

Kľučky v siločiarach elektromagnetickej vlny

Ako desaťročný školák z Vermontu som bol fascinovaný tajomstvami náuky o elektrine, ktoré mi poodhalil výtlačok knihy J. Arthura Thompsona *Outline of Science*, ktorý sme mali na našej farme. Zo všetkých tajomstiev popisovaných v knihe som si najviac lámal hlavu nad dosahom elektromagnetického žiarenia. Pre vidieckeho chlapca ako som bol ja, bolo prirodzené predstaviť si elektrické siločiarly ako priamky vychádzajúce z centrálného bodu, podobne ako ostne vytŕčajúce z tela dikobraza, alebo aby to bolo ešte hrozivejšie, ostne vrhnuté šklbnutím jeho chvosta. Štvorec tenkého papiera, umiestneného vo vzdialenosti jedného metra od nebezpečného dikobraza vrhajúceho ostne, by mohol byť prepichnutý 20 ostňami, no ak by sme ho držali dvakrát tak ďaleko, bol by prepichnutý iba 5 ostňami. Dôvod bol evidentný. Štvorec tenkého papiera nezmenil svoju veľkosť. O ostne sa delí s myslenou guľovou plochou. V dvakrát väčšej vzdialenosti sa polomer gule zdvojnásobil, čo znamená, že jej povrch sa zoštvornásobil. Štvorec tenkého papiera zaberá z guľového povrchu väčšej gule štyrikrát menšiu časť ako z povrchu malej gule. Kvôli tejto predstave bolo pre mňa prijateľné prijať tvrdenie, že elektrické pole vyvolané bodovým nábojom klesne na štvrtinu svojej hodnoty, ak sa vzdialenosť od náboja zväčší dvakrát. Túto predstavu som si overil aj tak, že som v suchom vzduchu treskúcej vermontskej zimy robil pokusy so zelektrizovaným hrebeňom a kúskami papiera. Objav, že ten istý zákon prevráteného štvorca vzdialenosti, ktorý sa vzťahoval na pôsobenie elektrického náboja, sa vzťahuje aj na gravitačné pole, ako to ukázal Newton, spôsobil, že správanie prírody mi pripadalo úplne rozumné a prirodzené— až pokým som sa nedozvedel viac!

Potom som v knihe J. Arthura Thompsona narazil na tvrdenie, že vektor intenzity elektrického poľa v elektromagnetickej vlne nesmeruje rovno od centrálného náboja, ale kolmo k tomuto smeru. Jeho veľkosť je pritom priamoúmerná prevrátenej hodnote vzdialenosti od zdroja. Toto správanie elektromagnetickej vlny ma vtedy poplietlo rovnako, ako poplietlo dvadsať rokov predtým lorda Kelvina, a rovnako ako bolo súdené podobnému správaniu gravitačnej vlny zmiasť nepokojnú fyzikálnu komunitu o dvadsať



Prvé rozhlasové vysielania na svete boli uskutočnené v roku 1922 z Pittsburghu v Pensylvánii. Vysielala priekopnícka stanica KDKA spoločnosti Westinghouse.

rokov neskôr. Moje znepokojenie nad týmto problémom rástlo. Teraz, keď som mal trinásť a býval som v Youngstowne, meste ocele v štáte Ohio, roznášal som do päťdesiatich domov po škole noviny *The Youngstown Vindicator*. Špeciálna týždenná rubrika v týchto novinách prinášala správy o novej oblasti rozvíjajúceho sa rozhlasu. Boli tam uverejňované aj schémy a návody ako si vyrobiť vlastný prijímač. Za zarobené peniaze som si mohol kúpiť slúchadlá, potrebné množstvo drôtu a ďalšie súčiastky a vyrobiť si kryštálku. Primitívny prijímač, ktorý som zostavil starostlivo podľa návodu, chytal spravodajstvo z KDKA, prvej rozhlasovej stanice na svete s pravidelným vysielaním. Bola v Pittsburghu v Pennsylvánii, vzdialená asi 100 km. Aká to bola radosť! Ale tiež aký búrlivý zmätok! Podľa zákona prevráteného štvorca vzdialenosti, ako mohli elektrické náboje, prípadne elektrické prúdy—dokonca aj veľmi veľké, ktorými mohli disponovať inžinieri z Westinghouse v Pittsburghu—vyvolať akékoľvek znateľné pôsobenie v Youngstowne? Akokoľvek veľká by bola intenzita elektrického poľa vo vzdialenosti 1 centimeter od zdroja v Pittsburghu, kým by vlna došla do Youngstownu, ktorý bol vzdialený 100 kilometrov, čo je 10^7 centimetrov, klesla by jej intenzita podľa zákona prevrátenej druhej mocniny 10^{14} krát. Tým by intenzita elektrického poľa klesla na úplne nedetekovateľnú hodnotu. No napriek tomu som tam sedel a z kryštálky počúval vysielanie!

