

## 9. Levitation control - Ovládání levitace (Zdeněk Janů)

Následující videa na YouTube názorně a hezky ukazují, jak experiment provést. Podrobné vysvětlení jevu tam není. To je v odkazech "Literatura - Experiment" a "Literatura - Teorie". Poslední už je ale hodně nad rámec středoškolské fyziky.

### Video

- 1) Magnet Tricks z 19. 2. 2022, 12 Diamagnetic Levitation Setups to Try with Pyrolytic Graphite and Neodymium Magnets, <https://www.youtube.com/watch?v=Vy9uWXgbKy0>
- 2) Forrest Trenaman , Levitate a Piece of Graphite on Magnets - \$10 Project, 23. 9. 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=To6VvIKGxQw>
- 3) Kevin Patterson (Kevin H. Patterson), Diamagnetic Levitation with Pyrolytic Graphite - \$20 How-To, 27. 6. 2014, <https://www.youtube.com/watch?v=TID12QObooc>

### Literatura - Experiment

- 1) Masayuki Kobayashi and Jiro Abe, Optical Motion Control of Maglev Graphite, J. Am. Chem. Soc. 2012, 134, 20593–20596; doi:10.1021/ja310365k

Autoři ukazují, že magneticky levitujícím pyrolytickým grafitem lze pohybovat na libovolném místě jeho fotozařováním. V článku popisují, že systém optického řízení pohybu vyžaduje pouze permanentní magnety NdFeB a zdroj světla. Optický pohyb je poháněn fototermálně indukovanými změnami magnetické susceptibility grafitu. Dále demonstrují, že světelnou energii lze přeměnit na rotační kinetickou energii. Zjistili, že levitující grafitový disk se otáčí rychlostí přes 200 ot/min na slunečním světle, což umožňuje vyvinout nové systémy pro přeměnu světelné energie.

- 2) Miriam Ewall-Wice, Steven Yee, Kelly DeLawder, Steven R. Montgomery, Peter J. Joyce, Cody Brownell, and Hatem ElBidweihy, Optomechanical Actuation of Diamagnetically Levitated Pyrolytic Graphite, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 55, NO. 7, JULY 2019 2501506; doi:10.1109/TMAG.2019.2892332

Magnetická susceptibilita pyrolytického grafitu (PyG) je teplotně závislá. Pod vnějším magnetickým polem na levitující vzorek PyG s lokalizovanou změnou teploty působí nerovnoměrné diamagnetické síly. V tomto článku prezentují studii makroskopického optomechanického posunutí levitovaného vzorku PyG pomocí laserového zdroje sloužícímu k lokálnímu zvýšení teploty. Dynamické simulace metodou konečných prvků ukazují, že lokalizované zvýšení teploty vzorku, simulující laserový zdroj, snižuje diamagnetickou sílu v dané lokální oblasti, což vede k posunutí vzorku PyG v rovině permanentního magnetického pole. Experimentální nastavení vytvořená s použitím různých laserových zdrojů a vzorků potvrzují rozsah použitelnosti jevu na různé podmínky. Další nastavení bez pohyblivých částí snižuje pravděpodobnost, že by posunutí mohlo způsobit proudění vzduchu, jak se asi stalo v předchozích studiích.

### Literatura - Teorie

- 3) Manato Fujimoto and Mikito Koshino, Diamagnetic levitation and thermal gradient driven motion of graphite, PHYSICAL REVIEW B 100, 045405 (2019);  
DOI:10.1103/PhysRevB.100.045405

Teoreticky studují levitaci a tepelně řízený pohyb grafitu. Pomocí kvantově mechanicky odvozené magnetické susceptibility vypočítávají rovnovážnou polohu diamagnetického grafitu levitujícího nad periodickým uspořádáním magnetů a zkoumají závislost výšky levitujícího grafitu na susceptibilitě a geometrii. Zjišťují, že výška levitace je maximálně dosažena v určité periodě magnetů a maximální výška je pak lineárně úměrná susceptibilitě levitujícího objektu. Porovnávají běžný grafit s vrstvami AB a náhodně vrstvený grafit a ukazují, že druhý jmenovaný vykazuje velkou levitační délku, zejména při nízkých teplotách, protože jeho diamagnetismus je nepřímo úměrný teplotě. Nakonec demonstrují, že teplotní gradient posouvá levitující objekt směrem ke straně s vyšší teplotou, a odhadují generovanou sílu jako funkci susceptibility.

- 4) Bogdan Semenenko and Pablo D. Esquinazi, Diamagnetism of Bulk Graphite Revised, Magnetochemistry 2018, 4, 52; doi:10.3390/magnetochemistry4040052

Podle autorů nedávno publikované strukturní analýzy a galvanomagnetické studie velkého počtu různých objemových a mezoskopických vzorků grafitu vysoké kvality a čistoty odhalují, že běžný obraz, který předpokládá, že vzorky grafitu jsou polokovem s homogenní hustotou nosičů vodivostních elektronů, je zavádějící. Tyto nové studie naznačují, že hlavní dráha elektrického vedení probíhá v rámci 2D rozhraní vložených do polovodičových Bernalových a/nebo romboedrických oblastí vrstvení.

Tato nová znalost je vede k experimentální a teoretické revizi diamagnetismu vzorků grafitu. Zjistili, že susceptibilita vysoce čistých orientovaných vzorků grafitu na ose  $c$  není ve skutečnosti konstantní, ale může se měnit o několik desítek procent u objemových vzorků s tloušťkou  $t \geq 30 \mu\text{m}$ , zatímco u vzorků s menší tloušťkou mnohem více. Pozorovaný pokles susceptibility s tloušťkou vzorku se kvalitativně podobá poklesu zaznamenanému pro elektrickou vodivost a naznačuje, že hlavní část diamagnetického signálu na ose  $c$  není vlastní ideální struktuře grafitu, ale je způsobena vysoce vodivými 2D rozhraními. Interpretace hlavního diamagnetického signálu grafitu souhlasí s publikovaným popisem jeho galvanomagnetických vlastností a poskytuje vodítka k pochopení některých magnetických zvláštností tenkých vzorků grafitu.

- 5) J. W. McClure, Diamagnetism of Graphite, PHYSICAL REVIEW VOLUME 104, NUMBER 3  
NOVEMBER 1, 1956

Magnetická susceptibilita vodivostních elektronů v grafitu byla vypočtena s využitím Wallaceovy dvourozměrné pásové struktury. Energetické hladiny indukované magnetickým polem byly vypočteny metodou Luttingera a Kohna, s přihlédnutím k velkým (v tomto případě) efektům pásových přechodů, které nejsou zahrnuty v Landau-Peierlsově metodě. Shoda se susceptibilitou pozorovanou při vysokých teplotách je dosažena s volbou 2,6 eV pro ezonanci -integrálního parametru  $\gamma_0$ . Detaily de Haas-van Alphenova jevu nelze reprodukovat, což naznačuje, že pro vysvětlení nízkoteplotních experimentů je zapotřebí složitější pásová struktura.