

VZNIK ELEKTROMAGNETIZMU

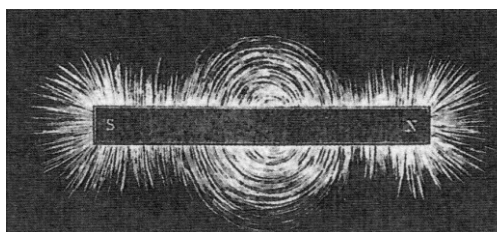
Oerstedov objav magnetických účinkov elektrického prúdu a prvý matematický opis magnetickej sily v okolí vodiča prúdu

Voltov stĺp (1800) a Seebeckov termočlánok (1821) boli prvými zdrojmi "trvalého" elektrického (jednosmerného) prúdu. Dovtedy používaný zdroj napätia - Leidenská fľaša, v podstate nabitý kondenzátor, bol iba zdrojom krátkodobo tečúceho prúdu. V tom čase nejestvovala správna predstava o podstate elektrického prúdu (pohyb nosičov náboja). Meracie prístroje ešte len vznikali. Jeden z prvých takýchto prístrojov - elektroskop - založený na roztváraní kovových lístkov v dôsledku priloženého náboja registroval akúsi veličinu, no v tom čase nebolo jasné, akú. Dnes vieme, že touto veličinou je veľkosť náboja, resp. elektrické napätie, ktoré ako pojem bez hlbšieho pochopenia použil v roku 1778 ako prvý A. Volta. Že ide o rozdiel dvoch potenciálov elektrického poľa, bolo známe až oveľa neskôr v súvislosti s rozvojom teórie elektromagnetizmu. S rozvojom meracích metód vznikali aj definície jednotiek fyzikálnych veličín, napr. el. náboja a napätia. Medzinárodný kongres elektrotechnikov v roku 1881 ustanovil za jednotku elektrického napätia *volt* na počesť zásluh A. Voltu pre rozvoj elektrotechniky; za jednotku elektrického prúdu bol určený *ampér* na počesť objaviteľa elektrodynamiky A. M. Ampéra.

Voltov vynález elektrochemického článku sa dočkal mnohých technických vylepšení. Došlo k rozvoju elektrochémie, fyzikálnej chémie a na získavanie prvkov sa začala používať elektrolýza. Princíp Voltovho článku správne vysvetlil priekopník elektrochémie HUMPHRY DAVY. Ten v roku 1810 postavil **obrovskú batériu z 2000 galvanických článkov** a pomocou nej demonštroval **elektrický oblúk** medzi dvoma uhlíkovými elektródami. Ale už v roku 1803 vyšla v Sankt Peterburgu kniha V. V. PETROVA o pokusoch, vykonaných pomocou **obrovskej batérie zostavenej zo 4200 galvanických článkov**. Tie boli pospájané „do série“ pomocou drôtov s povrchovou izoláciou z pečatného vosku. Petrov zistil, že pri prerušení prúdu v obvode vznikajú iskry a medzi kúskami uhlíka vzniká dokonca „väčší alebo menší plameň“ vhodný na osvetlenie tmavej miestnosti. To boli prvé pokusy s využitím elektriny na svietenie. Petrov sa považuje za priekopníka *elektrometalurgie*. Svoj gigantický Voltov stĺp používal na získavanie cínu, olova a ortuti z príslušných oxidov týchto prvkov. V roku 1802 zistil, že „účinnok Voltovho stĺpa sa znižuje pri predlžovaní vodičov v pripojenom okruhu a zvyšuje sa vtedy, ak zväčšíme ich prierez“. To je vlastne pravidlo pre určenie el. odporu vodičov prúdu z ich rozmerov.

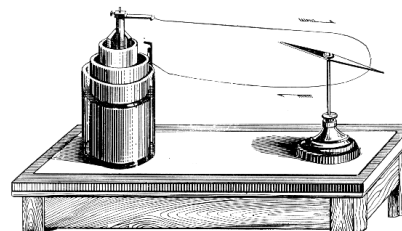
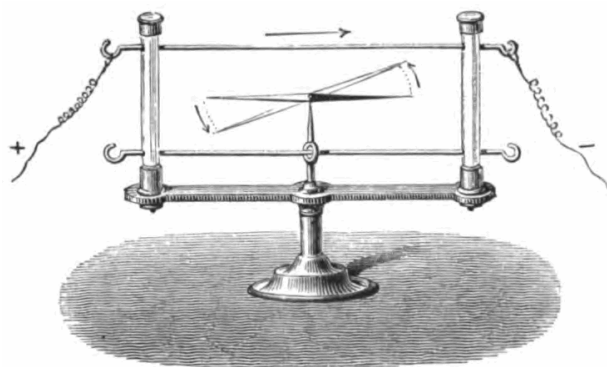
V roku 1827 vyšla kniha G. OHMA, v ktorej prvý raz bol na základe experimentov napísaný **vzťah medzi napätím zdroja, odporom vodiča a elektrickým prúdom**. K pojmu elektrického odporu však Ohm dospel až v roku 1829. Ohmov zákon po prvý raz použil až v roku 1838 E. LENZ v tvare zlomku, kde sa prúd v okruhu dá vypočítať ako podiel elektromotorického napätia a súčtu vnútorného odporu zdroja a odporu vodiča pripojeného k zdroju. K Ohmovmu zákonu sa vrátíme neskôr.