Pocit tajomna a zmätenosti ohľadom elektromagnetických vln mi zostal ešte po niekoľko ďalších rokoch. Ako stredoškolač som sa ešte nenaučil neúnavne hľadať najlepšie spôsoby na vysvetlenie javov, nech by už boli akékoľvek. V roku 1934 som konečne narazil na taký najlepší spôsob prostredníctvom prednášky Sira J. J. Thomsona (1856–1940), rektora Trinity College v Cambridge, ktorý v roku 1897 objavil elektrón. Tento územčistý šlachovitý sivovlasý muž bol v tej dobe veľkou osobnosťou fyziky. Potom, čo som Thomsona videl a počul na medzinárodnej konferencii, získal som konečne dosť citu na prečítanie jeho knihy *Electricity and Matter* z roku 1907. Vtedy som naraz pochopil ústrednú myšlienku, ktorá sa skrývala za elektromagnetickým žiarením. Bola zhmotnená v jedinom slove—*klučka*. Klučka v elektrickej siločiare—prenesená do predstavy kľučky v smere priestoročasovej deformácie—sa ukáže ako magická prísada, ktorá nám pomôže pochopiť, čo to je gravitačná vlna v tvare pulzu, a prečo by vôbec niečo také malo existovať.

Nejestvuje lepší pohľad na to, čo sa deje, ako Thomsonov. Elektrický náboj sa pohybuje v smere doľava konštantnou rýchlosťou a spolu s ním sa v plnej nádhere pohybujú aj jeho siločiarly. Zrazu zacíti náboj úder a po ňom sa začne pohybovať doprava rovnako veľkou rýchlosťou. Ako budú vyzerajú siločiarly náboja v istom okamihu po údere? Dajme tomu 10 svetelných centimetrov neskôr? Za desať svetelných centimetrov preletí svetlo desať centimetrov. Nakreslíme kružnicu—symbol guľovej plochy—ktorá má polomer 10 centimetrov a má stred v mieste, kde sa odohral úder. Vnútri tejto kružnice už siločiarly vedia o novej situácii. Vychádzajú radiálne všetkými smermi z miesta, kde sa v tom okamihu v skutočnosti nachádza náboj. Siločiarly na vonkajšej strane kružnice sa ešte nedozvedeli o novom stave vecí. Vyžarujú z bodu, kde *by bol* v súčasnom okamihu náboj, keby nebolo úderu a on by pokračoval doľava vo svojom pôvodnom pohybe, pôvodnou rýchlosťou. Ale ako



