

MAGNETISMUS:

HISTORIE a SOUČASNOST

Od magnetitu a kompasu k magnetickému
disku a spinovému tranzistoru.

Svatopluk Krupička, Fyzikální ústav AV ČR

říjen 2007

I. ČÁST

CO JE MAGNETISMUS ?

Pohledy do jeho historie
aneb
jak se vyvíjely názory na původ magnetismu

ÚvodI. Od starověku k DescartoviStarověk

- nejstarší objevy: Řecko, Čína
- kompas

Středověk a počátky novověku v Evropě:

- od Peregrina k Portovi a Gilbertovi

17. Století

- Descartes, Newton

II. Elektrodynamika a magnetismusCo předcházelo objevu elektromagnetismu

- 18. století: fluidové teorie
- C.A. Coulomb

Jak se rodil elektromagnetismus

- počátek 19. století: historický pokus Oerstedův

Zákony elektromagnetismu

- A.M. Ampère, M. Faraday, experimentální základy teorie

Maxwellova teorie elektromagnetického pole

- J.C. Maxwell, východiska a axiomy jeho teorie
- Maxwellovy rovnice, komentář a poznámky k nim

Co znamenala Ampèrova a Maxwellova elektrodynamika pro magnetismus

- magnetický moment, k definici magnetizace

Závěrem

III. Ve světle nových objevů

Objev elektronu

- diskrétní charakter elektřiny, elektrony nositeli záporného náboje, záporné vs. kladné náboje
- orbitální magnetický moment elektronů v atomech

Lorentzova elektronová teorie

- pokus o rozšíření elektromagnetické teorie do oblasti atomů, Zeemanův jev
- Lorentzova síla

Relativita a magnetismus

- éter, nezávislost rychlosti světla na pohybu zdroje
- základní postuláty Einsteinovy teorie speciální relativity
- kontrakce délek a dilatace času, důsledky pro síly působící mezi pohybujícími se elektrickými náboji
- relativistický původ magnetické síly

IV. Ve světě kvantové fyziky

Kvantová hypotéza

- Planckův předpoklad o kvantování energie, Planckova konstanta
- Bohrov model atomu, prostorové kvantování
- vznik kvantové mechaniky, spin elektronu
- magnetický moment atomu

Začátky studia magnetických vlastností látek

- paramagnetismus a diamagnetismus
- feromagnetismus: teorie molekulárního pole, Curieův – Weissův zákon
- feromagnetické domény

Klíčová úloha kvantové teorie

- teorém Bohrov – Van Leuwenové
- původ feromagnetismu, kolektivnost a operativnost souboru magnetických momentů

Kvantová elektrodynamika a magnetismus elementárních částic

- co je elektrický náboj, elektron a foton, elektromagnetická interakce
- proton a neutron, kvarky a gluony

Dovětek

- "strom života" magnetismu

Úvod

Slovo magnet zřejmě pochází z řeckého „magnés“ a bývá spojováno se zeměpisným názvem „Magnésia“. Takto byla označována krajina v severovýchodní části Evropského Řecka bezprostředně související se starou Makedonií, stejný název ovšem též přísluší hned dvěma městům v nejzápadnější části Přední Asie, v Ionii resp. Lydii [1]. Právě v okolí posledně vzpomenutého města, Magnésia pod Sipylem (dnešní Manisa), obydleném převážně osadníky z Thessalie (tedy Magnéty!), byla bohatá naleziště minerálu magnetovec (magnetit), který fungoval jako přirozený magnet a byl tedy prvním zdrojem poznatků o magnetismu a magnetických silách.

A bylo to u magnetismu po prvé, kdy se člověk setkal se silami a vůbec jevy, které nebyly ani mechanické povahy, ani nevznikaly přímou činností člověka či jiného zástupce živočišné říše, a přitom se odehrávaly v jeho bezprostředním dosahu. Je proto pochopitelné, že pro něj byl magnetismus od samého počátku opředen sítí záhad a dohadů a oblakem jakéhosi tajemna. Uvedeme později, jak se tyto mystické představy, často velmi absurdní nebo zase sklouzávající do sféry banálních pověr a předsudků, udržovaly dlouho až do počátků novověku a založení exaktní přírodovědy, která se důsledně opírala o experiment a kritické myšlení. Toto mystické vnímání magnetismu bylo přitom nemálo posíleno poznáním magnetické střelky a kompasu. Ty nebyly známy ve starém Řecku a vědomost o nich a jejich praktickém uplatnění se do Evropy dostala někdy na konci 12. století. Schopnost kompasu ukazovat cestu lodím na moři či výpravám ve stepi bylo opravdu něco naprosto fantastického. Nedivme se, vždyť i A. Einstein (!) vzpomíná [2], jak byl jako hoch hluboce rozechvén chováním magnetické střelky:

A wonder ... I experienced as a child of 4 or 5 years, when my father showed me a compass. That this needle behaved in such determined way did not at all fit into the nature of events, which could find a place in the unconscious world of concepts (effects connected with direct „touch“). I can still remember – or at least believe I can remember – that this experience made a deep and lasting impression upon me.

Toto zvláštní tajemno lákalo ovšem badatele již od samého vzniku novověké přírodovědy. Nepřekvapí proto, že snaha objasnit povahu a původ magnetických jevů stála i na samém počátku rozvoje experimentální metody ve fyzice, v němž sehrála významnou průkopnickou

roli. Magnetismus byl také velmi záhy konstituován jako samostatná fyzikální disciplína a jako takový se vyvíjel paralelně s naukou o elektřině. Samostatnost si zachoval až do objevu elektromagnetismu (1. pol. 19. stol.), který oba jevy úzce spojoval, ale ponechával jim alespoň zpočátku v podstatě rovnocenné postavení. Avšak ani když Einsteinova teorie relativity později ukázala skutečný původ magnetických sil a jejich podmíněnost silám elektrickým, nezmizel zájem o magnetismus jako zvláštní disciplínu. Vedle důvodů ryze vědeckých hrají zde úlohu zejména bohaté aplikace magnetismu – v technice, vědecké metodice různých oblastí, v lékařství a ve velkém počtu dalších oborů.

Následující text je upravenou a rozšířenou verzí přednášky, kterou jsem přednesl na zasedání Učené společnosti ČR v únoru 1997. Především, že v žádném případě nejde o originální studii. Fyzikální problematiku pokrývá většina standardních učebnic o elektřině a magnetismu a pokud jde o historický pohled, důležitým vodítkem pro mne byla úvodní kapitola knihy Mattisovy [3]. Mojí snahou bylo přiblížit čtenáři (posluchači), který má o fyzice jen základní povšechné znalosti či povědomí, magnetismus jako obor, který v historii zcela zásadním způsobem přispěl k rozvoji fyzikálního poznání, a dát mu aspoň hrubou představu o tom, jak bohaté uplatnění má magnetismus i v jiných, zdánlivě odlehlých vědních oborech, v technice i v našem každodenním životě. Tomuto dvojímu cíli odpovídají dvě navzájem nezávisle koncipované části přednášky, z nichž zveřejňuji zatím prvou. Text je kombinací souvislého výkladu a heslovitého výčtu tezí, dat a myšlenek s potřebným komentářem a odkazy na prameny. Tím se mu, jak se domnívám dostává větší přehlednosti a snad i větší atraktivnosti pro případného zájemce s hlubším fyzikálním vzděláním.

I. OD STAROVĚKU K DESCARTOVI

Starověk

Objev minerálu magnetovec (magnetit) a jeho neobyčejného chování byl (patrně nezávisle na sobě) učiněn nejméně ve dvou starověkých kulturách – v Řecku [3, 4] a v Číně [5]. Předcházelo mu zřejmě zvládnutí přípravy železa ze železné rudy; právě v oblastech, kde se tato ruda těžila, byla i naleziště přírodního magnetitu. Kromě toho, že se kousky magnetitu vzájemně přitahovaly a odpuzovaly (přírodní magnety), přitahovaly velmi silně i železo (železné piliny). Navíc v Číně – zřejmě jako první – byl objeven kompas: natáčení těchto magnetů účinkem zemského magnetického pole a jeho využití k určování zeměpisné orientace. Časově nelze období těchto objevů přesně stanovit. Nejhlouběji do minulosti ho kladou odhady pro Čínu (až 3. tisíciletí před Kr.), přičemž, jak se zdá, kompas sám byl konstruován později (2. až 6. stol. př. Kr.). První čínské kompasy měly velmi zajímavou a originální konstrukci – byly vyrobeny přímo z magnetitu, měly tvar jakési lžičky, která se volně otáčela na velice hladké měděné či bronzové podložce a druhým koncem („držadlem“) ukazovala zeměpisnou orientaci. Příklady rekonstrukce čínského kompasu viz obrázek 1.



Obr. 1 Rekonstrukce starověkých čínských kompasů.

Objevy magnetismu v Řecku se kladou do 1. poloviny 1. tisícletí př. Kr. (~ r. 800 př. Kr). Ze zmínky v Aristotelovi víme, že se jím zabýval Thales Miletský (6.stol. př. Kr.), týž, jehož jméno je spojováno i s objevem elektřiny (povrchový elstat. náboj na jantaru), resp. elektrostatické indukce. Zkoumání těchto jevů, o magnetismu pak to platilo zvlášť, podobně jako pokusy o jejich objasnění, splývaly v Řecku s filozofií a v podstatě byly podřízeny jednomu či druhému z hlavních filozofických směrů: animismu a mechanismu.

Animisté:

Thales 6. stol. př. Kr.

Anaxagoras 5. stol. př. Kr.

Antropomorfní představy – magnet má duši, železo touží po objetí a pod., proto je přitahováno k magnetu.

Mechanisté (atomisté):

Diogenes, Empedokles oba 5. stol. př. Kr.

Demokritos 5.-4. stol. př. Kr.

Epikuros 4.-3. stol. př. Kr.

Některé apriorní a neověřené (bludné) představy, např., že vlhkost železa „sytí“ suchost (vyprahlost) magnetitu, což má být hybnou silou vzájemného přitahování. Ale i některé sofistikovanější domněnky vyslovili mechanisté: o existenci magnetického fluida (nevažitelné a neviditelné látky) nebo jistých blíže nedefinovaných dynamických polí.

Společné pro obě školy: ryze spekulativní a deduktivní přístup. Představy obou přežívaly dlouho, dokonce až do novověku, kdy byly postupně vytlačovány kritickým přístupem rodící se vědy. Přímé písemné zprávy se většinou nezachovaly, uvedené představy známe ze zmínek pozdějších filozofů.

Nejsouhrnnější informace: Lucretius Carus, De Rerum Natura, 1. stol. př. Kr.

Celkem lze mít za ověřené, že ve starém Řecku byla známa magnetická indukce (magnetování a přitahování železa), známa existence odpudivé síly působící mezi magnety, existence pólů magnetu však přesto, jak se zdá, známa nebyla. Magnetka ani kompas v Řecku známy nebyly. Tajemná síla magnetu ovšem vyzývala k různým manipulacím při náboženských obřadech a v neposlední řadě se magnetům, přesněji magnetitu, připisovaly i léčivé účinky: proti neplodnosti, magnetitový prášek doporučován při očních chorobách, melancholii aj.

Závěrem tohoto odstavce uveďme, že řecká a čínská kultura nemusely být ve starověku jedinými, které znaly magnetit a jeho podivuhodné chování. Připouští se, že magnetismus (a případně i kompas) mohly být známy též v některých starověkých kulturách střední Ameriky (Olmecká kultura, kultura La-Venta) [6].

Středověk a počátky novověku v Evropě

Událostí velkého praktického významu bylo až poznání kompasu, patrně koncem 12. století. Podle Needhama [5] je první zpráva o použití kompasu v Evropě z r. 1190. Použito bylo jehly zmagnetované magnetitem a spojené s plovoucí slámkou či brčkem. Pravděpodobně nešlo o originální vynález, ale o přenos zprostředkovaný nejspíše Araby.

Po mnoho let kompas využíván především mořeplavci a opředen mnoha pověrami. Nicméně časem vzbudil nový zájem i o samotný jev magnetismu a jeho nositele – magnetit → objevují se první pokusy o systematické uchopení magnetických jevů – možno je klasifikovat jako první vážné vědecké pokusy:

1269 Pierre Pélerin de Maricourt (Petrus Peregrinus)

Francouz, zveřejňuje práci „Epistola ... de Magnete“, která shrnuje jeho systematické experimenty s kulovitým magnetem vybroušeným z magnetitu, který nazval „terrella“.

Hlavní výsledky:

- objev magnetických siločar na povrchu, jejich průsečíky nazval póly magnetu
- rozdělením magnetu na 2 kusy vznikají 2 plnohodnotné magnety, každý se dvěma póly. Naopak opětným složením získáme zpět magnet s původními vlastnostmi.

Závěr – poplatný tehdejšímu geocentrickému vnímání vesmíru, později vyvráceno Gilbertem: Terrella je Peregrinovi modelem nebeské báně, póly jsou jejími význačnými body.

Význam: Jde patrně o první experimentální práci z fyziky vůbec, zatím zcela izolovanou. Tato „Epistola“ byla hojně opisována a šířena zejména mezi těmi, kdo využívali kompas.

Pokračovatele ve snahách po vědeckém zkoumání magnetických jevů přineslo však až období renesance na počátku novověku, zhruba o 300 let později.

Renesance znamenala změnu v nahlížení na postavení člověka ve světě. Zájem středověku o nábožensko-filozofické a teologické otázky ztratil svou výlučnost, člověk dychtil po poznání světa kolem sebe a jeho pochopení. Vzdělanost, ve středověku soustředěná hlavně do některých klášterních komunit, počala rychle pronikat nejprve na panovnické dvory a odtud dále do laické veřejnosti. Vynikající vzdělanci nejen vzájemně komunikovali, ale zakládali i společnosti na způsob pozdějších vědeckých akademií¹.

Z hlediska historie magnetismu mají v této době význam hlavně dvě osobnosti: Ital Giambattista della Porta (v anglických pramenech uváděný jako John Baptist Porta) a jeho o 9 let mladší vrstevník, Angličan William Gilbert.

Giambattista della Porta (1535-1615)

Zakladatel snad historicky první učené společnosti, neapolské „Academia Secretorum Naturae“², osobnost velmi širokého záběru, zabýval se nejrůznějšími otázkami z oblasti přírodních věd, techniky, ale i lékařství, psychologie, astrologie aj. Při hojných cestách zejména po zemích středomořské oblasti nasbíral mnoho poznatků a zkušeností, byl zřejmě obeznámen i s antickou kulturou a jejím odkazem. Ve svém zkoumání přírody se pohyboval často na pomezí mezi okultismem a vědou, jeho dílo je jakousi směsí vlastních pozorování, přejatých vědomostí, nápadů, racionálního uvažování a mýtů. Magnetismus je pouze jednou z mnoha oblastí, kterými se zabýval. V jeho hlavním přírodovědném díle *Magia Naturalis*, které v konečném doplněném znění vyšlo v Neapoli r. 1589 [7], je magnetismu věnována z 20 „knih“ (obsažených v jediném svazku!) kniha VII. s impresivním názvem „Dívy magnetovce“: obsahuje 56 kapitol (statí) detailně popisujících základní vlastnosti magnetovce (magnetitu) a magnetů z něj zhotovených, ukazuje existenci pólů severního a jižního, chování železa v blízkosti magnetitu a podrobnosti o jeho zmagnetování, využití v kompasu, snaží se vyvrátit řadu mýtů³.

Celé dílo *Magia Naturalis* lze považovat spíše za populárně vědeckou literaturu. Nicméně získalo autorovi pozornost a uznání snad celého tehdejšího vzdělaného světa a záhy se dočkalo překladů do mnoha jazyků. Z výsledků v oblasti magnetismu je třeba ocenit důraz

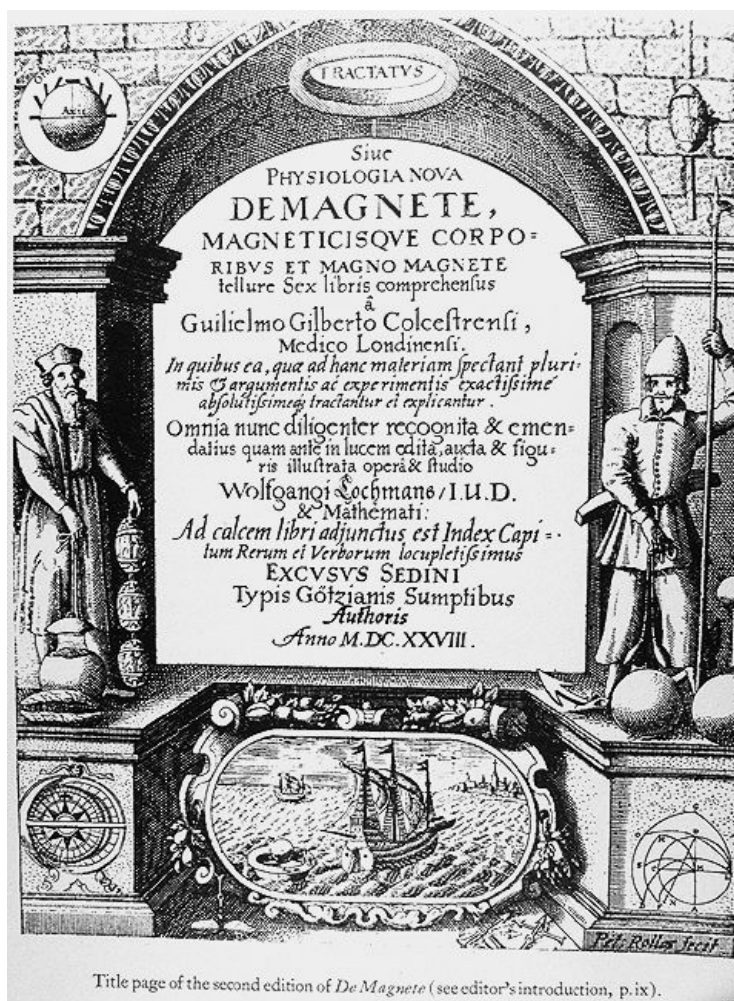
¹ Tento proces započal již dříve, asi koncem 11. nebo začátkem 12. století. Svědčí o tom vznik univerzit: v Boloni r. 1119, v Paříži 1150, a v neposlední řadě i zřízení Karlovy univerzity v Praze r. 1348. Hlavní důraz byl však na těchto univerzitách rovněž kladen – alespoň zpočátku – na otázky teologicko-filozofické, i když tam vedle toho zpravidla existovaly i další směry, jmenovitě právo a lékařství. Přírodní vědy ovšem na univerzitách té doby zastoupeny nebyly.

² Tato společnost se věnovala diskusím a studiu přírody, scházela se pravidelně v jeho Neapolském domě. Nevyhnila se pozornosti Inkvizice, která ji zakázala v r. 1578 a Portu vyšetřovala. I když se před ní očistil a vstoupil r. 1585 (jako bratr-laik) do Jezuitského řádu, publikace jeho děl byla v letech 1594 až 1598 zakázána. Má se zato, že v Portových knihách jsou obsaženy i výsledky a myšlenky ostatních členů jeho Akademie. Zrušením původní Akademie ovšem aktivity Porty v tomto směru nekončí, neboť se později podílel na vzniku „Academia dei Lincei“ (Acad. of the Lynxes). Jejím členem byl v letech 1610-1615. Prezidentem této pokrokové společnosti byl hrabě Cesi, on sám se stal vice-prezidentem. Významným členem Ac. dei Lincei byl Galileo Galilei.

³ K potíží námořníků s česnekem, cibulí apod. (těm, kteří přicházeli do styku s kompasem, bývalo údajně zakázáno před a během plavby je jíst) např. Porta píše: Když jsem zkoumal všechny tyto věci, zjistil jsem, že jsou falešné: neboť nejen, že dýchání a řhání na kompas po požití česneku nezastavilo jeho fungování, ale když byl celý pomazán šťávou česneku, konal svou práci stejně dobře, jako kdyby s ním nepřišel nikdy do styku. A nepozoroval jsem téměř ten nejmenší rozdíl i když jak se zdá tím vytvářím mezeru v tom, o co usilovali staří.

kladený na experiment a rovněž poctivou snahu prověřovat dosud tradované (a ničím nepodložené) dohady a pověry (např. „sycení“ magnetu vlhkostí železa, škodlivý vliv česneku a cibule na funkci kompasu – viz pozn. výše); jinak najdeme málo zásadně nového ve srovnání s 300 let starou „Epistolou“ P. Peregrina.

William Gilbert (1544-1603), rodák z Colchesteru; vlastním povoláním lékař – zřejmě významný: byl prezidentem Royal College of Physicians a na sklonku života osobním lékařem královny Alžběty I. Na rozdíl od Porty měl univerzitní vzdělání (Cambridge). Fyzika byla jeho celoživotní zálibou a magnetismu věnoval hlavní zájem: po 17 letech práce a zkoumání vydává v r. 1600 své stěžejní dílo *De Magnete*, nemající obdoby v tehdejší době. Titulní stránka (obr. 2) ukazuje celý název knihy, který anticipuje analogické názvy dalších základních vědeckých děl té doby: *Astronomia nova* Johanneše Keplera a *Novum organum* Francise Bacona. Přesvědčení, že experiment tvoří základ vědy, je všem společné.



obr. 2 Titulní stránka Gilbertovy knihy „De Magnete“.

Připomeňme však, že Gilbert byl z nich nejstarší. Ve srovnání s Portovou knihou o „Divech magnetovce“ jde o podstatně systematictější pojednání opírající se důsledně o vlastní pozorování a experimenty doprovázené kritickými úvahami a svědčící o poctivé snaze

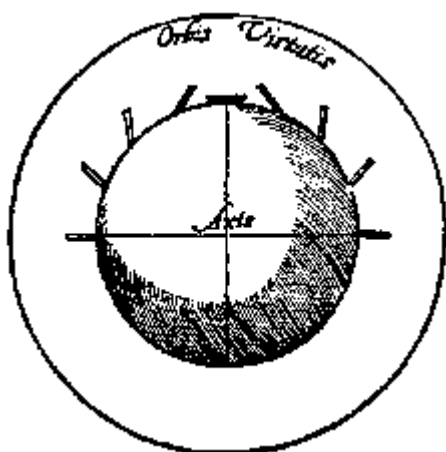
porozumět zkoumaným jevům. Nelítostné kritice podrobil i své předchůdce⁴, někdy patrně ne zcela oprávněně, neboť před ním existovalo i několik nesporně pozitivních postav (např. Peregrinus – viz výše). Kritice nešel ani Porta, jehož *Magiae Naturalis* vyšla v r. 1589 (tedy o 11 let před Gilbertovým *De Magnete*) a byla Gilbertovi známa⁵.

Gilbert prováděl soustavná měření na magnetech kulového („terella“) nebo elipsoidovitého tvaru vyrobených z přírodního magnetitu (magnetovce); studoval magnetickou sílu pomocí zavěšené magnetky a určil směry magnetického pole při povrchu magnetu a v jeho blízkosti (magnetické siločáry). Zatímco na rovníku terelly a v jeho blízkosti našel pole rovnoběžné s povrchem, směrem k pólům se postupně zvětšoval vertikální sklon magnetky, (tzv. inklinace) až přímo na pólu dosáhl 90° (směr pole kolmý k povrchu). Porovnáním s údaji (zejména mořeplavců) o inklinaci na různých místech světa došel k novému důležitému závěru, že země je veliký magnet a „terella“ představuje jeho model (obr. 3). Pokoušel se vysvětlit i odchylky směru zemského magnetického pole v horizontální rovině (tzv. deklinaci), a to pomocí představy o nepravidelnostech a poruchách magnetické struktury země – modelem mu byla „terella“ s narušenou homogenitou magnetitu (obr. 4). Přes zdánlivé experimentální potvrzení této domněnky byl Gilbertův výklad vzniku deklinace záhy zpochybněn zjištěním, že se deklinace v daném místě časem mění (A. Gellibrand 1634). Ve snaze objasnit samotný vznik zemského magnetismu přišel s myšlenkou, že by mohl souviset s rotací země (argument proti je mj., že magnetické póly jsou vůči pólům zemské rotace posunuty)⁶. Gilbert studoval i magnetickou indukci v železe a dovedl ji využít ke zdokonalení magnetů z magnetovce připojením železných pólových nástavců (užíval kuželové) ke zvýšení účinnosti magnetu.

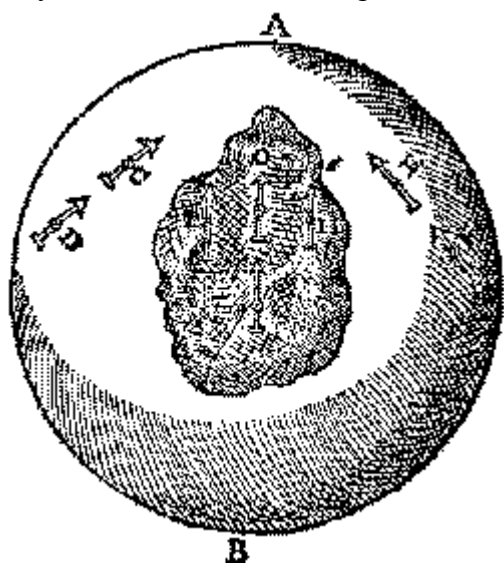
⁴ they have lost both their oil and their pains; for, not being practised in the subjects of Nature, and being misled by certain false physicas systems, they adopted as theirs, from books only, without magnetical experiments, certain inferences based on vain opinions, and many things that are not, dreaming old wives' tales. (Cit. podle Mattise) [3].

⁵ Na tuto kritiku Porta podrážděně reaguje v italském překladu své knihy r. 1611. Gilberta označuje za Angličana s barbarským chováním „who took the whole seventh book of my „Natural Magick“ and split it into many books, making some changes; the material which he adds on his own account is false, perverse and melancholy (!); and towards the end he arrives at the mad (!) idea that the Earth is in motion“.

⁶ Gilbertovy objevy o magnetismu Země a myšlenky o možné souvislosti s její rotací upoutaly Keplera: poté co objevil oba první zákony o pohybu planet, hledal původ síly, která by mohla oběh planet kolem Slunce působit. Neznaje gravitaci – tu objevil Newton později – nechal se inspirovat Gilbertem a pokusil vysvětlit planetární pohyb magnetickými silami vycházejícími ze Slunce, o němž předpokládal, že rotuje kolem své osy a představuje magnetický „monopol“ [9].



Obr. 3 Gilbertova „terella“; osa spojující póly je vodorovná, krátké úsečky na obvodě schematicky ukazují průběh magnetické inklinace od nuly na rovníku až k 90° na pólech.



Obr. 4 Terella s porušeným magnetitem: v blízkosti krajů poruchy se magnetka odchylovala od normálního směru ukazujícího k pólu terelly. Ve středu poruchy, stejně jako v neporušených místech zůstával přitom směr magnetky zcela normální.

Z hlediska historie fyziky není bez zajímavosti, že paralelně s magnetickými silami se Gilbert zabýval i elektřinou (název *elektrický*, *elektřina* vlastně zavedl právě on). Podařilo se mu vedle jantaru zelektrizovat i řadu dalších látek, jako diamant, křemen, safír či síru. Zabýval se rovněž myšlenkou, zda elektřina a magnetismus spolu nesouvisí. Jejich vzájemnou podobnost, kterou podporovala představa o existenci elektrického resp. magnetického fluida (nevažitelné substance, která vyvolává příslušné silové působení), odmítl na základě zjištění, že zatímco magnetické působení není ovlivňováno jinými materiály (magnetit přitahuje železo i skrze jiné pevné látky), přítomnost takových látek výrazně zeslabuje síly elektrické. Usoudil z toho, že fluidová teorie pro magnetismus je nevhodná, neboť – jak se domníval – cizí látky by musely fluidu překážet ve volném toku (tj. interakci např. mezi magnetem a železem), zatímco elektřina by mohla být fluidem vyvolána. Více ovšem k tomuto trochu zvláštnímu argumentu o samotné podstatě obou jevů a jejich možné příbuznosti říci nedovedl – úroveň

tehdejších poznatků a dostupných experimentálních metod to ani objektivně nedovolovala⁷. A tak Gilbertovi nezbylo, než připustit oprávněnost starého animistického výkladu – totiž, že magnetit má duši (možná, že v jeho případě míněno trochu obrazně a s nádechem jisté ironie a skepse).

Význam Williama Gilberta lze tedy spatřovat ve dvou rovinách: (i) jako skutečného zakladatele nauky o magnetizmu, který ověřil a uspořádal základní poznatky o magnetických silách včetně magnetování železa působením trvalého magnetu z přírodního magnetitu (magnetická indukce) a jako první vysvětlil existenci zemského magnetického pole tím, že země sama je ohromný magnet; de facto jako první podrobně zmapoval pole magnetického dipólu v jeho blízkosti. Navíc svým paralelním zkoumáním magnetických a elektrických jevů, jejich podobností i rozdílů, předjímal budoucí vývoj směřující k objevu elektromagnetismu. Právem bývá tedy W. Gilbert označován jako „otec magnetismu“. (ii) Druhou rovinu představuje jeho přínos k metodice vědeckého bádání, důsledné upřednostňování experimentem zjištěných faktů a uplatňování kritického rozumu při jejich hodnocení. Omezujícími faktory byly slabé znalosti matematiky a z ní plynoucí omezení na kvalitativní stránku jevů, dále pak celková nedostatečná úroveň chápání fyzikálních zákonitostí a dějů v té době.