Postupne sa darilo odhaľovať aj skutočnosť, že elektrické a magnetické sily v okolí nabitých telies a permanentných magnetov pôsobia prostredníctvom dovtedy neznámeho prejavu hmoty, ktoré dnes nazývame elektromagnetickým poľom. **Predobrazom koncepcie elektromagnetického poľa boli snahy o jeho zobrazenie**. Jedným z prvých takýchto experimentov bol pokus J. Seebecka, objaviteľa termočlánku v roku 1821. Železné piliny sa v okolí tyčového magnetu rozložili do zvláštnych obrazcov, ktoré sa stali neskôr predlohou pre zobrazovanie magnetického poľa pomocou magnetických indukčných čiar. Takto vznikali aj pojem elektrických siločiar ako "geometrického" nástroja na zobrazenie elektrického poľa.



Obr. 1. Seebeckov pokus: Zobrazenie magnetického poľa pomocou železných pilín v okolí tyčového magnetu (obr. vľavo). Vpravo je pre ilustráciu znázornený pokus so zobrazením poľa v okolí cievky, ktorou preteká elektrický prúd. Na to, že v okolí magnetu a cievky, v ktorej prechádza jednosmerný prúd, vzniká rovnaké magnetické pole, upozornil v nadväznosti na Oerstedove pokusy z roku 1820 otec elektrodynamiky ANDRÉ MARIA AMPÈRE, ktorý neskôr v roku 1826 vydal knihu *Teória elektrodynamických javov odvodená výlučne z experimentov*. Je zaujímavé, že Ampère pojem elektromagnetického poľa ešte nepoužíval.

Na začiatku 19. storočia ešte pretrvával názor o tom, že elektrické a magnetické javy spolu nesúvisia. Jedným z prvých náznakov súvisu zaregistroval B. Franklin pri pokusoch s atmosférickou elektrinou v roku 1752, pri ktorých výboje vznikajúce v neuzemnenom bleskozvode zmagnetizovali železný kľúč, ktorý Franklin držal v ruke. V roku 1820 pozoroval dánsky fyzik HANS CHRISTIAN OERSTED (1777-1851) **vychýľovanie magnetickej strelky v blízkosti vodiča**, ktorým prechádzal elektrický prúd.



Obr. 2. Oerstedov pokus s vychýľovaním magnetky v okolí vodiča prúdu (1820). Vpravo originálny náčrt experimentu

Oersted sa 7 rokov zaoberal súvislosťou medzi elektrickým prúdom a magnetizmom a údajne už na túto myšlienku rezignoval. Chybou bolo, že vodiče boli umiestnené zvislo a magnetka vodorovne. Pri jednej zo svojich prednášok 15. 2. 1820 (bol vynikajúci prednášateľ) demonštroval svoje dovedy neúspešné pokusy a dal pokyn, aby vodiče prúdu umiestnili vodorovne, rovnobežne s magnetkou. Jeden zo študentov si náhodou všimol malú výchylku magnetky, ktorá sa nachádzala v tesnej blízkosti vodiča, ktorým prechádzal elektrický prúd. Následne Oersted nechal vykonať ďalšie pokusy a zisťoval napr. závislosť

výchyľky magnetky od jej vzdialenosti od vodiča a závislosť výchyľky od rôznych vzájomných polôh magnetky a vodiča. Objav zverejnil v spise *Pokusy s pôsobením elektrického konfliktu na magnetku*, písanú latinsky. Pod elektrickým konfliktom si predstavoval zrážku dvoch fluíd, ktoré sa vo vodiči pohybujú opačne. Pri tomto *conflictus electricus* vznikne magnetické pole. Spis Oersted rozoslal mnohým známym fyzikom a učným spoločnostiam, takže sa stal veľmi rýchlo široko známym. V zásade sa Oersted nepokúšal nový objav vysvetliť, zato ho veľmi podrobne opísal Jeho základný poznatok znie:

Ak prúd prechádza z juhu na sever nad magnetkou v smere magnetického meridiánu (poludníka), vychýli sa jej severný pól na západ. Z toho usúdil, že sila pôsobiaca na magnetický pól má smer dotyčnice ku kružnici, ktorá má stred na vodiči a leží v rovine kolmej na vodič. Elektrický prúd teda vytvára okolo seba magnetický vír. Mýlil sa len v tom, že do spisu tiež napísal, že "smer magnetky závisí tiež od veľkosti prúdu, nielen od jeho smeru". Oersted ďalej zistil, že voľne zavesený kruhový závit sa chová rovnako ako magnetka.

