

Prof. dr hab. Stefan Krompiewski  
Instytut Fizyki Molekularnej PAN  
ul. Mariana Smoluchowskiego 17  
60-179 Poznań

Poznań, 14. 01. 2020 r.

## **Ocena osiągnięcia naukowego**

***„Efekty dynamiczne i nielokalne w transporcie  
przez układy kropek kwantowych”***

**oraz dorobku naukowego, działalności dydaktycznej i  
organizacyjnej dr. Grzegorza Michałka  
w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego  
doktora habilitowanego**

---

### Informacje o Habilitancie

Dr Grzegorz Michałek ukończył studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Uzyskał stopień magistra w zakresie fizyki teoretycznej w roku 1997, na podstawie pracy pt. „*Teoria złącza Josephsona*”, wykonanej pod opieką naukową prof. dr hab. Leona Kowalewskiego. W trakcie ostatnich 2 lat studiów pracował jednocześnie na pół etatu na Wydziale Fizyki. Następnie Habilitant był przez 4 lata doktorantem w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN. W 2001 roku obronił pracę doktorską pt. „*Transport jednoelektronowy w magnetycznych złączach tunelowych*”, której promotorem był prof. dr hab. Bogdan Bułka. W latach 2001-2002, dr G. Michałek odbył 15-to miesięczny staż naukowy w Niemczech na Uniwersytecie w Hamburgu w Instytucie Fizyki Teoretycznej. W Instytucie Fizyki Molekularnej PAN zatrudniony był na stanowisku adiunkta w latach 2003-2012, a następnie (i do tej pory) - na stanowisku asystenta.

## Ocena osiągnięcia naukowego

Na rozprawę habilitacyjną składają się spójne tematycznie prace teoretyczne na temat własności fizycznych różnorodnych układów złożonych z kropek kwantowych i podłączonych do nich elektrod zewnętrznych. Autor prezentuje zbiór dziewięciu publikacji naukowych pochodzących z czasopism o zróżnicowanej randze naukowej, 4 z nich mają współczynnik wpływu  $IF > 3,7$  (1 • Scientific Reports + 3 • Physical Review B). Habilitant jest zawsze pierwszym autorem, a całkowita liczba współautorów wynosi odpowiednio: 2 (prace H1-H4), 3 (H7), 4 (H5,H6,H9) i 5 (H8). Ostatnie 5 prac (H5-H9) – to rezultat owocnej współpracy z wybitnymi fizykami teoretykami z Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie (profesorami K. Wysokińskim i T. Domańskim). Jak wynika z oświadczeń współautorskich Dr G. Michałek wniósł zdecydowanie największy wkład do wszystkich dziewięciu prac, polegający głównie na wykonaniu obliczeń. Współautorzy natomiast uczestniczyli w dyskusjach naukowych i redagowaniu tekstu prac. Wszystkie prace z wyjątkiem publikacji H7, wykonane zostały w ramach projektów badawczych kierowanych przez profesora B. Bułkę i z jego współautorstwem. Sugeruje to, że miał on także wpływ na wybór tematyki badawczej i koncepcje prowadzonych badań.

W autoreferacie Habilitant w sposób rzeczowy prezentuje główne cele i wyniki swojego osiągnięcia naukowego. Nawiązuje do intensywnego rozwoju nanotechnologii wynikającego z konieczności miniaturyzacji nowoczesnych urządzeń elektronicznych i magneto-elektronicznych (spintronicznych). Jak wiadomo istotnymi elementami tych urządzeń są też kropki kwantowe sprzężone z odpowiednio dobranymi elektrodami zewnętrznymi.

Poniżej przedstawiam krótkie omówienie prac H1-H9.

- Praca H1 poświęcona jest badaniu wpływu oddziaływań kulombowskich i wymiennych na konduktancję układu dwóch kropek kwantowych połączonych szeregowo, w zależności od ich wzajemnego sprzężenia i sprzężenia z elektrodami zewnętrznymi. Rozpatrzono 2 przypadki, tj. limit atomowy - z dominującym sprzężeniem między elektrodami a kropką kwantową i przypadek odwrotny - z dominującym sprzężeniem między kropkami kwantowymi. Pokazano, że w pierwszym przypadku występuje podwójny efekt Kondo, w drugim zaś efekt Kondo ulega tłumieniu w miarę obniżania energii poziomu.