17. Století

V první polovině 17. století vrcholí úsilí o hlubší porozumění jevům v přírodě a snahy o jejich systematické uspořádání; jsou vytvářeny odpovídající metodické přístupy i filozofický rámec. Pro oblast fyziky klíčovou úlohu sehrál pokrok v matematice, o níž již v r. 1590 Galileo prohlásil, že je *jazykem přírody*, a která umožnila mj. i kvantifikaci získaných poznatků. Tento pokrok na široké frontě následně umožnil vznik vědy v našem pojetí.

Mezi nejvýznačnější představitele této epochy patří René Descartes, který po Portovi a Gilbertovi v první polovině 17. století zasáhl i do historie magnetismu.

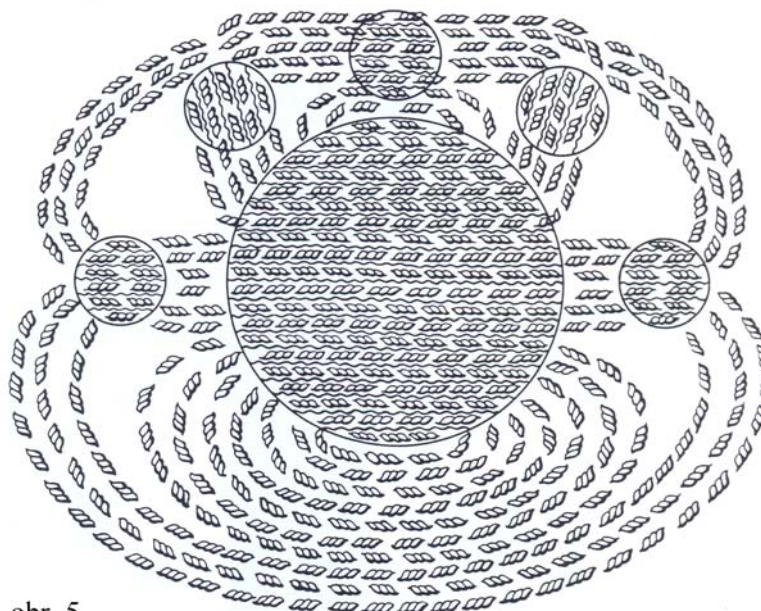
René Descartes (1596-1650)

Francouzský filozof a matematik, považován za jednoho z hlavních zakladatelů novověké vědy a filozofie, jeho racionalismus zásadním způsobem ovlivnil další vývoj obou. Mj. je i autorem první teorie magnetismu, která je obsažena v jeho Principiích, část IV odst. 133-183.

Descartova *Teorie magnetismu* je dobrou ilustrací jeho deduktivní metody (včetně jejích slabin). Základní myšlenka: Původ magnetismu magnetovce a Země je společný, přitom primární je zemský magnetismus. Jeho nositelem jsou nevažitelné částčky, jakési jemné „závitky“, které neustále proudí nitrem země od pólu k pólu, tam zemi opouštějí a vracejí se vzduchem zpět. Jsou dvojího druhu, pravotočivé a levotočivé, což odpovídá dvěma různým směrům pohybu. Jejich pohyb uvnitř Země jedním nebo druhým směrem je pak umožněn jednosměrnými kanálky, speciálně k tomu uzpůsobenými určitým vnitřním „obrvením“ či „závitem“ pro jeden či druhý typ částice. Magnetovec, který byl původně uvnitř země vybaven těmito „kanálky“, si tuto vlastnost zachovává i mimo zemské nitro. Narazí-li zmíněné částice při své cestě vzduchem zpět k zemskému pólu na magnetovec, nejen ochotně do něj vstupují, ale často jsou jím polapeny a vytvářejí zde jakýsi miniaturní koloběh,

⁷ Odhlédneme-li od nesprávné argumentace, můžeme zde najít i pozitivní jádro. Předně je možno ocenit byť spíše intuitivní kvalitativní odlišení elektřiny od magnetizmu. Navíc, chápeme-li pojem fluidum jako něco neurčitěho, jehož definici a bližší vymezení teprve hledáme, nemohli bychom je pak ztotožnit i s elektrickým nábojem, jehož existenci pozdější elektromagnetická teorie také pouze postuluje?

analogický onomu zemskému. Tím vznikají póly magnetu. Situaci schematicky ukazuje originální obrázek (obr. 5). Železo, jako produkt získaný z magnetitu resp. železné rudy, má tyto kanálky porušené; prudkými nárazy částíček však může dojít k jejich dočasnému (měkké železo) nebo i trvalejšímu (ocel) restituování.



obr. 5

Descartův model zemského magnetismu.

Všichni cítíme, že tento výklad, i když se jeví jako vnitřně konzistentní a logicky vyhovující, je na hony vzdálen realitě a v podstatě ignoruje fakta, neboť se vůbec nezabývá ověřováním důsledků této „teorie“ a ani úvahami o otázkách, které se nutně kolem ní vynoří. Přesto Descartes tvrdí, že touto teorií je schopen vysvětlit všechno, co v té době bylo známo o magnetismu.

Pomineme-li ovšem tyto výhrady a skutečnost, že díky své autoritě fakticky značně zabrzdil hledání nových cest k vysvětlení magnetických jevů a pokrok v jejich zkoumání na dalších možná 100 let, zůstává Descartes velikou postavou v dějinách lidské vzdělanosti s výrazným pozitivním vkladem do rozvoje vědy:

- významným způsobem přispěl k rozvoji matematiky, zejména geometrie
- posílil důvěru v rozum a logické uvažování (racionalismus)
- důsledně oddělil duševno od tělesna, resp. od hmotného světa a tím ukázal cestu k oddělení vědy resp. fyziky od metafyziky⁸.

Pokud jde o magnetismus, objevily se ovšem i kritické hlasy. Citujeme Johna Keilla (Oxford 1705).a všechno to obecné holedbání se věcmi jako emanace jemných částíček

⁸ Toto oddělení nebylo u Descarta ještě úplné, neboť byl nadále přesvědčen, že celou fyziku bude možné odvodit dedukcí z jistých nedokazatelných prvotních principů.

ustrojených právě tak, aby se hodily pro póry magnetitu atd. nás nepřivedlo ani v nejmenším k jasnému výkladu takových dějů. Přes všechno to musíme magnetismus stále počítat mezi okultní jevy.

Byly však i pozitivní příspěvky k magnetismu v té době. Především Francouz Marin Mersenne, mnich, přítel Descartův, který jako první kvantifikoval značnou část Gilbertových pozorování (1644). Na druhé straně, zejména 2. polovina 17. století přináší převratné změny ve fyzice, zejména v mechanice. Za všechny jmenujme Newtonovy objevy z té doby: pohybové zákony a zákon gravitační, které jsou základem mechaniky včetně nebeské mechaniky, a další – včetně jeho objevu základů diferenciálního a integrálního počtu.

V té souvislosti – z pohledu tématu této přednášky – upozorníme na Newtonův zájem o kvantifikaci závislosti magnetické síly na vzdálenosti od magnetu. Tento zájem patrně souvisel s již dříve zmíněným Keplerovým návrhem, že síly které udržují pohyby planet ve Sluneční soustavě, jsou silami magnetickými [9]. Jeho idea, později rozpracovaná (1666) Robertem Hockem, byla Newtonem vzápětí (1686) vyvrácena porovnáním sil gravitačních a magnetických. Jedním z argumentů byla i rozdílná závislost obou typů síly na vzdálenosti: zatímco gravitace ubývá s druhou mocninou vzdálenosti, tedy $\sim 1/r^2$, pro magnetickou sílu (magnetický dipól) se při větších vzdálenostech blíží $\sim 1/r^3$, tj. klesá s téměř třetí mocninou. Toto tvrzení Newton zřejmě opírá o vlastní pokusy s magnetem a později (1712) na Radě Royal Society doporučuje provést přesnější měření; očekával výsledek $\sim 1/r^3$, jak by odpovídalo poli magnetického dipólu (srov. Blackman [3]). Navrhovaný pokus se však, jak se zdá, v té době neuskutečnil.

II. ELEKTRODYNAMIKA A MAGNETISMUS

Zatímco 18. století bylo ve fyzice ještě ve znamení Newtonovy mechaniky, která definicemi základních veličin jako jsou hmotnost, síla, hybnost nebo energie a formulací jejich vzájemných vztahů zásadně ovlivnila uvažování fyziků i v dalších oblastech rodící se vědy, ve století 19. patří tato ústřední pozice elektromagnetismu. Dávná tušení o vzájemné příbuznosti magnetických a elektrických jevů se naplnila a nalezením vzájemných souvislostí a jejich exaktním vyjádřením (Maxwellovy rovnice) byla otevřena cesta k širokému uplatnění v technice a v každodenním životě člověka. Zásadním způsobem byly ovšem ovlivněny i jiné vědní obory, zejména chemie a také další odvětví fyziky samé, především optika.

I když magnetismus v rámci této nové elektrodynamiky zdánlivě ztrácí do určité míry svou vlastní identitu, neubírá mu to na významu a v žádném případě tím nekončí jeho historie. Jeho působíště se záhy přesouvá do rodící se fyziky pevných látek a fyziky materiálů, důležité místo pak zaujímá i ve fyzice atomové, v optice a fyzice elementárních částic. O tom však později. Zde bych chtěl připomenout jiný charakteristický rys magnetismu – jeho inspirativní roli, kterou sehrál v historii celé fyziky. Vzpomeňme např., co bylo řečeno o Peregrinovi a Gilbertovi, kteří právě na magnetismu předváděli, co je to experimentální práce a dávali tak příklad pozdějším badatelům v různých fyzikálních oborech; byly to později – jak ukážeme – opět klasické pokusy s magnetkou, tentokrát prováděné Oerstedem v okolí vodiče protékaného elektrickým proudem, které odstartovaly závratný vzestup elektrodynamiky. A konečně vybudování důmyslné teorie elektromagnetického pole a zejména role magnetické síly sehrály klíčovou úlohu při formulaci teorie speciální relativity A. Einsteinem na přelomu 19. a 20. století. Jako by magnetismus představoval jakýsi spiritus agens naznačující

v klíčových okamžicích fyzikům další cestu, a pak se vytrácející, či lépe řečeno sám se transformující do nové polohy.

Co předcházelo objevu elektromagnetismu

Vznik vědy (přírodovědy) v novodobém smyslu, iniciovaný pronikavými úspěchy zejména v matematice a mechanice, musel se ovšem dříve či později projevit i v novém pohledu na elektrické a magnetické jevy. Pro další vývoj a rozlišení obou měl zásadní význam objev vedení elektřiny (Stephen Gray 1729) a opakované zjištění, že u magnetismu podobný jev neexistuje. K vysvětlení Grayova výsledku posloužila staronová představa o elektrickém fluidu (srov. výše text a pozn.⁷). Původní hypotéza Benjamína Franklina (1706 – 1790) předpokládala existenci jediného elektrického fluida. Našla mnoho zastánců a snažila se vypořádat i s objevem 2 druhů elektřiny učiněným Charles Francois du Fayem v r. 1733: dva druhy elektrického náboje byly Franklinem interpretovány jako nadbytek resp. nedostatek elektrického fluida⁹. Záhy ovšem převládl oponentní názor, že existují skutečně dvě různá fluida, tedy kladná a záporná elektřina.

O rozvinutí této dvou-fluidové teorie elektřiny se přičinil hlavně Charles Augustin Coulomb (1736 - 1806). Proslul svými experimenty s torsními vážkami, které vynalezl a které mu umožnily kvantifikovat síly působící mezi elektrickými náboji (přitahování u nestejnojmenných a odpuzování stejnojmenných). Určil, že pro tuto sílu v obou případech platí nepřímá úměrnost se čtvercem vzdálenosti $\sim 1/r^2$ (1785) a z experimentů tak vyvodil zákon nesoucí jeho jméno. Tento zákon umožnil rovněž zavést jednotku elektrického náboje; na jeho počest nese dnes používaná jednotka jeho jméno.

Po léta byla sledována vzájemná podobnost, či dokonce příbuznost jevů elektrických a magnetických (srov. např. odstavec věnovaný Gilbertovi). V různých souvislostech byla pak diskutována možnost připsat původ jednoho či druhého nevažitelným fluidům. Zmínili jsme např. Gilbertovu argumentaci, který připouštěl vhodnost fluidové hypotézy u elektřiny, ale odmítal ji pro magnetismus. Descartes sice nahrazuje u magnetismu fluidum jistými nevažitelnými částicemi, ale zřejmě nejde o nic jiného než o jistou variantu fluida, byť pro změnu „kvantovaného“. Vzhledem k souběžnému vnímání elektrických a magnetických jevů nás nemůže překvapit, že záhy po aplikaci *jedno-fluidové teorie* pro elektřinu Benjaminským Franklinem přichází jeho žák a pokračovatel Franz Maria Aepinus (1724 – 1802) i s magnetickou variantou této teorie¹⁰. Současně ovšem podrobuje jedno-fluidovou teorii kritickému rozboru a konfrontuje ji s experimentálními výsledky i matematickými závěry.

Záhy se však, podobně jako v případě elektřiny, začala prosazovat představa o dvou různých fluidech i u magnetismu (Johan C. Wilcke a Anton Brugmans nezávisle na sobě v r.

⁹ Pokud to chápeme jako modelový popis *určitého* chování, nemusí být Franklinova představa o nadbytku, resp. nedostatku náboje vůbec špatná či nepoužitelná. Stačí připomenout *elektronovou vs. děrovou vodivost* v polovodičích v rámci tzv. pásového modelu spektra elektronů. V obou případech jde o pohyb elektronů, tedy záporného elektrického náboje. Zatímco při elektronové vodivosti se pohyb týká relativně nevelkého počtu elektronů ve stavech při dnu jinak neobsazeného pásu – pohyb *záporných* nábojů, u děrové vodivosti je naopak pás téměř obsazen a dochází k přesunu neobsazených míst odpovídajících energiím při vrchní hraně pásu. Neobsazená místa se ovšem „pohybují“ v elektrickém poli opačným směrem než elektrony a jde tedy zdánlivě o pohyb *kladných* nábojů.

¹⁰ Aepinus byl původem Němec, který emigroval do Petrohradu; tam v r. 1759 publikoval svoji jedno-fluidovou teorii pro obojí, elektřinu i magnetismus, pod názvem *Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetismi*.

1778)¹¹. Podle této hypotézy příslušela severnímu resp. jižnímu zemskému magnetickému pólu *různá* fluida; podobně tomu bylo i u přirozených magnetů z magnetitu a magnetické póly byla zde místa, kde byla fluida nahromaděna. Zajímavá byla podle této hypotézy představa o tom, jak dochází k magnetování železa: v nezmagnetovaném stavu jsou obě fluida promíchána v celém objemu, při magnetování se vlivem magnetické síly oddělují a přesouvají směrem k příslušnému pólu, kde se hromadí. A jako u elektřiny se s dvou-fluidovou teorií dostáváme i v magnetismu k C.A. Coulombovi, který ji i v tomto případě svými experimenty a přesnými měřeními kvantifikoval a postavil na solidní vědeckou bázi. Zavedl pojem *magnetického množství* (analogicky k *elektrickému náboji*), který mu pomohl zformulovat i pro magnetismus zákon (na jeho počest běžně nazývaný Coulombovým):

$$F_{mag} = k_m \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{12}^2}$$

F_{mag} je síla působící mezi dvěma (ideálně bodovými) póly dvou magnetů vzájemně vzdálených o r_{12} ; m_1, m_2 jsou magnetická množství, tj. množství magnetického „fluida“ v těchto pólech, a k_m je konstanta závislá na volbě jednotek¹². Tento Coulombův zákon pro magnetismus je po formální stránce úplným analogem výše zmíněného Coulombova zákona pro elektrickou sílu mezi náboji q_1 a q_2 :

$$F_{el} = k_e \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{12}^2}$$

Lze se domnívat, že vzorem resp. inspirací mohl být v obou případech Newtonem objevený zákon gravitační $F_G \sim m_1 \cdot m_2 / r_{12}^2$, který vedle stejné závislosti na vzdálenosti $\sim 1/r^2$ zavádí hmotnost m jako množstevní veličinu podobně jako to učinil Coulomb s elektrickým nábojem či magnetickým množstvím. Vzhledem k obrovské vážnosti a obdivu, kterému se v 18. století Newton těšil, se tato domněnka jeví zcela oprávněná¹³.

Coulomb se ve svých výsledcích a úvahách ovšem dostal značně dál než k pouhé formulaci a ověření obou svých zákonů:

- dospěl k závěru, že magnetická fluida, na rozdíl od elektrických, nejsou volně pohyblivá, nýbrž jsou vázána na jednotlivé molekuly v látce (polarizace molekul)
- byl si vědom toho, že jeho zákony nebude možné jednoduše aplikovat na úrovni molekulární či atomové (přesněji, že v pevných látkách nemůže dojít ke stabilní rovnováze mezi silami ubývajícími se čtvercem vzdálenosti)
- sledoval jak se mění vlastnosti magnetů samých při vyšších teplotách.

Po matematické stránce se Coulombovým výsledkům dostalo završení začátkem 19. století v pracích Poissonových (1781 – 1840) a Greenových (1793 – 1841). V Coulombovi a těchto jeho pokračovatelích lze zároveň spatřovat vrcholné představitelů tehdejšího pozitivizmu ve vědě: šlo o formulaci obecných zákonů na základě dostatečně bohaté akumulace dat; otázka zní jak a nikoliv proč.

¹¹ Wilcke byl Švéd, žák a později spolupracovník Aepinův, Brugmans Holanďan.

¹² Coulombův zákon je jedním ze základních zákonů magnetostatiky. Aby se vyhnuli zavádějícímu pojmu „magnetické množství“, který je poplatný dnes překonané představě o magnetických fluidech, používají někteří pozdější autoři pojmu „magnetický náboj“, nebo podle Sommerfelda [10], „magnetická pólová mohutnost“ *magnetische Polstärke*.

¹³ V literatuře lze nalézt zmínku o tom, že zákon ukazující, že magnetická síla klesá se čtvercem vzdálenosti, ještě před Coulombem prezentovali Tobiáš Mayer (1760) a Johann Heinrich Lambert (1765).

Jak se rodil elektromagnetismus

Stav počátkem 19. století:

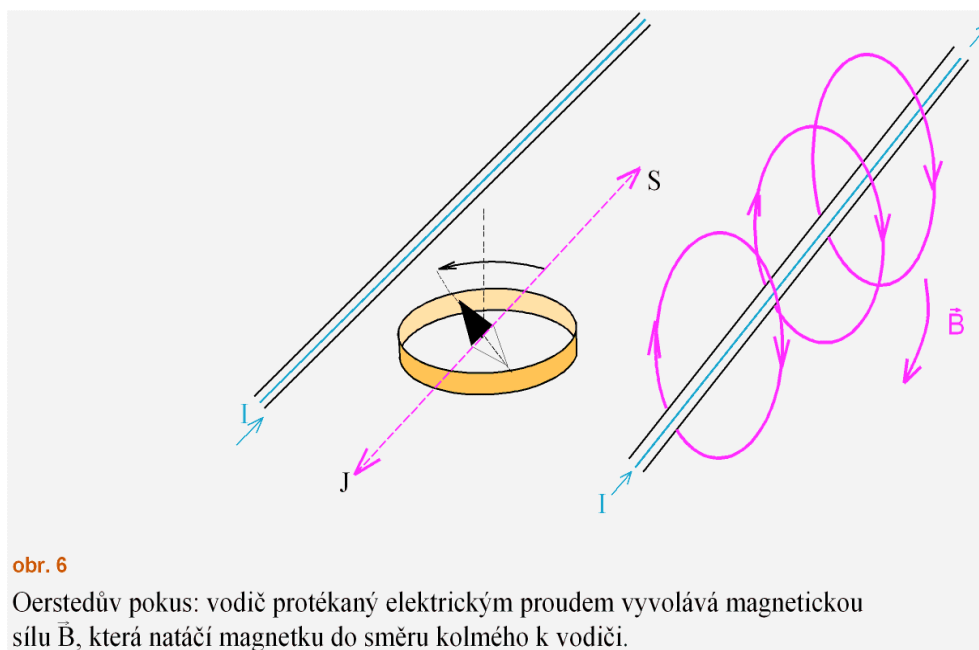
Elektřina a magnetismus jsou sice různé jevy (Gilbert, Gray), ale v něčem jsou velmi analogické (Coulomb a jeho zákony pro magnetické a elektrické síly, dvoufluidová teorie). Byly však i další podněty pro hledání vzájemného vztahu obou. Zmiňuje se obvykle následující příhoda: *Lod' směřující do Bostonu byla zasažena bleskem, což – porovnáním s postavením hvězd na obloze – způsobilo nevídanou věc, že se polarita kompasu obrátila a magnetka svým dosud „severním“ pólem ukazovala k jihu* [11]. Dnes bychom prostě řekli, že se přemagnetovala; ovšem tehdy to představovalo naprostou záhadu a pokud se tušilo, že blesk souvisí s elektřinou, mohlo to být i pobídkou k hledání hlubší souvislosti mezi elektřinou a magnetismem.

Významnou roli pak v dalším sehrál objev galvanického článku (A. Volta 1745 - 1827 v návaznosti na experimenty L. Galvaniho 1737 - 1798). Volta položil základy k nové disciplíně *galvanismus*, který se zabýval jevy spojenými s elektrickým proudem. Poznamenejme, že v té době šlo skutečně o samostatný obor, neboť dosud neexistoval přímý důkaz o souvislosti mezi elektrickým nábojem a elektrickým proudem, označovaným v té době jako proud *galvanický*. To ovšem nemění nic na skutečnosti, že galvanický článek jako trvalý zdroj elektrického proudu umožnil řadu nových experimentů.

Historický pokus Oerstedův.

Hans Christian Oersted (1777 - 1851), profesor fyziky na Universitě v Kodani, měl v zimním semestru 1819/20 přednášku nazvanou „Elektřina, galvanismus a magnetismus“. Spojení těchto tří disciplín, které byly v té době chápány jako samostatné a prakticky nezávislé, naznačuje, že Oersted patřil k těm, kteří intenzivně tušili, že mezi nimi může ve skutečnosti existovat hlubší souvislost. Proto svoji přednášku doplňoval i některými novými experimenty.¹⁴ Při jednom z nich umístil nad magnetku kompasu drát, kterým protékal elektrický proud, při čemž drát svíral s magnetkou pravý úhel. Magnetka se nevychýlila a poněkud zklamaný Oersted chtěl již ukončit experiment. Něco mu však napovídalo, aby změnil polohu vodiče vůči magnetce: zavěsil jej do směru rovnoběžného se směrem magnetky a senzace byla na světě. Magnetka se viditelně vychýlila, a co víc, při obrácení směru proudu se vychýlila na opačnou stranu! Elektrický (galvanický) proud tedy působí na magnetku (obecně můžeme říci magnet) silou, podobně jako kdyby se ocitla v blízkosti jiného magnetu (obr. 6)!

¹⁴ Skutečně patřil Oersted ke skupině tzv. dynamistů. Na rozdíl od ostatních, kteří za základní realitu přírody považovali hmotné objekty včetně těch nevažitelných (tj. fluid, odpovědných za elektřinu, magnetismus, teplo a světlo) a tyto hmotné objekty za vzájemně odlišné, dynamisté viděli jako primární „sílu“ (v dnešním pojetí bychom spíše řekli energii). Zatímco v prvním případě byly elektřina, magnetismus, gravitace, teplo atd. chápány jako vzájemně nezávislé přírodní jevy, podrobené obecným zákonitostem analogickým Newtonovu zákonu gravitačnímu, dynamisté viděli v těchto jevech různé projevy jediné všeobecné prapůvodní přírodní „síly“. Jako takové se měly nejen vzájemně ovlivňovat, ale mohly též přecházet jedna v druhou. V souladu s tímto očekáváním Oersted se svým kolegou Johanem Wilhelmem Ritterem již v letech 1801 a 1802 (!) prováděli experimenty směřující k nalezení souvislosti mezi elektřinou a magnetismem. Zatím ovšem bezvýsledně.



Tento nečekaný výsledek přinesl v budoucnosti skutečný převrat v názorech na magnetismus, neboť

- ukázal, že existuje souvislost mezi magnetismem a elektrinou, přesněji elektrodynamikou
- ukázal, že elektrický proud může být zdrojem magnetického působení.

Zákony elektromagnetismu

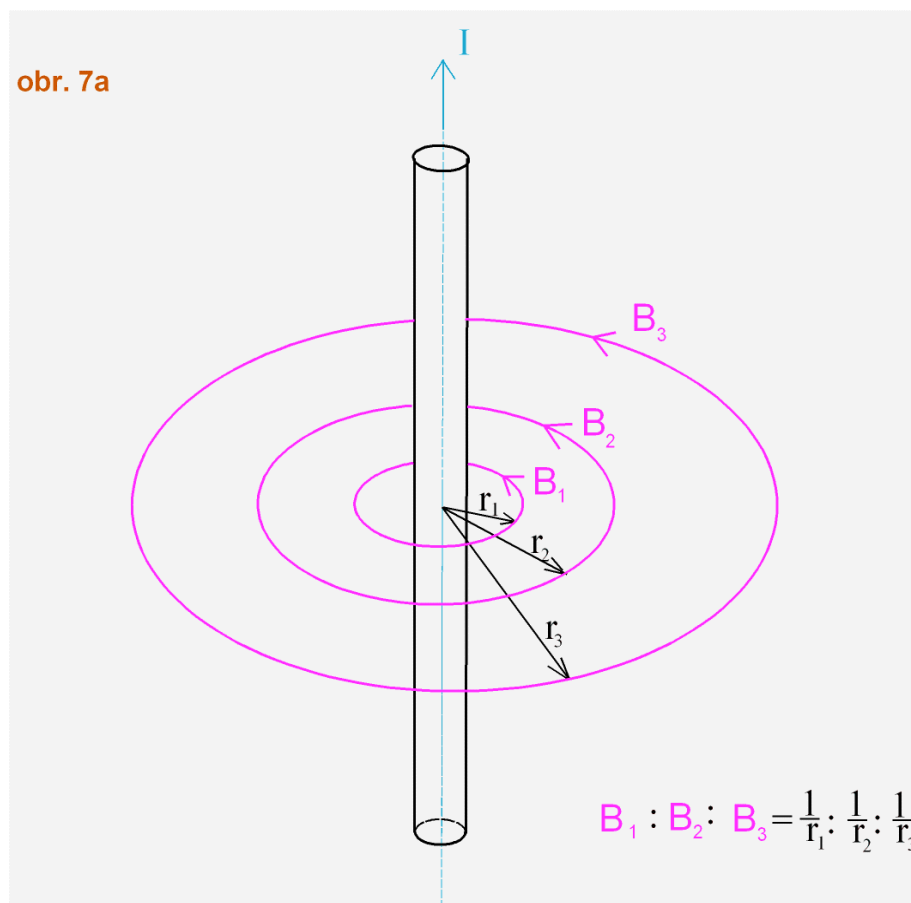
O svém objevu informoval Oersted vědecký svět latinsky psaným sdělením datovaným 21. července 1820, tedy krátce po ukončení školního roku. Sdělení rozeslal významným světovým vědcům a vědeckým institucím. Těžko asi nalezne obdoby v historii fyziky to co následovalo. Poté co F.J. Arago 11. září 1820 referoval o Oerstedově objevu ve Francouzské Akademii, došlo ke skutečné explozi: zprávy o nových pozorováních a objevných výsledcích následovaly jeden za druhým, nejvýznamnější fyzikové se zapojili do těchto „závodů“: Arago, Ampère, Davy, Faraday, Biot, Savart, Weber V jejich pracích byly nejen důkladně experimentálně prozkoumány vztahy mezi elektrickými a magnetickými jevy, ale zásadní pokrok se objevil i v jejich chápání: byly zavedeny důležité nové pojmy *elektrického a magnetického pole* a formulovány pro ně základní zákony. Než přejdeme k Maxwellově teorii elektromagnetického pole a jeho rovnicím, jež jsou vyvrcholením celého tohoto úsilí, zmiňme se o dvou badatelích, jejichž příspěvek lze považovat za zvlášť závažný, Ampèrovi a Faradayovi.

André Maria Ampère (1775 – 1836).

Od mládí vynikal v matematice, což mu již v 29 letech vyneslo jmenování profesorem na Ecole Polytechnique v Paříži a později i členství ve Francouzské Akademii. Jeho zájmy byly ovšem značně široké a těkaly od chemie a atomismu až po filozofii, psychologii a metafyziku. Fyzikou se začal zabývat až pod dojmem Oerstedova pokusu. Za dobu asi 6 let pak prokázal s minimálními experimentálními prostředky podrobně prozkoumat magnetické účinky elektrického proudu: ukázal, že v souladu s principem akce a reakce je i vodič

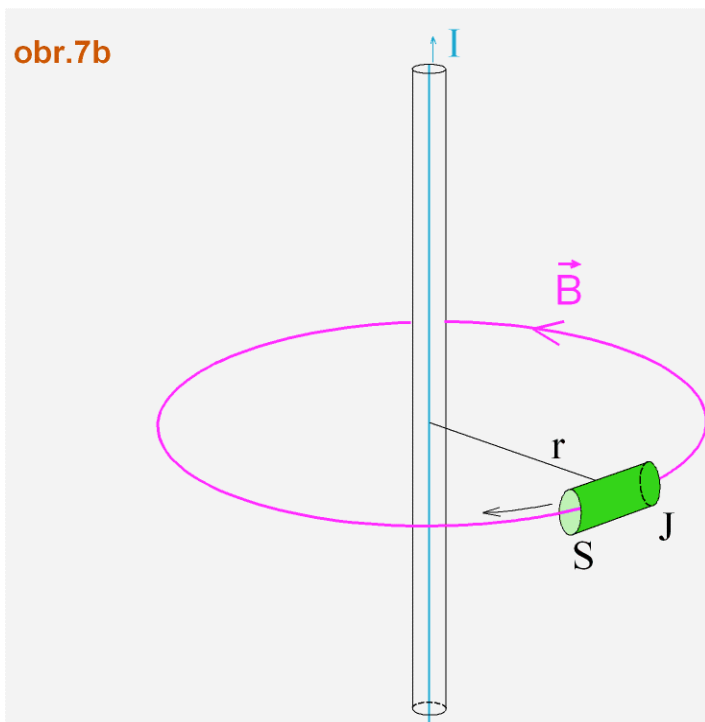
protékaný proudem vystaven v blízkosti magnetu účinku magnetické síly, takže nutně musí i mezi dvěma vodiči existovat vzájemné přitahování event. odpuzování. Navíc dokázal svá pozorování brilantně vyjádřit matematicky. Hlavní Ampèrovy výsledky jsou znázorněny v obr. 7a až 7e.

