

Jak jsem měřil (na) zeměkouli

IVO VOLF

Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové

Už od dob *J. Á. Komenského* je učitelům známo, jak je třeba vyučovat. Pedagogické zásady, které formuloval, usnadňují učitelům předávání vědomostí a samotným žákům jejich poznávací procesy. Říká se také, že velmi důležitý je prožitek. Během výuky je zapotřebí připravovat takové situace, v nichž je možno zapůsobit nejen na rozumovou, ale i na citovou stránku žáků. Důležitá je také samotná aktivita žáků v procesu poznávání. V současnosti má učitel fyziky k dispozici nejen mnoho vyučovacích metod, ale také promyšlené učební pomůcky. V posledních patnácti-dvaceti letech k nim přistoupily také počítače a internet.

Chtěl bych ukázat, jak mi internet pomohl tam, kde by se žáci pravděpodobně ztráceli jen v matematických vzorcích nebo se museli učit nazpaměť to, co přináší živá historie fyziky. Jde o měření rozměrů Země a měření vzdáleností a úhlů na povrchu Země, na jejichž základě pak jsou vytvářeny další metodické postupy. Namísto klasického „papírového“ atlasu map jsem použil internetové zdroje jako www.mapy.cz, www.Googleearth.com aj. Tento článek je „pracovní“ – nelze ho číst jako povídku, ale je nutno, abyste aktivně využívali internet a pokusili se dopracovat se ke stejným, nebo alespoň přibližně stejným hodnotám. Ostatně, v dětství jsem s mapou v ruce četl v podstatě nejen každý cestopis, ale každou knížku s místně lokalizovatelnými údaji.

Rozměry naší planety poprvé zjistili již ve starověku. Známý matematik, astronom a fyzik *Eratosthenes*, žijící v letech 276 až 194 př. n. l., byl správcem alexandrijské knihovny, jež obsahovala záznamy o tehdejších poznání lidstva. Měl tak přístup k záznamům o mnoha zajímavostech, včetně skutečnosti, že určitý den v roce se ve městě Syena (dnešní Aswan) slu-

neční paprsky odrážely od vodní hladiny ve velmi hlubokých studních – plyne z toho, že slunce bylo po několik minut v daném místě v zenitu. Je to možné, protože Syena leží v Egyptě, přesně na obratníku Raka. Paprsky tedy dopadají kolmo k tečné rovině v místě, kde je studna, a tedy sluneční paprsky dopadají ve směru spojnice středu slunečního kotouče a středu Země.

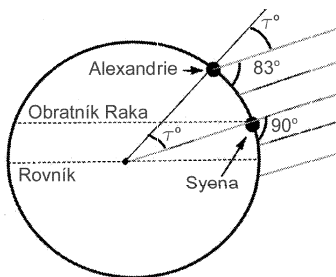
Dále zjistil, že ve stejný den v Alexandrii, která je severněji, vytvářejí sluneční paprsky kolem poledne u sloupů krátký stín; z délky stínu a výšky sloupu bylo možno vypočítat, že sluneční paprsky svírají s kolmicí dopadu úhel $7,2^\circ$, což představuje padesátinu plného úhlu 360° . Vzhledem k tomu, že sluneční paprsky dopadající z velké vzdálenosti od Slunce na povrch Země lze považovat za navzájem rovnoběžné, usoudil Eratosthenes, že stejný úhel svírají i průvodiče míst Syena a Alexandria ve vztažné soustavě spojené se středem Země. Stačilo pak jen zjistit vzdálenost obou míst měřenou po povrchu Země, vynásobit ji padesáti a získat tak délku kružnice, jejíž částí je uvedený oblouk. Délka kružnice se tehdy stanovila jako $22/7$ průměru kružnice. Naměřená vzdálenost se dnes odhaduje na 800 km (neví se přesně, jak velká byla měřicí jednotka, což podstatně může ovlivnit výsledek) a pro délku kružnice vychází asi 40 000 km. Tak toto čteme v historii fyziky nebo astronomie (obr. 1).

Problém 1: Zopakujte Eratosthenovo měření

K měření jsem použil fotomapy na www.Googleearth.com. Zjistil jsem, že obě místa neleží na stejném poledníku, a tak nutně vzniknou ve stanovení identifikačního času drobné nepřesnosti (rozdíl v zeměpisné délce je asi 3° , což představuje rozdíl v okamžiku pravého poledne 12 min = 0,2 h). Zeměpisné souřadnice vzhledem k tomu, že jsem nemohl zcela přesně zjistit počáteční a koncový bod měření, zaokrouhlíme na úhlové minuty. Údaje pro zvolené místo v Alexandrii jsou $31^\circ 09'N$, $29^\circ 47'E$, pro místo v Syeně $23^\circ 24'N$, $32^\circ 47'E$. Rozdíl zeměpisných šířek je tedy $7^\circ 45' = 7,75^\circ$. Naměřil jsem vzdálenost 888 km, po vynásobení $360/7,75$ vychází pro délku kružnice 41 250, zjištěný poloměr Země 6 565 km. Výsledek korigujeme přepočtem na měření na Alexandrijském poledníku, hledaná vzdálenost je 832 km, délka kružnice 38 647 km, poloměr Země 6 150 km; střední hodnota 6 358 km. Výsledek považuji za velmi dobrý.

K měření rozměrů Země došlo v historii ještě několikrát. Zajímavé jsou údaje, získané při definici prvního metru, nové jednotky délky, jež byla zavedena během Francouzské revoluce. Komise Akademie navrhla změřit část

délky Pařížského poledníku mezi městy Dunkerque a Barcelona (obr. 2). Vzhledem ke dnes užívanému základnímu poledníku Greenwichskému má Pařížský poledník zeměpisnou délku $2^{\circ}20'14''$. K měření oblouku byla využita metoda triangulace, úhlová vzdálenost mezi koncovými body byla stanovena na $9^{\circ}40'26'' = 9,67^{\circ}$. Později bylo měření prodlouženo na ostrov Formentera, úhlová vzdálenost byla $12^{\circ}22'13''$, k měření byla zvolena jednotka toise de Pérou, bylo naměřeno 705 188,8 toise. Odtud se pak propočítal tzv. kvadrant zemský 10 000 000 m, upraveno dalším měřením 10 000 855,76 m s nepřesností $\pm 498,23$ m; poloměr zemský vychází na 6 367 km.



