

Ohlédnutí za obdobím heuristického poznávání ve fyzice

BOHUMIL VYBÍRAL

Přírodovědecká fakulta, Univerzita Hradec Králové

Článek pojednává o klíčovém poznávání člověka v letech 1785 až 1905, které v průběhu těchto 120 let znamenalo výrazný pokrok v uvedených oblastech: v propojení a obohacení nauky o elektřině a magnetismu, ve vytvoření teorie elektromagnetického pole, v předpovědi a prokázání existence elektromagnetického vlnění/záření a jejího propojení s naukou o světle, přičemž vše vyústilo ve speciální relativitu, která přinesla výraznou změnu poznatků o prostoru a čase a energii, viz [1]–[6].

Nové poznatky o elektromagnetismu daly již od poloviny 19. století vznik elektrotechnickému průmyslu s výrobou generátorů elektrického proudu, elektromotorů, transformátorů a postupné elektrifikaci celé společnosti [1]. Uvedenému 120letému období předcházelo od počátku 17. století dlouhé období kvalitativních poznatků o elektřině a magnetismu [6].

Po roce 1905 se teoretické poznatky dále prohlubovaly, spojené zejména s objevem kvantování energie a navazující kvantové teorie, nauky o atomu a jeho jádru a obecné relativitě. V oblasti aplikace to byla zejména stavba urychlovačů částic, rozvoj sdělovací techniky, telekomunikací, mikroelektroniky, výpočetní techniky a po roce 1960 laserové techniky aj.

Nauka o elektřině a magnetismu ([3], [6])

V 17. a 18. století byly elektřina a magnetismus zkoumány v podstatě jen kvalitativně a na sobě nezávisle. Roku 1785 francouzský fyzik (původně vojenský technik) *Charles Augustin de Coulomb* (1736–1806), na základě měření torzními váhami vlastní konstrukce, formuloval zákony o elektrostatickém a magnetostatickém silovém působení. Výsledky zobecnil německý matematik a fyzik *Carl Fridrich Gauss* (1777–1855); označují se jako *Gaussovy zákony elektrostatiky a magnetostatiky*:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dV, \quad \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0. \quad (1)$$

První zákon je formulován pro elektrický náboj, který je rozložen s hustotou ρ v objemu V , ohraničeného plochou S . Druhý zákon je vyjádřením skutečnosti, že neexistují samostatné magnetické náboje. Mezi indukčními \mathbf{D} , \mathbf{B} a intenzitami \mathbf{E} , \mathbf{H} platí materiálové vztahy, které v případě vakua mají tvar

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}. \quad (2)$$

Mezi permitivitou ε_0 a permeabilitou μ_0 vakua platí významný vztah

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}, \quad (3)$$

kde c je univerzální konstanta – rychlost světla ve vakuu.

Významným počinem byl objev elektrochemického potenciálu kovů a navazující vynález zdroje stejnosměrného napětí z let 1799/1800 italským fyzikem *Alessandro Voltou* (1745–1827). To byl nutný předpoklad k uskutečnění jednoduchého kvalitativního experimentu, provedeného roku 1820 dánským fyzikem *Hansem Christianem Ørstedem* (1777–1851): v okolí vodiče protékaného proudem vzniká magnetické pole. Tím byla objevena souvislost elektřiny a magnetismu.

Poté následovalo plodné desetiletí rozvoje elektrodynamiky – na základě kvantitativních experimentů byly formulovány její zákony. Roku 1821 formuloval francouzský matematik *Pierre Simon de Laplace* (1749–1827) diferenciální vztah pro element $d\mathbf{H}$ intenzity magnetického pole, vybuzeného elementárním proudovodičem $I d\mathbf{l}$. Využil experimentální výsledky, k nimž dospěli jeho kolegové *Jean-Baptiste Biot* (1774–1862) a *Félix Savart* (1791–1841). Zákon se označuje jako Biotův–Savartův–Laplaceův. Z něj lze odvodit jednoduchý výsledek pro velikost intenzity magnetického pole ve vzdálenosti r od nekonečně dlouhého přímého vodiče, protékaného proudem I , který je důležitý pro další zobecnění: $H = I/2\pi r$, neboť se z něj vychází při formulaci zákona celkového proudu. Prochází-li plochou S ohraničenou křivkou C spojitě rozložený vodivý proud o hustotě \mathbf{j} , platí pro magnetomotorické napětí

