

Světlo ve století světla

Jiří Langer

Ústav teoretické fyziky MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8; Jiri.Langer@mff.cuni.cz

Zlaté sedmeré světlo, vůkol planoucí, duši ti dává směsice barev...

Díky známému filmu celý národ ví, že 19. století je „století páry“. Trochu nás však může zaskočit termín „století světla“ pro století osmnácté. Ten je běžný ve Francii (*Le siècle des Lumières*), ale my hovoříme o období osvícenství, podobně jako Angličané o *Enlightenment* a Němci o *Aufklärung*. Ze všech těchto termínů sice světlo jasně prosvítá, ovšem má pouze symbolickou úlohu. Jenže světlo jako fyzikální jev hrálo ve vývoji myšlení „věku rozumu“, což je jiný termín pro osvícenství, velmi důležitou roli. Charakteristickým rysem osvícenství byla osvěta (i z tohoto slova nápadně vykukuje světlo, podobně jako z německého *Erklärung*), tedy šíření vzdělanosti, a nauka o světě byla hojně popularizována. Šlo o jev každému známý, skrývající však řadu zapeklých hádanek a umožňující efektní experimenty.

„Náboženství rozumu“, pěstované především ve Francii, mělo řadu významných proroků. K nejznámějším jistě patří François-Marie Arouet, řečený Voltaire (1694–1778). Ten chtěl přiblížit francouzskému čtenáři dílo obdivovaného Isaaca Newtona spisem *Základy Newtonovy filosofie* [1] a jeho značná část věnoval právě newtonovské optice. Frontispis prvního vydání z roku 1745 ukazuje, že slova „prorok“ jsem užil docela vhodně. Vidíme na něm světlo vycházející od božského Newtona a dopadající na zrcadlo, které je odráží na písíciho Voltaira. Optiky se týká značná část spisu a Voltaire v něm mimo jiné vyvrací teorie konkurentů Newtonovy korpuskulární teorie, zejména Descarta a Malebranche.

Dáma držící zrcadlo je neobyčejně vzdělaná Gabrielle Émilie Le Tonnelier de Breteuil, markýza Du Châtelet (1706–1749), autorka několika vědeckých pojednání, mimo jiné *Eseje o optice*. Jejími učiteli matematiky a fyziky byli především Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698–1759) a později Alexis Claude Clairaut (1713–1765). Clairaut ukázal na základě hydrostatiky, že rotující Země musí mít tvar elipsoidu s malou poloosou jako osou rotace, což s de Maupertuisem i experimentálně prokázali, když zorganizovali expedice za účelem proměření velikosti stupně zeměpisné délky v Laponsku a blízko rovníku. Paní du Châtelet dělala zajímavé experimenty s měřením kinetické energie. Přeložila také z latiny do francouzštiny Newtonova „Principia“. Napsala učebnici fyziky pod názvem *Institutions de physique* a práci podanou do soutěže francouzské akademie *Dissertation sur la nature et la propagation du feu* (Dissertace o povaze a šíření ohně). Její vliv na Voltairovy „Základy“ byl tedy určitě aktivnější než pouhé držení zrcadla, což ostatně v knize zdůrazňuje i autor.



Markýza též volně přeložila rozporuplnou politickou satiru Bernarda Mandevillea *Bajka o včelách*, kritizovala některé myšlenky Johna Locka, napsala kritický výklad Bible a řadu dalších prací mimo přírodovědnou oblast. Voltaire, Maupertuis i exemplární materialista Julien Offray de La Mettrie, autor známého spisu *Člověk stroj*, též zauímají čestné místo na poměrně bohatém seznamu jejích milenců.

Dříve než Voltairovy „Základy“ vyšlo v roce 1737 i půvabné dílko od italského polyhistora Francesca Algarottiho (1712–1764) *Il newtonianismo per le dame* [2], tedy *Newtonianismus pro dámy*, s podtitulem „Dialogy o světle, barvách a přitažlivosti“. Kniha začíná rozsáhlým věnováním významnému francouzskému mysliteli a popularizátorovi Le Bovierovi de Fontenelle (1657–1757), autoru vlivného spisu *Rozhovory o pluralitě světů*. (Fontenelle se dožil plné stovky let; po devadesátce se prý zamiloval do jedné mladé dámy a povzdychl si: „Kéž by mi bylo o deset let méně!“)

V Algarottiho příběhu vypravěč navštíví zámek krásné markýzy a zpočátku se s ní baví především o li-