Obr. 1



Obr. 2

Problém 2: Zopakujte měření skupiny francouzských vědců

Nejprve bylo třeba najít počáteční a koncový bod měření. Obrátil jsem se na museum ve městě Dunkerque, ale bez úspěchu, takže jsem zvolil počáteční bod s ohledem na to, že musí ležet na pařížském poledníku a ještě na pevnině, zeměpisná šířka tohoto místa byla $51^{\circ}03'$. Další místo jsem zvolil v okolí Barcelony na břehu moře, zeměpisná šířka $41^{\circ}29'$, rozdíl v zeměpisných šířkách $9^{\circ}32'$, změřená vzdálenost 1 062 km, obdobným postupem jako při řešení problému 1, určíme délku kružnice 40 104 km a určený poloměr Země 6 380 km. Možná změna změřené vzdálenosti o -1 km vede k hodnotě poloměru Země 6 374 km.

Ke stanovení délky rovníku, nejdelší kružnice na povrchu Země, musíme změřit vzdálenost dvou míst s nulovou zeměpisnou šířkou. To byl však v minulosti dosti velký problém: Vezmeme-li to z Ekvádoru, prochází rovník amazonskými deštnými, leckde dříve zcela neprostupnými pralesy, pokračuje přes Atlantický oceán na africký kontinent, též s neprostupnými pralesy, přechází bouřlivý Indický oceán, přes Sumatru a Borneo pokračuje Tichým oceánem. Takové možnosti, co měla Akademie při měření Pařížského poledníku, zde chybí. Proto použijeme další možnosti:

Problém 3: Změřte délku rovníku

My máme možnost zjistit délku rovníku buďto pomocí mapy nebo www.googleearth.com. Zvolil jsem si dva body – jeden na břehu Sumatry ($103^{\circ}48'E$), druhý na břehu Kalimantanu (jak se v Indonésii říká Borneu, $109^{\circ}11'$), takže jsem si vymezil na rovníku úsek o rozdílu zeměpisných délek $5^{\circ}23' = 5,4^{\circ}$, naměřená délka byla 596 km, na 1° připadá 110,4 km, tedy naměřená délka rovníku je 39 740 km a určený rovníkový poloměr Země 6 323 km, o necelé 1 % méně než je skutečnost.

V hodinách zeměpisu se žáci dozvídají, že nejdelší kružnice se jmenuje rovník, další kružnice s ním „rovnoběžné“ jsou rovnoběžky, které jsou kratší. Určit délku rovnoběžek bude při vhodné volbě jednodušší – zvolme si oblast severně od naší republiky – v německé a polské rovinné polšině.

Problém 4: Změřte délku 52. rovnoběžky na severní polokouli

Jižně od Berlína jsem si zvolil tentokrát na www.mapy.cz dvě místa o vzájemné vzdálenosti 146 km; rozdíl v zeměpisných délkách ($12^{\circ}07'$, $14^{\circ}15'$) činil $2^{\circ}08' = 2,13^{\circ}$. Na jeden stupeň zeměpisné délky pak připadá 68,5 km, délka 52. rovnoběžky mi vyšla 24 680 km, odtud určený poloměr této rovnoběžky 3 927 km. Použijeme-li k výpočtu ze známých hodnot $R = 6 371$ km, vychází hodnota poloměru kružnice 3 622 km a délka 52. rovnoběžky 24 645 km.

Problém 5: Porovnejte, jak se liší lineární vzdálenosti pro změnu úhlové zeměpisné šířky a délky 1° v Hradci Králové

Souřadnice dominanty Hradce Králové – Bílé věže – jsou $50^{\circ}12'E$, $15^{\circ}50'N$, poloměr Země zvolíme 6 370 km. Odtud nám vychází délka poledníku 20 016 km, pro 1° je to 111,2 km a délka oblouku na povrchu Země, odpovídající změně zeměpisné šířky $1'$ je 1 853 m. Pro hradeckou rovnoběžku v místě Bílé věže nám vychází délky rovnoběžky 25 620 km,

na 1° připadá 71,2 km a pro délku oblouku připadajícího na změnu zeměpisné délky o $1'$ máme hodnotu 1 186 m. Nesmíme tedy zapomenout, zejména v případě některých kartografických zobrazení, že čtverec $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ se nezobrazuje jako čtverec. Ve skutečnosti je situace při zobrazování zemského povrchu mnohem složitější.

Problém 6: Zjistěte, s jak velkou úhlovou přesností jsou vyjádřeny polohy bodu a určete tuto přesnost v lineárním rozměru

Údaje, které nacházíme na www.googleearth.com jsou udávány s přesností na tisícinu úhlové vteřiny. Vezměme délku poledníku asi 20 000 km, na 1° připadne asi 111 km, na $1'$ asi 1 852 m, na $1''$ 31 m, na jednu setinu úhlové vteřiny je to 0,31 m, tedy asi 1 stopu (foot). Budeme-li zvažovat měření ve směru některé rovnoběžky, potom jsme zjistili, že na 52. rovnoběžce odpovídá 1° oblouk 71,2 km, pro úhel $1'$ odpovídá oblouk 1 187 m, pro $1''$ oblouk asi 20 m, jedné setině 0,2 m. Pokusíme-li se vložit měřicí značku (křížek) dvakrát do téhož místa, zjišťujeme poněkud jiné údaje, tedy přesnost měření je větší než je přesnost umisťování měřicí značky.

Problém 7: Jak měřit vzdálenosti dvou míst po poledníku, po rovnoběžce a ve skutečnosti

Měření po poledníku je vcelku jednoduché – protože všechny poledníky mají v podstatě stejnou délku a jde o tzv. hlavní kružnice na kouli, stačí znát zeměpisnou šířku počátečního a koncového bodu měřené délky, příslušná vzdálenost se určí jako $d_1 = R\Delta\varphi$. Pro tento případ najdeme mnoho konkrétních údajů, poloměr Země dosadíme 6 370 km. Měření po rovnoběžce je sice zajímavé a jednoduché, ale jak je známo, nevyjadřuje skutečnou vzdálenost obou míst. Tu najdeme, když na www.googleearth.com necháme vytvořit tzv. loxodromu. Konkretizaci provedeme pro let speciálního letadla z letiště Brno-Tuřany do kanadského Vancouveru. První cesta vede k výpočtu vzdálenosti d_2 z rozdílu zeměpisných délek, a to 9 730 km, při hledání nejkratší vzdálenosti dospějeme k hodnotě 8 440 km, což je podstatně méně. Tato nejkratší trasa vede ze střední Evropy středem Grónska přes severní Kanadu do Vancouveru. Znázorníme-li si tuto trasu, můžeme ji překreslit do běžných map. Pochopíme snad, proč se může létat z evropských letišť do Japonska přes severní pól.

