

Razvoj Maxwellove elektrodinamike

dr. Janez Strnad

Povzetek

Pred sto petdesetimi leti je James Clerk Maxwell objavil članek *Dinamična teorija elektromagnetnega polja*. V njem je pojave prvič dosledno opisal z električnim in magnetnim poljem in ugotovil, da je svetloba elektromagnetno valovanje. Nato je razvoj za dvajset let zastal. Nadaljeval se je šele, ko je Oliver Heaviside predelal Maxwellovo elektrodinamiko in uporabil vektorje. Zadnje dvome o njej je premagalo Hertzevo odkritje radijskih valov.

Abstract

A hundred and fifty years ago, James Clerk Maxwell published the paper *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. In it, he consistently described phenomena with the electromagnetic field for the first time, and observed that light is an electromagnetic wave. For the next twenty years, development was at a standstill. It was continued only when Oliver Heaviside reformulated Maxwell's theory of electrodynamics using vectors. The last doubts vanished when Hertz discovered radio waves.

Dinamična teorija elektromagnetnega polja

James Clerk Maxwell je na začetku leta 1865, pred sto petdesetimi leti, objavil članek z navedenim naslovom. Številni ga imajo za najpomembnejši članek 19. stoletja. To je bil že tretji Maxwellov korak v prizadevanjih, da bi predstavam »največjega eksperimentatorja 19. stoletja«, Michaela Faradaya, dal matematično obliko. Prvi korak je bil članek v dveh delih *O Faradayevih silnicah* v letih 1855 in 1856. V njem je Maxwell električne in magnetne pojave poskušal razumeti po podobnosti na primer s prevajanjem toplote ali tekočinskim tokom. Članek ni vzbudil pozornosti. Drugi korak je bil članek v štirih delih *O fizikalnih silnicah* v letih 1861 in 1862. V njem je Maxwell električne in magnetne pojave pojasnil z enotnim modelom. Ta članek je bil nekoliko bolj pregleden, a tudi ni vzbudil pozornosti. Oba članka sta vsebovala več novih enačb. V tretjem koraku se Maxwell ni več skliceval na podobnost in modele in je električne in magnetne pojave opisal z elektromagnetnim poljem.

Nenavadno je, da Maxwellova teorija več kot dvajset let ni spodbudila nadaljnjega razvoja. Freeman J. Dyson je zapisal: »Toda pomen Maxwellovega dela

za sodobnike ni bil očiten. Teorijo elektromagnetizma so za več kot dvajset let spregledali. Fiziki so enačbe težko razumeli, ker so bile zapletene. Matematiki so jih težko razumeli, ker je Maxwell uporabljal fizikalni jezik. Teorijo so imeli večinoma za mračno spekulacijo, ki je ni podpiralo veliko eksperimentalnih ugotovitev.« [1] Fiziki so težko sprejeli novi pojem polja.

Maxwell je bil spoštovan fizik. Med drugim je vodil Cavendishev laboratorij v Cambridgeu. Svojega položaja pa ni poskusil izkoristiti za širjenje svoje teorije. Bil je tudi predsednik matematično-fizikalnega dela Angleškega združenja za napredek naravoslovja. V njem je imel leta 1870 pomembno predavanje. Posvetil pa ga ni svoji teoriji, ampak tisti, ki jo je predložil William Thomson, poznejši lord Kelvin. Dyson se sprašuje, ali je Maxwell mislil resno ali pa je le poskusil zabavati poslušalce. Edino v zadnjem stavku je omenil, da obstaja še ena teorija, ki mu je ljubša. Taka skromnost se zdi kar izzivalna [1].