Gabrielle Émilie Le Tonnelier de Breteuil,
markýza Du Châtelet

teratuře. Markýza nerozumí metafoře ve verši o „sedmerém světle“, jež jsme uvedli v záhlaví, a vypravěč ji seznámí se spektrálním rozkladem slunečního světla na sedm barev. Zvídavá dáma se chce dozvědět více, a tak čtenář spolu s ní sleduje historii představ o světle od antických dob. Markýzu nejprve upoutá Descartova představa prostoru vyplněného částicemi, jež nekonečnou rychlostí předávají impulzy od zdroje až k oku. Vypravěč jí však přesvědčí o slabinách této teorie i o problémech teorie Nicolase Malebranche (1638–1715) a obrátí ji na newtoniánskou víru. Kniha je rozdělena na šest dialogů. Pátý z nich je věnován především optickým experimentům, šestý rozebírá gravitaci. Vše končí happy endem, když vypravěč svou žačku ujistí, že „teď se již může pokládat za pravou newtoniánku“. Jaké štěstí markýza pocítí!

Pronewtonovských argumentů si všimneme později, teď spíše k duchu knihy. Není vůbec dogmatický, nese typické rysy osvícenství. I když hájí newtonovskou korpuskulární teorii, která později padla, činí to argumenty odvozenými z experimentů, třebaže ne vždy správně interpretovanými, a odmítá spekulativní přístup k poznání. Algarotti sám předváděl v Bologni Newtonovy optické experimenty [3] a markýza pod zkušeným vedením dochází jednoznačně k názoru, že empirie má při poznávání přednost před spekulací. Celková svobodomyšlnost spisu mu vynesla i církevní zákaz.

Markýza z Algarottioho knihy je fyzikálně a matematicky méně vzdělaná než markýza du Châtelet, zdá se však, že nese některé její rysy. Algarotti se znal s okruhem přátel markýzy du Châtelet, navštívil zámek Châteletů v Cirey, který v letech 1734 až 1749 poskytoval útočiště Voltairovi. Znal se i s de Maupertuisem, který jej zval k účasti na expedici do Laponska za účelem měření úhlového stupně. Vypravěč a markýza na frontispisu prvního vydání *Newtonianismu pro dámy* jsou podobní Algarottimu a paní du Châtelet.

Během několika málo let vyšla Algarottioho kniha též francouzsky, anglicky a německy, jednalo se tedy o skutečný bestseller. Byla ovšem kritizována pro frivolní tón. Vypravěč s markýzou neustále flirtuje, místo

strohého výkladu se setkáváme s mnohými lichotkami občas kořeněnými lehkou ironií: „Tak například mezi červení vašich líček a červení v duze nebo hranolu není rozdíl, až na to, že vaše tváře je příjemnější pozorovat. Myslíte, že tolik skvělých básníků by přirovnávalo dámy k duze, kdyby zde nebylo podobnosti v barvách?“ Když markýze vykládá o mikroskopu, upozorňuje ji, že její hebká pleť by se pod ním jevila pokrytá nerovnostmi a šupinami, a markýza říká, že své méně vědychtivé známé bude varovat před filosofy disponujícími mikroskopem. Styl knihy výstižně ilustruje, jak se diskutovalo v modlitebnách „náboženství rozumu“, v literárních salonech – s duchaplným šarmem, vtípem, někdy trochu lechtivým, s noblesou, ale především se skutečnou myšlenkovou hloubkou.

Salony sehrály v dějinách osvícenství důležitou roli. Byl to vlastně italský vynález, ale největšího rozkvětu se mu dostalo v 17. a 18. století ve Francii. V čele salonu stála „salonnière“, na které závisel výběr hostů, často však byla i tvůrkyní programu a moderátorkou diskusí. Ženský prvek byl v salonech významný i jinak. V době, kdy instituce poskytující vyšší vzdělání byly ženám uzavřeny, představovaly pro ně jakési neformální univerzity. Salony navštěvovala řada vynikajících osobností vědy, literatury i politického života a „Newtonova filosofie“ patřila k oblíbeným diskusním tématům. V druhé polovině 18. století byl silnou baštou osvícenství salon madame Geoffrin, k němu pak přibývaly salony Julie de Lespinasse a Suzanne Curchod-Necker. Navštěvoval je například d'Alembert, Diderot i veký přírodovědec Georges-Louis Leclerc Buffon (1707–1788).