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}. \quad (4)$$

Na základě důmyslných experimentů formuloval roku 1827 francouzský matematik a fyzik *André Marie Ampère* (1775–1836) zákon o vzájemném silovém působení dvou mimoběžných elementárních proudovodičů, který se uvádí v jednoduché formě pro jeden proudový element, nacházející se

ve vnějším poli \mathbf{B}

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}. \quad (5)$$

Strukturu základních zákonů elektrodynamiky roku 1831 završil anglický samouk fyziky a chemie *Michael Faraday* (1791–1867), když po dlouhodobém experimentování objevil elektromagnetickou indukci proudu v obvodě s časově proměnným magnetickým indukčním tokem Φ . Zákon elektromagnetické indukce má jednoduchý tvar $U_i = -d\Phi/dt$. Uvedeme jej v zobecněné formě pro elektromotorické napětí indukované v proudovém okruhu C , když rovinnou plochou o obsahu S , vymezeném křivkou C , probíhá časová změna magnetického pole o indukci \mathbf{B} (znaménko minus plyne ze zákona zachování energie při procesu indukce):

$$\int_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}. \quad (6)$$

K významným výsledkům experimentální éry elektrodynamiky patří i měření vzájemné vazby konstant ve vztahu (3), které roku 1852 provedl německý fyzik a elektroinženýr *Wilhelm Eduard Weber* (1804–1891). Tím potvrdil, že rychlost světla ve vakuu je univerzální konstanta. To je jeden ze základních pilířů speciální relativity, formulované až 53 let poté. Když na počátku druhé poloviny 20. století byla hodnota c změřena s přesností na devět platných číslic, tak roku 1976 Mezinárodní astronomická unie (IAU) rozhodla, že konstanta c bude mít neměnnou hodnotu. Roku 1983 byla využita k definici jednoho metru. Rychlost světla ve vakuu je přesně

$$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (7)$$

Maxwellova syntéza: teorie elektromagnetického pole ([3], [5], [6])

Geniální skotský fyzik *James Clerk Maxwell* (1831–1879) provedl mezi roky 1855 až 1873 syntézu experimentálních poznatků z elektro-magnetismu (souhrnně publikované ve dvoudílné tisícistránkové monografii *A Treatise on Electricity and Magnetism*, London 1873). Shrnuł zde a podrobně rozpracoval a aplikoval experimentální poznatky, jejichž zobecněné formulace jsou v této stati uvedeny jako výrazy (1) až (6).

Intuitivně tehdy doplnil zákon celkového proudu (4) o posuvný (dnes Maxwellův) proud o hustotě \mathbf{j}_M , kterému rovněž přisoudil magnetické účinky. Pro určení \mathbf{j}_M vycházel z jednoduché úvahy, že proudové okruhy jsou uzavřené, i když jejich vodivá část je přerušena např. kondenzátorem, mezi jehož deskami je vakuum. Je-li na deskách o ploše S náboj Q , určíme

velikost indukce D užitím Gaussova zákona elektrostatiky (1) vlevo. Vektor elektrické indukce pole mezi deskami má velikost $D = Q/S$. Zkratujeme-li nabitý kondenzátor vodičem, pokračuje vodivý proud ve vodiči také ve vakuu mezi deskami jako Maxwellův proud o velikosti hustoty

$$j_M = \frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (8)$$

Maxwellovy rovnice se uvádějí buď v integrálním, nebo v diferenciálním tvaru. Integrální tvar je soustava rovnic (1), (2) a (4) – zde doplněná o hustotu j_M Maxwellova proudu. Důležitější je jejich diferenciální tvar, který uvedeme pomocí operátorů vektorové analýzy (div a rot), jež zavedl až po Maxwellově smrti geniální německý teoretický a experimentální fyzik *Heinrich Rudolf Hertz* (1857–1894). Hlavní Maxwellovy rovnice elektromagnetického pole mají v soustavě SI diferenciální tvar

