

Další nápady z Malé Hraštic: odpuzování magnetů

LEOŠ DVORÁK

Katedra didaktiky fyziky, MFF UK, Praha

Abstrakt

Příspěvek prezentuje několik pokusů s jednoduchými pomůckami pro měření síly mezi malými magnety. Sílu měříme pomocí levných digitálních vah, torzních vah nebo pomocí vahadla. Měření torzními vahami přitom může sloužit jako analogie Cavendishova pokusu či Coulombova měření síly mezi náboji; historickou analogii má i měření pomocí vahadla. V popsaných měřeních nejde o velké demonstrační pokusy, ale o ukázkou, jak lze pomocí vlastnoručně vyrobených pomůcek změřit i malé síly (řádu desítek μN), na které běžné digitální vážky vůbec nereagují.

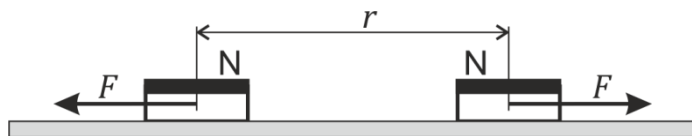
Úvod

Námět na níže popsaná měření vznikl na jarním soustředění pro budoucí učitele fyziky (viz [1] ev. [2] a další odkazy tam uvedené). Hlavní téma letošního odborného programu bylo „Vzájemné působení“. Odpuzování magnetů je hezkým problémem, který se nabízel k experimentování. Mimo jiné i proto, že na workshopu na letošní konferenci Elixíru do škol jsme experimentovali s „levitující tužkou“, která je postavena na právě na odpuzování magnetů – viz obr. 1 a příspěvek [3].



Obr. 1 - Odpuzování magnetů využité pro levitaci tužky (převzato z [3]).

Že se magnety odpuzují, si samozřejmě všimneme i v jednodušších pokusech, například když je položíme vedle sebe na stůl stejnými póly nahoru, viz obr. 2.



Obr. 2 - Magnety v tomto uspořádání, např. položené na stole, se odpuzují.

Ze zkušenosti víme, že když jsou magnety blíže k sobě, odpuzují se silněji. Ale jak moc silněji? Jinak řečeno: **Jak odpuzování magnetů závisí na vzdálenosti?**

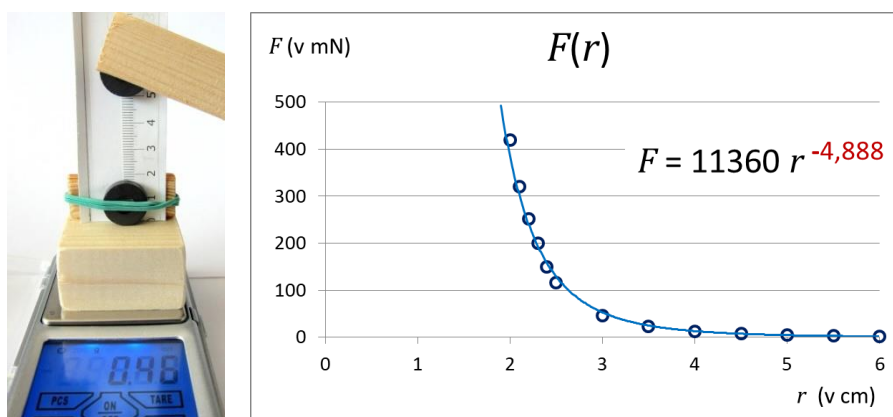
Teoreticky se dá síla mezi magnety odvodit, když jsou magnety velmi malé, takže je můžeme brát jako elementární dipóly. Síla v tomto případě klesá se čtvrtou mocninou vzdálenosti:

$$F \sim 1/r^4. \quad (1)$$

Teoretické odvození lze najít ve VŠ učebnicích, většinou pro případ elektrických dipólů, viz např. [4], zde se jím blíže nebudeme zabývat. Místo toho si zkusíme jednoduchými pokusy prověřit, zde vztah (1) platí, a jak velké síly mezi magnety opravdu jsou.

Měření malými digitálními vahami

Malé digitální vážky lze dnes koupit levně (za několik set korun) a ve školních pokusech už bývají používány, viz např. [2]. Citlivější typy mají rozlišení 0,01 g, což odpovídá síle 0,1 mN. Příklad, jak je lze využít pro měření síly mezi magnety, a naměřené výsledky ukazuje obr. 3.