Pupinova zgodba

O pogledih na Maxwellovo teorijo izvemo več iz življenjepisa Mihajla Pupina [2]. Po končanem štu-

diju na kolidžu univerze Columbia v New Yorku leta 1883 je hotel bolje spoznati Maxwellovo teorijo. »[...] manjkalo mi je tisto razumevanje vidnih pojavov, ki si ga človek pridobi z zavestnim naporom. In jaz nisem imel takega fizikalnega znanja [...] Slutil sem, da je to pravi vzrok, da nisem mogel razumeti Maxwellove fizike.« [2] Odpotoval je v Evropo v Cambridge. Ni vedel, da je Maxwell leta 1879 umrl. Vseeno je ostal v Cambridgeu in se vpisal na univerzo. Tam so brusili predvsem njegovo matematično znanje. »Kadar se danes ozrem v preteklost, razmišljam, kako malo fizikov je spoznalo pomen [Maxwellove teorije], ko jo je objavil leta 1865 in celo dvajset let pozneje.« [2]

Leta 1885 se je preselil na univerzo v Berlinu. Tam je pri vodilnem nemškem fiziku Hermannu von Helmholtzu bolje spoznal teorijo. Pri njem je Pupin leta 1889 doktoriral iz fizikalne kemije in se vrnil v New York. Na univerzi Columbia je postal predavatelj in med ameriški študenti širil Maxwellovo teorijo.



Slika 1. Mihajlo Pupin (1858–1935) je bil rojen v Idvoru v Banatu. Srednjo šolo je nadaljeval v Pragi. Leta 1874 se je izselil v ZDA. Najprej je delal kot delavec, leta 1879 pa je vstopil v kolidž univerze Columbia v New Yorku. Leta 1883 je študij končal in se odpravil v Evropo. Dve leti je prebil na univerzi v Cambridgeu, nato je prešel na univerzo v Berlinu. Tam je pri Helmholtzu doktoriral, se vrnil v ZDA in postal predavatelj na univerzi Columbia. Med prvimi v ZDA je delal poskuse z rentgenskimi žarki. Leta 1895 je razširil Heavisidovo delo in dobil patent za pupinizacijo. Tuljave na določeni razdalji v vodniku zmanjšajo popačenje signala. Patent je bogato prodal, čeprav ga je družba, ki ga je kupila, komaj izkoristila, ker je razpolagala s svojimi patenti.

Maxwellove enačbe

Nemški fiziki so privzeli, da naelektreno telo deluje na drugo tako telo po praznem prostoru *na daljavo*. Izhajali so iz Coulombovega zakona za mirujoči telesi in dodatno upoštevali, da se delovanje ne razširi v trenutku. To je nasprotovalo Maxwellovem delovanju na blizu, to je *delovanju polja*. Pri tem je

sila na telo odvisna od vrednosti količin in njihovih odvodov po času in kraju na mestu telesa. Helmholtz je na enotni osnovi obravnaval dve od teorij z delovanjem na daljavo in Maxwellovo teorijo. S spreminjanjem vrednosti parametrov, ki jih je uvedel, je lahko napovedal izid poskusa v vsaki od treh teorij.

Enačbe v Maxwellovih člankih so bile zapletene, ker jih je dosledno pisal s komponentami v trirazsežnem prostoru. Leta 1873 je Maxwell izdal svoje veliko delo *Razprava o elektriki in magnetizmu*. V njem je enačbe poskusil poenostaviti s *kvaternioni*. Kvaternioni imajo enake lastnosti kot števila, le da v štirih dimenzijah. Pri njih se je treba odpovedati komutativnostnemu zakonu pri množenju. Opisal jih je leta 1853 William Rowan Hamilton. Hamilton je dolgo iskal tako možnost v treh dimenzijah in nazadnje spoznal, da ne obstaja. V dveh dimenzijah imajo take lastnosti kompleksna števila.

Kvaternion sestavljajo skalarna komponenta in tri vektorske komponente (ime *vektor* je vpeljal Hamilton). Enačbe Maxwellove elektrodinamike s kvaternioni so še manj nazorne in so vzbujale še večji odpor kot enačbe v komponentah. Zato je Maxwell *Razpravo* začel predelovati, a predelave ni dokončal. Upoštevali so jo v poznejših izdajah.

