

VZNIK KLASICKEJ ELEKTRODYNAMIKY. OBJAV ELEKTROMAGNETICKEJ INDUKCIE A ELEKTROMAGNETICKEHO POĽA

1. Pokusy vedúce na objav elektromagnetickej indukcie (M. Faraday, J. Henry)

Oerstedove, Biotove - Savartove, Ampérove experimentálne poznatky a Weberov zákon, vyjadrené dokonca pomocou matematických rovníc položili základ poznania o vzájomnej súvislosti elektrických a magnetických javov a významne prispeli do objavu tzv. klasickej elektrodynamiky. Ich hlavným nedostatkom bolo, že vychádzali aj z Newtonovej koncepcie (okamžitého silového) pôsobenia "na diaľku". Newtonova koncepcia formálne dokázala dokázala vynikajúco vysvetliť pohyb planét a Keplerove zákony. Formálna podobnosť matematického vyjadrenia gravitačného zákona a silových zákonov v ampérovej elektrodynamike (závislosť síl od prevrátenej hodnoty druhej mocniny vzdialenosti) prirodzene navádzali na predpoklad o nekonečnej rýchlosti šírenia gravitačných, elektrických a magnetických síl, ktoré nie sú prenášané nijakým médiom. Pojem silového poľa, v ktorom sa vzájomné pôsobenie nábojov, elektrických vodičov prúdu a magnetov uskutočňuje konečnou rýchlosťou šírenia "informácie" o vzájomnej polohe, ešte len čakal na svoje objavenie.

Do dôsledného zohľadnenia konečnej rýchlosti šírenia fyzikálnej interakcie prispel najmä A. EINSTEIN vypracovaním špeciálnej teórie relativity v roku 1905. Na jej základe bolo treba práve v oblasti klasickej mechaniky vykonať významné korekcie. Pojmy ako dĺžka úsečky, časový interval, hmotnosť telesa, sila, hybnosť, rýchlosť a zrýchlenie nadobudli relatívny charakter (závislosť od voľby pohybujúcej sa vzťažnej sústavy, v ktorej sa určujú). Tým, že A. Einstein postuloval rýchlosť šírenia svetla vo vákuu ako konštantu nezávislú od voľby vzťažnej sústavy a všetky inerciálne vzťažné sústavy považoval za rovnocenné, vznikla *relativistická fyzika*. Tá prirodzene dáva pre rýchlosti oveľa menšie, ako je rýchlosť svetla vo vákuu, výsledky zhodné s tým, čo poskytovala klasickej fyzika. Nové poznatky o elektromagnetizme nadväzujúce na Ampérovu elektrodynamiku objavené v rokoch 1830-1890, teda ešte pred vznikom Einsteinovej špeciálnej teórie relativity, v prevažnej väčšine prípadov už prirodzene mali relativistický obsah, hoci o tom ich objavitelia nevedeli. Tu už len upozorníme, že v prípade klasickej elektrodynamiky šlo o teóriu "makroskopickú", ktorá si nekladie za cieľ opísať javy v oblasti mikrosvetla. Tie opisuje kvantová elektrodynamika.

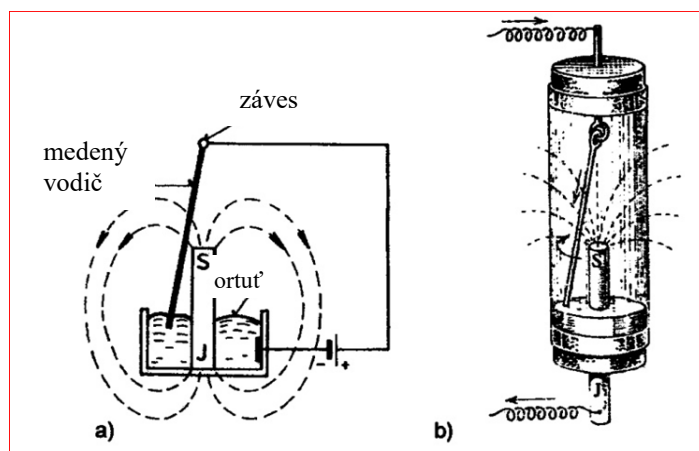
Na začiatku významného posunu v správnom poznaní povahy elektromagnetických javov stál predovšetkým anglický fyzik - experimentátor MICHAEL FARADAY (1791-1867). Dovtedy ťažko a postupne zbierané poznatky o elektrických a magnetických javoch výrazne posunul do nového poznania fyzikálneho obrazu sveta. Nielen tým, čo objavil, ale aj to, akú vedeckú metodiku či vedecké myslenie začal používať. Jeho životopis a dielo možno podrobne nájsť v mnohých prameňoch. Nás bude zaujímať hlavne jeho prínos pre rozvoj elektrotechniky. Tu už len spomeňme jeho krédo: *Work, finish, publish!* Zachovalo sa po ňom množstvo písomných záznamov o jeho experimentoch. M. Faraday je právom označovaný za jednu z najvýznamnejších postáv dejín elektrotechniky. Hoci nemal hlbšie matematické vzdelanie, stál aj pri zrode nových teórií. Dokázal totiž fyzikálne poznatky slovne formulovať s matematickou presnosťou.

