

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Josef Polák

K 100. výročí úmrtí Jamese Clerka Maxwella

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 24 (1979), No. 6, 301--312

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138982>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1979

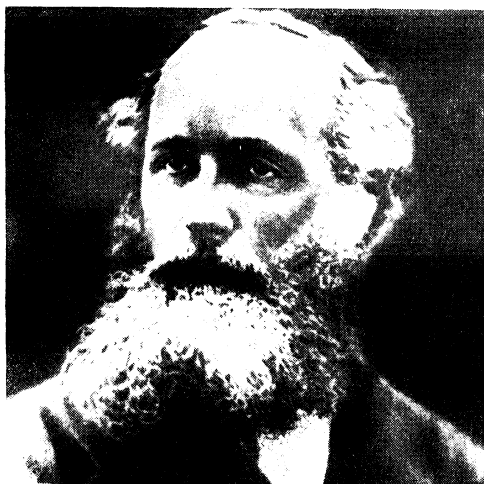
Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

K 100. výročí úmrtí Jamese Clerka Maxwella

Josef Polák, Plzeň



Hranice života J. C. MAXWELLA (1831 — 1879) jsou vymezeny jakoby symbolicky: V roce Maxwellova narození objevil M. FARADAY *elektromagnetickou indukci* (29. 8. 1831) a tím vytvořil základní předpoklad pro budoucí vznik *Maxwellovy teorie elektromagnetického pole*. A v roce Maxwellova úmrtí před 100 lety se narodil A. EINSTEIN (14. 3. 1879), jehož *speciální* a *obecná teorie relativity* ukázaly meze platnosti Maxwellovy teorie pole a vedly k jejímu podstatnému zobecnění a zároveň i ke kvalitativně novému pojetí samotného *pojmu pole* ve fyzice.

Maxwellovo dětství a studium na akademii (1831—1847) — počátek vědecké cesty

JAMES CLERK MAXWELL pocházel z významného skotského rodu. Jeho otec, právník JOHN CLERK, se stal dědicem zemědělské usedlosti Maxwellů (jedné ze ženských větví rodu Clerků) u Middlebie v Jižním Skotsku a podle tamního zvyku zároveň přijal druhé příjmení Maxwell. V době přestavby usedlosti žil s manželkou FRANCES v Edinburghu, kde se 13. 6. 1831 narodil syn James. Brzy poté se vrátili do nově postaveného domu nazvaného Glenlair a zde ve venkovském prostředí prožil James dětství. Projevoval od malička velkou zvědavost i pracovní zručnost (sestrojoval si mechanické hračky, pletl košíky, vyšíval) a měl zájem o přírodu i přírodní jevy. Tyto zájmy v něm probouzel a pěstoval především jeho otec, sám velký milovník přírody a všestranně vzdělaný člověk, zajímající se o zkoumání přírodních jevů a o technické vynálezy. Svě právnícké profesi se John Clerk Maxwell věnoval jen příležitostně, pravidelně však navštěvoval veřejná zasedání Královské společnosti v Edinburghu (skotské Akademie věd) a bral s sebou i Jamese, v němž prostředí učené společnosti zanechávalo hluboký dojem. Chlapec rád poslouchal vyprávění i poezii a sám skládal verše (i v pozdějších letech). Ve věku osmi let mu zemřela matka. Výchova plně přešla na otce, který se jí věnoval velmi pečlivě

a odpovědně. V listopadu 1841 vstoupil James ve věku deseti let do 2. ročníku akademie v Edinburghu. Systematická školní práce mu zpočátku dělala obtíže. Úspěšně začal studovat až od pátého ročníku, kdy jej zaujala zejména *geometrie*. Nacházel vlastní elegantní řešení geometrických úloh a sestrojoval modely mnohostěnů. Lásku ke geometrii si zachoval po celý život, geometrické modely a zobrazení sehrály důležitou roli v jeho vědeckých pracích. V posledních ročnících edinburghské akademie patřil k nejlepším žákům v matematice spolu s P. G. TAITEM (1831–1901), s nímž navázal přátelství, vyměňoval si s ním matematické rukopisy a oba získali několik školních matematických cen. S otcem James často navštěvoval zasedání Královské společnosti v Edinburghu. Zde při diskusi o tvaru etruských pohřebních uren získal podnět k napsání své první vědecké práce o *mechanické konstrukci oválových křivek*. Na požádání otce předložil tuto práci profesor univerzity v Edinburghu J. D. FORBES (1809–1868) 16. 4. 1846 na zasedání Královské společnosti. Její upravená verze byla krátce poté uveřejněna v *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* pod názvem *On the Description of Oval Curves and those having a plurality of Foci; with remarks by Professor Forbes*. Touto jinošskou Maxwellovou vědeckou prací začíná též dvojdílné vydání jeho sebraných vědeckých statí „*J. C. Maxwell. The scientific papers*“, jež poprvé vyšlo v r. 1890. S profesorem Forbesem navázal Maxwell celoživotní přátelství. S jeho podporou měl již jako student akademie možnost používat přístroje univerzity v Edinburghu a vedle matematiky se začal stále více zajímat o fyziku. Na jaře 1847 jej přivedl strýc k význačnému fyzikovi W. NICOLOVI (1768–1851), vynálezci později po něm nazvaného polarizačního hranolu (*nikolu*). Maxwell byl nadšen předvedenými nádhernými jevy *chromatické polarizace a fotoelasticity*. Sám si pak vyrobil jednoduchý *polarizační přístroj* (jako polarizátorů použil skleněná zrcadla) a věnoval se *fotoelasticimetrii* průhledných pružných materiálů; nejkrásnější ze získaných barevných obrazců překreslil a poslal Nicolovi. Odměnou dostal dva Nicolem vyrobené *polarizační hranoly*, kterých si po celý život velmi cenil a pomocí nichž realizoval řadu výzkumů. Studium na edinburghské akademii zakončil Maxwell jako jeden z nejlepších žáků již ve věku šestnácti let a na radu Nicola, Forbese a dalších profesorů přešel na Edinburghskou univerzitu. Na rozloučenou s akademií složil její hymnu.