Problém 8: Pohyb v blízkosti pólu – jak je to možné

Představme si, že do vzdálenosti 10 km od severního (jižního) pólu nahradíme skutečný povrch modelem – ideálním kulovým vrchlíkem, na nějž jsme předem nanесли dostatečně hustou souřadnicovou síť, na níž jsou vyznačeny poledníky a rovnoběžky (např. po půl stupni nebo dokonce po 10'). Odpovíme na několik poměrně jednoduchých otázek:

- a) Vypravíme se směrem na sever. Kam dorazíme?
- b) Vypravíme se směrem na východ. Kam dorazíme?
- c) Vypravíme se směrem na severovýchod. Kam dorazíme?
- d) Vypravíme se přesně na severozápad. Kam dorazíme?

Úlohu budeme řešit úvahou a potom si nakreslíme vhodnou modelovou situaci do obrázku. Teprve potom přistoupíme k práci s mapou. Bude potom jednodušší, když promítneme kulový vrchlík do roviny, obsahující kružnici o poloměru 10 km.

Když se vypravíme směrem severním, tedy ve směru poledníku, budeme se pohybovat po úsečce a dostaneme se na severní pól. Když se vypravíme směrem východním, tedy ve směru rovnoběžky, budeme se pohybovat po kružnici o zvoleném poloměru, daném vzdáleností místa od severního pólu. Poté, co se budeme pohybovat po trajektorii tvaru kružnice, dostaneme se do původního místa, ale směrem od západu. Když se vypravíme směrem na severovýchod, tedy pod úhlem 45° vzhledem k místnímu poledníku a 45° vzhledem k rovnoběžce v daném místě, budeme se pohybovat po trajektorii tvaru spirály a dostaneme se na severní pól. Obdobně dopadneme, když vyrazíme směrem severozápadním.

Problém 9: Jak daleko je do cíle

V jedné z „kartografických“ hádanek se uvádí následující podmínky a z nich vyplývající dotaz: Vyrazíme z určitého místa, dáme se směrem jižním a urazíme 10 km, poté se vydáme směrem 10 km směrem východním a nakonec urazíme 10 km směrem severním a zjistíme, že jsme na původním místě, z nějž jsme vyrazili. Otázka zní: Je to možné? Zeptejme se však zcela obecně: Vyrazíme z určitého místa na povrchu Země, urazíme 10 km směrem jižním, potom se budeme pohybovat po trase 10 km směrem východním a nakonec se budeme pohybovat 10 km směrem severním. Jak daleko máme do cíle a kterým směrem se musíme pohybovat?

Odpovědi na otázku jsou závislé na místě startu. Pohyb směrem jižním nebo severním představuje pohyb po poledníku, pohyb směrem východním nebo západním představuje pohyb po rovnoběžce. Vzdálenosti mezi

poledníky se od severního pólu směrem na jih až k rovníku zvětšují, při dalším pohybu se zase zmenšují (viz problém 4), vzdálenosti mezi rovnoběžkami jsou při pohybu na východ nebo na západ stálé. Musíme probrat jednotlivé případy, kdy výchozí místo je na severním pólu, méně než 10 km od severního pólu, dále např. 20 km od severního pólu, dále 5 km severně od rovníku, dále 20 km od jižního pólu, popř. v oblasti kruhu o poloměru 10 km od jižního pólu. Všechny situace si můžeme modelovat nejen na náčrtku, ale i na některé z konkrétních map, na nichž můžeme změřit vzdálenosti vybraných bodů.

L i t e r a t u r a

- [1] *Strouhal, Č. – Kučera, B.*: Mechanika. Praha, JČMF 1910.
- [2] *Kay, B.*: Dobrodružné plavby. Až na konec světa. a snad ještě dál. Praha, Albatros 2001.
- [3] <www.wikipedia.com>
- [4] <www.Googleearth.com>
- [5] <www.mapy.cz>
- [6] *Février, D.*: Histoire du metre. In: <www.wikipedia.com>

Částicová struktura látek ab initio II^{*)} Od objevu elektronu k prvním modelům atomu

ALEŠ LACINA

Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Třebaže dnes najdeme všechny základní informace o elektronu v každých sebestručnějších fyzikálních tabulkách, situace vždy „takhle jasná“ nebyla. Nejprve byl

^{*)} Článek je částí rozsáhlejšího textu předneseného na konferenci *Moderní trendy v přípravě učitelů fyziky 3* (Srní 2007) a publikovaného v Československém časopisu pro fyziku [i].

- **ELEKTRON OBJEVEN JAKO ZÁPORNĚ NABITÝ MIKROOBJEKT S MIMOŘÁDNĚ VELKÝM MĚRNÝM NÁBOJEM (q/m).**

Sám objev elektronu s úvahami o stavbě atomu nesouvisel. Byl vyústěním experimentálního studia elektrických výbojů v plynech, které začalo již v padesátých letech devatenáctého století. V té době zjistil *Heinrich Geissler* (1814–1879), že napětí přibližně 1000 V mezi elektrodami zatavenými ve skleněné trubici, v níž je tlak roven asi tisícině tlaku atmosférického, způsobí vznik zářícího oblaku vyplňujícího trubici. Snížení tlaku v trubici způsobilo nejprve lokalizaci oblaku jen do prostoru mezi elektrodami. Další snižování tlaku se současným zvyšováním napětí na elektrodách (*Julius Plücker*, 1801–1868) mělo za následek vznik nového jevu: silící světélkování stěn trubice – především v oblasti protilehlé záporné elektrodě; zářivý oblak uvnitř trubice při tom naopak postupně slábl. Výsledkem tohoto experimentování byl závěr, že všechny tyto jevy způsobuje něco, co vystupuje ze záporné elektrody (katody) – *katodové paprsky*, resp. *katodové záření* (Plücker 1858).

V následujících letech byly vlastnosti katodového záření intenzivně zkoumány řadou badatelů. Nejprve Plücker zjistil, že se paprsek katodového záření vychyluje v magnetickém poli a to na tutéž stranu, na niž by se vychyloval svazek záporně nabitých částic. *William Crookes* (1832–1919) v řadě experimentů konaných v šedesátých a sedmdesátých letech prokázal mj. tepelné a mechanické účinky katodového záření a na základě všech těchto výsledků vyslovil domněnku (1879), že toto záření je proudem molekul zbytkového plynu v trubici, které nejprve dopadem na katodu získají záporný náboj a následně jsou od ní odpuzovány.

Tomuto závěru oponoval německý fyzik *Heinrich Hertz* (1857–1894), jenž se marně snažil odchýlit svazek katodového záření přiložením elektrického pole (1883). Hertzův názor podporoval jeho krajan *Philipp Lenard* (1862–1947), který nejprve (1894) experimentálně prokázal, že katodové záření má podstatně větší pronikavost, než by mohl mít jakýkoli molekulární či atomární svazek, a po té zjistil, že ani po dlouhodobém pronikání katodového záření do vyčerpané nádoby v ní nelze detekovat žádnou látku (plyn) [P2].