M. Faraday mal iba nevyhnutné základné vzdelanie. Ako 13-ročný sa stal poslúchom londýnskeho kníhkupca Riebaua a v roku 1805 sa stal na 7 rokov učňom v odbore kníhviazačstvo. Tak mal možnosť (po nociach) čítať rôzne knihy, okrem iného aj kapitolu o elektrine, ktorá vyšla v roku 1797 v Encyklopaedia Britannica. V rokoch 1810-13 navštevoval popri učení aj súkromnú školu, kde sa na praktických príkladoch vyučovali aj prírodné vedy. Tak sa dozvedel o Voltovom stĺpe, Galvaniho pokusoch a začal v kníhviazačskej dielni vykonávať pokusy s trecou elektrinou a leidskou fľašou. Pokusy si zapisoval do denníka, ktorý neskôr vlastnoručne zviazal. Kníhkupec jeho vzdelávanie podporoval a zohnal mu cez jedného zákazníka lístky na cyklus prednášok vtedy najpopulárnejšieho vedca HUMPHRYHO DAVYHO (1778-1829), pôsobiaceho

v Kráľovskom inštitúte Veľkej Británie. Davy sa stal Faradayovým idolom. V roku 1813 mu napísal 22-ročný Faraday žiadosť o prijatie za asistenta, pričom k žiadosti predložil zviazané krasopisne spracované Davyho prednášky. Bol prijatý, dostal aj byt a oficiálne čistil fľaše a skúmavky. Ešte v tomto roku sprevádzal Davyho na jeho 18-mesačnej ceste po Európe (Francúzsko, Svajčiarsko, Taliansko, Grécko, Turecko) a to dokonca počas francúzsko-anglickej napoleonskej vojny. Davy však získal povolenie na cestu, pretože tesne predtým dostal od Napoleona medailu a 3000 frankov za jeho vedecké práce o galvanickom článku. Faraday síce v skutočnosti robil rodine Davyho sluhu, no zároveň sa zoznámil s mnohými význačnými vedcami, napr. v Paríži s Ampérom (vtedy bol Ampère učiteľ matematiky na Sorbone), Gay-Lussacom a spolu s A. Humboldtom, ktorý vtedy žil v Paríži, robil pokusy so zlučovaním vodíka a kyslíka. V Miláne boli hosťami u A. Voltu. H. Davy dostal v Paríži od Ampéra nejakú látku získanú z morských rias a identifikoval ju ako nový prvok - jód. Vo Florencii Davy spolu s Faradayom dokázali, že diamant je forma čistého uhlíka. Faraday sa popri veľkom H. Davym stal obľúbeným pre skromnosť a chytrosť.

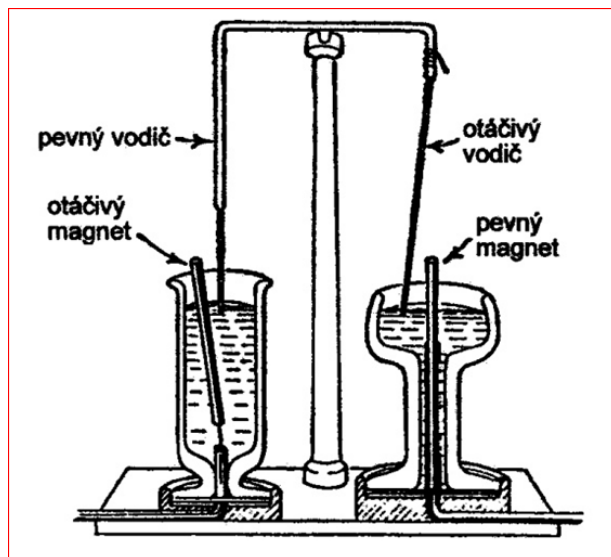
Po návrate do Londýna (1815) sa Faraday stal vedeckým asistentom v Kráľovskom ústave a pracoval v oblasti analytickej chémie, elektrochémie a metalurgie. Objavil benzén, rôzne druhy optických skiel, zliatin oceli a vedel skvapalňovať plyny. Postupne sa dostal na úroveň svojho nadriadeného H. Davyho. V rokoch 1815-18 konal "večerné prednášky" z fyziky a chémie. Hoci mal pripravený písomný podklad, rečnil bez papiera. Na jeho prednášky chodili význačné osobnosti aj široké množstvo záujemcov. H. Davy neskôr na otázku, čo je jeho najväčší objav, odpovedal: M. Faraday. Faraday postupne dosiahol rôzne stupne vedeckého i spoločenského uznania. Žiakov ani deti však po sebe nezanechal a na sklonku života trpel stratou pamäti. Odmietal však prijať akékoľvek počty, dokonca i šľachtický titul. Bol silným prívržencom evanjelickej cirkvi sandemiánskej, no napriek tomu, že Biblia bol preňho nedotknuteľná, v odhaľovaní prírodných zákonov mal veľmi kritický úsudok.

O elektrické a magnetické javy sa Faraday začal zaujímať až po Oerstedovom objave pôsobenia elektrického prúdu na magnetku, zistenom v roku 1820. Spolu s H. Davym pokusy zopakovali. Davy vtedy napr. zistil, že drôt, cez ktorý preteká prúd, priťahuje železné piliny. No Davy sa o tieto javy prestal zaujímať a Faraday mohol pokračovať samostatne. Pokúšal sa preštudovať Ampérovu teóriu, ale v liste z roku 1825 sa Ampérovi ako svojmu dobrému známemu zdôveril, že ju celkom nepochopil. Už v roku 1821 Faraday vykonal pokus s vodičom prúdu, ktorý sa nachádzal v poli permanentného magnetu.



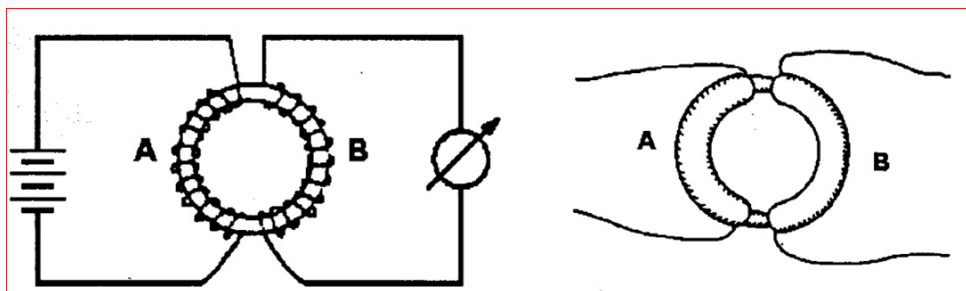
Obr. 1. Faradayov pokus s otáčavým vodičom nachádzajúcim sa v poli permanentného magnetu a) princíp pokusu b) praktická realizácia. Tento pokus uskutočnil na základe rozhovoru H. Davyho a W. Wollastona, ktorého bol svedkom. H. Davy následne obvinil Faradaya z nekorektného správania.