Ważnym efektem tych badań jest zademonstrowanie, że zakres występowania rezonansu Kondo ulega zwiększeniu ze wzrostem sprzężenia między kropkami kwantowymi, podczas gdy oddziaływanie wymienne wywiera efekt odwrotny. W badaniach tych ograniczono się do nieskończonej dużej wartości parametru odpychania kulombowskiego na tym samym orbitalu ( $U \rightarrow \infty$ ), czyli do jednoelektronowych stanów na orbital.

- W pracy H2 autor bada tunelowy magnetoopór w singletowych i trypletowych stanach dwupoziomowych kropek kwantowych uwzględniając, podobnie jak w pracy H1, tylko oddziaływania kulombowskiego odpychania między elektronami na różnych orbitalach ( $U_{12}$ ) i oddziaływania wymienne, oraz pomijając procesy z odwróceniem spinu. Na uwagę zasługuje wykazanie, że asymetryczne podłączenie elektrod zewnętrznych prowadzić może do ujemnej wartości oporności różniczkowej i ujemnego tunelowego magnetooporu ( $TMR < 0$ ).



- Efekty dynamicznego przełączania polaryzacji (DPS), szeregowo połączonych kropek kwantowych, za pomocą napięcia zbadane zostały w pracy H3. Pokazano, że napięcie może prowadzić do znacznych zmian ilości elektronów w poszczególnych kropkach kwantowych, przy czym różnice obsadzeń wykazują oscylacje co do znaku. Efekt DPS przypisano różnicom między energią przenoszenia ładunku między kropkami kwantowymi, a energią przenoszenia ładunku między elektrodą a kropką kwantową.

Na uwagę zasługuje ściśle powiązanie prowadzonych badań teoretycznych z dostępnymi danymi eksperymentalnymi i zaproponowanie oryginalnego schematu pomiarowego do weryfikacji własnych przewidywań teoretycznych.

- O ile badania prezentowane w pracy H3 dotyczą małych wartości napięcia elektrycznego, to praca H4 dotyczy zakresu dużych napięć (poza obszarem blokady kulombowskiej) w układzie dwóch pojemnościowo sprzężonych kropek kwantowych. Szczególną uwagę poświęca się tutaj lokalnym korelacjom (autokorelacjom) i korelacjom nielokalnym (krzyżowym). Autor prezentuje 2-wymiarowe kontury ilustrujące zachowanie się takich kluczowych wielkości jak natężenie prądu, czynnik Fano i korelacje krzyżowe, w funkcji napięć  $V_{tR}$  i  $V_{bR}$  przyłożonych do górnej i dolnej elektrody z prawej strony kropek kwantowych (przy uziemionych elektrodach z lewej strony).

Bardzo interesujące jest zwrócenie uwagi na takie kwestie jak:

- (i) kulombowskie unoszenie - spowodowane indukowaniem napięcia w jednej z gałęzi badanego układu przez przepływający prąd w drugiej gałęzi,
- (ii) dynamiczna blokada kulombowska – czyli współzależność między fluktuacjami napięcia i fluktuacjami ładunku elektrycznego w poszczególnych gałęziach.
- (iii) zależność szumów prądowych od przyłożonego napięcia (określenie sub-poissonowskiego, poissonowskiego i super-poissonowskiego zakresu).