Videozáznam princípu základného Oerstedovho pokusu možno sledovať napr. na

<https://www.youtube.com/watch?v=ex3dXfB4fqk>

Obr. 3. V okolí vodiča sa železné piliny zorientujú do tvaru sústredných kružníc. Tak možno demonštrovať Oerstedov záver o magnetickej "vírovosti" magnetickej sily vznikajúcej okolo vodiča prúdu.



Pilinový obrazec magnetického poľa v okolí priameho vodiča s prúdom

Oersted skúšal aj vplyv vodiča prúdu na "magnetky" zhotovené zo skla a mosadze, no žiadny efekt samozrejme nenamerl, keďže nešlo o feromagnetické látky. Sám Oersted nebol manuálne príliš zručný, takže pokusy robili podľa jeho dohľadu asistenti. V Dánsku však bol vtedy považovaný za jednu z najvýznamnejších osobností

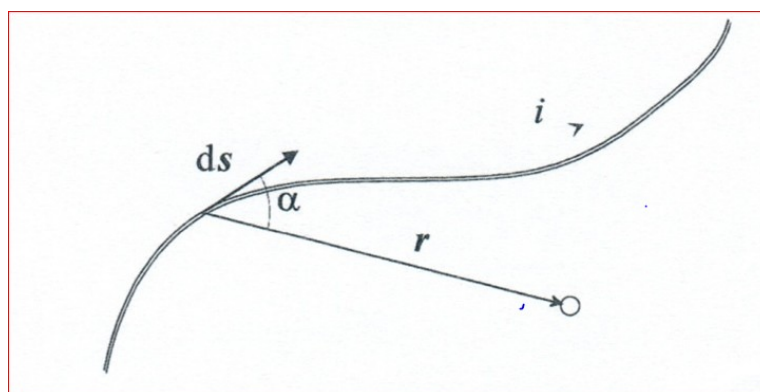
Na Oerstedove pokusy nadviazali ďalší význační fyzici a nielenže jeho pokusy spresnili, ale i rozvinuli o nové experimentálne poznatky. Taktiež vytvorili prvý, a treba povedať, že veľmi úspešný pokus o teoretický výklad a matematický opis týchto javov.

Po vzore Coulomba sa ukazovalo ako užitočné prejsť od čisto kvalitatívneho opisu pozorovaných javov aj k formulovaniu zákonov, ktoré sú s týmito javmi spojené. **Oerstedov objav odštartoval nielen intenzívne experimentálne bádanie, ale i prvé pokusy formulovať v pokusoch obsiahnuté prírodné zákony pomocou matematických rovníc.** Samozrejme, to si žiadalo definovať príslušné fyzikálne veličiny vyjadrujúce pozorovateľné javy. To však patrí skôr do histórie fyziky, no aspoň hlavné fyzikálne závery a teoretické predstavy k nim mali významný vplyv na rozvoj (elektro)techniky. Možno pre technické aplikácie je dôležité pripomenúť, že si to žiadalo vytvárať aj spôsob merania veličín, predtým ich definovať a nájsť aj mieru ich veľkosti (jednotku, v ktorej sa veličina meria). Matematický opis javov nazývame aj kvantitatívnym opisom fyzikálnej podstaty.

Zdá sa, že lavínovú vlnu záujmu o Oerstedove pokusy vyvolal všestranný francúzsky fyzik D. F. ARAGO, ktorý sa usiloval nájsť vysvetlenie pre vznik magnetických účinkov blesku, ktoré pozoroval už aj B. Franklin a živelne námorníci. Náhodou sa mu na kongrese v auguste 1820 v Ženeve dostala do rúk Oerstedov spis. A hneď urobil uzáver: ak je blesk (tiež) elektrický prúd a má magnetizačné účinky (čo zistil náhodou už Franklin), musí pôsobiť na magnetku a magnetizovať predmety zo železa. Po návrate do Paríža o tomto referoval v Parížskej akadémii. Na základe toho viacerí, okrem iného aj JEAN BAPTISTE BIOT