Vodič zavesený na osi otáčania v dôsledku pôsobiacej sily konal otáčavý pohyb. Druhý koniec vodiča bol ponorený do ortuti (obr. 1). Bol to **jeden z prvých pokusov realizovať princíp elektromotora**. Iný Faradayov pokus demonštroval prenos mechanickej energie pomocou elektrického prúdu (obr. 2).



Obr. 2. Faradayov experiment s prenášaním mechanickej energie pomocou elektrického prúdu. Ľavá strana predstavuje "generátor" prúdu, pravá časť funguje ako "elektromotor".

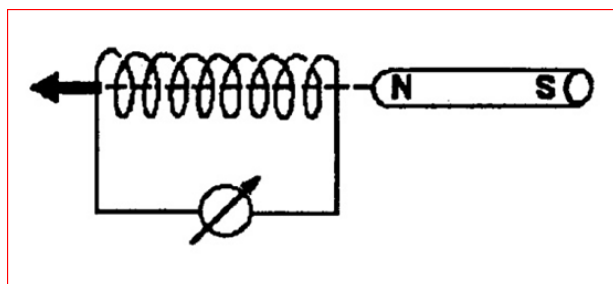
Faraday zastával predstavu o jednote prírodných síl (elektriny, magnetizmu, gravitácie, svetla, chemického zlučovania prvkov). K Oerstedovmu javu (vznik magnetickej sily v okolí vodiča prúdu) musí preto existovať jav inverzný, to jest, že *magnetizmus musí vyvolávať elektrický prúd*. Na tejto myšlienke pracoval od roku 1822 do roku 1831. Napokon sa mu naozaj podarilo 29. 8. 1831 experimentálne potvrdiť **jav elektromagnetickej indukcie**, čo je vlastne vyvolanie elektrického prúdu pomocou časovo premenlivého magnetickeho poľa. Použil na to prstenec z mäkkého feromagnetika s dvoma navinutými navzájom vodivo nespojenými cievkami. Prvá cievka bola pripojená na zdroj napätia, druhá na merací prístroj (galvanometer). Spočiatku sa mu nedarilo, pretože zisťoval, že ustálený jednosmerný prúd v prvej cievke nikdy nevyvoláva v druhej cievke prúd. Bolo to dané tým, že ustálený prúd síce vyvolá v železnom jadre magneticke pole, ale pokiaľ sa toto pole s časom nemení, galvanometer nezaznamená na druhej cievke nijaký prúd.



Obr. 3. Schéma Faradayovho experimentu z 29. 8. 1831. Vpravo pôvodný Faradayov náčrt "vzájomne zasúvateľných" husto navinutých cievok. V zásade je to princíp transformátora.

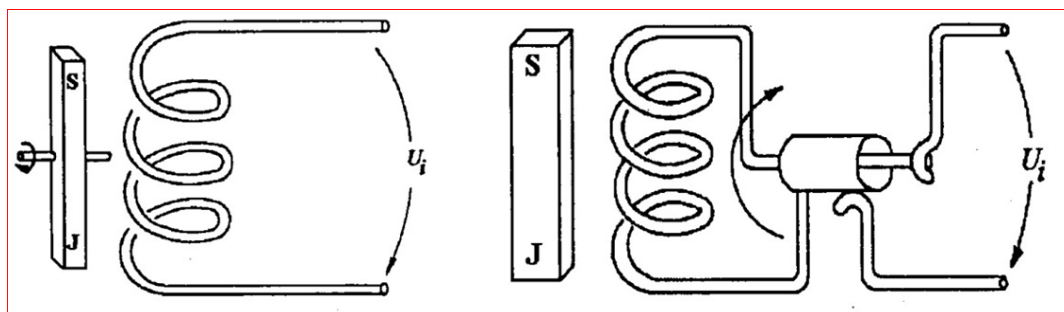
V onen šťastný deň však zistil, že v okamihu pripojenia zdroja napätia na cievku A sa na cievke B objaví prúdový impulz, zaznamenaný galvanometrom. Pri odpojení galvanického článku sa na cievke B objavil prúdový impulz opačného smeru. Tento jav nazval elektromagnetickou indukciou. Faraday svoje pokusy opakoval a rôznym spôsobom modifikoval. Usiloval sa pochopiť podstatu javu, a preto o výsledkoch referoval na zasadaní Kráľovskej spoločnosti až 24. 11. 1831. Neskôr v roku 1855 vydal dielo *Experimentálne výskumy o elektrine*, ktoré obsahuje 3362 číslovaných odstavcov. Prvých 17 odstavcov je venovaných práve pokusom s dvoma do seba zasunutými husto navinutými cievkami. Zistil tiež, že pri zachovaní geometrie pokusu nezáleží na tom, aké napätie má galvanický článok alebo aký odpor má vinutie cievky A. (Dôležitá je teda len "rýchlosť časovej zmeny prúdu" pri zapnutí alebo vypnutí prúdu v cievke A.)

Ďalšie experimenty dokázali **vznik indukovaného elektromotorického napätia na cievke B aj pri vzájomnom pohybe primárnej a sekundárnej cievky.** (To je samozrejme fyzikálne iný prípad. V pôvodnom pokuse podľa obr. 3 sa cievky navzájom nepohybovali.) Faraday taktiež demonštroval zosilnenie efektu zasunutím železného jadra do primárnej cievky. Zasunutie medeného jadra tento efekt nevyvolalo. Napokon tiež zistil **vznik indukovaného prúdu v obvode cievky pri pohybe permanentného magnetu v jej okolí** (obr. 4).



Obr. 4. Náčrt Faradayovho pokusu zo 17. 10. 1831, v ktorom sa Faradayovi definitívne podarilo "premeniť magnetizmus na elektrinu". Po zasunutí tyčového magnetu do cievky sa ručička galvanometra pohla.