Obr. 7 K Ampérově elektrodynamice.



a) Proud protékaný dlouhým přímým vodičem vyvolává ve svém okolí magnetickou sílu, charakterizovanou vektorem $\vec{B}$, jejíž existenci objevil Oersted svým historickým pokusem. Její velikost v daném místě je nepřímo úměrná vzdálenosti od vodiče r a přímo úměrná proudu I , tedy $B \sim I/r$, její směr je pak určen siločarou, která prochází uvedeným místem a kterou je zde kružnice o poloměru r . Je to síla, která vyvolala výchylku magnetky v Oerstedově pokusu.

obr.7b

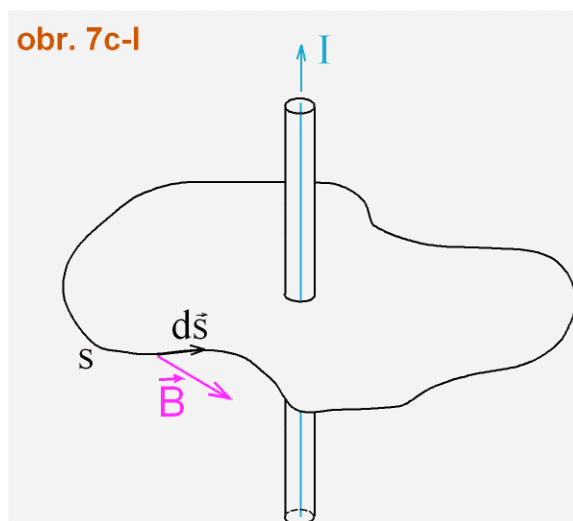


b) Kdybychom si místo magnetky představili jednotkový pól magnetu (srov. pozn. 12) a v myšlenkovém pokusu jím pohybovali po kružnici představující onu siločáru ve směru proti působící síle B , vykonáme práci, která při celém oběhnutí kružnice bude rovna

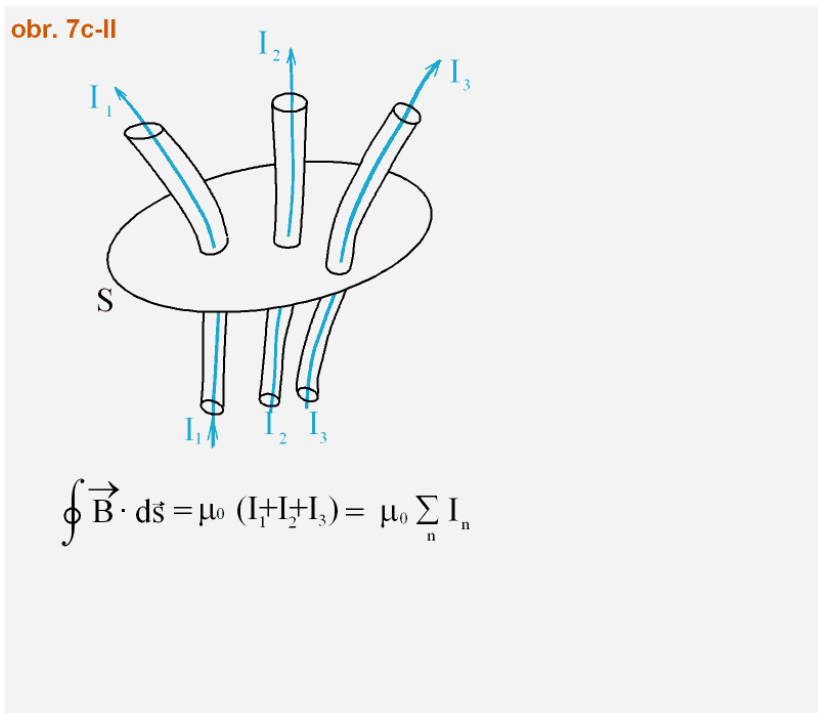
$$2\pi r \cdot B \sim 2\pi r \cdot I / r = 2\pi I$$

Tento výraz má tu jedinečnou vlastnost, že *nezávisí* na vzdálenosti r a zároveň je až na konstantu úměrnosti *roven* hodnotě elektrického proudu, který je zde *zdrojem* magnetické síly. Toto je velmi speciální případ tzv. *Ampèrova zákona*.

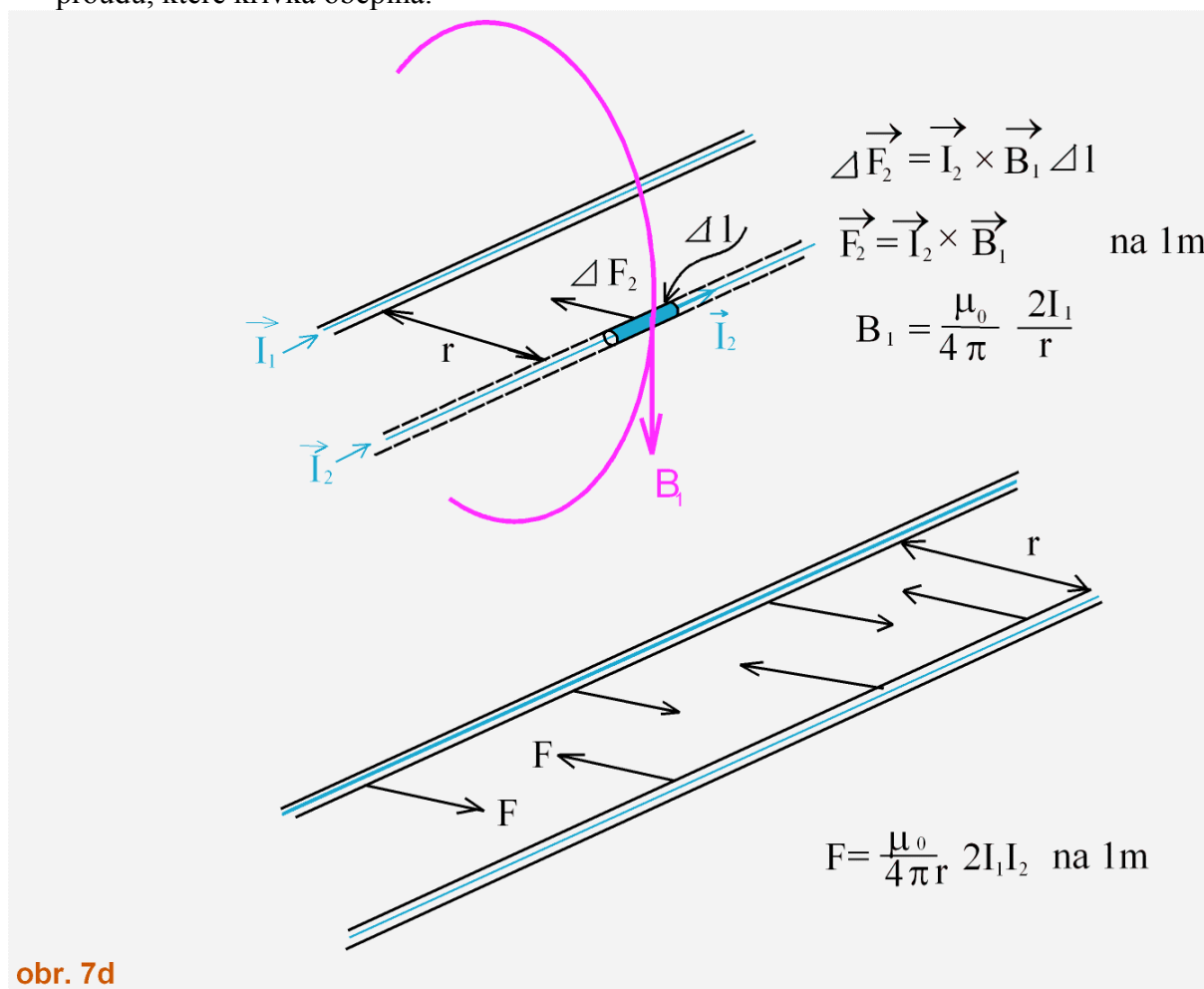
obr. 7c-I



obr. 7c-II



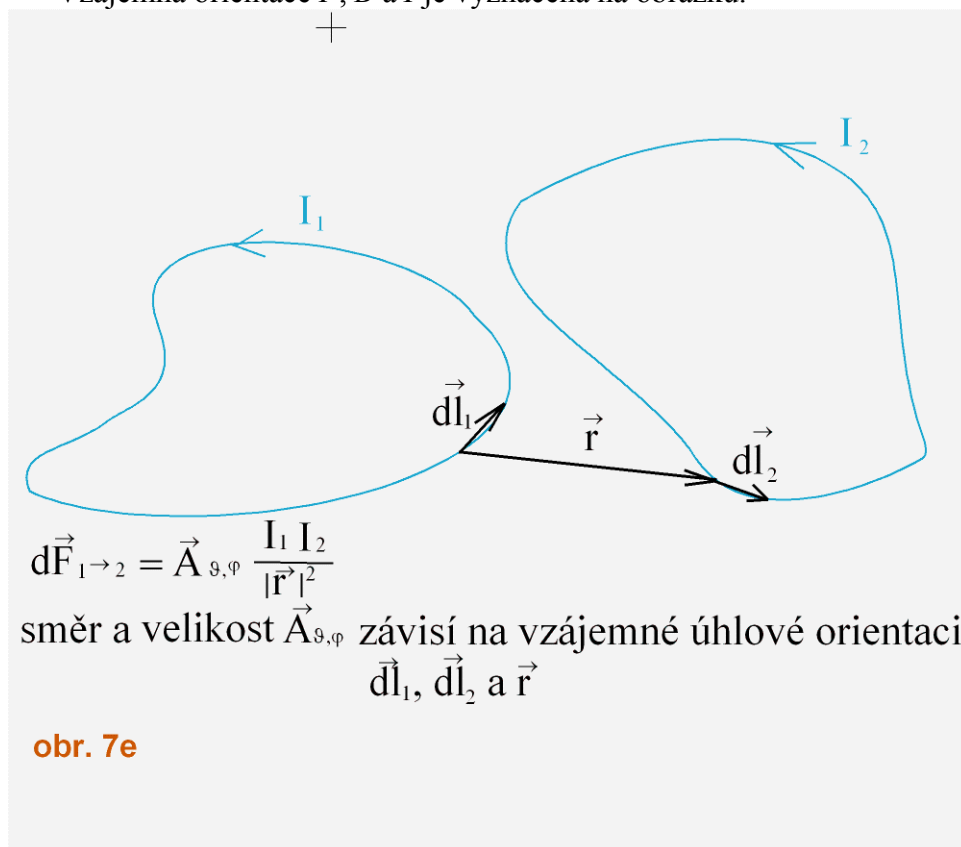
c) Ampèreův zákon platí pro libovolnou uzavřenou křivku a sumu všech elektrických proudů, které křivka obepíná.



obr. 7d

d) Přiložíme-li k prvnímu vodiči do vzdálenosti r místo magnetky či magnetického pólu druhý elektrický vodič protékající proudem, působí na něj opět síla F , ale ta bude

odlišná od magnetického vektoru $\vec{B}$ uvažovaného v předešlém případě: bude mířit k prvnímu vodiči, případně od něho, a bude tedy buď přitažlivá nebo odpudivá. Vzájemná orientace F , B a I je vyznačena na obrázku.



- e) Výsledné vzájemné působení mezi dvěma vodiči lze chápat jako souhrn silových účinků mezi proudovými elementy $I_1 dl_1$ a $I_2 dl_2$. Jak ukázal Ampère, klesá síla působící mezi dvěma libovolnými proudovými elementy s druhou mocninou jejich vzdálenosti v analogii ke Coulombovu zákonu (!)¹⁵

V případě dvou rovnoběžných vodičů (obr. 7d) je síla, která mezi nimi působí, buď přitažlivá, nebo odpudivá podle toho, zda proud v obou vodičích má shodný nebo opačný směr. Velikost této síly je při obecně různých proudech I_1 , I_2 v obou vodičích dána vztahem

$$F = \text{konst.} \cdot 2 I_1 I_2 / r \quad \text{na 1 m vodiče,}$$

k němuž se později ještě vrátíme. Připomeňme, že Ampèreův zákon, jehož význam je naznačen v obrázku 7 b, c, tvoří jeden z pilířů Maxwellovy teorie elektromagnetického pole.

¹⁵ Tento výsledek byl ve své době považován za fundamentální a Ampère byl oslavován jako „Newton magnetismu“. Výsledek byl totiž chápán jako argument ve prospěch tradičního pojetí fyziky, proti tzv. dynamismu – srov. pozn. ¹⁴ k Oerstedově pokusu. Ve skutečnosti jde o nadsázku: Výraz pro sílu mezi dvěma proudovými elementy v obecném případě závisí na pořadí, v jakém je uvažujeme, tj. $dF_{1 \rightarrow 2} \neq dF_{2 \rightarrow 1}$, tak jako by zde neplatil princip akce a reakce. Provedeme-li ovšem dvojistou integraci, tj. vypočítáme-li celkovou sílu mezi oběma vodiči, tato nesnáze zmizí a princip akce a reakce bude opět splněn. Z této poznámky je patrné, že analogie mezi Newtonovým gravitačním zákonem a uvedeným výrazem pro sílu mezi dvěma proudovými elementy je jen zdánlivá a stojí na vratkých nohách.

Kromě toho Ampère ukázal, že cívka protékaná proudem (solenoid) je po magnetické stránce ekvivalentní tyčovému magnetu, a navíc, že vložením železného jádra do cívky se zesílí vnější magnetické účinky solenoidu. Ampère bývá proto právem nazýván *otcem elektromagnetu*. Dřívější zkušenosti s atomistikou lákaly Ampèra též ke studiu magnetických (feromagnetických) látek, především železa. Z toho, že elektrický proud vyvolává magnetickou sílu, usoudil, že i magnetismus magnetů samých (tedy např. i zmagnetovaného železa) může být vyvolán *vnitřními elektrickými proudy v látce*, nejspíše na molekulární úrovni (*Ampèrovy molekulární proudy*)¹⁶.

Je pozoruhodné, že po zmíněných 6 plodných letech, které mu stačily k získání těchto fundamentálních poznatků o vztahu mezi elektrickým proudem a magnetismem, zaměřil Ampère opět úplně jinam: V r. 1826, poté co převzal profesuru fyziky na Collège de France, obrátil svoji pozornost nejprve zpět k filosofii a logice, aby se posléze věnoval biologii a srovnávací anatomii(!)

Michael Faraday (1791 – 1867)

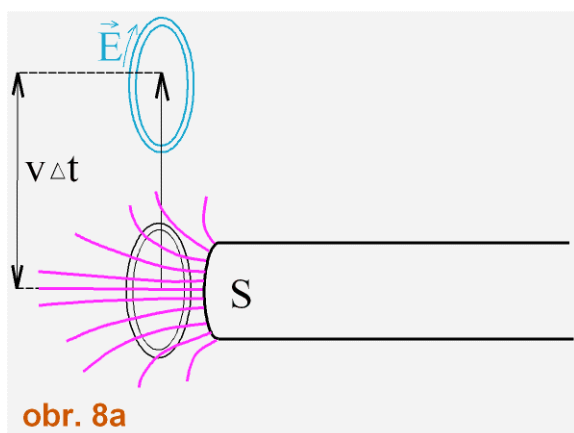
Pocházel ze sociálně velmi skromných poměrů. Hluboké náboženské kořeny jeho rodiny formovaly jeho osobnost a patrně byly i zdrojem jeho morální síly, vytrvalosti a obětavosti, které mu pomohly, aby se jako samouk vypracoval z roznašeče novin až na všeobecně uznávaného vědce, člena Royal Society a nositele nesčetných ocenění dalších světových učených společností. Nutno dodat, že i jeho podíl na vybudování základů elektromagnetismu je zásadní:

- Pojem pole (elektrické, magnetické, (1845); na rozdíl od starších představ o *působení na dálku* tradovaných Coulombem, Poissonem a Greenem přenesl dějiště elektrického resp. magnetického silového působení do prostoru *mezi* interagujícími náboji či proudy. Silové působení tak spojil přímo s elektrickými resp. magnetickými siločarami, jež považoval za něco víc než myšlené čáry. Pole se u něj stává nejen dějištěm, ale skutečnou reálnou entitou.
- V souvislosti s předchozím se nově zabýval látkovým prostředím, v němž pole působí: zavedl pojem dielektrická konstanta, studoval paramagnetické a diamagnetické chování látek v magnetickém poli, objevil jeden ze základních magnetooptických jevů nesoucí jeho jméno.
- Pro vlastní elektrodynamiku je nejdůležitější objev elektromagnetické indukce (Faradayův zákon, 1831).

Tento Faradayův zákon, nazývaný též všeobecný zákon elektromagnetické indukce, říká: *máme-li libovolnou smyčku v magnetickém poli, pak každá změna počtu magnetických siločar protínajících libovolnou plochu ohraničenou touto smyčkou vyvolá ve smyčce kruhové napětí (elektromotorickou sílu) orientovanou tak, aby svými účinky (vyvolaným elektrickým proudem) působila proti původní změně v počtu magnetických siločar* (obr. 8).

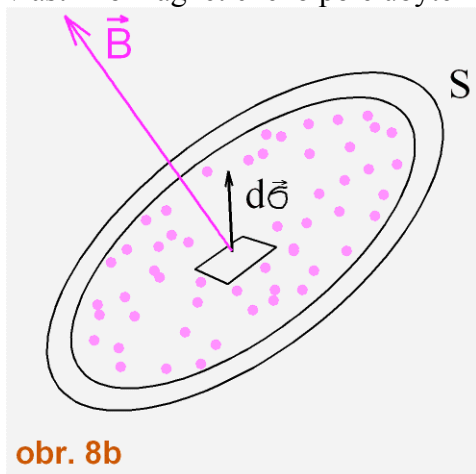
¹⁶ Z korespondence mezi Ampèrem a Fresnelem nalezené v Ampèrově pozůstalosti vyplývá, že oba si uvědomovali, že tyto proudy nemohou být makroskopické povahy, neboť jinak by muselo vznikat pozorovatelné Jouleovo teplo. Ampèrovy výpočty k modelu molekulárních proudů se zachovaly jen v nepublikovaných náčrtcích; později se snažil na ně navázat W.E. Weber a vysvětlit tak vznik „molekulárních magnetů“ v železe a jeho nasycování v magnetickém poli.

Obr. 8 K Faradayova zákonu elektromagnetické indukce.



obr. 8a

a) Změna „počtu“ siločar při posunutí smyčky směrem od pólu magnetu. Vzniká elektromotorická síla a ve smyčce následně elektrický proud, který se snaží vyvoláním vlastního magnetického pole úbytek siločar nahradit.



obr. 8b

b) Místo původního označení *počet siločar* užíváme dnes obvykle pojmu *magnetický tok*, což je plošný integrál $\int \vec{B} \cdot d\vec{\sigma}$ uvažovaný přes celou plochu smyčky, tedy *tok* vektoru $\vec{B}$ touto plochou. Zhruba řečeno to znamená, že ztotožníme *počet siločar na jednotku plochy*, tedy jejich *hustotu*, s vektorem $\vec{B}$, který charakterizuje magnetickou sílu. V matematickém přepisu pak bude zákon elektromagnetické indukce znít

$$\frac{d}{dt} \int_{\sigma} \vec{B} \cdot d\vec{\sigma} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s},$$

což vyjadřuje skutečnost, že indukované kruhové napětí $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s}$ podél smyčky je úměrné *rychlosti* změny magnetického toku.

Faradayův zákon elektromagnetické indukce je dalším pilířem Maxwellovy teorie. O zásadním inspirativním významu Faradayova díla máme mj. i přímé svědectví Maxwellovo:

... I resolved to read no mathematics on the subject till I had first read through Faraday's *Experimental Researches in Electricity*. I was aware that there was supposed to be a difference between Faraday's way of conceiving phenomena and that of the mathematicians. ... As I proceeded with the study of Faraday, I perceived that his method ... [was] capable of being expressed in ordinary mathematical forms. ... For instance, Faraday, in his mind's eye, saw lines of force traversing all space where the mathematicians saw centres of force attracting at a distance: Faraday saw a medium where they saw nothing but distance. ... I also found that several of the most fertile methods of research discovered by the mathematicians could be expressed much better in terms of ideas derived from Faraday than in their original form¹⁷ [13].

Shrnutí:

Přehlédneme-li znovu toto plodné období 20 až 30 let po zásadním objevu Oerstedově (1820), zjistíme:

- bylo potvrzeno, že elektřina a magnetismus nejsou na sobě nezávislé jevy
- experimentálně byla nalezena řada zákonů, které vztahy mezi elektřinou a magnetismem popisují
- pro popis těchto nových zákonitostí byly zavedeny pojmy elektrického a magnetického pole
- bylo ukázáno, že s výjimkou statiky (nepohybující se elektrické náboje, časově neměnné magnetické pole) vyskytují se elektrické i magnetické pole vždy současně → elektromagnetické pole, elektromagnetismus.

Vyjasnění obsahu nalezených zákonitostí pak přinesla Maxwellova teorie elektromagnetismu, která pro ně geniálním způsobem vytvořila širší jednotný matematický rámec.

Chtěl bych ještě upozornit, že celé toto významné období historie fyzikálních objevů v oblasti elektřiny a magnetismu je podrobně zpracováno R. Kolomým [12], kterému vděčím za poskytnutí některých jeho prací.

Maxwellova elektrodynamika

James Clerk Maxwell (1831 – 1879)

Narodil se v Edinburghu jako potomek starých skotských rodů, Clerků po otci a Maxwellů po matce. Již během školních let strávených na Edinburghské Akademii upozornil na svůj výjimečný talent zejména v matematice, když již ve 14 letech napsal své první pojednání o „oválech“ (zobecnění pojmu elipsa). Od r. 1847 pak pokračoval ve svých studiích na Edinburghské universitě, v r. 1850 přechází do Cambridge, tam také získává v r. 1854 diplom v matematice s vyznamenáním. V následujících 2 letech, kdy mu stipendiem bylo umožněno, aby na Cambridžské universitě pokračoval ve své vědecké práci, pak publikuje

¹⁷ Vytvoření koncepce polí (elektrického, magnetického) přineslo značný posun v chápání základních fyzikálních jevů směrem k dynamismu (srov. poznámky ¹⁴ a ¹⁵). Omezilo prioritu materiálních zdrojů včetně tehdy ještě nezbytných fluid a zdůraznilo význam dějů samých, tj. stavu polí a jejich změn. Elektromagnetická indukce Faradayem objevená pak mohla být chápána skutečně jako *přeměna* magnetické síly (energie) na elektrickou (logicky to ovšem platí i pro obrácený jev vyvolání magnetické síly při zapnutí elektrického proudu), v naprosté shodě se základním postulátem dynamismu. Úsilí, které v následujících letech Faraday věnoval studiu vlivu magnetického pole na optické vlastnosti látek, (které mj. vedlo k objevu magnetooptického jevu po něm pojmenovaného) je možno chápat jako snahu po nalezení podobných vztahů mezi magnetismem a světlem v souladu s očekáváním dynamistů.

svoji průkopnickou práci, ve které položil základy nové teorie elektromagnetismu. V práci „On Faraday's lines of force“, přednesené ve 2 částech 1855 a 1856 pro Cambridge Philosophical Society, prezentoval po prvé své rovnice, s nimiž dokázal geniálním způsobem velmi přehledně skloubit základní poznatky o elektrických a magnetických polích získané M. Faradayem a dalšími. K těmto rovnicím se opět vrátil později, aby je ve svém pojednání „A Treatise on Electricity and Magnetism“ z r. 1873 [13] představil v úplnosti a formální vybroušenosti – jeden z největších výdobytků vědy v 19. století. A jak už to bývá u skutečně velkých osobností vědy, nešlo ani u Maxwella o obohacení pouze jednoho speciálního odvětví: byl např. tvůrcem kinetické teorie plynů, kterou vypracoval (nezávisle na L. Boltzmannovi) v r. 1866, a předtím již v r. 1857, bezprostředně po uveřejnění první verze matematické teorie popisující vlastnosti elektrického a magnetického pole a jejich vzájemného vztahu, přichází s řešením stability Saturnových prstenců, kdy vyslovil závěr, že prstence jsou nutně tvořeny velikým množstvím drobných pevných částecek – výsledek, který mohl být teprve před nedávnem potvrzen vesmírnou sondou Voyager. Po nedlouhém životě, který mu nepřinesl jen skvělé úspěchy, ale i řadu zklamání, umírá James Clerk Maxwell r. 1879 ve věku 48 let.

Maxwellova elektrodynamika, tj. teorie elektromagnetického pole, je ve svých základech plně obsažena v tzv. Maxwellových rovnicích. Jejich rozbor a diskuse o důsledcích, které z nich vyplývají, by si pochopitelně vyžádaly značného místa a přesahují naše téma, kterým zůstává magnetismus. Nicméně je však nelze ani úplně pominout. Máme pro to několik důvodů:

- Maxwellovy rovnice vytvořily rámec pro pochopení všech makroskopických dějů spojených s elektřinou *i magnetismem*; tento rámec si zachoval platnost až do dnešních dnů a je důležitý např. i pro popis a pochopení magnetických jevů v pevných látkách
- Maxwellovy rovnice prvně vymezily vzájemnou vazbu mezi magnetismem a elektřinou a otevřely cestu ke konečnému vysvětlení původu magnetismu a magnetických sil
- vůbec v sobě obsahují Maxwellovy rovnice zárodky budoucího vývoje fyziky, i v dalších jejích oblastech, a tento vývoj do značné míry skutečně iniciovaly – např. Einsteinovu teorii speciální relativity
- ve své eleganci a geniální prostotě jsou Maxwellovy rovnice nejen nádherným dokladem toho, jak důležitá je matematika pro pochopení nejzákladnějších zákonitostí přírody, ale představují i po estetické stránce jedinečný artefakt a triumf lidského genia.

Maxwellovy rovnice jsou odvozeny z několika základních tvrzení (axiomů), která se opírají o celý souhrn tehdejších poznatků založených na zkušenosti. I když svým dosahem tento empirický rámec výrazně překračují, nelze je pojmově, ani co do původního chápání fyzikálního obsahu, od něj úplně oddělit. Fyzikální myšlení bylo stále zatíženo představou různých fluid, Maxwell sám pak se cítil nucen např. uvažovat o reálné existenci éteru v souvislosti s elektromagnetickým polem a šířením elektromagnetických vln. Z těchto důvodů i chápání poselství obsaženého v těchto geniálních rovnicích včetně obsahu pojmů, se kterými se tu operuje, bylo domýšleno postupně a ustálilo se až koncem 19. a začátkem 20. století. Proto v následujícím výkladu použijeme již tohoto novějšího přístupu.