Jean-Baptiste le Rond d'Alembert (1717–1783) byl ovšem se salony spjat, dá se říci od narození, či přesněji od početí. Jeho matkou byla vcelku úspěšná spisovatelka baronka Claudine de Tencin (1682–1749), která se s jeho otcem, rytířem Louisem-Camussem Destouchesem, seznámila právě ve svém salonu. Jenže dítě se jí jaksi nehodilo, a tak použila „baby boxu“ 18. století – schodu kostela Saint Jean-Baptiste le Rond, který v té době přiléhá ke katedrále Notre Dame. Budoucí člen francouzské akademie byl tedy pokřtěn podle kostela,



Jean-Baptiste le Rond d'Alembert

kam byl odložen, a rané dětství prožil v nalezcinci. Zde ho vypátral jeho otec, který jej sice oficiálně neuznal, ale nalezl mu pěstouny a platil mu i vzdělání. Ke jménu d'Alembert přišel až za studií. Na šlechtické „d“ měl sice určitý nárok, zbytek však byla čirá invence.

O d'Alembertovi všichni víme, že byl spolu s Denisem Diderotem (1713–1784) vydavatelem *Encyclopedie*. Byl také autorem řady encyklopedických hesel včetně stati „Světlo“ [4], která krásně prezentuje názory na povahu světla v polovině 18. století. Často se uvádí, že korpuskulární teorie byla neprávem upřednostňována proti teorii vlnové jen díky Newtonově autoritě. Jak nám d'Alembert ve svém hesle ukazuje, pravda je trochu složitější. Nejdříve nás seznamuje s karteziánskou představou, že světlo se přenáší prostřednictvím částic naplňujících prostor. Pohyb částice blízko světelného zdroje vyvolá pohyb částice sousední, ta postrčí další a tak dále, a protože částice jsou dokonale tuhé, impulz se přeneše k oku okamžitě. Světlo se tedy šíří nekonečně rychle. Karteziánská teorie musela ovšem vysvětlit rozklad bílého světla do spektra. Zdroj podle ní udílí částicím „éteru“ určitou rotaci, která se předává od částice k částici. Naše oko na tuto rotaci reaguje a částice s různou rotací vidí jako světlo různé barvy. Nicolas Malebranche (1638–1715) vylepšil tento neobratný výklad představou, že barva světla je určena frekvencí kmitů částic, tedy analogicky výkladu výšky tónu u zvuku, což bylo blízké dnešní teorii i Huyghensově matematicky propracovanější představě světla jako vln v tekutině.

D'Alembert hovoří o vlnové teorii světla se zjevnými sympatiemi. Není divu – sám má důležité práce v teorii řešení vlnové rovnice a operátor v této rovnici nenese jeho jméno náhodou. Oceňuje, jak se Huyghens vyrovnal s odvozením zákona lomu i odrazu, pak však poukazuje na hlavní nedostatek vlnové teorie – že totiž neumí vyloužit, jak se tehdy domnívali, přímočaré šíření světla. Zvonek za překážkou nevidíme, ale slyšíme. Dnes samozřejmě i středoškolák ví, že důvodem je rozdíl v délce světelných a zvukových vln, tehdy to však byla vážná námitka. Interferenci se ještě plně nerozumělo a rozdíl mezi vlnovými délkami zvuku a světla je skutečně skoro nepředstavitelný. Experimenty s difrakcí se sice nakonec staly rozhodujícím argumentem ve prospěch vlnové teorie, to ale bylo až na počátku „století páry“.

D'Alembert dále hovoří o Newtonově korpuskulární teorii, která se s empirickými znalostmi vyrovnávala zdánlivě úspěšněji. Bílé světlo je složeno ze sedmi druhů částic nepatrných rozměrů, jež mají různé hmotnosti a na nichž závisí úhel lomu na rozhraní. Částicová povaha světla snadno vysvětluje vznik geometrického stínu. D'Alembert také uvádí výsledek měření rychlosti světla Ole Rømerem z roku 1676 a jeho následovníků založeného na zpoždování zákrytů Jupiterových měsíců. Zmiňuje i Bradleyho pozdější měření na základě aberace a výsledek shrnuje tak, že cesta světla ze Slunce trvá asi 7 minut. V souhrnu pak dává přednost korpuskulární teorii světla, ale ne zcela jednoznačně.