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j}, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (9)$$

První rovnice je vyjádřením zákona celkového proudu (vycházejícího z experimentálního Biotova–Savartova–Laplaceova zákona), doplněná o hustotu Maxwellova proudu. Vyjadřuje, že magnetické pole je vírové a že jeho zdrojem je vodivý proud a proměnné elektrické pole. Druhá rovnice plyne z Coulombova zákona elektrostatiky, vyjadřuje Gaussův zákon elektrostatiky v diferenciálním tvaru a říká, že elektrické pole je zdrojové, přičemž zdrojem jsou nabitě částice. Třetí rovnice je diferenciální tvar Faradayova zákona elektromagnetické indukce a říká, že časově proměnné magnetické pole indukuje vírové elektrické pole. Čtvrtá rovnice je Gaussův zákon magnetostatiky a vyjadřuje skutečnost, že neexistují magnetické monopóly (a že myšlené magnetické indukční čáry tedy jsou uzavřené křivky).

Soustava hlavních rovnic se doplňuje *soustavou vedlejších Maxwellových rovnic*, k nimž patří lokální (diferenciální) tvar *Ohmova zákona*

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E},$$

kde γ je měrná vodivost (konduktivita prostředí). Dále sem patří vztahy mezi induklemi a intenzitami pro elektrické a magnetické pole; označují se jako *materiálové vztahy* pro izotropní nebo neizotropní prostředí, které pro izotropní homogenní prostředí mají jednoduchý tvar

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}.$$

Další vedlejší rovnicí je vztah pro *Lorentzovu sílu*, působící na částici s nábojem q , pohybující se v elektromagnetickém poli rychlostí \mathbf{v} :

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

a konečně je to vztah pro *hustotu elektromagnetické energie*, který má tvar

$$w = \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{B}}{2}.$$

Soustava se ještě doplňuje o *rovnici kontinuity* pro náboj a proud:

$$\operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{\partial \varrho}{\partial t} = 0.$$

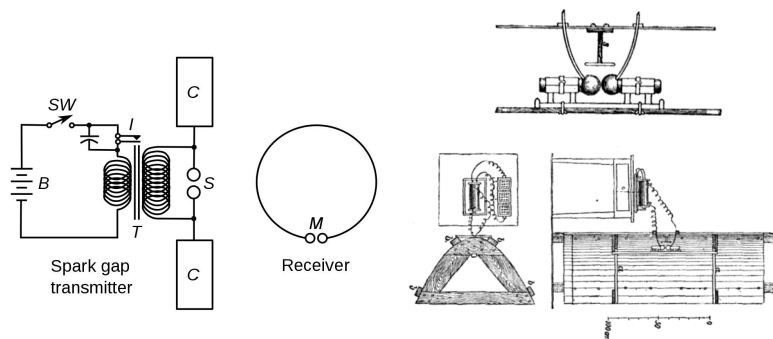
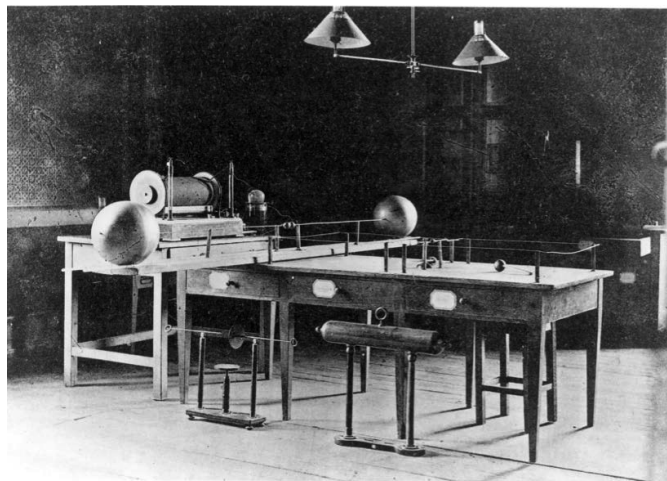
Vztah bezprostředně vyplývá z 1. a 2. rovnice hlavní soustavy. K Maxwellovým diferenciálními rovnicím se připojují *okrajové podmínky* pro hodnoty veličin na rozhraní prostředí.