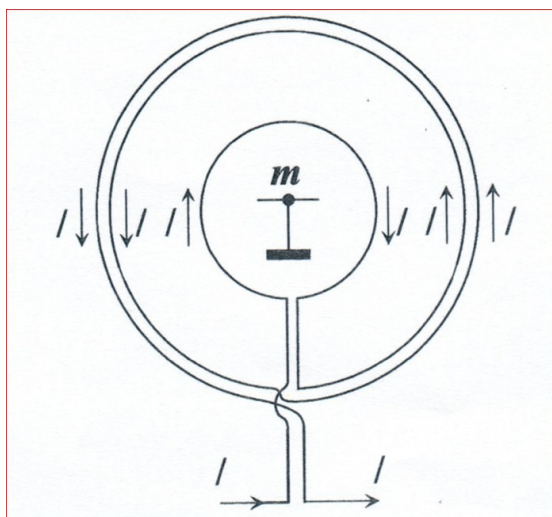
(objavitel' polarizácie svetla pri lome, skúmal otáčanie roviny polarizácie v kryštáloch) a FELIX SAVART (venoval sa akustike) predložili už 30. októbra 1820 prácu, v ktorej na základe vlastných meraní uviedli matematický vzťah pre silu, ktorou pôsobí malý element dĺžky tenkého vodiča prúdu ds na magnetku, ležiacu v jednej rovine s vodičom a vzdialenú od elementu o vzdialenosť r :

$$dF = \text{konšt.} \frac{id s \sin \alpha}{r^2}$$



Obr. 4. Pôvodný Biotov - Savartov zákon

Magnetická sila dF teda klesá so štvorcem vzdialenosti elementu dĺžky vodiča! Tento poznatok potvrdili ďalším pokusom s magnetkou, umiestnenou do dvoch sústredných kruhových závitov s polomerami R a $2R$, pričom na polomere $2R$ bol dvojitý závit. Ak vnútornou a vonkajšou cievkou tečú opačné prúdy, pričom vonkajšia cievka je 4-krát dlhšia ako vnútorná, silové pôsobenie oboch závitov sa v ich strede práve ruší, čo sa skvele potvrdilo!



Obr. 5. Overenie Biotovho-Savartovho zákona. Závit s polomerom R a dvojitý závit s polomerom $2R$ pri prechode prúdov navzájom opačných smerov vytvoria v strede závitov práve nulovú výslednú silu, takže magnetka v strede sa nevychýli.

Neskôr vynikajúci fyzik, matematik a astronóm, ktorý sa elektromagnetizmom zaoberal len okrajovo, PIERRE SIMON MARQUIS de LAPLACE (1749-1827) uvedený vzťah pre silu pôsobiacu na magnet v okolí vodiča prúdu zovšeobecnil na prípad, kedy vodič neleží v rovine, ale má tvar všeobecnej priestorovej krivky. Ten sa dnes uvádza v každej vyspelejšej učebnici fyziky v kapitolách o elektromagnetizme ako základný zákon pre magnetostatické pole vodičov, v ktorých tečie ustálený jednosmerný elektrický prúd. Vodič prúdu bol takto "uznaný" za nositeľa magnetických síl podobne, ako permanentný magnet, pretože silovo taktiež pôsobil na magnet. Vznikla otázka, či tieto magnetické sily majú rôznu alebo tú istú podstatu a sú teda navzájom ekvivalentné. Inými slovami, či tieto sily vznikajú aj bez prítomnosti magnetov medzi rôznymi vodičmi prúdu.

Ampérova elektrodynamika

Aragova informácia o Oerstedovom pokuse (11. 9. 1820) v Parížskej akadémii oslovila aj ANDRÉ MARIA AMPÈRE (1775-1836), ktorý dovtedy s ničím neexperimentoval. Ihneď tiež začal (súčasne s Biotom a Savartom) robiť pokusy s prúdom a magnetkou. V priebehu týždňa zistil, že magnetické účinky nevyvoláva len vodič prúdu, ale i Voltov stĺp, ak jeho zinkové a medené kotúče spájkuje po celej ploche z jednej strany. Magnetické účinky však nemá statická elektrina. 18. septembra 1820 predniesol svoje výsledky na zasadnutí Parížskej akadémie. Vo svojej prednáške vyslovil aj známe *pravidlo plavca*:

“Predstavme si, že ležíme v smere prúdu tak, aby prúd tiekol od našich nôh k hlave, a tvárou sa otočíme k magnetke. Účinkom prúdu sa bude vychyľovať zo svojho normálneho smeru vľavo ten koniec magnetky, ktorý smeruje na sever a ktorý budeme nazývať južným pólom magnetky.”