Zmínka o Bradleyem nás přenáší z kontinentu do vlasti Newtonovy. V roce 1727 byl ve Philosophical Transaction zveřejněn „Dopis reverenda Jamese Bradleyho Královskému astronomu Edmondovi Halleyovi o nově objeveném pohybu stálic“ [5]. Nejdříve líčí snahu změřit paralaxu hvězdy γ Draconis. Jestliže je Slunce v klidu vůči stálicím a Země kolem něho obíhá, pak bychom měli během roku pozorovat stálice pod různými



Frontispis *Il Newtonianismo per la dame*, zobrazující F. Algarottiho a Mme. Du Chatelet

úhly. Tato paralaxa je ovšem velice malá. Název astronomické míry „parsek“ je zkratka pro „paralaktická sekunda“, což je vzdálenost, ze které se poloměr zemské dráhy jeví pod úhlem jedné sekundy. Jasná hvězda γ Draconis je vzdálená asi 50 parseků, takže její paralaxa je zhruba padesátina sekundy, a to se tehdejšími prostředky nedalo změřit. Bradley si však povšiml, že tato hvězda opisuje na nebi malou elipsu, a správně to vysvětlil tím, že nemá-li být světlo pohlceno tubusem dalekohledu, musí se dalekohled naklonit proti směru jeho pohybu. To znamená na jaře jedním směrem, na podzim směrem opačným. Aberační úhel činí kolem 20 úhlových sekund, je tedy podstatně větší než paralaxa a je stejný pro všechny stálice. Bradley ověřil měření i na dalších hvězdách. (Spravedlnost si žádá připomenout, že navazoval na práci svého přítele Samuela Molyneuxe, jak v dopise korektně uvádí.)

Význam objevu aberace byl obrovský. Aberační úhel závisí na poměru rychlosti světla k rychlosti Země na oběžné dráze. Ta byla známá s dobrou přesností. Bradley ze svých měření určil, že světlu trvá cesta ze Slunce k Zemi 8,1 minuty, což je lepší výsledek, než uvádí d'Alembert jako průměr i z dalších měření. Aberace též sehrála důležitou roli v pokusech o určení pohybu Země éterem, to je však záležitost pozdější. Bradley na konci Dopisu rozebírá, jak jeho objev zmenšuje prostor pro „Antikopernikiány“, z čehož se zdá, že více jak sto let po Keplerovi a zhruba padesát let po Newtonových „Principiích“ tento klan ještě nevyhynul.

Nyní se podívejme na světlo v poněkud jiné úloze, totiž jako na ukazatele další cesty. Již v šedesátých letech 17. století vyslovil Pierre de Fermat princip, podle něž se světlo šíří po takové dráze, aby k průchodu mezi dvěma body potřebovalo co nejmenší čas. Z tohoto principu, jenž je stále platným nástrojem geometrické optiky, odvodil zákon lomu; už dříve se vědělo, že drá-

» citát «



Frontispis vydání *Encyclopedie* z r. 1772 (kresba C. N. Cochin, rytina B-L Prévost). Postava uprostřed obklopená jasným světlem je Pravda, kterou zbavují šatu Rozum a Filosofie.

ha paprsku je minimální při odrazu. Pro matematickou formulaci principu v obecném případě průchodu paprsku prostředím s proměnným indexem lomu, kde se rychlost světla mění bod od bodu, neměl Fermat dostatečné technické prostředky. Tvůrci variačního počtu je objevili až o století později. Nicméně Fermat věřil, že jeho princip má smysl daleko obecnější, že odráží ten nejhlubší zákon přírody – „příroda postupuje tím nejvýhodnějším způsobem“. Nebylo ovšem vůbec jasné, co to „nejvýhodnější“ znamená.

