5-6/2015

ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS

PRO FYZIKU®



MEZINÁRODNÍ ROK SVĚTLA A SVĚTELNÝCH TECHNOLOGIÍ **2015**

speciální dvojčíslo

Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, v. v. i., Praha
http://ccf.fzu.cz

svazek **65**

ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS
PRO FYZIKU
5-6/2015

Založen roku 1872 jako
„Časopis pro pěstování mathematiky a fysiky“
Vydává Fyzikální ústav Akademie věd
České republiky, v. v. i.
Vychází 6 čísel ročně,
uzávěrka tohoto čísla: prosinec 2015

Founded in 1872 as „Časopis pro pěstování mathematiky a fysiky“ "The Journal for Cultivation of Mathematics and Physics"
Published bimonthly in Czech and Slovak by
Institute of Physics, v. v. i.
Academy of Sciences of the Czech Republic

Vedoucí redaktor – Editor-in-Chief:
Libor Juha

Oboroví redaktoři – Associate Editors:
Pavel Cejnar, Michal Fárník, Jiří Limpouch, Peter Lukáč, Jan Mlynář, Karel Rohlena, Patrik Španěl, Jan Valenta, Vladimír Wagner

Redakční rada – Editorial Board:
Ivo Čáp, Pavel Demo, Antonín Fejfar, Ivan Gregora, Eva Klimešová, Jan Kříž, Petr Kulhánek, Štefan Lányi, Jana Musilová, Martin Orendáč, Fedor Šimkovic, Aleš Trojánek

Sekretariát redakce – Editorial Office Administration:
Marek Šípek, Jana Tahalová
Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.
Na Slovance 2, 182 21 Praha 8
tel.: 266 052 152, fax: 286 890 527
e-mail: cscasfyz@fzu.cz, http://ccf.fzu.cz

Jazyková úprava:
Stanislava Burešová, Lýdia Murtinová

Technický redaktor, grafik a výroba:
Ⓐ Jiří Kolář

WWW stránky: Matěj Bulvas

Tisk: Grafotechna Print, s. r. o.

Cena tohoto dvojčísla je 170 Kč
při odběru v prodejnách nebo v redakci.
Objednávky a prodej jednotlivých čísel
v ČR vyřizuje redakce.
Na Slovensku časopis rozšiřuje
Jednota slovenských matematikov a fyzikov,
pobočka v Žiline, Ul. 1. mája 32, 010 01 Žilina,
e-mail: ivo.cap@fel.uniza.sk
Distribution rights in foreign countries:
Kubon & Sagner, PO Box 240108,
D-8000 München 34

Časopis je od 31. 1. 2014 zařazen na
Seznam recenzovaných neimpaktovaných
periodik vydávaných v ČR.
Registrace: MK ČR E 3103,
ISSN 0009-0700 (Print),
ISSN 1804-8536 (Online).
Copyright © 2015
Institute of Physics of the ASCR, v. v. i.





Editorial

Vážení čtenáři,

otevíráte oborově profilované dvojčíslo *Československého časopisu pro fyziku* věnované „Mezinárodnímu roku světla a světelných technologií 2015“. Toto téma je připomenutím klíčového postavení světla v bytí lidstva. Sama existence života na Zemi je umožněna přílivem energie ze Slunce, z valné většiny ve formě světla. Člověk získává nejvíce informací o svém okolí prostřednictvím zraku – tedy také díky světlu. Jeho význam si lidé uvědomovali už od pradávna, a tak jej pokládali za boží dar (budiž světlo) a duchovní prozření označovali jako „osvícení“. Postupné vědecké odhalování podstaty světla, jeho šíření a působení poskytovalo a poskytuje mocné nástroje pro poznávání světa a pomáhá porozumět fundamentálním zákonům přírody. Stačí připomenout, jak na přelomu 19. a 20. století dva „malé“ fyzikální problémy spojené se světlem vedly později k vytvoření dvou pilířů moderní fyziky: teorie relativity a kvantové fyziky.

To vše bylo motivací pro vznik speciálního dvojčísla „žlutého časopisu“. Je nám ctí, že jsme mohli být jeho editory. Naším cílem bylo představit ukázky z široké palety užití světla ve vědě, technice i všedním životě lidské společnosti a obsáhnout témata od historie zkoumání světla až po nejžhavější témata současnosti. Vzniklo tak jedno z nejrozsáhlejších čísel *Československého časopisu pro fyziku*, čítající přes třicet článků. Za to patří dík především jejich autorům. Děkujeme jim za úsilí a také za ochotu, s jakou přispěli k tomuto dílu.

Nakonec bychom rádi vyjádřili naději, že těch několik málo plodů z košatého stromu optické fyziky a techniky, které se vešly do tohoto svazku, zachutná studentům hledajícím předmět svého budoucího studia a ti se dají na „cestu světla“.

Miloslav Dušek a Jan Valenta
hostující redaktoři

Bůh řekl:

$$\mathcal{L} = \psi^\dagger \gamma_0 \left(i\gamma^\mu D_\mu - m \right) \psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu},$$

kde $D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu,$
$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu,$

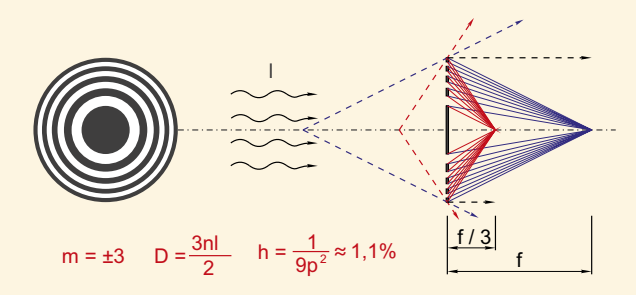
… a bylo světlo!

Obsah

AKTUALITY

Hmotová spektrometrická mikroskopie využívající ablace XUV laserem 259

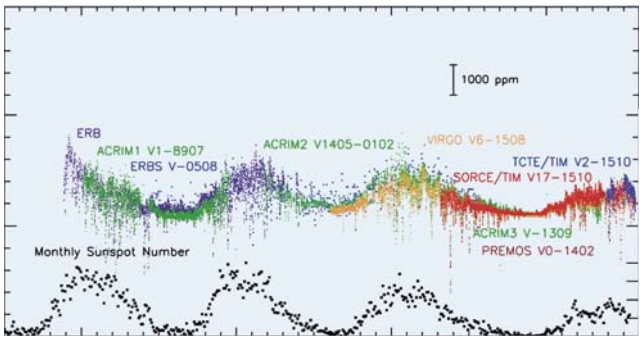
Tomáš Burian, Ilya Kuznetsov, Libor Juha, Jorge J. Rocca, Carmen S. Menoni



