

Dr hab. Agnieszka Wołoś, prof. UW
Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Md Shahina Alama,
pt. „*Thermoelectric phenomena in topological materials*”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. Md Shahina Alama została wykonana w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk (MagTop) pod kierunkiem dr. hab. Marcina Matusiaka. Wyniki zawarte w rozprawie zostały opublikowane w trzech artykułach naukowych w czasopismach: *J. Phys. Chem. Solids* (1 praca) i *Phys. Rev. B* (2 prace). W artykułach tych mgr. Md Shahin Alam był pierwszym autorem, co wskazuje na jego wiodącą rolę w powstaniu tych publikacji. Artykuł zatytułowany „*Sign change of anomalous Hall effect and anomalous Nernst effect in the Weyl semimetal CeAlSi*” był jednym z dziesięciu najczęściej pobieranych artykułów *Phys. Rev. B* w 2023 roku. Dodatkowo doktorant jest współautorem dwóch prac o zbliżonej tematyce, obie opublikowane w *Phys. Rev. B*.

Rozprawa dotyczy badań metodami magnetotransportowymi i termoelektrycznymi właściwości trzech materiałów: TaAs₂, CeAlSi i α -Sn. Cechą wspólną tych materiałów jest nietrywialna struktura pasmowa, która pozwala zaliczyć je do materiałów topologicznych. Tematyka badań dotyczy aktualnych zagadnień związanych z istnieniem kwazicząstek, będących przedmiotem dyskusji na styku dwóch dyscyplin naukowych: fizyki wysokich energii i fizyki materii skondensowanej.

Rozprawa została napisana w języku angielskim. Stanowi zbiór trzech opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, opatrzonych wstępem teoretycznym, opisem zastosowanych w pracy technik eksperymentalnych oraz krótkim streszczeniem głównych wyników pracy. W skład wyszczególnionych artykułów wchodzi:

- 1) Md Shahin Alam *et al.*, “*Temperature-Driven Spin-Zero Effect in TaAs₂*”, *J. Phys. Chem. Solids* **170**, 110939 (2022).
- 2) Md Shahin Alam *et al.*, “*Sign change of anomalous Hall effect and anomalous Nernst effect in the Weyl semimetal CeAlSi*”, *Phys. Rev. B* **107**, 85102 (2023).
- 3) Md Shahin Alam *et al.*, “*Quantum transport properties of the topological Dirac Semimetal α -Sn*”, *Phys. Rev. B* **109**, 245135 (2024).

W *Rozdziale 1* autor zawarł zwięzły wstęp poświęcony topologicznym metalom i półmetalom Diraca oraz Weyla. Przedstawił koncepcje ich struktury elektronowej i pojawiających się w tej strukturze punktów Diraca i Weyla. Następnie omówił właściwości transportu elektrycznego, oscylacje kwantowe, anomalne efekty Halla i Nernsta oraz koncepcję anomalii chiralnej. Omówił również ideę pomiarów termoelektrycznych, podkreślając ich przydatność w badaniach struktury pasmowej

materiałów topologicznych. Zauważył, że mogą być bardziej czułe niż pomiary transportu elektrycznego a dostarczają podobnych informacji. Następnie autor omówił cele pracy. Zostały one jasno sformułowane w *Rozdziale 1.4*. Celem pracy jest zbadanie właściwości struktur pasmowych TaAs₂, magnetycznego materiału CeAlSi i α -Sn, przy połączonym użyciu technik magnetotransportowych i termoelektrycznych. W ramach badań przeanalizowano oscylacje kwantowe w TaAs₂, aby zweryfikować możliwość uzyskania półmetal Weyla przy aplikacji pola magnetycznego, jak wcześniej raportowano w literaturze. Ponadto praca obejmuje badanie anomalnego efektu Halla i Nernsta w magnetycznym materiale CeAlSi oraz anomalii chiralnej w α -Sn, również wcześniej opisywanej. Chociaż badania te nie są całkowicie pionierskie, gdyż bazują na wcześniejszych doniesieniach literaturowych, poruszane zjawiska wciąż nie zostały w pełni zbadane i zrozumiane, dlatego niewątpliwie zasługują na systematyczną analizę.

