

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Rudolf Zajac

150 rokov od objavu elektromagnetickej indukcie

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 26 (1981), No. 2, 81--85

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138655>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1981

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

- [1] AGMON S.: *Lectures on Elliptic Boundary Value Problems*. Van Nostrand, 1965.
- [2] BERGER M., GAUDUCHON P., MAZET E.: *Le Spectre d'une Variété Riemannienne*. Lecture Notes in Mathematics, Vol. 194, Springer-Verlag, 1971.
- [3] GILKEY P.: *The spectral geometry of a Riemannian manifold*, J. Differential Geometry, 10 (1975), 601—618.
- [4] GILKEY P.: *Recursion relations and the asymptotic behavior of the eigenvalues of the Laplacian*. Compositio Mathematica 38 (1979), 201—240.
- [5] GRAY A., VANHECKE L.: *Riemannian geometry as determined by the volumes of small geodesic balls*. Acta mathematica, Vol. 142, 1979, 157—198.
- [6] MCKEAN H. P., SINGER I. M.: *Curvature and the eigenvalues of the Laplacian*. J. Differential Geometry, 1, 1967, 43—69.
- [7] KOWALSKI O.: *Additive volume invariants of Riemannian manifolds*. Acta mathematica, Vol. 145, 1980, No. 3—4, 205—225.
- [8] SAKAI T.: *On eigen-values of Laplacian and curvature of Riemannian manifolds*, Tôhoku Math. J., 23 (1971), 589—603.

150 rokov od objavu elektromagnetickej indukcie

Rudolf Zajac, Bratislava

Pred 150 rokmi, 29. augusta 1831 objavil Michael Faraday elektromagnetickú indukciu a vytvoril tak predpoklady pre novú éru v dejinách techniky a energetiky, éru elektrifikácie. Z hľadiska dejín fyziky zavŕšil týmto objavom experimentálnu základňu elektrodynamiky.

Ak jeho predchodcovia ukázali, že elektrické prúdy vyvolávajú magnetické účinky, M. Faraday dokázal opak: pomocou stálych magnetov alebo elektromagnetov možno vo vodičoch indukovať elektrické prúdy. Keby nebol urobil viac, delil by sa rovnakým dielom s A. M. Ampèrom (a jeho súčasníkmi H. Ch. Oerstedom, J. B. Biotom a F. Savartom) o objav elektromagnetizmu.

Faraday však zohral v histórii fyziky ešte aj inú úlohu. Bol prvý, čo opustil Newtonovu schému okamžitého silového pôsobenia na diaľku a položil základy teórie elektromagnetického poľa. Prostriedkom, ktorým preniesol silové pôsobenie elektricky nabitých diskretných hmotných bodov alebo elementov vodiča pretekaným prúdom do priestoru, do poľa, kde už niet okamžitého pôsobenia na diaľku, boli siločiar, ktoré zaviedol do náuky o elektrine a magnetizme. Pole, ktoré zaviedli francúzski matematici 18. storočia ako matematickú konštrukciu, stalo sa vo Faradayovom ponímaní fyzikálnou realitou.



Michael Faraday sa narodil 22. septembra 1791 v rodine kováča v okrajovej londýnskej štvrti. Bol roznášačom novín, vyučil sa za knihára a ako samouk študoval chémiu a fyziku. V marci roku 1813 ho prijal sir Humphrey Davy za svojho asistenta v Royal Institution a v októbri toho istého roku s ním podnikol 18mesačnú cestu po európskom kontinente. Táto cesta nahradila Faradayovi univerzitu. V Paríži sa stretli s A. M. Ampèrom, G. L. Cuvierom, L. J. Gay-Lussacom a ďalšími význačnými francúzskymi vedcami, precestovali Taliansko, Švajčiarsko, Nemecko a Belgicko. To všetko sa udialo v čase, keď Napoleon bol vo vojnovom stave s Anglickom.

Po návrate do Londýna konal Faraday samostatné chemické experimenty, o. i. formuloval známe zákony elektrolyzy, pomenované po ňom a ako prvý podal fyzikálnu interpretáciu tohto procesu, platnú dodnes. V roku 1824 ho zvolili za člena Royal Society, od roku 1825 bol riaditeľom laboratória Royal Institution a od roku 1827 profesorom chémie na tejto inštitúcii, založenej Benjaminom Thompsonom (grófom Rumfordom). Bývalý Davyho asistent, ktorý na ceste po Európe mal za úlohu tiež nosiť kufre pani Davyovej (čo sa neobišlo bez diskrepancií), prerástol svojho mecenáša a učiteľa a vošiel ako jedna z ústredných postáv a vari najsvojráznejšia osobnosť do dejín fyziky. Zomrel 26. augusta 1867.