Poznámka. Indukované napätie vzniká ako pri pohybe magnetu v okolí vodiča, tak aj pri pohybe vodiča v okolí nehybného magnetu (obr. 5.) A. EINSTEIN vo svojej práci "O elektrodynamike pohybujúcich sa telies" z roku 1905 (špeciálna teória relativity) toto uvádza ako akýsi paradox: indukované napätie U_i je v oboch prípadoch rovnaké, avšak vzorce, ktorými sa U_i počíta, sú rozdielne. To udáva ako motiváciu pre hľadanie rovníc, ktoré by tieto dva prípady zjednotili.



Obr. 5. Dva špeciálne prípady vzniku indukovaného napätia. Pri tej istej geometrii pokusu vzniká v každom prípade také isté U_i . Vľavo však rotuje magnet a cievka sa nepohybuje (teda s časom sa mení magnetické pole v okolí vodiča), vpravo rotuje cievka a magnet sa nepohybuje (magnetické pole je stále, ale pohybuje sa vodič).

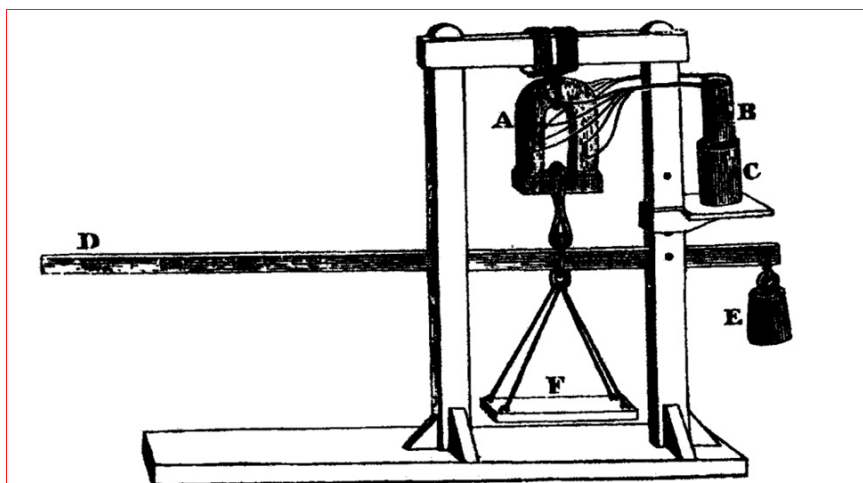
V odstavcoch 26 a 38 *Experimentálnych výskumov v elektrine* M. Faraday určuje smer prúdu indukovaného v obvode cievky ako prúdom z galvanického článku, tak aj pohybom magnetu. Napríklad v pokuse znázornenom na obr. 4 zistil, že pri vsunutí železného jadra zaznamená galvanometer prúdový impulz, ale pri vysunutí jadra je prúdový impulz v galvanometri opačný. Tento jav nazval Faraday **magnetoelektrickou indukciou**. (Dnes sa tento pojem nepoužíva.) Tým objavil aj pravidlo určovania "smeru indukovaného prúdu":

Indukovaný prúd tečie tak, aby svojimi účinkami (svojím magnetickým poľom) bránil časovej zmene magnetického toku, ktorá vyvolala jeho vznik.

Takúto formuláciu pravidla pre určovanie smeru indukovaného prúdu vyslovil neskôr Heinrich Friedrich EMIL LENZ (1804-1865), ruský fyzik nemeckého pôvodu pôsobiaci prevažne v Petrohrade na univerzite a v akadémii vied. E. Lenz potvrdil aj platnosť Jouleovho zákona o teple vyvolanom elektrickým prúdom. Spolu s B. Jacobim navrhol metódu na výpočet elektromagnetov a objavil vratnosť elektrických strojov.

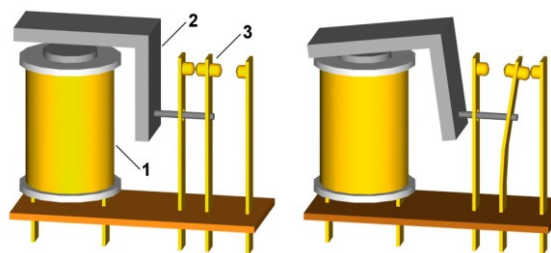
Koncom roka 1834 sa Faraday začal zaoberať javom, pri ktorom pri vypnutí prúdu v cievke, napájanej galvanickým článkom, vzniká na kontaktoch vypínača iskra. Tak zistil, že cievka pri prechode časovo premenlivého prúdu "sama na sebe" indukuje tzv. samoindukované napätie. To je jav **samoindukcie**. Faraday o ňom referoval 29. januára 1835 v Royal Society. Napísal: *Každá časť elektrického prúdu pôsobí indukciou na susednú časť toho istého prúdu, aj keď je to v tom istom dróte a v tej istej časti tohto drótu.* Na jav samoindukcie ho upozornil W. Jenkin, ktorý zistil, že iskra pri vypínaní vznikne pri prechode prúdu cievkou so železným jadrom, ale nie pri spojení pólov zdroja priamym vodičom.

Z časového hľadiska však prvenstvo v objave javu elektromagnetickej indukcie má americký fyzik JOSEPH HENRY, ktorý sa zaoberal elektromagnetmi podkovovitého tvaru. Jav elektromagnetickej indukcie objavil pravdepodobne už v roku 1830 a jav samoindukcie v roku 1831. Na železnú tyč navliekol cievku pripojenú ku galvanometru. Tyčku umiestnil medzi póly elektromagnetu tvaru podkovy. Elektromagnet napájal galvanickým článkom a menil napájacie napätie (zasúval a vysúval elektródy z elektrolytu). Tým sa časovo menil prúd v elektromagnete, a teda i magnetické pole v tyčke s navinutou cievkou. Pri vypnutí a zapnutí prúdu v elektromagnete galvanometer registroval indukovaný prúdový impulz. Princípiálne je to ten istý poznatok, aký urobil v roku 1831 Faraday. Henry zaviedol pojem *indukčnosť cievky*. Taktiež zistil, že ak v cievke prerušíme prúd, na kontaktoch vypínača vznikne iskra. Z toho usúdil, že pri vypnutí prúdu vzniká v cievke vysoké samoindukované napätie. J. Henry na rozdiel od Faradaya však nezanechal zo svojich pokusov hodnoverné záznamy a obaja fyzici o sebe zrejme nevedeli. Na obr. 6 je Henryho testovacie zariadenie na určenie ťažnej sily elektromagnetu. Jeho elektromagnety dokázali uniesť niekoľko ton záťaž.