Tematy omówione we wstępie są spójne z treścią głównej części doktoratu. Zagadnienia zostały omówione w sposób przystępny, bez nadmiernego przeładowania faktami, jednocześnie podkreślając kluczowe kwestie i przedstawiając niezbędne wzory. Wstęp zawiera liczne odnośniki do literatury. **Doktorant wykazuje się tutaj znajomością metodologii oraz dorobku nauki w dyscyplinie. Praca niewątpliwie prezentuje ogólną wiedzę, na poziomie wymaganym do uzyskania stopnia doktora.**

W *Rozdziale 2* autor opisuje zagadnienia związane z przeprowadzonymi eksperymentami. Deklaruje wykonanie pomiarów transportowych i termoelektrycznych oraz informuje, że próbki zostały otrzymane dzięki współpracy z zespołem MagTop ON6.1 IF PAN (TaAs₂ i α -Sn) oraz Tafti Lab w Boston College, USA (CeAlSi). Pozytywnie odczytuję jasne stwierdzenie własnego wkładu w skądinąd wieloautorską pracę. Choć autor nie uczestniczył w procesie uzyskiwania próbek kryształów, zwięźle i przystępnie opisuje metody ich otrzymania. Następnie przedstawia układ kriogeniczny, stosowany w połączeniu z wysokim polem magnetycznym, podkreślając, że ekstremalne warunki temperatury i pola magnetycznego są niestety niezbędne do obserwacji zjawisk kwantowych. Opisuje także przygotowanie próbek oraz kwestie związane z przeprowadzeniem pomiarów magnetotransportowych i termoelektrycznych. **Zaprezentowana metodologia badań, umiejętność pracy w zespole oraz przedstawiona w dalszych rozdziałach analiza wyników świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

Następnie w *Rozdziale 3* kandydat przytacza trzy publikacje naukowe, które są podstawą doktoratu. Prace zostały opatrzone krótkimi streszczeniami.

Artykuł 1, zatytułowany „*Temperature-driven spin-zero effect in TaAs₂*”, zawiera wyniki pomiarów magnetotransportowych i termoelektrycznych TaAs₂ wraz z analizą oscylacji obserwowanych zarówno w oporności jak i w efekcie Nernsta. Głównym wynikiem pracy jest demonstracja efektu „*spin-zero*”, wyznaczenie współczynnika $g = 5.8$ w temperaturze bazowej 5.4 K i zapostulowanie zmian temperaturowych współczynnika g w wyższych temperaturach. Publikacja napisana jest w sposób jasny i czytelny. Skupia się na głównym wyniku eksperymentalnym i głównym przekazie. Tę pracę czyta się bardzo dobrze. Praca została 3 razy zacytowana do 30.09.2024 w/g WoK. Wyraźny jest dominujący wkład doktoranta.

Do tej pracy mam następujące pytanie: Czy były przeprowadzane niezależne badania, np. techniką EPR, w celu wyznaczenia współczynnika g w TaAs₂? Czy kandydat zna odpowiednią literaturę? Kolejne pytanie: W celu oszacowania współczynnika g konieczne było wyznaczenie wartości masy efektywnej z amplitudy oscylacji w funkcji temperatury. Czy ruchliwość kwantowa wykazuje zależność od temperatury w badanym zakresie i czy może wpływać na wyznaczoną wartość masy efektywnej, a co za tym dalej idzie – wartość współczynnika g ?

Artykuł 2 jest zatytułowany: *"Sign change of anomalous Hall effect and anomalous Nernst effect in the Weyl semimetal CeAlSi"*. Autor demonstruje anomalny efekt Halla, który występuje zarówno w fazie ferromagnetycznej jak i paramagnetycznej i charakteryzuje się zmianą znaku w zależności od kierunku przyłożonego pola magnetycznego. Dzięki współpracy z zespołem teoretyków udało się wytłumaczyć obserwowane efekty mechanizmem wewnętrznym, związanym z topologią struktury pasmowej. Praca opublikowana w 2023 r. zyskała do tej pory 14 cytowań (do 30.09.2024 w/g WoK), co świadczy o dużym zainteresowaniu środowiska wynikami. Porusza bardzo ciekawy problem występowania anomalnego efektu Halla poza reżimem ferromagnetycznym, mającego swoje źródło w wewnętrznych właściwościach materiału. Pracę tę również czyta się bardzo dobrze. Wielu autorów deklaruje wkład w ostateczną formę pracy, co jest zrozumiałe, jako że praca zawiera bardzo ważne dla zagadnienia wyniki obliczeń teoretycznych, będące poza oceną tej recenzji.

