Scientific Reports* **14** (2024) 18966 (dziewiąty rozdział rozprawy), Doktorant dyskutuje układ podwójnej kropki kwantowej i możliwość sterowania jego spinem przez przyłożenie zmiennego pola elektrycznego w ramach mechanizmu fizycznego rezonansu spinowego w polu elektrycznym. Rozważany układ zdefiniowany jest przez gaussowski potencjał uwięzienia, a modelowy hamiltonian w przybliżeniu masy efektywnej uzupełniono członem wprowadzającym sprzężenie spin-orbita typu Rashby oraz polem elektrycznym sinusoidalnie zmiennym w czasie. Hamiltonian ten jest rozwiązywany dla stanów dwuelektronowych przy wykorzystaniu ograniczonej metody oddziaływania konfiguracji, dodatkowo uwzględniano ewolucję czasową stanów. Wykazano znaczący wpływ asymetrii potencjału uwięzienia (t.j. różnicy jego wartości dla obu kropek) na zachodzenie przejścia między stanem singletowym a trypletowym; najkorzystniejsze warunki zachodzą, gdy asymetria lokalizuje pierwszy ze stanów w jednej kropce, a drugi stan pozostaje zdelokalizowany. Przebadano wpływ orientacji układu kropek względem różnych kierunków krystalograficznych na analizowane zjawisko. Należy dostrzec, że w fosforenowych kropkach kwantowych nie występuje zmiana fazy powodowana przez oddziaływania nadsubtelne, co stanowi ich godną odnotowania zaletę. W pracy zawarto także szczegółową dyskusję czasu obrotu spinu zachodzącego poprzez procesy pierwszego i wyższych rzędów.

Rozprawę zamyka krótkie podsumowanie, rekapitułujące uzyskane wyniki i podkreślające ich istotność. Bibliografia rozprawy liczy łącznie 239 powoływanych pozycji literatury. Jest ona kompletna, celnie dobrana i świadczy o dobrej orientacji Autora w literaturze przedmiotu. Cytowania są również poprawnie skonstruowane (z obowiązku recenzenta zauważę jedynie, że w pozycji [188] brakuje danych wydawcy).

Uważam, że konstrukcja samej rozprawy i sposób wkomponowania w jej treść publikacji [I]–[V] są w pełni poprawne, przedstawiona rozprawa tworzy spójną całość, łatwą w lekturze i mającą niezbędne walory pedagogiczne. Język rozprawy oceniam jako poprawny – jest ona przygotowana w sposób staranny i wywiera pozytywne wrażenie na czytelniku (oceny tej nie zmieniają absolutnie drobne usterki językowe, np. na s. 7 czy 15, czy też spotykany brak odstępu między wartością liczbową a jednostką wielkości fizycznej). Estetyka i czytelność ilustracji zawartych w publikacjach [I]–[V] również zasługują na pozytywną ocenę.

Podczas lektury rozprawy nasuwają mi się pewne pytania, uwagi i komentarze, które przedstawiam poniżej:

Warto skomentować, że dyskusja dotycząca gęstości stanów w układach o różnej wymiarowości przedstawiona w zwięzłej części teoretycznej (s. 10) dotyczy zasadniczo układów opisywanych paraboliczną relacją dyspersyjną w kierunkach w których nie występuje ograniczenie kwantowe (por. rozważania w cytowanej pozycji literatury [80]) – taki model gęstości stanów np. dla fosforenu byłby nadto uproszczony [por. np. M. Ezawa, *Journal of Physics: Conference Series* **603**, (2015) 012006 [DOI:10.1088/1742-6596/603/1/012006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/603/1/012006), S. Madas i in., *Scientific Reports* **9** (2019) 10307 [DOI:10.1038/s41598-019-44823-x](https://doi.org/10.1038/s41598-019-44823-x), czy A. G. Solomenko i in., *Scientific Reports* **13** (2023) 13444 [DOI:10.1038/s41598-023-40541-7](https://doi.org/10.1038/s41598-023-40541-7)].

W dyskusji we wstępie ułamkowego kwantowego efektu Halla (s. 16), zamiast a i b we wzorze na współczynnik wypełnienia powinny być chyba użyte symbole p i q .