S definitivní platností o povaze katodového záření rozhodly experimenty *Josepha Johna Thomsona* (1856–1940), jemuž se roku 1896 podařilo – při dokonalejším vyčerpání trubice – odchýlit katodové paprsky i elektrickým

polem. Na základě toho (a s odkazem na zmíněné Plückerovy a Crookesovy experimenty) vyslovil přesvědčení, že katodové záření je proudem stejných záporně nabitých částic [P3]. Následujícího roku pak tuto hypotézu podpořil experimentálním určením měrného náboje těchto korpusek

$$q/m \approx (-)10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Mimořádně pozoruhodné při tom bylo, že tato hodnota je tisíckrát větší než do té doby největší známý měrný náboj (měrný náboj vodíkového iontu zjištěný v elektrolytických experimentech $q_H/m_H = 9,6 \cdot 10^7 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$). Pro pojmenování korpusek katodového záření byl přijat již existující termín *elektron*, který byl do té doby používán k označení velikosti náboje vodíkového iontu ($q_H = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; dnes je tato hodnota zpravidla označována symbolem e a nazývána *elementární náboj*).

Z počátku byl tedy jedinou známou charakteristikou nově objeveného elektronu jeho měrný náboj q/m , zatímco jeho náboj q a hmotnost m samy o sobě známy nebyly. I když za této situace připadalo v úvahu více možností

- elektron má náboj srovnatelný s nábojem vodíkového iontu ($|q| \approx q_H$) a asi tisíckrát menší hmotnost ($m \approx 0,001 m_H$),
- elektron má hmotnost srovnatelnou s hmotností vodíkového iontu ($m \approx m_H$) a asi tisíckrát větší náboj ($|q| \approx 1\,000 q_H$),
- elektron má jiné hodnoty hmotnosti ($m \not\approx m_H$) a náboje ($|q| \not\approx q_H$) slučitelné s experimentálním výsledkem $q/m \approx (-)10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$,

obecný názor fyzikální komunity se vzápětí přiklonil k první alternativě:

• ELEKTRON JE MIKROOBJEKT S (RELATIVNĚ) MALOU HMOTNOSTÍ NESOUCÍ ZÁPORNÝ NÁBOJ BĚŽNÉ VELIKOSTI.

Především se totiž zdálo být podstatně pravděpodobnější, že pozornosti experimentátorů dosud unikal spíše nepatrný objekt s nevelkým nábojem než objekt běžné velikosti nesoucí obrovský náboj. Hlavně však tímto směrem ukazovalo dřívější, výše již zmiňované, Lenardovo experimentální zjištění, že katodové záření – teď už ovšem interpretované jako proud elektronů – má o několik řádů vyšší pronikavost látkou než atomové, molekulové či iontové svazky [P2]. Úplnou jistotu pak přineslo Thomsonovo přímé experimentální určení náboje elektronu q (pomocí právě zkonstruované první

verze Wilsonovy mlžné komory) provedené v roce 1898. (Dnešní učebnicová literatura, např. [3], odkazuje zpravidla na experimentální stanovení této veličiny, jehož autorem je *Robert Andrews Millikan* (1868–1953). Millikanovo měření je sice přesnější než Thomsonovo, heuristický význam však nemělo, neboť bylo provedeno až o dvanáct let později.)

Mnohonásobné opakování Thomsonova experimentu s trubicemi s katodami zhotovenými z různých materiálů, dřívější (1879) Edisonovy zkušenosti získané při práci na konstrukci žárovky ($\sim$ termoemise), zjištění, že elektrony lze uvolnit z různých vodičů i jejich ozáření elektromagnetickým zářením (= fotoelektrický jev), přivedly k závěru, že

• VŠECHNY LÁTKY OBSAHUJÍ ELEKTRONY.

Ani doposud diskutované experimenty, ani zatím provedené úvahy nás ovšem neopravňují automaticky lokalizovat elektrony, jak jsme zvyklí, do nitra atomů. Možnosti se totiž nabízejí dvě:

- látky se skládají z atomů (o nichž už se vědělo dříve) a elektronů (které byly nově objeveny),
- látky sestávají z atomů obsahujících elektrony.

„Jistěže“ vybereme druhou možnost. Ale na základě čeho?

Nejjednodušším zdůvodněním takové volby je poukaz na experimentální fakt, že atomární plyn (= soubor navzájem neinteragujících atomů) je za normálních podmínek izolantem, avšak po zahřátí na vysokou teplotu nebo ozáření elektromagnetickým zářením dostatečně vysoké frekvence se stává elektricky vodivým. Zatímco první část tohoto zjištění je přesvědčivým argumentem pro zpravidla blíže nekomentované tvrzení, že

• ATOMY JSOU ELEKTRICKY NEUTRÁLNÍ,

schopnost vést elektrický proud, zmiňovaná v jeho druhé části, ukazuje na existenci volných elektrických nábojů v tomto případě. Jejich přítomnost vysvětluje J. J. Thomson již v roce 1899 slovy „... *elektrizace* [dnes bychom řekli *ionizace*] *v podstatě spočívá v rozštěpení atomu, při němž se jeho část odděluje a stává se volnou* ...“ a na základě toho konstatuje, že

• ELEKTRONY JSOU SOUČÁSTÍ ATOMŮ.

Kromě elektronů nesoucích záporný náboj musí neutrální atom samozřejmě obsahovat stejně velký kompenzující kladný náboj. Přemýšlivý čtenář – poučen, a věrme, že i motivován, předcházejícím příběhem – nyní

snad již nesklouzne přímo k nazpaměť naučeným veršíkům o atomovém jádru a jeho obalu, ale uvědomí si, že intelektuální poctivost vyžaduje každé takové tvrzení podložit spolehlivými argumenty. Opět je tedy nutné nejprve kvalifikovaně posoudit přinejmenším dvě základní alternativy sluchitelné s předcházejícími závěry:

- Atom obsahuje tisíce elektronů, jejichž celková hmotnost je rovna polovině jeho hmotnosti, a stejný počet analogických kladně nabitých mikroobjektů (hypotetických „kladných elektronů“), které přispívají ke hmotnosti atomu druhou polovinou a kompenzují záporný náboj elektronů.
- Atom obsahuje nevelký počet elektronů, jež přispívají k celkové hmotnosti atomu zanedbatelně. Ta je téměř celá soustředěna v jeho zbytku nesoucím kompenzující kladný náboj.