Oliver Heaviside

Heaviside je leta 1873 morda zaradi izida *Razprave* zapustil službo. Zapisal je: »Videl sem, da je [Razprava] velika, večja in največja, z ogromno možnostmi. Bil sem odločen, da jo bom obvladal [...] Vzelo mi je nekaj let, preden sem razumel, kolikor sem pač bil zmožen razumeti. Potem sem Maxwella dal na stran in šel po svoji poti. Napredoval sem veliko hitreje.« [3]

Heaviside se je oprl na vektorje. Prišlo je do precej odmevnega spora med »kvaternionisti« in »vektorisiti«. Danes ima večina fizikov kvaternione za nekoristne. Za vektorje se je zavzel tudi ameriški fizikalni kemik Josiah Willard Gibbs, ki se je prav tako kot Heaviside, neodvisno od njega, dokopal do vektorskega računa. Uporaba vektorjev je enačbe močno poenostavila. Heaviside je naposled dvajset Maxwellovih enačb, ki niso bile vse neodvisne druga od druge, nadomestil s štirimi preglednimi vektorskimi enačbami, ki jih poznamo danes. Nekaj časa so jih imenovali Heaviside-Maxwellove enačbe, dokler se ni ustalilo današnje ime – *Maxwellove enačbe*. Vektorji so popolnoma prevladali nad kvaternioni. Heavisidovo in Gibbsovo zaslugo za njihovo uveljavitev pa le redko omenijo.



Slika 2. Oliver Heaviside (1850–1925) je bil rojen v revnem delu Londona. V srednji šoli je pokazal svoje zmožnosti. Zaradi revščine pa si družina ni mogla privoščiti, da bi nadaljeval šolanje. Tako je ostal brez formalne izobrazbe. Študiral pa je sam. Leta 1869 je sprejel službo na brzojavnem uradu. Ob izidu Maxwellove Razprave o elektriki in magnetizmu je službo pustil. Nazadnje je bistveno preoblikoval Maxwellovo elektrodinamiko. Leta 1880 je raziskoval kožni pojav in patentiral koaksialni vodnik. Raziskoval je potovanje elektromagnetnega signala po ravnem vodniku in izpeljal telegrafsko enačbo. Za elektrotehniško revijo je pisal članke, ki so pozneje izšli v obsežnem zborniku. Veliko je naredil tudi v matematiki, v kateri pa so mu očitali, da je površen. Pozneje so njegove korake utemeljili matematiki. Heaviside je bil posebej. Z leti so postala njegova dejanja vse bolj nenavadna.

Heinrich Hertz

Maxwell je uvedel premikalni tok: spremenljivo električno polje ima enak magnetni učinek kot tok električnih nabojev po vodniku. To je bil eden od najbolj spornih delov Maxwellove teorije. Pri nagradni nalogi berlinske akademije je bilo treba izmeriti magnetno polje premikalnega toka. Hertz je uvidel, da naloge z razpoložljivimi napravami ne more rešiti brez ovinkov: »Toda vseeno sem si prizadeval, da bi našel kako novo pot, in tedaj se je moje zanimanje usmerilo na vse, kar je povezano z električnim nihanjem«. [4] Električno nihanje v nihajnem krogu iz tuljave in kondenzatorja so raziskovali že nekaj časa. Leta 1853 je William Thomson izpeljal enačbo za nihajni čas nihajnega kroga. Različni raziskovalci so opozorili na električno nihanje v precejšnji razdalji od kroga. Pojava pa niso spremljali, ker so mislili, da gre za indukcijo.