Obr. 3 - Příklad uspořádání měření síly digitálními vážkami a naměřené výsledky

V našem případě byla měřena síla mezi feritovými magnety ve tvaru prstence s vnějším průměrem 17 mm, vnitřním průměrem 7,5 mm a výškou 5 mm; šlo o stejné magnety jako ty v „levitující tužce“. Jak vidno i z obrázku, při vzdálenosti os magnetů 5 cm ukázaly vážky 0,46 g, takže síla je asi 4,6 mN. (To je v dobré shodě s teoretickou hodnotou, která vychází z vlastností magnetů, příslušný výpočet pro elementární dipóly dává asi 4,8 mN.)

Bohužel praktický experiment ukáže, že s levnými digitálními vážkami nemůžeme měřit sílu ve větších vzdálenostech – při malých silách odpovídajících závažím pod asi 0,1 až 0,2 g se vážky často jakoby „zasekávají“ a neměří přesně. Reálně s danými magnety šlo měřit do vzdálenosti asi 6 cm.

Druhý problém ukazuje graf na obr. 3: Když Excel naměřenými daty proložil mocninnou závislost, výsledek vypadá, jako by síla mezi magnety klesala spíše s *pátou* mocninou vzdálenosti, a ne se čtvrtou, jak předpovídá teorie.

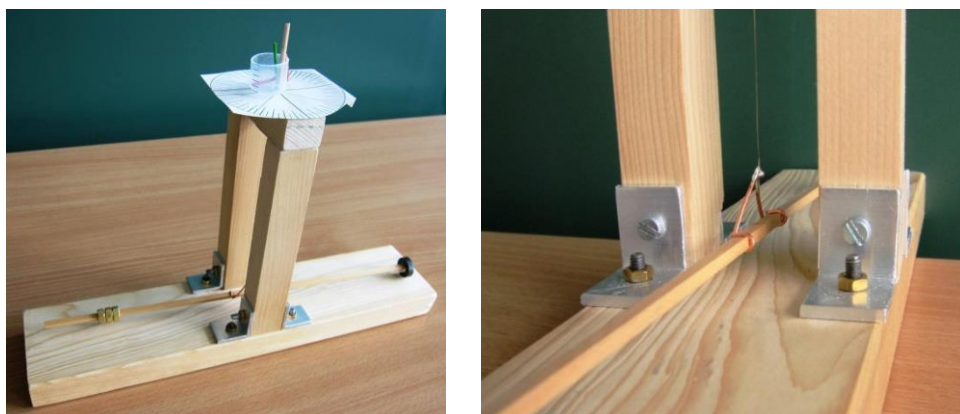
Toto zdánlivě podivné chování se ale dá pochopit. Závislost (1) platí pro elementární dipóly, v praxi tedy tehdy, když jsou rozměry magnetů mnohem menší než jejich vzdálenost. To při měření podle obr. 3, kdy se vzdálenost os magnetů blížila i dvěma centimetrům, není splněno. Bylo by proto zajímavé jít do větších vzdáleností. Pro ně už

ale jsou levné digitální váhy málo citlivé. Potřebujeme přístroj, který bude schopen měřit podstatně menší síly.

Měření torzními vahami (vlastní konstrukce)

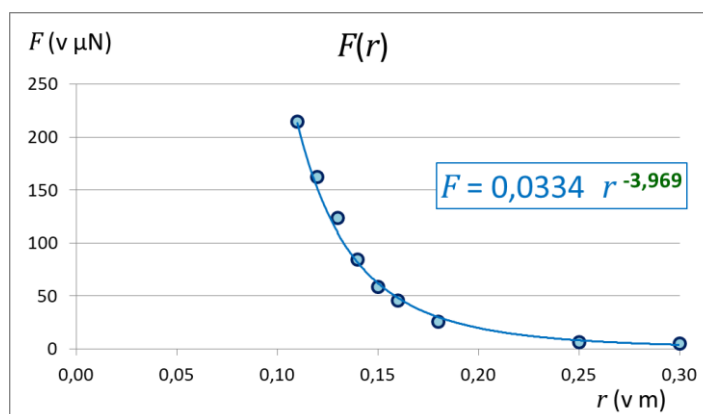
Inspirovat nás mohou historické pokusy: Cavendishovo měření přitahování olověných koulí a Coulombovo měření síly mezi elektrickými náboji. V obou těchto měřeních se používaly torzní váhy. V nich je rameno vah zavěšeno na tenkém vlákně. Ke zkroucení vlákna, a tedy k pozorovatelné výchylce ramena, stačí velmi malý moment sil, tedy velmi malá síla na konci ramene.

Torzní váhy si lze vyrobit vlastnoručně. Obr. 4 ukazuje jednu možnou konstrukci.



Obr. 4 - Jednoduché torzní váhy vlastní konstrukce.