Jednoduchým argumentem proti první a ve prospěch druhé možnosti je nesymetrie všech druhů emise vzhledem ke znaménku uvolňovaného náboje: Jak při zahřívání (termoemise), tak při ozařování (fotoelektrický jev) z látek vystupuje vždy jen záporný náboj (elektrony), což svědčí o různé povaze nositelů obou druhů náboje v atomu projevující se mj. relativně velkou pohyblivostí záporného náboje a malou pohyblivostí náboje kladného. S odkazem na toto experimentální zjištění lze uzavřít, že:

• ATOM OBSAHUJE NEVELKÝ POČET ELEKTRONŮ A „KLADNÉ ZÁVAŽÍ“

přesně kompenzující náboj elektronů a rozhodujícím způsobem ovlivňující hmotnost atomu [P4].

Říci o vnitřním ustrojení atomu něco určitějšího však dosud uvedená fakta, odpovídající stavu fyzikálního poznání na sklonku devatenáctého století, neumožňují. O konkrétním rozložení hmoty a náboje v atomu se za této situace tedy lze pouze dohadovat. A v prvních letech dvacátého století se vskutku objevuje téměř současně několik spekulativních představ o stavbě atomu, které jsou dnes připomínány pod souhrnným označením *první modely atomu* [P5] už jen jako fyzikálně-historická zajímavost.

Obvyklé tvrzení o jádru a elektronovém obalu, shrnující současný názor na strukturu atomu, je teprve dalším krokem do mikrosvěta. Logicky sice bezprostředně následujícím, ale poměrně velkým a zdaleka ne samozřejmým.

Literatura

- [i] *Lacina, A.*: Deset kroků do mikrosvěta. Čs. čas. fyz. **57**, č. 4 (2007) 243.
- [1] *Lacina, A.*: Postrecenze učebnice „Fyzika pro gymnázia – Fyzika mikrosvěta“. Školská fyzika **VI**, č. 3 (2000) 72.
<http://www.physics.muni.cz/kof/recenze/post7.pdf>
- [2] *Lacina, A.*: Atom – od hypotézy k jistotě. Čs. čas. fyz. **48**, č. 5 (1998) 282.
<http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/atom.pdf>
- [3] *Štoll, I.*: Fyzika pro gymnázia – Fyzika mikrosvěta. Prométheus, Praha 2002.
- [4] *Beiser, A.*: Úvod do moderní fyziky. Academia, Praha 1975.
- [5] *Vanovič, J.*: Atómová fyzika. Alfa Bratislava, SNTL Praha 1980.
- [6] *Zajac, R. – Pišút, J. – Šebesta, J.*: Historické pramene súčasnej fyziky 2. Univerzita Komenského, Bratislava 1997.
- [7] *Hajko, V. a kol.*: Fyzika v experimentoch. Veda, Bratislava 1988.
- [8] *Jammer, M.*: The Conceptual Development of Quantum Mechanics. McGraw-Hill, New York 1967. Ruský překlad: Evolucija ponjatij kvantovoj mechaniki. Nauka, Moskva 1985.
- [9] *Kudrjavcev, P. S.*: Kurs istorii fiziki. Prosvěščenije, Moskva 1974.
- [10] *Thomson, J. J.*: Cathode Rays. Phil. Mag. **44** (1897) 293.
- [11] *Lacina, A.*: Částicová struktura látek ab initio III. Matematika – fyzika – informatika (vyjde v MFI 20, č. 8).

Poznámky

- [P2] Kolem poloviny devadesátých let devatenáctého století provedl Philipp Lenard řadu významných experimentů, jejichž motivem bylo prozkoumání vlastností katodového záření. Za nejdůležitější z nich je považován pokus, v němž skrze otvor ve stěně katodové trubice uzavřený tenkou kovovou fólií (tzv. Lenardovo okénko) vyvedl svazek katodových paprsků z vyčerpané trubice do vnějšího prostředí. Nečekaný byl už sám průchod katodového záření hustým materiálem fólie. Kromě toho však Lenard také detekoval jeho značný doběh v okolním vzduchu (více než 2 cm, zatímco svazek částic běžné – atomární – velikosti by měl mít, podle odhadů provedených na základě molekulárně-kinetické teorie plynů, doběh o několik řádů menší). Těmito překvapivými zjištěními Lenard nejprve mylně argumentoval proti možnosti částicového výkladu katodového záření. Po přijetí elektronové interpretace katodových paprsků (1897) se však tyto výsledky staly rozhodujícím argumentem ve prospěch nepatrné velikosti elektronu. Vysoká pronikavost elektronů látkou později Lenardovi také posloužila jako východisko při formulaci vlastní představy o stavbě atomu (*Lenardův model atomu* [P5]).

[P3] Ke stručnému prohlubujícímu komentáři tohoto závěru by stačilo doplnění snad jedné či nanejvýš dvou výstižných vět. Na tomto místě jsem se však rozhodl udělat výjimku a – čtenáři (i sobě) pro potěšení – ocituji příslušnou argumentaci v nezkráceném tvaru z Thomsonovy původní práce [10]: „*Proti názoru, že katodové paprsky jsou záporně nabitými částicemi, se obecně namítá, že až dosud nebylo pozorováno vychýlení těchto paprsků působením malé elektrostatické síly. ... Hertz nechal tyto paprsky procházet mezi dvěma rovnoběžnými kovovými deskami umístěnými ve výbojové trubici, zjistil však, že se po připojení těchto desek k pólům elektrické baterie neodchýlí [od původního směru]; při opakování tohoto experimentu jsem sám nejdříve dospěl k témuž výsledku, ale následující experimenty ukázaly, že absence výchylky je důsledkem vodivosti zbytkového plynu, která je způsobena průchodem katodových paprsků. Měřením této vodivosti bylo zjištěno, že velmi prudce klesá s rostoucím vyčerpáním trubice; zdálo se tedy, že při zopakování Hertzova experimentu při velmi vysokém [stupni] vyčerpání by mohlo být nadějně detekovat odchylku katodových paprsků způsobenou elektrostatickou silou. Když byly při vysokém vyčerpání dvě hliníkové desky připojeny k pólům malé baterie, paprsky se vychýlily: dolů, pokud byla horní deska připojena k zápornému a dolní deska ke kladnému pólu baterie, a nahoru, bylo-li zapojení opačné. Odchylka byla úměrná potenciálovému rozdílu mezi deskami, při čemž jeho hodnota nepřevýšila dva volty.*

K vychýlení tedy skutečně došlo, jen když vakuum bylo dobré. Nicméně, že absence výchylky je způsobena vodivostí prostředí, plyne až z toho, k čemu dochází, když vakuum dosahuje právě stupně, při němž se začíná objevovat výchylka. Při tomto stadiu [vyčerpání] se výchylka objeví v okamžiku připojení desek k pólům baterie, ale během dalšího trvání tohoto kontaktu se fluorescenční skvrna [= stopa paprsku na čelní stěně trubice] postupně přesouvá zpět do nevychýlené polohy. A právě tohle by se stalo, kdyby byl prostor mezi deskami vodivý, byť jen velmi špatně, neboť pak by kladné a záporné ionty mezi deskami pomalu difundovaly, dokud by se kladná deska nepokryla zápornými ionty a záporná kladnými; tak by došlo k vymizení elektrické intenzity mezi deskami a na katodové paprsky by žádná elektrostatická síla nepůsobila.