Studium na univerzitě v Edinburghu (1847–1850) — práce z teorie pružnosti

Na univerzitě v Edinburghu studoval Maxwell v letech 1847–1850. Katedru fyziky (tehdy zde podle Newtona nazývanou „přírodní filozofii“) vedl profesor Forbes, katedru logiky významný logik, filozof a historik W. HAMILTON (1788–1856), jenž výrazně zapůsobil na Maxwella v oblasti teorie poznání. A jeho profesor matematiky předložil v edinburghské Královské společnosti druhou vědeckou práci tehdy sedmnáctiletého studenta Maxwella *On the Theory of Rolling Curves*. Avšak Maxwella v té době již především přitahovala fyzika. Studium fotoelasticity jej přivedlo k *teorii pružnosti*. V práci *On the Equilibrium of Elastic Solids*, kterou nyní již sám četl v r. 1850 na zasedání Královské společnosti v Edinburghu, řešil řadu problémů teorie pružnosti experimentálně i teoreticky. Výsledky práce byly přijaty odborníky s uznáním a jedna z odvozených vět vešla do učebnic teorie pružnosti a stavební mechaniky pod názvem „*Maxwellova věta*“.

Před Maxwellem se rýsovala další perspektiva studia, univerzita v Edinburghu jej již nemohla uspokojit, toužil po širším rozhledu. Na podzim 1850 proto odjíždí James Clerk Maxwell studovat do Cambridge.

Studium na univerzitě v Cambridgi (1850—1854) — tripos

Nejstarším univerzitním učilištěm Cambridge byla kolej Peterhouse (založená v r. 1284), nejznamenitějším Trinity College (založená v r. 1546), kterou proslavil její absolvent a profesor ISSAC NEWTON (1643—1727). Maxwell nastoupil ke studiu na Peterhouse, brzy však přestoupil na Trinity College. Podle svědectví P. G. Taita (studujícího na Trinity College v té době již dva roky) znalosti Maxwellovy byly na jeho věk velmi rozsáhlé, avšak tak chaotické, že to uvádělo v úžas jeho učitele (tutora) HOPKINSE, který měl pověst nejlepšího korepetitora koleje. Hopkins připravoval Maxwella k závěrečné zkoušce (*triposu*) z matematiky a vyjádřil se o něm: „... *Byl to nejneobyčejnější muž, kterého jsem kdy viděl. Vrozeně byl neschopen myslet o fyzice nesprávně...*“. Kromě matematiky studoval Maxwell mechaniku, astronomii a další fyzikální disciplíny. V letech studií v Cambridgi 1850—1854 měl na něj mimořádný vliv profesor katedry matematiky na Trinity College G. G. STOKES (1819—1903), významný matematik a fyzik. Maxwell se aktivně zúčastňoval všech jeho přednášek a brzy se s ním sblížil pro celý život. Začátkem roku 1854 složil tripos z matematiky. V celkovém pořadí byl druhý („*Second Wrangler*“) za E. J. ROUTHEM (1831—1907), který se stal vynikajícím tutorem Trinity College a dosáhl později významných výsledků v analytické mechanice. Kvality obou se vzápětí potvrdily při písemné zkoušce o *Smithovu cenu* pro absolventy Cambridge. Stokesem zadaný problém — důkaz věty nazývané nyní ve vektorové analýze *větou Stokesovou*, zvládl Maxwell ještě lépe než Routh a vzhledem k výsledku triposu byla Smithova cena mezi ně rozdělena rovným dílem. Stokesova věta měla později pro Maxwella obrovský význam při jeho formulaci základních zákonů teorie elektromagnetického pole.

Aspirant profesury v Cambridgi (1854—1856) — první práce z elektromagnetismu „O Faradayových siločarách“

V letech 1854—1856 zůstal Maxwell na Trinity College a připravoval se na profesuru. O svých vědeckých plánech a výsledcích vedl čilou vědeckou korespondenci zejména s W. THOMSONEM (1824—1907), budoucím lordem KELVINEM, který byl v té době pokládán vedle M. FARADAYE (1791—1867) za nejvýznamnějšího fyzika Velké Británie a byl již od svých 22 let profesorem univerzity v Glasgowě. Jako s přítelem rodiny Clerků se s ním seznámil o sedm let mladší J. C. Maxwell již v dětství (dvanáctiletý strávil u něho v Glasgowě část prázdnin). Jejich vzájemné korespondence je svědectvím Maxwellova vědeckého vývoje. Již pouhý měsíc po matematickém triposu, 20. 2. 1854, sděluje Maxwell v dopise W. Thomsonovi, že má „*silnou touhu vrátit se k fyzikálním problémům*“ a je rozhodnut „*zaútočit na elektřinu*“. Byl si vědom nutnosti rozšířit své znalosti v tomto oboru a žádal proto o radu, jak a v jakém pořadí číst práce Ampérovy, Faradayovy a Thomsonovy. Závěrem seznámil Thomsona s výsledky své poslední matematické práce