Hertzov laboratorij v Karlsruheju je bil dobro opremljen. V njem sta bili dve veliki tuljavi, iz katerih je sestavil nihajna kroga in začel delati poskuse. V razpravi o zelo hitrih električnih nihanjih je opisal oddajni nihajni krog in sprejemni nihajni krog. Oddajni krog je poganjal s sunki električne napetosti. Po iskrah v iskrišču sprejemnega kroga je sklepal, da nihanje v oddajnem krogu povzroča nihanje v

sprejemnem krogu. Iskrišče sta sestavljali kovinski kroglici s premerom po dva centimetra, katerih razdaljo je naravnaval z mikrometrskim vijakom. Tok je bil tem večji, čim večja je bila razdalja med kroglicama, pri kateri so se pojavile iskre.



Slika 3. Heinrich Hertz (1857–1894) je bil rojen v Hamburgu. Po navadi nemških študentov je študiral na več univerzah, nazadnje na univerzi v Berlinu. Tu je leta 1880 pri Helmholtzu zagovarjal doktorsko delo. Potem je bil tri leta Helmholtzov asistent. Leta 1883 je sprejel mesto profesorja na univerzi v Kielu in nato na tehniški visoki šoli v Karlsruheju. Nazadnje je leta 1889 prešel na univerzo v Bonnu. Tu je obravnaval Maxwellovo elektrodinamiko s teoretične strani. Maxwellove enačbe v vakuumu je zapisal tako, da se je jasno pokazala simetrija med električnim in magnetnim poljem. Enačbe so nekaj časa imenovali Hertz-Maxwellove enačbe. Hertzovi sklepi so bili podobni Heavisidovim. Za ta korak je Hertz prvenstvo priznal Heavisidu.

Sčasoma sta iz nihajnih krogov nastala *nesklenjena* ali *odprta nihajna kroga* v obliki dolge medeninaste žice s kroglastima na krajiščih. V iskrišču sprejemnega kroga so iskre preskakovale najizdatneje, ko se je frekvenca tega kroga ujemala s frekvenco oddajnega kroga, torej ko sta kroga bila v resonanci. Frekvenco je ocenil na sto milijonov nihajev na sekundo. Opazil je, da iskre v krogu povzročajo iskre v bližnjem krogu, če je mogoče prvo iskrišče videti iz drugega. Tako je odkril *fotoelektrični pojav*, ki pa ga ni utegnil raziskati.

Pri vrsti novih poskusov je sprejemni krog postavil v vse večjo razdaljo od oddajnega kroga, ki je bil z njim v resonanci. Z merjenjem je ugotovil, da učinki pojemajo obratno sorazmerno z razdaljo. To je bilo znamenje, da gre za valovanje. Učinki mirujočega naboja namreč pojemajo obratno sorazmerno s kvadratom razdalje. Hertz je odkritje opisal v posebni razpravi leta 1887. Še istega leta je opisal induksijske pojave v izolatorju. Helmholtzu je razpravo poslal s pripombo: »Ne morem si kaj, da Vam ne bi poslal tega dela, ker obravnava predmet, na katerega ste me opozorili pred leti. Nenehno sem imel pred očmi to nalogo in končno sem našel pot

k njeni rešitvi, ki je nazadnje dala jasen rezultat. Najbrž se ne motim, če imam opisani poskus za dovolj prepričljiv. Mislim, da morejo biti uporabljena električna nihanja zelo pripravna v elektrodinamiki neskljenjenih tokov. Naredil sem že nekaj nadaljnjih korakov.« [4]

Vrsta poskusov je Hertzu pokazala, da obstaja elektromagnetno valovanje z valovno dolžino okoli tri metre, kar je veliko več od valovne dolžine vidne svetlobe. Tako je odkril *radijske valove* in si prislužil nagrado pruske akademije. S poskusi je posredno potrdil, da obstaja premikalni tok. Brez tega toka namreč ne bi bilo mogoče pojasniti radijskih valov. Pozneje je Hertz izpopolnil teorijo, spremenil okoliščine in delal poskuse z valovanjem z valovno dolžino 30 centimetrov. Leta 1889 je sprejel Maxwellovo teorijo in v njenem okviru raziskal električne in magnetne silnice. Obravnaval je dipol, to je droben pozitivni naboj in negativni naboj z enako absolutno vrednostjo, ki nihata drug proti drugemu. Silnice se napihujejo, stiskajo, odlepajo in po prostoru potujejo s hitrostjo svetlobe.