... Nemohu se vyhnout závěru, že [katodové paprsky] jsou zápornými elektrickými náboji nesenými hmotnými částicemi. Tato citace,

podle mého názoru, přesvědčivě ukazuje, jak lze vyučování – ovšemže jen v jednotlivých konkrétních případech – v nejlepším slova smyslu oživit. Původní fyzikální příběhy totiž až příliš často necitlivým převedením do učebnicového textu ztratily mnoho ze svého skutečného obsahu, určitosti, přesvědčivosti – i krásy.“

[P4] Úvahy o konkrétním počtu elektronů v atomech různých druhů měly dlouho víceméně jen spekulativní charakter. Tak v roce 1906 vyslovil J. J. Thomson domněnku podepřenou kvalitativně několika nezávislými teoretickými důvody, že se tento počet řádově shoduje s atomovou vahou (dnes bychom řekli hmotnostním číslem) prvku. Jeho žák Charles Glover Barkla (1877–1944) posléze tento odhad zpřesnil na přibližně polovinu atomové váhy. V roce 1912 Thomson vyšetřoval vlastnosti různých iontových svazků na primitivní embryonální verzi hmotnostního spektrometru. Při tom mj. zjistil, že „*všechny zkoumané prvky dávají násobně nabitě atomy [$\sim$ ionty], s výjimkou vodíku, u nějž nebyl nikdy pozorován více než jeden [elementární] náboj*“. Na základě toho pak vyslovil – vzápětí všeobecně přijatý – názor, že nejlehčí atom vodíku obsahuje jediný elektron. Počet elektronů v těžších atomech byl přesně stanoven až později [11].

[P5] Na podzim roku 1903 předložil *Philipp Lenard* hypotézu, že se atomy různých druhů skládají z různého (nevelkého) počtu stejných komponent, jež nazval *dynamidami*. Tyto dynamidy, které si představoval jako těsné – elektricky neutrální – spojení elektronu s mnohem hmotnějším kladně nabitým objektem, měly být rozloženy rovnoměrně v celém objemu atomu. S odkazem na vysokou prostupnost tenkých kovových fólií pro katodové paprsky – kterou sám experimentálně prokázal o několik let dříve [P2] – Lenard konstatuje, že úhrnný objem dynamid je jen nepatrným zlomkem ($\approx 10^{-12}$) objemu celého atomu. Přestože se *Lenardův dynamidový model atomu* velmi liší od později zjištěné skutečné struktury atomu, byl Lenard prvním, kdo vyslovil správný názor, že **atomy nejsou neproniknutelné, ale skládají se z malých objektů, mezi nimiž je prázdný prostor.**

Těsně před koncem téhož roku zveřejnil Hantaro Nagaoka (1865–1950) jinou představu o stavbě atomu inspirovanou podobou planety Saturn. Podle ní by měl být atom tvořen masivním kladným nábojem opásaným prstencem elektronů. I když Nagaoka tuto ideu podepřel obecnými komentáři její možné souvislosti s optickými spektry atomů a radioaktivními přeměnami, nestabilita takového rozložení hmoty

a náboje jeho návrh diskvalifikovala. Historikové fyziky dnes přiznávají *Nagaokovu saturnskému modelu atomu* jistou inspirativní hodnotu: jím formulovaná **představa o centrálním kladném náboji obklopeném souborem elektronů** byla zřejmě určitým vodítkem Ernestu Rutherfordovi při vytvoření jeho jaderného modelu atomu [11].

Ve své době nejpopulárnějším, nejpropracovanějším – a tudíž i později nejznámějším – z *prvních modelů atomu* byl *Thomsonův pudingový model*. Autorem prvotní ideje byl sice William Thomson (lord Kelvin, 1824–1907), do tvaru využitelného k dalším fyzikálním úvahám ji však rozvinul jeho jmenovec J. J. Thomson. Kladný náboj a hmota ($\sim$ „kladné závaží“) jsou podle něj spojitě (a rovnoměrně) rozestřeny v celém objemu atomu. Elektrony jsou pak v tomto „kladném těstě“ rozptýleny jako rozinky v koláči/pudingu (odtud název). J. J. Thomson vystoupil s touto představou poprvé roku 1903. Po několika dalších letech ji však postupně rozpracovával do značných detailů se záměrem vyložit pomocí ní jak chemické vlastnosti atomů, tak jejich optická spektra.

(Podrobnější informace, mající však dnes už jen historický význam, lze nalézt např. v [6].)

Jak elektrodynamika vyústila ve speciální teorii relativity

BOHUMIL VYBÍRAL

Pedagogická fakulta Univerzity Hradec Králové

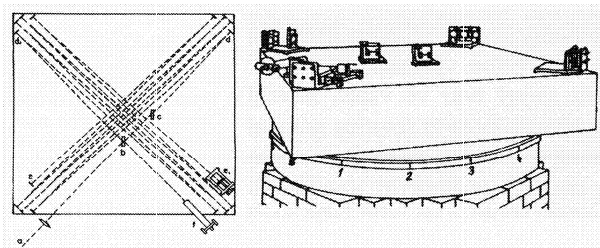
(Dokončení)

5. Scestné éterové hypotézy

Vraťme se nyní do 2. poloviny 19. století. Optici se léta potýkali s problémy, která ze tří tehdy vytvořených éterových hypotéz bude platit – každá zdánlivě měla nějakou experimentální oporu. Jak známo ([12], [14], [18]) byly to hypotézy:

1. Stokesova-Hertzova (každé těleso si nese svůj éter),
2. Fesnelova-Fizeauova (pohybující se těleso éter částečně strhává),
3. Lorentzova (éter je v klidu vůči absolutnímu Newtonovu prostoru – kolem těles vzniká „éterový vítr“).

Po vytvoření elektromagnetické teorie světla Maxwellem bylo žádoucí tento problém vyřešit. Mladý Američan *A. Michelson*, který byl na dvouletém studijním pobytu v Evropě, se rozhodl provést pokus 2. řádu, tedy experiment, u něž sledované jevy závisí na $(v/c)^2$. Především se mu podařilo navrhnout a zhotovit originální interferometr (užívaný dodnes). Při experimentu, který roku 1881 provedl v Postupimi, očekávané jevy nezjistil – právem se mu vytýkala nedostatečná citlivost užitého interferometru. Proto experiment roku 1887 zopakoval v USA [11] ve spolupráci s o generaci starším *E. Morleyem*. Nové zařízení (obr. 7) již bylo dostatečně citlivé (ramena zvětšili násobnými odrazy na délku $l = 11$ m a tím zvětšili očekávaný dráhový rozdíl interferujících paprsků na $0,45\lambda$, tedy na hodnotu již průkazně ověřitelnou). Výsledek experimentu byl opět negativní, což prohloubilo tehdejší krizi v tomto oboru.