Východiska Maxwellovy elektrodynamiky

- Předpokládá se existence elektrického náboje jako základní konstantní veličiny, jejíž velikost se nemění s časem a nezávisí ani na rychlosti, se kterou se pohybuje. Elektrický náboj je zdrojem elektrických sil (Coulombův zákon) a vytváří tedy kolem sebe elektrické pole ve smyslu Faradayově.
- Podobně pohybující se náboj (elektrický proud) vytváří kolem sebe magnetické pole, které je zdrojem magnetických sil, které působí na póly magnetu a též na vodiče protékané elektrickým proudem a nalézající se v jeho okolí. Toto působení je ekvivalentní působení magnetu či zmagnetované látky.
- Stejně jako každá mechanická síla mají elektrická i magnetická síla velikost a směr a mají tedy v běžném smyslu vektorový charakter. Dvojici vektorů, které je charakterizují, označíme jako $\vec{E}$ a $\vec{B}$ a uijíme pro ně nejjednoduššího názvu, obvyklého v anglosaské literatuře, tj. *elektrické pole* pro $\vec{E}$ a *magnetické pole* pro $\vec{B}$.¹⁸
- Hmotné prostředí modifikuje silové účinky polí $\vec{E}$, resp. $\vec{B}$, a proto se vedle vektorů $\vec{E}$, $\vec{B}$ zavádí další dvojice vektorů – $\vec{D}$ a $\vec{H}$, které zachycují i chování a účinky elektrického resp. magnetického pole ve hmotném prostředí. Elektromagnetické pole je tedy určeno čtveřicí vektorů $\vec{E}$, $\vec{B}$, $\vec{D}$, $\vec{H}$; první pár charakterizuje pole jeho silovými účinky, druhá dvojice jeho zdroji. Ve většině případů můžeme předpokládat mezi vektory $\vec{E}$ a $\vec{D}$, resp. $\vec{B}$ a $\vec{H}$ lineární vztah, nejčastěji přímou úměrnost: píšeme $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, a z historických důvodů $\vec{B} = \mu \vec{H}$ místo logičtějšího $\vec{H} = \mu' \vec{B}$.¹⁹

Představě, že $\vec{D}$ vyjadřuje hustotu jakéhosi „toku“ náboje v určitém místě vnějšího prostředí (obr. 9a) odpovídá integrální vztah

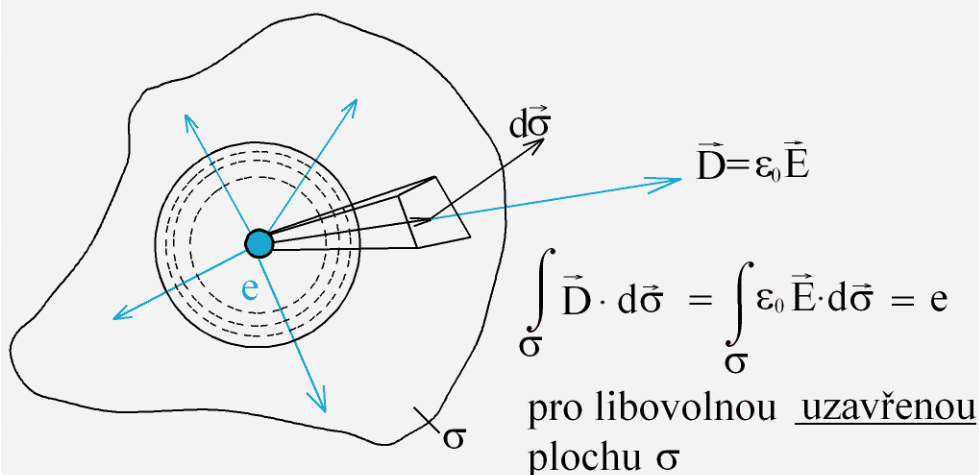
$$\oint_{\sigma} \vec{D} \cdot d\vec{\sigma} = \sum e,$$

kde σ je libovolná uzavřená plocha procházející uvažovaným místem a $\sum e$ součet

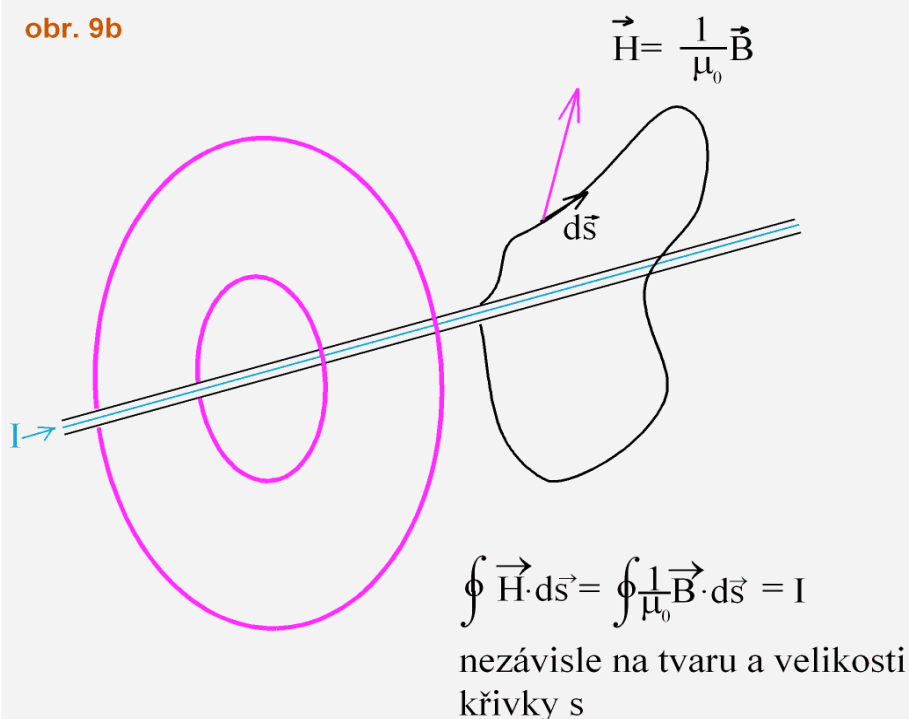
¹⁸ Obvyklé názvy v češtině – intenzita elektrického pole resp. magnetická indukce – jsou zavádějící, viz další poznámka.

¹⁹ Skutečnost, že svým fyzikálním významem sobě odpovídají $\vec{E}$ a $\vec{B}$ na jedné straně (mechanické síly) a $\vec{D}$ a $\vec{H}$ na straně druhé dlouho nebyla zřejmá, a ještě Heinrich Hertz (1857-1894) ve svém závěru o „neexistenci pravého magnetismu“ vycházel z mylného předpokladu, že analogií vektoru $\vec{D}$ je $\vec{B}$ (srovnání Sommerfeld [10]). Ve skutečnosti oba vektory $\vec{D}$ a $\vec{H}$ charakterizují elektrické resp. magnetické pole nikoliv z hlediska silových účinků v daném místě, ale z hlediska zdrojů, tj. elektrických nábojů resp. elektrických proudů a lze si je představit jako jakýsi tok, kterým se realizuje působení zdroje v okolním prostředí. Proto běžné označení pro $\vec{H}$ *intenzita magnetického pole* jakožto analogické označení *intenzita elektrického pole* je zcela zavádějící; s ohledem na podobný význam obou vektorů $\vec{D}$ a $\vec{H}$ (přenos působení ze zdroje okolním prostředím) navrhuje Sommerfeld pro ně označení *elektrické vzbuzení*, resp. *magnetické vzbuzení*. (Erregung). Jinak bývá $\vec{D}$ od času Maxwella označováno jako dielektrické posunutí, což vychází z představy polarizace prostředí (dielektrika) elektrickým polem.

obr. 9a



obr. 9b



Obr. 9 K definici vektorů $\vec{D}$ a $\vec{H}$: jejich význam je názorně patrný z nejjednodušších případů polí, kdy jedinými zdroji jsou (a) bodový náboj e , resp. (b) ustálený elektrický proud I tekoucí dlouhým přímým vodičem.

všech elektrických nábojů uvnitř σ , a to včetně těch, které vznikly působením pole původních nábojů na prostředí uvnitř σ (dielektrická polarizace). V případě magnetického pole můžeme za jeho zdroj považovat elektrický proud, neuvažujeme-li pro jednoduchost přímo magnety a jejich póly. Přesné analogii s elektrickým nábojem by odpovídal magnetický monopol; ten však neexistuje (resp. nebyl dosud objeven) a proto musí být geometrie onoho „toku“ jiná. Vzpomeňme, že magnetické siločáry obepínají elektrický proud a v případě jednoduchého přímého vodiče to jsou kružnice. Použijeme tedy Ampèrova zákona a působení elektrického proudu v okolí posoudíme

podle dráhového integrálu $\oint \vec{H} \cdot d\vec{s}$ po libovolné uzavřené křivce obepínající tento elektrický proud a procházející uvažovaným místem (obr. 9b). $\vec{H}$ lze pak chápat opět jako hustotu jistého pomyslného „toku“ magnetických účinků proudu, který teče uvnitř této křivky. Ampèrův zákon, zapsaný takto správně s $\vec{H}$, nikoliv $\vec{B}$, neboť zahrnuje i vliv prostředí, pak bude znít

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum I ;$$

$\sum I$ zde představuje sumu všech elektrických proudů, které tečou uvnitř uvažované křivky (smyčky).

Axiomy teorie

Podobně jako v případě klasické mechaniky lze i u elektrodynamiky odvodit její základní rovnice (tj. Maxwellovy rovnice), z několika základních předpokladů – axiomů, či chcete-li principů, které plně spočívají na naší zkušenosti (i když ji obvykle poněkud idealizují). V našem případě jde o tyto axiomy:

- I.** *Faradayův zákon elektromagnetické indukce*
 Jeho fyzikální význam jsme naznačili již dříve. Nyní jej jen přepíšeme v matematické podobě, která odpovídá dnes používanému systému jednotek MKSA (metr-kilogram-sekunda-ampér); ten zjednodušuje tento i další základní vztahy tím, že vystupující konstanty úměrnosti klade zpravidla rovny jedničce:²⁰

$$\frac{d}{dt} \int_{\sigma} \vec{B} \cdot d\vec{\sigma} = - \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (\text{I})$$

- II.** *Ampèrův zákon o vzniku magnetického kruhového napětí (magnetomotorické síly) podél křivky obepínající elektrické proudy;*

$$\int_{\sigma} \vec{i} \cdot d\vec{\sigma} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (\text{II})$$

V obou případech (I), (II) σ představuje libovolnou plochu ohraničenou uvažovanou (uzavřenou) křivkou, k níž se vztahuje $\oint$ na pravé straně, $\vec{i}$ je hustota elektrického proudu v daném místě této plochy. I o tomto zákonu bylo již podrobněji hovořeno. Zatímco druhý z obou axiomů vyjadřuje skutečnost, že elektrické proudy jsou vždy doprovázeny magnetickým polem, tedy souběh obou jevů, první ukazuje setrvačnost magnetického pole, jehož změna je

²⁰ O hlubším smyslu volby těchto jednotek viz dále

brzděna indukovaným elektrickým polem; proto je v (I) na první straně znaménko mínus na rozdíl od (II), kde je na obou stranách plus.

Tyto dva základní axiomy pak doplňují *další dva*:

Předně víme ze zkušenosti, že magnetické siločáry charakterizované vektorem $\vec{B}$ jsou uzavřené²¹, takže jejich celkový tok uzavřenou plochou musí být roven nule (v objemu touto plochou ohraničenou žádná magnetická siločára nekončí ani nemá svůj počátek). Tedy

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\sigma} = 0 \quad (\text{III})$$

Dále z již dříve uvedené definice vektoru $\vec{D}$ a z předpokladu o časové neproměnnosti elektrického náboje v nevodiči získáme vztah

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{\sigma} = \sum e = \text{konst.} \quad (\text{IV})$$

K těmto čtyřem axiomům přistupuje Maxwellův předpoklad, že podobně jako magnetické siločáry jsou v prostoru uzavřené, budou uzavřené i všechny elektrické proudy. K tomu účelu zavádí Maxwell tzv. posuvný (Maxwellův) proud daný časovou změnou vektoru $\vec{D}$ v místech, kde žádný galvanický proud neteče, tj. v elektrických izolátorech, ale např. i ve vakuu:

$$\vec{C} \equiv \text{hustota úhrného el. proudu} = \vec{i} + \frac{d}{dt} \vec{D}$$

Tímto výrazem pro celkový proud je nutné nahradit v integrálu na levé straně (II) původní hustotu proudu $\vec{i}$ takže bude

$$\frac{d}{dt} \int_{\sigma} \vec{D} \cdot d\vec{\sigma} + \int_{\sigma} \vec{i} \cdot d\vec{\sigma} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (\text{II}')$$

Zároveň podle Maxwellova předpokladu musí analogicky k (III) platit²²

$$\oint \vec{C} \cdot d\vec{\sigma} = \oint \vec{i} \cdot d\vec{\sigma} + \frac{d}{dt} \oint \vec{D} \cdot d\vec{\sigma} = 0$$

odkud vzhledem k (IV) dostáváme tzv. rovnici kontinuity

$$\frac{d}{dt} \sum e + \oint \vec{i} \cdot d\vec{\sigma} = 0, \quad (\text{V})$$

která neříká nic jiného, než že změna celkového množství elektrického náboje uvnitř uzavřené plochy za jednotku času je rovna celkovému elektrickému proudu protékajícímu touto

²¹ Vyplyvá to např. z pokusů o dělení magnetů a z (předpokládané) neexistence magnetických monopolů

²² Pozor: zatímco v (II') se integrál $\int_{\sigma}$ vztahuje na neuzavřenou plochu σ , zde značí $\oint$ integraci přes plochu uzavřenou !!

plochou, čili jinými slovy množství náboje vytékajícího z uvažovaného objemu musí se rovnat úbytku náboje uvnitř.

Přehlédněme zpětně uvedené axiomy, na nichž Maxwellova elektrodynamika spočívá: Dva hlavní axiomy (I) a (II) jsou shodné se zákony, k nimž již dříve dospěli Faraday a Ampère, vedlejší (III) a (IV) představují starou experimentální zkušenost resp. jsou důsledkem základního předpokladu o konstantnosti elektrického náboje v čase i jeho nezávislosti na pohybu. Zcela nové a zásadní je ovšem Maxwellovo zobecnění pojmu elektrického proudu a nové je i zavedení čtyř základních vektorů pro popis elektrického resp. magnetického pole místo původních dvou, což poněkud modifikuje konkrétní výrazy v jednotlivých zákonech. Připomeňme, že Maxwellův posuvný proud se jeho současníkům nutně musel jevit jako něco zcela abstraktního, jako pouhá myšlenková konstrukce. Tím, že vyjadřuje ekvivalenci mezi elektrickým proudem a časovou změnou vektoru $\vec{D}$, musí platit nejen pro látkové prostředí tvořené dielektrikem (elektrickým izolátorem), ale i pro vakuum, kde $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$; jinými slovy: časová změna elektrického pole – tedy Maxwellův posuvný proud – je schopna vyvolat magnetické pole, tak jako by šlo o skutečný galvanický proud! A právě toto explicitně vyjadřuje druhá z dvojice hlavních Maxwellových rovnic (II'a), o nichž bude řeč za chvíli. Nepřekvapuje, že právě tento předpoklad, pro který Maxwell neměl ve své době žádnou oporu v experimentu, byl některými jeho současníky zpochybňován. Následující léta ovšem dala Maxwellovi plně za pravdu a potvrdila tak jeho genilální intuici.

Maxwellovy rovnice a komentář k nim

Úpravou původních axiomů (I), (II) tím, že zavedeme Maxwellův posuvný proud, dostáváme automaticky *základní Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru* (I) a (II'). Beze změny jsou převzaty též vedlejší vztahy (III) a (IV) a vzhledem k zavedení posuvného proudu k nim přistupuje ještě rovnice kontinuity (V). Výhodou této formy Maxwellových rovnic je zejména jejich názornost opírající se právě o výklad Ampérových a Faradayových výsledků (viz dříve).

Pro praktické aplikace Maxwellovy elektrodynamiky a její hlubší analýzu se však zpravidla používá jejich *diferenciální* tvar, který lze získat z integrální podoby, když necháme integrační obory v nich vystupujících integrálů – velikost ploch σ resp. křivek, které je ohraničují – konvergovat k nule. Integrály přitom zmizí a jsou nahrazeny jistými vektorovými operátory, vytvořenými z parciálních derivací vůči pravoúhlým souřadnicím v uvažovaném místě pole, div (divergence) a rot (rotace). Konkrétní podobu a význam těchto operátorů by nemělo smysl zde vysvětlovat. Spokojme se tím, že nový diferenciální tvar Maxwellových rovnic je díky nim neobyčejně jednoduchý a přehledný a že i na neodborníka může zapůsobit hlubokým dojmem pro svoji úspornou estetičnost, která kontrastuje s jejich nesmírným významem pro rozvoj vědy, techniky i celé lidské civilizace. Zde tedy jsou nejprve dvě *základní* rovnice vyplývající z integrálního tvaru (I) a (II')

$$\dot{\vec{B}} = - \text{rot } \vec{E} \quad (\text{I a})$$

$$\dot{\vec{D}} + \vec{i} = \text{rot } \vec{H} \quad (\text{II 'a})$$

Tečka nad písmeny označujícími jednotlivé vektory pole je pouze jiný jednodušší způsob pro psaní jejich časové derivace $\frac{\partial}{\partial t}$.

V těchto dvou rovnicích je shrnuto vše *podstatné* o elektromagnetickém poli – nedivme se proto emfatickému výroku Boltzmannovu:

War es ein Gott, der diese Zeilen schrieb..... (!!!)

Tyto rovnice pak opět doplňují analogicky k (III), (IV) a (V), vztahy

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III a}),$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{IV a})$$

a rovnice kontinuity v podobě

$$\dot{\rho} + \operatorname{div} \vec{i} = 0, \quad (\text{V a})$$

přičemž ρ značí hustotu el. náboje v uvažovaném místě a $\dot{\rho}$ opět rychlost jeho změny s časem (časová derivace); $\vec{i}$ je hustota proudu.

Jak jsme se zmínili již dříve, vektory $\vec{D}$, $\vec{H}$ a ovšem také proudová hustota $\vec{i}$ zahrnují vliv látkového prostředí; proto je třeba vyjádřit jejich souvislost se základními vektory $\vec{E}$ a $\vec{B}$ vyjadřujícími elektrickou a magnetickou sílu v daném místě, tedy veličiny přístupné měření (a v tom smyslu základní). Proto jsou rovnice (I a) až (V a) doplněny ještě vztahy

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}, \quad \vec{i} = \sigma \vec{E} \quad (\text{VI})$$

obsahujícími materiálové konstanty ε , μ , σ , které charakterizují chování materiálu v elektromagnetickém poli.²³ Připomeňme, že tyto rovnice, které odpovídají jednoduché přímé úměrnosti, nemají onu absolutní míru platnosti jako rovnice předchozí. Je to patrné např. u feromagnetik, u nichž μ není prostá konstanta, ale samo je závislé na velikosti magnetického pole.

A nyní několik poznámek k Maxwellovým rovnicím:

- Je to systém diferenciálních rovnic, které musí splňovat vektory $\vec{E}$, $\vec{D}$, $\vec{B}$ a $\vec{H}$ popisující libovolné elektromagnetické pole, a to v jakékoliv situaci. Čtveřice vektorů pole je přitom funkcí prostorových souřadnic x , y , z a času. Jejich určení při daném (časově proměnném) rozložení elektrických nábojů, proudů a případně magnetů může být extrémně složité. Naproti tomu dá se poměrně snadno ukázat, že jednotlivé zákonitosti experimentálně zjištěné Biotem, Savartem, Ampèrem a dalšími v době před Maxwellem lze bezprostředně z Maxwellových rovnic odvodit. Velké zjednodušení pak představují statické problémy, kde nedochází k časovým změnám v rozložení elektrického náboje, magnetických pólů a elektrických proudů. Potom $\dot{\vec{D}} = \dot{\vec{B}} = 0$ a rovnice pro elektrické a magnetické pole jsou vzájemně separovány (elektrostatika, magnetostatika).

²³ Poslední z těchto rovnic vlastně vyjadřuje Ohmův zákon, σ značí elektrickou vodivost.

- Jiné možnosti nabízí redukce polních veličin: místo čtyř vektorů stačí uvažovat pouze dva, vektory pole $\vec{E}$ a $\vec{B}$, tj. elektrické a magnetické síly. To jistě lze pokud vztahy $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ a $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$ jsou striktně splněny a prostředí je rozumně homogenní (aspoň v mikroskopickém smyslu). Tento postup je efektivní zejména tehdy, vyšetřujeme-li elektromagnetické pole ve vakuu ($\varepsilon = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$), neboť ε_0 a μ_0 jsou opravdu konstantami, dokonce je můžeme řadit mezi základní fyzikální konstanty pro jejich úzkou vazbu na rychlost světla $c = 3 \cdot 10^8$ m/sec.²⁴

- Aby bylo možné se vyhnout omezené platnosti „materiálových“ rovnic (VI), a to zvláště v statických případech, tj. v elektrostatice a magnetostatice, zavádějí se veličiny běžně nazývané *elektrická polarizace* $\vec{P}$ a *magnetizace* $\vec{M}$ vztahy

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad \frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H} + \vec{M},$$

ve kterých $\vec{P}$ a $\vec{M}$ představují onu část elektrického resp. magnetického vzbuzení pole, které je vyvoláno látkovým prostředím. Je jich proto běžně používáno k *charakterizaci* elektrické polarizace resp. magnetického momentu látky.²⁵

²⁴ Velikost těchto konstant i jejich fyzikální rozměr jsou ovšem závislé na použitém systému jednotek. Dnes běžně používaná soustava jednotek MKSA (metr – kilogram – sekunda – ampér) dokáže vystihnout rozdílný fyzikální význam dvojice vektorů síly ($\vec{E}$, $\vec{B}$) a vektorů charakterizujících vznik pole v daném prostředí ($\vec{D}$ a $\vec{H}$). Z odlišnosti podstaty obou dvojic vektorů pak vyplývá, že i ve vakuu jsou příslušné konstanty $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$ fyzikálními veličinami, majícími určitý fyzikální rozměr a nejsou to tedy pouhá čísla:

$$\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi} \cdot \frac{1}{c^2} \approx 9 \cdot 10^{-12} \text{ [amper}^2 \cdot \text{sekunda}^2 / \text{newton} \cdot \text{metr}^2 \text{]}, \text{ zkráceně [} A^2 \cdot S^2 / N \cdot M^2 \text{]}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \approx 12,6 \cdot 10^{-7} \text{ [N} \cdot \text{M} \cdot S^2 / A^2 \cdot S^2 \cdot M \text{]} = \text{[N / A}^2 \text{]}$$

$$\varepsilon_0 \cdot \mu_0 = c^{-2}, \text{ c ... rychlost světla ve vakuu.}$$

Poslední vztah mezi ε_0 a μ_0 na jedné straně a rychlostí světla na straně druhé byl poprvé ověřen Hertzovými pokusy s šířením elektromagnetických vln (viz např. [10]).

Na rozdíl od soustavy MKSA nezavádí původní starší systém jednotek cgs (centimetr-gram-sekunda) zvláštní jednotku pro elektrický náboj či el. proud a „rozměry“ všech fyzikálních veličin, tedy i elektrických a magnetických, vyjadřuje pomocí základních jednotek cm, g, sec odvozených z mechaniky. Dielektrická konstanta ε a permeabilita μ jsou zde pouhá čísla, přičemž $\varepsilon_0 = \mu_0 = 1$. Soustava cgs byla v Maxwellově době a ještě dlouho po ní jedinou používanou a svoji superioritu si uhájila téměř až do konce první poloviny 20. století. Poněvadž v této soustavě dvojice vektorů $\vec{E}$ a $\vec{D}$ resp. $\vec{B}$ a $\vec{H}$ mají vždy stejný „rozměr“, smazává se zde i fyzikální rozdíl mezi $\vec{E}$ a $\vec{D}$ resp. $\vec{B}$ a $\vec{H}$. Nepřekvapí proto, že zpočátku docházelo i k jejich chybné interpretaci a záměně – především mezi $\vec{B}$ a $\vec{H}$.

²⁵ Uvedené definiční vztahy nejsou úplně analogické: čekali bychom spíše opačné znaménko u $\vec{M}$. Tato diskrepance je vyvolána tradičním způsobem definice permeability prostředí μ , která vycházela z původní interpretace zaměřující význam obou polních vektorů $\vec{B}$ a $\vec{H}$; viz též pozn. 19). Zavedení vektorů $\vec{P}$ a $\vec{M}$

- Skutečnost, že ve shodě s Faradayovými představami se elektromagnetické pole stává nositelem a původcem elektrických a magnetických jevů včetně silového působení ve smyslu mechaniky, vede k závěru, že pole je i nositelem energie. Má tedy schopnost vykonávat práci, což je názorně potvrzeno i konstrukcí dynama a jiných elektrických a elektromagnetických strojů. Z Maxwellových rovnic lze pro tuto energii odvodit i zákon zachování energie (Poyntingova věta- viz např. [10]).

- Mluvíme-li o vyzářené energii v souvislosti s elektromagnetickým polem, tak jak nás k tomu vede např. tato Poyntingova věta, napadne nás přirozená otázka o formě tohoto vyzářování. Již Maxwell věděl, že jeho rovnice mají řešení ve tvaru vln šířících se prostorem. Jeho představy o jejich podstatě byly v té době ovšem poněkud mlhavé, neboť byly svázány s vsudypřítomným éterem: domníval se, že jde o napětí mechanické povahy šířící se v tomto éteru. Přesto se stal autorem první elektromagnetické teorie světla opírající se o jeho rovnice; vyzářovaná energie je podle ní i podle pozdějších názorů totožná s energií elektromagnetických vln. Později se elektromagnetickými vlnami podrobně zabýval především Heinrich Hertz (1857 – 1894); dokázal brilantně propojovat teorii s experimentem, zabýval se podrobně řešeními Maxwellových rovnic v dynamickém režimu (Hertzův dipól) a jeho základní pokusy s šířením elektromagnetických vln ve volném prostoru vyjasnily definitivně úlohu rychlosti světla v elektrodynamice. S obdivuhodnou jasnozřivostí H. Hertz tak otevřel cestu nejen k budoucímu rozvoji radiotechniky, ale též, nevědomky, i k elektronové teorii.

Co znamenala Ampèrova a Maxwellova elektrodynamika pro magnetismus

Záměrně zde uvádím Ampérovo jméno na prvním místě, neboť jím objevené a matematicky vyjádřené vztahy mezi elektrickým proudem a magnetickými silami tvoří ten základní milník na cestě za poznáním původu magnetismu²⁶. To ovšem nijak nesnižuje význam Maxwellovy teorie jako takové, která obohatila naše poznání o novou kvalitu – pojem pole, elektrického, magnetického resp. elektromagnetického – a překonala tak fyzikálně těžko udržitelnou představu o silovém působení na dálku, kterou ještě zastával Ampère. Navíc teprve tato nová teorie dokázala popsat magnetické jevy z hlediska jediné společné teorie zahrnující elektřinu i magnetismus a tím ukončila éru dohadů o vzájemném vztahu obou: Magnetismus je díky ní definitivně zakotven spolu s elektřinou ve společné oblasti elektromagnetických jevů. Že tím ještě nepadlo konečné slovo o samé podstatě magnetismu, ukážeme později.

I když je v Maxwellově teorii elektrický proud považován za zdroj magnetického pole a magnetismus tedy za jeho jakýsi průvodní jev – mohli bychom říci, že magnetické pole a elektrický proud jsou dvě strany téže mince – přesto tu zůstává magnetismus *de facto rovnocenný* s elektřinou. V případě elektrostatiky či magnetostatiky pak lze – jak jsme naznačili již dříve – soustavu Maxwellových rovnic separovat tak, že každá rovnice obsahuje jen vektory elektrického, nebo naopak magnetického pole. Kromě toho nejsou Maxwellovy rovnice ani v rozporu s existencí magnetů, případně zmagnetovaného látkového prostředí a

je důležité pro feroelektrika a zejména feromagnetika, neboť umožňuje zahrnout trvale elektricky polarizované nebo zmagnetované prostředí, tedy permanentní magnety, do teorie jako *zdroje* magnetického pole.

²⁶ Od Ampèra pochází i samotný pojem *elektrodynamika*. Je to patrné už z názvu jeho základního díla, shrnujícího výsledky z let 1820-1825: *Memoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience*, Paris 1826; zároveň v tomto názvu Ampère zdůrazňuje, že prezentované výsledky jsou odvozeny výlučně z experimentů.

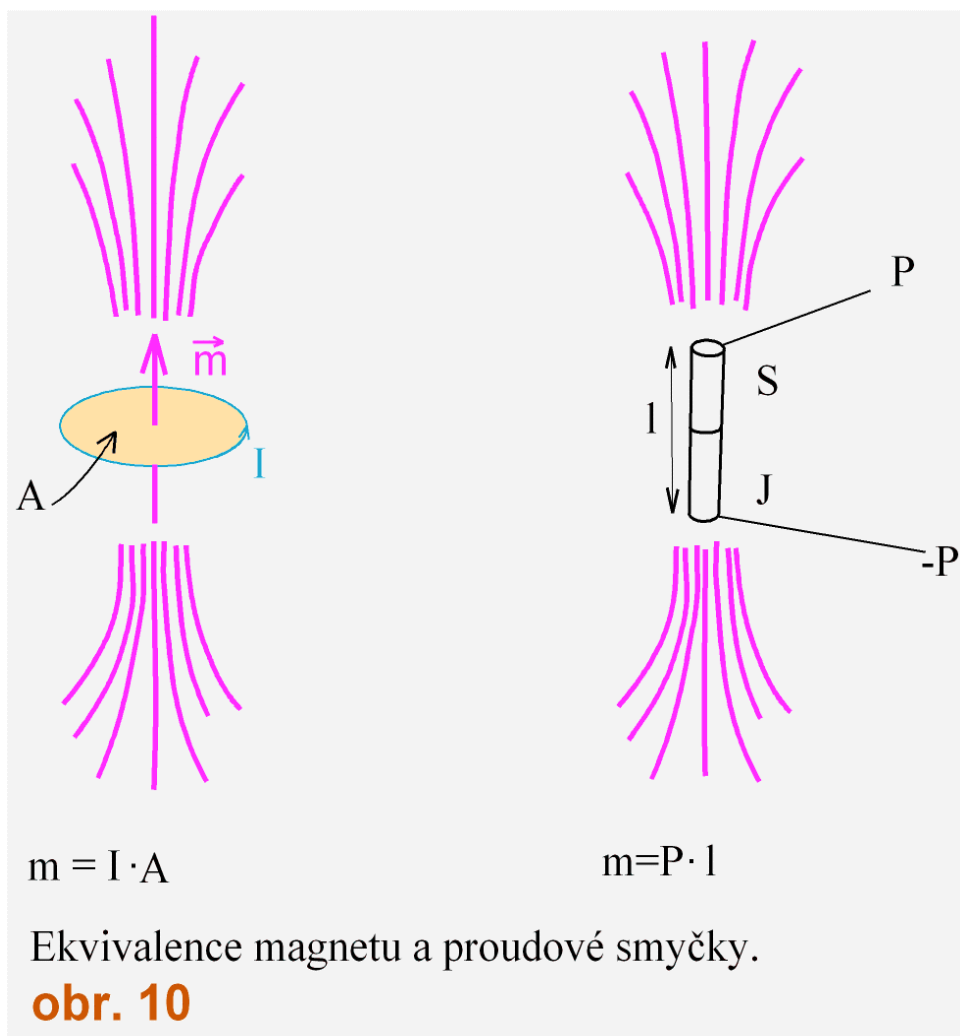
Lze je i v takových případech použít.²⁷ Maxwellovy rovnice se takto staly základem pro řešení nejrůznějších technicky důležitých obvodů, které obsahují elektrické i magnetické prvky a sehrály tak důležitou roli v rozvoji celé moderní elektrotechniky.