Geniální intuitivní doplnění zákona celkového proudu o posuvný proud (8) přivedlo Maxwella matematickou cestou k *vlnovým rovnicím*. Pro zjednodušený případ, kdy se ve vyšetřovaném prostoru již nevyskytují náboje a proudy ($\varrho = 0, \mathbf{j} = \mathbf{0}$), mají vlnové rovnice např. pro intenzitu $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ v kartézské soustavě tvar

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (10)$$

Vlnová rovnice byla ve fyzice známa již koncem 18. století pro mechanické (akustické) vlnění a na začátku 19. století i pro světelné vlnění. Bylo známo, že konstanta u členu s druhou derivací podle času má význam převrácené hodnoty druhé mocniny rychlosti šíření vlnění. Maxwell tedy dospěl k poznatku, že elektromagnetické pole se šíří formou elektromagnetických vln a že, vzhledem k výrazu (3) má stejnou rychlost jako světlo. Matematickou analýzou zjistil, že tyto vlny jsou příčné (jako u světla, na rozdíl od akustických vln, které jsou podélné). Zjistil, že vektory veličin \mathbf{B} a \mathbf{E} jsou k sobě kolmé. Analyzoval rovněž chování elektromagnetických vln na rozhraní dvou prostředí s rozdílnými rychlostmi šíření. Využitím okrajové podmínky o rovnosti tečné složky intenzity \mathbf{E} na obou stranách rozhraní zjistil, že se elektromagnetické vlnění odráží a láme tak, že rovina odrazu a lomu je totožná s rovinou dopadu a že úhel odrazu je roven úhlu dopadu a že úhel lomu splňuje Snelliův zákon, známý z optiky. Usoudil, že světlo je druh elektromagnetického vlnění.

Verifikačního experimentu se již nedožil. Provedl jej roku 1887 H. R. Hertz (8 roků po Maxwellově smrti). Elektromagnetické vlnění o délce asi 4 m generoval jednoduchým vysílačem a přijímačem – oscilátorem s jiskříštěm (obr. 1).



Obr. 1 Hertzovy experimenty z roku 1887 s elektromagnetickými vlnami o vlnové délce asi 4 m. Fotografie stolu se sestavou experimentu, který prokázal existenci vlnění a platnost zákona odrazu (foto: H. Hertz). Schéma a náčrt ukazují vysílač a přijímač, mající formu jednoduchého oscilátoru s jiskříštěm jako emitorem a detektorem vlnění.

Prokázal jejich odraz, lom (použil rozměrný parafinový hranol) a polarizaci. K tomu je třeba poznamenat, že za krátký život 36 let toho dokázal hodně, také objevil vnější fotoelektrický jev a teoretické oblasti dal Ma-

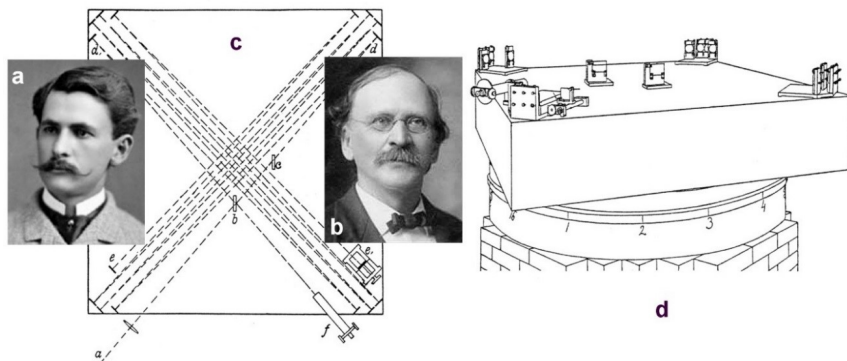
xwellově teorii srozumitelnou formu zavedením vektorových diferenciálních operátorů a Maxwellovu teorii dále rozvinul. Již ve 26 letech se stal profesorem teoretické fyziky.