Dnes toto pravidlo poznáme ako *“pravidlo pravej ruky”*. Ampère na tejto prednáške definoval aj *“smer prúdu”*. (Dnešná fyzika považuje elektrický prúd za skalárnu veličinu, ktorá nemá smer. Smer má vektor prúdovej hustoty: je to smer prenosovej rýchlosti kladných nosičov náboja.) Zároveň **vyslovil predstavu o ekvivalentnosti solenoidu (cievky, slučky, ktorou preteká prúd) a magnetu**. V nasledujúcom týždni sa snažil túto predstavu potvrdiť.

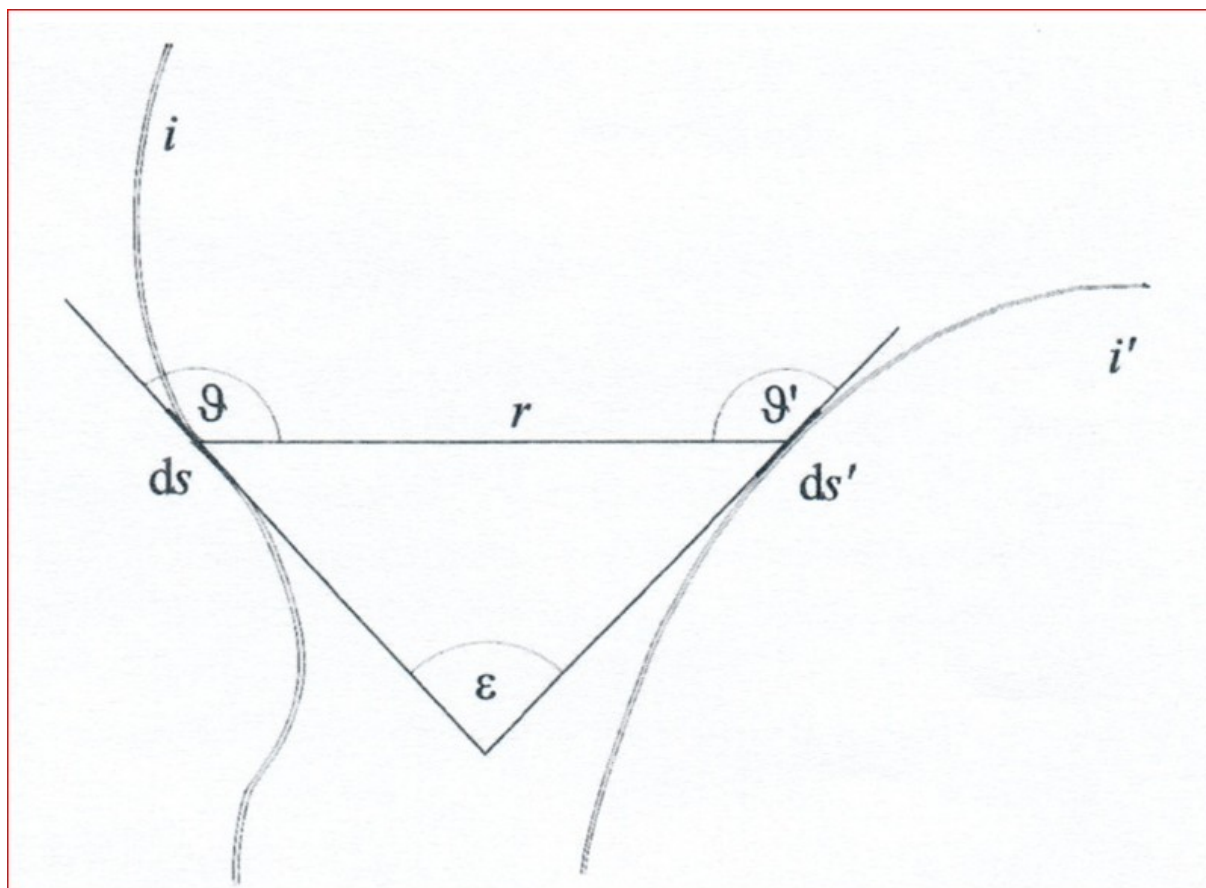
Poznámka. Elektrodynamikou sa Ampère zaoberal len do roku 1827. V literatúre možno nájsť o Laplaceovi a Ampérovi celý rad pozoruhodných informácií, avšak my sa z ich diela a životopisných údajov sústreďujeme len na ich zásluhy pre rozvoj elektrotechniky.