Ale vraťme se ještě krátce k magnetismu a Ampèrovi. Přínosem velikého dosahu byla jím zavedená nová definice magnetické síly, tentokrát nikoliv na základě vzájemného silového působení mezi magnety, resp. jejich póly, nýbrž mezi vodiči protékanými elektrickým proudem. To umožnilo nové konstrukce měřicích přístrojů a rychlý rozvoj experimentálních a měřicích metod, nejen v magnetismu, ale i v elektřině samé.

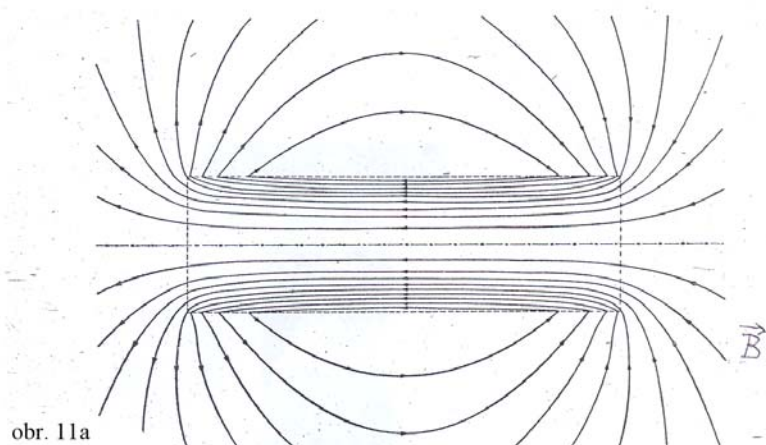
S tím nepřímo souvisí i zavedení magnetického momentu jako základní charakteristiky zmagnetované látky a jeho elektrického analogu – proudové smyčky. Jak ukázal Ampère, je totiž magnetické pole proudové smyčky ve větších vzdálenostech od ní shodné s polem tyčového magnetu, který umístíme do stejného místa tak, aby směřoval kolmo k rovině smyčky (obr. 10). Definujeme-li *magnetický moment smyčky* jako vektor velikosti $\text{proud} \times \text{plocha smyčky}$, $m = A \cdot I$, bude tento moment roven momentu (přesněji dipólovému momentu) tyčového magnetu $P \cdot l$, kde P je magnetická pólová mohutnost (viz pozn. 12) a l vzdálenost pólů magnetu.²⁸ Celkem snadno se dá ukázat, že obě veličiny, magnetický moment smyčky i moment magnetu, mají stejný rozměr a že tedy jejich ekvivalence je i fyzikálně oprávněná.

²⁷ Vzniká pouze jedna komplikace: obsahuje-li systém např. permanentní magnet, bude uvnitř něj i v jeho okolí existovat magnetické pole ($\vec{B} \neq 0$, $\vec{H} \neq 0$) a podle předešlého je namístě se ptát, kde že je ten elektrický proud, který jej doprovází. Ampère, jak už jsme se dříve zmínili, se snažil připsat vznik magnetizace v látce existenci jakýchsi molekulárních proudů. Kdybychom tuto hypotézu doslova přijali, měl by, jak se dá ukázat, téci na povrchu magnetu uzavřený plošný elektrický proud. Nic takového se ovšem nepozoruje. Kde je tedy chyba? Aniž bychom šli hlouběji do problému, který přesahuje rámec klasické fyziky, do které Maxwellova teorie nutně spadá, lze pochopit, že předpokládané „molekulární“ proudy jsou vnitřním jevem spojeným s atomovou strukturou a jeho nositelé (elektrony) nemohou se zpravidla volně látkou pohybovat. Může tedy jít o proudy čistě lokální a tak jako v elektricky nevodivých látkách mluvíme o vázaných el. nábojích, podobně můžeme tyto vnitřní proudy, které by v úhrnu měly vytvářet povrchový proud, považovat za proudy *vázané*. Tyto proudy nelze sice obvyklými způsoby zjistit, nevycházejí např. Jouleovo teplo, ale Maxwellova teorie je vnímá, i když je odlišuje od proudů galvanických.

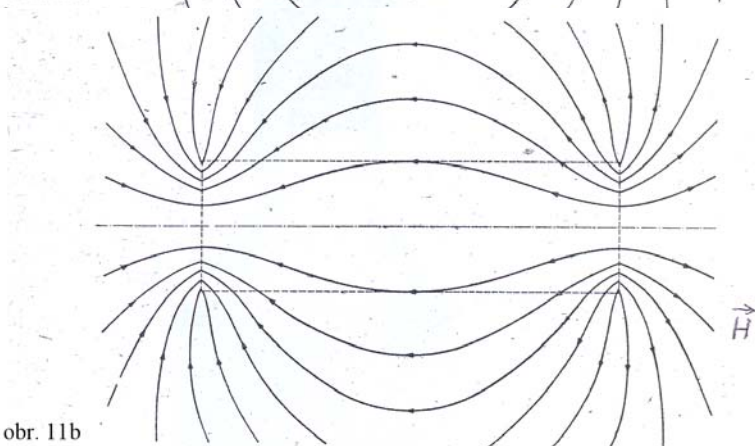
²⁸ Slovo magnetický moment naznačuje, že jde o veličinu určující moment síly, působící na magnetický dipól (tj. magnet resp. proudovou smyčku) v homogenním magnetickém poli, je-li tento dipól vychýlen ze svého stabilního směru.



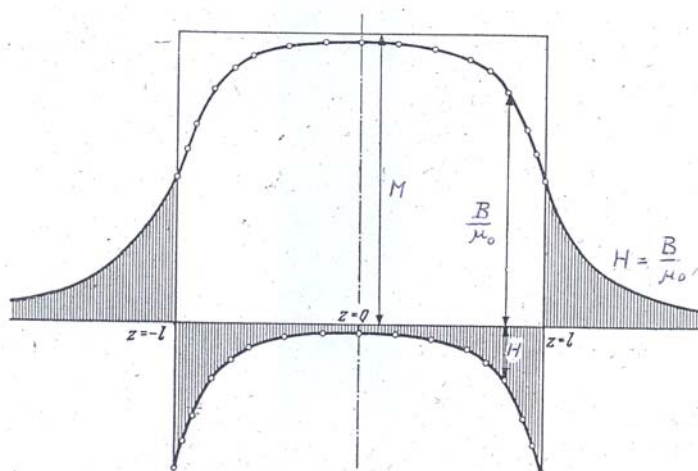
V komentáři k Maxwellovým rovnicím jsme se zmínili, jak lze do systému vektorů popisujících elektromagnetické pole zavést magnetizaci látky vztahem $\vec{B}/\mu_0 = \vec{H} + \vec{M}$; $\vec{M}$ přitom chápeme jako příspěvek látky (tj. magneticky polarizované nebo krátce zmagnetované) k celkovému magnetickému „vzbuzení“. Zatímco magnetická síla pole určená vektorem $\vec{B}$ do látky vstupuje spojitě, bez skokových změn, přítomnost pólů na povrchu zmagnetované látky (např. u permanentního magnetu) vyvolává nutně změnu vektoru $\vec{H}$, který, jak jsme opakovaně zdůrazňovali, charakterizuje magnetické pole v daném místě pomocí zdrojů, které ho vyvolávají – tedy včetně magnetizace látky. Rozdílné chování vektorů $\vec{B}$, $\vec{H}$ a $\vec{M}$ v okolí tyčového magnetu a uvnitř něj je ukázáno na obr. 11.



obr. 11a



obr. 11b



obr. 11c

Obr. 11 Pole homogenního tyčového magnetu. Vektor $\vec{B}$, tj. magnetická síla, probíhá všude spojitě, tedy i na koncích (tj. pólech) magnetu, a odpovídající síločáry jsou jakoby vtahovány do magnetu a zhušťují se v něm (a). Naopak čáry znázorňující magnetické vzbuzení $\vec{H}$ jsou na pólech nespojitě a jsou z magnetu jakoby vytlačovány (b). Póly magnetu tedy zdánlivě nesou magnetický náboj, jeden kladný a druhý záporný, a tyto „náboje“ působí uvnitř magnetu demagnetizační silou. Situace je dobře patrna z obrázku (c), který graficky znázorňuje průběh velikosti vektorů $\vec{B}/\mu_0$, $\vec{H}$ a $\vec{M}$ podél osy magnetu z. (Podle Sommerfelda [10]).

Ale o to nám tu ani příliš nejde. Chtěl bych spíš ukázat, jak tato formálně zavedená veličina $\vec{M}$ souvisí se skutečným magnetickým stavem látky: ukázali jsme si, jak podle Ampèra lze každému magnetu přisoudit určitý magnetický moment. Platí to v makroskopickém měřítku – tedy např. pro takový magnet jako celek²⁹, ale i pro každou jeho i mikroskopickou část (molekulární či atomový „magnet“). Jestli tedy sečteme tyto momenty v nějakém objemu látky a dělíme výsledný magnetický moment velikostí tohoto objemu, dostaneme magnetický moment v přepočtu na jednotku objemu. Zvolíme-li za tento objem malé okolí určitého bodu, dostáváme něco, co můžeme nazvat *lokální hustotou* magnetického momentu v tomto bodě. Vzpomeneme-li na význam různých veličin používaných v Maxwellových rovnicích – jako hustota elektrického náboje ρ , hustota elektrického proudu $\vec{i}$ – snadno nahlédneme, že hustota magnetického momentu není nic jiného, než magnetizace $\vec{M}$ vztažená k určitému bodu pole.

Závěrem tohoto odstavce:

I když elektrodynamika ve své konečné Maxwellově podobě vytvořila konzistentní a dosud platnou teorii pro náš běžný život, která adekvátním způsobem popisuje elektrické a magnetické jevy z makroskopického pohledu a která definicí základních veličin a formulací jejich vzájemných vztahů neobyčejně posunula naše vnímání magnetismu, je třeba zvláště zdůraznit i její význam jako historického mezníku ve složitém procesu vytváření moderní vědy.

Zmíňme alespoň některé na ni navazující kroky resp. oblasti, které se vztahují k předmětu této přednášky:

- objev elektronu, elektronová teorie, atomistika
- teorie relativity, objev spinu
- kvantová mechanika, kvantová elektrodynamika
- teorie elementárních částic

Některých nových skutečností, které završily složitou cestu za poznáním magnetismu, si blíže všimneme v následujících dvou kapitolách.

III. VE SVĚTLE NOVÝCH OBJEVŮ

Není nadsázkou řekneme-li, že Maxwellovou teorií elektromagnetického pole vrcholí éra tzv. *klasické fyziky*. V 2. polovině 19. století tak spolu s Newtonovou mechanikou a termodynamikou umožnila vytvářet ucelený obraz fyzikálního dění kolem nás, ve kterém hmotné prostředí, předměty a jevy na nich pozorované byly chápány jako spojitě v prostoru i čase, ovšem bez možnosti vidět hlouběji do jejich mikroskopické struktury. Maxwellova elektrodynamika ovšem navíc zavedla nový progresivní pojem *pole* jakožto vlastního nositele fyzikálních jevů. Dokázala tím od sebe oddělit jevy samotné od zdrojů těchto polí a tím naznačila cestu pro další pokrok, totiž úsilí po hlubším pochopení zdrojů samých. Pro úplnost ještě dodejme, že v této době – mluvíme stále ještě o 2. polovině 19. století – existovalo již

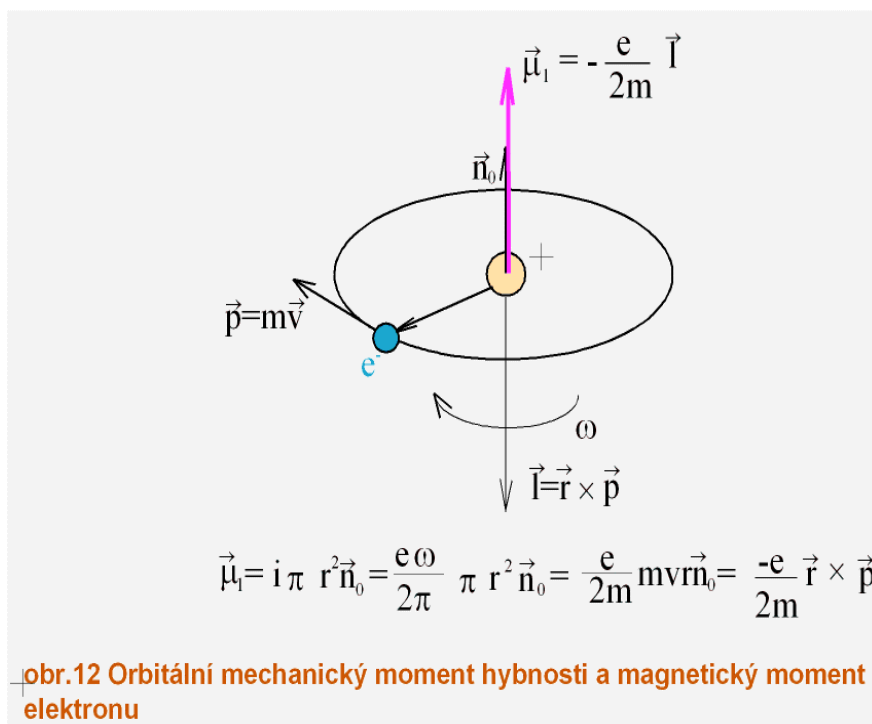
²⁹ Viz pozn. (26) a (27). Asi nyní lépe pochopíme jaký je význam tzv. vázaného elektrického proudu: že jde o jistou modelovou představu vztahující se k magnetickému stavu látky a jeho *makroskopickému* popisu, která si nečiní nárok na skutečné vystižení mikroskopických (atomárních) dějů vedoucích ke zmagnetování látky.

mnoho poznatků a dokonce celé vědní oblasti a disciplíny, které tento klasický rámec makroskopické fyziky překračovaly; např. představy o atomové a molekulární struktuře hmoty zde byly již dlouho a v této době již dosáhly značně konkrétních obrysů - Mendělejeva periodická soustava prvků byla publikována v r. 1869, kinetická teorie plynů a základy statistické fyziky s ní spojené byly vypracovány Maxwellem a Boltzmannem zhruba ve stejné době a bezprostřední význam pro pochopení struktury látek měly pak zejména Faradayovy výsledky studia chemických účinků elektrického proudu (elektrolýza) a pozdější zkoumání elektrických výbojů ve zředěných plynech.

Objev elektronu

Maxwellova teorie zná explicitně jen jeden zdroj elektromagnetického pole a tím je elektrický náboj, ať už statický (elektrická síla) nebo pohybující se, tj. elektrický proud (jako zdroj magnetické síly). Již Faraday (a s ním zřejmě i Maxwell) tušili, že elektrina je diskrétní a že existuje v určitých „kvantech“, avšak konečnou odpověď dalo až objevení elektronu, částice s nábojem $e = -1,26 \cdot 10^{-19}$ Coulombu a o hmotnosti (klidové) $m = 9,11 \cdot 10^{-28}$ gramu. Cesta k tomuto objevu nebyla ani rychlá, ani přímá a od prvního konkrétního návrhu G.J. Stoneye v r. 1874 uplynulo čtvrt století, než byla existence elektronu potvrzena studiem katodových paprsků a posvěcena Mezinárodním fyzikálním kongresem v Paříži r. 1900 [14].

A co kladná elektrina? Objasnění přišlo až poněkud později. Byla sice známa existence kladně nabitých iontů, ale co je vlastním nositelem těchto kladných nábojů se podařilo objasnit až později, počátkem 20. století po objevení radioaktivity a radioaktivního rozpadu. Průlom učinil Ernest Rutherford (1871-1931), když vyvrátil starší představy podle nichž měly být v atomech kladné a záporné náboje promíchány, což mělo zaručovat jejich elektroneutralitu, a ve své „Teorii struktury atomových jader“ (1911) na základě pokusů s rozptylem α - částic (dvakrát ionizované atomy helia He^{++}) v tenké kovové folii ukázal, že rozměr atomového jádra, ve kterém je soustředěna téměř celá hmotnost atomu, je mnohem menší, než odpovídá velikosti celého atomu. Kolem tohoto kladně elektricky nabitého jádra pak krouží elektrony nesoucí záporný náboj a vytvářejí tak *obal* atomu, který je příčinou jeho velkého rozměru v porovnání s jádrem. To je tedy představa již velmi blízká našemu dnešnímu pohledu. Konkrétní podoby tím nabývají i Ampèrovy „molekulární proudy“. Připomeňme ještě, že elektron je hmotná částice, a tedy při obíhání po uzavřené, pro jednoduchost řekněme kruhové, dráze nabývá určitého mechanického momentu hybnosti (*impulsmoment*). Na obr. 12 je ukázáno, jak elektrický proud, který vzniká v důsledku takového pohybu, je doprovázen magnetickým (orbitálním) momentem; přitom oba, moment hybnosti $\vec{l}$ a moment magnetický $\vec{m}$ jsou si vzájemně úměrné a vzhledem k zápornému znaménku elektronu mají opačnou orientaci. Poznamenejme, že tato představa o vzniku orbitálního magnetického momentu zůstává *v principu* zachována až do nynější doby, ovládané kvantovou fyzikou.



Vrátíme-li se však k otázce úlohy kladných nábojů soustředěných v jádrech atomů, lze říci, že v první řadě zajišťují rovnováhu mezi záporně nabitými elektrony a kladnými jádry, a to i v mikroskopickém, atomárním měřítku. Při narušení této rovnováhy by vznikly ohromné elektrické síly, které by mohly způsobit totální destrukci látky a v konečném důsledku patrně i celého hmotného světa. Za zmínku ovšem stojí, že tzv. statická elektřina, která vzniká mechanickým třením některých látek, je vlastně mechanickým kontaktem uměle vyvolané porušení této rovnováhy na jejich povrchu. Přečtením omezeného počtu elektronů z jednoho povrchu na druhý vznikne na nich jejich nadbytek resp. nedostatek a povrch se stává elektricky nabitý, kladně nebo záporně. Dotčena je ovšem jenom povrchová vrstva těchto látek a proto je výsledný efekt slabý a v žádném případě není ani „katastrofický“. Naopak rovnováha mezi náboji má za následek, že většina nábojů v látce je nějakým způsobem lokalizována. Výsledkem je stabilita a tvrdost látky. Pokud jde o magnetismus, pak alespoň v pevném skupenství jsou kladné náboje v jádrech atomů prakticky nepohyblivé, nevytvářejí elektrický proud a tudíž nepřispívají v Ampèrově smyslu ani ke vzniku magnetických sil – alespoň u hmotných objektů, které jsou v klidu.³⁰

Elektrony jsou tedy, alespoň v pevných látkách, až na nepatrné výjimky jedinými významnými nositeli elektrických nábojů schopnými vyvolat elektrický proud. Jsou i hlavními nositeli magnetických vlastností, a to jak díky svému orbitálnímu pohybu v okolí atomových jader, tak i vzhledem k existenci vlastního spinového magnetického momentu, o němž bude řeč za chvíli.

Lorentzova elektronová teorie

Objev elektronu, pokroky v poznávání atomů jako základních stavebních kamenů látek, studium spekter molekul, atomů a iontů a řada dalších poznatků získaných zejména na pomezí mezi fyzikou a chemií nejen definovaly „zdroje“ elektromagnetických sil a polí

³⁰ Úmyslně zde nehovoříme o tom, že tak jako elektrony mají i jádra některých atomů vlastní *spinový* magnetický moment, který je ovšem – ve srovnání s magnetickým momentem elektronů – zpravidla velmi malý.

Maxwellovy elektrodynamiky, ale zároveň naznačovaly, jak významnou roli hrají zejména elektrony ve struktuře a chování látek, včetně atomů samých. Proto již na přelomu 19. a 20. století vyvstala potřeba aplikovat zákony elektromagnetismu, resp. rozšířit jejich platnost, do oblasti mikrosvětla atomů a molekul. Základní práci v tomto směru vykonal holandský teoretický fyzik Henrik Antoon Lorentz (1853-1928). Podnětem byl objev štěpení čar spekter žhavých plynů a par vystavených působení magnetického pole učiněný r. 1896 Lorentzovým žákem Pietrem Zeemanem (1865-1943). Jev byl později po něm nazván (Zeemanův jev) a sehrál velmi důležitou roli při objasňování struktury atomů (resp. jejich elektronového obalu). Poněvadž současné představy o atomech selhávaly při pokusech o vysvětlení Zeemanova jevu, Lorentz zde aplikoval Maxwellovu teorii elektromagnetismu, kterou poněkud přizpůsobil situaci, v níž jsou elektrony nositeli elektřiny a hlavními aktéry:

- vše se odehrává ve vakuu $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_0 \rightarrow$ stačí uvažovat dva vektory pro elektromagnetické pole: $\vec{E}$ a $\vec{B}$
- místo elektrického proudu resp. proudové hustoty $\rightarrow$ pohybující se elektron (náboj $-e$, hmotnost m , rychlost $\vec{v}$); podobně lze uvažovat i jiné elektricky nabitě částice.
- používá se nová formulace pro úhrnnou (elektrickou + magnetickou) sílu působící na elektron (**Lorentzova síla**),

$$\vec{F}_L = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}).$$

Výsledek Lorentzovy analýzy Zeemanova jevu byl kvalitativně správný; ukázal na existenci magnetického momentu, s nímž je pohyb elektronu spojen a který byl interpretován ve smyslu Ampèrově (obr. 10). Tento magnetický moment interaguje s magnetickým polem a může tak skutečně vyvolat podobný efekt. Kvantitativní shody s pozorovaným rozštěpením čar magnetickým polem však bylo dosaženo až když byl vzat v úvahu *spinový* moment elektronu – ovšem až po jeho objevení po dalších více než 20 letech.

Ve své zobecněné podobě (1895 [15]), představuje Lorentzova teorie obecnou bázi pro celou elektrodynamiku; s udivující jasnoživostí tu její autor důsledně užíval formulací, které ob stojí i ve světle pozdější Einsteinovy teorie speciální relativity (1905) a vytvořil tak pro ni půdu, i když zřejmě zcela intuitivně.³¹

Relativita a magnetismus

Podrobné zkoumání cest, které vedly od Lorentzovy elektronové teorie k Einsteinově teorii speciální relativity by bylo jistě velmi zajímavým tématem samo o sobě, zavedlo by nás však značně daleko od předmětu našeho vyprávění. Omezím se proto jen na několik poznámek.

Jak už jsme se zmínili, Maxwell i Lorentz se při svých úvahách vždy opírali o existenci éteru. Éter měl vyplňovat celý vesmír, byl neviditelný, nevažitelný, ale byl obdařen podivuhodnou vlastností: byl nositelem dějů spojených s existencí elektromagnetických polí, zejména se *šířením* elektromagnetických rozruchů. Mluvílo se proto o éteru elektromagnetickém resp. optickém. Původní pokusy Maxwellovy a dalších vysvětlovat tento přenos určitým, v podstatě mechanickým napětím šířícím se éterem byly Lorentzem a jeho vrstevníky ovšem opuštěny a

³¹ Stojí za zmínku, že základní Einsteinova práce o speciální relativitě má název „O elektrodynamice pohybujících se těles“ a slovo relativita se v něm vůbec nevyskytuje.

elektromagnetická pole byla chápána abstraktněji, jako určité fyzikální stavy éteru. Změny polí pak měly představovat změny těchto stavů.

Éter sám měl být v klidu, nepohyblivý, a proto nepřekvapovala skutečnost, že elektromagnetické rozruhy se jím šíří nejen konečnou, ale univerzální, konstantní rychlostí. Vyplývalo to ostatně už z původní Maxwellovy teorie. Měření této rychlosti, její nezávislost na pohybu světelného zdroje a bezvýslednost pokusů, které měly nějakým způsobem určit vzájemnou rychlost éteru vůči různým vesmírným objektům – Země, Slunce, dvojhvězdy – byly hlavním důvodem pro vyslovení *dvou hypotéz*, které se o něco málo později staly důležitou charakteristikou *Einsteinovy speciální relativity*: totiž zpomalování hodin, které jsou v pohybu (*dilatace času*), a zmenšování rozměru těles ve směru jejich pohybu (*kontrakce délek*). To vše se odehrálo ještě koncem 19. století, tedy před formulací Einsteinovy teorie. Dodejme, že nezávislost rychlosti světla (elektromagnetických vln) na pohybu zdroje byla od doby prvních měření Michelsona a Morleye (1887) mnohokrát různými způsoby znovu ověřována, samozřejmě za postupného zvyšování přesnosti měření – prakticky až do současnosti. Výsledek byl vždy stejný:

rychlost světla c je konstantní, nezávisle na pohybu zdroje.

Právě tato poučka tvoří základní empirický postulát Einsteinovy teorie publikované r. 1905. Druhým pak je předpoklad o *konstantnosti elektrického náboje*, který byl obsažen již v Maxwellově elektrodynamice a který lze dnes rovněž považovat za experimentálně ověřený.³² Oba postuláty jsou pak nutným předpokladem k tomu, aby Maxwellovy a Lorentzovy rovnice platily bez omezení ve všech vztažných systémech, i těch které se vzájemně pohybují, ovšem jen konstantní rychlostí. Einstein ve své teorii speciální relativity postulát o konstantnosti rychlosti světla ovšem podpírá podrobným rozбором pojmů prostor, čas a současnost a důmyslně zvolenými myšlenkovými experimenty.

Zjevů, které Einsteinova teorie předpověděla budou pro nás důležité zejména kontrakce délek a dilatace času, o nichž jsme se již dříve zmiňovali. Pomocí nich chceme alespoň kvalitativně objasnit některé změny elektromagnetického pole při pohybu nábojů a přiblížit se tak ke konečnému zodpovězení otázky původu magnetických sil.

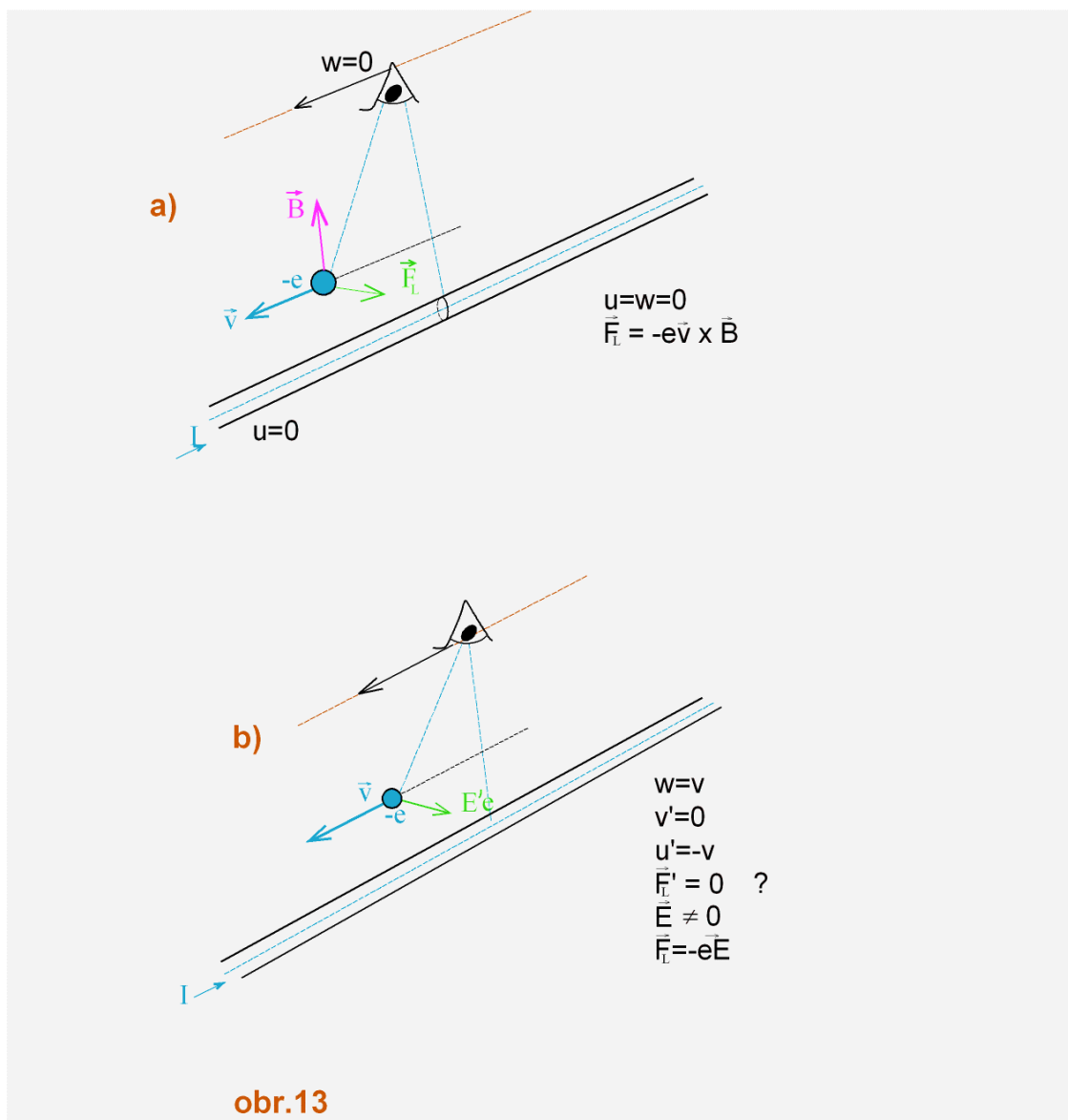
Použijeme k tomu dvou na sebe navazujících myšlenkových experimentů.