o *deformacích ploch*. V podrobné odpovědi Thomson souhlasil s Maxwellovým rozhodnutím zabývat se problémy elektřiny a magnetismu, doporučil mu vhodný postup studia prací z tohoto oboru a připojil též informaci o GAUSSOVÝCH klasických pracích z teorie ploch. A Maxwell již 14. 3. 1854 v dopise Thomsonovi byl schopen porovnat svoje výsledky (později publikované r. 1856 ve stati *On the Transformation of Surfaces by Bending*) s Gaussovou teorií. Existovala však též další oblast Maxwellova zájmu – *teorie barev a barevného vidění*, k níž byl pravděpodobně přiveden svými pokusy s chromatickou polarizací a již se věnoval systematicky už od r. 1852. V tomto dopise popsal svoje úvahy o *daltonismu*. První výsledky svého „útoku na elektřinu“ pak oznámil W. Thomsonovi v dopise 13. 11. 1854: „*nováčkovi v elektřině*“, jak se sám charakterizuje, se podařilo vyjasnit „*ohromnou spoustu pochybností*“ a „*dosti snadno dospěl k základním principům elektřiny napětí*“ (jíž rozumí *elektrostatiku*), přitom mu velmi pomohla Thomsonem nalezená *analogie s tepelnou vodivostí*. Píše, že v průběhu semestru četl AMPÉROVA vědecká pojednání a „*byl jimi nadšen*“, avšak chce se na ně podívat „*filozoficky*“, neboť jej neuspokojuje představa vzájemného silového působení proudových elementů bezprostředně „*na dálku*“. Kdysi se dozvěděl o „*magnetických siločarách*“ M. Faradaye právě od W. Thomsona (který na rozdíl od ostatních fyziků té doby dovedl pochopit Faradayovy představy), postupně přijal a domyslel Faradayovu metodu magnetických siločar pro výklad vzájemného silového působení vodičů protékanými proudy. „*Nyní se domnívám*“, uvádí, „*že každý proud generuje magnetické čáry a je vystaven působení určovanému magnetickými čarami, jež jím prochází...*“ V následujícím textu dopisu se u Maxwella poprvé setkáváme s pojmem *magnetické pole*. Tento pojem zavedl již Faraday v *Experimental Researches in Electricity*, uveřejněných v letech 1831 – 1852 v londýnských „*Philosophical Transactions*“; ve svých úvahách však převážně používal pojem *elektrotonický stav* (tj. elektricky vzbuzený stav), do něhož se dostává prostředí obklopující magnety nebo vodiče protékané proudy, a názorný pojem *magnetické siločáry*. V citovaném Maxwellově dopise se též poprvé objevují některé *lokální a integrální veličiny* jeho budoucí *teorie elektromagnetického pole* i *první verze slovní a matematické formulace jejich základních zákonů*. Následující dopisy W. Thomsonovi (z 15. 5. a 13. 9. 1855) zachycují období soustředěného Maxwellova studia třídílných Faradayových *Experimental Researches in Electricity* a přípravy prvního spisu o elektřině a magnetismu. V září 1855 složil Maxwell s úspěchem zkoušky k dosažení učitelské způsobilosti na Trinity College („*Fellowship at Trinity*“). Byl pověřen přednáškami z vybraných partií *hydrostatiky* a *optiky*, zároveň však pokračoval ve vědecké práci zejména v *teorii elektromagnetismu a teorii barev*. Začátkem r. 1856 dokončil spis *On Faraday's Lines of Force*, který byl publikován v *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* za r. 1855 – 1856. Je to první ze čtyř základních Maxwellových prací, v nichž vybudoval svoji teorii elektromagnetického pole, termín *pole* však v ní nepoužil. Jako cíl této práce si kladl zjednodušení obrovského množství poznatků v elektřině a magnetismu a názornou interpretaci Faradayových představ. Za základní pracovní metodu zvolil *metodu fyzikální analogie*. Pojem „*fyzikální analogie*“ charakterizoval jako „*podobnost v matematické formě jevů dvou různých oblastí přírody...*“ a zdůvodnil užitečnost jejího použití. Potom přistoupil k vytvoření *hydrodynamického modelu* pro výklad elektrických a magnetických sil. Definoval pojem „*siločáry*“, jejíž tečny udávají směr elektrické, resp. magnetické síly

v příslušném bodě. Pro vyjádření velikosti těchto sil zavedl trubice proměnného průřezu ohraničené siločarami (později nazvané „*silovými trubicemi*“) a protékané *hypotetickou nestlačitelnou kapalinou*, jejímiž stálými „*zdroji*“ a „*norami*“ jsou *elektrické částice* („*částice elektřiny*“) nebo *magnetické póly*. Rychlost kapaliny v každém bodě udávala intenzitu elektrických, resp. magnetických sil. Vliv prostředí charakterizoval Maxwell odporem, který prostředí klade protékající kapalině. Pomocí hydrodynamického modelu se Maxwellovi podařilo názorně popsat elektrostatické a magnetostatické silové působení i síly, jimiž na sebe působí vodiče se stacionárními proudy. Pro popis indukčních procesů „*faradayovského elektrotonického stavu*“ se však tento model ukázal nevhodný a Maxwell přistoupil k použití *matematické symboliky* (za což se čtenářům omlouvá a doufá, že se mu v budoucnu podaří nalézt adekvátní názorný model). Formuloval soubor základních elektromagnetických zákonů, mezi kterými již jsou i matematická a slovní vyjádření všech *čtyř Maxwellových rovnic elektromagnetického pole*. I. rovnice je zde však dosud bez „*posuvného proudu*“ (pro stacionární elektromagnetické pole) a II. rovnice je formulována pro elektromagnetickou indukci ve vodičích (uzavřených nebo neuzavřených). V komentáři k německému překladu této práce L. BOLTZMANN (1844–1906) právem poznamenal, že „*první velká Maxwellova práce obsahuje už překvapivě mnoho*“. V období, kdy Maxwell promýšlel druhou část této práce, oznámil mu v únoru 1856 profesor Forbes, že se uvolnilo místo profesora „*přírodní filozofie*“ na Marishall College ve Skotském Aberdeenu, pro něž by měl nejlepší předpoklady, a zároveň, že jej chce navrhnout za člena Královské společnosti v Edinburghu. Maxwell, který toužil být nablízku svému nemocnému otci, se proto rozhodl ucházet o profesuru na univerzitě v Aberdeenu v rodném Skotsku. Krátce před jejím udělením mu však v dubnu 1856 otec zemřel. Ztráta vroucně milovaného otce byla pro Maxwella těžkou životní ranou.