J. J. Thomson

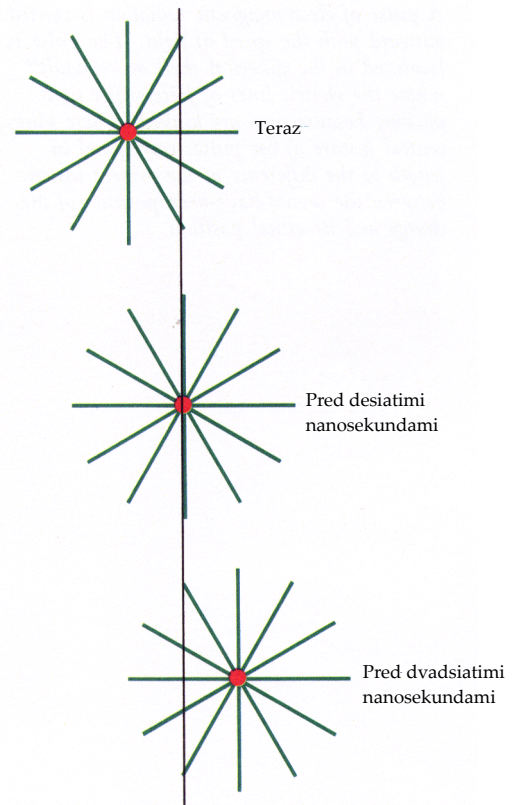
Narodil sa 18. decembra 1856 v Cheetham Hill v Anglicku. Zomrel 30. augusta 1940 v Cambridge v Anglicku. V roku 1897 Thomson objavil elektrón a v roku 1906 mu bola udelená Nobelova cena.

sa budú správať siločiarly pri prechode z vnútra kružnice do jej vonkajšej oblasti?

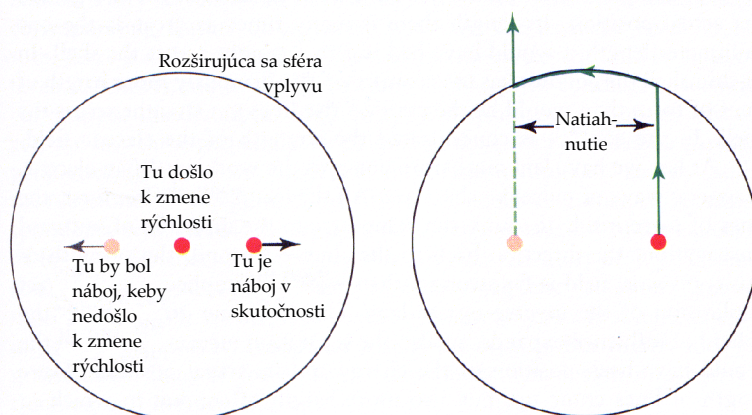
Elektrické siločiarly majú jednu pozoruhodnú črtu. Žiadna siločiarla nikdy nekončí v prázdnom priestore bez náboja. Inak povedané, do každej maličkkej kocky v priestore vstupuje rovnako veľa siločiar, ako z nej vystupuje. S prihliadnutím na túto vlastnosť siločiar si pozorne prezrime každú siločiaru, ktorá opúšťa náboj, alebo prinajmenšom sa sústreďme na dostatočne veľa siločiar, aby sme sa dozvedeli, čo sa vlastne deje. Budú stačiť tri—tri povedzme zo všetkých sto, ktoré sme mohli preskúmať!

Silochiara číslo nula smeruje pred aj po údere priamo doľava. Podobne silochiara číslo 100 smeruje pred aj po údere priamo doprava. Ani v jednej z nich nie je žiadna kľučka! No pozrite sa na silochiaru číslo 50. Vnútri „sféry vplyvu“ so stredom v mieste úderu smeruje silochiara číslo 50 priamo nahor zo súčasnej polohy náboja. Na vonkajšej strane sféry vplyvu smeruje táto silochiara priamo nahor od bodu, v ktorom by bol náboj, keby nebolo úderu. Ak má byť ktorákoľvek silochiara prerušená, tak čiara číslo 50 je horúci kandidát. Vyzerá to tak, že neexistuje žiaden spôsob, ako by čiara zostala neprerušená, tak aby nemala voľné konce. Každý kúsok priestoru, ktorý by bol inak dostupný na manévrovanie, už vyzerá byť preplnený silochiarami s inými číslami—vnútri sféry celý trs siločiar smerujúcich na všetky strany od skutočnej polohy náboja; na vonkajšej strane sféry čiary rozbiehajúce sa všetkými smermi do diaľky a zdanlivo vychádzajúce z polohy, v ktorej by bol náboj, keby nebolo úderu. Táto kríza signalizuje prichádzajúci moment pravdy. Ako môže silochiara nezmeniť svoj kurz?