Pokus první (obr. 13):

Velmi dlouhý vodič (drát) protékáný elektrickým proudem má ve své blízkosti částici nesoucí elektrický náboj, která se pohybuje konstantní rychlostí v podél vodiče. Může to být např. elektron, v tomto případě bude pohybující se náboj záporný ($-e$) a směr pohybu zvolíme opačný ke směru proudu ve vodiči: potom bude jakýsi druhý „proud“ představovaný pohybujícím se nábojem orientován proti pohybu elektronu, tedy paralelně k proudu ve vodiči.³³

³² Připomeňme, že zachování velikosti elektrického náboje bez ohledu na rychlost, se kterou se pohybuje, je vlastností zcela ojedinělou; neplatí to např. ani o hmotnosti, která se při rychlostech řádově se blížících rychlosti světla výrazně zvětšuje, ani o energii hmotné částice.

³³ Podle staré konvence určuje směr proudu pohyb kladných nábojů – přesto, že jeho nositelem jsou obvykle záporně nabitě elektrony.



a) Představme si nejprve, že vodič je v klidu vůči pozorovateli. Elektron se pak i vůči pozorovateli pohybuje rychlostí $\vec{v}$. Magnetické pole $\vec{B}$, které kolem sebe vytváří vodič protékaný proudem $\vec{I}$ bude na pohybující se náboj $-e$ působit podle Lorentze silou $-e\vec{v} \times \vec{B}$. Poněvadž vodič sám není elektricky nabit (záporné náboje elektronů jsou v něm kompenzovány kladnými náboji jader atomů), je kolem vodiče nulové elektrické pole a magnetická síla bude jedinou silou, která na letící elektron působí. Směr této síly je takový, že elektron je přitahován k vodiči,³⁴ vychýlí se tedy ze své přímočaré dráhy směrem k vodiči, jeho dráha se stane mírně zakřivenou.

b) Nyní si představme, že pozorovatel, nebo nějaký senzor, který ho zastupuje, se pohybuje spolu s nabitou částicí (elektronem), která je tak pro něj v klidu ($v'=0$). Naproti tomu vodič, vůči kterému se nyní pozorovatel pohybuje, se mu bude jevit jako pohybující se, a to se stejnou rychlostí jako se dříve pohybovala částice, ale v opačném směru. Bez ohledu na to, jaké bude v tomto případě magnetické pole $\vec{B}'$ vytvářené pohybujícím se vodičem, musí být síla, kterou $\vec{B}'$ působí na (nyní klidný) náboj $-e$ rovna nule, neboť $v'=0$. Analogicky k

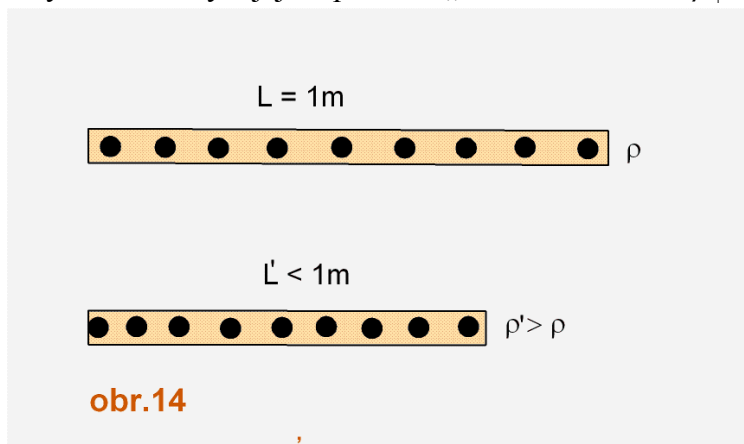
³⁴ Vzpomeňme na Ampèrův pokus s rovnoběžnými vodiči, které se v případě souhlasné orientace obou proudů vzájemně přitahují, v opačném odpuzují (obr. 7d).

předchozímu případu (a) by tedy mělo zdánlivě být $F'_L = 0$. Takže, zůstane náboj v klidu, když na něj nyní žádná magnetická síla nepůsobí? Je to vůbec možné? Nějak cítíme, že nás takový „výsledek“ neuspokojuje. Ale zůstaňme klidní, ve skutečnosti se nic takového nestane! Náš elektron nezůstane stát na místě, ale bude se pohybovat přímo k vodiči, tak jak bychom to podle předešlého uspořádání (klidný vodič i pozorovatel) čekali. Ale jak vysvětlit tento pohyb? Magnetická síla nemůže působit, zbývá tedy jediná možnost: provedenou transformací vztažného systému vznikne elektrické pole, radiálně orientované vůči vodiči, tak jako kdyby byl elektricky nabitý! Hned vysvětlím, kde se toto elektrické pole bere:

Pohybem se vodič protékaný proudem skutečně stává elektricky nabitým a jde o čistě relativistický efekt. Jak jsme již zmínili, vodič obsahuje jak záporné tak kladné náboje. Ty kladné jsou náboje jader atomů a jsou pevně spojeny s krystalovou mřížkou materiálu vodiče. Elektrony, které jsou nositeli záporných nábojů, jsou z části také lokalizovány, pohyblivé zůstávají jen vnější vodivostní elektrony, které zprostředkovávají elektrickou vodivost. Pokud protéká proud, vodivostní elektrony se ve vodiči *pohybují*, a to *proti* směru elektrického proudu³³. Naopak lokalizované vnitřní elektrony vytvářejí spolu s jádry atomů *kladně nabitě ionty*, které pak představují kladné náboje ve vodiči. Pohybuje-li se *celý* vodič vůči pozorovateli, pohybují se tedy s ním stejnou rychlostí i tyto kladné náboje iontů. A nyní přijde ke slovu *relativita* - kontrakce délek při pohybu: Měřil-li by pozorovatel jejich hustotu (např. jejich počet připadající na délku 1 metru vodiče), pak vzhledem k tomu, že úsek vodiče délky 1 m se mu bude jevit jako *zkrácený* v poměru $\sqrt{1 - v^2/c^2} : 1$, musí být hustota pohybujících se nábojů ρ'_+ vztažená k 1 metru, který je v klidu vůči pozorovateli, ve stejném poměru *větší*:

$$\rho'_+ = \rho_+^{(0)} / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

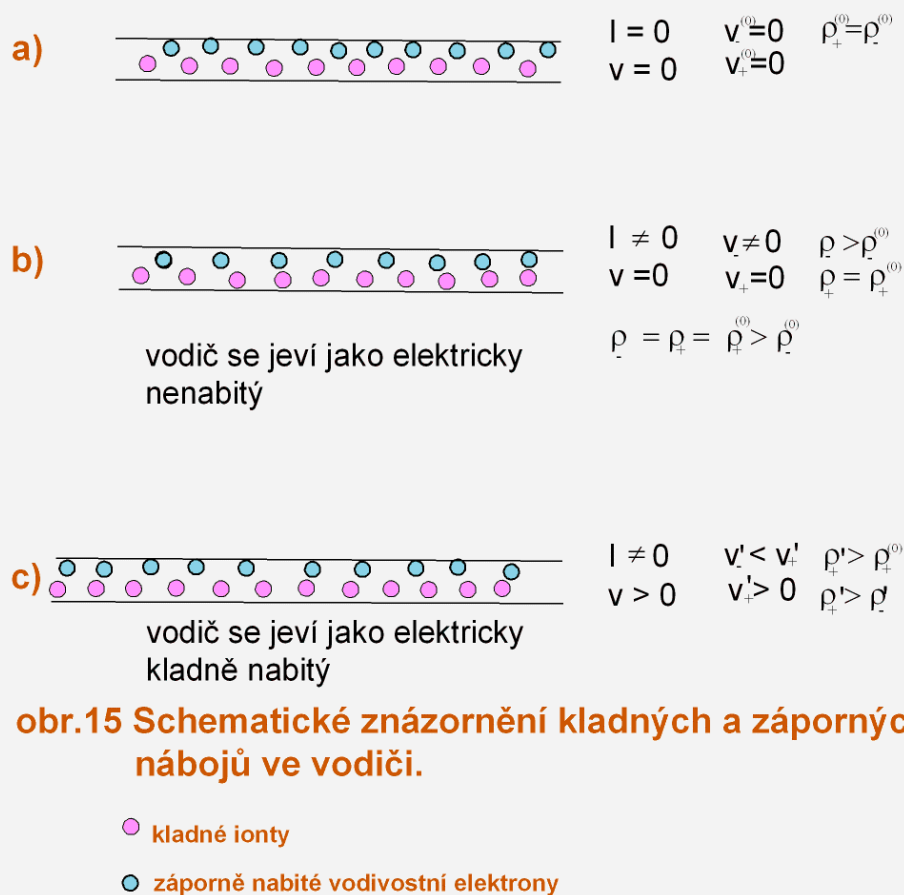
tedy větší než byla jejich původní „klidová“ hustota $\rho_+^{(0)}$ (obr. 14).



Ve hře jsou ovšem i záporné náboje – vodivostní elektrony. Ty se – pokud teče elektrický proud – ve vodiči pohybují. Pohybuje-li se též vodič, vykonávají tyto elektrony vzhledem ke klidnému pozorovateli vlastně dvojí pohyb současně, podobně jako když stojící pozorovatel sleduje osoby procházející vagonem jedoucího vlaku. V našem případě (obr. 13b) probíhají oba pohyby navzájem v opačném směru. Označíme-li směr pohybu celého vodiče jako kladný, bude pro rychlosti kladných a záporných nábojů platit vždy nerovnost $v'_+ > v'_- > v_-$, kde jsme jako v_- označili rychlost elektronů v *nepohybujícím* se vodiči. Bude tedy vždy, pokud *teče elektrický proud*, $v_- < 0$, zatímco analogická rychlost kladných nábojů musí být vždy nulová ($v_+ = 0$). Je zajímavé a v tom je podstata problému – že pozorovatel, vůči němuž je vodič protékaný proudem v klidu, by zjistil, že hustota vodivostních elektronů,

tedy záporných nábojů, ρ_- je větší, než kdyby byly vůči němu elektrony v klidu (tj. neteče-li elektrický proud) a to ze stejných důvodů jako v předešlém případě pohybujících se kladných nábojů. Označíme-li hustotu *nepohybujících* se elektronů jako $\rho_-^{(0)}$, musí tedy platit $\rho_- > \rho_-^{(0)}$. Ale poněvadž se pozorovateli jeví vodič, který je vůči němu v klidu, jako *elektricky neutrální*, tedy nenabitý, musí v něm být kladné a záporné náboje v rovnováze, tj. musí zároveň platit $\rho_- = \rho_+ = \rho_+^{(0)}$ a tedy $\rho_+^{(0)} > \rho_-^{(0)}$. Jinými slovy, *pokud teče elektrický proud, je ve hře více nábojů kladných než záporných*.

Tato nerovnost zůstane zachována i při pohybu vodiče: zvyšujeme-li totiž postupně rychlost pohybu vodiče vůči pozorovateli (tedy při jakémsi rozjíždění), bude pozorovaná hustota elektronů ρ'_- nejprve klesat, neboť se zmenšuje *absolutní hodnota* jejich rychlosti vůči pozorovateli, a bude klesat tak dlouho, až dosáhne minima (při $v_- = 0$). Současně však pozorovatel zjišťuje nárůst hustoty kladných nábojů ρ'_+ , takže určitě bude pro nábojové hustoty zjištěné pozorovatelem stále platit $\rho'_+ > \rho'_-$ přesto, že při nepohybujícím se vodiči bylo $\rho_+ = \rho_-$. Vodič se pohybem stává pro pozorovatele elektricky kladně nabitým a na tom nic nezmění ani další zvyšování rychlosti. Celá tato úvaha je schematicky znázorněna na obr. 15.



- a) vodičem neprotéká elektrický proud ($I = 0$) a zároveň je vodič v klidu vůči pozorovateli ($v = 0$): v klidu jsou pak jak kladné ionty, tak vodivostní elektrony ($v_+^{(0)} = v_-^{(0)} = 0$); poněvadž je vodič elektricky neutrální (nenabitý), musí být jejich hustoty sobě rovné ($\rho_+^{(0)} = \rho_-^{(0)}$)

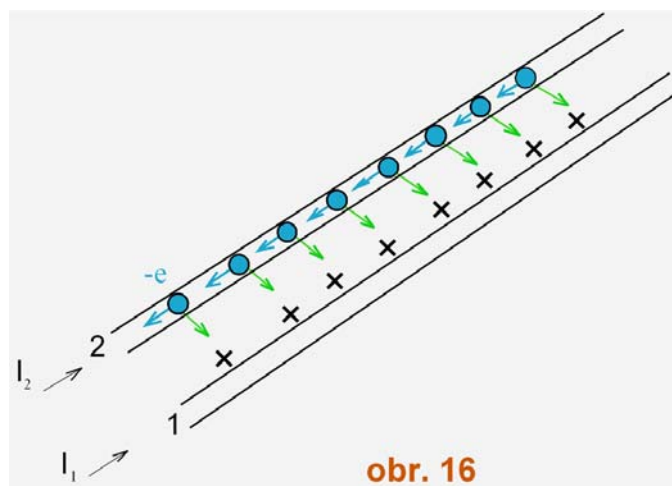
- b) po zapnutí proudu ($I > 0$) je jedinou změnou *pohyb* vodivostních elektronů ($v_- < 0$); aby pro pozorovatele v klidu zůstal vodič elektricky nenabitý, musí poklesnout jejich hustota ρ_- ($\rho_- < \rho_-^{(0)}$), a to ze stejných důvodů jako v obr. 14. Vodič je však stále elektricky nenabitý ($\rho_- = \rho_+$) a proto je celkový počet vodivostních elektronů po zapnutí proudu ve skutečnosti menší než počet kladných iontů ($\rho_-^{(0)} < \rho_+^{(0)}$)
- c) při pohybu vodiče vůči pozorovateli ve směru proudu ($I > 0$, $v > 0$) zůstávají vodivostní elektrony relativně v opačném pohybu vůči kladným iontům; současně jsou však unášeny celým vodičem ve směru proudu a proto bude jejich rychlost zjištěna pozorovatelem vždy menší než rychlost kladných iontů ($v'_- < v'_+$). Z toho důvodu bude i jejich hustota menší než hustota kladných iontů ($\rho'_- < \rho'_+$) a vodič bude elektricky kladně nabitý.

Dá se rovněž ukázat, že v případě obráceného směru proudu (směr proudu je pak shodný se směrem pohybu náboje $-e$) převládne naopak vliv záporných nábojů ve vodiči a ten se stává pro pozorovatele pohybujícího se spolu s nábojem *záporně* nabitým. Elektrická síla na tento náboj působící bude pak samozřejmě odpuzivá, stejně jako byla i magnetická síla, kterou zjistí pozorovatel, který je stejně jako vodič v klidu (nezapomeňme, že proud teče nyní obráceným směrem).

Připomeňme ještě důležitou okolnost, že v naší úvaze bylo mlčky použito i druhého základního postulátu teorie relativity, konstantnosti elektrických nábojů a nezávislosti jejich velikosti na rychlosti.

Druhý pokus:

Dva rovnoběžné vodiče jsou protékány proudem velikosti I_1 , I_2 , a to shodným směrem (obr. 16). Vodiče jsou vzájemně i vůči laboratoři v klidu. Podle Ampèra jsou tyto vodiče k sobě přitahovány magnetickou silou úměrnou součinu $I_1 I_2$. Ptáme se, jaké síly mezi vodiči budou působit z hlediska relativity. V každém z obou vodičů existují kladné a záporné náboje (kladné ionty resp. záporné elektrony). Zatímco kladné náboje jsou ve vodičích lokalizovány, vodivostní elektrony se pohybují a jsou nositeli elektrického proudu (srov. pozn. 32). Situace je zcela analogická prvnímu pokusu: máme vodič protékáný proudem, jen místo jedné částice pohybující se podél něj je zde celý další vodič, obsahující takových nábojů velké množství. Připomeňme, že ten *druhý vodič sám* zůstává v klidu. Výsledná síla, která působí na tento druhý vodič pak nebude ničím jiným, než součtem sil působících na jednotlivé elektrické náboje v něm. Kladné náboje obou vodičů jsou nepohyblivé, v klidu vůči laboratoři i pozorovateli v ní sedícímu; jejich hustota je proto konstantní – nedochází k žádné relativistické kontrakci délky. Kladné náboje druhého vodiče „vidí“ tedy první vodič jako elektricky neutrální a žádná síla na ně nepůsobí. Naopak pohybujícím se záporně nabitým elektronům – jak víme z prvního pokusu – jeví se první vodič jako *kladně* nabitý a jsou tedy přitahovány elektrickou silou úměrnou tomuto „relativistickému“ náboji. Celková síla na druhý vodič bude dána součtem sil na všechny pohybující se elektrony a bude tedy úměrná proudu I_2 . Ale poněvadž kladný náboj prvního vodiče, který jsme označili jako „relativistický“, je zřejmě úměrný celkovému množství nábojů v tomto prvním vodiči, tedy i proudu I_1 , bude celková *přitažlivá* síla mezi oběma vodiči úměrná součinu obou proudů $I_1 I_2$.



Obr. 16 Každý vodivostní elektron pohybující se ve vodiči 2 je přitahován relativistickou silou k vodiči 1, který je pro něj kladně nabitý. Obráceně toto platí i pro vodivostní elektrony ve vodiči 1 ve vztahu k vodiči 2. Celková přitažlivá síla mezi oběma vodiči je rovna součtu sil na jednotlivé elektrony a je úměrná výrazu $2I_1 I_2$.

Dospěli jsme k výsledku, který je formálně shodný s Ampérovým zákonem o magnetickém silovém působení mezi vodiči. Předchozí analýza prvního pokusu, kdy síla původně identifikovaná jako magnetická se přeměnila na elektrickou, ukazuje, že tato shoda není nahodilá; podrobnější *kvantitativní* rozbor pak dosvědčuje, že původní Ampèrova magnetická síla je skutečně totožná s tou, která vyplynula z našeho druhého myšlenkového pokusu.

Opět se dá snadno ukázat, že obdobný výsledek lze získat i v případě kdy oběma vodiči protékají proudy v *navzájem opačném směru*; pouze bude výsledná síla *odpudivá*. Navíc, a to je důležité pro obecnou platnost závěrů plynoucích z uvedených pokusů, výsledky zůstanou v platnosti i tehdy, když klasické kovové vodiče nahradíme jinou látkou či prostředím, které přenáší elektrický náboj; mohou to být i takové vodiče, v nichž se pohybují jak záporné, tak i kladné náboje (např. elektrolyty či iontové plasma).

Závěrem: Co tedy znamená teorie speciální relativity pro námi sledovaný problém vzniku magnetismu a magnetických sil? Velmi mnoho – posunuje nás téměř k cíli: Ukazuje, že to, co označujeme výrazem *magnetická síla*, je ve své podstatě *relativistickým efektem* spojeným s pohybem elektrických nábojů. Není totiž ničím jiným než relativistickou korekcí elektrické síly, která působí mezi těmito náboji, a elektrické náboje jsou tedy zdrojem elektrických i *magnetických* sil a tyto druhé jsou svojí podstatou totožné s prvými. Proto i v Lorentzově výrazu pro sílu, která působí na elektron v *elektromagnetickém* poli,

$$\vec{F} = e\vec{E} + (e\vec{v} \times \vec{B})$$

je druhý - „magnetický“- člen, obsahující $\vec{B}$, závislý na rychlosti elektronu, jen *relativistickou korekcí k prvému „elektrickému“*.

A co tedy ještě zbývá: především vysvětlit původ magnetismu v látkách, jevu který zřejmě souvisí se strukturou atomů a způsobem, jakým jsou zabudovány v látce. Odpověď na to mohla dát až kvantová fyzika, pro kterou sám Planck, Einstein a další již počátkem 20. století začali připravovat půdu. Velkou ne-li klíčovou roli zde sehrál objev spinu elektronu,

k jehož vysvětlení bylo třeba spojit kvantovou mechaniku s teorií relativity. O tom v příští kapitole.

IV. VE SVĚTĚ KVANTOVÉ FYZIKY

Od samého počátku 20. století se celá fyzika dostává do prudkého pohybu. S novými a přesnějšími experimentálními výsledky se objevují i nové a často revoluční myšlenky a představy. Hlavní pozornost se upíná ke světu atomů a jevům, které umožňují do něj nahlédnout a poskytují o něm přímé informace. Takovou oblastí zájmu jsou např. atomová spektra a vše co s nimi souvisí.

Kvantová hypotéza a vznik kvantové fyziky

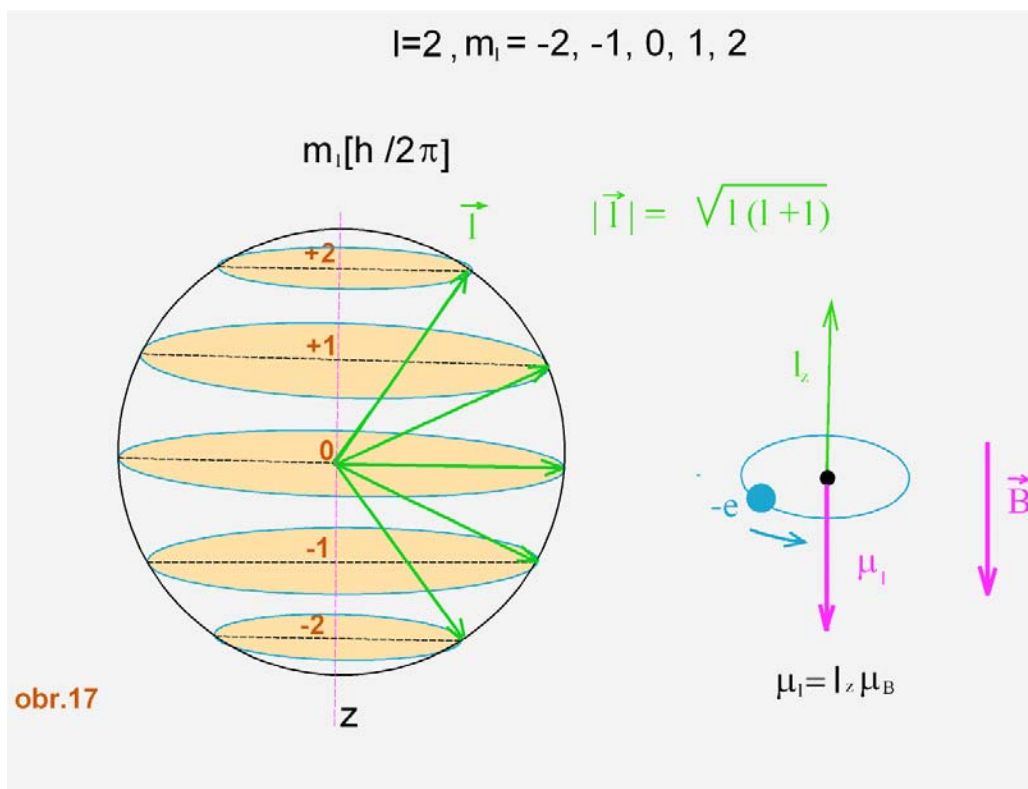
V r. 1900 německý teoretický fyzik Max Planck (1858-1947) šokoval svojí kvantovou hypotézou: *Atomy jsou schopny vyzařovat a pohlcovat energii pouze v kvantech, nikoliv spojitě; kvantum energie je úměrné kmitočtu ν vyzařovaného nebo pohlcovaného záření, tedy $E=h\nu$, přičemž h je univerzální konstanta, tzv. účinné kvantum.*³⁵

Pomocí této hypotézy dokázal Planck formulovat vyzařovací zákon (tj. závislost vyzařované energie na frekvenci záření ν a teplotě zářícího tělesa), který vyhovuje pro celý obor vlnových délek elektromagnetického záření. I když tato Planckova revoluční myšlenka byla zpočátku přijímána s rozpaky, již o pět let později ji A. Einstein úspěšně použil pro vysvětlení fotoelektrického jevu, který byl pozorován na kovových površích ozářených UV zářením, a o něco později, v r. 1913, se stala základem pro nový model atomu navržený N. Bohrem (1885-1962).

Bohrův model atomu

Bohrův model atomu vychází ze základního postulátu, že v atomech existují stabilní dráhy elektronů, v nichž elektrony mají stálou energii a ač se pohybují, energii nevyzařují ani nepohlcují. Vyzařování nebo pohlcování je pak vždy spojeno s přechodem elektronu z jedné dráhy do druhé; energie elektronu se přitom mění skokem a vyzářená resp. pohlcená energie je rovna rozdílu energií obou drah (dnes bychom raději řekli *stavů*), tedy $h\nu = E_2 - E_1$ (E_1, E_2 jsou energie výchozího, resp. konečného stavu). Pro *magnetismus* je důležitý další Bohrův předpoklad, totiž že stav elektronu v atomu určuje nejen jeho energie, ale i jeho *moment hybnosti*, který může nabývat jen zcela určitých diskrétních hodnot a zároveň i určitých orientací v prostoru (obr. 17). Dochází tedy k tzv. prostorovému kvantování (orbitálního) momentu hybnosti elektronu. Jak víme už z dřívějšíka, představuje elektron pohybující se ve své dráze – orbitu – vlastně elektrickou proudovou smyčku, která se chová jako magnet. Jeho magnetický moment je úměrný momentu hybnosti (obr. 12). Původní Ampèrova představa o molekulárních či atomových proudech jako zdroji atomových „magnetů“ v látce tak získává již velmi konkrétní podobu.

³⁵ $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Watt.sec².



Obr. 17 Prostorové kvantování orbitálního momentu hybnosti elektronu $\vec{l}$ a vznik jemu odpovídajícího magnetického momentu μ_l . Velikost prvního z nich $|\vec{l}|$ je určena kvantovým číslem l ($|\vec{l}| = \sqrt{l(l+1)}$), které může nabývat jen celočíselných hodnot. Samo prostorové kvantování je dáno podmínkou, aby průmět momentu hybnosti do určitého směru, např. směru magnetického pole $\vec{B}$, nabýval hodnot $m_l = l, l-1, \dots, -l$. Na obrázku je ukázáno prostorové kvantování pro $l=2$. Skutečné velikosti momentu hybnosti resp. jeho průmětu (složky) do směru pole dostaneme vynásobením uvedených kvantových čísel veličinou $h/2\pi$. Magnetický orbitální moment μ_l resp. jeho měřitelná složka ve směru magnetického pole mají vzhledem k zápornému náboji elektronu opačnou orientaci než $\vec{l}$, resp. $\vec{l}_z$ - viz též obr. 12.

Poznámka: Uvedený výraz pro $|\vec{l}|$ není zcela totožný s původní Bohrovým výsledkem, nýbrž je korigován v souladu s pozdější přesnější kvantovou mechanikou.

Orientující účinek magnetického pole, které necháme na magnetický moment elektronu působit, má zřejmě za následek, že pro různé, z hlediska prostorového kvantování přípustné orientace, bude elektron nabývat i různých energií; projeví se to rozštěpením některých čar optického spektra (již dříve zmíněný Zeemanův jev). Důležitý experiment W. Gerlacha a J. Sterna, publikovaný v r. 1922 [17], ověřil existenci prostorového kvantování u atomů a molekul přímým pozorováním rozštěpení jejich svazku, když prolétají nehomogenním magnetickým polem. To pochopitelně dokazuje, že i magnetický moment elektronů je prostorově kvantován, s čímž souvisí i existence minimálního magnetického momentu elektronu - tedy jakéhosi *kvanta magnetismu*. Nazývá se Bohrův magneton a je

dodnes základní jednotkou pro magnetismus atomů a molekul, které konstituují látkové prostředí.³⁶

Vznik kvantové mechaniky

Od Bohrova modelu atomu vede pak přímá cesta ke kvantové mechanice (De Broglie 1923, Heisenberg 1925, Schrödinger 1927, Dirac 1928). Tento vývoj byl neobyčejně prudký a lze jej srovnat se situací při objevování zákonů klasické elektrodynamiky. My se jím zde ovšem nemůžeme podrobněji zabývat a omezíme se na to, co bezprostředně ovlivnilo chápání magnetických jevů. Připomenou pouze, že ruku v ruce s budováním kvantové teorie se na obecném pokroku fyzikálního vnímání podílelo i úsilí experimentátorů; právě nové experimentální výsledky, které nebylo možné vysvětlit na základě stávajících teorií, byly hlavní inspirací pro vznik nových smělých myšlenek a koncepcí. Příkladem může být objev spinu, který měl klíčový význam jak pro pochopení elektronové struktury atomů, tak i vysvětlení magnetických vlastností látek, především feromagnetik a jim podobných materiálů.