Profesor univerzity v Aberdeenu (1856—1860) — práce z teorie barev a výzkum prstenců Saturna

Na podzim r. 1856 nastoupil jako pětadvacetiletý profesorské místo na Marishall College. Zde pokračoval ve svých výzkumech v oblasti fyziologické teorie barev pomocí kotouče s barevnými sektory („*Maxwellova disku*“) umístěného na setrvačnicku („*vlčku*“) a s použitím spektroskopu. První jeho práce o *teorii barev a barvosleposti* byla uveřejněna v r. 1856, další dvě v r. 1857. Rozvíjí v nich *tříslůžkovou teorii barevného vidění* a jeho základním přínosem bylo zavedení *kvantitativního přístupu* k teorii barev, rozpracoval metodu *měření barev* a jako první zavedl *rovnice barev*. Zkoumal též dynamiku setrvačnicku (gyroskopu), který podepřel v těžišti („*Maxwellův setrvačnick*“) a aplikace na pohyb Země. O nových přístrojích, experimentech i teoretických výsledcích psal Maxwell 17. 12. 1856 W. Thomsonovi. Tento dopis je velmi závažný pro pochopení Maxwellovy *pedagogické činnosti*, kterou stavěl naroveň s vědeckou prací a chápal ji jako tvůrčí proces. Uvědomoval si zřetelně nedostatky pasívní výuky, a proto se zajímal o všechny formy *aktivizace výukového procesu*. Z této i jeho další korespondence je zřejmé, že Maxwell věnoval přinejmenším v určitých obdobích hodně času i energii přípravě

výuky. Přesto podle svědectví jeho současníků nebylo snadné sledovat jeho výklady, zčásti v důsledku jeho dikce, zejména však proto, že své posluchače i čtenáře stavěl na úroveň svého výjimečného talentu. Pro nadané studenty nebylo ale lepšího učitele. V Aberdeenu též zavedl do výuky *experimenty*, což byl čin velmi progresivní, neboť na anglických univerzitách fyzikální vzdělání do této doby se omezovalo na matematickou fyziku. Na skotské univerzitě v Glasgowě vybudoval fyzikální laboratoř jeho vzor W. Thomson. Počátkem r. 1857 zaslal Maxwell separáty své práce *O Faradayových siločarách* řadě vědců a též M. Faradayovi. V odpovědi z 25. 3. 1857 vyjádřil Faraday neskrývané nadšení, neboť se konečně objevil fyzik schopný nejen přijmout jeho myšlenky, ale mocně je rozvíjet a matematicky vyjadřovat. Dopis obsahuje též sdělení, že se Faraday chystá měřit „*dobu šíření magnetického působení*“ (z kontextu je zřejmé, že měl na mysli měření *rychlosti šíření*). Tento dopis byl počátkem vědeckých kontaktů mezi oběma zakladateli teorie elektromagnetického pole. Z prací provedených v Aberdeenu širokou popularitu získalo Maxwellovo vyšetřování záhady *Saturnových prstenců*, o nichž studiem stability jejich pohybu matematicky dokázal, že nemohou být ani kompaktní ani tekuté, nýbrž sestávají z množství drobných tělísek. Za tento objev, později potvrzený spektroskopickými měřeními, získal *Adamsovu cenu* a renomé prvotřídního matematika. Období působení v Aberdeenu se stalo závažným i pro Maxwellův osobní život – seznámil se zde s dcerou rektora Marishall College KATHRINE MARY DEWAROVOU a v r. 1858 se s ní oženil. Manželka mu byla věrnou průvodkyní po celý zbytek jeho života. Závěr aberdeenského období zahájil novou významnou etapu Maxwellovy vědecké práce v oblasti *kinetické teorie plynů a statistické fyziky*; o svých prvních výsledcích referoval Maxwell v r. 1859 na aberdeenském sjezdu Britské asociace pro podporu rozvoje věd. V r. 1860 došlo ke sloučení dvou univerzit v Aberdeenu a při této reorganizaci přišel Maxwell o profesorské místo. Avšak po krátkém pobytu v Glenlairu přešel na podzim 1860 jako profesor fyziky na King's College v Londýně.

Profesor na univerzitě v Londýně (1860—1865) — přínos ke kinetické teorii plynů, první barevná fotografie, díla „O fyzikálních siločarách“ a „Dynamická teorie elektromagnetického pole“

Londýnská etapa Maxwellova života měla dramatickou předehru. Za prázdninového pobytu v Glenlairu vážně onemocněl neštovicemi a lékaři měli obavu o jeho život. Uzdravil se však díky péči své manželky, takže mohl na podzim 1860 nastoupit profesorské místo na King's College. Ještě v r. 1860 publikoval ve vedoucím anglickém fyzikálním časopise *Philosophical Magazine* rozsáhlou stať *Illustrations of the Dynamical Theory of Gases*. Ke studiu pohybu molekul v ní použil oblíbené *mechanické analogie* – modelu tvořeného malými pružnými koulemi, jejichž pohyby a srážky se řídí podle zákonů klasické mechaniky. Zásadním Maxwellovým přínosem bylo zavedení matematického pojmu *pravděpodobnosti* a *statistických metod* do kinetické teorie plynů. Odvodil statistický „*zákon rozdělení rychlostí molekul plynu*“, podle něhož je rozdělení různých pohybových rychlostí mezi molekulami právě takové jako Gaussovo normální rozdělení náhodných chyb měření. Dalším významným výsledkem byla formulace „*zákona*