Obr. 6. Henryho testovacie zariadenie na meranie ťažnej sily elektromagnetu

J. Henrymu sa pripisuje i vynález *elektromagnetickeho relé*, ktoré bolo použité na konštrukciu prvého *telegrafu*, umožňujúceho spojenie na asi 1 míľu. Bolo jednovodičové; druhým "vodičom" bola zem. Relé pozostáva z cievky s vloženým pohyblivým jadrom, prepojeným na pružné kontakty. Pri prechode prúdu cievkou sa kontakty zopnú alebo rozopnú, čím sa ovláda prúd v spínanom okruhu. Neskôr bol poradcom S. Morseho. Skúmal aj oscilácie v induktívne viazaných obvodoch. V jednom z pokusov umiestnil 1 závit v miestnosti na prvom poschodí a druhý závit v sklade. Vzdušná vzdialenosť závitov bola cca 9 metrov. Ak nechal vybit' leidenskú fl'asu cez prvý závit, nezmagnetovaná strelka v druhom závite sa zmagnetizovala. Vysvetliť tento jav nevedel. Tento pokus pripomína Hertzove pokusy konané o 50 rokov neskôr, ktorými sa preukázala existencia elektromagnetickeho vlnenia ako zvláštnej formy elektromagnetickeho poľa.



Obr. 7. Elektromagnetické relé. 1 = cievka 2 = magnetická "kotva" 3 = pružný spínací kontakt

Takto sa dostávame k jednému z ďalších priekopníckych činov M. Faradaya, ktorým je **faktický objav elektromagnetickeho poľa**. Faraday postupoval empiricky a vychádzal zo známych spôsobov geometrického zobrazenia magnetickeho poľa pomocou železných pilín v okolí magnetu (prvý to pozoroval J. Seebeck v roku 1821). Do prostredia medzi vodičmi, magnetmi a nábojmi zaviedol pojmy *siločiar* a *silová trubica*. Na zobrazenie smeru a veľkosti elektrickej sily pôsobiacej na indikačnú nabitú guľôčku používal Coulombov torzný elektrometer.

Poznámka. Nemecký fyzik W. E. Weber, súčasník Faradaya, významne rozvinul Ampérovu elektrodynamiku. Jej nedostatkom bolo to, že Ampére oddelene chápal elektromagnetickú a elektrostatickú teóriu a nebral do úvahy existenciu elektromagnetickej indukcie. To sa Weber podujal vyriešiť. Ako sme uviedli v predošlej kapitole, Weber odvodil z Ampérovho silového zákona vzťah pre silu medzi dvoma navzájom sa (pomaly) pohybujúcimi nábojmi, ktorý v prípade, ak náboje nemajú rýchlosť a zrýchlenie, prejde na Coulombov zákon. Elektrostatika je teda len špeciálny prípad elektrodynamiky. Neskôr Weber dokonca odvodil vzťah pre indukované elektromotorické napätie, ktoré v uzavretom vodiči vyvoláva indukovaný prúd. Weber teda v rámci koncepcie pôsobenia na diaľku našiel vzťah opisujúci elektromagnetickú indukciu a stal sa pre iných bádateľov v polovici 19. storočia vrcholnou autoritou v oblasti elektromagnetizmu. Pred Weberom odvodil vzťah pre zákon elektromagnetickej indukcie F. Neumann, pôsobiaci v Kaliningrade. Ani jeden z týchto významných fyzikov neuvažoval o možnosti, že by prostredie medzi nábojmi, vodičmi prúdu a magnetmi nejako mohlo ovplyvňovať ich vzájomné pôsobenie. M. Faraday zastával úplne odlišné stanovisko. História dala za pravdu Faradayovi, tým však zásluhy Ampéra a Webera pre rozvoj elektrodynamiky nestrácajú na význame.

Faraday v zásade zavrhol newtonovskú koncepciu pôsobenia elektrických a magnetických síl na diaľku. V tejto koncepcii silové pôsobenie nie je ničím sprostredkované a vzniká okamžite. Faraday naopak prikladal veľký význam práve prostrediu v okolí nábojov, prúdov a magnetov. V tomto prostredí určitá elektrická alebo magnetická zmena ovplyvní okolie a táto zmena (rozruch) sa šíri konečnou rýchlosťou ďalej. Hovoríme o koncepcii *pôsobenia na blízko*. Táto koncepcia vychádza z predstavy o poli, ktoré neoddeliteľne existuje v okolí nábojov, vodičov prúdu a magnetov. Pojem poľa zaviedli pôvodne francúzski

matematici v 18. storočí ako abstraktný pojem, ale Faraday mu dal význam fyzikálnej reality ako jednej z foriem existencie hmoty. V *Experimentálnych výskumoch elektriny* napísal: "Pri tomto pohľade na magnet je prostredie alebo priestor okolo neho tak isto podstatný ako magnet sám, lebo je súčasťou skutočného a úplného magnetického systému".

Je zrejmé, že Faraday pôvodne nepoužíval pojem poľa, ale pojem prostredia medzi nábojmi, prúdmi a magnetmi, ktorého povahu znázorňovanú siločiarami ešte presne nepoznal, no považoval ho za neoddeliteľný prejav hmoty.