- Pozostałe prace H5-H9, wykonane we współpracy i partnerami z Uniwersytetu M. Curie-Skłodowskiej, dotyczą układów złożonych z kropki kwantowej i trzech elektrod, z których dwie to normalne elektrody, a trzecia – nadprzewodząca. Dla układów tego typu autor rezerwuje nazwę hybrydowe (zawężając nieco zakres tego określenia). W pracy H5 analizowane są możliwe mechanizmy transportu elektronowego przy założeniu dużej przerwy energetycznej nadprzewodzącej elektrody. Zbadano procesy typu balistycznego transferu ( $ET$ ) między metalicznymi elektrodami, oraz lokalne (bezpośrednie  $DAR$ ) i nielocalne (krzyżowe  $CAR$ ) odbicia Andreeva. Badania przeprowadzono w sposób kompleksowy, w funkcji napięcia i z uwzględnieniem korelacji kulombowskich i kondowskich. W pewnych szczególnych wypadkach ( $T=0$  i z pominięciem oddziaływań) podano analityczne formuły na gęstość stanów, oraz lokalną i nielokalną konduktancję z wyszczególnieniem składowych  $ET$ ,  $DAR$  i  $CAR$ . Uzyskano w ten sposób ścisły punkt odniesienia umożliwiający weryfikację wyników ogólnych w przypadkach granicznych. Interesujące są również wyniki pokazujące jak relacje między parametrami sprzężenia kropki kwantowej z elektrodą normalną ( $N$ ) i nadprzewodzącą ( $S$ ),  $\Gamma_N$  i  $\Gamma_S$ , wpływają na kształt i ilość pików konduktancji w funkcji napięcia. Ponadto zademonstrowano, że przez odpowiedni dobór parametrów, badany układ może być sprowadzony zarówno do zakresu blokady kulombowskiej, jak i poza ten zakres - do obszaru kondowskiego.
- Dokładną analizę transportu nielokalnego, we wspomnianych wyżej układach hybrydowych, przeprowadzono w pracy H6 dla szerokiego zakresu zmieniającego się

napięcia. Pokazano, że na znak nielokalnego oporu mają wpływ zarówno procesy typu *ET* jak i *CAR*, przy czym te pierwsze wnoszą wkład dodatni, a te drugie – ujemny. Badanie tego typu dostarczą bezpośrednich informacji o położeniu i naturze stanów Andreeva.

Ciekawym wynikiem tej pracy jest obserwacja, że dla dużych napięć (zakres nieliniowy) następuje pewne nagromadzenie ładunku na elektrodach co ekranuje ładunek elektryczny na kropce kwantowej i wpływa w istotny sposób na konduktancję całego układu.

- Praca H7 poświęcona jest zagadnieniu rozszczepiania par Coopera w hybrydowych trójterminalowych kropkach kwantowych, na skutek krzyżowego odbicia Andreeva. Pokazano, że efektywność rozszczepiania może sięgać 80% przy optymalnym doborze parametrów. Czynnikiem zmniejszającym parametr opisujący efektywność rozszczepiania jest odpychanie kulombowskie na kropce kwantowej.

Badany problem nawiązujący do bardzo aktualnej kwestii, a mianowicie do tzw. stanów splątanych, przyjmując że rozczepione elektrony po dojściu do elektrod normalnych pozostają skorelowane.

- Praca H8 przynosi rozszerzenie dotychczas omawianych badań o bardzo istotny problem, a mianowicie zagadnienie lokalnego i nielokalnego efektu termoelektrycznego w układach wieloterminalowych. Opracowano formalizm umożliwiający wyliczenie współczynnika Seebecka w trójterminalowych układach z różnymi kombinacjami elektrod, niemagnetycznych, ferromagnetycznych i nadprzewodzących. Podejście to można traktować jako uogólnienie metody Büttikera (dotyczącej transportu balistycznego w układach wieloterminalowych) przez wprowadzenie gradientów temperatury między elektrodami.

Na podkreślenie zasługuje opracowanie koncepcji dwuetapowej metody pomiarowej umożliwiającej weryfikację teoretycznych przewidywań. Proponuje się najpierw wyznaczyć, w warunkach izotermicznych, odpowiednie opory. Następnie zaś zbadać przypadek, w którym przynajmniej 2 elektrody mają różne temperatury, wyznaczając różnice potencjałów między elektrodami (jedną z nich traktuje się jako sondę napięciową). Zaproponowany ‘protokół pomiarowy’ umożliwia jakościowe prześledzenie zachowania się termosyły dla różnych warunków zewnętrznych determinujących zmiany na interfejsach i wewnątrz kropki kwantowej.

