

## Podsumowanie osiągnięć zawodowych

### 1. Nazwa

Bruno Cury Camargo

2. Dyplomy, stopnie naukowe nadane w określonych dziedzinach nauki lub sztuki, w tym nazwa instytucji, która nadała stopień, rok nadania stopnia, tytuł rozprawy doktorskiej, tytuł rozprawy habilitacyjnej, tytuł rozprawy habilitacyjnej i tytuł rozprawy doktorskiej.

2014 - Doktor nauk przyrodniczych. Instituto de Fisica Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas - IFGW/UNICAMP (Instytut Fizyki Gleb Wataghin, Uniwersytet Stanowy w Campinas). Specjalizacja: Fizyka półprzewodników. Tytuł pracy doktorskiej: "Efeitos quanticos em semimetals de Dirac e heteroestruturas relacionadas" (Zjawiska kwantowe w półmetalach Diraca i ich heterostrukturach). Opiekun pracy Prof. dr Yakov Kopelevich.

3. Informacje o zatrudnieniu w instytutach badawczych lub na wydziałach lub w szkołach artystycznych.

2014-2015: Staż podoktorancki, Wydział Fizyki, Uniwersytet w Lipsku (obecnie "Felix-Bloch Institute for Solid State Physics"), Lipsk, Niemcy.

2015-2016: Staż podoktorancki, Laboratoire National des Champs Magnetiques Intenses (Krajowe Laboratorium Wysokich Pól Magnetycznych) - LNCMI Toulouse, Tuluza, Francja.

2016-2020: Adiunkt (pracownik badawczo-dydaktyczny - postdoc), Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk – IFPAN, Warszawa, Polska.

Od 2021 r: Adiunkt (pracownik badawczo-dydaktyczny), Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski – FUW, Warszawa, Polska.

4. Opis osiągnięć, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy

Osiągnięcia opisane w tym dokumencie odpowiadają serii publikacji dotyczących **badania wpływu domieszkowania i zaburzeń strukturalnych na właściwości elektronowe grafitu.**

4.1 Seria publikacji i rola odegrana w pracy.

[1\*] M. Muszynski, I. Antoniazzi, **B. Camargo**, *Ion-beam-milled graphite nanoribbons as mesoscopic carbon-based polarizers*, Appl. Phys Lett (2023)

Rola: koncepcja i plan badań, koordynacja zespołu, przygotowanie próbek, opracowanie danych, napisanie manuskryptu

[2\*] **B. Camargo**, B. Kerdi, A. Alaferdov, S. Zhuri, M. Birowska, W. Escoffier, *Self-doped graphite nanobelts*, Carbon **207**, 240 (2023).

Rola: koncepcja i plan badań, koordynacja zespołu, przygotowanie próbek, pomiary transportu elektrycznego, analiza danych, napisanie manuskryptu

[3\*] **B. Camargo**, P. Gierłowski, M. Kuzmiak, R. Jesus, O. Onufriienko, P. Szabó, Y. Kopelevich, *Macroscopic-ranged proximity effect in graphite*, J. Phys: Cond Mat **33**, 495602 (2021).

Rola: koncepcja i plan badań, koordynacja zespołu, przygotowanie próbek, pomiary transportu elektrycznego, interpretacja i analiza danych, napisanie manuskryptu, pozyskanie finansowania

[4\*] **B. Camargo** i W. Escoffier, *Taming the magnetoresistance anomaly in graphite*, Carbon **139**, 210 (2018).

Rola: koncepcja i plan badań, przygotowanie próbki, wykonanie wszystkich pomiarów, interpretacja i analiza danych, napisanie manuskryptu,

[5] R. Jesus, A. Turatti, **B. Camargo**, R. Silva, Y. Kopelevich, M. Behar, M. Gusmao, P. Pureur, *Electronic Transport and Raman Spectroscopy Characterization in Ion-Implanted Highly Oriented Pyrolytic Graphite*, J. Low Temp. Phys **190**, 141 (2018).

Rola: współudział w interpretacji danych oscylacji kwantowych, współudział w przygotowaniu próbek, wykonanie pomiarów transportu elektrycznego, korekta manuskryptu.

[6\*] **B. Camargo**, R. Jesus, B. Semenenko i C. Precker, *Electrical properties of in-plane implanted graphite nanoribbons*, J. Appl. Phys **122**, 244302 (2017).

Rola: koncepcja i plan badań, przygotowanie próbek, pomiary transportowe i optyczne, analiza danych, modelowanie systemu, napisanie manuskryptu

[7] R. Jesus, **B. Camargo**, R. Silva, Y. Kopelevich, M. Behar, M. Gusmao, P. Pureur, *Magneto-transport properties of As-implanted highly oriented pyrolytic graphite*. Phys B: Cond Mat. **118**, 500 (2016).

Rola: współudział w interpretacji danych oscylacji kwantowych, współudział w przygotowaniu próbek, wykonanie pomiarów transportu elektrycznego, korekta manuskryptu.

[8\*] **B. Camargo**, Y. Kopelevich, A. Usher i S. Hubbard, *Effect of structural disorder on quantum oscillations in graphite*, Appl. Phys. Lett. **108**, 031604 (2016).

Rola: : koncepcja i plan badań, przygotowanie próbek, pomiary transportowe, magnetyczne i mikroskopowe, i optyczne, analiza danych, modelowanie systemu, napisanie manuskryptu

\* - Wnioskodawca jest autorem korespondencyjnym

#### 4.2 - Opis osiągnięć naukowych:

Grafit jest alotropową formą węgla, składającą się z dużej liczby ułożonych warstw grafenowych w strukturze Bernala (ABABAB). Obliczenia struktury pasmowej definiują ten materiał jako wysoce anizotropowy quasi-skompensowany półmetal, z powierzchnią Fermiego złożoną z kieszeni elektronów i dziur w kształcie cygara zlokalizowanych wzdłuż krawędzi H-K-H strefy Brillouina [A1].