Faradayova koncepcia pôsobenia na blízko sa opiera o dva princípy:

1. Pôsobenie na diaľku nejestvuje. Hmota nemôže pôsobiť tam, kde nie je. Pôsobí prostredníctvom poľa, ktoré je fyzikálnou realitou. Za indukciu je zodpovedné dielektrikum, ktoré sa pritom kontinuálne polarizuje. Dielektrikum je substancia, cez ktorú sa šíria elektrické polia. (Faraday zaviedol pojem merná elektrická indukcia, čo je dnes označované ako permitivita prostredia).
2. Rozloženie elektrických a magnetických síl nemožno znázorniť priamkami, ale krivkami; ich usporiadanie a tvar závisia od vlastností prostredia, ktorým sa elektrické a magnetické sily šíria. Prostredie teda ovplyvňuje priebeh elektrických a magnetických dejov. Svedčí o tom existencia mernej elektrickej indukcie rôznych telies. (Faraday dokonca experimentálne určil permitivitu niektorých látok)

Súčasťou koncepcie pôsobenia na blízko boli elektrické a magnetické *siločiar*y. Používali ich ako pojem Aepinus aj Seebeck, no pre Faradaya to boli čiary vyjadrujúce fyzikálnu realitu: pôsobením nábojov a prúdov menia svoj tvar, je pre ne podstatná prítomnosť hmoty, v závislosti od vlastností prostredia menia svoju hustotu, môže v priestore jestvovať nezávisle od zdrojov; elektrický alebo magnetický rozruch sa šíri konečnou rýchlosťou. Faraday o svojej teórii siločiar referoval v Royal Society 27. 11. a 11. 12. 1851. Názov referátu bol: "O magnetických siločiarach, ich určitej povahe a o ich rozdelení vnútri magnetu a v priestore".

Magnetickú siločiaru (dnes ju nazývame indukčná čiara) definoval Faraday takto:

- a) je to čiara, ktorú opisuje veľmi malá magnetka, ak ňou pohybujeme v pozdĺžnom smere tak, aby v ľubovoľnom okamihu ležala na dotyčnici ku dráhe;
- b) je to čiara, pozdĺž ktorej sa neindukuje elektrický prúd v pohyblivom vodiči preloženom cez túto čiaru, kým pohyb (vodiča) v ľubovoľnom inom smere prúd indukuje.

Faraday uprednostňoval definíciu pod bodom b), lebo je použiteľná aj v prostredí, kde sa metóda zobrazenie poľa pomocou železných pilín alebo magnetiek nedá použiť. Považa, smer a veľkosť magnetických síl sa dá lepšie opísať pomocou siločiar, a to v ľubovoľnom bode priestoru, než pomocou predstavy o silách sústredených v bodových centrách alebo pomocou predstavy o tom, že v magnete je rozložené fluidum. Pomocou siločiar vieme vystihnúť i proces prenosu síl, ktorý iné teórie dovtedy nebrali do úvahy. Siločiar y charakterizujú elektromagnetické prejavy v ľubovoľnom bode prostredia, dokonca i vo vákuu. Vákuum je podľa Faradaya vyplnené pravdepodobne éterom.

M. Faraday súčasne referoval aj o rade pokusov, z ktorých vyplynulo, že **v uzavretom obvode vzniká indukovaný elektrický prúd len vtedy, ak počet siločiar prechádzajúcich uzavretým obvodom sa pri relatívnom pohybe vodiča a magnetu mení. Veľkosť indukovaného prúdu je úmerná rýchlosti zmeny počtu týchto siločiar.**

Tento záver vyjadruje jediný matematický vzťah, ktorý Faraday vo svojich prácach napísal. Bol to vzťah pre výpočet indukovaného napätia

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

ktorý nazývame Faradayovým zákonom elektromagnetickej indukcie. Dodnes sa v tomto tvare uvádza vo všetkých učebniciach fyziky. Veličina Φ je magnetický (indukčný) tok, pôvodne zrejme vyjadrujúci počet siločiar prechádzajúcich plochou ohraničenou uzavretým obvodom. Indukované napätie U_i vzniká iba vtedy, ak sa magnetický tok s časom t mení (jeho časová derivácia je rôzna od nuly). Táto časová zmena magnetického toku sa dá dosiahnuť ako pohybom magnetu v okolí cievky, tak aj pohybom cievky v okolí nehybného magnetu (obr. 4,5). V prípade naznačenom na obr.3 časová zmena magnetického toku vzniká v železnom prstenci v dôsledku časovej zmeny prúdu v cievke A. Uvedený vzťah takto formálne platí ako pre (elektromotorické) napätie vznikajúce pohybom vodiča v časovom nepremennom magnetickom poli, tak aj pre indukované elektrické napätie vznikajúce v nehybnej cievke (alebo prúdovej slučke) v dôsledku časovej zmeny magnetického poľa. **Zákon sa stal východiskom pre konštrukciu generátorov prúdu a pre konštrukciu transformátorov.** V prípade generátora uzavretý vodič vložený do magnetického poľa rotuje okolo svojej osi. Podrobnejší rozbor rôznych prípadov indukcie možno nájsť v rôznych kurzoch a učebniciach fyziky, resp. teórie elektromagnetickeho poľa. To sa týka aj používania znamienka mínus v uvedenom vzťahu. Pojem *magnetického toku* Faraday pôvodne nepoužíval: spočiatku sa domnieval, že elektromagnetická indukcia predstavuje osobitný stav sekundárnej cievky, ktorý nazval elektrotonickým stavom.

Z predstavy o siločiarach ako zvláštnych hmotných objektoch sa logicky vyvinula predstava o **existencii elektromagnetickeho poľa**. V roku 1854 Faraday v práci *O fyzikálnej povahe magnetických siločiar* uviedol:

Zatiaľ sa nedá povedať, aký je to stav alebo s čím súvisí. Môže súvisieť s éterom, ako s ním súvisí svetelné žiarenie; vtedy by sme mohli hovoriť o súvisi medzi svetlom a magnetizmom. Môže súvisieť so stavom napätia alebo kmitmi éteru či azda s nejakým iným stavom analogickým elektrickému prúdu, s ktorým tak úzko súvisia magnetické sily. Či si budeme na zdôvodnenie nevyhnutne vyžadovať hmotu, závisí od toho, čo rozumieme pod pojmom hmota. Ak sa obmedzíme na vážiteľné a gravitačné substancie, hmota nie je pre fyzikálne magnetické siločiare o nič viac podstatná než pre svetelné lúče či teplo. Ak však za predpokladu o existencii éteru pripustíme, že je to druh hmoty, siločiare môžu súvisieť s nejakými jeho funkciami.