O týždeň znova prednášal na Parížskej akadémii. Pred ďalším zasadnutím Parížskej akadémie (25. septembra 1820) si Ampère zaobstaral silnejší Voltov stĺp. Pomocou neho naozaj dokázal rovnaké účinky magnetu a vodičov zatočených do špirály (cievok). Na oboch uvedených prednáškach zaviedol pojmy *elektrostatika, elektrodynamika, solenoid, elektrické napätie, elektrické napätie a elektrický prúd*. Navrhol aj prístroj na zisťovanie prúdu z Voltovho stĺpa, ako aj meranie smeru a energie tohto prúdu. Nový prístroj pomenoval **galvanometer**.

Ampère na základe týchto experimentálnych poznatkov do konca roka 1820 pracoval na vytvorení teórie, ktorú nazývame **Ampèrovou elektrodynamikou**. Jej **podstatnou črtou bolo redukovanie magnetizmu na pôsobenie elektrických prúdov**. Aj keď táto teoretická predstava sa dnes považuje za "umelú", dodnes v teórii elektromagnetického poľa túto predstavu úspešne používame na matematickú definíciu vektora magnetizácie reálnych prostredí.

Do konca roka 1820 Ampère experimentálne overil a odvodil svoj slávny **Ampèrov silový zákon**, matematicky vyjadrujúci (magnetickú) silu pôsobiacu medzi dvoma vodičmi prúdu. Všeobecný (diferenciálny) tvar tohto zákona je

$$dF = \frac{K i i' ds ds'}{r^2} \left(\cos \varepsilon - \frac{3}{2} \cos \vartheta \cos \vartheta' \right)$$

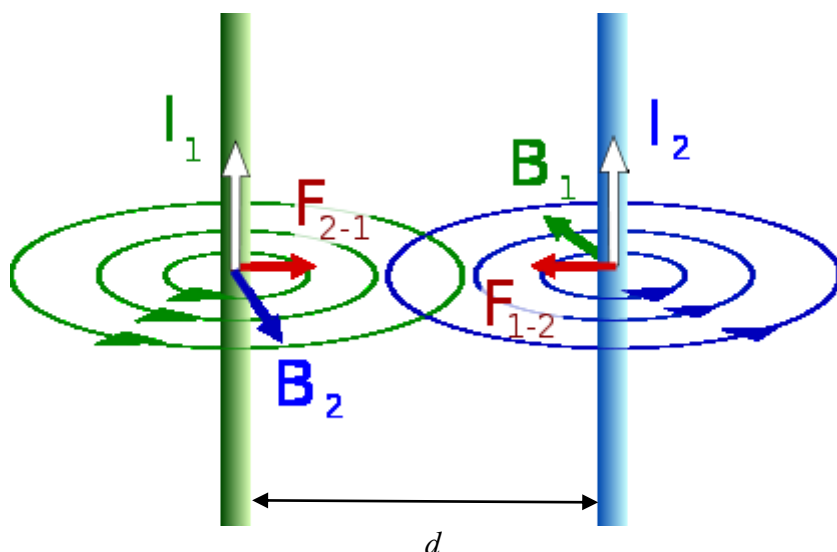


Obr. 6. K Ampèrovmu silovému zákonu.

Konštantu K Ampère zvolil rovnú 1, čím položil základy tzv. absolútnej elektrodynamickej sústavy jednotiek. Dnes je uzákonená sústava SI, v ktorej má táto konštanta inú hodnotu. Tá sa uvádza v základnom kurze fyziky. Veličina dF je sila vznikajúca na spojnici dvoch malých úsekov vodičov všeobecného tvaru s prúdmi i a i' . Ostatné veličiny sú zrejmé z obrázka, priamky zvierajúce uhol ε sú dotyčnice ku krivkám, ktoré predstavujú (veľmi tenké) vodiče prúdu. Ampèrove úvahy, ktoré ho dovedli k uvedenému matematickému vzťahu, sú pomerne náročné a nemá význam ich tu uvádzať. Dnes sa v učebniciach oveľa častejšie používa pre magnetickú silu zjednodušený vzťah

$$F_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l \quad (a)$$

platný pre dva veľmi dlhé priame rovnobežné a v jednej rovine ležiace vodiče vzdialené od seba o vzdialenosť d . Vo vodičoch dĺžky l prechádzajú ustálené prúdy I_1 a I_2 . **Vzťah (a) sa donedávna používal na definíciu hlavnej jednotky elektrického prúdu - ampér.**



Obr. 7. K Ampérovmu silovému zákonu - prípad dvoch priamych rovnobežných vodičov prúdu. Veličiny B_1 a B_2 v tvare sústredných kružníc predstavujú magnetické indukčné čiary vznikajúce okolo vodičov - pozri aj obr. 3 na str. 3.