Pomimo tego, że grafit jest materiałem o szerokim znaczeniu technologicznym, jego zastosowania utrudnia fakt, że nie jest on monokryształem. Powoduje to szereg niespójności w określaniu jego właściwości fizycznych, a wyniki są silnie zależne od próbki [8, A2]. Dla przykładu, doniesienia w literaturze z ostatnich 30 lat identyfikują różne lokalizacje kieszeni na elektrony i na dziury [A4], a także natywne koncentracje nośników ładunku obejmujące ponad 2 rzędy wielkości [A2]. Trudność ta częściowo wynika z braku spójnego sposobu oceny pozwalającego określić, co jest dobrą, a co złą próbką - ponieważ kolejne wyniki uzyskane na tej samej próbce fizycznej są na ogół powtarzalne. Problem jest podobny do tego, z którym borykał się grafen w momencie jego powstania: najmniejsze różnice w procesach produkcji próbek (lub w samej próbce) mogą potencjalnie powodować znaczne zmiany właściwości elektrycznych materiału. Najlepszym tego przykładem jest rozpad grafenu na obszary bogate w elektrony i dziury w pobliżu punktu neutralności ładunku [A3].

**W tym kontekście moja praca ma na celu zrozumienie, jak prawidłowo przewidzieć właściwości elektryczne i magnetyczne grafitu oraz jak skutecznie je regulować *pomimo* nieporządku.** Jest to trudne zadanie, które można osiągnąć jedynie poprzez badanie zachowania różnych rodzajów grafitu w różnych warunkach, próbując oddzielić wewnętrzne reakcje materiału od tych związanych z jakością próbki, nieporządkiem i domieszkami. Praca obejmuje cztery nakładające się na siebie tematy. Są one wymienione poniżej:

- W jaki sposób ocenić jakość próbki grafitu? [2, 5-8],
- W jaki sposób można domieszkować grafit? [5-7],
- W jaki sposób można kontrolować elektronowe przejścia fazowe w graficie przy wysokich polach magnetycznych? [2, 4],
- Jak wykorzystać unikalne cechy grafitu w produkcji nowych urządzeń [1, 3, 6].

W dalszej części nagłówki poszczególnych sekcji wskazują główny wkład załączonych prac. Nagłówki sekcji nie są jednak wykluczające się (tj. prace w ref [1-8] mogą być opisane w jednej sekcji ale też odnosić się do kilku).

#### **4.2.1 - W jaki sposób ocenić jakość próbki grafitu ?**

Jakość grafitu jest tematem spornym. Ogólnie rzecz biorąc, stosunek oporności prostopadłej do płaszczyzny do oporności w płaszczyźnie ( $\rho_c/\rho_a$ ), zwany również anizotropią elektryczną, jest przyjętym parametrem do oszacowania uporządkowania między warstwami grafenu w próbce [A5, A6]. Parametr ten waha się od 10 do wartości powyżej 10000 i silnie zależy od rodzaju rozważanego grafenu [A1]. Największe wartości obserwuje się w syntetycznym wysoce zorientowanym graficie pirolitycznym (HOPG) [A1, A6]. Inną metodą określenia jakości kryształu grafitu jest określenie jego mozaikowatości na podstawie pomiarów XRD [A6]. Standardowo stosowanym parametrem jest szerokość krzywych dyfraktometrycznych (ang. *rocking curve*) wokół głównych pików dyfraktometrycznych, określana również jako szerokość połówkowa (FWHM – ang. *full width at half maximum*). Parametr ten bezpośrednio mierzy mozaikowatość próbki. Syntetyczne HOPG wykazują najmniejszą FWHM, która waha się od  $0,3^\circ$  dla próbek najbardziej anizotropowych do wartości powyżej  $2^\circ$  dla próbek najmniej anizotropowych [8].

Grafit **naturalny** i grafit **Kish** są również wysoce zorientowane. Uzyskuje się je odpowiednio wydobywając ze skał i jako produkt uboczny produkcji stali. Te rodzaje grafitu mogą wykazywać FWHM powyżej kilku stopni, ze współczynnikami anizotropii elektrycznej rzędu 10–30 [A7]. Takie wskaźniki klasyfikują je jako gorszej jakości niż ich syntetyczne odpowiedniki. Jednak badania właściwości fizycznych grafitu (i grafenu) najczęściej faworyzują grafit naturalny i grafit Kish, które są czasami błędnie

określane jako "monokrystaliczne". Jest to bardziej powszechne w badaniach oceniających właściwości materiału w kierunku prostopadłym do płaszczyzny. Uzasadnieniem tego wyboru jest to, że rzadkie "błędy ułożenia" są bardziej powszechne w syntetycznym HOPG, co maskowałoby rzeczywiste zachowanie jego transportu elektrycznego w osi c [A7, A8]. Jednak argument ten pomija fakt, że HOPG wykazuje również lepszą średnią kolejność układania w porównaniu z grafitem Kish i grafitem naturalnym, o czym świadczy ogólnie mniejsza mozaikowatość w pomiarach XRD.

W mojej pracy staram się rozstrzygnąć tę niespójność, określając, który parametr można by najlepiej wykorzystać do powiązania właściwości elektronicznych i strukturalnych grafitu, a ostatecznie zastosować jako miernik jakości materiału. Temat ten jest poruszany na różne sposoby w pracach [2, 5, 6, 7, 8].