VE ZKRATCE

Rychlý kurz fotometrie aneb jak září naše Slunce 264

Jan Janík



REFERÁTY

První roky světla 268

Vladimír Chlup



Světlo ve století světla 275

Jiří Langer

REFERÁTY

Světlo v malířství 279

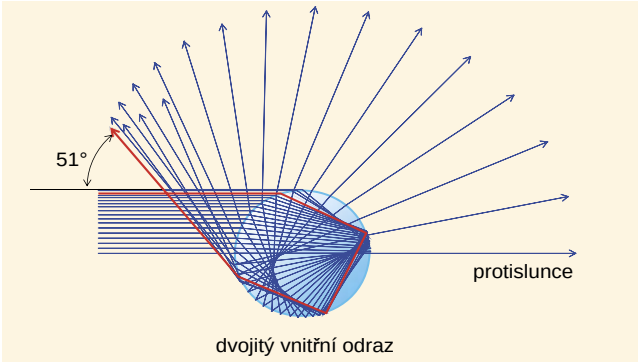
Ladislav Daniel



REFERÁTY

Historie zkoumání duhy 283

Jiří Bajer

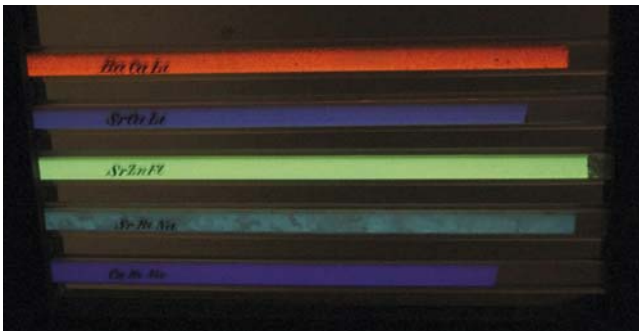


dvojitý vnitřní odraz

REFERÁTY

Z historie luminiscence: Philipp Eduard Anton Lenard 287

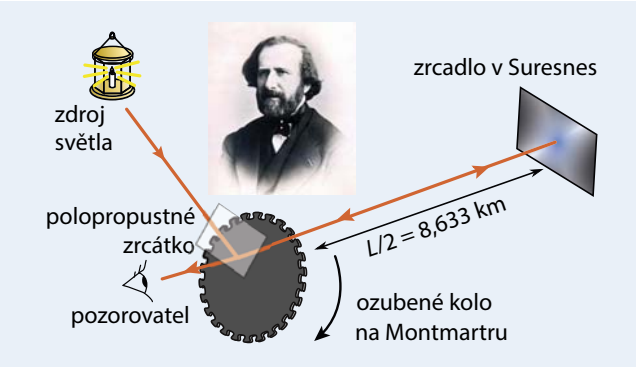
Ivan Pelant, Jan Valenta



Menší vložený obrázek na obálce:
Profil hustoty energie výstupního svazku z prvního regenerativního zesilovače Beamline C. Více na str. 399.

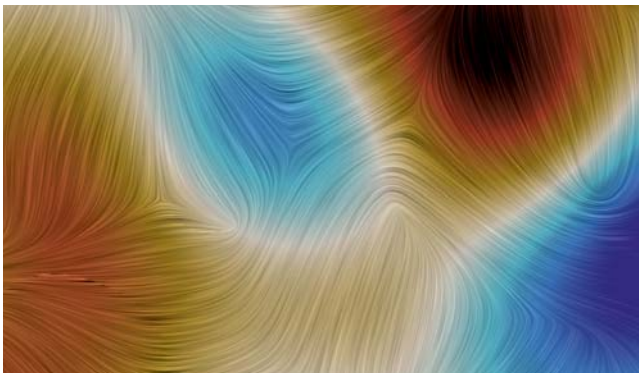
REFERÁTY

Měření rychlosti světla 291
Lukáš Richterek



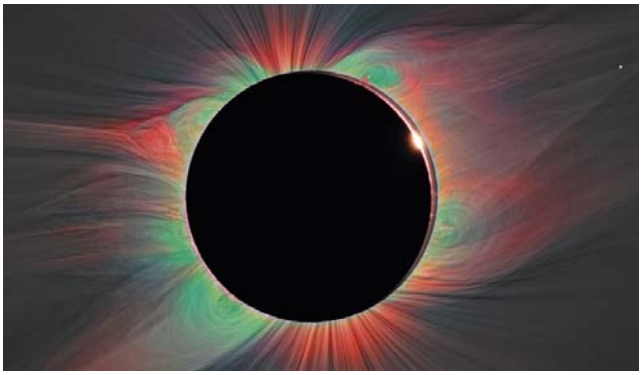
REFERÁTY

Světlo dávných časů 295
Petr Kulhánek



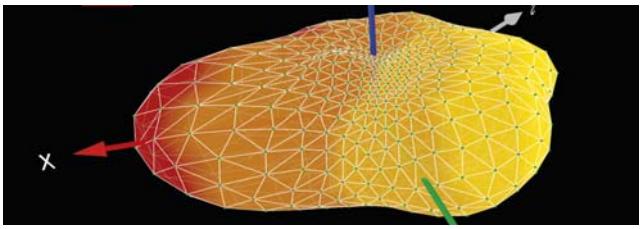
REFERÁTY

O původu světla ze Slunce 298
Michal Švanda



REFERÁTY

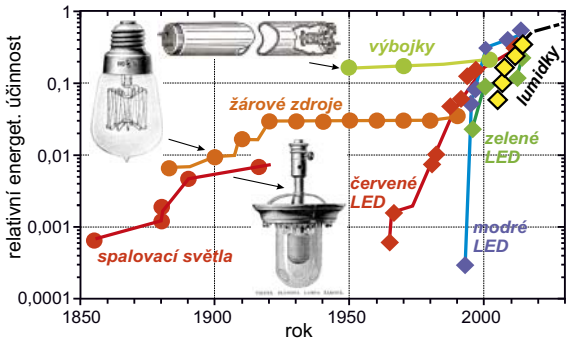
Dynamické účinky záření v nebeské mechanice 302
Miroslav Brož



Adaptivní optika v astronomii 305
Jaroslav Řeháček, Bohumil Stoklasa

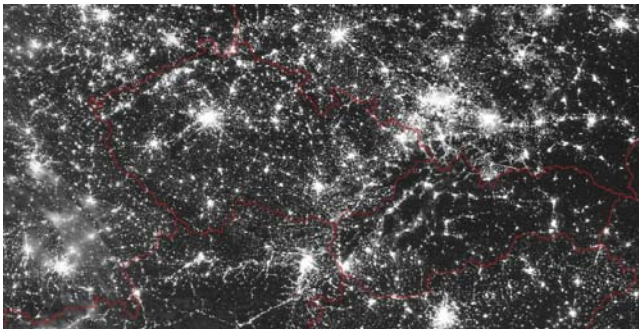
REFERÁTY

Elektroluminiscenční revoluce osvětlovací techniky 311
Jan Valenta, Ivan Pelant



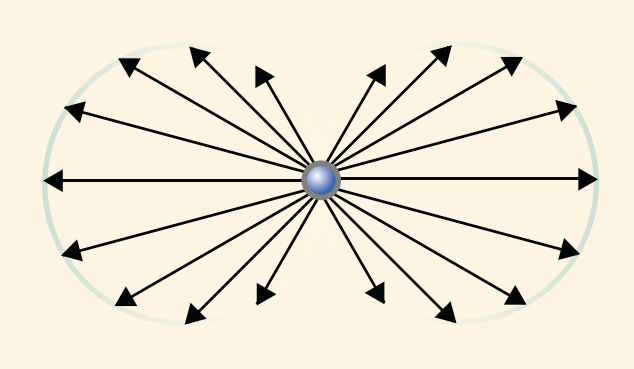
REFERÁTY

Noční pohledy na Zemi přístrojem Day/Night Band družice Suomi-NPP 315
Martin Setvák