Ak majú prúdy ten istý smer, sila je príťažlivá. Napríklad veličina B_1 na obr. 7 (magnetická indukcia v okolí vodiča č. 1) vo vzťahu (a) je vo vzdialenosti d od pravého vodiča daná výrazom

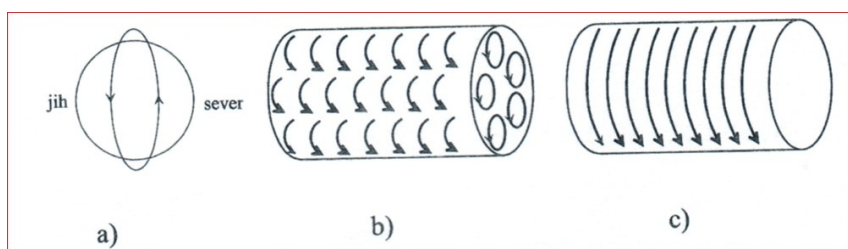
$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$$

takže potom $F_{12} = B_1 I_2 l$. Tento posledný vzťah pre silu, ktorá pôsobí na vodič prúdu dĺžky l v magnetickom poli, je dobre známy z učebníc fyziky. Je základom pre činnosť elektromotorov. Menej je známa skutočná fyzikálna povaha tejto sily - vzniká v dôsledku toho, že pohybujúce sa voľné elektróny vo vodiči č. 2 sú magnetickým poľom prvého vodiča vychýľované "doprava" a túto zložku svojej hybnosti odovzdávajú atómom vodiča č. 2.

Ampère svoj vzťah overoval na rôznych dômyselných zariadeniach. Niektoré z nich sú ukázané na nasledovných obr. 8 a 9. Jeho poznatky sú sumarizované v spise *Teória elektrodynamických javov odvodená výlučne z experimentov* (1826). Stala sa podstatným autorským dielom pre oblasť elektromagnetizmu až do čias, kedy J. C. Maxwell publikoval svoju dodnes používanú teóriu elektromagnetického poľa (1865). Maxwell sám nazval vzťah (a) fundamentálnym vzorcom elektrodynamiky. Dnes vzťah (a) možno nájsť vo vektorom tvare v rôznych učebniciach fyziky. Možno z neho exaktne odvodiť napríklad Biotov-Savartov zákon (obr. 4 na str. 4), ktorý bol pôvodne určený empiricky na základe experimentov. Pre matematickú teóriu elektromagnetického poľa je mimoriadne dôležité, že vzťah (a) umožňuje odvodiť **Ampérov zákon celkového prúdu** (veta o cirkulácii magnetického poľa) pre ustálené jednosmerné prúdy:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

Ako sme už naznačili, Ampère vytvoril **novú koncepciu teórie magnetizmu**. Je založená na tom, že permanentný magnet a prúdová slučka sú navzájom vzhľadom na silové pôsobenie ekvivalentné. Ak solenoid (cievka s husto navinutým závitmi), cez ktorý tečie ustálený jednosmerný prúd, voľne zavesíme, natočí sa do smeru geomagnetického poludníka. Súhlasné "póly" solenoidov sa odpudzujú, nesúhlasné sa priťahujú. Na základe týchto poznatkov Ampère vytvoril svoju **teóriu permanentných magnetov**. V nej sa predpokladá, že okolo každého atómu Fe trvale prechádza elektrický prúd, ktorý vytvára svoje vlastné magnetické pole. V nezmagnetizovanom stave sú tieto elementárne magnety usporiadané náhodne, ale po zmagetizovaní sa zorientujú do rovnakého smeru. Vo vnútri magnetu sa susedné prúdy navzájom rušia a účinné sú len prúdy tečúce po povrchu magnetu, takže magnet je potom vlastne solenoid, ktorým tečie elektrický prúd.



Obr. 10. K Ampérovej teórii permanentného magnetu. a) atóm železa (Fe) obkolesený (mikro)prúdovou slučkou b) magnet tvaru valca s úplne zorientovanými osami mikroprúdových slučiek c) na povrchu magnetu vznikne plošný prúd, čo je obdobné ako v prípade husto navinutej cievky

Ampère tak vytvoril model magnetu, v ktorom sa dá ľahko zdôvodniť **neoddeliteľnosť severného a južného pólu**. Jeho teóriu molekulárnych mikroprúdových slučiek používame vo fyzikálnej teórii dodnes, aj keď vieme, že jeho redukcia magnetizmu na pôsobenie prúdov nie je oprávnená. Dnes sa v mikroskopickej a kvantovej teórii látok za zdroj elementárneho magnetizmu považujú magnetické momenty atómov a elementárnych častíc.