Praca [8] zawiera mój najbardziej merytoryczny wkład do dyskusji (pozostałe prace są przedstawione poniżej ze względu na inne zawarte w nich punkty). Przeprowadzono w niej kompleksowe badanie reżimu kwantowania Landaua w graficie o różnej jakości. Co zaskakujące, zaobserwowano, że jakość próbki krystalograficznej, oszacowana na podstawie FWHM grafitu, nie jest skorelowana z ruchliwością elektronową próbki ani z amplitudą oscylacji kwantowych (QO) materiału. Szczególnie zaskakującym uzyskanym wynikiem było to, że dwa syntetyczne grafity o bardzo podobnej mozaikowości wykazywały wyraźnie różne amplitudy QO (ZYB i SPI-I). Pokazuje to, że obserwowane zjawisko nie było zwykłą konsekwencją wyboru "grafit naturalny kontra syntetyczny", ale raczej bardziej fundamentalną kwestią dotyczącą charakterystyki tego materiału.

Zakładając konwencjonalne podejście Lifszitza-Kosevicha do opisu kwantowego zachowania oscylacyjnego, zależność amplitud QO od próbki w stałej temperaturze można przypisać zmianom temperatury Dingle'a układu [A9]. Parametr ten jest miarą szybkości rozpraszania kwantowego i reprezentuje "temperaturę efektywną" związaną z poszerzeniem poziomów Landaua w badanej próbce. Jak wynika z doniesień badaczy, chropowatość (ang. *roughness*) materiału wydaje się lepiej korelować z takim zaburzeniem, zamiast z innymi powszechnie stosowanymi parametrami strukturalnymi. Chropowatość nie jest jednak łatwa do określenia przy wykorzystaniu standardowych technik XRD, nawet w (rzekomo) najwyższej jakości dostępnych HOPG.

Pofałdowania (ang. *corrugation*) zaobserwowane w próbkach miały charakterystyczne długości w skali setnych lub tysięcy nanometrów, rozciągając się na wiele komórek elementarnych (typowy rozmiar  $\sim 2,5$  Å). Taki wynik sugeruje, że na poszerzenie poziomów Landaua w graficie wpływają cechy pojawiające się w zakresach podobnych lub większych od promienia cyklotronowego materiału (ok. 300 nm/T).

Obserwacja ta pokazuje odpowiedniość grafenowo-grafitową, która staje się coraz bardziej istotna, gdy badacze stopniowo odchodzą od badania czystego grafenu, i podążają z powrotem w kierunku jego trójwymiarowego odpowiednika - motywowanego badaniem bloków grafitowych [A10] i skręconych (ang. *twisted*) struktur wielowarstwowych [A11]. Wiadomo już, że pofałdowania odgrywają ważną rolę w jednowarstwowym grafenie, działając jako centra rozpraszania dalekiego zasięgu [A12]. Wyznaczenie tego samego zachowania w **graficie objętościowym** jest kluczowe dla oceny jakości próbki w większych płatkach i w nowej generacji urządzeń z cechami odpowiedniości między własnościami objętościowymi i brzegowymi (ang. *bulk-boundary correspondence*) [A10]. Oczekuje się, że oddziaływania z podłożem nie będą miały na nie tak silnego wpływu jak na ich jednowarstwowych kuzynów ze względu na **efekty ekranowania**. Jednak wyniki w pozycji [8] pokazują, że jest to tylko częściowo prawdą, a morfologia podłoża nadal ma ogromne znaczenie. Obserwacja ta ma kluczowe znaczenie dla wykorzystania tego materiału we wszelkich zastosowaniach technologicznych związanych z kwantowo-mechaniczną naturą nośników ładunku (np. w elektronice spinowej (spintronice) lub elektronice dolinowej (valleytronice)).

Poza oczywistą przesłanką, że konwencjonalne parametry strukturalne niekoniecznie są przydatne w kategoryzacji grafitu, głównym przesłaniem pracy [8] **jest to, że brak spójnych i prostych metod oceny jakości próbek nie pozwala obecnie na właściwe porównanie dwóch różnych kryształów grafitu, nawet jeśli mają one technicznie tę samą gradację.** Jest to niezwykle ważne przy porównywaniu różnych rodzajów (lub próbek) materiału pod kątem ich właściwości, np. w płaszczyźnie i poza nią. Aby uniknąć wszelkich niejednoznaczności, właściwe badanie musi dotyczyć parametrów tej samej próbki. Można to zrealizować poprzez odpowiednią konfigurację eksperymentalną (np. nietypową geometrię styku), albo poprzez modyfikację właściwości próbki przez czynnik zewnętrzny.

#### **4.2.2 - Kontrola koncentracji nośników ładunku w graficie objętościowym**

Pofałdowanie powierzchni, chociaż jest decydującym czynnikiem w określaniu szybkości rozpraszania kwantowego (ang. *quantum scattering rate*), nie jest jedynym parametrem, na który należy uważać przy charakteryzowaniu nieuporządkowania w graficie. Przedyskutowałem ten problem w publikacjach [5, 6, 7], poprzez próbę zmiany właściwości elektronowych grafitu objętościowego za pomocą domieszkowania jonowego. Przetestowana przeze mnie teza brzmiała: Jeśli grafit jest monoatomowym półmetalem, powinien być poddany tym samym mechanizmom domieszkowania, które są rutynowo stosowane w przemyśle półprzewodnikowym.