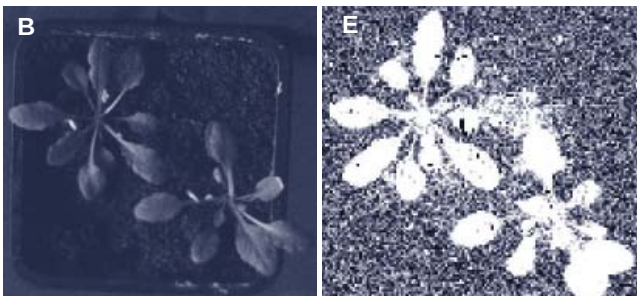
REFERÁTY

Světelné znečištění 320
Milada Moudrá



REFERÁTY

Ultraslabá emise fotonů z biologických systémů: fyzikální podstata a potenciální aplikace 326
Michal Cifra, Pavel Pospíšil



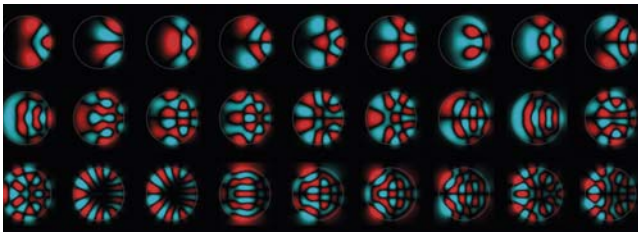
REFERÁTY

Optické komunikační prostředky 330
Radan Slavík, Jiří Čtyroký



REFERÁTY

Světlo v multimódových optických vláknech 335
Tomáš Tyc



Kvantová kryptografie 338
Miloslav Dušek

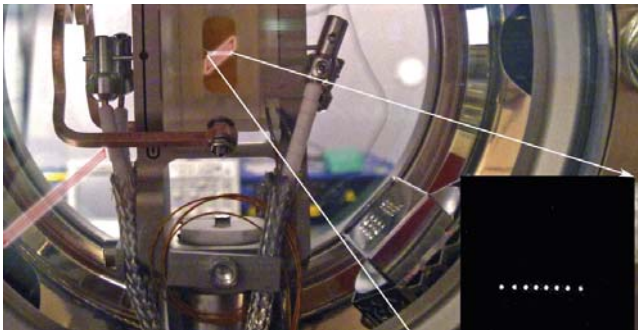
REFERÁTY

Detektory jednotlivých fotonů a jejich použití pro velmi přesná měření v kosmu 342
Ivan Procházka, Josef Blažej



REFERÁTY

Laserové chladenie elementárnych častíc 347
Lukáš Slodička

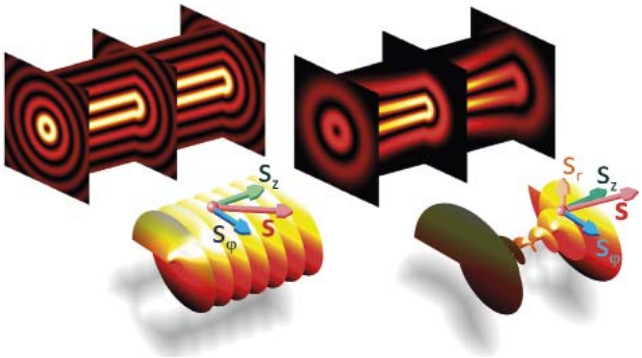


Abstracts of review articles: 329, 407–409.

REFERÁTY

Optické víry aneb jak roztočit světlo 351

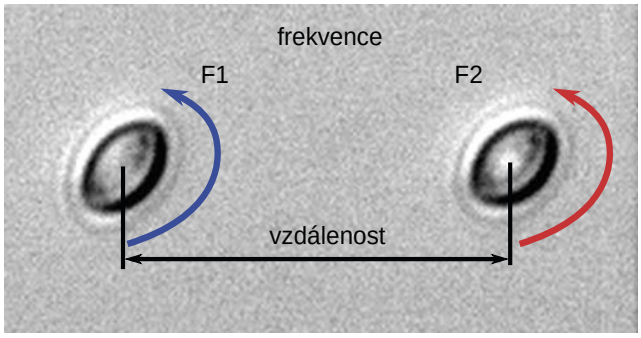
Zdeněk Bouchal, Petr Bouchal



REFERÁTY

Silové působení laserových svazků na nesférické objekty 355

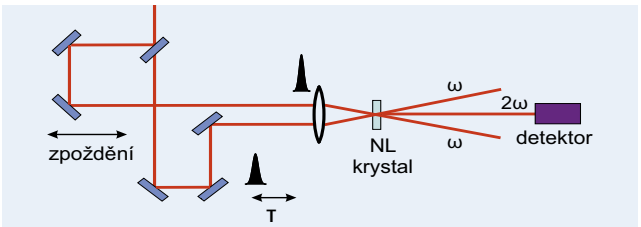
Pavel Zemánek, Petr Jákl a Oto Brzobohatý



REFERÁTY

Ultrakrátké světelné pulzy 359

Petr Malý



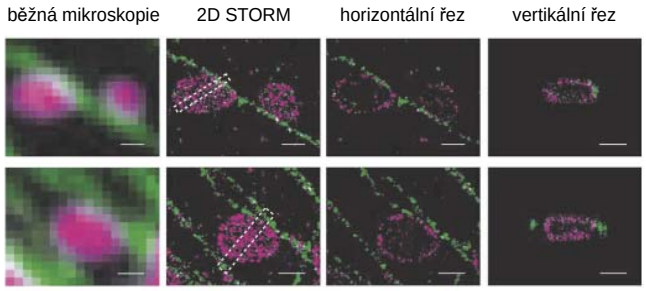
Holografie a difraktivní optika, jak jsme je pěstovali v ÚRE ČSAV 363

Miroslav Miler

REFERÁTY

Optická mikroskopie od van Leeuwenhoeka k Nobelově ceně za chemii v roce 2014 365