Leta 1889 je poročal o novih poskusih. Valovanje iz ravne antene je z odbojem na pločevini, zviti v plašč parabolnega valja, zbral v skoraj vzporeden curek kratkih radijskih valov. Kot sprejemnik je uporabil ravno anteno z iskriščem na sredi. Opazoval je pojave, ki jih poznamo pri svetlobi. Radijski valovi so se odbili na ravni pločevini tako, da je veljal odbojni zakon. Na orjaški prizmi iz asfalta so se lomili tako, da je veljal lomni zakon. Opazoval je uklon in interferenco. Kot uklonska mrežica je delovala vrsta navpičnih kovinskih palic v enakih razmikih.

Hertzeve poskuse so v kratkem ponovili Oliver Lodge v Angliji, Augusto Righi v Italiji, Aleksandr Stepanovič Popov v Rusiji in Eduard Branly v Franciji. Sprva nobeden od njih, enako kot Hertz, ni pomislil na možnost, da bi novi pojav uporabili za prenašanje sporočil. Med prvimi je možnost

omenil William Crookes leta 1892. Drugi pa so bili prepričani, da ni mogoče »z električnimi silami vzbuditi valovnih motenj v etru«. Po letu 1894 se je naloge lotil Guglielmo Marconi in postopno prenašal sporočila z radijskimi valovi na vse večje razdalje. Ob začetku novega stoletja so Marconijeva sporočila iz Evrope že segla do Amerike. Poskuse je delal tudi Nikola Tesla, ki je uvedel več izboljšav. Zaradi pomanjkanja sredstev pa jih ni nadaljeval. Pri vseh navedenih poskusih so bili Hertzevi valovi močno dušeni, kar pomeni, da so hitro zamrli, in je bilo treba oddajni krog nenehno spodbujati. Na začetku 20. stoletja so razvili vakuumске elektronke in z njimi sestavili oscilator, ki je dajal nedušeno nihanje. Šele tedaj je bilo mogoče z radijskimi valovi prenašati govor in glasbo in ne samo Morsejeve abecede. Zaradi Hertzevega odkritja radijskih valov so fiziki razmeroma hitro opustili delovanje na daljavo in sprejeli Maxwellovo elektrodinamiko.

Maxwellove enačbe v današnji obliki za prazen prostor:

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0, \quad (1)$$

električno polje nima izvirov.

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (2)$$

magnetno polje nima izvirov.

$$-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \operatorname{rot} \vec{E}, \quad (3)$$

spremenljivi magnetni pretok povzroči vrtnice električnega polja.

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \operatorname{rot} \vec{B}, \quad (4)$$

spremenljivi električni pretok povzroči vrtnice magnetnega polja.

Del nesimetrije je navidezen, ker magnetno polje opišemo z *gostoto* $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ in ne z jakostjo, električno polje pa z *jakostjo* $\vec{E}$ in ne z gostoto $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$.

Nesimetričen je minus v tretji enačbi.

Literatura

- [1] F. J. Dyson, Why is Maxwell's theory so hard to understand, na spletu: <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/em/dyson.pdf>, (maj 2015).
- [2] M. Pupin, Od pastirja do izumitelja, DZS, Ljubljana 1977.
- [3] P. J. Nahin, Oliver Heaviside, Scientific American (1990), 80–87 (6); B. J. Hunt, Oliver Heaviside. A first-rate oddity, Physics Today 64 (2011) 48–54 (11).
- [4] J. Strnad, Fiziki. V. del, Modrijan. Ljubljana 2005, str. 114–123.