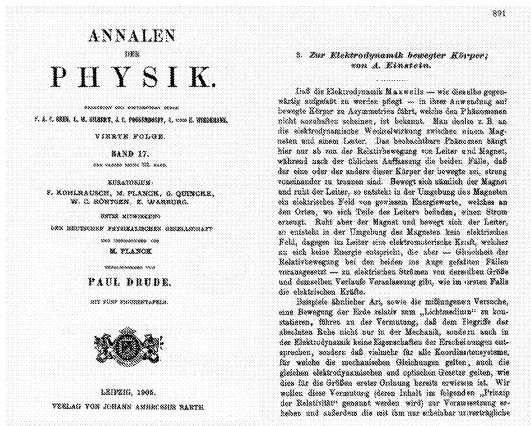
Obr. 7 Michelsonův-Morleyův experiment (1887); schéma a uspořádání

Fyzikové tehdy nešli cestou opuštění hypotetického prostředí „éter“, nýbrž se snažili hypotézy o něm upravovat tak, aby byly v souladu s experimenty. Tak americký fyzik *G. F. Fitzgerald* již roku 1889 vyslovil myšlenku, že ramena Michelsonova interferometru se zkracují ve směru pohybu (tak, jak jej zná speciální teorie relativity z roku 1905), avšak opět vůči éteru, jež je v klidu v Newtonově absolutním prostoru. Tuto myšlenku roku 1893 prohloubila i tehdejší fyzikální autorita, jakou byl *H. A. Lorentz*, který se pokusil o fyzikální výklad kontrakce délky na elektromagnetickém základě

stavby látek. Roku 1904 Lorentz též vyslovil *speciální princip relativity*³⁾ a hledal takové transformační vztahy pro prostoročasové souřadnice mezi dvěma inerciálními vztáznými soustavami, aby Maxwellovy rovnice zůstaly kovariantní (tj., aby neměnily tvar). Tyto (*Lorentzovy*) *transformační vztahy* Lorentz našel. Myšlenku éteru, jako prostředí absolutně klidného vůči Newtonovu absolutnímu prostoru, přitom neopustil.

6. Východisko: speciální teorie relativity podle Einsteina

Albert Einstein přistoupil roku 1905 k budování speciální teorie relativity v práci [1] (obr. 8) zcela bez éterového břemena (dokonce později přiznal, že v této době o éterovém problému a Michelsonově experimentu ani nevěděl⁴⁾). Východiskem pro Einsteina jsou dva principy: *speciální princip relativity* a *princip stálé rychlosti světla ve vakuu* (jako rychlosti nezávislé na pohybovém stavu světelného zdroje či pozorovatele). Toto uvádí jako tvrzení (jak je to u fyzikálních principů běžné) a k tomu jen dodává, že c (v [1] ji označuje V) je univerzální fyzikální konstanta. V práci [2] vystižně poznamenává, že princip stálé rychlosti světla c již je implicitně obsažen



Obr. 8 Titulní strana časopisu, v němž byla poprvé zveřejněna Einsteinova věhlasná práce [1] a její první stránka

³⁾ Speciální princip relativity vyslovil krátce před Einsteinem také francouzský fyzik *Henri Poincaré*.

⁴⁾ Fizeauův a Michelsonův éterový pokus Einstein podrobněji z hlediska STR analyzuje např. v [3], s. 25 a 36.

v Maxwellových rovnicích. K tomu je třeba dodat, že k rychlosti c , jako univerzální fyzikální konstantě, již roku 1852 experimentálně dospěl W. Weber (viz čl. 2).

Einstein pro své úvahy éter nepotřebuje; pro něj je tímto prostředím prostoročas, daný existencí vesmíru jako soustavy hmotných útvarů. Konstatuje, že prostoročas má fyzikální vlastnost přenášet elektromagnetické vlny (a světlo). Především opouští Newtonův absolutní prázdný prostor a nezávisle plynoucí absolutní čas. Na druhé straně je třeba chápat situaci fyziků 19. století, kteří na základě tehdejšího mechanistického obrazu světa extrapolovali poznatek z vlnění, jež pro šíření potřebuje látkové prostředí a tak pro světlo hypoteticky zavedli éter (jako prostředí, které však mělo mít nereálné vlastnosti). Pro Einsteina (i pro Lorentze) jsou základem východiskem jen Maxwellovy rovnice⁵⁾ elektromagnetického pole, které shrnují a zobecňují stoleté experimentální a teoretické úsilí fyziků celého 19. století.

Problematicku, kterou Einstein řešil ve své zakladatelské práci [1] „K elektrodynamice pohybujícího se tělesa“ nejlépe ozřejmí některé názvy jejích paragrafů. Kinematický díl: Definice současnosti. O relativitě délky a času. Teorie transformací prostorových a časových souřadnic. Teorem o skládání rychlostí. Elektrodynamický díl: Transformace Maxwellových-Hertzových rovnic pro vakuum. Teorie Dopplerova principu a aberace. Transformace energie světelných paprsků. Dynamika pozvolna urychlených elektronů (zde pracuje s relativistickou hmotností). Práce [1] ještě neobsahuje slavnou rovnici $E = mc^2$. Nepřímo se k ní dostává až v následující třístránkové práci [2], která jako doplněk [1], vyšla ještě roku 1905. Nový objev je popsán takto: „Pokud těleso vydá energii E (tam je označena L) ve formě záření, jeho hmotnost se zmenší o E/c^2 ... Hmotnost tělesa je mírou jeho energetického obsahu ...“.

7. Budování teorie elektromagnetického pole užitím teorie relativity

Sledování historické cesty od elektrodynamiky k teorii relativity je sice poučné, avšak pro studenta často dosti obtížné. Historii měnit nelze, nicméně lze alternativně ukázat didakticky schůdnější cestu budování oboru. Tento postup použil Z. Horák [5] a B. Vybíral [15] a [18].