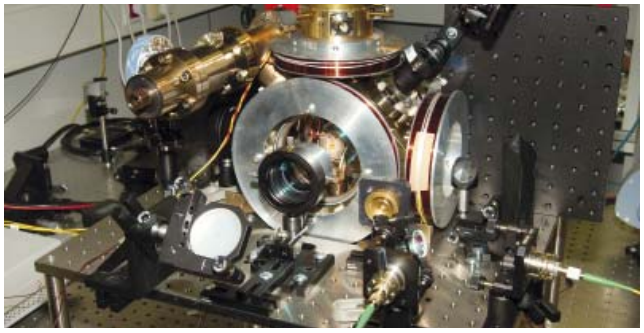
Jaromír Plášek



REFERÁTY

Lasery v měřicí technice – měření délek 370

Josef Lazar a kolektiv oddělení koherenční optiky



REFERÁTY

Spektroskopická elipsometrie 375

Josef Humlíček

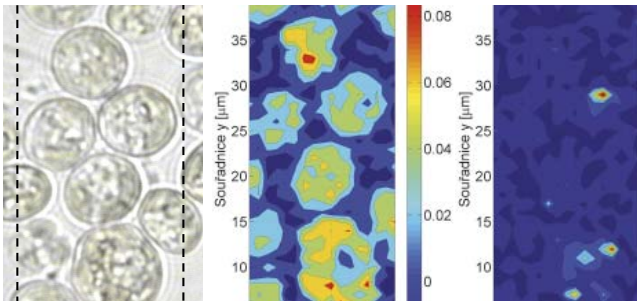


REFERÁTY

Ramanova spektroskopie 378

Od nesmělých počátků až po odvážné kosmické zítřky

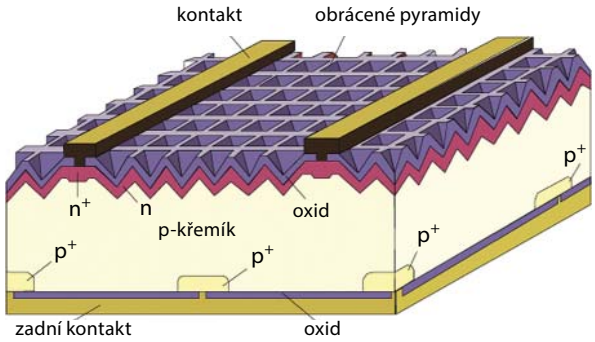
Vladimír Kopecký Jr., Josef Štěpánek



REFERÁTY

Fotovoltaické využití energie světla ze Slunce 384

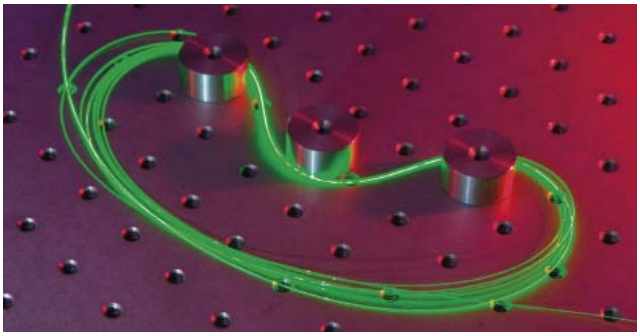
Antonín Fejfar, Martin Ledinský



REFERÁTY

Vláknové lasery: nový nástroj pro průmysl a medicínu 389

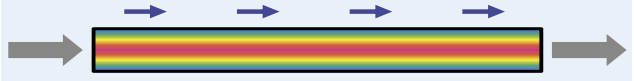
Pavel Peterka, Pavel Honzátko a Ivan Kašík



REFERÁTY

Vývoj pulzních vysokovýkonných laserů v centru HiLASE 395

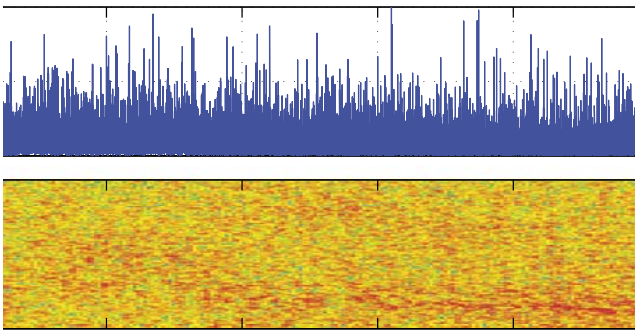
Ondřej Novák, Martin Smrž, Michal Chyla, Siva S. Nagisetty, Hana Turčičová, Jiří Mužík, Patricie Severová, Pawel Sikocinski, Jakub Měsíček, Jaroslav Huynh, Tomáš Hambálek, Jens Linnemann, Alina Pranovich, Taisuke Miura, Akira Endo, Martin Divoký, Ondřej Slezák, Magdalena Sawicka-Chyla, Venkatesan Jambunathan, Petr Navrátil, Lucie Horáčková, David Vojna, Jan Pilař, Stefano Bonora, Antonio Lucianetti, Tomáš Mocek



REFERÁTY

Role a využití plazmatu při laserovém svařování 401

Libor Mrňa, Martin Šarbort



ZPRÁVY

Medzinárodný rok svetla v Medzinárodnom laserovom centre v Bratislave 405

Alžbeta Marček Chorvátová, František Uherek



Hmotová spektrometrická mikroskopie využívající ablace XUV laserem

Tomáš Burian[1,2], Ilya Kuznetsov[3], Libor Juha[1,4], Jorge J. Rocca[3], Carmen S. Menoni[3]

[1] Oddělení radiační a chemické fyziky, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

[2] Katedra fyziky povrchů a plazmatu, Matematicko-fyzikální fakulta UK v Praze, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8

[3] NSF Center for Extreme Ultraviolet Science and Technology, Department of Electrical & Computer Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523-1373, USA

[4] Oddělení laserového plazmatu, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., Za Slovankou 3, 182 00 Praha 8

Nedávno byly publikovány první výsledky dosažené pomocí metody využívající pro účely zobrazovací hmotové spektrometrie ablaci zkoumaného materiálu submikronovým svazkem extrémního ultrafialového (XUV) laseru s kapilárním výbojem.

Od prvního pozorování „kanálových paprsků“ v nízkotlaké výbojce s perforovanou katodou německým fyzikem Eugenem Goldsteinem (5. 9. 1850 – 25. 12. 1930) uplynulo již téměř 130 let [1]. Během následujících tří dekád intenzivního výzkumu tohoto jevu se ukázalo, že jde o svazky nabitých částic, které lze působením magnetického nebo elektrostatického pole vychylovat z přímého směru, přičemž výchylka závisí na poměru hmotnosti a náboje daného iontu – M/q. Zachycením prostorově separovaných svazků na fotografickou desku vznikaly obrazce připomínající optická spektra a díky této podobnosti dostaly název *spektra hmotnostní*. Mezi analytické přístroje experimentální fyziky se tak zařadily první hmotnostní spektrometry (1910 – J. J. Thomson, 1918 – A. J. Dempster) a spektrografy (1919 – F. W. Aston). Oba typy přístrojů našly široké uplatnění především v izotopové analýze prvků.

Postupem času docházelo v hmotnostní spektroskopii (MS – *Mass Spectroscopy*) k implementaci celé řady nových přístupů jak vzhledem ke zdroji ionizace, tedy přípravy plynných ionizovaných stavů studovaných látek (elektrická ionizace, termální ionizace, fotoionizace, emise sekundárních iontů, laserem indukovaná desorpce či ablace aj.), tak i v metodách separace iontů (kvadrupólový filtr, iontová past, průletový analyzátor atp.) a detekce (fotonásobiče, scintilátory, Faradayovy válce, mikrokanálkové destičky a další).

Díky své variabilitě je dnes MS rozštěpena na mnoho odvětví a její nesmazatelnou stopu můžeme najít prakticky v každém exaktním vědeckém výzkumu (fyzika atomů, molekul a iontů, fyzika pevných látek a materiálový výzkum, organická i anorganická chemie, biochemie, vesmírný výzkum, medicína a další), ale i v analytické praxi (analýza znečištění životního prostředí, kontrola složení a čistoty materiálů a léčiv, izotopové datování, detekce drog a výbušnin, analýza kontaminace povrchů atp.).

Podívejme se nyní blíže na obor, který patří díky překotnému vývoji elektroniky a optiky v posledních letech k těm, které zaznamenaly jeden z největších posunů na poli MS. Jde o zobrazovací hmotnostní spektroskopii (MSI – *Mass Spectroscopy Imaging*), tedy metodu umožňující studium plošného či ještě lépe objemového zastoupení chemických sloučenin v daném vzorku, nejvíce užívanou např. v biochemii, analýze tkání nebo fyzice tenkých vrstev.

Základní myšlenkou je zde záznam kompletního hmotnostního spektra pro každý pixel (v případě 2D MSI) či voxel (pro 3D MSI), v současnosti realizovatelná třemi základními způsoby v závislosti na zdroji ionizace: hmotnostní spektroskopie sekundárních iontů (SIMS – *Secondary Ions Mass Spectroscopy* [2, 3]), laserová desorpční ionizace (LDI – *Laser Desorption Ionization* [3]) a relativně nový způsob, tzv. desorpční elektrosprejová ionizace (DESI – *Desorption ElectroSpray Ionization* [3]).