rovnoměrného rozdělení energie“ pro molekuly plynu (později rozvinutého a zobecněného Boltzmannem) a jeho aplikace na objasnění *Avogadrova zákona*. Jako první se Maxwell zabýval „*jevy přenosu*“: „*vnitřním třením*“, „*difúzí*“ a „*vedením tepla*“ v plynech. Pravidelnostní a statistické metody zavedené Maxwellem v kinetické teorii plynů našly zobecnění ve statistické fyzice, kde si jeho zásluhy připomínáme v názvu „*klasická Maxwelllova-Boltzmannova statistika*“. V r. 1860 byl Maxwell vyznamenán za svoje práce z *optiky*, zejména z teorie barev a barevného vidění *Rumfordovou medailí* Královské společnosti v Londýně. V květnu 1861 zde předvedl projekci první *barevnou fotografii* na světě. Realizace se podařila díky souhře šťastných okolností 50 let před tím, než byly získány první fotografické materiály pro barevnou fotografii. V červnu 1861 byl Maxwell počtěn krátce před dovršením svých třiceti let členstvím londýnské Královské společnosti. V Londýně se Maxwell poznal také osobně s Faradayem, se kterým od r. 1857 udržoval písemnou korespondenci. Faraday byl v té době stárnoucím mužem na konci svých fyzických i duševních sil. Z jeho dopisů Maxwellovi je zřejmé, že jevil o Maxwellovy práce z oboru elektřiny a magnetismu vřelý zájem, nebylo však v jeho silách proniknout do jejich matematického jazyka a také neakceptoval nutnou modernizaci terminologie (např. použití pojmu „*energie*“). V posledním Maxwellově dopise Faradayovi z října 1861, jenž zůstal již bez odpovědi (i když jej Faraday pozorně četl), byly obsaženy základní myšlenky druhé Maxwellovy stati z elektřiny a magnetismu *On Physical Lines of Force*, která byla uveřejněna po částech v letech 1861–1962 v časopise *Philosophical Magazine*. Maxwell vycházel opět z *mechanické analogie*, avšak použil složitější model „*molekulárních vírů*“, jejichž osy jsou tečnami k magnetickým siločarám. Pomocí tohoto modelu byl schopen objasnit elektromagnetické síly, stacionární, ale i nestacionární elektromagnetické jevy. Poprvé zde Maxwell zavedl pojem „*posunutí*“ (v dnešní terminologii „*elektrická indukce*“) a „*posuvný proud*“, jímž v práci doplňuje rovnici, nazývanou nyní I. Maxwellovou rovnicí a je tu formulována i II. Maxwellova rovnice. Tyto Maxwellovy rovnice, zapisované dnes ve vektorovém tvaru, byly Maxwellem vyjádřeny v *souřadnicové formě*, tj. jako trojice („*triplety*“) skalárních parciálních diferenciálních rovnic. Kromě toho Maxwell uvedl v této práci *výrazy pro elektrickou a magnetickou energii*. Závěrem na základě mechanické analogie dospěl k myšlence, že „... světlo je tvořeno příčnými kmity téhož prostředí, které je příčinou elektrických a magnetických jevů“. Fundamentální význam Maxwellovy práce *O fyzikálních siločarách* je především v tom, že v ní byla poprvé formulována *úplná soustava Maxwellových rovnic* („*triplety*“) včetně II. Maxwellovy rovnice pro pohybující se vodič (v nerelativistickém případě) a byla zde vyslovena *hypotéza o elektromagnetické podstatě světla*. Tato práce přivedla také Maxwella k zájmu o *elektrické a magnetické jednotky*, v nichž panovala v té době nesmírná nejednota a libovůle. Maxwell se stal členem „*Komitétu pro jednotky (etalóny)*“ založeného r. 1861 „*Britskou asociací*“. Závěry práce komise byly publikovány v r. 1863 a později (v r. 1881) se staly základem pro mezinárodní zavedení elektrických jednotek *ampéru, voltu a ohmu*. V r. 1864 se setkal Maxwell s H. HELMHOLTZEM (1821–1894) za jeho přednáškového pobytu v Londýně a ukazoval mu svoje přístroje ke studiu teorie barev, jíž se od r. 1856 periodicky zabýval (a publikoval z tohoto oboru v letech 1857–1872). Věnoval se též ryze inženýrským problémům z oblasti *statiky konstrukcí* a výsledky uveřejnil r. 1864 v *Philosophical*

Magazine. V tomtéž roce vyšla v Royal Society Transactions třetí fundamentální rozsáhlá Maxwelllova stať z elektřiny a magnetismu nazvaná *A dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. Je charakteristická tím, že Maxwell v ní opustil mechanické modely, jejichž pomocí dospěl v předchozích pracích k formulaci svých rovnic a soustředil pozornost na pojem *elektromagnetického pole*. (Termín „pole“, vyskytující se již v jeho dopise W. Thomsonovi v r. 1854, v obou předchozích statích o siločarách nepoužil a vrátil se k němu až nyní.) Uvádí zde *první definici pojmu elektromagnetického pole* v historii fyziky: „*Elektromagnetické pole — to je část prostoru, která obsahuje v sobě a obklopuje tělesa nacházející se v elektrickém nebo magnetickém stavu.*“ A dodává, že „*tento prostor může být zaplněn libovolným druhem hmoty*“, resp. „*vakuum*“. Rozborem tepelných, světelných a vlnových procesů a dalších elektromagnetických jevů však dospěl k názoru, že nositelem a zprostředkovatelem těchto procesů je hypotetické vše pronikající prostředí zvané *éter* — specifická substance, jejíž rozporuplné vlastnosti popisuje. Velkou pozornost věnoval *elektromagnetické indukci*, přičemž vznik indukovaného elektrického napětí neváže jen na vodič a zobecňuje tak indukční zákon pro *libovolnou smyčku*. Svoje základní rovnice elektromagnetického pole uvádí opět v *souřadnicovém tvaru*, avšak poprvé v přehledném uspořádání. Významně rozvinul elektromagnetickou teorii světla; ze svých rovnic odvodil *vlnové rovnice* pro magnetickou indukci a vztah pro *rychlost šíření rovinné vlny* v závislosti na permeabilitě a permitivitě prostředí (v dnešní terminologii).