Faraday bol – podobne ako Oersted – presvedčený o jednote všetkých prírodných síl. Bolo preň teda logické, že pôsobenie elektrického prúdu na magnetku musí byť vzájomné. Prvé bezvýsledné pokusy v tomto smere konal v roku 1824. Sústavne sa tejto problematike začal venovať 29. augusta 1831, keď uskutočnil prvý úspešný pokus. 24. novembra toho istého roku mohol už podať v Royal Society obsiahly referát o elektromagnetickej indukcii. Faraday zanechal podrobné, pedantne spracované protokoly o svojich experimentoch, čo nebolo v tých časoch vždy samozrejmosťou. Vo svojom hlavnom diele *Experimentálne výskumy o elektrine* len nepodstatne pozmenil poradie vykonaných pokusov. Toto dielo má 3362 číslovaných odsekov, z ktorých nepatrná časť je venovaná všeobecným úvahám.

V prvých 17 odstavcoch opisuje systematicky experimenty s dvoma do seba zasunutými cievkami. Prvý zapojil na galvanický článok, druhú na galvanometer. Dokázal nimi indukciu elektrického prúdu v sekundárnej cievke pri zapojení a vypojení prúdu z primárnej cievky, neexistenciu indukcie, pokiaľ preteká primárnou cievkou stály prúd (a to bez ohľadu na veľkosť prúdu, napätie na svorkách cievky a na odpor jej vinutia). V ďalších odsekoch opisuje experimenty, ktorými dokázal vznik indukovaného elektromotorického napätia pri vzájomnom pohybe primárneho a sekundárneho vodiča, demonštruje zosilnenie tohto efektu po vsunutí železného jadra do primárnej cievky (vsunutie medeného jadra neposkytlo tento úkaz), až napokon zistil indukovaný prúd v obvode cievky pri pohybe trvalého magnetu. Konečne určil (odst. 26 a 38) smer indukovaného prúdu v obvode cievky.

M. Faraday potom nadviazal na efekt, ktorý pozoroval D. F. Arago, že totiž krútiaci sa kovový disk vychyluje magnetku, nad ním voľne zavesenú. Francúzski fyzici vysvetľovali tento efekt vzájomným pôsobením magnetických fluid. Faraday vystihol, že aj tu ide o elektromagnetickú indukciu, pozmenil experimentálne usporiadanie tohto pokusu a vyrobil vlastne prvé dynamo elektrického prúdu. Bolo to medené koliesko otáčivé na mosadznej osi o priemere 12 anglických palcov a hrúbky 1/5 palca, ktorého obvod bol

zasunutý medzi póly silného magnetu. Pri krútení kola vznikalo elektromotorické napätie medzi medenými alebo poamalgamovanými olovenými kolektormi, ktoré sa dotýkali obvodu kola a jeho osi.*)

Elektromagnetickú indukciu pripisoval Faraday osobitnému stavu látky sekundárneho vodiča, ktorý nazval elektrotonickým stavom. Tejto hypotézy sa vzdal až neskoršie, keď zaviedol pojem magnetického toku.

Ďalším významným Faradayovým krokom bol objav samoindukcie, o ktorom predniesol 29. januára 1835 v Royal Society referát na tému: *O vplyve indukovaného elektrického prúdu na seba samého a všeobecne o induktívnom pôsobení elektrických prúdov*. Na efekt samoindukcie upozornil Faradaya istý pán William Jenkin, ktorý pozoroval nasledujúci jav: ak pripojíme póly batérie k svorkám vinutia cievky so železným jadrom, badáme pri prerušení kontaktu iskrú a pociťujeme úder. Pri spojení pólov batérie priamym vodičom, tento jav nepozorujeme. Faraday potom opísal systematicky konané experimenty s elektromagnetmi a na ich základe Jenkinov efekt interpretoval ako samoindukciu.