SIMS využívá k dekompozici materiálu proud iontů (např. Ar^+, Ga^+, Cs^+, In^+, Bi^+, Au^+ aj.) s energiemi ~ 10 až 30 keV [2, 3], které bombardují povrch vzorku, ionizují

Metoda	Zdroj ionizace	Příčné rozlišení [μm]	Hloubkové rozlišení [μm]	Rozsah detekce M/q
SIMS	iontový svazek	~1 (0,06)	~0,01	~1 000 (184) [4]
LDI	UV laser	~1–10	~0,1	>1 000 [10–13]
DESI	elektrosprej	~100	-----	-----
XUV TOF	XUV laser	~0,075	~0,025	>400

Tab. 1 Srovnání klíčových vlastností nejčastějších metod MSI.

Rychlý kurz fotometrie aneb jak září naše Slunce

Jan Janík
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, 611 37 Brno; honza@physics.muni.cz

Fotometrie [1–3] historicky náleží k části optiky věnované zkoumání světla z hlediska jeho účinku na lidské oko. K popisu tohoto působení proto zavádíme fotometrické veličiny, mezi které řadíme např. svítivost, světelný tok nebo osvětlení. Nejdříve se podíváme na základní jednotku SI svítivost, od níž si odvodíme další fotometrické veličiny. Závěrem si ukážeme fotometrii na příkladu našeho Slunce a různé metody fotometrie v astrofyzice.

Svítivost

Svítivost patří mezi základní jednotky SI, přestože sama nemá velký fyzikální význam. Z hlediska využití fotometrie v praxi však bylo nutné určitou jednotku definovat, aby bylo možné vyjádřit i následné fotometrické veličiny. Za základní fotometrickou veličinu byla zvolena právě svítivost.

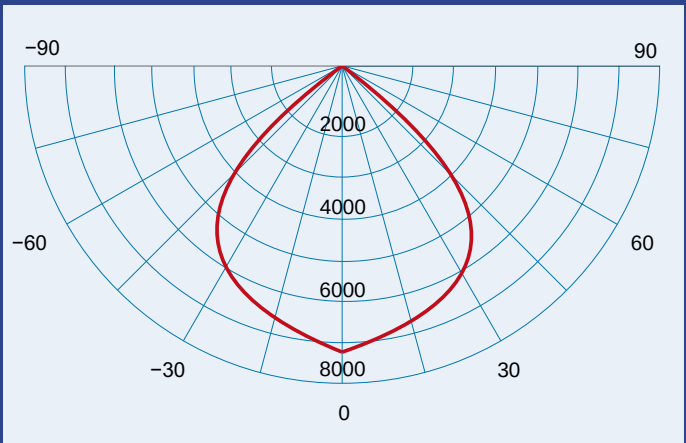
Jednotkou svítivosti je *kandela* [cd]. Kandela vychází historicky ze svítivosti jedné obyčejné svíčky, která byla standardizována na mezinárodní úrovni v roce 1909. I tak se však potýkala s problémem stability, který nakonec vedl k jiné definici přes vyzařování absolutně černého tělesa při teplotě tuhnoucí platiny (2 045 K) [4]. Současná definice svítivosti pochází z roku 1979 a říká, že

jedna kandela je svítivost zdroje, který v daném směru vysílá monochromatické záření s frekvencí 540·10^{12} Hz a jehož zářivost v tomto směru je 1/683 W/sr.

Svítivost tedy vyjadřuje rozdělení vycházejícího záření (světelného toku) do různých směrů Ω, do kterých zdroj světlo vyzařuje, jak je vidět na příkladu křivky svítivosti LED žárovky na obrázku 1. Svítivost je dána poměrem světelného toku Φ a prostorového úhlu ω ve směru Ω, do kterého bylo toto záření emitováno

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}. \qquad (1)$$

Svítivost tedy udává hustotu světelných paprsků v závislosti na konkrétním směru, samotná velikost svítivosti se se vzdáleností od světelného zdroje nemění.



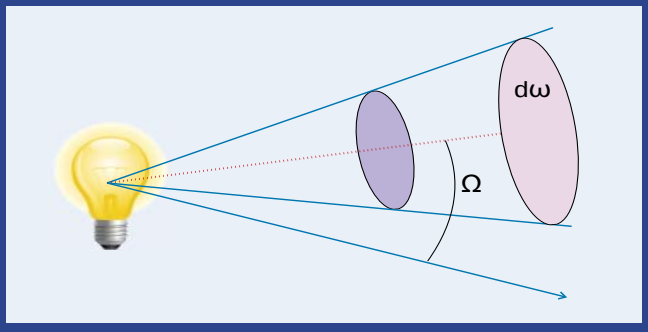
Obr. 1 Křivka svítivosti LED svítidla SINCLAIR řady HB v závislosti na vyzařovaném směru Ω (od –90 do 90 stupňů) [4].

Světelný tok

Svítivost je definována za pomocí světelného toku (monochromatického záření), který z tohoto zdroje vychází. Světelný tok Φ vyjadřuje intenzitu zrakového vjemu normálního oka, který je vyvolán dopadající energií světelného záření procházejícího za jednotku času určitou plochou v prostoru, jímž se světlo šíří. Jednotkou světelného toku je *lumen* [lm].

Bavíme-li se o světelném toku 100W žárovky (odpovídá svítivosti přibližně 200 cd), reprezentuje ve většině případů toto záření pouze malé procento světelného toku v lumenech. Je to dáno tím, že vlákno žárovky vyzařuje hlavně v infračervené části spektra, ve které již oko není citlivé. Dá se tedy říci, že světelný tok v lumenech odpovídá zářivému toku, který je udáván ve wattech, s tím rozdílem, že je zahrnuta do úvahy spektrální citlivost lidského oka.

Světelný tok si můžeme vypočítat také jako součin svítivosti I a prostorového úhlu ω, do něhož bylo světlo vyzářeno ve směru Ω. Jak je z obrázku 2 patrno, světelný tok se zachovává.



Obr. 2 Světelný tok.

První roky světla

Vladimír Chlup

Katedra optiky, Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc; vladimir@chlup.net

Článek rekapituluje důležité události, které ovlivnily rozvoj optických technologií a optiky od prvního tisíciletí př. Kr. až do roku 1850 po Kr. Poukazuje na zajímavá data a naznačuje, že Mezinárodní rok světla stanovený OSN na rok 2015 má své odůvodnění, nicméně přinejmenším vzhledem ke kontinuálnímu nárůstu nových optických objevů a rozvoji technologií můžeme světlo slavit trvale.

Vyhlášením Mezinárodního roku světla a technologií založených na světle OSN a UNESCO zdůraznily důležitost světelných technologií pro život lidí, kvalitu života a budoucí rozvoj společnosti zejména: v lékařství, energetice, informatice a komunikacích, vláknové optice, zemědělství, hornictví, astronomii, architektuře, archeologii, zábavě, umění a kultuře a v mnoha jiných disciplínách [1]. Podle rezoluce OSN k volbě roku 2015 přispěla významná kulatá výročí z historie vědy. Jmenovitě byla zmiňována:

- optická práce Ibn Al-Haythama v roce 1015,
- Fresnelova představa světla jako vlny z roku 1815,
- elektromagnetická teorie šíření světla navržená Maxwellem v roce 1865,
- Einsteinova teorie fotoelektrického jevu z roku 1905,
- začlenění světla do kosmologie prostřednictvím obecné teorie relativity v roce 1915,
- objevení kosmického mikrovlnného pozadí Penziasem a Wilsonem v roce 1965,
- dosažené úspěchy s přenosem světla ve vláknech pro optickou komunikaci také v roce 1965.