Soukromý učenec v Glenlairu (1866—1871) — tvorba vrcholných spisů z elektřiny i magnetismu a teorie tepla, příspěvek k teorii regulace

Život v hlavním městě Británie byl pro Maxwella velmi náročný, povinnosti na univerzitě, organizační a populárně vzdělávací činnost mu ubíraly čas k soustředěné vědecké činnosti. Vedení King's College ani studenti neoceňovali jeho snahu převést výuku fyziky na experimentální základ a přetvořit ji v tvůrčí proces. Při přednáškách nebyl často schopen udržet studenty v kázi a soustředěné pozornosti, jeho výklady byly pro mnohé z nich příliš náročné. Všechny tyto skutečnosti a nedobrá zdravotní stav obou manželů Maxwellových byly příčinou toho, že se Maxwell rozhodl vzdát se své profesorské činnosti na King's College. K definitivnímu rozhodnutí došlo na podzim 1865, kdy se Maxwell za svého pobytu v Glenlairu při projížďce na koni zranil na hlavě a těžce onemocněl. Od té doby žil Maxwell na svém statku v Glenlairu jako soukromý učenec, pokračoval ve svých teoretických i experimentálních pracích a zejména intenzivně připravoval rozsáhlá knižní díla o *teorii tepla*, o *elektřině a magnetismu*. Kromě toho periodicky publikoval články, např. obsáhlou stať o *kinetické teorii plynů* v r. 1866. Věnoval se však i hospodářství. Vedl nesmírně rozsáhlou korespondenci. Na delší čas opustil Glenlair v létě 1867, kdy navštívil se svou ženou Itálii. Učil se velmi snadno jazykům, kromě angličtiny velmi dobře ovládal řečtinu, latinu, francouzštinu, němčinu a před cestou do Itálie se naučil i italštině. Příležitostně zajížděl do Londýna na zasedání učených společností a do Cambridge jako examinátor. Avšak povolání na nejstarší skotskou univerzitu v Saint Andrews, kde se měl stát v r. 1868 rektorem po zemřelém

příteli profesoru Forbesovi, odmítl. V tomto roce vyšla jeho práce *On Governors*, kde rozebírá *teorii regulace* na základě matematických metod navazujících na jeho práce o stabilitě pohybu prstenců Saturna. Tímto dílem se stal jedním ze zakladatelů teorie automatické regulace. Na sjezdu Britské asociace v r. 1869 referoval o soustavách jednotek v elektřině a magnetismu. V letech 1870 a 1871 publikoval zásadní články o *vztazích mezi matematikou a fyzikou, o fyzikálních veličinách a jejich klasifikaci*. V r. 1870 dokončil znamenitou publikaci *Theory of Heat*, jež vyšla v následujícím roce. Po zavedení pojmů *teplota* a *teplotní stupnice* se zabýval *termodynamikou*, formuloval tvůrčím způsobem *hlavní termodynamické věty*, zavedl *termodynamické funkce* a odvodil pomocí geometrických konstrukcí základní diferenciální rovnice termodynamiky („*Maxwellovy termodynamické vztahy*“). Učebnice měla velký úspěch a ještě za Maxwellova života vyšla v několika vydáních, která autor postupně upravoval a doplňoval, zavedl pojem „*užitečná energie*“ (později byla nazvána Helmholtzem „*volná energie*“) a geometrické metody studia termodynamických vlastností J. W. GIBBSĚ (1839 – 1903). Kniha obsahovala též *molekulárně kinetickou teorii tepla* a výklad Maxwellových výzkumů s použitím *statistických metod*. Brzy po jejím vydání v r. 1871 bylo Maxwellovi nabídnuto místo univerzitního profesora v Cambridgi.

Cavendishským profesorem Cambridge (1871—1879) — „Pojednání o elektřině a magnetismu“

Kolem r. 1870 se i v Cambridgi začalo výrazně měnit univerzitní vzdělání fyziků zařazením kursů experimentální fyziky. Trinity College se rozhodla zřídit katedru experimentální fyziky jako součást nově vybudovaného experimentálního vědeckého pracoviště, později nazvaného „*Cavendishova laboratoř*“ na počest H. CAVENDISHE (1731 až 1810), vynikajícího fyzika a chemika (jehož potomek poskytl finanční prostředky na její výstavbu). V jejím čele by bylo vedení univerzity rádo vidělo W. Thomsona, ale ten odmítl opustit Glasgow. Volba pak padla na J. C. Maxwella a čtyřicetiletý vědec po delším váhání nabídku přijal. V jeho rozhodnutí hrála zřejmě velkou roli skutečnost, že právě nyní, když dokončil rukopisy svých dvou učebnic, se mu naskytla vzácná příležitost realizovat své dlouholeté plány přestavby univerzitní výuky fyziky na experimentální bázi, a to v Cambridgi, k níž byl vázán poutem vlastních studií. Tak se stal v březnu 1871 potřetí univerzitním učitelem — prvním *cavendishským profesorem* Cambridge. V nástupní přednášce v říjnu 1871 načrtl svůj *program modernizace vysokoškolského vyučování fyzice*, pronesl promyšlená slova — s nadčasovou platností — o poslání experimentální fyziky, jejích vztazích k teoretické fyzice a matematice, o pedagogických vědeckých i organizačních aspektech vytvářeného fyzikálního experimentálního vědeckého pracoviště. V letech 1871 – 1873 přednášel kursy experimentální fyziky — termiku, svazcích jeho stěžejní dílo *A Treatise on Electricity and Magnetism*, v němž shrnul veškeré dosavadní poznatky z elektřiny a magnetismu. Velkou pozornost věnoval výsledkům získaným pomocí koncepce silového působení „*na dálku*“, jež převládala mezi fyziky do té doby, ale sám se jednoznačně staví na stranu Faradayovy koncepce silového působení „*na blízko*“, tj. prostřednictvím pole. Svoji práci na vytváření matema-