Oczekuje się, że implantacja neutronów w graficie wprowadzi luki w sieci, które uwiężą elektrony i domieszkują materiał dziurami [A13]. Z punktu widzenia zachowania oscylacji kwantowych jednak, taka właściwość jest mniej prawdopodobna. Na przykład podwojenie koncentracji nośników ładunku w materiale wymagałoby podwojenia częstotliwości QO, a także ich obserwacji w dwukrotnie wyższych polach magnetycznych. Nie zaobserwowano tego w oryginalnych pracach nad implantacją neutronów w graficie, ani nie dostrzeżono w późniejszych badaniach (patrz publikacja [A13] i odnośniki tam zawarte). W tym kontekście, w moich badaniach zastosowałem inne podejście: wprowadzenie domieszki do materiału za pomocą implantacji jonowej i śledzenie powstałych w ten sposób efektów poprzez badanie ewolucji oporności w reżimie kwantyzacji Landaua w pomiarach  $R_{xx}$  i  $R_{xy}$ . Moje badania, udokumentowane w publikacjach [5, 7], wyraźnie pokazują, że wprowadzenie jonów do grafitu wzdłuż jego osi  $c$  nie modyfikuje częstotliwości QO, niezależnie od rodzaju i strumienia implantowanych pierwiastków. Zauważyłem jednak modyfikacje krzywych Halla i magnetooporu. Ponieważ częstotliwości kwantowego zachowania oscylacyjnego zapewniają bezpośredni pomiar koncentracji nośników ładunku w materiale, zmiany odnotowane w  $R_{xx}$  i  $R_{xy}$  można przypisać modulacji względnej ruchliwości między elektronami i dziurami. W tym przypadku główną rolą implantacji przeprowadzonej w graficie jest wprowadzenie nieporządku w materiale, z pomijalnym wpływem na przesunięcie jego poziomu Fermiego lub zmianę powierzchni Fermiego grafitu.

Alternatywą dla uniknięcia takich zaburzeń mogłoby być wprowadzenie jonów równoległe do płaszczyzn grafenu tworzących grafit. W tej orientacji rozległe kanały generowane przez warstwową strukturę grafitu działałyby jako ścieżki dla jonów, ułatwiając ich penetrację w materiale i zmniejszając ilość wprowadzanych zaburzeń - zjawisko określane jako "kanałowanie jonowe". Było to podejście wybrane w jednej z moich prac [6]. Tam po raz pierwszy zademonstrowano wpływ implantacji jonowej w płaszczyźnie na właściwości elektryczne mikrostruktur grafitowych. W tym celu wytworzono mezoskopowe nanorurki grafitowe techniką frezowania wiązką jonów. Próbki miały nietypową geometrię, rzadko spotykaną w literaturze. Mianowicie, miały one wysokość (ich wymiar wzdłuż kierunku układania) większą niż ich szerokość (mierzona wzdłuż kierunku w płaszczyźnie). Umożliwiło to łatwe rozpylenie jonami prostopadłymi do osi  $c$  wstęgi, a właściwości elektryczne urządzenia były badane po kolejnych

implantacjach wykonanych w **tej samej próbce**. Takie podejście pozwoliło ominąć problemy związane z własnościami kolejnych próbek, ponieważ zrezygnowano z porównywania różnych obiektów (zgodnie z wnioskami przedstawionymi wcześniej w pracy [8]).

Co ciekawe, implantacja jonowa wzdłuż płaszczyzn spowodowała gwałtowny i systematyczny spadek oporności grafitu - o ponad rząd wielkości, w zależności od dawki. Wynik ten silnie kontrastuje z moimi innymi próbami opisanymi w publikacjach [5, 7], które były wykonywane równoległe do osi c próbki

i dawały pomijalne zmiany oporności próbki w polu zerowym przy kolejnych implantacjach. Wyniki dla nanorurek [6] są dość dobrze wyjaśnione przez model Drudego, przy założeniu, że implantacja obejmuje zarówno jony międzywęzłowe w obszarze między warstwami, jak również generuje postępującą amorfizację próbki z powodu zblakanych jonów zrywających wiązania w płaszczyźnie [6]. Niestety, geometria próbki (która zostanie później wykorzystana w pracy [1] dla polaryzatorów na bazie grafitu) nie pozwoliła na właściwą ocenę innych parametrów materiału, takich jak efekt Halla czy oscylacje kwantowe. Umieszczenie próbki na płaskim podłożu, z osią c skierowaną wzdłuż powierzchni tego ostatniego, uniemożliwiło kwantowanie pól magnetycznych lub połączenie elektryczne urządzenia w konfiguracji paska Halla.

Pomimo wykazania, że implantacja jonowa może być stosowana jako narzędzie do kontrolowania magnetooporu lub oporności grafitu, zarówno poprzez modulację nieporządku [5, 7], jak i poprzez domieszkowanie [6], technika ta jest ograniczona z tego powodu, że po przygotowaniu próbki nie można jej łatwo dostroić. Alternatywą jest kontrolowanie koncentracji nośników ładunku w materiale in situ poprzez elektrostatyczne domieszkowanie cienkich płatków. Taka metoda ma tę dodatkową zaletę, że pozwala uniknąć zmienności próbki z powodu nieporządku i jest rutynowo stosowana - z dużym powodzeniem - w próbkach grafenu i wielowarstwowego grafenu. W przypadku grafitu wykazano już, że podejście to wpływa na kwantowy reżim oscylacyjny materiału [A14], choć mniej skutecznie niż w przypadku grafenu, ze względu na silne ekranowanie międzywarstwowe spowodowane półmetaliczną naturą grafitu.