- Ostatnia praca H9 to praca konferencyjna opublikowana w *Acta Physica Polonica A*. Dotyczy ona badań krótkoczasowej dynamiki układu złożonego z kropki kwantowej silnie sprzężonej z elektrodą nadprzewodzącą (z przerwą energetyczną  $\Delta \rightarrow \infty$ ) i słabo sprzężonej z dwiema elektrodami normalnymi. Główną uwagę poświęca się wyznaczeniu i analizie parametru WTD (*waiting time distribution*) opisującego oczekiwany rozkład czasu między kolejnymi procesami tunelowania. Pokazano, że na skutek efektu bliskości możliwe są przeskoki par Coopera z elektrody nadprzewodzącej do kropki kwantowej i proces ten ma charakter oscylacyjny, natomiast gdy na kropkę kwantową trafia elektron z elektrody normalnej – efekt bliskości jest niszczone.

Podzielam opinię autora zawartą w autoreferacie, że „W pracy [H9] przedstawiono wyniki wstępnych badań, które pokazują, że nowa tematyka badawcza jest bardzo interesująca i warto ją rozwijać i kontynuować”.



Jak wynika z powyższego omówienia, Habilitant zbadał różne kombinacje układów typu kropka kwantowa elektrody zewnętrzne, w tym układy hybrydowe zawierające elektrody nadprzewodzące i magnetyczne. Do opisu zjawisk fizycznych zachodzących w tych układach użył odpowiednich metod teoretycznych, umożliwiających uwzględnienie istotnych korelacji elektronowych (m.in. kulombowskich, wymiennych i kondowskich) i dokonanie gruntownej analizy lokalnych i nielokalnych procesów dotyczących transportu elektronowego i spinowego, oraz efektu termoelektrycznego. W szczególności dokładnie zbadał następujące kwestie: fluktuacje prądowe (szum śrutowy), efekt blokady kulombowskiej, efekt Kondo, jak również zjawisko odbicia Andreeva i efekt bliskości na styku nadprzewodnik/kropka kwantowa.

### Ocena dorobku naukowego i działalności dydaktycznej i organizacyjnej

Dr G. Michałek bada teoretycznie zagadnienia o dużym znaczeniu poznawczym i praktycznym. Już w trakcie wykonywania pracy magisterskiej zapoznał się z procesami tunelowania w układach złożonych z nadprzewodników i warstwy normalnej. Natomiast, badaniem tunelowania w magnetycznych złączach zajmował się w pracy doktorskiej. W kolejnych publikacjach wzbogacał problematykę badawczą o nowe ważne elementy.

Całkowity dorobek publikacyjny Habilitanta to 24 artykuły naukowe, tj. 15 publikacji oprócz omówionych wyżej prac H1-H9. Zdecydowana większość tych dodatkowych publikacji dotyczy materiałów prezentowanych na konferencjach naukowych (9 w Acta Physica Polonica A, oraz po jednej w physica status solidi B i NATO Science Series: Mathematics, Physics and Chemistry). Poza tym są cztery artykuły naukowe opublikowane w czasopiśmie o wysokim i średnim czynniku wpływu (IF), tj. dwie w Physical Review B i po jednej w Journal of Magnetism and Magnetic Materials i European Physical Journal B. Według deklaracji dr. G. Michałka jego wkład w tych pracach wynosi powyżej 60% w dziewięciu pracach (w tym 100% w jednej z publikacji w APP A) i od 10% do 25% w sześciu pracach. Habilitant uczestniczył też w czterech publikacjach nienotowanych w bazie JCR (*Journal Citation Reports*). Swój wkład do tych prac, z lat 2016, 2001, 1999 i 1999, ocenia odpowiednio na 5%, 25%, 60% i 65%.

Ograniczając się do publikacji, w których udział Habilitanta przekracza 50% (pomijając prace H1-H9) należy wymienić następujące dokonania: (i) przeprowadzenie szczegółowej analizy różniczkowej oporności i szumu śrutowego w dwóch pojemnościowo sprzężonych tranzystorach jednoelektronowych (prace [11,9] w załączniku 5, punkt II), (ii) zbadanie wpływu kulombowskiego i wymiennego oddziaływania między kropkami kwantowymi na transport elektronowy [7], (iii) zbadanie szumu śrutowego i efektu nagromadzania (*bunching*) ładunku w wielopoziomowych kropkach kwantowych [6], oraz (iv) zbadanie autokorelacji i korelacji krzyżowych w podwójnych kropkach kwantowych [5].