tické teorie elektromagnetického pole charakterizoval skromně jako „překlad“ FARADAYOVÝCH idejí „do matematického tvaru“. Kromě tohoto nesmírně náročného úkolu významně zobecnil a obohatil ve svém díle tyto ideje, zejména o pojem „posuvného proudu“. Cíle *Pojednání o elektřině a magnetismu* jsou formulovány v předmluvě. Po ní následují úvod o fyzikálním měření a matematický úvod. Další text knihy je rozdělen do čtyř rozsáhlých částí – počínaje elektrostatikou a konče elektromagnetismem. Závažná je zejména poslední část, v níž po kapitolách o elektromagnetické síle a elektromagnetické indukci jsou zařazeny kapitoly o užití metod analytické mechaniky při studiu elektromagnetických systémů (k jejichž renesanci dochází nyní v souvislosti se systémovým přístupem k řešení elektromagnetických problémů) a nejvýznamnější kapitoly o obecných rovnicích elektromagnetického pole a teorie světla. Pro veličiny elektromagnetického pole Maxwell zde poprvé použil *vektorovou symboliku* a základní rovnice elektromagnetického pole vyjádřil vedle *souřadnicového tvaru* též v *kvaternionovém tvaru*, tj. pomocí kvaternionů a kvaternionového počtu W. R. HAMILTONA (1805 až 1865). Například triplet „*rovnice elektrického proudu*“, tj. souřadnicové vyjádření I. Maxwellovy rovnice v dnešní terminologii, zapisoval Maxwell v *Pojednání* takto:

$$4\pi u = \frac{dy}{dz} - \frac{d\beta}{dx}; \quad u = p + \frac{df}{dt},$$

$$4\pi v = \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx}; \quad v = q + \frac{dg}{dt},$$

$$4\pi w = \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy}; \quad w = r + \frac{dh}{dt},$$

kde u, v, w jsou kartézské souřadnice *hustoty celkového proudu*, p, q, r souřadnice *hustoty vodivého proudu*, f, g, h souřadnice *elektrické indukce* (v dnešní terminologii; Maxwell vynechával slovo „*hustota*“ a místo termínu *elektrická indukce* používal název „*posunutí*“), α, β, γ jsou kartézské souřadnice *intenzity magnetického pole* (v dnešní terminologii; Maxwell mluvil o „*magnetické síle*“). V kvaternionovém tvaru vyjádřil Maxwell tyto rovnice takto:

$$4\pi\mathfrak{C} = V \cdot \nabla\mathfrak{H}; \quad \mathfrak{C} = \mathfrak{R} + \mathfrak{D},$$

kde ∇ je operátor $\mathbf{i}(d/dx) + \mathbf{j}(d/dy) + \mathbf{k}(d/dz)$ Hamiltonova kvaternionového počtu a V zde značí, že se má vzít vektorová část následujícího kvaternionového výrazu. Rozsahem i obsahem bylo *Pojednání* dílem pro čtenáře velmi náročným. Ideje Faradayovy-Maxwellovy teorie elektromagnetického pole a teorie světla byly v době prvního vydání spíše natolik nové a revoluční, že naprostá většina fyziků (včetně W. Thomsona) se k nim postavila odmítavě nebo rezervovaně. HELMHOLTZ, LORENTZ, POINCARÉ, BOLTZMANN a další fyzici doznávají ve svých autobiografických vyznáních, že se dlouho nemohli v Maxwellově spise orientovat a pochopit jej. L. Boltzmann výstižně uvádí, že *Pojednání* se pro ně stalo „*knihou za sedmi zámky*“. Bylo to způsobeno nejen novostí myšlenek v něm obsažených, ale také formou, kterou je Maxwell podává – výsledky druhých autorů popisuje velmi podrobně a jasně, zatímco své vlastní výsledky podává

stručně a mnohdy bez odvození. Maxwell již zde neuvádí své mechanické modely a příslušné myšlenkové postupy, které jej vedly k formulaci rovnic elektromagnetického pole. L. Boltzmann o tom napsal v komentáři k práci *O Faradayových siločarách*, že „osobitá originální Maxwellova metoda vystupuje daleko jasněji v jeho dřívějších dílech“. Maxwell byl rozčarován chladným přijetím svého díla a pro 2. vydání je začal podstatně přepracovávat. Budoucnost však ukázala, že *Pojednání* i ve své původní formě sehrálo obrovskou roli pro rozšíření idejí Maxwellovy teorie elektromagnetického pole. V r. 1873 Maxwell vydal též knížku menšího rozsahu *Matter and Motion* věnovanou *mechanice*, která pro něj byla základem veškeré fyziky. Jeho snahou bylo podat výklad jednoduše, bez použití vyšší matematiky, přesto však je tato knížka náročná a má vysokou vědeckou úroveň. V letech 1873–1878 Maxwell vydal řadu zajímavých článků, např. v r. 1873 *Faraday a Molecules*, r. 1875 *Atom*, r. 1876 *On Ohm's Law*, r. 1879 *Ether*. Mnoho času a péče věnoval Maxwell v letech 1874–1879 redigování a vydávání spisů z pozůstalosti H. Cavendishe, zvláštní pozornost přitom zaměřil na jeho práci z elektřiny. (Cavendish byl velkým anglickým přírodovědcem, měl však podivínskou povahu a sám uveřejnil ze svých prací jen velmi málo.) To ovšem Maxwell ještě netušil, jak málo času mu zbývá na vlastní vědeckou práci... V r. 1878 měl poslední veřejnou přednášku o telefonu a v r. 1879 vyšel poslední jeho článek. Přepracování *Pojednání o elektřině a magnetismu* pro 2. vydání již nedokončil a jeho poslední kniha *On Elementary Treatise on Electricity* byla vydána až po jeho smrti v r. 1881. Počátkem r. 1877 se u něj začaly projevovat příznaky zhoubné choroby. Teprve v dubnu 1879 však o ní píše svému lékaři. V červnu 1879 ještě odjíždí na prázdniny do Glenlairu, ale v říjnu se vrací těžce nemocný do Cambridge. Zde 5. listopadu 1879 ve věku 48 let umírá na stejnou nemoc – rakovinu zažívacího traktu – jako před čtyřiceti lety jeho matka. Po pohřebních obřadech v Trinity College byl pochován v Partonu poblíže Glenlairu.