W kontekście rozdziału 3 (s. 23–28) zauważam, że przydatny byłby tu opis metody różnic skończonych stosowanej do hamiltonianu w przybliżeniu masy efektywnej – metody Cranka-Nicholsona (tego typu, co zawarty w części teoretycznej pracy [II]) – podniosłoby to poziom spójności i kompletności tego rozdziału.

Warto, aby Doktorant wskazał, w jakich warunkach używane przez niego przybliżenie masy efektywnej nie funkcjonowałoby prawidłowo i niezbędne byłoby użycie hamiltonianu ciasnego wiązania. Ponadto, budzi moją ciekawość, jakie są największe rozmiary (liczba atomów) układów przebadanych numerycznie przez Autora w ramach przybliżenia ciasnego wiązania?

W kontekście ostatniej publikacji [V], zagadnienie potencjalnej użyteczności fosforenowych podwójnych kropek kwantowych jako bitów kwantowych jest nader interesujące. Chciałbym, aby podczas obrony Doktorant przedstawił porównanie pewnych parametrów tych układów wynikających z jego obliczeń z analogicznymi parametrami charakteryzującymi wybrane inne realizacje fizyczne bitów kwantowych. Wartościowe byłoby także wyjaśnienie, na czym polegają przejścia Landaua-Zenera-Stückelberga-Majorany.

W odniesieniu do prac dotyczących stanu molekuly Wignera, chciałbym, aby Doktorant wyjaśnił, czego dokładnie dotyczy używany w nich termin układu laboratorium (*laboratory frame*) i jakie inne układy współrzędnych mogą wchodzić w grę w kontekście opisu omawianego zjawiska, na przykład w układach nie wykazujących anizotropii. Wartościowe byłoby także wspomnienie metod eksperymentalnych pozwalających badać cechy stanów kwantowych stanowiące przedmiot szczegółowych rozważań w pracy [III].

Chciałbym podkreślić, że przedstawione powyżej uwagi i komentarze oraz nasuwające się pytania nie umniejszają mojej bardzo pozytywnej oceny merytorycznej przedłożonej rozprawy.

Cały dorobek publikacyjny Doktoranta doczekał się do chwili obecnej 28 cytowań (wg. bazy *Scopus*) oraz 34 (wg. *Google Scholar*) – w tym praca [I] aż 17 cytowań. Należy to uznać za bardzo dobry wynik, biorąc pod uwagę zarówno fakt, że pierwsza z prac ukazała się w 2022 r., jak i wysokospecjalistyczny charakter podjętej tematyki.

Warto wspomnieć o aktywności konferencyjnej Doktoranta – bowiem prezentował on swoje wyniki w formie posterów podczas międzynarodowych konferencji tematycznych, takich jak 36th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS) 2024 w Ottawie oraz International School & Conference on the Physics of Semiconductors “Jaszowiec” w 2022, 2023 czy 2025 r. Należy uznać te konferencje za bardzo dobrze dobrane z punktu widzenia tematyki badań, co zapewnia efektywną dyskusję i popularyzację rezultatów badań w środowisku.

Należy nadmienić, że wchodzące w skład rozprawy publikacje powstały w ramach realizacji projektu pt. *Elektrostatyczne kropki kwantowe w dwuwymiarowych warstwach czarnego fosforu* (2019/35/O/ST3/00097) przyznanego przez NCN w ramach konkursu Preludium Bis I (kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Bartłomiej Szafran), realizowanego w latach 2021–2025. Praca [V] powstała w wyniku współpracy Autora z Grupą Teorii Materii Skondensowanej Uniwersytetu w Antwerpii (Prof. François Peeters).