#### **4.2.3 - Kontrola elektronowych przejść fazowych w wysokich polach magnetycznych**

Dysponując tą wiedzą, moje doświadczenia prowadzone w ramach pracy [4] stanowią pierwsze zastosowanie próbki grafitu domieszkowanego elektrostatycznie do badania elektronowych przejść fazowych indukowanych przez pola magnetyczne w głębokiej granicy kwantowej. Takie przejścia są cechą charakterystyczną grafitu objętościowego, po raz pierwszy opisaną w latach 80-tych, i manifestują się jako stan wysokiej rezystancji (HRS) w pomiarach  $R_{xx}$  dla  $B > 35$  T. Chociaż prawdziwa natura tego zjawiska pozostaje przedmiotem dyskusji, wszystkie teoretyczne podejścia mikroskopowe na ten temat opisują pochodzenie HRS jako niestabilność powierzchni Fermiego wzdłuż osi c grafitu, wywołaną przez przejście wymiarowe 3D do 1D, gdy zajęty jest tylko najniższy poziom Landaua i zniesiona jest degeneracja Zeemana [A15 - A17]. Eksperymentalne potwierdzenie, że cechą charakterystyczną stanu HRS jest jego zorientowanie wychodzące poza płaszczyznę (ang., *out-of plane*), było mało przekonujące. Ponieważ HRS obserwuje się zarówno w oporności grafitu w płaszczyźnie, jak i poza płaszczyznę, większość eksperymentów poświęconych jego badaniu próbuje skorelować pomiary wykonane w różnych geometriach na **różnych próbkach**. Jak wykazałem w publikacji [8], porównanie to jest dyskusyjne - w najlepszym przypadku - ze względu na fakt, że grafit nie jest pojedynczym kryształem. Z wyjątkiem pomiarów propagacji fal dźwiękowych [A16], do tej pory nie wykazano trójwymiarowego (lub w płaszczyźnie + poza płaszczyznę) charakteru HRS.

Moja praca [4] wniosła wkład w tę dyskusję poprzez wykazanie dwóch cech HRS, które, co zaskakujące, nie były dotychczas brane pod uwagę:

(i) Wykazałem, że zjawisko to jest tłumione w próbkach o grubości od 4 nm do 10 nm. Potwierdza to, że indukowany polem HRS w grafenie jest efektem objętościowym (a nie czysto dwuwymiarowym) i eksperymentalnie ustanawia 4 nm jako dolną granicę grubości dla jego obserwacji w wielowarstwowych urządzeniach grafenowych (próbki muszą mieć co najmniej 4 nm grubości).

(ii) Zademonstrowałem, że HRS można regulować poprzez zastosowanie napięć bramki w cienkich płatkach grafitu.

Wynik (ii) jest niezwykle intrygujący, jeśli weźmie się pod uwagę standardowe właściwości grafitu. Grafit wykazuje międzywarstwową długość ekranowania  $\sim 1$  nm [A14]. Dlatego modulacja HRS przez napięcia bramki (punkt (ii)) jest niezgodna z objętościowym charakterem zjawiska 3D występującym na długościach powyżej 4 nm w kierunku osi  $c$  (punkt (i)). Wyniki (i) i (ii) można pogodzić albo jeśli (a) długość ekranowania międzywarstwowego w graficie jest większa niż oczekiwano, albo jeśli (b) istnieje duży wkład do HRS w płaszczyźnie. W obu scenariuszach współistnienie HRS i QO Shubnikova-de-Haasa z częstotliwościami powyżej 40 T wymaga, aby HRS był wyzwalany poza granicą kwantową, co jest sprzeczne z obecnym rozumieniem tego zjawiska [A8, A14 - A17].

W pracy [4] doszedłem do wniosku, że (b) jest najbardziej prawdopodobnym scenariuszem. Hipoteza ta jest obecnie wspierana przez nowsze wyniki badań uzyskane przez innych badaczy w tej dziedzinie, takie jak pomiary prędkości dźwięku i ciepła właściwego wykonane przez D. LeBoeuf [A16] i C. Macenata [A17]. W tym kontekście nowa (2023) praca C. Mullana i in. [A18] może stanowić klucz do wyjaśnienia moich obserwacji z 2018 roku [4]. A mianowicie, w ich pracy teoretyzowano, że efekty skończonego rozmiaru w cienkich płatkach grafitu w reżimie kwantyzacji Landaua mogą prowadzić do elektronicznych fal stojących wzdłuż osi  $c$  grafitu, które nie są przypięte (ang. pinned) w kierunku  $x$ - $y$ . W świetle tych informacji, modulacja HRS zaobserwowana w mojej pracy [4] może być ponownie zinterpretowana jako zmiana dynamiki w płaszczyźnie takich stacjonarnych fal przez ukształtowanie potencjału powierzchniowego za pomocą kontroli napięć bramki, zapewniając w ten sposób mikroskopowe uzasadnienie dla opisanego przeze mnie charakteru HRS w płaszczyźnie [4].

Przedstawiony powyżej mechanizm, choć niezwykle interesujący, jest trudny do zweryfikowania za pomocą dostępnych do tej pory technik eksperymentalnych. W tym zakresie, w moich płatkach grafitowych z publikacji [4], jednym ze sposobów na ominięcie dyskusji lub interpretacji dotyczących roli ukształtowania potencjału powierzchniowego [A18] lub ekranowania [A14] byłoby uzyskanie jednorodnie domieszkowanych próbek, które w przeciwieństwie do tych uzyskanych w pracach [5, 6, 7], pozostają w reżimie kwantyzacji Landaua w polach magnetycznych przekraczających 7 T. Jest to podejście przyjęte ostatnio przeze mnie w publikacji [2]. W pracy tej, we współpracy z A. Alaferdovem z UNICAMP, otrzymano nowe próbki grafitu, uzyskane w wyniku intensywnej obróbki mechanicznej płatków, a następnie wyżarzania w temperaturze 3000°C przez kilka sekund.

Badając zachowania magnetorezystywnego tego materiału w wysokich polach magnetycznych, zaobserwowałem występowanie oscylacji kwantowych o częstotliwościach około 85 T [2]. Wartość ta jest znacznie większa niż wartości konwencjonalnie występujące w graficie, które mieszczą się w zakresie 4 T-7 T [A4]. Po bliższym przyjrzeniu się, takie nowe zachowanie oscylacyjne można przypisać nowej grupie nośników ładunku w graficie, z natywną koncentracją około 10 razy większą niż w czystym materiale. Charakterystyka parametrów strukturalnych próbki pozwoliła na wstępne przypisanie takich nośników samodomieszkowaniu spowodowanemu defektami wprowadzonymi podczas obróbki mechanicznej [2].