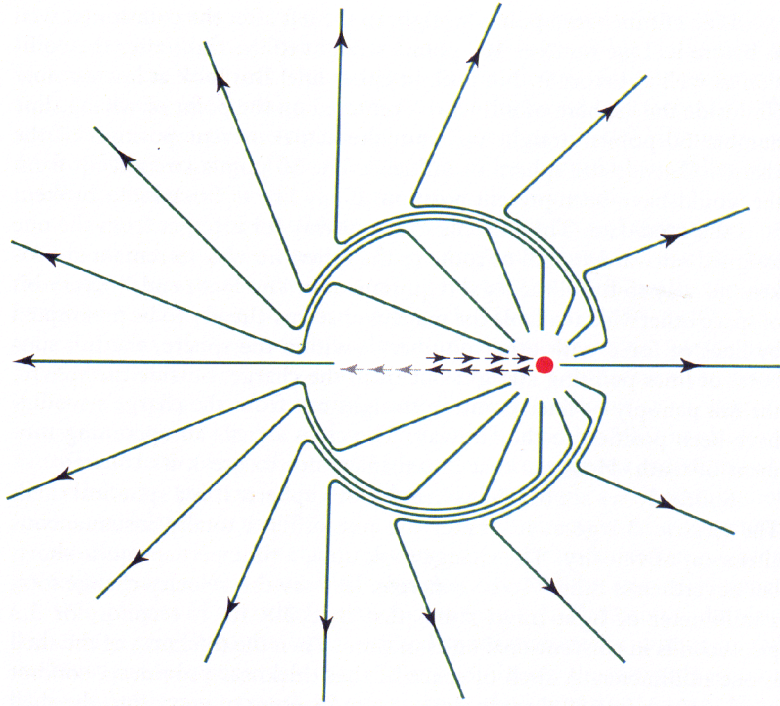
Naraz nám to dôjde. Sféra vplyvu nie je sféra. Je to guľová vrstva. Elektrický náboj v jej vnútri nepodstúpil úplne okamžitú zmenu rýchlosti. Táto zmena trvala istý čas, ktorý bol pravdepodobne krátky, avšak konečný. Aby sme boli konkrétni, povedzme že zmena rýchlosti trvala jeden svetelný milimeter, čo je v bežných jednotkách $3,3 \cdot 10^{-12}$ sekundy, alebo 3,3 pikosekundy. Potom bude hrúbka guľovej vrstvy 1 milimeter. Táto milimetrová vrstvička predstavuje kanálik, pozdĺž ktorého sa silochiara číslo 50 vinie od bodu svojho vstupu do vrstvy po bod svojho výstupu. Táto silochiara musí ostro zabočiť, prvý krát keď vstupuje do kanáliku a druhý krát keď z neho vystupuje. Medzi týmito dvoma kľučkami však postupuje hladko a zhruba rovnobežne so smerom pohybu elektrického náboja. Jej dĺžka v kanáliku je



Pri rovnomernom pohybe elektrického náboja doľava sa spolu s nábojom pohybuje aj obrazec, ktorý vytvárajú silochiarly jeho elektrického poľa.



Vľavo: Signál o tom, že pohyb elektrického náboja sa zmenil, sa šíri z bodu, kde došlo k zmene pohybu. Vpravo: Silochiara elektrického poľa sa musí „natiehnúť“ aby sa dostala do bodu, ktorým by prechádzala, keby náboj nezmenil svoju rýchlosť.