Nový pohled na světlo a marné hledání éteru ([3]–[5])

Geniální Maxwellova hypotéza, že světlo je elektromagnetické vlnění o vlnových délkách (380 až 780) nm, jej přivedla k vypracování *elektromagnetické teorie světla*, což současně znamenalo nejen propojení elektřiny a magnetismu, ale i optiky. Bohužel od optiků, objevitelů vlnového charakteru světla (*T. Younga* a *A. J. Fresnela*, 1800) přijal také hypotézu o *éteru* – jakémsi materiálním prostředí, potřebném k šíření světla. Fyzici totiž tehdy vycházeli z poznatku mechanického vlnění, že např. zvuk potřebuje k šíření vzduch. Z teorie elastických vln (známé již na konci 18. století) pro rychlost podélných vln v jednorozměrném pružném kontinuu o hustotě ρ a Youngovu modulu pružnosti E vychází výraz $v = \sqrt{E/\rho}$, např. pro ocel má hodnotu $v \doteq 5,1 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, která je o 5 řádů menší než rychlost světla c . Na hypotetický éter (prostupující látkami, např. sklem) by to kladlo zcela protichůdné požadavky: veliký modul E při velmi malé hustotě ρ .

Experimentální hledání éteru a jeho vztahu k prostoru trvalo téměř celé 19. století (podrobněji např. [4]). Některé experimenty dávaly vzájemně protichůdné výsledky. Rozhodnout měl experiment z roku 1881, který navrhl a provedl americký doktorand v Německu *Albert Abraham Michelson* (1852–1931), avšak experiment nic nerozhodl. Usuzovalo se, že jsou malé optické dráhy interferujících paprsků (dráha byla 1 m, přičemž ideální by byla 11 m). Proto spolu s *Edwardem W. Morleyem* (1838–1923) zdokonalil interferometr (obr. 2) a experiment roku 1887 provedli znovu. K interferenční záměně světlých proužků za tmavé však nedošlo (očekávaný dráhový posun paprsku byl $0,45\lambda$). Jeden z možných výkladů již tehdy byl, že nastává kontrakce ramen ve směru orbitální rychlosti Země vůči éteru, spojeného s inerciální heliocentrickou soustavou, ztotožňovanou s absolutním newtonovským prostorem. Experiment je považován za největší negativní experiment 19. století. Nizozemského teoretika *Hendrika Antoona Lorentze* (1853–1928) přivedl k vyslovení teorému, že Maxwellovy rovnice elektromagnetického pole jsou kovariantní (neměnné) vůči inerciálním vztahným soustavám spojených s éterem (hypotézu éteru nikdy neopustil). Z podmínky kovariance roku 1895 odvodil transformace prostorčasových souřadnic – *Lorentzovy transformační vztahy* (současný tvar

je z roku 1904), které korigují Galileovu klasickou transformaci. Problém éteru vyřešen nebyl.