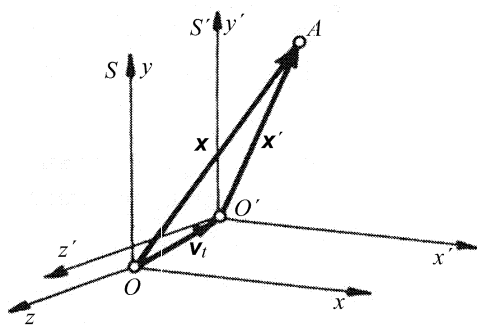
⁵⁾ Einstein je zde označuje jako Maxwellovy-Hertzovy rovnice. Jak je uvedeno v čl. 4.1, Hertz se (vedle Heavisidea) zasloužil o rozvoj teorie elektromagnetického pole a o přehlednější zápis původních Maxwellových rovnic.

Východiskem je *speciální teorie relativity*, jako obecná fyzikální teorie, založená na *speciálním principu relativity* (tj. všechny inerciální vztažné soustavy jsou rovnocenné pro popis fyzikálních dějů; prostoročasové souřadnice jsou vztaženy k uvažované inerciální soustavě). Dále *princip stálé rychlosti světla ve vakuu* (tj. c je univerzální fyzikální konstanta, poznána nejprve u světla). Dalším východiskem je experimentální *Coulombův zákon elektrostatiky* s rozšířenou platností i na případ jednoho pohybujícího se náboje, neboť elektrický náboj je lorentzovsky invariantní.

Z principů relativity lze odvodit Lorentzovy transformace (je však nutné volit šikmý, prostorový, pohyb soustav – obr. 9). Pro obecný případ $v < c$ je uvádí např. [12] a podrobně odvozuje [6]. Pro naše úvahy postačí předpokládat $v \ll c$, neboť tuto podmínku splňují driftové rychlosti elektronů v kovových vodičích (např. pro proud 5,0 A v měděném vodiči o průřezu $1,0 \text{ mm}^2$ je tato rychlost jen $0,37 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$). Důsledkem je, že se Lorentzova transformace v prostorové části pro bod A na obr. 9 redukuje na Galileiovu transformaci, čas se transformuje relativisticky (avšak zjednodušeně):

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}' + \mathbf{v}t \quad (13)$$

$$t = t' + \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{x}'}{c^2} \quad (14)$$



Obr. 9 Šikmý pohyb inerciálních soustav

Postupem, uvedeným např. v [18], odvodíme mezi soustavami S, S' transformaci rychlosti, hmotnosti, hybnosti a poté síly, působící mezi dvěma částicemi, nacházejícími se v O , A :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}' + \frac{1}{c^2} \mathbf{u} \times (\mathbf{v} \times \mathbf{F}'), \quad u < c, \quad v \ll c \quad (15)$$

Podle (15) se síly v obou inerciálních soustavách S, S' liší (podle klasické fyziky přechodem od jedné inerciální soustavy do druhé ovšem nemůže vzniknout nová síla!). Je to dáno tím, že podle (14) je běh času v obou soustavách odlišný.

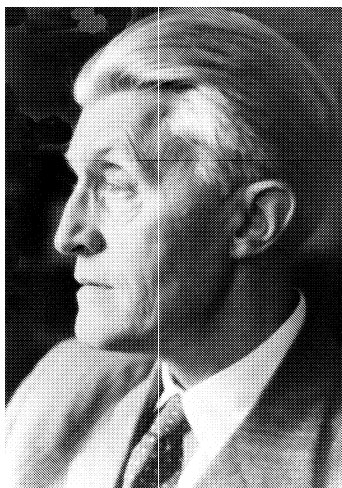
Vložíme-li do počátku O' soustavy S' náboj Q a do bodu A ve vzdálenosti $\mathbf{x}' = \mathbf{r}$ (kontrakce délky je zanedbatelná) náboj q , jehož rychlost měřená v S je $\mathbf{u}$, bude mezi částicemi v S' působit Coulombova síla $\mathbf{F}'$. V soustavě S působí síla, kterou dostaneme dosazením do (15):

$$\mathbf{F} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[\mathbf{r}^0 + \frac{1}{c^2} \mathbf{u} \times (\mathbf{v} \times \mathbf{r}^0) \right] = q(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}), \quad (16)$$

kde $\mathbf{E}$ je intenzita elektrického pole v bodě A . Podobně

$$\mathbf{B} = \frac{1}{c^2} (\mathbf{v} \times \mathbf{E}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 c^2 r^2} (\mathbf{v} \times \mathbf{r}^0) = \frac{\mu_0 Q}{4\pi r^2} (\mathbf{v} \times \mathbf{r}^0), \quad \mu_0 = (\epsilon_0 c^2)^{-1}, \quad (17)$$

je *indukce magnetického pole* v bodě A , kde byla zavedena nová konstanta μ_0 – *permeabilita vakua* – zavedená již v experimentální elektrodynamice. Ve výrazu (17) jsme ji však zavedli formálně, kdežto stejný vztah získal W. Weber pracným měřením – viz čl. 2). Budeme-li výraz (17) aplikovat na element náboje dQ v proudovodiči Idl , dostaneme klasický Biotův-Savartův-Laplaceův zákon. Výraz (16) je z experimentální elektrodynamiky znám jako *Lorentzova síla* a můžeme jej zpětně přepsat do Ampérova zákona (2). Jeho užitím lze odvodit zákon elektromagnetické indukce pro pohyb vodiče v magnetickém poli – viz postupy v [5], [15]. Pro získání Heavisideova vztahu ve tvaru (4), je třeba postupovat obecněji – jak ukázal Z. Horák [6]. Tento význačný český fyzik 20. století (obr. 10) rozpracoval teorii elektromagnetického pole rychlých částic, přispěl k teorii relativity a nově koncipoval budování teorie elektromagnetického pole, jak zde bylo naznačeno.



Obr. 10 Zdeněk Horák (1898–1987)

8. Závěr

Sto dvacet let vývoje elektřiny a magnetismu, sledované v této stati od prvních kvantitativních Coulombových zákonů (1785), ukázalo nejen na provázanost těchto původně samostatných oborů. Po vzniku elektrodynamiky (1820) byl postupně poznáván i jejich těsný vzájemný vztah. Tak vznikaly střípky budoucí speciální teorie relativity, která jako samostatná teorie byla vybudována až na konci sledovaného období (1905). Zárodky speciální teorie relativity jsou zřejmé především z dílčích experimentálních poznatků (Weberova experimentální zjištění vztahu mezi konstantami pro vakuum $\varepsilon_0\mu_0 = c^{-2}$ z roku 1852) a z teoretických výsledků, bezprostředně plynoucích z Maxwellových rovnic. Magnetismus se ukázal jako relativistický efekt k elektrickému poli a je tak nejdéle známým relativistickým jevem (aniž by si to však přímo člověk uvědomoval). Nejlépe je to zřejmé z přístupu k budování teorie elektromagnetického pole, který byl naznačen v odstavci 7 tohoto příspěvku.

(Literatura byla uvedena za 1. částí příspěvku.)