Wspólny mianownik prac wchodzących w skład rozprawy stanowi dyskusja znaczenia silnej anizotropii właściwości elektronowych fosforenu dla właściwości fizycznych opartych na nim kropek kwantowych. Należy dostrzec nowatorstwo, ale i dynamikę wzrostu zainteresowania tym materiałem – w samym 2024 r. opublikowano niemal 300 prac dotyczących fosforenu, a od 2014 r. (uzyskanie monowarstw) ukazało się ich już ponad 1400 (*Scopus*). Sam materiał dwuwymiarowy jest wysoce interesujący zarówno z punktu widzenia czysto poznawczego, jak i zastosowań, w tym w obszarze przetwarzania informacji. Doktorant podjął się niezwykle dogłębnej analizy zjawisk kwantowych zachodzących w fosforenowych kropkach kwantowych i ich układach, w których współgra wspomniana już anizotropia struktury elektronowej oraz anizotropia potencjału uwięzienia. Prowadzi to do niestandardowej realizacji takich efektów fizycznych jak oscylacje Aharonowa-Bohma, a także do pojawiania się bardzo ciekawych poznawczo zjawisk, do których należy tworzenie molekuł Wignera w pojedynczych kropkach i ferromagnetyzm Nagaoki w układach kropek. Co więcej, układ podwójnej kropki stanowi obiecującą realizację bitu kwantowego. Uzyskane przez Doktoranta wyniki szczegółowo omawiają zróżnicowane przejawy zjawisk kwantowych w układach wielu cząstek w oparciu o bardzo obszerny wybór uzyskanych wyników numerycznych. Świadczy to z pewnością o tym, że przedstawiona rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie interesującego problemu naukowego w obszarze teorii fazy skondensowanej, w dyscyplinie nauki fizyczne.

W swojej pracy Autor wykazał się wysoką biegłością w stosowaniu metod obliczeniowych, implementując samodzielnie właściwe metody numeryczne i tworząc programy służące przeprowadzeniu obliczeń. Zasługuje na wysoką ocenę również poszukiwanie możliwości optymalizacji przeprowadzanych obliczeń i staranna analiza wiarygodności uzyskanych wyników. Podejście to można uznać za wzorcowe, dobrze świadczące o warsztacie naukowym Doktoranta

i jego dojrzałości. Obok metod czysto numerycznych, Doktorant w pracy [I] wykazał się również umiejętnością zastosowania metod analitycznych do pogłębienia interpretacji uzyskanych wyników. Zdecydowanie pozwala to stwierdzić, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych w wybranym obszarze tematycznym nauk fizycznych.

Bardzo wartościowe wprowadzenie do cyklu publikacji zawarte w rozprawie oraz uwzględnione w publikacjach niekiedy bardzo szczegółowe rozdziały metodologiczne dobrze świadczą o wiedzy Autora w zakresie poruszanej tematyki badawczej. Podkreślam zwłaszcza, że dyskutując dogłębnie szczegóły wyrafinowanych właściwości fizycznych układów zerowymiarowych, Autor wciąż podkreśla związki z eksperymentem, co podwyższa znacznie walory pracy. Sam wybór badanych układów został dokonany z dbałością o realizowalność w warunkach doświadczalnych. Te okoliczności przekonują, że rozprawa wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie nauki fizyczne.

Wniosek końcowy

Podsumowując, jednoznacznie stwierdzam, że przedstawiona przez Pana MSc Tanmaya Thakura rozprawa p.t. *Electron States Confined in Electrostatic Quantum Dots Defined within Phosphorene* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Rozprawa ta prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie nauki fizyczne oraz dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej w tym zakresie. Spełnia zatem wszystkie wymagania stawiane przez ustawę z dn. 18 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (określone przez art. 187 ustawy). Wnoszę zatem do Komisji Doktorskiej powołanej przez Radę Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie o dopuszczenie Pana MSc Tanmaya Thakura do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Biorąc pod uwagę bardzo wysoką jakość naukową uzyskanych wyników opublikowanych w cieszących się prestiżem czasopismach, wnikliwą i wartościową dyskusję uzyskanych rezultatów, a także wyczerpujący charakter ujęcia i dogłębną analizę fizyczną badanego zagadnienia, uważam przedłożoną rozprawę za zasługującą na wyróżnienie. Tym samym wnioskuję o uznanie rozprawy doktorskiej Pana MSc Tanmaya Thakura za wyróżniającą się.

/Karol Szałowski/