Obr. 2 Michelsonův–Morleyův experiment (1887): a) A. A. Michelson, b) E. W. Morley. c) Chod paprsků v interferometru (při experimentu měly paprsky v jedné uhlopříčce směr orbitální rychlosti Země kolem Slunce $2,97 \cdot 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, přičemž se očekávalo, že v důsledku změněné rychlosti světla vůči éteru vznikne dráhový posun vůči paprskům v druhé, k ní kolmé úhlopříčce). d) Konstrukce interferometru (masivní kamenná deska se zrcátky plovala ve vaně se rtutí k jejímu snadnému otočení – k záměně směru paprsků). Zdroje: [7]–[9]

Východisko z krize poznávání: Einsteinova speciální relativita ([4], [5])

Zcela nový přístup k teorii elektromagnetického pole, neovlivněný hypotézou éteru (ani Michelsonovým–Morleyovým pokusem) zvolil německý fyzik *Albert Einstein* (1879–1955). Roku 1905 ve dvou článcích formuloval *speciální teorii relativity*. Výchozí principy jsou:

Princip konstantní rychlosti světla ve vakuu, univerzální fyzikální konstanty c , viz výrazy (3) a (7).

Speciální princip relativity: Všechny inerciální vztažné soustavy jsou rovnocenné pro popis všech fyzikálních jevů (tedy včetně elektromagnetických).

Cílem tohoto článku není zabývat se speciální relativitou (zájemce lze odkázat na četnou literaturu, např. na publikaci [4]). Ukážeme zde jen na její podstatné výsledky, dokumentující završení 120letého vývoje sledovaného poznávání elektromagnetismu.

Při odvození prostoročasových transformačních vztahů Einstein vyšel z jednoduché úvahy. Mějme dvě inerciální vztažné soustavy $S(x, y, z, t)$ a

$S'(x', y', z', t')$, které se vůči sobě pohybují tak, že soustava S' má vůči S konstantní rychlost v , přičemž osy x, x' splývají a ostatní dvě osy zůstávají rovnoběžné. Představme si, že v okamžiku $t' = t = 0$, kdy počátky obou soustav splývají, se vyše z počátku signál. Podle principu relativity se v obou soustavách za dobu t, t' rozšíří na kulové vlnoplochy: $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0$ (v S) a $x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 = 0$ (v S'). Těmto rovnicím vyhovuje lineární transformace $x' = \gamma(x - vt)$, kde γ je *relativistický koeficient*, přičemž čas je relativní ($t' \neq t$). Poměrně jednoduchým algebraickým výpočtem lze transformaci dořešit. *Lorentzovy transformační vztahy* jsou:

$$x' = \gamma(x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \quad (11)$$

přičemž

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c} \quad (12)$$

Pro opačný přechod (od S' k S) se zamění nečárkované veličiny za čárkované a naopak, přičemž $v' = -v$ a $v'^2 = v^2$ a tudíž také $\gamma' = \gamma$, neboť z principu je $c' = c$.

Výsledky ukazují vzájemnou vazbu souřadnic prostoru a času, především relativnost času. Vyplyvá z nich relativnost současnosti, mezní rychlost přenosu fyzikální interakce (rychlostí c), kontrakce délky

$$l = l_0/\gamma = l_0\sqrt{1 - \beta^2},$$

dilatace času

$$T = \gamma T_0 = T_0/\sqrt{1 - \beta^2},$$

vzorce pro skládání rychlostí (při součtu rychlostí nelze překročit mezní rychlost c) a také již v 1. Einsteinově článku popsaný relativistický Dopplerův jev.

Relativistická dynamika výrazně koriguje Newtonovu klasickou dynamiku. Významné jsou výsledky pro relativistickou pohybovou rovnici, hmotnost a energii:

$$F = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}), \quad m = \gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad E = mc^2. \quad (13)$$

Hybnost $\mathbf{p} = m\mathbf{v} = \gamma m_0\mathbf{v}$ roste, na rozdíl od klasické mechaniky, se zvětšující se rychlostí v nelineárně a pro $v \rightarrow c$ je $p \rightarrow \infty$. *Pohybová rovnice*

zůstává v původním Newtonově tvaru, avšak derivuje se hybnost, jako součin dvou funkcí rychlosti. *Relativistická hmotnost* $m = \gamma m_0$, jako míra setrvačných účinků tělesa (částice), s rychlostí \mathbf{v} roste z klidové hodnoty m_0 a v limitní situaci $v \rightarrow c$ je $m \rightarrow \infty$, protože konečnou silou již nelze zvětšit rychlost na mezní hodnotu c . Energie $E = mc^2$ tělesa (částice) má klidovou hodnotu $E_0 = m_0 c^2$ (odvození vztahu je v následujícím odstavci).