Moje pytanie do tej publikacji jest następujące: Czy w fazie ferromagnetycznej były obserwowane pętle histerezy w poprzecznym magnetooporze? Czy była badana zależność AHE od namagnesowania? Jak ta zależność wygląda?

Artykuł 3 jest zatytułowany *"Quantum transport properties of the topological Dirac Semimetal α -Sn"* i został opublikowany w 2024 r. Autor raportuje wyniki pomiarów magnetotransportowych i termoelektrycznych α -Sn. Autor argumentuje, że obserwowany negatywny magnetoopór ma swoje źródło w efekcie chiralnej anomalii, wynikającej z obecności pary stożków Diraca w strukturze pasmowej odkształconej α -Sn. Na poparcie swojej tezy prezentuje zależności kątowe ρ_{xx} i S_{xx} oraz dyskutuje stosunek wartości międzydolinowego czasu relaksacji do czasu rozpraszania Drudego, spodziewany dla reżimu chiralnego. Praca dodatkowo jest uzupełniona o wyniki obliczeń DFT uzyskane dzięki współpracy z zespołem teoretycznym, które przybliżają strukturę pasmową α -Sn i wynikający z niej negatywny magnetoopór. Praca stanowi ciekawy przyczynek do kontrowersyjnego zagadnienia obserwacji chiralnej anomalii, czyli niezachowania ładunku chiralnego w obecności równoległych pól elektrycznych i magnetycznych, w ciele stałym.

Deklaracje współautorów co do wkładu w publikację są zgodne z informacjami zawartymi w rozprawie i jasno definiują wkład kandydata, chociaż brak oświadczenia P. K. Tanwar.

Przedstawione w rozprawie wyniki (Artykuły 1-3) stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, spełniające wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Rozprawa jest zredagowana starannie i napisana w sposób klarowny. Niemniej jednak zdarzają się pewne fragmenty tekstu przygotowane mniej starannie, zawierające liczne błędy gramatyczne. W szczególności często czasowniki nie są zgodne gramatycznie z resztą zdania, co wymaga od czytelnika domyślania się sensu wypowiedzi i utrudnia czytanie. Zdarzają się też literówki, powtórzenia fragmentów zdań, błędy w szyku zdania.

Strona 3 brak „²” w formule w wierszu 4.

Streszczenie (polskie) – „wymaga dodatkowej eksperymentalnej ewidencji” nie brzmi poprawnie. Lepiej użyć: „wymaga dodatkowej eksperymentalnej weryfikacji”.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. Md Shahina Alama, pt. *„Thermoelectric phenomena in topological materials”* zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, prezentuje ogólną wiedzę Doktoranta w dyscyplinie i potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, tym samym spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce stawiane pracom doktorskim. Wnoszę więc o

dopuszczenie mgr. Md Shahina Alama do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej za szczególne osiągnięcia naukowe, do których przede wszystkim zaliczam opublikowanie pracy "*Sign change of anomalous Hall effect and anomalous Nernst effect in the Weyl semimetal CeAlSi*". Praca dzięki kombinacji pomiarów magnetotransportowych i magnetotermoelektrycznych, uzupełniona o analizę teoretyczną, w przekonujący sposób prezentuje wewnętrzny mechanizm anomalnego efektu Halla, tym ciekawszy że występujący poza fazą ferromagnetyczną. Jest to tematyka bardzo aktualna, a prezentację eksperymentalną efektu uważam za znaczący wkład do literatury tematu. Za wyróżnieniem tego osiągnięcia przemawia również duże zainteresowanie środowiska naukowego tą publikacją.

Dr hab. Agnieszka Wołoś, prof. UW