Pulz elektromagnetického žiarenia sa šíri na všetky strany rýchlosťou svetla. Pulz je lokalizovaný vo sférickej vrstve alebo „kanáliku“, kde sú elektrické siločiarly nahusto uložené, pretože sú dvakrát zalomené, čiže obsahujú dve kľučky. Tieto kľučky v siločiarach predstavujú ústrednú črtu elektromagnetického pulzu. Ich dĺžka zodpovedá vzdialenosti medzi súčasnou polohou náboja a polohou, v ktorej by bol, keby nedošlo k zmene jeho rýchlosti.

približne rovnaká, ako vzdialenosť medzi skutočnou polohou náboja a polohou, v ktorej by bol, keby nebolo úderu. Táto dĺžka je mnohonásobne väčšia, ako dĺžka 1 milimeter, ktorú by mala, keby prešla kanálikom naprieč. V tenkej guľovej vrstve sa tak nahromadí neporovnateľne viac dĺžky siločiar, ako by ňou prechádzalo, keby šli všetky siločiarly cez vrstvičku kolmo. V kanáliku je veľká hustota siločiar a preto veľká intenzita elektrického poľa.

Konečne sa nám pred očami rozprestrela podstata elektromagnetickej vlny pulzného charakteru. Vidíme všetky podstatné črty. Po prvé, siločiarly vnútri kanáliku smerujú kolmo na smer šírenia sa vlny, kolmo na smer späť k zdroju. Po druhé, intenzita tohto poľa je omnoho silnejšia ako by to vyplývalo z akejkoľvek priamej aplikácie zákona prevráteneho štvorca vzdialenosti. Teda ako plynie čas a sféra vplyvu sa rozširuje, tiež sa zväčšuje vzdialenosť medzi skutočnou polohou náboja a polohou, v ktorej by bol, keby nebolo úderu. Dĺžka priečných siločiar sa zväčšuje, no zväčšuje sa aj obvod kanáliku, v ktorom majú byť uložené. S plynutím času sa hustota uloženia siločiar v rovine papiera nezväčší ani o štipku. Hustota siločiar sa rozširovaním sféry znižuje iba v smere kolmom na smer papiera. Hustota siločiar udáva intenzitu elektrického poľa. Dôsledkom toho je, že intenzita klesá iba s prvou mocninou polomeru sféry vplyvu, teda je nepriamo úmerná vzdialenosti od zdroja.

Intenzita elektrického poľa v pulze je priamo úmerná zrýchleniu náboja, ktorý ho vytvára. Čiže pomer medzi aktuálnou dĺžkou siločiarly v kanáliku a hrúbkou kanáliku je priamo určený pomerom medzi zmenou rýchlosti náboja a časom, za ktorý sa táto zmena rýchlosti odohrala—a tento pomer je presne to, čo rozumieme pod zrýchlením. Bez zrýchlenia nielo žiarenia!

Teraz sa dostávame k štvrtej a poslednej črte elektromagnetickej vlny. Najviac je pri prechode kanálikom natiatnutá siločiarly číslo 50, zatiaľ čo siločiarly číslo 0 a 100 nie sú pri prechode kanálikom

natiahnuté vôbec. Stručne povedané v smere zrýchlenia ani v opačnom smere náboj nevyžaruje. Pozorovateľ by zistil, že intenzita vyžarovania pri odkláňaní od týchto smerov pomaly rastie až dosiahne maximálnu hodnotu v smere kolmom na zrýchlenie. Niet divu, že anténa vysielacej veže je postavená vertikálne, aby zvislý kmitavý pohyb elektrických nábojov v nej generoval maximálne vyžarovanie pozdĺž povrchu okolitej krajiny.

Preložené z knihy Johna Archibalda Wheelera, *A Journey into Gravity and Spacetime*, Scientific American Library, New York, 1999, ISBN 0-7167-6034-7, strany 190-195. Slovenský preklad © Slavomír Tuleja, apríl 2005. Kapitola v knihe sa venuje vysvetleniu gravitačnej vlny pulzného charakteru, ktoré motivuje vysvetlením podobnej elektromagnetickej vlny.

Na stránke <http://vscience.euweb.cz/JThomson/> nájdete tento text a tiež **Java applet**, ktorý vám umožní interaktívne preskúmať vznik elektromagnetických vln pulzného charakteru pri zrýchlenom pohybe náboja.

Veľmi dobrý učebný text (v angličtine) s troškou stredoškolskej matematiky popisujúci elektromagnetický pulz kvantitatívne nájdete na:

<http://physics.weber.edu/schroeder/mrr/MRRnotes.pdf>.