Teóriu magnetických siločiar Faraday dovŕšil v roku 1851, keď 27. novembra a 11. decembra predniesol v Royal Society referát: *O magnetických siločiarach, ich definitnom charaktere a o ich rozdelení vnútri magnetu a v priestore*. V tomto referáte (a v odstavci 3071 svojich *Experimentálnych výskumov o elektrine*) takto definuje magnetické siločiar: „3071. Magnetickú siločiaru možno definovať ako čiaru, ktorú opisuje veľmi malá magnetka, ak ňou v pozdĺžnom smere pohybujeme tak, aby v ľubovoľnom čase ležela na dotýčnici dráhy. Iná definícia ju opisuje ako čiaru, pozdĺž ktorej sa neindukuje elektrický prúd v pohyblivom vodiči, preloženom priečne cez túto čiaru, zatiaľ čo pohyb v ľubovoľnom inom smere produkuje prúd; alebo aj ako čiaru, ktorá sa kryje s magneto-kryštalickou osou kryštálu bizmutu“.

Faraday uprednostňuje definíciu pomocou elektromagnetickej indukcie, lebo sa dá použiť aj v prostredí, v ktorom sa metóda železných pilín alebo malých magnetiek použiť nedá, ďalej preto, lebo pomocou siločiar možno lepšie opísať povahu, stav, smer a veľkosť magnetických síl – a to v ľubovonome bode prostredia – ako pomocou predstáv o silách koncentrovaných v bodových centrách alebo podľa predstáv o rozložení nejakého fluida v magnete. Pomocou siločiar možno podľa Faradaya vystihnúť aj *proces prenosu síl*, ktoré ostatné teórie vôbec nebrali do úvahy. Siločiaru charakterizujú elektromagnetické vlastnosti v ľubovoľnom bode prostredia alebo aj vákuu, vyplneného podľa Faradaya podľa všetkej pravdepodobnosti éterom.

Faraday potom opísal svojím príslovečne pedantným spôsobom sériu pokusov, z ktorých vyplýva, že v statickom magnetickom poli vzniká v uzavretom obvode indukovaný elektrický prúd len vtedy, ak pri relatívnom pohybe vodiča a magnetu sa mení počet siločiar, prechádzajúcich uzavretým obvodom, pričom veľkosť indukovaného prúdu je úmerná rýchlosti zmeny počtu týchto siločiar. To je slávny Faradayov zákon, ktorého matematický zápis vyzerá takto:

*) Opis tohto prístroja nachádzame v základných učebniciach, pozri napr. FRIŠ, S. E., TIMOREVA, A. V.: *Kurs fyziky II*, Nakladatelství ČSAV, Praha 1953.

$$\frac{dN}{dt} = -\mathcal{E}.$$

Je to jediný kvantitatívny výsledok, ku ktorému Faraday v teórii elektromagnetického poľa dospel. (Pravda, uvedený vzťah možno chápať aj ako definíciu magnetického toku pomocou indukovaného elektromotorického napätia \mathcal{E} .)

Faradayova teória bola jednoduchá a revolučná, pretože sa v nej upúšťa od Newtonovho pôsobenia na diaľku.

Ako to už v histórii býva, väčšina fyzikov neprijala túto teóriu, ale usilovala sa elektromagnetickú indukciu v návaznosti na Newtona a Ampéra vysvetliť okamžitým pôsobením na diaľku.

Významným predstaviteľom tohto smeru bol Franz Neumann, ktorý v roku 1845 zaviedol potenciálovú funkciu medzi dvomi elektrickými obvodmi v tvare

$$ii' \int_s \int_{s'} \frac{ds ds'}{r},$$

pričom i je prúd v uzavretom obvode s , i' je prúd v uzavretom obvode s' a r je vzdialenosť medzi elementami ds' a ds . Neumann ako prvý zaviedol vektorový potenciál \mathbf{A} podľa definície (v súčasnom zápise)

$$\text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{B},$$

kde \mathbf{B} je magnetická indukcia. Ak magnetickú indukciu \mathbf{B} vyvolá prúd i' v obvode s' , potom podľa Neumanna

$$\mathbf{A} = i' \int \frac{ds'}{r}.$$

Neumannova teória do istej miery modifikovala pôvodné predstavy o pôsobení na diaľku. Predpokladom takého pôsobenia bola existencia dvoch telies, napríklad Slnka a planéty v Newtonovej gravitačnej teórii alebo dvoch magnetov v Coulombovej teórii. V Neumannovej teórii sú k registrácii vzájomného pôsobenia na diaľku tiež potrebné najmenej dve telesá, no predpokladá sa, že každé teleso osobitne produkuje v každom bode priestoru, ktorý ho obklopuje, silu danej veľkosti a smeru, aj za neprítomnosti druhých telies. Nepripúšťajú sa však zmeny priestoru na mieste rôzneho potenciálu, ale zdrojom pôsobiacej sily ostáva uvažované teleso.