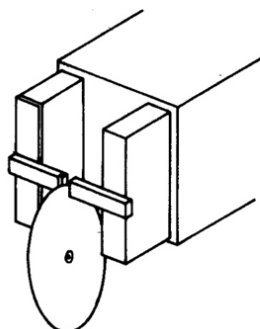
Fyzikálny pojem poľa je v súčasnosti všeobecne prijatý. Na jeho základe sa vytvorila prestava o tom, že každá interakcia sa šíri ako rozruch v istom poli (elektrickom, magnetickom, gravitačnom...). Šírenie rozruchov nazývame vlnením. Vo Faradayových neskorších vyjadreniach možno pociťovať úvahy o možnej elektromagnetickej povahe svetla. **Dnes Faradayov model siločiar používame ako geometrický obraz poľa.**

Poznámka. Napriek tomu, že siločiare resp. magnetické indukčné čiary sú predovšetkým názornou geometrickou pomôckou pre zobrazenie silových vlastností poľa, stali sa bežnou súčasťou fyzikálneho opisu poľa. Analógiu možno vidieť napr. v prúdnicach tečúcej kvapaliny, ktoré za určitých okolností vytvárajú aj uzavreté krivky - víry. Pritom v elektrickom poli rozoznávame dva typy siločiar: otvorené (začínajú v kladnom náboji a končia v zápornom) a uzavreté (vznikajú v priestore pri časovo premenlivom magnetickom poli a znázorňujú možnosť vzniku indukovaného prúdu v uzavretej vodivej slučke). Magnetické indukčné čiary sú vždy uzavreté (napr. okolo vodiča prúdu).

2. Ďalšie Faradayove objavy

M. Faraday interpretoval aj známy pokus francúzskeho fyzika Araga ako elektromagneticкую indukciu. Zmenil usporiadanie experimentu a vytvoril tak vlastne **dynamo elektrického prúdu**. Bolo to medené koliesko točiace sa na mosadznej osi. Jeho obvod bol zasunutý medzi póly silného magnetu. Ak sa koleso točilo, vznikalo medzi bodmi na obvode

a osou kola elektromotorické indukované napätie. Týchto bodov sa dotýkali medené kolektory (resp. kolektory z poamalgámovaného olova).



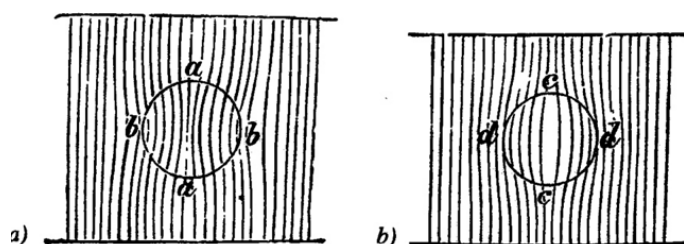
Obr. 8. Prvé dynamo zostrojené M. Faradayom. Na medenom kotúči sa pri jeho rotácii medzi pólmi magnetu indukuje elektrický prúd.

V roku 1833 sa Faraday zaoberal **elektrolýzou**. Vytvoril popri tom tzv. coulombmeter: zriedená kyselina sírová sa umiestnila do nádoby s dvoma elektródami z platiny. Meralo sa množstvo uvoľneného kyslíka alebo vodíka v závislosti od prúdu, ktorý za určitý čas systémom prechádzal. Zostali po ňom dva Faradayove zákony elektrolýzy:

1. Množstvo látky vylúčené na ktorejkoľvek elektróde je priamo úmerné elektrickému náboju, ktorý elektrolytom prešiel. (Nezávisí na veľkosti elektród, na ich vzdialenosti, na napätí, teplote a koncentrácii.)
2. Ak dvoma rôznymi elektrolytmí prejde taký istý elektrický náboj, je pomer množstiev látok vylúčených na príslušných elektródach rovný pomeru chemických ekvivalentov.

Po Faradayovi zostali aj pojmy, dodnes používané v elektrochémií: elektrolýza, elektróda, anión, katión, anóda, katóda, elektrolyt.

V štyridsiatych rokoch (1844) sa Faraday zaoberal **pôsobením magnetickeho poľa na rôzne látky**. Tyčinky z rôznych materiálov vkladal do nehomogénneho magnetickeho poľa. Niektoré boli do poľa vťahované (to sú tzv. paramagnety, napr. Al), niektoré boli vytláčané (diamagnety, napr. Bi).



Obr. 9. Schématické znázornenie magnetických indukčných čiar a) v paramagnetickej látke b) v diamagnetickej látke. Vzorky majú tvar valca.

Faraday preukázal, že elektrina z galvanických článkov, statická elektrina termoelektrina a živočíšna elektrina majú rovnaké vlastnosti. Taktiež dokázal, že zemský magnetizmus a magnetizmus permanentých magnetov majú zhodné vlastnosti. Objavil zákon zachovania elektrického náboja (1843) a preskúmal správanie elektrostatickeho náboja na povrchu vodiča