Einstein problémem „éteru“ nebyl zatížen a pro svou teorii éter nepotřeboval. Za prostředí potřebné pro šíření elektromagnetického vlnění relativita považuje prostoročas, který je dán existencí materiálních objektů v celém vesmíru.

Speciální relativita významně přispěla k teorii elektromagnetického pole. V důsledku principu relativity mají Maxwellovy rovnice v soustavách S a S' sice stejný tvar (rovnice jsou kovariantní), avšak mění se hodnoty kartézských složek intenzity \mathbf{E} a indukce \mathbf{B} v obou soustavách. Hodnoty pro elektrickou a magnetickou složku jsou vzájemně závislé (jsou funkcí rychlosti v). Pole je nejjednodušší, je-li částice o náboji q v soustavě S v klidu – vytváří elektrostatické pole. Při pozorování ze soustavy S' přistupují složky indukce magnetického pole (částice se vůči S' pohybuje, vytváří elektrický proud a je nejen zdrojem elektrického, ale i magnetického pole). Lze říci, že magnetické pole je relativistický efekt elektrického pole. Užitím relativistického vzorce pro transformaci síly lze z Coulombova zákona odvodit zákony elektrodynamiky: Biotův–Savartův–Laplaceův zákon a zákon Ampérův (viz např. [4]).

Vztah mezi energií a hmotností

Nechť se v inerciální vztahné soustavě nachází objekt, např. volná částice, o klidové hmotnosti m_0 . Částice nechť se v této soustavě nachází v klidu ($v_0 = 0$). Má-li dojít ke změně pohybového stavu, je nutné na ni působit silou \mathbf{F} , která konáním práce jí udělí zrychlení. Uvažujme element vykonané dráhy $d\mathbf{l}$. Protože ke změně pohybového stavu došlo ze stavu klidu, mají vektory \mathbf{F} , $d\mathbf{l}$ stejný směr, výpočet lze provést skalárně. Pak element práce dW a element přírůstku kinetické energie dE_k je

$$\begin{aligned} dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = F dl &= \frac{dp}{dt} dl = v d(mv) = \\ &= v(v dm + m dv) = mv dv + v^2 dm = dE_k. \end{aligned} \quad (14)$$

Pro pokračování ve výpočtu má rozhodující význam veličina hmotnost m .

a) Klasická fyzika hmotnost chápe jako veličinu, která je mírou setrvačných a gravitačních účinků těles a současně také jako míru množství látky. Tedy $m = \text{konst.}$, a tudíž $dm = 0$. Pak z (13) plyne

$$dW = mv \, dv = d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = dE_k, \quad (15)$$

neboli

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

což je klasický výraz pro výpočet kinetické energie.

b) *Relativistická fyzika* je vázaná principem konstantní rychlosti světla ve vakuu c , která je současně mezní rychlostí všech materiálních objektů. Důsledkem je vzrůst hmotnosti ve vztahné inerciální soustavě s rychlostí v podle vztahu

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad (16)$$

Z toho plyne $m^2(c^2 - v^2) = m_0^2c^2 = \text{konst.}$ Diferencováním vztahu dostaneme

$$mv \, dv + v^2 \, dm = c^2 \, dm.$$

Dosažením tohoto vztahu do (13) dostaneme pro element kinetické energie vztah

$$dE_k = c^2 \, dm, \quad (17)$$

neboli přírůstek kinetické energie částice se projeví jako přírůstek její hmotnosti. Pokud je částice urychlena z klidového stavu, kdy je $v = 0$ a částice má klidovou hmotnost m_0 , do stavu s rychlostí $v < c$, pak po integraci vztahu (16) platí

$$E_k = (m - m_0)c^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1\right) m_0c^2. \quad (18)$$

Neboli $E = E_0 + E_k$, kde

$$E = mc^2, \quad E_0 = m_0c^2 \quad (19)$$

je *celková energie* a *klidová energie* částice (tělesa). Výpočet změny energiového stavu jsme provedli užitím elementu mechanické práce. Dosažené poznatky (18) relativistická fyzika zobecňuje i na jiné druhy změn energiových stavů. Pohled na energii z hlediska obecné relativity je složitější; je mimo rámec tohoto příspěvku.