Po doktoracie Dr G. Michałek odbył wspomniany wyżej w *Informacjach o Kandydacie* staż w Hamburgu. Pobyt ten nie zaowocował jednak żadną publikacją z niemieckimi partnerami, ani nawiązaniem współpracy naukowej na kolejne lata.

Habilitant nie kierował żadnymi projektami badawczymi, ale w siedmiu (kierowanych przez prof. B. Bulkę) był aktywnym wykonawcą. Wygłosił 10 referatów na dwóch międzynarodowych i ośmiu krajowych konferencjach, oraz zaprezentował 21 plakatów (14 w Polsce i 7 w innych krajach Unii Europejskiej). Brał też udział jako uczestnik w trzech programach europejskich (w latach 2004-2008, 2006-2009 i 2010-2013).

Za swoją działalność naukową Habilitant był wielokrotnie wyróżniany i nagradzany. Między innymi, otrzymał stypendium od Kapituły Nagrody Naukowej Miasta Poznania (rok

2002), wyróżnienie za rozprawę doktorską od Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej (rok 2003) i nagrody Dyrektora IFM PAN za 2001 i 2014 rok.

Dane scjentometryczne Kandydata są na akceptowalnym poziomie, posiada 225 cytowań (204 bez autocytowań), sumaryczny czynnik wpływu 24 publikacji naukowych (notowanych w Web of Science) wynosi  $IF=38,4$ , a indeks Hirscha  $iH=7$ .

Dr G. Michałek aktywnie uczestniczył w organizowaniu pięciu krajowych konferencji naukowych w latach 2001-2013. Pełnił rolę: sekretarza (1 raz), organizatora warsztatów (1 raz) i członka komitetów organizacyjnych (3 razy). Posiada pewne osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki. W roku 2018 zaangażowany był w popularyzatorskiej akcji *Noc Naukowców* zorganizowanej w IFM PAN. Wygłosił też 6 referatów na zaproszenie w różnych ośrodkach naukowych, z czego 2 w Niemczech. Nie ma informacji o prowadzeniu przez Kandydata wykładów czy też ćwiczeń. Pełnił natomiast rolę opiekuna dwóch studentów odbywających praktyki studenckie i trzech zagranicznych doktorantów goszczących w IFM PAN w ramach projektu *Marie Curie Action*. Opiekował się też kilkoma magistrantami i doktorantami, ale bez formalnego umocowania (nie pełnił roli promotora czy też opiekuna pomocniczego).

### Konkluzja

Uważam, że przedstawione przez dr. G. Michałka osiągnięcie naukowe rozszerza w sposób istotny wiedzę na temat własności kropek kwantowych z kilkoma różnego rodzaju elektrodami. Na podkreślenie zasługuje fakt, że otrzymane przez niego wyniki tłumaczą w nowatorski sposób mechanizmy fizyczne odpowiedzialne za lokalne i nielocalne zjawiska transportu elektronowego i efekt termoelektryczny w układach wieloterminalowych. Tłumaczą również złożone procesy związane z odbiciem Andreeva – w przypadku, gdy jedna z elektrod jest nadprzewodząca. Wysoko oceniam dbałość Habilitanta o możliwość doświadczałnej weryfikację swoich teoretycznych przewidywań. Na przykład propozycję oryginalnego schematu pomiarowego do wyznaczenia polaryzacji podwójnych kropek kwantowych, jak również sporządzenie protokołu na dwuetapowy pomiar efektu termoelektrycznego w wieloterminalowych kropkach kwantowych. Nie ulega wątpliwości, że oceniane osiągnięcie naukowe nawiązuje do bardzo ważnego problemu przyszłych komputerów kwantowych (z singletowymi i trypletowymi kubitami) i wnosi interesujący przyczynek do badań nad tzw. stanami splątanymi (w kontekście rozszczepiania par Coopera).

Dr G. Michałek aktywnie uczestniczył w organizowaniu imprez naukowych, głównie konferencji. Ma też pewne osiągnięcia dydaktyczne w pracy z magistrantami i doktorantami (w tym z zagranicznymi stypendystami projektu *Marie Curie Action*) w IFM PAN.

Podsumowując, jestem przekonany, że Habilitant spełnia kryteria oceny stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk fizycznych i w związku z tym wnoszę o dopuszczenie dr. Grzegorza Michałka do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.



Stefan Krompiewski