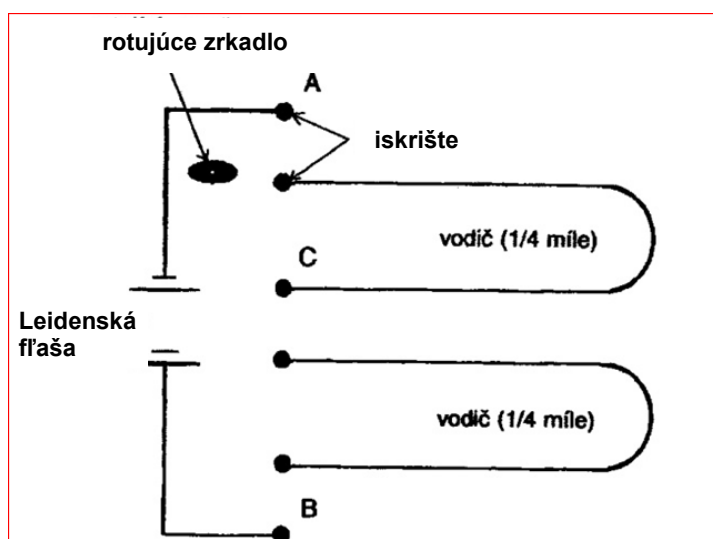
– povrch vodiča pôsobí ako elektrostatické tienenie (**Faradayova klieťka**). M. Faraday v roku 1845 objavil stáčanie roviny polarizácie svetla v niektorých látkach (voda, boroolovnaté sklo, prírodné NaCl), ak boli vložené do magnetickeho poľa silného magnetu (**Faradayov magnetooptický jav**). Nejde však o priamy vplyv poľa na svetlo; magneticke pole vyvolá zmeny v látke, ktorá sa stane pod vplyvom magnetickeho poľa opticky aktívnou. Jav sa vysvetľuje vznikom rozdielu indexov lomu pre ľavo- a pravotočivé polarizované vlnenie a má využitie v technickej optike.

3. Iné objavy dôležité pre vznik modernej elektrotechniky v prvej polovici 19. storočia

Okrem M. Faradaya a J. Henryho sa o rozvoj experimentálnych poznatkov o elektromagnetickom poli v prvej polovici 19. storočia zaslúžili aj anglický vedec CHARLES WHEATSTONE, petrohradský profesor EMIL LENZ, nemecký fyzik HERMANN HELMHOLTZ a francúzsky fyzik JEAN BERNARD LÉON FOUCAULT.

CH. Wheatstone bol pomerne všestranný fyzik. Pôvodne pracoval u svojho strýka v predajni a opravovni hudobných nástrojov. V tých časoch zostrojil niekoľko nových hudobných nástrojov typu akordeon, niekoľko akustických meracích prístrojov, napríklad *kaleidofón* (1827), ktorým zviditeľňoval zložené akustické kmity v podobe tzv. Lissajousových obrazcov. V roku 1830 zostrojil *stereoskop*, v ktorom pozorovaním dvojice plošných obrázkov vznikol dojem priestorového usporiadania. Tiež sa zaoberal mechanicou rezonanciou a stojatým vlnením. V roku 1834 sa stal profesorom experimentálnej fyziky na King's College v Londýne a bol známy svojou trémou pri prednášaní pred širokým plénom, takže čoskoro prešiel do radov výskumníkov. Okrem akustiky sa zaoberal optikou a elektrotechnikou. Je autorom tzv. Wheatstoneovho mostíka na meranie odporov a konštruktérom ručičkového telegrafného prístroja. Ručička ukazovala telegrafom prenášané písmeno. Neskôr v rokoch 1857-1865 spolupracoval s W. THOMSONOM (neskôr sa z neho stal lord KELVIN) pri kladení podmorského kábla medzi Anglickom a USA.

Pre rozvoj poznania vlastností elektromagnetickeho poľa sa zaslúžil **meraním rýchlosti, ktorou sa vo vedení šíri elektrický impulz**. Postavil dve elektrické vedenia z izolovaného medeného drôtu, dlhé štvrt' míle. Obe vedenia zakončil iskrišťami (obr. 10).



Obr. 10. Wheatstoneov experiment na určenie rýchlosti šírenia elektrického rozruchu vo vedení

Pripojením Leidenskej fláše na iskrištia A a B nastane na nich výboj. Elektrický rozruch sa potom šíri oboma vedeniami (vodičmi dlhými štvrt' míle) a po istom čase nastane výboj na iskrišti C. Pomocou rýchlo rotujúceho zrkadla zmeral časový posun medzi oboma výbojmi. Ním nameraná rýchlosť síce nebola celkom presná (280 000 míl/s), ale tento experiment priniesol Wheatstoneovi mnohé ocenenia a v roku 1836 bol vymenovaný za člena Kráľovského ústavu. Metódu rotujúceho zrkadla, ktorý tvorí akúsi časovú základňu (dnes je to v osciloskopoch bežné) používali v tom čase viacerí; napr. L. Foucault na určenie rýchlosti svetla. Nameral pomerne presný výsledok.

V roku 1834 doplnil zákon elektromagnetickej indukcie ruský fyzik a elektrotechnik nemeckého pôvodu, žijúci v Petrohrade E. LENZ. Na základe pokusov vyslovil **poučku o smere prúdu indukovanom v závíte (cievke)**. Uviedli sme ho na str. 5. Okrem toho E. Lenz experimentálne overil Jouleov zákon pre tepelný výkon elektrického prúdu $P=RI^2$.

V roku 1847 Hermann HELMHOLTZ skúmal zákon elektromagnetickej indukcie vo vzťahu k zákonu zachovania energie. Nad uzavretým závitom pohyboval permanentným magnetom, takže v závíte sa indukoval prúd. Tým konal prácu, pretože prekonával silu, ktorou pôsobí závit s indukovaným prúdom na magnet. Práca sa prejavila oteplením vodiča, z ktorého bol závit zhotovený.

J. B. L. FOUCAULT pôsobil aj v oblasti astronómie a meral rýchlosť svetla. Bol prvý, kto vyšetroval prúdy vznikajúce v masívnom vodivom telese, ktoré bolo vložené do časovo premenlivého magnetickeho poľa. Tieto prúdy dnes nazývame Foucaultove **vírivé prúdy**.

Spracované najmä podľa:

D. Mayer: Pohledy do minulosti elektrotechniky, nakladateľstvo Kopp České Budějovice, 2004

R. Zajac, J. Šebesta: Historické pramene súčasnej fyziky, Alfa Bratislava 1990

+ rôzne zdroje získané z internetu