Obr. 3 Hlavní tvůrci nauky o elektřině a magnetismu a teorie elektromagnetického pole: a) Ch. A. Coulomb, b) A. Volta, c) H. Ch. Ørsted, d) A. M. Ampère, e) M. Faraday, f) J. C. Maxwell, g) H. R. Hertz, h) A. Einstein. Zdroje: [10]–[17]

Literatura a zdroje vyobrazení

- [1] *Vybíral, B.*: Technické aplikace fyziky. Gaudeamus, Hradec Králové, 2019.
- [2] *Vybíral, B.*: Od elektromagnetismu ke speciální teorii relativity – poznámky k historii. In: 7. konference o matematice a fyzice na vysokých školách technických, Brno 22. září 2011, Univerzita obrany, Brno, 2011, s. 11–32.
- [3] *Vybíral, B.*: Teorie elektromagnetického pole. Pedagogická fakulta, Hradec Králové, 1984.
- [4] *Vybíral, B.*: Teorie relativity a gravitace. Gaudeamus, Hradec Králové, 2008.
- [5] *Votruba, V.*: Základy speciální teorie relativity. Academia, Praha, 1969.
- [6] *Vybíral, B.*: Kapitoly z experimentální fyziky. Gaudeamus, Hradec Králové, 2014.
- [7] *E. W. Morley*: http://www.epola.co.uk/epola_org/michelson_morley_3.jpg
- [8] *Michelsonův–Morleyův experiment 1*: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:On_the_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Luminiferous_Ether_-_Fig_4.png

- [9] *Michelsonův–Morleyův experiment 2*: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:On_the_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Luminiferous_Ether_-_Fig_3.png
- [10] *Ch. A. Coulomb*: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Coulomb.jpg>
- [11] *A. Volta*: https://akm-img-a-in.tosshub.com/indiatoday/volta_647_030516021229.jpg?Fsv4yWSxMYOBjN4TdriF2WL218MbQQr
- [12] *H. Ch. Ørsted*: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/79/%C3%98rsted.jpg/225px-%C3%98rsted.jpg>
- [13] *A. M. Ampère*: <http://www.geocities.ws/saladefisica9/biografias/ampere10.jpg>
- [14] *M. Faraday*: http://1.bp.blogspot.com/-MZy9hk5i_qs/T6DPZk8001I/AAAAAAAAAB4c/uEFI_WmrWYY/s1600/Michael%2BFaraday%2B%2BPhoto.jpg
- [15] *J. C. Maxwell*: https://usercontent2.hubstatic.com/13882069_f520.jpg
- [16] *H. R. Hertz*: <https://i.pinimg.com/originals/23/f6/9c/23f69c2ac734c5d2cfdffd8ddf1585d8.jpg>
- [17] *A. Einstein*: http://blogs.esa.int/orion/files/2013/07/Einstein_patentoffice.jpg

VPython/GlowScript Trinket ve výuce fyziky

JAN VÁLEK

Pedagogická fakulta, MU Brno

Vizuální stránka hraje ve společnosti v posledních několika letech velmi výraznou roli. To se podepisuje také na tom, že je kladen mnohem větší důraz na to, jak prezentovat informace, než jaké informace se prezentují. To je ale v přímém rozporu s tím, jak obrazovou reprezentaci vnímají přírodovědci. Ti kladou důraz na maximální přesnost a adekvátní množství sdělovaných informací. Didaktici mimo vědecké přesnosti požadují názorost přiměřenou mentální úrovni žáků.