Niespodziewanie okazało się, że próbki zawierające taką dodatkową grupę nośników nadal wykazywały HRS, w tym samym zakresie pola i temperatury, jak w przypadku czystego grafitu [2, 4]. Dowodzi to możliwości wyzwalania HRS w graficie objętościowym także poza granicą kwantową. Ta obserwacja ma ogromne znaczenie, ponieważ wzmacnia tezę, że niestabilność elektronowa nie dotyczy wyłącznie najniższych pasm Landaua, potwierdzając wcześniejsze wyniki przedstawione przeze mnie w pracy [4]. Oprócz istotnego wkładu do wiedzy dotyczącej HRS, moje badania mają również fundamentalne znaczenie dla zastosowań: pokazanie indukowanej obecnością nieporządku grupy nośników ładunku w mikrostrukturach grafitowych zapewnia prostą, ale skuteczną metodę dostrajania właściwości wstęp grafitowych które mają zastosowania jako czujniki lub elementy łączące w rzeczywistych urządzeniach.

#### **4.2.4 - Badanie właściwości grafitu poprzez tworzenie nowych urządzeń**

W trakcie badania właściwości elektronowych grafitu zastosowałem nietypowe geometrie i konfiguracje próbek. Stanowią one prototypowe urządzenia, które zasadniczo mogą być wykorzystywane w przemyśle półprzewodnikowym lub jako takie mogą przyczynić się pogłębiania stanu wiedzy na temat grafitu.

Jedna z takich nietypowych geometrii, przedstawiona w publikacjach [1] i [6], została nazwana "nanorurkami grafitowymi". Są to bloki grafitu o submikronowym rozmiarze bocznym i grubości kilku mikrometrów. Są one osadzone na podłożach, z osią c materiału wzdłuż powierzchni podłoża (prostopadle do kierunku normalnego). W pracy [6] zbadałem ich potencjału pod kątem grafitowych międzypoleceń z mocno dostrojonymi koncentracjami nośników ładunku - sekcja. 4.2.2. Podczas dalszych analiz doszedłem do wniosku, że ta geometria może pozwolić na badania, a także zastosowania naturalnej anizotropii grafitu.

Tak jest w przypadku mojej pracy [1]. Badałem w niej właściwości optyczne grafitu prostopadłego do kierunku osi c. W przeszłości dostęp do tego typu próbek uzyskiwano poprzez mechaniczne polerowanie krawędzi próbek objętościowych [A20, A21]. Niezmiennie powoduje to jednak wyginanie się płaszczyzn grafenowych i bloków grafitowych, w efekcie dodając do pomiarów prostopadłych do płaszczyzny niechciany duży wkład w płaszczyźnie. W badaniach w pracy [1] ominąłem ten problem, wykorzystując bloki grafitowe z bokami wypolerowanymi przez frezowanie wiązką jonową (ten sam rodzaj próbki użyty wcześniej w publikacji [6]). To nowatorskie podejście pozwoliło mi zademonstrować możliwość wykorzystania anizotropii grafitu do budowy całkowicie węglowych polaryzatorów optycznych, w 100% kompatybilnych z obecną technologią opartą na grafenie. Jednocześnie moje pomiary pozwoliły na weryfikację wcześniejszych widm Ramana uzyskanych w graficie wzdłuż kierunku układania [A20, A21] - ale teraz bez ograniczeń związanych z mechanicznym polerowaniem.

Wreszcie, w pracy [3] zbadałem możliwość nadprzewodnictwa w urządzeniach opartych na graficie. Dyskusja wokół tego tematu nie jest nowa, sięga lat 70-tych [A22]. Jednak we wszystkich doniesieniach zjawisko to jest opisywane jako trudna do zweryfikowania właściwość grafitu, albo ukryta w obszarach małych „kałuż” (ang. *puddles*), albo w postaci niekoherentnego fazowo gazu nadprzewodzącego [A23]. W mojej pracy [3] próbowałem zająć się tą kwestią, badając nadprzewodzący efekt zbliżeniowy. Postawiona teza brzmiała: jeśli grafit jest rzeczywiście nadprzewodnikiem fazowo zmiennym lub zbiorem słabo sprzężonych wysp nadprzewodzących, to obecność zewnętrznego nadprzewodnika w pobliżu układu może wywołać makroskopową odpowiedź w materiale. Uzyskane wyniki istotnie wykazały, że zastosowanie elektrod nadprzewodzących do wstrzykiwania prądu wpłynęło na właściwości elektryczne grafitu objętościowego, z oznakami indukowanego nadprzewodnictwa utrzymującymi się na odległościach przekraczających 1 mm od miejsca umieszczenia elektrod nadprzewodzących.



Wyniki opisane w pracy [3] stają się jeszcze bardziej interesujące i coraz bardziej istotne w kontekście twistroniki. Obecnie wiadomo, że skrócone grafeny wielowarstwowe wykazują nadprzewodnictwo, generowane przez niestabilności elektronowe spowodowane spłaszczeniem pasma. To ostatnie jest wynikiem powstania supersieci wprowadzonych przez okresowe niedopasowania między górną i dolną warstwą [A25]. To samo dzieje się w objętościowych materiałach warstwowych, aczkolwiek obszary poddane takim potencjałom są rozłożone losowo w całej objętości materiału. W tym kontekście moje wyniki pokazują, że możliwe jest wykorzystanie zjawiska obserwowanego w (quasi) kryształach 2D również w układach 3D, poprzez odpowiednie zaprojektowanie geometrii urządzenia. Dodatkową zaletą tej metody jest mniejsza podatność układów objętościowych na warunki środowiskowe, spowodowana ich mniejszym stosunkiem powierzchni do objętości w porównaniu z kryształami czysto dwuwymiarowymi.