Odvážná myšlenka věnovat rok 2015 světlu, entitě, která se krátce po svém vzniku vymanila z rozptylujícího plazmatu a začala se svobodně šířit prostorem, soustavně doplňovaná o další mladé světlo generované nejrůznějšími důvody z té druhé, zbývající části hmoty po velkém třesku, byla rozšířena dovětkem „a technologiemi založenými na světle“. Rok světla je výzvou a umožňuje pracovníkům se světlem zdůraznit důležitost oboru. Na druhé straně rok končící patnáctkou je jen záminkou. Přehled optických objevů od starověku do začátku moderních dějin vypovídá, že optická výročí lze slavit každoročně.

Máme-li vymezit nějaký počátek vzniku optických technologií, tak s jistou nadsázkou vzpomeňme nejstarší dochovanou čočku z roku kolem 750 př. Kr. Tuto 2 765 let starou, hrubě broušenou čočkovitou desku (obr. 1) z krystalického křemene nalezl Henry Layard ve zříceninách Ninive v roce 1853. Kvalita povrchu čočky je z hlediska optických ploch velmi špatná, ale potvrzuje, že byla opracována pomocí rotující rovinné plochy. Lze se jen dohadovat, k jakému účelu měla tato čočka se značně nepravidelnou asféricitou povrchu, nepravidelným průměrem kolem 40 mm a zvětšením asi 2,5 sloužit. Menších kamenů z přírodního křišťálu existují desítky. Část z nich byla vhodná k zapalování pomocí slunečního světla.

První písemný záznam o používání zápalných kamenů najdeme v Aristofanově komedii *Oblaky* z roku 418 př. Kr. Aristofanés zesměšňuje Sokratovu školu vědy a do slov dlužníka Strepsiadése vkládá návrh technologického využití světla k zabránění svého zatčení:

Strepsiadés: Viděl jsi už v obchodech ten krásný kámen, co je průhledný a co s ním můžeš zapalovat?

Sokratés: Krystal?

Strepsiadés: Ano, co myslíš, kdybych jej tak vzal, až bude chystat písař obsílku, a nastavil jej z dálky proti Slunci a na obsílce smazal písmena?

V letošním roce vzpomínáme dvoutisícího šestistého výročí objevů Thaléta z Milétu, který využil přímočarého šíření světla a svých znalostí z geometrie trojúhelníků k určení výšky pyramid a vzdálenosti lodí od přístavu a v roce 585 př. Kr. určil dobu zatmění Slunce, které, jak píše Hérodotos, přimělo válčící Lýdy a Médy k uzavření míru. Následující úvahy umožnily Aristarchovi (325 př. Kr. až asi 260 př. Kr.) odhadnout relativní vzdálenosti Slunce a Měsíce. A když pak Erathostenés z Kyrény díky studně v Syéné, do které v době letního slunovratu dopadají sluneční paprsky



Obr. 1 Čočka z roku kolem 750 př. Kr. nalezená v rozvalinách Ninive (The British Museum – ev. číslo 90959, resp. 12091).

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 světle byla hojně popularizována. Šlo o jev každému známý, skrývající však řadu zapeklitých hádanek a umožňující efektní experimenty.

„Náboženství rozumu“, pěstované především ve Francii, mělo řadu význačných 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 značnou 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 píšícího 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* (Disertace 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 zaujímají 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 povzdechl si: „Kéž by mi bylo o deset let méně!“)

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

Světlo v malířství

Ladislav Daniel

Katedra dějin umění, Filozofická fakulta Univerzity Palackého, Univerzitní 3, 771 80 Olomouc; ladislav.daniel@upol.cz

Světlo znamená pro výtvarné umění již jeho prostou existenci. Bez světla si nelze představit vznik žádného obrazu, sochy, kresby, uměleckořemeslného díla, architektury ani jiného díla výtvarného umění. S výjimkou sochařských děl, která vytvořili nevidomí sochaři, jako byl například Giovanni Gonnelli (1603–1664), zvaný Slepec z Gambassi [1], který vytvářel sochařské portréty ve Florencii a v Římě, ovšem za předpokladu, že by jeho díla vnímali opět jen nevidomí. O světle v umění je tedy možné hovořit z nejrůznějších aspektů. Podívejme se na ně tentokrát ne z hlediska optiky, ale z pozice dějin umění.

Zvolme si aspekt zobrazování světla, který mnoho znamenal jak pro způsoby zobrazování skutečnosti, tak pro utváření jednoho specifického slohu minulosti. Již pravěký umělec začal zobrazovat nejen zvířecí nebo lidskou postavu, ale později i to, co se děje se světlem na jejím povrchu. Nejpozději od skalních maleb ve španělské jeskyni Altamira (asi 10 000 let př. Kr.) malíři zobrazují objem zvířete pomocí tzv. vlastního stínu na povrchu jeho těla. V řeckém i římském starověku zobrazují již i stín vržený a také lesky a světlem ozářená místa na povrchu postav a věcí.

Když se zajímáme o světlo ve středověkém malířství, zjistíme, že malířům nešlo již jen o zobrazení reálného



Obr. 1 Magister Theodoricus: *Sv. Lukáš*. 1359–1367, dřevo, hrad Karlštejn, kaple sv. Kříže, dlouhodobě zapůjčeno do Národní galerie v Praze. *(Foto: archiv autora)*



Obr. 2 Mistr třeboňského oltáře: *Kristus na Olivové hoře*. Po roce 1380, dřevo, Národní galerie v Praze. *(Foto: archiv autora)*

dění světla ve světě, ale pokusili se světlo využít k zobrazení skutečností přesahujících tento svět, vyjádřit transcendentní duchovní elementy. Povšimněme si například Mistra Theodorika, dvorního malíře císaře Karla IV. [2]. Jeho způsob malby, nazvaný později „měkkým stylem", vynikal zdánlivým umisťováním zdroje světla jakoby dovnitř objemů postav, jakýmsi vyzařováním zevnitř, jak to vidíme na deskové malbě *Sv. Lukáš* z kaple sv. Kříže na Karlštejně z let 1359–1367 (obr. 1). K inspiraci pro uvedený postup mohla Theodorikovi sloužit i okna gotických katedrál, v jejichž barevných vitrážích zářila světlá místa sklomalеb prosvícená denním světlem. Theodorik se zřejmě snažil vyvolat iluzi bytostné přítomnosti desítek světců na stěnách kaple jejich objemovým vyklenutím do prostoru, spojeným zároveň s vyvoláním nepostižitelné duchovnosti jejich zjevení.