Vláknem je měděný drátek vytažený z tenkého měděného lanka, průměr drátku byl 0,15 mm, jeho drátku o něco více než 10 cm. (Tato konstrukce byla udělána, aby bylo možno torzní váhy převážet, tedy aby výsledná pomůcka byla dostatečně robustní. Pokusy lze ovšem dělat i s výrazně jednoduššími konstrukcemi torzních vah.) Výsledek měření ukazuje obr. 5.



Obr. 5 - Výsledek měření s pomocí torzních vah.

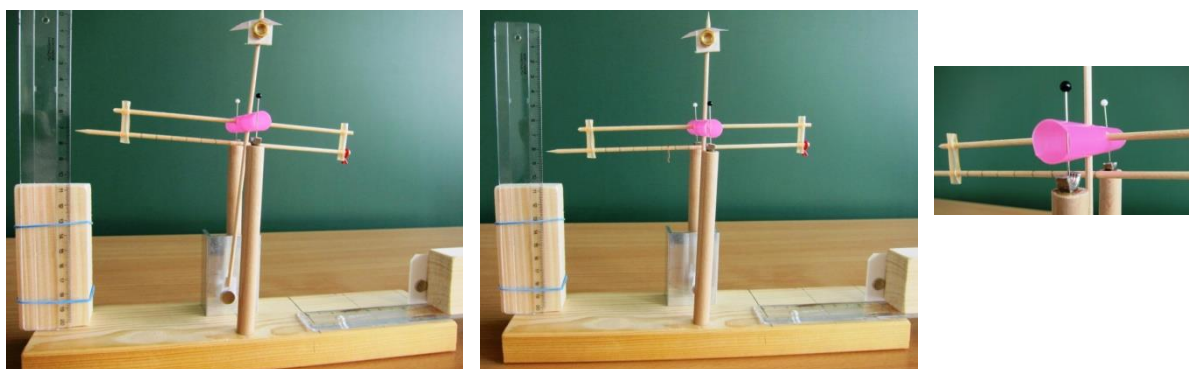
Na první pohled to vypadá, že jsme závislost síly na vzdálenosti ověřili až fantasticky přesně. Ovšem to, že se exponent proložené závislosti liší od -4 jen nepatrně, je v tomto případě jen náhoda. (Reálně mohou vyjít hodnoty mezi 3,8 až asi 4,2.)

Torzní váhy umožnily měřit sílu až do vzdálenosti asi 25 až 30 cm, naopak ovšem nejsou použitelné pro měření v malých vzdálenostech, kde jsou síly příliš velké. Při vzdálenosti magnetů 10 cm bylo vlákno zkrouceno o více než 270 stupňů a při vzdálení magnetu už zůstalo trochu zkroucené, zřejmě došlo k plastické deformaci mědi, z níž je vlákno vyrobeno. Je vidět, že s našimi pomůckami jsme ještě „nepokryli“ měření síly ve vzdálenostech mezi asi 6 až 11 cm.

Měření pomocí vahadla

Vhodnou pomůckou může být docela obyčejné vahadlo. I to bylo v historii použito – jeho pomocí proměřoval sílu mezi elektrickými náboji John Robison, dokonce ještě dříve (v r. 1769), než ji měřil Coulomb.

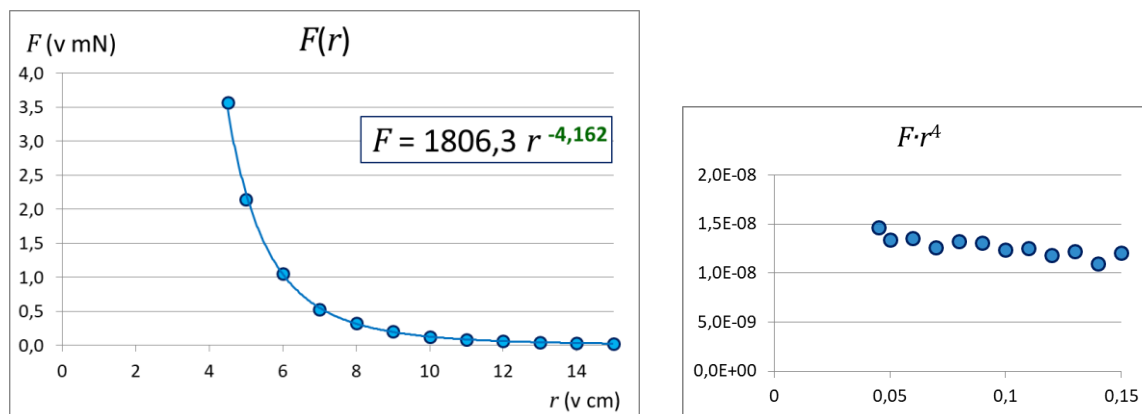
Konstrukci, která se při měřeních osvědčila, a měření s vahadlem ukazuje obr. 6.



