

15. ročník, úloha II. E ... elektrostatické pole Země (8 bodů; průměr ?; řešilo 9 studentů)

Změřte velikost elektrostatického pole Země.

Návod: Můžete buď přímo měřit potenciálový rozdíl mezi Zemí a izolovaným vodičem v určité výšce (pozor však, musíte zařídit, aby se potenciál tohoto vodiče stihl vyrovnat s potenciálem vzduchu v příslušné výšce – zkuste např. do vzduchu umístit nádobu s vodou tak, aby voda mohla odkapávat a odnášet tak sebou přebytečný náboj). Druhý způsob využívá faktu, že Země má svůj povrchový náboj. Umístíme-li do blízkosti povrchu vodivou desku a uzemníme ji, objeví se na ní náboj. Přikryjeme-li tuto desku jinou uzemněnou deskou, objeví se náboj na ní a z původní vymizí, což můžeme galvanometrem změřit.

Při čtení Feynmanových přednášek z fyziky napadlo Lenku Zdeborovou

Teorie

Jak změřit elektrostatické pole Země, když se jeho hodnota mění v blízkosti vodivých předmětů (tedy i nás lidí, domů, stromů atd.)? V zadání jsme vám stejně jako Richard P. Feynman ve svých Přednáškách navrhli dva způsoby.

První z nich byl založený přímočaře na změření potenciálu mezi dvěma místy v různých výškách. To je ovšem natolik technicky náročné, že se ani nikomu z řešitelů ani nám nepodařilo touto metodou nic naměřit. Uvědomme si, že předmět zavěšovaný do výšky h musí být dost veliký, aby se na něm indukoval náboj dostatečný na to, aby se nevybil při prvním dotyku svorek voltmetru. Pak také musí být daleko od vysokých vodivých objektů jako jsou stromy a domy (nemůžeme zavěšovat z okna nebo z větve stromu), neboť v blízkosti takových objektů se elektrostatické pole deformuje a pod větví stromu či pod oknem je typicky mnohem menší než na volném prostranství. Dalším problémem je, za co předmět zavěsit, aby byl dokonale izolován. Provaz či dřevo zvlhnou od vzduchu. Ideální by bylo někde na poli postavit konstrukci ze skla či porcelánu a tam provést měření. Nebo vyrobit balón, který vyletí do určité výšky, tam nějakou dobu zůstane, a pak zase sletí dolů. Na to jsme však neměli prostředky.

Druhý způsob byl na realizaci mnohem přijatelnější. Pokud existuje elektrické pole Země, musí být na povrchu Země náboj. Citujme z Feynmana: „Umístíme-li do blízkosti zemského povrchu rovnou kovovou desku a uzemníme ji, objeví se na ní záporné náboje. Přikryjeme-li tuto desku jinou uzemněnou vodivou deskou, objeví se náboje na ní a z původní desky vymizí. Když odměříme náboj, jenž prochází z první desky k zemi při jejím zakrývání, můžeme zjistit povrchovou hustotu náboje, která na něm byla, a tím i elektrické pole.“ Zde zůstává problémem, jak změřit onen prošlý náboj. Vhodný galvanometr nemáme. Procházející proud je mnohem menší než je citlivost běžného ampérmetru. Zbývá měřit napětí $u(t)$ na odporu voltmetru R , pak pro prošlý náboj platí

$$Q = \int_0^t i(t) dt = \int_0^t \frac{u(t)}{R} dt.$$

Čas, po který se na milivoltmetru nějaká výchylka drží, je velmi krátký. Proto nejsme schopni měřit závislost $u(t)$. Integrál a tedy i hodnotu náboje budeme tedy aproximovat vztahem

$$Q = \frac{\Delta U \Delta t}{R},$$

kde ΔU je střední výchylka voltmetru, která se na přístroji drží po dobu Δt . Uvědomme si, že touto aproximací vnášíme do měření obrovskou chybu (možná i více než 100 %); lépe to ovšem v našich podmínkách neumíme.

Elektrické pole nad povrchem koule o plošné hustotě náboje σ je $E = \sigma/\varepsilon_0$, kde ε_0 je permittivita vakua (vzduchu). Je-li tedy plocha měřené desky S , dostáváme pro intenzitu elektrického pole nad povrchem Země vztah

$$E = \frac{\Delta U \Delta t}{\varepsilon_0 S R}. \quad (1)$$

Postup měření a výsledky

K měření jsme použili dva plechové pláty o rozměrech 30×70 cm, uprostřed zahrady jsme do země zarazili zemnicí drát, k němu uzemnili první plech přes digitální multimetr a druhý přímo. Na zem jsme položili skleněnou desku (šířky asi 3 mm), aby náboj z prvního plechu nemohl utíkat jinudy než přes voltmetr. Na sklo jsme položili první plechový plát, na něj druhou skleněnou desku (opět kvůli izolaci). Soustavu jsme přikrývali a odkrývali druhým plechem a přitom pozorovali následující: Při nasouvání plechu se údaj na voltmetru (skoro nula) zvětšil o 1–2 mV, zůstal na voltmetru dobu srovnatelnou s dobou nasouvání plechu, tj. asi 1 s. Při odsouvání plechu jsme pozorovali totéž, jen údaj na displeji se o danou hodnotu zmenšil. Na spodním plechu byla připojena záporná svorka voltmetru. Při nasouvání tedy z desky odcházely záporné náboje, což odpovídá teorii. Dosadíme do vztahu (1) hodnoty $\Delta U = 1,5$ mV, $\Delta t = 1$ s, $R = 10$ M Ω podle manuálu k multimetru, $S = 0,21$ m². Dostaneme hodnotu elektrického pole Země $E = 80$ V·m⁻¹.

Závěr

Naměřenou hodnotu intenzity pole považujeme vzhledem k výše uvedené aproximaci integrálu za velmi přibližnou, chybu odhadněme asi na 100%. Ostatní chyby jsou vůči této zanedbatelné. V literatuře se uvádí, že za klidného počasí je intenzita elektrického pole nad povrchem Země kolem 120 V·m⁻¹, což se s naším výsledkem v rámci možné chyby našeho měření velmi dobře shoduje.