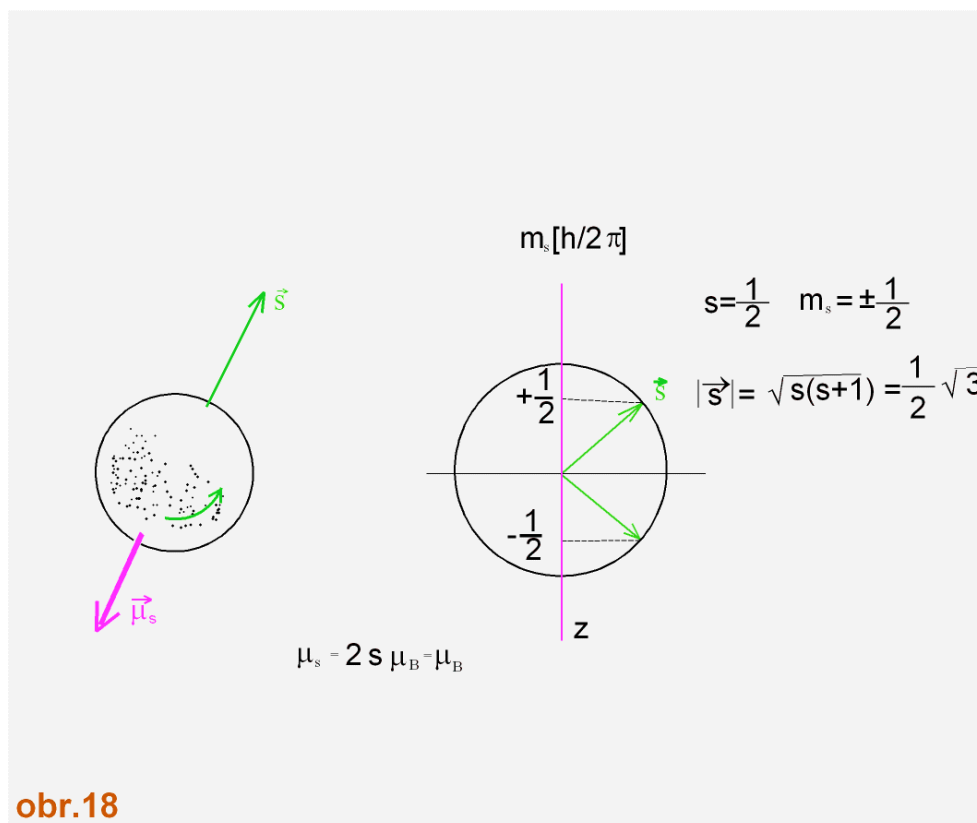
Spin elektronu

R. 1925 G.Goudsmit a S.Uhlenbeck, když se marně pokoušeli rozluštit záhadu jemné struktury atomových spekter, vyslovili hypotézu, že elektrony mají vedle orbitálního momentu ještě moment vlastní, tj. spin [18]. Spin si lze představit jako určitý rotační pohyb elektronu (nebo i jiné částice) kolem vlastní osy – viz obr. 18. Jde-li o částici nabitou, jako je elektron, vzniká i jemu úměrný magnetický moment – spinový magnetický moment. Jeho zvláštností je, že poměr jeho velikosti vůči spinu (tj. mechanickému momentu) je dvojnásobný ve srovnání s momentem orbitálním.³⁷

³⁶ Bohrov magneton $\mu_B = e\hbar/2m = 0,9273 \cdot 10^{-23} \text{ Am}^2$, $\hbar = h/2\pi$

³⁷ Z tohoto důvodu zůstává minimální magnetický spinový moment roven Bohrovu magnetonu přesto, že spin elektronu je $\frac{1}{2}$.

Teorii spinu elektronu na základě spojení kvantové mechaniky a speciální teorie relativity podal P.A.M. Dirac v r. 1928. Ovšem jak Dirac, tak většina významných teoretických fyziků zastávala názor, že spin představuje čistě kvantový a relativistický efekt, který nemá žádný analog v klasické fyzice a že tudíž jakékoli konkrétní názorné představy o něm jsou neadekvátní (viz např. L.D. Landau, E.M. Lifšic: Kvantová mechanika). Zmíněná modelová představa o rotujícím elektronu je však běžně používána, neboť nám dokáže přiblížit mnohé, především magnetické vlastnosti elektronového spinu, včetně toho, že se spinový moment v mnoha ohledech chová jako smyčka protékaná elektrickým proudem. Kromě toho se v 2. polovině 20. století množí pokusy o “klasickou” interpretaci spinu. Impulsy k tomu pocházejí mj. z řad fyziků zabývajících se studiem elementárních částic, z nichž mnohé – např. proton či neutron – rozhodně nelze považovat za jednoduché “bodové” částice, neboť se samy skládají z ještě elementárnějších částí – kvarků a gluonů. Pro hlubší seznámení s možnostmi vzájemného propojení klasického a kvantově mechanického popisu spinu doporučuji knihu M.Rivase “Kinematical Theory of Spinning Particles”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 2001.



obr.18

Prostorové kvantování spinu elektronu a klasická modelová představa vzniku spinu jako momentu hybnosti elektronu rotujícího kolem osy.

Je pozoruhodné, že ještě těsně před zrodem rigorózní kvantové mechaniky a zejména před Diracovým objasněním této „anomálie“ spinového momentu (1928) vyslovil již W. Pauli svůj tzv. vylučovací princip, který ve své nejjednodušší podobě říká:

Stav elektronu v atomu je dán nikoliv třemi, jak předpokládal Bohr, ale čtyřmi kvantovými čísly (n, l, m, m_s).³⁸ Každý z těchto stavů může být obsazen pouze jediným elektronem.

To znamená, že každý stav v Bohrově modelu, určený třemi kvantovými čísly n, l, m , může být obsazen nejvýše 2 elektrony, které však musí mít různé hodnoty spinu. Pauliho vylučovací princip nesmírně napomohl k jednoznačnému stanovení elektronové struktury atomů a pochopení zákonitostí periodického systému prvků. Navíc měl i klíčovou úlohu při vysvětlení feromagnetismu a některých dalších problémů elektronové struktury pevných látek. Dodejme, že rigorózní popis na základě kvantové mechaniky tyto zásadní rysy Bohrova modelu ponechává v platnosti, pouze je upřesňuje.

Magnetický moment atomu

Atomy mají obvykle větší počet elektronů, z nichž každý má svůj orbitální i spinový moment. Ty se dohromady sčítají či skládají v jediný výsledný moment celého atomu, který tak představuje jakýsi elementární atomový magnet. Podle toho bychom mohli očekávat, že magnetismus je obvyklým jevem v řadě atomů a že jejich magnetické momenty mohou jevit

³⁸ Tedy k původním třem číslům vztahujícím se k energii (n), velikosti orbitálního momentu hybnosti (l) a jeho složky do určitého směru – např. směru magnetického pole (m) přibyl další – spinové (m_s). To může nabývat 2 hodnot $+1/2$ a $-1/2$, které odpovídají pravotočivému a levotočivému smyslu rotace elektronu.

velikou variabilitu. Opak je však pravdou: magnetismus je vlastností vyhrazenou jen *některým skupinám* atomů – souvisí to s dříve zmíněným Pauliho principem a s tím, že za obvyklých podmínek jsou v atomech přednostně obsazovány stavy s nejnižšími kvantovými čísly, které jsou energeticky výhodnější. Vytvářejí se tak známé „slupky“ atomů, které se s přibývajícím počtem elektronů postupně zevnitř zaplňují. U plných slupek je vždy výsledný magnetický moment vzhledem k prostorovému kvantování roven nule a tak nositeli magnetismu v atomech mohou být jen elektrony v nejvyšších ne zcela zaplněných slupkách. Navíc jsou izolované atomy většinou nestabilní a vytvářejí buď molekuly, nebo dokonce kondenzované látky v kapalném nebo pevném skupenství. Tam jsou jejich vnější elektrony vystaveny silnému vzájemnému působení s dalšími atomy, vzniká to, čemu říkáme chemická vazba a původní stavy elektronů se mění. A je přímo v povaze věci, že až na výjimky dochází k anulování orbitálních i spinových momentů. Těmi výjimkami jsou v první řadě tzv. tranzitivní kovy (např. železo, nikl, kobalt) a jejich sloučeniny (např. oxidy), dále tzv. vzácné zeminy a některé další, z molekul např. dvouatomová molekula kyslíku. Ostatně skutečnost, že po dlouhá staletí byly známy pouze dva případy, kdy látka projevuje *makroskopické* magnetické vlastnosti – magnetit a železo – to dobře ilustruje.

Začátky studia magnetických vlastností látek

Základní rozdělení látek na paramagnetické a diamagnetické, dané rozdílným chováním v magnetickém poli, bylo známo již Faradayovi. Bylo též známo, že z široké skupiny paramagnetických látek lze vydělit úzkou skupinku reprezentovanou magnetitem a železem, která vykazuje za normálních teplot mnohonásobně silnější magnetismus, včetně toho, že se u nich může vyskytovat permanentní magnetický moment. Časem se pro ně zavedl název feromagnetika.

Paramagnetismus a diamagnetismus

Zhruba v době, kdy ve Francii byla objevena radioaktivita (Becquerel 1896 radioaktivita uranu, M. Curie-Sklodowska 1898 polonium a radium), začíná manžel Marie Curie-Sklodowské, Pierre Curie (1859-1906) systematicky studovat magnetické vlastnosti paramagnetik i diamagnetik, a to především jejich teplotní vlastnosti [19]. Výsledkem byl především obecný zákon vyjadřující *nepřímou* úměrnost mezi susceptibilitou *paramagnetik* a teplotou,

$$\chi = C/T,$$

nazývaný po jeho autorovi jako *Curieův zákon*. Konstanta C – tzv. Curieova konstanta, je přitom různá pro různé druhy látek a je tedy jistou sondou do látky samé, do její atomové, resp. elektronové struktury. Na rozdíl od paramagnetik nenalezl u *diamagnetických* látek žádnou výraznější teplotní závislost a jejich susceptibilita zůstává trvale zápornou ($\chi < 0$). U *feromagnetik* Curie zjistil pokles magnetického momentu s rostoucí teplotou, který trvá až do určité kritické teploty – Curieovy teploty T_c , nad níž se feromagnetická látka stává paramagnetickou [18]. Na vysvětlení Curieových výsledků a jejich dalším prohlubování pracovali další fyzikové, jmenujme zejména P. Weiss (1865-1940) a P. Langevin (1872-1946). Oba jsou předními reprezentanty a spoluvůdci významné francouzské školy v oboru magnetismu, jejíž věhlas přetrval, zejména díky osobnosti jejich pokračovatele L. Néela (1904-2000), až do druhé poloviny 20. století.

Paul Langevin byl první (1905), kdo nastínil důvody odlišnosti diamagnetických a paramagnetických látek [20]: zatímco diamagnetismus je skryt přímo v Maxwellových rovnicích a je důsledkem indukovaných polí vznikajících při zapnutí vnějšího magnetického

pole³⁹, paramagnetismus je podmíněn existencí atomových (či molekulárních) magnetických momentů v látce, tak jak jsme o nich před chvílí hovořili. Paramagnetismus je tedy výběrový a závisí přímo na stavu elektronů v látce, kdežto diamagnetismus se takto jeví jako obecný jev a měl by tedy být přítomen i v paramagnetikách; je ovšem výrazně slabší a tak ho obvykle u nich nepozorujeme. Pro magnetizaci *paramagnetické* látky Langevin odvodil -- s využitím klasické statistiky známé z kinetické teorie plynů -- obecný zákon vyjadřující závislost na teplotě a magnetickém poli. Pro slabá pole a pro všechny teploty s výjimkou teplot velmi nízkých lze považovat Langevinův výraz pro susceptibilitu za totožný se zákonem Curieovým, kterému se tak dostává teoretického opodstatnění.⁴⁰

Použitá statistika je klasická v tom smyslu, že připouští pro magnetické momenty libovolnou orientaci vůči $\vec{B}$. Ve světle pozdějšího odhalení prostorového kvantování atomových momentů tento předpoklad ovšem není splněn. Příslušná korekce vede k nahrazení Langevinovy funkce funkcí Brillouinovou B_J , která je parametricky závislá i na kvantovém čísle J souvisejícím s velikostí magnetického momentu. Důležité však je, že Curieův zákon v dosavadních mezích své platnosti zůstává přitom beze změny.

Ferromagnetismus: teorie molekulárního pole

Ferromagnetickými látkami se zabýval Pierre Weiss (1865-1940). Od běžných paramagnetik se lišily hned v několika směrech:

- velmi snadno se magnetovaly v relativně slabých polích
- magnetická susceptibilita byla nejen vysoká, ale zpravidla i velmi silně závisela na velikosti magnetického pole
- existence nasycení, magnetické remanence (tj. permanentního magnetického momentu) a magnetické hystereze (magnetizační smyčky)
- existence kritické teploty, Curieovy teploty, která shora omezovala oblast ferromagnetického chování látky.

P. Weiss přišel r. 1907 s revoluční myšlenkou [21]: Ferromagnetické látky se proto tak snadno vnějším magnetickým polem nasycují, poněvadž jsou už samy předem spontánně

³⁹ Indukované pole vzniká v důsledku Faradayova zákona a představuje reakci, kterou se systém brání změně magnetického pole. Toto elektrické pole působí přídavnou urychlující silou na elektrony v látce, které pak vytvářejí jakési dodatečné proudové smyčky, jejichž magnetický moment je orientovaný proti vnějšímu magnetickému poli, v souladu s tzv. Lenzovým pravidlem v elektrodynamice.

⁴⁰ Kdyby rušivě nepůsobily tepelné kmity, stačilo by i slabé magnetické pole na to, aby se všechny magnetické momenty v látce shodně zorientovaly do směru pole, takže by prostě magnetický moment látky na jednotku objemu – tedy magnetizace M – byl dán vynásobením atomového (nebo molekulárního) momentu m počtem atomů (molekul) N v jednotkovém objemu: $M_0 = Nm$. K této situaci se blížíme při velmi nízkých teplotách. Tepelné kmity však narušují toto uspořádání a momenty jsou rozorientovány; tím víc, čím vyšší je teplota a tedy i energie těchto kmitů. Namísto uvedeného jednoduchého výrazu dostáváme $M = N\bar{m}$, přičemž teplotní závislost průměrné hodnoty $\bar{m}$ (tj. průměrné hodnoty složky momentu ve směru pole) je dána Langevinovou funkcí

$L(x) \equiv \coth x - (1/x)$, kde $x \equiv mB/\mu_0 k_B T$ udává poměr velikosti energie magnetického momentu m v magnetickém poli B a energie tepelných kmitů $k_B T$ (k_B je tzv. Boltzmannova konstanta). Tedy $M = NmL(x)$. Pro $x \ll 1$, tj. při dostatečně vysokých teplotách a nepříliš silném poli B , bude $L(x) \approx x/3$ a pro M pak platí Curieův zákon

$$M \approx Nm^2 \cdot B / (\mu_0 \cdot 3k_B T) \approx C \cdot B / \mu_0 T,$$

$$\text{resp. } \chi = \mu_0 M/B \approx C/T$$

$C \equiv Nm^2/3k_B$ je ona důležitá Curieova konstanta; známe-li její hodnotu (z měření teplotní závislosti susceptibility), určíme odtud při známé hodnotě N přímo velikost atomového nebo molekulárního magnetického momentu m .

zmagnetovány a vnější pole jen zvýrazňuje na *makroskopické úrovni* toto již existující zmagnetování! Weiss samozřejmě nedokázal určit – a ve své době to zásadně ani nemohl učinit – jaké jsou fyzikální příčiny takového chování, co je to za sílu, která nutí magnetické momenty atomů, aby se samovolně zorientovaly do určitého směru. Odsunul proto podobné úvahy zcela stranou a nahradil neznámé síly jakýmsi efektivním polem – nazval ho *molekulární pole* – které na každý magnetický moment atomů působí silou tak jako by šlo o pole magnetické. O tomto molekulárním poli pak předpokládal, že je *úměrné magnetizaci* látky. Každý individuální atomový moment se pak chová jako moment *paramagnetické* látky, na kterou působí magnetické pole rovné součtu vnějšího magnetického pole a pole molekulárního:

$$\vec{B} = \vec{B}_{ext} + \vec{B}_{mol}$$

$$\vec{B}_{mol} = \lambda_w \cdot \mu_0 \vec{M}$$

Tedy i tehdy, nepůsobí-li na ferromagnetickou látku žádné vnější pole ($\vec{B}_{ext} = 0$), je zde pole molekulární, které vyvolává vznik spontánního zmagnetování. Chování souboru magnetických momentů lze pak jednoduše vyvodit z Langevinovy teorie paramagnetismu (viz předchozí). Pro teploty vyšší než je kritická teplota feromagnetika T_C (Curieova teplota) tak ihned plyne známý Curieův-Weissův zákon

$$\chi = \frac{\mu_0 M}{B_{ext}} = \frac{C}{T - \lambda_w C}, \quad T > \lambda_w C$$

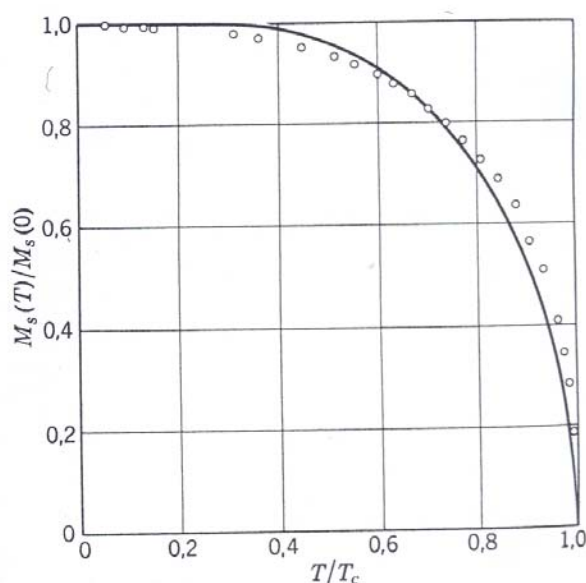
Pro $T \rightarrow \lambda_w C$ bude $\chi \rightarrow \infty$ a tuto mezní teplotu lze proto chápat jako teplotu Curieovu, tedy $T_C = \lambda_w C$; teorie tak dává pro T_C kvantitativně porovnatelný údaj a činí Curieovu teplotu přímo mírou pro velikost molekulárního pole. V praxi se Curieův-Weissův zákon častěji používá v inverzní podobě

$$1/\chi = (T - \lambda_w C)/C = (T - T_c)/C$$

která názorně ukazuje charakteristickou přímkovou závislost $1/\chi$ na teplotě.⁴¹

Při teplotách, které jsou nižší než T_C , dovoluje Langevinova-Weissova teorie určit teplotní průběh spontánní magnetizace a porovnat jej s experimentem. Výsledky docílené takto v následujících letech lze považovat za uspokojivé a později byla shoda mezi teoretickými a experimentálními křivkami $M(T)/M(0)$ ještě zdokonalena nahrazením Langevinovy funkce funkcí Brillouinovou respektující zákonitosti prostorového kvantování magnetických momentů. Shodu teorie s experimentem můžeme posoudit na příkladě niklu, kovového feromagnetika, jehož vlastnosti byly Weissem a jeho spolupracovníky velmi podrobně studovány (obr.19).

⁴¹ Curieův-Weissův zákon je ovšem jen přibližný. Jak ukázaly četné experimenty dochází v blízkosti T_C v teplotním průběhu χ (resp. $1/\chi$) ke zřetelným odchylkám; studium těchto odchylek později poskytovalo cenné informace o podrobných mechanismech interakcí působících mezi magnetickými momenty v látce.



obr. 19

Obr. 19 Redukovaná teplotní závislost, spontánní magnetizace niklu $M(T)/M(0)$ vs. T/T_c . Body představují experimentální hodnoty naměřené P. Weisssem, plná čára odpovídá teorii na bázi Brillouinovy funkce B_J ($J=1/2$). Odchyly – zejména v oblasti nízkých teplot – lze odstranit na základě tzv. Blochova třípolovinového zákona (viz dále pozn. 48), který respektuje kolektivní charakter interakcí mezi atomovými magnetickými momenty a uvažuje existenci kolektivních excitací magnetického systému – spinových vln.

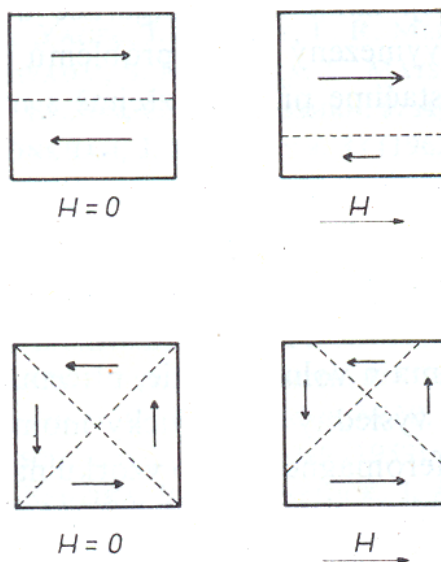
Weissova teorie molekulárního pole skutečně představuje důležitý mezník ve studiu feromagnetismu, neboť poskytla jednoduchý návod ke studiu látek, které v určitém oboru teplot jeví samovolné uspořádání magnetických momentů, které jsou v ní přítomny. Nepřekvapí proto, že tím dala signál k objevování nových feromagnetik a jejich sledování. Později, počátkem třicátých let minulého století, inspirovala Weisssova žáka Louis Neéla k objevu nové třídy látek se spontánně orientovanými magnetickými momenty, tentokrát však orientovanými navzájem antiparalelně – *antiferomagnetik*, a po dalších asi 15 letech (1948), i k objasnění magnetického uspořádání v tehdy nastupující generaci nových oxidických magnetik, *feritů*, do té doby neúspěšně traktovaných jako anomální feromagnetika⁴². Z toho je patrné, že teorie molekulárního pole si podržela svoji sílu a úspěšnost až hluboko do 20. století. Dokonce se dá říci, že dodnes je používána jako užitečný a přehledný způsob pro analýzu magnetického stavu látek se spontánní magnetizací, neboť představuje poměrně dobré přiblížení skutečnému stavu.⁴³

Teorie molekulárního pole však není jediným triumfem Weissovy geniální intuice. Aby vysvětlil proč feromagnet se spontánně uspořádanými magnetickými momenty se přesto většinou jeví z vnějšího makroskopického pohledu jako nemagnetický a k jeho zmagnetování

⁴² Mezi ferity patří i sám prapředek magnetických látek, nám dobře známý magnetit (Fe_3O_4).

⁴³ To není náhoda. Vyjdeme-li z rigoróznější kvantové teorie feromagnetických nebo antiferomagnetických interakcí např. typu W. Heisenberga, nebo J.H. Van Vlecka dospějeme v určitém přiblížení zpravidla k analogickým výsledkům; pouze fenomenologická konstanta λ_w je nahrazena fyzikálně o něco lépe postizitelnými tzv. výměnnými integrály.

je třeba vnějšího magnetického pole, předpokládal, že směr spontánní magnetizace je stejný jen v určitých oblastech – doménách; přitom je její směr v různých doménách obecně odlišný, takže výsledný magnetický moment může být bez působení vnějšího pole nulový (obr. 20).



obr. 20

Schématické znázornění nejčastějších typů doménových struktur a jejich změn při magnetování. V odmagnetovaném stavu svírají vektory magnetizace sousedních domén uvnitř jednoho krystalku v polykrystalickém materiálu obvykle úhel 90° nebo 180° . Na obrázku je schematicky naznačeno, jak se při zapnutí vnějšího magnetického pole B posouvá v těchto případech rozhraní mezi doménami, čímž dochází k magnetování látky.

Při zapnutí magnetického pole pak domény s příznivě orientovanou magnetizací se mohou zvětšovat na úkor těch, u kterých je magnetizace vůči směru pole nepříznivě orientovaná. Materiál se tak jako celek snadno zmagnetuje, tj. chová se sám jako magnet. Tato smělá Weissova hypotéza, ač byla obecně přijímána, dočkala se svého *přímého* potvrzení skutečným zviditelněním domén až téměř po 30 letech [22]. Studium domén se pak stalo velmi důležitou a úspěšnou disciplínou moderního magnetismu.

Klíčová úloha kvantové teorie

Na první pohled by se podle předešlého mohlo zdát, že objev kvantové mechaniky přinesl spolu s prostorovým kvantováním atomových momentů a objevem spinu elektronu jen určité kvantitativní upřesnění stávající teorie Langevinovy a Langevinovy-Weissovy pro paramagnetismus resp. feromagnetismus. Avšak není tomu tak. Již na samém začátku kvantové éry dospěl Niels Bohr r. 1911 k závěru, že při důsledném uplatnění zákonů *klasické fyziky a statistiky* nemůže jakýkoli systém elektronů, tedy i např. elektronů v atomech, které tvoří paramagnetickou látku, vyprodukovat nenulový výsledný magnetický moment.⁴⁴ Tento Bohrovův výsledek ukazuje, že pro pochopení magnetismu jsou zákony klasické fyziky naprosto nepostačující, a naznačuje i později ověřenou skutečnost, že pokrok v porozumění

⁴⁴ Význam tohoto teorému, který zůstal víceméně ukryt v Bohrově disertační práci, ani po „znovu objevení“ – nezávisle na Bohrovi – J.H. van Leuvenovou v r. 1919, zůstal dlouho nedoceněn. Výrazně na něj upozornil až J.H. Van Vleck r. 1932 [22].

magnetismu půjde ruku v ruce s budováním kvantové teorie ve fyzice. Magnetismus se tak vedle toho, že je *relativistickým efektem*, řadí zároveň i mezi jevy kvantové. Právem lze tedy považovat Bohrovu teorém, nebo, jak se v literatuře častěji označuje, teorém Van Leuvenové za *důležitý mezník* v cestě za poznáním magnetismu.

Magnetismus látek je ovšem vždycky projevem chování velikého počtu elektronů resp. atomů, takže jde vždy o jevy statistické povahy. Zatímco v minulosti se statistických metod používalo ve fyzice téměř výhradně u plynů, je zásluhou badatelů v oboru magnetismu – především P. Langevina a P. Weisse – že přenesli tyto metody i do zkoumání pevných látek a kondenzovaných fází vůbec. Z Bohrem dokázaného teorému ovšem plyne, že klasická statistika jak ji vypracovali Maxwell a Boltzmann je pro magnetické látky nepostačující; lze jej proto chápat i jako podnět pro vypracování *statistiky nové – kvantové*, která pak v budoucnu skutečně sehrála velmi významnou úlohu v *celé moderní fyzice*.

Ale vraťme se k magnetismu. P. Weiss zavedl molekulární pole ve feromagnetikách *vědomě* jako *pomocný* pojem, kterým lze charakterizovat velikost a kvantitativní působení vzájemných interakcí mezi přítomnými molekulárními event. atomovými magnetickými momenty. Bylo mu rovněž jasné, že toto fiktivní pole, působící na každý z magnetických momentů v látce, nemůže být *skutečným magnetickým* polem jimi vyvolaným, neboť je řádově silnější než pole, které jsou tyto magnetické momenty (dipóly) schopné vyvolat. Dokonce tušil, že skutečný původ je třeba hledat v silách elektrostatických, mechanismus jejich vzniku ovšem v té době odhalit neuměl a fakticky ani nemohl. Teprve podrobné rozpracování kvantové mechaniky, doplněné znalostmi týkajícími se spinů elektronů včetně Pauliho *vylučovacího* principu (srv. str. 50) umožnilo W. Heisenbergovi v r. 1926-1928 vysvětlit vznik feromagnetismu na základě tzv. výměnných sil, které jsou ryze kvantovým jevem vznikajícím v podstatě kombinací elektrostatických sil a Pauliho principu.⁴⁵ Teorii téměř současně formuloval poněkud z jiného hlediska Dirac (1929)⁴⁶ a později byla dále rozpracována řadou dalších teoretiků (Van Vleck, Bloch, Slater, Stoner). Objevují se i první knihy o magnetismu, r. 1932 Van Vleckova *The Theory of Electric and magnetic Susceptibilities* [23] a 1934 E.C. Stonera *Magnetism and Matter* [24].⁴⁷

Objev spontánní magnetizace P. Weissem napověděl, že existuje ještě další tvář feromagnetismu, která se postupným pronikáním do záhad jeho existence stále zřetelněji objevovala. Charakterizují ji 2 pojmy: *kolektivnost* a *kooperativnost*.

Prvý z nich vyjadřuje skutečnost, že na vzniku feromagnetického uspořádání se podílejí všechny atomy resp. jejich magnetické momenty. Energii, která souvisí s tímto uspořádáním nelze proto chápat jako prostý součet energií (resp. energetických příspěvků) jednotlivých atomů, neboť je v samé podstatě nedělitelná a patří k celému souboru atomů

⁴⁵ Pauliho princip brání tomu, aby se v určitém okamžiku v daném místě setkaly 2 elektrony se *stejným* spinem (tj. se stejným smyslem rotace). Tím vzniká mezi elektrony silná vazba, která – v závislosti na vzájemné vzdálenosti atomů – upřednostňuje buď shodnou orientaci spinových momentů (feromagnetická vazba), nebo naopak opačnou orientaci (antiferomagnetická vazba).

⁴⁶ Dirac a Van Vleck jsou autory velmi důležitého operátoru, $A\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$, který umožňuje pojímat výměnnou interakci jako párovou interakci mezi dvěma spiny a formálně ji přibližuje k Weissovu molekulárnímu poli. Bývá používán i při analýze magnetických rezonančních spekter (EPR, FMR) a analogicky i v případě hyperjemných interakcí pro interakci mezi spinem elektronu a spinem jádra (NMR).