Poznámka. Podrobnejšie sa možno o Ampérových úvahách dočítať v knižke R. Zajaca a J. Šebestu, Historické pramene súčasnej fyziky, str. 224-232.

Ampère v spolupráci s F. ARAGOM neskôr vytvoril **prvý elektromagnet**. Arago upozornil na to, že ak umiestnime vodič prúdu do železných pilín, pokryje sa týmito pilinami. Ampère správne usúdil, že ak oceľový drôt vložíme do cievky s prúdom, zmagetizuje sa. Tzv. tvrdý magnet sa takto dá trvale zmagetizovať. Pokiaľ použijeme "mäkké" feromagnetikum ako jadro cievky, magnetické pole sa ním výrazne zosilní. Takýto magnet sa však dá ľahko opačným prúdom premagnetizovať na opačný smer. Tento technický objav bol pre elektrotechniku veľmi významný.

Ampérove (aj Oerstedove) názory boli poplatné Newtonovej koncepcii (okamžitého) pôsobenia (síl) na diaľku, ktorá neuvažovala s možnosťou šírenia fyzikálnej interakcie konečnou rýchlosťou. Pokračovatelia Ampéra - nemeckí vedci WILHELM EDUARD WEBER a FRANZ ERNST NEUMANN v rámci tejto teórie vybudovali veľmi uznávanú teóriu elektromagnetizmu. (Weber spolu s F. Gaussom zostrojili v roku 1833 prvý telegrafný prístroj). **Weber napríklad zovšeobecnil Coulombov zákon pre prípad dvoch (pomaly sa navzájom pohybujúcich) bodových nábojov** (Mayer, str. 83). Weber ukázal, že sila medzi nábojmi závisí aj od ich rýchlosti a zrýchlenia (Weberov zákon):. V tomto zákone sila závisí od druhej mocniny vzájomnej rýchlosti nábojov (druhá derivácia veľkosti vzájomnej

vzdialenosti r podľa času) a od prvej mocniny vzájomného zrýchlenia (druhá časová derivácia r); α je konštanta:

$$F \approx \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \left[1 - \frac{\alpha}{16} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{\alpha}{8} r \frac{d^2 r}{dt^2} \right]$$

Ak sa náboje nepohybujú ($r = \text{konšt.}$), vzťah sa redukuje na pôvodný Coulombov zákon. Až v roku 1890 sa ukázalo, že Weberov zákon nezohľadňoval konečnú rýchlosť šírenia elektrickej interakcie. F. Neumann vošiel do histórie okrem iného aj zavedením pojmu vektorového magnetického potenciálu.

Tepelné účinky elektrického prúdu

V polovici 19. storočia sa začala rozvíjať termodynamika a došlo sa k poznaniu, že teplo nie je zvláštna látka, ale určitá forma energie. Tak bol formulovaný **princíp zachovania energie**. Meraním tepla pri mechanických a elektrických javoch sa zaberá JAMES PRESCOTT JOULE (1818-1889), pôvodne majiteľ pivovaru. V rokoch 1843-48 experimentálne určil **mechanický ekvivalent tepla**. Napríklad skúmal zahriatie vody miešanej lopatkou v kalorimetri, pričom lopatku poháňalo cez kladku závažie a dala sa zmerať zmena jeho potenciálnej energie, čiže mechanická práca ťažových síl. Iný príklad: medzi póly magnetu umiestnil cievku, ktorú uviedol do rotačného pohybu pomocou padajúceho závažia. Tým sa v cievke indukoval prúd, ktorým zahrieval vodu.

Jouleov princíp ekvivalentnosti mechanickej práce a tepla mal svojich zástancov aj odporcov. Odporcom bol spočiatku aj známy lord Kelvin (W. Thomson).

Pre elektrotechniku je významný Jouleov objav z roku 1841. Kalorimetrickými meraniami zistil, že ak vodičom s odporom R tečie prúd I , za jednotku času sa v ňom vyvinie teplo

$$Q \sim RI^2$$

To je slávny **Jouleov zákon**. Joule jav vysvetľoval ako dôsledok zrážok častíc elektrického fluida s molekulami vodiča. Pre teplo sa používala jednotka *kalória* (*cal*). Pritom vieme, že platí

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

Od roku 1948 sa aj teplo určuje v jouloch. Podobné výsledky ako J. P. Joule zistil o 4 roky neskôr ruský fyzik EMIL LENZ. Z tohto dôvodu sa zákon premeny energie prenášanej elektrickým prúdom na teplo označuje i ako **Jouleov-Lenzov**.

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