Brzy po něm asi po roce 1380 ponořil Mistr třeboňského oltáře [3] (obr. 2) své postavy do měkce zahalujícího stínu, což zesílilo pocit tajemnosti výjevu, pravděpodobně ve spojení s dobovým úsilím nizozemských iluminátorů a malířů, kteří nejpozději na počát-

Historie zkoumání duhy

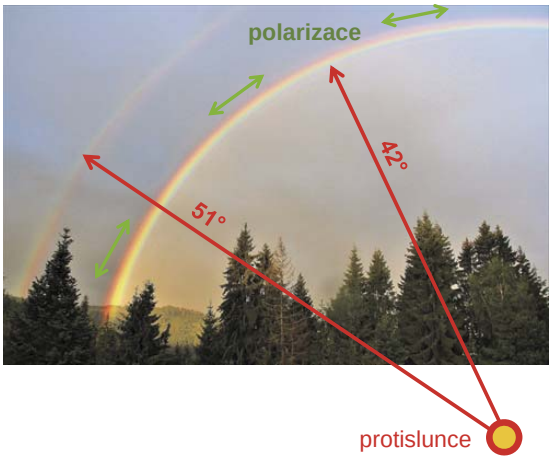
Jiří Bajer

Katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc; bajer@optics.upol.cz

Lidé pozorují duhu tisíce let. Tento článek přináší shrnutí základních poznatků a objevů, které souvisejí s pochopením duhy jako optického jevu od starověku po současnost.

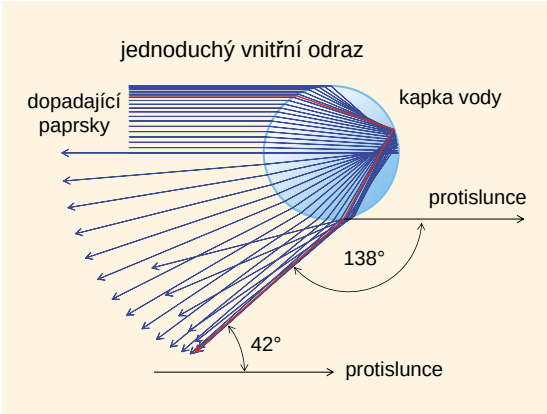
Jedním z nejnápadnějších a současně i nejkrásnějších přírodních úkazů na obloze je duha, která člověka od nepaměti přitahovala a uchvacovala svou nečekanou barevností. Staré civilizace přisuzovaly duze nadpozemský význam. Duha je například jako stvrzení boží smlouvy (Mojžíš) i příslib lepších časů (Noe) zmiňována již ve Starém zákoně [1–3].

Každý z nás duhu na vlastní oči viděl mnohokrát a jistě si všiml, že je pokaždé trochu jiná. Pečlivý pozorovatel ovšem brzy zjistí, co mají všechny duhy společné (obr. 1). Duhu lze spatřit, když prší a současně svítí slunce, které nesmí být příliš vysoko nad obzorem. Obvykle je proto vidět v podvečer, když ustává déšť a zpod mraků vykoukne slunce. Hlavní (primární) duhově zbarvený oblouk je obvykle doprovázen mnohem slabším vedlejším (sekundárním) obloukem s inverzním pořadím barev. Oba oblouky se nacházejí na opačné straně od slunce, jejich barvy odpovídají zhruba barevnému spektru, ovšem s menší sytostí, a oba oblouky jsou k sobě přivrácené svými červenými okraji, takže jejich fialové okraje jsou od sebe nejdále. Délky oblouků závisejí nejen na oblasti aktuálních



Obr. 1 Hlavní a vedlejší oblouk duhy mají poloměr 42° a 51° se středem v protislunci, místu opačném k aktuální poloze slunce na obloze. Všimněte si, že oba duhové oblouky jsou obráceny červeným koncem k sobě. Oboustranné zelené šipky ukazují převládající směr polarizace.

srážek, ale i na výšce slunce nad obzorem. Oba oblouky jsou soustředné a jejich střed odpovídá protislunci, tj. bodu, který leží přesně na opačné straně oblohy než slunce. Poloměr hlavního oblouku je zhruba 42°



Obr. 2 Geometrický chod paprsků kapkou vody po jednom vnitřním odrazu a dvou lomech, vystupující paprsky tvoří kaustiku v místě vzdáleném 42° od protislunce, to je hlavní oblouk duhy. Červený paprsek značí tzv. *duhový paprsek*, který dopadá na povrch kapky pod úhlem 59°, má nejmenší deviaci a tvoří hranu hlavního oblouku duhy. Pro přehlednost je zobrazen pouze svazek paprsků dopadajících na horní polovinu kapky.

a je asi 2° široký a vedlejší oblouk má poloměr zhruba 51° a je asi 4° široký. Oblast mezi oběma oblouky je o poznání temnější. Někdy jsou vedle hlavního oblouku pozorovány i jemné podružné oblouky směřující do světlého pole.

Dnes víme, že duha vzniká rozptylem slunečních paprsků na kapkách deště, ovšem tento jev je ve skutečnosti velmi komplexní, zahrnuje současně nejen odraz a lom, ale i disperzi, polarizaci, interferenci a ohyb světla, takže není divu, že optice trvalo celá staletí, než tento jev uspokojivě objasnila. Podívejme se blíže na historii duhy, tedy na jednotlivé významné kroky při objasňování mechanismu vzniku duhy.

Podle starověkých představ byla duha vysvětlována zažehnutím hořlavých par slunečními paprsky. Tyto páry měly být do ovzduší vytlačeny z podzemí vsakující se dešťovou vodou.

O první racionální vysvětlení duhy se zasloužil Aristotelés ze Stageiry ve 4. století před naším letopočtem ve svém pojednání Meteorologika. Podle Aristotela je duha zvláštním druhem odrazu slunečního světla od dešťových mraků. Světlo se přitom odráží pod stálým úhlem, což vede ke vzniku známého oblouku duhových paprsků. Aristoteles tak logicky objasnil kruhový tvar oblouku a správně popsal, že duha není

Z historie luminiscence: Philipp Eduard Anton Lenard

Ivan Pelant[1], Jan Valenta[2]

[1] Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Cukrovarnická 10, 162 53 Praha 6; pelant@fzu.cz

[2] Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2; jvalenta@karlov.mff.cuni.cz

Celou první polovinu dvacátého století bylo všem přírodovědcům zabývajícím se otázkami luminiscence bezpochyby velmi dobře známo jméno Philipp Eduard Anton von Lenard. Současné učebnice či monografie se o tomto muži ve spojitosti s luminiscencí zmiňují již jen spíš výjimečně,[1] i když tu a tam lze stále odkazy na jeho dílo nalézt, např. [1]. Tyto zmínky nejspíše stručně seznámí čtenáře s termínem *Lenardovy fosfory*. Jde (dnešní terminologií) o luminofory na bázi sulfidů kovů alkalických zemin, tedy CaS, SrS a BaS.

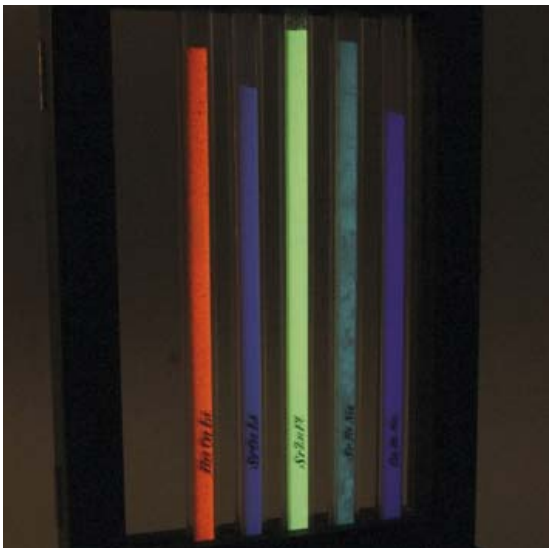
Co je na těchto luminoforech zajímavého? Jaké experimentální metody Lenard používal a co lze z dnešního pohledu hodnotit jako nejdůležitější Lenardův příspěvek k luminiscenčnímu bádání? Jaký byl profesní život Philippa Lenarda? A proč se u nás v minulých desetiletích o Lenardovi téměř vůbec nehovořilo? Pokusme se tyto otázky v nám zde vymezeném prostoru zodpovědět.