⁴⁷ Je pozoruhodné, že již předtím, r. 1929 v nakladatelství R. Prombergra v Olomouci vyšla útlá knížka o magnetismu Pierra Weisse a Gabriela Foëxe v českém překladu B. Součka. Tato publikace seznamuje čtenáře přístupnou formou s tehdy studovanými magnetickými jevy a jejich fyzikálními souvislostmi. Vzhledem k době vzniku (~1928), výklad vychází plně z Weissovy teorie molekulárního pole a termodynamických úvah. Kvantová teorie je zmíněna jen okrajově, v dodatku – samozřejmě bez nejnovějších výsledků W. Heisenberga a dalších v kvantové teorii feromagnetismu.

najednou – je jimi kolektivně sdílena. Hovoříme-li přesto někdy o *energii na 1 atom* máme na mysli jakousi průměrnou energii, která na 1 atom připadá. Stavem s nejnižší energií potom bude u feromagnetika zřejmě stav dokonalého uspořádání. Kolektivnost souboru magnetických momentů ovšem umožňuje existenci i dalších kolektivních stavů. Hlavními kolektivními excitovanými stavy (excitovanými proto, že jim přísluší vyšší hodnoty celkové energie) jsou tzv. spinové vlny předpověděné F.Blochem a J.C.Slaterem v r. 1930. Spinové vlny označují stav, při němž se odchylka od dokonalého uspořádání magnetických momentů (spinů) šíří konstantní rychlostí v systému, který tyto momenty resp. spiny tvoří, formou vlny. Nelze ji tak připsat k jedinému atomu, může se vyskytovat u různých atomů systémů a jde tudíž o stav *kolektivní*. Existence spinových vln byla přímo experimentálně ověřena později; nepřímo byla ovšem záhy konfrontována s důsledky plynoucími pro teplotní závislost magnetizace při velmi nízkých teplotách.⁴⁸

Kooperativnost feromagnetismu lze spatřovat v tom, že vzniká *samovolně*, pouze v důsledku *vzájemného* působení mezi atomy resp. elektrony. Takových kooperativních jevů ve fyzice existuje více a tak podrobné zkoumání feromagnetismu jako *kooperativního jevu* otevřelo cestu k obecné teorii podobných jevů – především k teorii a pochopení fázových přechodů v látkách. Jako vícekrát ve své historii, magnetismus i zde opět otevíral nové pohledy a přinášel nové koncepty a myšlenky posunující celou fyziku dopředu.

Ovšem *vlastní* historie magnetismu uvedenými základními odhaleními ještě zdaleka nekončí. Mnohé důležité magnetické jevy musely počkat ještě celou řádku let na své objevení či konečné vysvětlení: magnetismus atomových jader a elementárních částic, magnetická resonance elektronů nebo jader, nová magnetika s neobvyklými typy spontánního uspořádání magnetických momentů, postupné objasňování souvislostí mezi magnetickými vlastnostmi a chemickým složením a strukturou látek; také magnetické domény, teorie magnetické hystereze a prakticky celá ohromná oblast praktického využití magnetismu. K některým naznačeným otázkám se ještě dostaneme. Nejdříve však chci dokončit cestu po hlavní linii tohoto výkladu, která sleduje postupné odhalování *původu* magnetismu a jeho začleňování do fyzikálního obrazu světa.

Kvantová elektrodynamika a magnetismus elementárních částic

Zatímco klasická elektrodynamika objevila vztah mezi elektřinou a magnetismem a označila elektrický náboj za zdroj nejen elektrických, ale i magnetických sil, objev elektricky nabitých částic elektronu a později protonu potvrdil kvantový charakter elektřiny a identifikoval tyto částice jako nositele elektrického náboje, zatímco kvantová mechanika popsala zákonitosti pohybu těchto částic, především elektronu, který svým pohybem – orbitálním i vlastním (spin) – vytváří magnetické momenty v látkách, a konečně, přesto, že Einsteinova teorie speciální relativity odhalila skutečný charakter magnetických sil, totiž že jsou ve své podstatě totožné se silami elektrickými, neboť jsou pouze jejich relativistickou korekcí při pohybujících se nábojích, přesto tu stále něco chybí k úplnému pochopení, něco velmi zásadního - poznání co je vlastně ten elektrický náboj. Určité objasnění nebo alespoň poodhalení tohoto problému poskytuje *kvantová elektrodynamika*.

Všimněme si, že od samotného pojmu kvanta, který byl spojen s *energií záření* (Planck 1900), nevedla cesta přímo ke zkoumání struktury elektromagnetického záření, které musí logicky představovat jakýsi proud těchto „energetických kvant“, ale nejprve oklikou k vytvoření kvantové mechaniky, tak jak jsme to již v předchozím popisovali. Po základním

⁴⁸ Jde zejména o tzv. Blochův „třípolovinový zákon“, $M(T) = M(0) [1 - (T/T_c)^{3/2}]$.

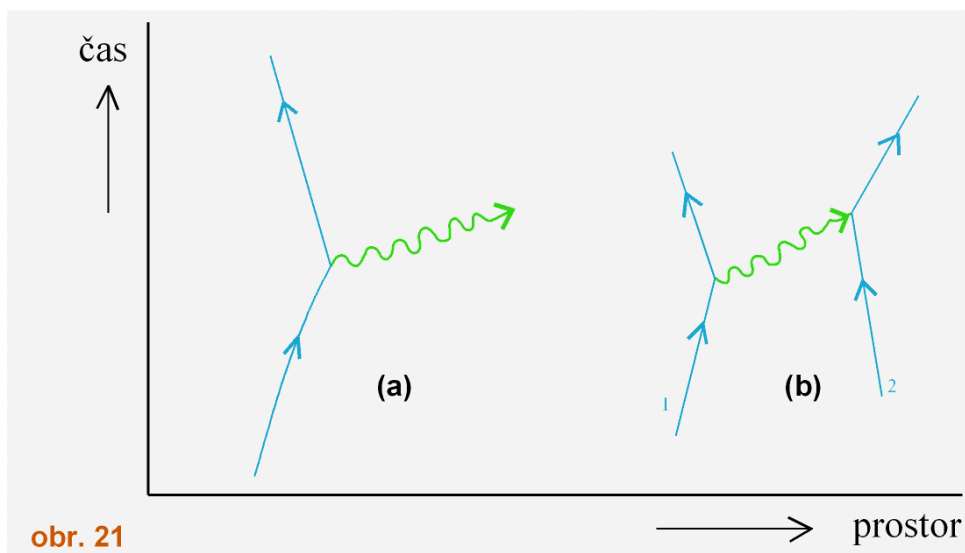
objevu, že hmotné částice se v určitých situacích chovají jako vlnění, vzniká pak nejprve představa o *dualitě* chování částic (dualita částice – vlna), kterou pak bylo možné analogicky přenést i na dualitu elektromagnetických vln, když částicový charakter světla představoval tehdy ještě hypotetický *foton*. Avšak tak jako pozdější vývoj kvantové mechaniky dokázal popsat chování elektronů a částic aniž by tento pojem duality potřeboval, podobně i kvantová elektrodynamika se přiklonila k popisu světla a elektromagnetického záření výhradně pomocí *částic – fotonů*.⁴⁹ Dodejme ještě, že kvantová elektrodynamika vznikla proto, aby vysvětlila, *jak probíhá vyzařování a pohlcování* světla atomy, což klasická elektromagnetická teorie nedovede a selhává zde podobně jako klasická mechanika při vysvětlování *pohybu elektronů* v atomech.

S kvantovou elektrodynamikou, stejně jako s kvantovou mechanikou, ovšem opouštíme svět založený na zkušenostech našeho běžného života a jeho bezprostředního vnímání. Jestli jsme považovali za přirozené, že např. částice, jejíž polohu v prostoru jsme v daný časový okamžik zjistili, se bude dále pohybovat po zcela určité trajektorii, která je přesně stanovena počáteční rychlostí částice a vnějšími silami na ni působícími a samozřejmě její hmotností, pak nic takového ve světě kvant neexistuje. Především nelze současně přesně stanovit polohu a rychlost (tedy ani hybnost) částice: to je známý *princip neurčitosti* objevený Heisenbergem, který platí i pro kvantovou elektrodynamiku. Všechno, co můžeme pak o dalším pohybu resp. osudu částice říci, je určení pravděpodobnosti, že se s ní na určitém místě v prostoru a v daném okamžiku setkáme, aniž bychom předem vylučovali kteroukoli z možných cest, které by tam částici mohly zavést.

Elektron pohybující se prostorem, který ve smyslu klasické fyziky vytvářel kolem sebe elektromagnetické pole, namísto toho vysílá fotony, a zároveň je schopen i fotony, které na své cestě potká, pohltit. Tyto fotony mohou být emitovány např. jiným elektronem, případně jinou částicí v jeho okolí, ale mohou to být i „vlastní“ fotony, které elektron vyzáří a poté opět absorbuje. Pohlcováním fotonů, které vysílají částice v okolí námi uvažovaného elektronu, se vytváří jeho *vazba* s těmito částicemi (obr. 21). Lze též říci, že dvě částice (např. elektron-elektron nebo elektron-proton) si fotony vzájemně *vyměňují*.⁵⁰

⁴⁹ Připomeňme, že tím se vlastně vrátila zpět k Isacu Newtonovi a jeho intuitivnímu odporu k pojmání světelného záření jako vlnění; přesto, že po mnoho let představa světelných vln jako skutečné podstaty světla byla všeobecně přijímána a zdála se být nezvratně prokázána velkou řadou pokusů (ohyb, interference), Newton až do své smrti zůstal věren částicové představě o světle. Dnešní kvantová elektrodynamika *jednoznačně* považuje světlo za proud těchto fotonů; fotony se tak řadí do rodiny elementárních částic, jako jsou např. elektron a proton, byť na rozdíl od nich má nulovou hmotnost.

⁵⁰ Tato vazba může být buď kladná – výsledkem je pak vzájemné přitahování částic – nebo záporná – pak jde o odpuzování. Přesněji řečeno, vazba ovlivní pravděpodobnosti, že částice zjistíme v daném čase na určitém místě. Z našeho klasického pohledu můžeme pak např. absorpci fotonu elektronem chápat jako srážku dvou částic – elektronu a fotonu. Při ní zaniknuvší foton předá elektronu svoji hybnost a energii, což způsobí změnu směru jeho dráhy (obr. 21).



Obr. 21 Emise fotonu letícím elektronem:

- a) osamocení elektron
- b) výměna fotonu mezi dvěma elektrony vytváří jejich vzájemné odpuzování

A nyní přichází to, co je pro nás nejdůležitější. Přes zdánlivou složitost těchto dějů ukazuje se fantastická věc: pravděpodobnost, že elektron vyzáří nebo pohltí foton je univerzální konstantou, která je zcela nezávislá na dané situaci, na pohybu elektronu, na čase, či na tom, zda a kolik jiných částic se pohybuje v okolí. Odtud vede už přímá cesta k tomu, abychom tuto konstantu v podstatě ztotožnili s elektrickým nábojem elektronu.⁵¹ To znamená, že onen zdroj elektřiny – elektrický náboj – který je původcem jak elektrických, tak magnetických sil, nám jaksi vysublimoval a přeměnil se v podstatě na schopnost elektronu, resp. protonu emitovat do svého okolí fotony a zároveň při srážce s fotony, které bloudí prostorem, tyto pohlcovat. Z toho vyplývá, že jde o jistou specifickou vlastnost *hmotné částice*, v tomto případě elektronu. Interakci mezi částicemi obdařenými touto podivuhodnou vlastností pak nazýváme interakcí elektromagnetickou a foton vystupuje jako částice zprostředkující tuto interakci. Elektrické a magnetické síly, které tuto interakci charakterizují, jsou speciálním případem tzv. elektromagnetických sil představujících jeden ze čtyř základních typů sil ovládajících celý náš vesmír.⁵²

Docházíme tedy k závěru, že magnetické síly a jevy s nimi související jsou jedním z projevů elektromagnetické interakce mezi částicemi, které tak jako elektron jsou *schopny vysílat a pohlcovat fotony*.

V podstatě jsme tedy u konce svého putování za objasněním původu magnetismu. Rozhlédněme se však, kde jsme se to octli. Kvantová elektrodynamika nás zavedla z našeho každodenního světa, ve kterém jsme se zvykli spoléhat na svoje smysly a běžné vnímání souvislostí, do světa atomů a elementárních částic, ve kterém již mnohé z toho přestává platit. Vždyť i klasická elektrodynamika Maxwella a Lorenze, která beze změn prošla sítím speciální relativity a podle zkušeností spolehlivě platí i na tak malé vzdálenosti, které jsou srovnatelné s velikostí atomového jádra $\sim 10^{-10}$ cm,⁵³ musela být posléze u dějů odehrávajících

⁵¹ Pravděpodobnost vyzáření či pohlcení fotonu *protonem* je co do velikosti *stejná*, ale vazba má opačné znaménko. To souhlasí s opačným tj. kladným nábojem protonu. V té souvislosti uveďme, že např. v atomu vodíku, který se skládá z jednoho protonu jakožto jádra a jednoho elektronu, je to právě neustálá výměna fotonů mezi jádrem a elektronem, která vytváří přitažlivou vazbu mezi nimi, a ta udržuje atom v rovnováze.

⁵² Dalšími jsou silné a slabé síly jaderné a síly gravitační.

⁵³ Zákonů elektromagnetického pole lze běžně používat např. pro přitahování a odpuzování částic v atomech vně jádra, a to i při aplikaci kvantové mechaniky.

se na ještě menších vzdálenostech nahrazena kvantovou elektrodynamikou. Mám tu na mysli např. srážky mezi částicemi a jejich interakci na velmi krátkou vzdálenost, mechanismus udržování stability atomů vzájemným působením mezi elektrony a protony v jádře a v neposlední řadě otázku *magnetického momentu* elementárních částic, kterými jsou především základní stavební kameny všech hmotných objektů našeho běžného života – elektron, proton a neutron.⁵⁴ Několik slov k tomuto tématu:

Začneme s elektronem. Když byl objeven spin elektronu, resp. jemu příslušný magnetický moment, doprovázelo ho překvapení: proti očekávání byl poměr magnetického momentu k momentu mechanickému u spinu dvojnásobný ve srovnání s orbitálním momentem elektronu. Tuto záhadu v podstatě vysvětlil záhy na to Dirac v rámci své *relativistické* kvantové teorie elektronu. Označíme-li spinový magnetický moment plynoucí z Diracovy teorie jako *jednotkový* – v podstatě je to 1 Bohrův magneton μ_B (pozn. 35) – můžeme experimentálně kontrolovat, do jaké míry je teorie přesná. První přesná měření byla provedena v době, kdy se rodila kvantová elektrodynamika. Experiment dával soustavně hodnotu zhruba o 0,001 větší, přesněji 1,00118(3). Po prvních neúspěšných pokusech se tuto odchylku podařilo s velkou přesností spočítat pomocí *nové teorie* – kvantové elektrodynamiky.⁵⁵

Protony a neutrony představují základní stavební kameny *jader* atomů. Podle běžných představ protony nesou *kladný* elektrický náboj velikostí rovný náboji elektronů (vzpomeňme na přesnou rovnováhu mezi kladnými a zápornými elektrony v našem hmotném světě!) a jejich počet v jádře určuje jeho celkový (kladný) elektrický náboj. Z hlediska kvantové mechaniky je proton částicí se spinem $\frac{1}{2}$ tak jako elektron a proto velikost jeho *mechanického* spinového momentu bude rovněž stejná. Naproti tomu jeho *magnetický* spinový moment by měl být v poměru hmotností obou částic tj. přibližně 1836krát menší než magneton Bohrův⁵⁶. Považujeme-li jej za jednotku jaderného magnetizmu, očekávali bychom, že experimentálně zjištěný magnetický moment protonu vyjádřený v těchto “jaderných magnetonech” bude při nejmenším velmi blízko 1. Výsledek 2,79 se ovšem velmi liší od tohoto očekávání a vzniklý rozpor nedokáže vysvětlit ani kvantová elektrodynamika.

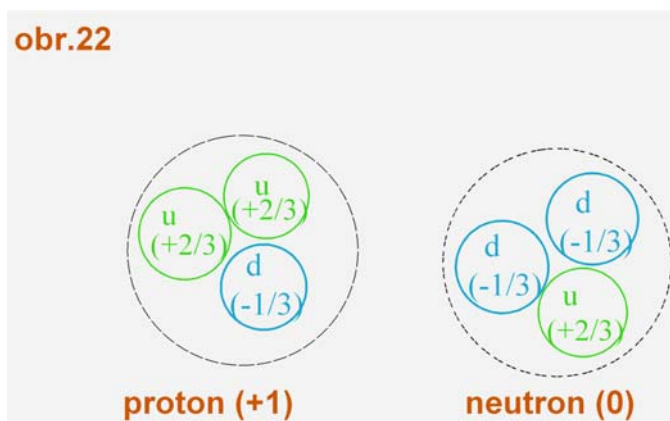
Ještě možná větší problém znamená neutron. Jako elektricky nenabitá částice měl by mít magnetický moment rovný nule. Místo toho byl u něj zjištěn magnetický moment $\sim 1,91$ (vyjádřeno v jednotkách odvozených obdobným způsobem jako u protonu).

Vysvětlení přišlo až počátkem 70tých let a opíralo se o nespočetné pokusy se srážkami vysoce energetických částic na velkých urychlovačích. Ukázalo se, že ani proton ani neutron nejsou v pravém smyslu „elementárními“ částicemi, ale že jsou složeny z menších částic či stavebních kamenů – kvarků. Kvarků je několik druhů. Jsou to vesměs částice se spinem $\frac{1}{2}$ a co je významné, jsou elektricky nabitě! Jejich náboj je buď $+(2/3)e$, nebo $-(1/3)e$. Na obr. 22 je schematicky znázorněna kvarková struktura protonu a neutronu: obě částice mají stejný *počet* kvarků (3), ty se ovšem liší elektrickým nábojem. Mj. je odtud patrné, jak se v případě neutronů náboje kvarků kompenzují, takže neutron se jako částice *navenek* jeví jako elektricky nenabitý.

⁵⁴ Čtenáři, který si přeje seznámit se se základy kvantové elektrodynamiky na populární úrovni, vřele doporučuji knížku Richarda P. Feynmana, jednoho z tvůrců této teorie, *The Strange Theory of Light and Matter* z r. 1985, která vyšla i v českém překladu [25].

⁵⁵ Pozdější experimenty na jedné straně a zpřesnění teoretických výpočtů na základě kvantové elektrodynamiky na straně druhé dosáhly až pohádkové shody na více než 9 desetinných míst.

⁵⁶ viz pozn. 35). Názorně to ukazuje, proč je jaderný příspěvek k magnetismu látek zanedbatelně malý.



Obr. 22 Kvarková struktura protonu a neutronu.

Pokud jde o magnetický moment protonu mohlo by se na první pohled zdát, že stačí vhodně kombinovat spiny kvarků, tj. jejich orientaci, tak, aby výsledek odpovídal jeho spinu, který je roven rovněž $\frac{1}{2}$. Uvážíme-li, že magnetický moment je na jedné straně co do velikosti úměrný poměru *el. náboj/hmotnost* a jeho orientace je dána znaménkem elektrického náboje, mohli bychom se tak zdánlivě lehce dostat k hodnotám pro magnetický moment protonu, které jsou podstatně větší než 1 jaderný magneton, dokonce např. ~ 3 . Ve skutečnosti je ovšem situace natolik komplikovaná, že od podobných unáhlených soudů je lépe upustit. V čem jsou hlavní potíže:

- Kvarky vytvářející proton nejsou volnými částicemi: jsou navzájem vázány velmi silnou interakcí, kterou zprostředkovávají tzv. gluony, částice se spinem 1, které v případě těchto tzv. *silných interakcí* plní podobnou úlohu jako fotony u interakce elektromagnetické.
- Jak ukázaly experimenty provedené koncem 80. let v CERNu, které sledovaly rozptyl elektronů při jejich srážkách s protony, lze s velkou pravděpodobností připsat jen menší část spinu protonu přímo spinovým momentům kvarků.
- Skutečnost, že se kvarky i gluony zřejmě pohybují v celém objemu protonu, tedy i mimo jeho střed, naznačuje, že k výslednému „spinu“ protonu pravděpodobně mohou přispívat i výraznými „orbitálními“ příspěvky.⁵⁷
- Ocitáme se tak v přímém kontaktu se současnou vědou a celá problematika spinu protonu je evidentně dosud nedořešena.

Se stejnými problémy se setkáme i u neutronu. I zde by bylo možné najít kombinaci kvarků a jejich spinů tak, aby výsledný „spin“ neutronu byl $\frac{1}{2}$ a zároveň jeho magnetický moment ~ 2 . Na druhé straně však platí všechny důvody, které jsme zmínili v souvislosti s protonem, které zpochybňují takový postup.

Cítíme, že se ocitáme v jiném světě, než na jaký jsme byli zvyklí. Přítomnost daleko větších jaderných sil, které udržují stabilitu protonu či neutronu a řádově převyšují síly elektromagnetické, se ve světě částic stávají rozhodujícím činitelem, který určuje stav částic a odsunuje elektromagnetické efekty jaksí na okraj dění. Navíc se ukazuje, že ani naznačené problémy týkající se spinu a magnetického momentu protonu a neutronu, ač na první pohled jednoduché, stále ještě nejsou beze zbytku dořešeny. Dotkli jsme se tedy skutečné *současnosti* fyziky a je čas naše putování *historií* magnetismu ukončit.

⁵⁷ Z uvedeného je patrné, že „spin“ protonu není spinem částice v obvyklém smyslu, jako je např. spin elektronu; jde o celkový moment hybnosti složený pravděpodobně z podstatně různorodých příspěvků.

Dovětek

V předchozích třech kapitolách jsme sledovali, jak se v průběhu staletí vyvíjel názor na podstatu a původ jednoho z nejstarších fyzikálních jevů - magnetismu. Tento vývoj byl pochopitelně neoddelitelně spojen s pokrokem celé fyziky, s odkrýváním jejích základních zákonů a vytvářením jim odpovídajících pojmů a představ. Vždyť elektromagnetická interakce, pro niž magnetismus představuje jeden ze základních charakteristických projevů, patří mezi čtyři hlavní interakce, které ovládají náš vesmír! A je to právě ona, která je zodpovědná za tu neuvěřitelnou rozmanitost hmotného světa, který nás obklopuje.

Nepřekvapí proto, že se magnetismus, podobně jako je tomu u každého základního fyzikálního a obecně vůbec vědeckého oboru, počal postupem času dělit na řadu speciálních podoborů či disciplín. Tento proces je znázorněn v obr. 23 “stromem života” magnetismu, který svými kořeny vyrůstá ze starověkých objevů: magnetitu a kompasu. První boční větev je důsledkem objevu zemského magnetismu (Peregrinus, Gilbert) a směřuje k moderním oborům zabývajícím se nejen projevy magnetismu v historii a současnosti naší planety, ale magnetismem jako důležitým fenoménem astrofyziky.

Následuje etapa elektromagnetismu, vzájemně propojující magnetické a elektrické jevy: umožňuje důležité přesahy do široké oblasti technických disciplín, ale zároveň i nesmírně obohacuje experimentální metodiku magnetismu samého, čímž umožňuje nové pohledy na jeho podstatu; vytváří tak i základy nových podoborů, které nalézají bohaté uplatnění v dalších vědách jako chemie či medicína – zejména tu mám na mysli magnetickou rezonanci, elektronovou či jadernou, a s ní související metody (např. Mössbauerovu spektroskopii). Velmi starým odvětvím je i studium permanentních magnetů a procesů magnetování a přemagnetování, které jeví charakteristickou hysterezi (hysterezní smyčka) a rozhodují o vlastnostech a kvalitě magnetů.

Poté, co se elektromagnetismus stal všeobecně přijatým základem a východiskem pro chápání magnetických jevů v rámci klasické fyziky (2. pol. 19. století), soustředila se pozornost na samu podstatu: nejprve Einsteinova teorie relativity odhaluje skutečnost, že magnetická síla není nic jiného, než relativistická korekce elektrických sil působících mezi pohybujícími se elektricky nabitými hmotnými objekty, a krátce poté revoluční změny v poznání struktury hmoty (objevy elektronu, jeho spinu a dalších částic, postupné zpřesňování představ o struktuře atomů a molekul, vznik nové kvantové teorie) zásadně ovlivňují další vývoj magnetismu. Dosavadní mohutný kmen našeho magnetického „stromu poznání“ se rozvětňuje, nastupuje období pronikání do tajů mikrosvěta. Tam, kde ještě lze použít představy o spojitosti magnetických veličin jako je magnetizace (např. jevy odehrávající se na vzdálenosti řádu $\sim 1 \mu\text{m}$), se vychází z tzv. teorie mikromagnetismu. Patří sem např. zkoumání doménových struktur ve feromagnetických látkách a studium magnetizačních procesů. Na opačném pólu je svět částic (elektron, proton a další částice, včetně izolovaných atomů a molekul). Hlavní proud však je tvořen zkoumáním magnetismu pevných (obecněji kondenzovaných) látek. Dohromady tyto tři zmíněné řekněme stále ještě kmeny, dobře patrné na našem obrázku, tvoří přirozené pokračování kmene původního a dále se rozvětvují, případně i propojují, a vytvářejí bohatou korunu našeho stromu. I když některé haluze čas od času se vyčerpávají a uvadají, jejich místo většinou zaplňují nové, čerstvě vyrostlé.



obr.23

Obr. 23 Jak se magnetismus, který od samého počátku představoval jeden ze základních fyzikálních jevů, postupně rozvinul v plejádě specializovaných disciplín.

Ve druhé části, která, jak doufám, záhy doplní dosavadní výklad, se budu některými ze speciálních tématických okruhů magnetismu zabývat – a to jak těmi klasickými, tak i takovými, které představují priority současného zájmu. Důležitým kritériem při jejich výběru bude i hledisko praktických aplikací.

Poděkování

Je mi milou povinností závěrem poděkovat všem, kdo mně při přípravě a konečné realizaci této stati pomáhali: kolegům a přátelům z Fyzikálního ústavu AV ČR Miroslavu Maryškovi, Zdeňku Šimšovi, Petru Zavadovi a Karlu Závětovi za cenné podněty, připomínky a technickou pomoc, Ing. Janu Švábovi za realizaci většiny obrázků a v neposlední řadě paní Ludmile Nigrínové, sekretářce oddělení magnetik a supravodičů ústavu, která s velikou obětavostí průběžně přepisovala stránky mého textu a se vzácnou ochotou je podle mých přání znovu a znovu upravovala až do této konečné podoby. Všem patří můj hluboký dík.

Literatura

- [1] viz např. Encyklopedie Antiky, Academia Praha 1974
- [2] P.A. Schilp (ed.): Albert Einstein, Philosopher-Scientist, Harper and Row, New York 1959, vol. I, str. 9
- [3] D.C. Mattis: The theory of Magnetism I, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1981
Chapter 1.
- [4] M. Blackman, Contemp. Phys., 1983, 24, 319-331
- [5] J. Needham: Science and Civilization in China, Vol. 4 (1) Cambridge University Press 1962
Yu-Quing Yang, in Physics of Magnetic Materials, ed. W. Gorzkowski, K.H. Lachowicz and H. Szymczak, World Scientific, 1986, p. 4.
- [6] J.B. Carlson: Science 189 (1975), 753
J.H. Malstrom, Nature 259 (1976), 390
- [7] John Baptist Porta, Natural Magick (Naples 1589), přetisk 1. angl. vyd., Basic Books, Inc., New York
- [8] Po prvé publikováno: Chiswick Press, London 1600, novodobé vydání Gilbert Club, London 1900
- [9] Johannes Kepler, Neue Astronomie, něm. překlad a úvod Max Caspar, München, Berlin 1929
Ulrich Hoyer, Die Geschichte der Keplerschen Gesetze, Physikalische Blätter 27 (1971), 542
- [10] Arnold Sommerfeld: Elektrodynamik, Vorlesungen über theoretische Physik Bd III, Akademische Verlagsgesellschaft Geest and Portis K-G, Leipzig 1949
- [11] F. Cajori: A History of Physics, Dover, New York 1962, str. 102 (citováno podle Mattise [3])
- [12] R. Kolomý, Počátky studia elektromagnetických jevů. Vznik Ampèrovy elektrodynamiky; XXIII. Zborník dejín fyziky, Bratislava 2007, s. 49-66; HÚ SAV, odd. dejín ved a techniky. Viz od téhož autora ještě: Michael Faraday (1791-1867) – tvůrce nového fyzikálního obrazu světa, vyjde ve XXIV. Zborníku tamtéž. Dále od téhož autora několik článků v časopise Pokroky matematiky a fyziky, JČMF Praha.
- [13] James Clerk Maxwell, A. Treatise on Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford 1873
- [14] H.A. Lorentz, Versuch einer Theorie der elektr. und opt. Erscheinungen in bewegten Körpern, Leiden 1895, citováno podle [10]

- [15] D.L. Anderson, The Discovery of the Electron, Van Nostrand, Princeton, N.Y., 1964
- [16] H.A. Lorentz, Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern, Leiden 1895; Theory of Electrons, Teubner 1909. Viz též [10]
- [17] W. Gerlach, J. Stern, Z. Physik 9 (1922), 349
- [18] G. Uhlenbeck u. S. Goudsmit, Naturwiss., 13 (1925), 953
- [19] P. Curie, Oeuvres, Paris 1908
- [20] P. Langevin, Ann. Chim. Phys., (8) 5 (1905), 7; J. Phys. (4) 4 (1905), 678
- [21] P. Weiss, J. de Phys., (4) 6 (1907), 661
- [22] W.C. Elmore, Phys. Rev. 54 (1938), 309
- [23] J.H. Van Vleck, The Theory of Electric and Magnetic Susceptibilities, Oxford, 1932
- [24] E.C. Stoner, Magnetism and Matter, Methuen, London 1934
- [25] R.P. Feynman, Neobyčejná teorie světla a látky, Aurora, Praha 2001