### **Bibliografia**

- [A1] D. Chung, J. of Materials Science 37. 1475 (2002)
- [A2] A. Arndt et al., Phys Rev. B 80, 195402 (2009)
- [A3] J. Martin et al., Nature Physics 4, 144 (2008)
- [A4] S. Hubbard et al, Phys Rev. B 83, 035122 (2011)
- [A5] A. Rene i J. Ubbelohde, Proc. R. Soc. Lond. A 327, 289 (1972)
- [A6] B. Kelly, "*Physics of Graphite*" Applied Science Publishesrs, London (1981).
- [A7] B. Fauque et al., Phys. Rev. Lett. 110, 266601 (2013)
- [A8] G. Morgan i C. Uher, Phylosophical Magazine B 44, 427 (1981).
- [A9] R. Dingle, Proc. R. Soc. London Ser. A 211, 517 (1952)
- [A10] C. Mullan et al, Nature 620 756 (2023)
- [A11] C. Xu et al, Phys. Rev. Lett 121, 087001 (2018)
- [A12] M. Katsnelson i A. Geim, Phil. Trans. R. Soc. A 366, 195 (2008)
- [A13] H. Yaguchi i J. Singleton, J. Phys: Cond. Mat. 21, 344207 (2009)
- [A14] Y. Zhang et al, Phys. Rev. Lett. 94, 176803 (2005)
- [A15] F. Arnold et al, Phys. Rev. Lett 119, 136601 (2017)
- [A16] D. LeBoeuf et al, Nat. Comm. 8, 1337 (2017)
- [A17] C. Macenat et al., Phys. Rev. Lett. 126, 106801 (2021)
- [A18] C. Mullan et al, Nature 620, 756 (2023)
- [A19] A. Alaferdov et al, Carbon 129, 826 (2018)
- [A20] G. Katagiri et al, Carbon 26, 565 (1988).
- [A21] Y. Kawashima, Phys Rev. B 59, 62 (1999)
- [A22] K. Antonowicz, Nature 247, 358 (1974)
- [A23] Y. Kopelevich et al, Phys. Rev. B 73, 165128(2006)
- [A24] T. Scheike et al, Adv. Materials 24, 5826 (2012)
- [A25] L. Balents et al., Nat. Phys. 16, 725 (2020)

5. Prezentacja znaczącej działalności naukowej lub artystycznej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub uczelni, instytucji naukowej lub kulturalnej, w szczególności w instytucjach zagranicznych

### **Staż na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Lipsku, Niemcy (14 miesięcy)**

Po uzyskaniu stopnia doktora w 2014 r. otrzymałem grant na 14-miesięczny staż na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Lipsku (Niemcy). Tam dołączyłem do grupy Nadprzewodnictwa i Magnetyzmu,

kierowanej przez prof. dr Pablo Esquinazi (PE). Zdecydowałem się na staż z dwóch powodów: z jednej strony zdobycie doświadczenia z technikami mikrofabrykacji, a z drugiej strony zbadanie możliwości nadprzewodnictwa w nano-taśmach grafitowych. Drugi cel był aktywnym polem badawczym PE.

Aby osiągnąć założone cele, musiałem uzyskać mezoskopowe próbki grafitu w nietypowych geometriach, zbadać rolę nieporządku ułożenia (ang. *stacking disorder*) na ich właściwości elektryczne i magnetyczne (poprzez transport elektryczny i pomiary magnetyczne) oraz uruchomić oprzyrządowanie do magnetometrii.

W trakcie mojego pobytu z powodzeniem zaprojektowałem i uruchomiłem magnetometr wibracyjny i torsijsny, które zostały wykorzystane do eksperymentów w połączeniu z magnetometrią SQUID, konwencjonalnymi pomiarami magnetotransportu elektrycznego i mikroskopią sił atomowych. Udało mi się również wytworzyć próbki grafitu w konfiguracjach cienkowarstwowych i cienkowstęgowych, wykorzystując litografię elektronową i techniki zogniskowanej wiązki jonów.

Staż zrealizowany na uniwersytecie w Lipsku był moim fundamentalnym doświadczeniem, ponieważ wyposażył mnie w profesjonalny zestaw umiejętności niezbędnych do wytwarzania próbek, które wykorzystam później w mojej karierze (np. w pracach [1, 2, 4, 5, 6, 7]). Niestety, jeden z moich głównych celów - weryfikacja nadprzewodnictwa na wytworzonych strukturach - pozostał nieosiągnięty. Jednak wyniki uzyskane w trakcie stażu zostały wykorzystane do badania efektu nieuporządkowania i implantacji jonów w graficie (rozdz. 4.2.1 i 4.2.2), zarówno w kierunku równoległym, jak i prostopadłym do płaszczyzn grafitu. Zaowocowało to (bezpośrednio lub pośrednio) publikacjami w czasopismach J. Appl. Phys, Appl. Phys Lett. i J. Low Temp. Phys.

### **Staż w Narodowym Laboratorium Wysokich Pól Magnetycznych w Tuluzie, Francja (12 miesięcy)**

Po ukończeniu badań na uniwersytecie w Lipsku dołączyłem do grupy NANO w Narodowym Laboratorium Wysokich Pól Magnetycznych (LNCMI) w Tuluzie (Francja). Moja praca w tej instytucji odbywała się w ścisłej współpracy z dr Walterem Escoffierem (WE) i dotyczyła wytwarzania i charakterystyki elektronicznej nanoobjektów o wysokiej krystaliczności wytwarzanych mięką chemią. Badałem mianowicie właściwości elektryczne monokrystalicznych nanogwiazd platynowych w polach magnetycznych do 90 T. Aby osiągnąć ten cel, musiałem wdrożyć procedury czystego pomieszczenia (ang. *clean-room procedures*) niezbędne do ich kontaktu elektrycznego w nowo utworzonym laboratorium procesowania próbek.