Obr. 6 - Vahadlo pro měření síly mezi magnety.

Vahadlo tvoří špejle, kterými propíchneme kousek tlustšího brčka. Na konci svislé špejle je magnet. (Magnet na vahadle i přibližovaný magnet byly tomto případě malé neodymové magnety. Síla mezi nimi je srovnatelná se silou mezi většími feritovými magnety, ve skutečnosti je asi 0,42-krát menší.) Pro minimalizaci tření se vahadlo opírá hroty špendlíků o kovové „podstavce“, jimiž jsou poloviny rozříznuté matičky, viz detail na obr. 6 vpravo. Na spodní vodorovnou špejli vahadla, která je ve stejné výšce jako hroty špendlíků, dáváme malá závaží, vyrobená z tenkého měděného drátku. (Na digitálních vážkách zvážíme třeba metr nebo dva metry drátku, pak z něj vezmeme vhodnou délku.) Závaží se snaží otáčet vahadlo na opačnou stranu, než kam jej otáčí odpuzování magnetů, viz prostřední fotografie na obr. 6; posunováním závaží po špejli vahadlo vyvažujeme. Matička na svislé špejli nad osou slouží k tomu, abychom těžiště vahadla přiblížili co nejvíce ose dané spojnicí hrotů špendlíků, tím nastavujeme citlivost našeho zařízení. A ještě jeden detail: Kývání kyvadla tlumíme kouskem hliníkového profilu; pohyb magnetu je tlumen vířivými proudy.

Experiment ukázal, že s danou konstrukcí bylo možno měřit v rozmezí vzdáleností asi 4,5 až 15 cm. Naměřené výsledky ukazuje obr. 7. V pravé části obrázku je v závislosti na vzdálenosti vynesena součinn $F \cdot r^4$, který by pro sílu mezi elementárními dipóly byl konstantní. Je vidět, že na daných vzdálenostech se síla mezi magnety již dobře blíží teoretické závislosti (1). (Hodnoty $F \cdot r^4$ se většinou neliší o více než dvacet procent, přitom poměr síly ve vzdálenostech 4,5 a 15 cm je víc než sto.)



Obr. 7 - Výsledky měření síly vahadlem.

Pro pokusy s vahadlem lze použít i jednodušší konstrukci. Na druhou stranu je výzvou, snažit se udělat vahadlo co nejcitlivější. Ovšem velmi citlivé vahadlo bude citlivé i na nejrůznější vnější vlivy, proudění vzduchu apod.

Závěr

S výše popsanými konstrukcemi lze měřit opravdu malé síly. V případě vahadla byla nejmenší měřená síla přibližně $25 \mu\text{N}$, v případě torzních vah jen asi $5 \mu\text{N}$. To odpovídá tíze závaží půl miligramu.

Torzní váhy jsou ovšem značně citlivé na proudění vzduchu v místnosti, jejich vahadlo kmitá s dlouhou periodou (přes jednu minutu) a obtížně se ustaluje; navíc k určení momentu síly, kterou vlákno stáčí rameno vah, je potřeba měřit periodu kmitů s přívazky v různých polohách na ramenu – tato metoda je tedy vhodná spíše pro vážnější zájemce o fyziku.

Měření pomocí vahadla je, co se týče fyzikálního rozboru, mnohem jednodušší, kmity vahadla lze lépe tlumit a konstrukci vahadla by patrně šlo zvětšit tak, aby šlo použít i pro demonstrační experiment. Další vývoj jednoduchých vahadel pro měření malých sil je tedy docela přitažlivou výzvou. K proměřování toho navíc zbývá dost a dost: síla při jiné vzájemné poloze magnetů, síla při přitahování, ... Ale to až snad někdy příště.

Literatura

- [1] Kácovský P., Koupilová Z. a kol.: *Malá Hraštice. Jarní soustředění pro budoucí učitele fyziky a sprízněné duše*. Dostupné online: <https://kdf.mff.cuni.cz/hrastice/main.php>
- [2] Dvořák L., Kácovský P.: *Další nápady z Malé Hraštice (jednoduché pokusy se slavnými jmény v pozadí)*. In.: Veletrh nápadů učitelů fyziky 23. Sborník z mezinárodní konference. Ed. M. Šerý, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2018, s. 64-73.
- [3] Dvořák L.: *Magneticky levitující tužka – jak ji udělat co nejlepší*. In: Sborník konference Elixíru do škol 2019. Bude publikováno a dostupné online.
- [4] Sedlák B., Štoll, I.: *Elektřina a magnetismus*. Academia, Praha, 1993.