Význam Maxwellova vědeckého díla ve fyzice a v technice

Život tohoto neobyčejně plodného badatele, který v sobě spojoval geniálního teoretického fyzika a nápaditého experimentátora, skončil neočekávaně brzy. Vědecké dílo, které ve svém relativně krátkém životě vytvořil, jej řadí mezi nejvýznačnější fyziky nové doby. S Maxwellovým jménem a výsledky jeho prací se setkáváme nejen v *kinetické teorii plynů*, v *termodynamice*, *statistické fyzice*, *optice*, *fyzilogické teorii barev*, ale i v *pružnosti*, *stavební mechanice*, *klasické teorii regulace*. Nesmrtelně se však zapsal do analů světové vědy především svou *klasickou teorií elektromagnetického pole a elektromagnetickou teorií světla*. Na rozdíl od prací v ostatních fyzikálních oborech tyto jeho nejvýznamnější teorie byly pochopeny a přijaty až po jeho smrti. Bylo k tomu třeba soustředěného úsilí řady dalších fyziků. Velký význam mělo vyjasnění podstaty Maxwellovy teorie elektromagnetického pole a formálního zápisu Maxwellových rovnic O. HEAVISIDEM (1850–1925) a H. HERTZEM (1857–1894). Heaviside pochopil, že použití kvaternionů je nevhodné, fyzikálně nepřirozené a od r. 1883 přešel k prostým skalárům a vektorům, začal používat vektorový počet a vyjádřil *Maxwellovy rovnice ve vektorovém tvaru*. Zjednodušený zápis *diferenciálního tvaru Maxwellových rovnic v souřadnicích* zavedl

Hertz. Jejich význam vyjádřil lapidárně slovy: „*Maxwellova teorie – to je soustava Maxwellových rovnic*“. A aby Maxwellova teorie zaujala pevné místo v rámci klasické fyziky, o to se zasloužil zejména Hertz, který prokázal (1884–1889) *reálnou existenci elektromagnetického vlnění* předvídaného touto teorií. Maxwellova teorie elektromagnetického pole tím vstoupila do stadia *praktických aplikací v radiotechnice* a dalších oborech *slaboproudé elektrotechniky*. Stala se *fyzikálním základem silnoproudé i slaboproudé elektrotechniky*. Pro zavedení a rozšíření nyní používaných tvarů Maxwellových rovnic měly důležitý význam přednášky A. SOMMERFELDA (1868–1951) a jeho kniha *Elektrodynamik* vydaná r. 1949. Vychází z Hertzova *axiomatického pojetí Maxwellovy teorie*, o jehož významu pro vyjasnění jádra Maxwellovy teorie v předmluvě knihy výstižně píše: „*Jako by mi spadly klapky s očí, když jsem přečetl velký Hertzův spis „O základních rovnicích elektrodynamiky těles v klidu“...*“. Na rozdíl od Hertze však používá *vektorové vyjádření Maxwellových rovnic* a jako výchozí bere fyzikálně názornější *integrální tvar* těchto rovnic (v SI):

$$\oint_{\epsilon(S)} \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = I + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \, d\mathbf{S}, \quad (\text{I}) \qquad \oint_S \mathbf{D} \, d\mathbf{S} = Q, \quad (\text{III})$$

$$\oint_{\epsilon(S)} \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S}, \quad (\text{II}) \qquad \oint_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} = 0. \quad (\text{IV})$$

Z nich se odvozuje *diferenciální tvar Maxwellových rovnic* (v SI):

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (\text{I}) \qquad \text{div } \mathbf{D} = \rho, \quad (\text{III})$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (\text{II}) \qquad \text{div } \mathbf{B} = 0. \quad (\text{IV})$$

Při používání tohoto zápisu Maxwellových rovnic odlišného od jejich původního Maxwellova zápisu si uvědomme slova L. BOLTZMANNNA v komentáři k dílu *O fyzikálních siločarách*: „*Mohl bych říci, že Maxwellovi následovníci v těchto rovnicích, zdá se, kromě písmen nic nezměnili. Avšak říci to by bylo příliš. Ne tomu je třeba se divit, že k tomto rovnicím vůbec mohlo něco být dodáno, ale mnohem spíše tomu, jak málo k nim bylo dodáno...*“. Klasická teorie elektromagnetického pole byla v dalším vývoji fyziky prohloubena a zobecněna („*Lorentzova elektronová teorie*“, „*relativistická elektrodynamika*“, „*kvantová elektrodynamika*“). *Elektrodynamika v pohybujícím se prostředí* má svůj základ již v Maxwellových pracích o teorii elektromagnetického pole a stala se pro A. EINSTEINA (1879–1955) důležitým inspiračním zdrojem při formulaci *speciální teorie relativity*. Tato Einsteinova teorie prokázala chybnost koncepce elektromagnetického pole jako stavu éteru. Spolu s experimenty ověřujícími hmotnou podstatu elektromagnetického pole (LEBEDĚV aj.) přispěla významně k modernímu fyzikálnímu pojetí *elektromagnetického pole jako specifické formy hmoty*. Maxwellova klasická teorie elektromagnetického pole si však trvale zachovala svoje postavení jako základní součást klasické fyziky i fundamentální význam pro technické aplikace.