De Maupertuis dostal ambiciózní nápad odvodit zákony šíření světla i hmotných částic z jednoho principu minimalizace určité veličiny. Světlo bylo pokládáno za proud malých částic, takže vypadalo nadějně, že zákony pohybu těles a pohybu světelných korpuskulí mohou mít společný základ. Ovšem minimalizace času potřebného k proběhnutí dráhy mezi dvěma body nebyla pro mechaniku schůdnou cestou – například planety se takto určitě nepohybují. Fermatův princip pro šíření světla tedy nahradil požadavkem na minimum veličiny nazvané *akce* definované elementem $V \cdot ds$, kde V je rychlost světla v daném prostředí a ds element dráhy. Z tohoto požadavku odvodil v [6] sinový zákon pro lom. Mělo to ovšem háček. Ve Fermatově principu je element uplynulého času $1/V \cdot ds$. Jednoduchý výpočet ukáže, že u paprsku šířícího se z prostředí s rychlostí světla V_1 do prostředí s rychlostí světla V_2 je poměr sinu úhlu dopadu k sinu úhlu lomu roven V_1/V_2 a to odpovídá i zkušenosti. Maupertuisovo odvození z jeho principu nejmenší akce vede k poměru právě opačnému. Jinými slovy, aby jeho vzorec fungoval například na vodní hladině, světlo by se muselo vodou šířit *větší* rychlostí než vzduchem. Experiment v té době ještě neumožňoval mezi oběma možnostmi rozhodnout, a tak

větší část de Maupertuisova článku je věnována právě argumentaci ve prospěch hypotézy, že v opticky hustším prostředí je rychlost šíření světla větší.

V článku [7] pak aplikuje svůj princip nejmenší akce na mechaniku. Pro hmotné částice akci definuje součinem hmotnosti, rychlosti a dráhy. Článek se nazývá „Zákony pohybu a klidu odvozené z metafyzického principu“, ovšem skutečná aplikace na pohyb částic pod vlivem síly je chudá – omezuje se na ráz koulí a rovnováhu na páce. Většina textu je věnována rozboru důkazu existence Boha a Maupertuis vidí v jednoduchosti principu nejmenší akce důkaz boží prozřetelnosti (vyneslo mu to kritiku d'Alembertovu). Oba články používají spíše svým heuristickým nadšením než matematickou zručností. Teprve génius Leonarda Eulera dal principu nejmenší akce korektní matematickou podobu, ve které je pro síly odvoditelné z potenciálu ekvivalentní formulací Newtonovy mechaniky. Název *akce* je ovšem zvolen tendenčně, aby základním zákonem přírody bylo vynaložení co nejmenšího úsilí a princip tak byl metafyzicky zdůvodněn. To ale už vybočuje z tématu našeho článku, zde jsme jen chtěli upozornit na to, jak světlo ukázalo cestu k variační formulaci fyziky.

O světle v 18. století by se dalo napsat ještě mnoho. Vůbec jsme se nezmínili o rozvoji optických přístrojů, bez kterého by další vývoj optiky a fyziky nebyl možný. Stálo by za to se pozastavit u eseje George Berkeleyho o teorii vidění [8], zajímavého a hlubokého rozboru, jak k nám světlo přenáší informace o světě, a o jeho vlivu na empirickou filosofii. Náš článek nemusí mít závěr – to, co nazrálo v 18. století, dozrávalo v následujícím věku bez nějakého ostrého skoku. Neodolám však, abych neuvedl dvojverší Alexandra Popea, i když se cituje poměrně často a řada čtenářů je bude znát. Odráží totiž trochu naivní osvícenské nadšení nad poznáním a víru věku rozumu, že o přírodě už víme skoro vše (až na drobné detaily):

*Nature and Nature's laws lay hid in night:
God said, Let Newton be! and all was light.*

*Příroda a její řád spaly v tmě:
Bůh „Budiž Newton!“ řek' a světlo je.*

(Překlad Zdeněk Hron)

Literatura

- [1] Voltaire: *Éléments de la philosophie de Newton*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015.
- [2] F. Algarotti: *Il Newtonianismo per le dame, ovvero Dialoghi sopra la luce, i colori, e l'attrazione*. Napoli 1739.
- [3] M. Mazzotti: „Newton for ladies: gentility, gender and radical culture“, *British Journal for the History of Science* 37, 119 (2004).
- [4] *Encyclopédie de Diderot et d'Alembert Tome II – F à O*. Ed. Kindle Edition.
- [5] J. Bradley: „A Letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and F.R.S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. &c. Giving an Account of a New Discovered Motion of the Fix'd Stars“, *Phil. Trans. R. Soc.* 35, 637–661 (1727).
- [6] P. L. M. de Maupertuis: „Accord de plusieurs lois naturelles qui avaient paru jusqu'ici incompatibles“, *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres* (1744).
- [7] P. L. M. de Maupertuis: „Les Loix du mouvement et du repos déduites d'un principe metaphysique“, *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres* 267–294 (1746).
- [8] G. Berkeley: *Essay towards a New Theory of Vision*. London 1732.