Podczas mojego pobytu we Francji kontynuowałem również wcześniejsze współprace i korzystałem z dostępnych urządzeń, aby rozwijać moje badania nad grafitem. W tym czasie przeprowadziłem pierwsze pomiary magnetotransportu na cienkich warstwach grafitu w wysokich polach magnetycznych. Próbki te mają ogromne znaczenie dla zrozumienia elektronowych przejść fazowych w graficie indukowanych polem magnetycznym, ponieważ są to cienkie warstwy, które zachowują się jak grafit objętościowy, ale ich koncentracja nośników ładunku może być regulowana poprzez bramkowanie dolne i górne (a także implantację).

Badania opracowane w LNCMI zakończyły się sukcesem i zaowocowały określeniem procedur czystego pomieszczenia („clean-room procedures”) niezbędnych do przygotowania w przyszłości układów kilkuwarstwowych i obiektów submikrometrowych. Wyniki w nanogwiazdach Pt dały urządzenia działające jako nanometryczne mnożniki częstotliwości, co ogłosiliśmy w czasopiśmie *Nanoscale* [*Nanoscale* 9, 14635 (2017)]. W międzyczasie, moje badania właściwości elektrycznych grafitu stworzyły podstawy do wieloletniej współpracy, która jak dotąd zaowocowała dwiema publikacjami w czasopiśmie *Carbon* (sekcja 4.2.3).

## **Staż w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk, Polska (48 miesięcy)**

Mój pobyt we Francji zakończył się w październiku 2017 r., po czym przeprowadziłem się do Warszawy. Tam dołączyłem do grupy prof. dr hab. Marty Z. Cieplak (MC) w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk (IFPAN). Moim zadaniem, jako post-doca, było wdrożenie mikrofalowej spektroskopii impedancyjnej w bezpośredniej współpracy z dr Piotrem Gierłowskim (z tej samej grupy). Celem końcowym było zmierzenie głębokości wnikania Londona w nadprzewodnikach na bazie żelaza w funkcji nieporządku indukowanego przez bombardowanie elektronami.

W trakcie mojej pracy korzystałem również z infrastruktury IFPAN, aby kontynuować badania nad właściwościami elektrycznymi i magnetycznymi grafitu i innych wysoko mobilnych quasi-skompensowanych półmetali, takich jak bizmut. W tym celu wykorzystywałem oprzyrządowanie do transportu elektrycznego istniejące w grupie MC do wykonania pomiarów heterostruktur nadprzewodnik-grafit i nadprzewodnik-Bi oraz do scharakteryzowania próbek, które zostaną później wykorzystane do pomiarów z WE, z którym utrzymywałem kontakt po zakończeniu stażu w LNCMI.

Pracę w IFPAN oceniam jako udaną. Wyniki dotyczące mikrofalowej spektroskopii impedancyjnej były szczególnie trudne i doprowadziły do interesujących wyników pokazujących indukowaną termicznie poprawę właściwości nadprzewodzących  $Ba K_{0.504} Fe_2 As_2$ , o czym niedawno informowaliśmy [Physica C, DOI 10.1016/j.physc.2023.1354347]. Prace nad grafitem i bizmutem doprowadziły do publikacji w J. Appl. Phys, J. Phys. Cond. Mat. oraz w J. of Magnetism and Magnetic Materials (częściowo opisane w rozdziale 4.2.3).

6. Prezentacja osiągnięć dydaktycznych i organizacyjnych oraz osiągnięć w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki

### **Nauczanie**

#### **Przed doktoratem:**

- Laboratorium elektromagnetyzmu (Ćwiczenia laboratoryjne)
- Laboratorium mechaniki (Ćwiczenia laboratoryjne)
- Wprowadzenie do fizyki ogólnej (Ćwiczenia audytoryjne)
- Elektromagnetyzm (Ćwiczenia audytoryjne)

#### **Po doktoracie:**

- Fizyka węgla (Wykłady)
- Równanie Diraca w materii skondensowanej (Wykłady)
- Podstawy fizyki II (elektryczność i magnetyzm) (Asystent przy ćwiczeniach laboratoryjnych)
- Laboratorium fizyki dla nanoinżynierii (Ćwiczenia laboratoryjne)
- Elektrodynamika (Ćwiczenia audytoryjne)
- Laboratorium elektroniki (Ćwiczenia laboratoryjne)
- Mechanika kwantowa (Ćwiczenia audytoryjne)
- Ćwiczenia laboratoryjne z ciał stałych - Optyka (Ćwiczenia laboratoryjne)
- Próżnia i kriogenika (Wykłady)

### **Popularyzacja nauki**

- Udział w Europejskiej Nocy Naukowców (Nuit Europeene des Chercheurs) w 2016 r. (Tuluza, Francja)

- udział w Warszawskim Pikniku Naukowym, lata 2018 i 2019 (Warszawa, Polska).
- udział w Letniej Szkole Fizyki, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, lata 2022 i 2023 (Warszawa, Polska).

### **Wkład organizacji**

- Komitet organizacyjny XIX Ogólnopolskiej Konferencji Nadprzewodnictwa (Polska, 2019).

7. Oprócz informacji określonych w punktach 1-6 powyżej, wnioskodawca może podać inne informacje o swojej karierze zawodowej, które uzna za istotne.

#### Przyznane granty jako badacz główny

- 2014-2015 *The secrets of Dirac semimetals.* (Agencja: Brazylijska Narodowa Rada Naukowa - CNPq),
- 2015-2016 *Unveiling the fundamental electronic properties of nano-objects in strong magnetic fields.* (Agencja: Campus France)
- 2018-2021: *Unveiling the nature of electronic phase transitions in Dirac systems* (Narodowe Centrum Nauki (NCN), Polska - projekt badawczy POLONEZ).



(podpis wnioskodawcy)