Hermann von Helmholtz sa pokúsil odvodiť v roku 1847 vo svojej práci *O zachovaní sily* (rozumej energie, pozn. R. Z.) Faradayov indukčný zákon pomocou zákona zachovania energie, pričom mechanické sily vyvolané prúdmi vyjadril Ampérovým vzťahom. Helmholtzove výpočty upresnil William Thomson (lord Kelvin), ktorý prvý zaviedol pojem energie poľa. Helmholtzova-Kelvinova teória postúpila v nazeraní na pole o krôčik ďalej ako Neumannova. Podľa nej sily pôsobiace na diaľku vyvolávajú v priestore zmeny, ktoré vyvolávajú nové sily, pôsobiace na diaľku. Obdobne ako Neumann

postupoval aj Wilhelm Eduard Weber, ktorý na rozdiel od Ampérových elektrických fluid uvažoval diskrétné kladné a záporné elektrické náboje, pohybujúce sa vo vodiči proti sebe rovnakou rýchlosťou. Pokiaľ je sekundárna cievka v pokoji voči primárnej, cez ktorú preteká prúd, pôsobia rovnaké sily na oba druhy nábojov v sekundárnej cievke. Ak sa sekundárna cievka pohybuje voči primárnej, sily pôsobiace na kladné a záporné náboje v nej budú rozličné, v dôsledku čoho vznikne indukovaný prúd. Weberova teória se nedá použiť, ak elektrický prúd nemožno rozložiť na rovnaké množstvá kladných a záporných nábojov, pohybujúcich sa proti sebe rovnakou rýchlosťou.

Zakladateľom dôslednej poľnej teórie je Michael Faraday, ktorý si trúfal kráčať vlastnou cestou, nedbajúc na postupy matematicky oveľa viac erudovaných fyzikov. Pod vplyvom názorov chorvátskeho fyzika Rudjera Josipa Boskoviča považoval sily za reálne iba pozdĺž čiar, v ktorých smere pôsobili. Zaviedol dokonca ťažové čiary medzi Slnkom a planétami ako dajaké elastické nite. Hmota podľa neho vyplňa celý priestor a závisí od síl pôsobiacich pozdĺž siločiar. Hmota nemôže pôsobiť tam, kde sa nenachádza (teda neexistuje pôsobenie na diaľku), ale iba prostredníctvom poľa, ktoré je materiálnou fyzikálnou realitou. Za indukciu je zodpovedné dielektrikum, ktoré sa pritom kontinuálne polarizuje. Dielektrikum je nejaká substancja, cez ktorú sa šíria elektrické polia. Vákuum je tiež akýmsi dielektrikom (niekedy stotožňoval Faraday vákuum s éterom).

Faraday svojou poľnou teóriou odôvodnil dôsledne všetky javy známe v náuke o elektrine a magnetizme vrátane paramagnetizmu a diamagnetizmu, ktorý objavil. Matematicky orientovaní fyzici jeho názory neprijali, lebo existujúce teórie vychádzajúce z princípu pôsobenia síl na diaľku podľa zákona prevrátenej hodnoty štvorca vzdialenosti vystihovali kvantitatívne všetky známe efekty.

V tejto situácii prichádza na scénu dejín fyziky J. C. Maxwell, ktorý sa podujal Faradayovu poľnú teóriu formulovať matematicky.

Je známe, že napokon zvíťazila Maxwellova teória a s ňou takmer všetky Faradayove myšlienky formulované pôvodne verbálne, bez matematického aparátu.

Literatúra

- [1] DORFMAN, J. G.: *Vsemirnaja istorija fiziki*. Moskva, Nauka 1979.
- [2] GLIOZZI, M.: *Istorija fiziki*. Moskva, Mir 1970.
- [3] SCHÜTZ, W.: *Michael Faraday*. Leipzig, Teubner 1972.
- [4] TRICKER, R. A. R.: *Frühe Elektrodynamik (Texte)*. Berlin, Akademie Verlag 1974.
- [5] TRICKER, R. A. R.: *Faraday und Maxwell. (Texte)*. Berlin, Akademie Verlag 1974.*

*) Posledné dve publikácie obsahujú preklady citovaných prác.