

Nieadiabatyczne nadprzewodnictwo w dwuwymiarowych materiałach heksagonalnych

Non-adiabatic superconductivity in two-dimensional hexagonal materials

D. Szczęsniak^{1,*}

¹Institute of Physics, Faculty of Science and Technology, Jan Długosz University in Częstochowa, 13/15 Armii Krajowej Ave., 42200 Częstochowa, Poland

**d.szczesniak@ujd.edu.pl*

Materiały dwuwymiarowe (2D) stały się obiecującą platformą pozwalającą na badanie nadprzewodnictwa fononowego w warunkach zredukowanej wymiarowości [1]. Szczególnie istotnym aspektem tych układów jest fakt, że stwarzają one możliwość analizy fazy nadprzewodzącej której charakterystyka wykracza poza standardowy obraz teorii Bardeena-Coopera-Schrieffera (BCS). Wynika to nie tylko z obecności silnego sprzężenia elektron-fonon oraz efektów retardacyjnych [2–4], ale także z faktu, że materiały te często charakteryzują się porównywalnymi skalami energetycznymi elektronów i fononów [5]. W konsekwencji może to prowadzić do załamania twierdzenia Migdala oraz pojawienia się efektów nieadiabatycznych, mających obserwowalne konsekwencje dla termodynamicznych właściwości fazy nadprzewodzącej [5].

W niniejszym wystąpieniu przedstawiony zostanie spójny przegląd nadprzewodnictwa fononowego w wybranych układach 2D, ze szczególnym uwzględnieniem związków bazujących na grafenie. Dyskusja dotyczyć będzie nie tylko mechanizmów prowadzących do powstania stanu nadprzewodzącego w tych materiałach [5, 6], lecz także możliwych sposobów wzmacniania tej fazy oraz ograniczeń omawianej platformy [7, 8]. Szczególną uwagę poświęci się roli niestabilności strukturalnych, jak również domieszkowania oraz zewnętrznych perturbacji w kształtowaniu nadprzewodnictwa w układach o niskiej wymiarowości.

Dyskusja prowadzona będzie przede wszystkim w ramach formalizmu Eliashberga, który rozszerza konwencjonalną teorię BCS poprzez uwzględnienie efektów silnego sprzężenia, retardacji oraz efektów nieadiabatycznych. Szczególny nacisk położony zostanie na wkład efektów nieadiabatycznych, które wydają się istotnie modyfikować właściwości nadprzewodzące w porównaniu z przewidywaniami konwencjonalnych modeli [5]. Ich wpływ omawiany będzie w odniesieniu do reprezentatywnych wielkości termodynamicznych, w tym temperatury krytycznej, przerwy nadprzewodzącej oraz powiązanych z nimi parametrów. Rozważona zostanie również skalowalność tych efektów w celu uzyskania głębszego wglądu w fundamentalną fizykę nadprzewodników niskowymiarowych oraz wskazania potencjalnych wytycznych do projektowania nowych materiałów 2D o ulepszonych właściwościach nadprzewodzących [7, 8]. Jako perspektywa dalszych badań omówiona zostanie koncepcja modyfikacji właściwości nadprzewodzących materiałów 2D zarówno poprzez redukcję wymiarowości, jak i domieszkowanie wodorowe, na przykładzie dwuwymiarowych wodorków metali [9].

Two-dimensional (2D) materials have emerged as a promising platform for studying phonon-mediated superconductivity at reduced dimensionality [1]. In this context, a particularly important aspect of these systems is that they provide an opportunity to explore superconductivity beyond the standard Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) picture. This stems not only from the presence of strong electron-phonon coupling and retardation effects [2–4], but also from the fact that these materials are often characterized by comparable electronic and phononic energy scales [5]. As a result, the latter may lead to the breakdown of Migdal’s theorem and the emergence of non-adiabatic effects with observable consequences for the thermodynamic properties of the superconducting phase [5].

Here, a coherent overview of phonon-mediated superconductivity in selected 2D systems is presented, with emphasis on graphene-based compounds. The discussion concerns not only the mechanisms leading to superconducting state formation in these materials [5, 6], but also possible routes toward enhancing this phase and the intrinsic limitations of the discussed platform [7, 8]. Particular attention is given to the role of structural instabilities, doping, and external modifications in shaping superconductivity at low dimensions.

The analysis is primarily conducted within the Eliashberg formalism, which extends conventional BCS theory by incorporating strong-coupling, retardation, and non-adiabatic effects. Special emphasis is placed on the non-adiabatic contributions, which appear to substantially modify superconducting properties beyond conventional predictions [5]. Their influence is discussed with respect to representative thermodynamic observables, including the critical temperature, superconducting energy gap, and related quantities. The scalability of these effects is further considered to provide deeper insight into the fundamental physics of low-dimensional superconductors and to identify possible guidelines for designing novel 2D materials with enhanced superconducting properties [7, 8]. As a future research perspective, the concept of modifying the superconducting properties of hexagonal materials not only through dimensionality reduction, but also through hydrogen doping, will be discussed using the example of two-dimensional metal hydrides [9].

References

- [1] P. Jamwal, R. Ahuja, R. Kumar, *Nanotechnol.* **37**, 042002 (2026).
- [2] D. Szczęśniak, A. P. Durajski and R. Szczęśniak, *J. Phys.: Condens. Matter* **26**, 255701 (2014).
- [3] A. P. Durajski, D. Szczęśniak and R. Szczęśniak, *Solid State Commun.* **200**, 17 (2014).
- [4] D. Szczęśniak, *EPL* **111**, 18003 (2015).
- [5] D. Szczęśniak and R. Szczęśniak, *Phys. Rev. B* **99**, 224512 (2019).
- [6] D. Szczęśniak, *Phys. Rev. B* **113**, 035402 (2026).
- [7] D. Szczęśniak and E. A. Drzazga-Szczęśniak, *EPL* **135**, 67002 (2021).
- [8] D. Szczęśniak, *EPL* **142**, 36002 (2023).
- [9] D. Szczęśniak, A. Z. Kaczmarek and Z. Dawei, to be published / in preparation (2026).