Philipp Lenard se narodil v r. 1862 v Bratislavě (tehdy Pressburg či Pozsony) v tehdejším Rakousko-Uhersku. Jeho rodiče přišli do Bratislavy z Tyrol. Lenard byl tedy německé národnosti, i když o tom lze vést diskusi; v úvahu přichází též národnost maďarská, popř. rakouská [2]. Státní příslušnost měl rakousko-uherskou a později německou. V Bratislavě vystudoval gymnázium, poté studoval fyziku a chemii ve Vídni a Budapešti. Jako vědecký pracovník prošel řadou německých univerzit (Berlin, Aachen, Bonn, Kiel, …) až se posléze usadil r. 1907 v Heidelbergu, kde pracoval na univerzitě až do svého penzionování v r. 1931. Nicméně působil zde pak i nadále jako emeritní profesor. Zemřel r. 1947 v osmdesáti pěti letech. Mnoho dalších zajímavých detailů o Lenardově životě lze získat z obsáhlého článku J. Šebesty [2].



Philipp Eduard Anton von Lenard

1 P. E. A. Lenard je znám spíše jako nositel Nobelovy ceny za fyziku, kterou obdržel r. 1905 za prozkoumání vlastností katodových paprsků. Tuto oblast jeho zájmu zde však sledovat nebudeme.



Obr. 1 Luminiskující Lenardovy fosfory (ze sbírek Matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze) při buzení UV světlem. Pokojová teplota. *Foto: Jan Valenta*

Luminofory na základě CaS, SrS a BaS (krystalizující v kubické plošně centrované mřížce typu NaCl) patří mezi nejstarší systematicky zkoumané anorganické luminiscenční látky[2]). Při buzení ultrafialovým zářením (UV) jeví různobarevnou fotoluminiscenci za pokojové teploty (obr. 1), což není zdaleka běžné – řada látek luminiskuje až při ochlazení na teplotu kapalného dusíku (77 K) či dokonce kapalného helia (4,2 K). To již samo o sobě tyto látky nejen předurčuje k badatelskému výzkumu, ale zároveň naznačuje, že by mohly být vhodnými praktickými materiály pro různé aplikace v oblasti osvětlování a světelné techniky vůbec. Kromě toho uvedené látky obsahují hluboké elektronové pasti, v nichž se zachytí při UV excitaci, popř. při buzení elektronovým svazkem značná část fotoelektronů. Ty pak jsou po skončení excitace postupně uvolňovány pomocí tepelné energie mřížky, doputují k luminiscenčním centrům a v nich zářivě rekombinují. Sulfidy CaS, SrS a BaS takto vykazují velmi dlouhou dobu dohasínání luminiscence – řádově to mohou být hodiny až několik dní (!). V tomto případě lze hovořit o tzv. *perzistentní* či setrvalé luminiscenci a to je jistě ideální scénář pro praktické použití, např. u ciferníků hodinek, pro svítící bezpečnostní nápisy v případě havárie elektrické sítě apod.

A Lenardovy fosfory jeví ještě jednu velmi přitažlivou vlastnost: elektrony „zamrzlé“ po předchozí excita-

2 BaS byl základem tzv. boloňského kamene, jenž představuje první podrobně zkoumaný a popsaný luminiscenční materiál. Byl vyroben roku 1603 italským ševcem Vincenzem Cascariolem u Boloně žíháním síranu barnatého $BaSO_4$, barytu, nalezeného na hoře Monte Paderno. Jak bylo prokázáno nedávno, byl výsledným produktem nejpravděpodobněji sulfid barnatý s příměsí mědi (BaS:Cu) [M. Lastusaari a kol.: Eur. J. Mineral **24**, 885 (2012)]. Boloňský kámen zaujal tehdejší alchymisty, a tak se o tomto objevu zachovaly spolehlivé zprávy, mj. i od Galilea Galileie.

Měření rychlosti světla

Lukáš Richterek

Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého, 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc; lukas.richterek@upol.cz

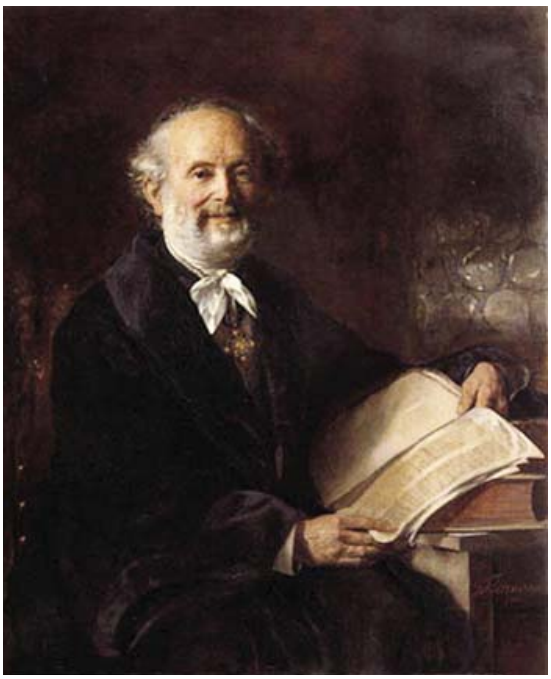
„Sotva existuje ve fysice jednodušší zákon než ten, dle něhož se šíří světlo v prázdném prostoru. Každý školák ví nebo věří, že ví, že toto šíření se děje přímočaře rychlostí c = 300 000 km·s^{-1}. Víme rozhodně s velkou exaktností, že tato rychlost jest pro všechny barvy stejná; neboť kdyby tomu tak nebylo, tu by při zakrytí nějaké stálice její temnou oběžnicí nebylo pro různé barvy emisní minimum současně pozorováno. Podobnou úvahou, vztahující se na dvojhvězdy, mohl hollandský astronom *de Sitter* ukázati, že rychlost šíření se světla nemůže záviseti na rychlosti tělesa světlo vysílajícího. Domněnka, že tato rychlost závisí na směru „v prostoru", jest sama o sobě málo pravděpodobná." (*Albert Einstein* [1])

„Světlo si myslí, že dokáže cestovat rychleji než cokoliv jiného, ale to se mýlí. I kdyby dokázalo cestovat seberychleji, kamkoliv dorazí, všude najde tmu, která tam byla dřív a už na něj čeká." (*Terry Pratchett* [2])

Úvod

Rychlost světla ve vakuu chápeme dnes především jako jednu ze základních fyzikálních konstant s přesnou hodnotou v soustavě SI c = 299 792 458 m·s^{-1} [3]. Její význam a role v různých částech fyziky se však neomezují jen na rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu, z nichž pouze jedna „oktáva" s vlnovými délkami zhruba mezi 400 nm a 800 nm odpovídá viditelnému světlu; setkáváme se s ní kromě optiky dále především v teorii elektromagnetického pole, teorii relativity, kosmologii i fyzice mikrosvěta. Pomocí ní definujeme astronomické vzdálenosti ke hvězdám ve světelných rocích a od roku 1983 je pomocí ní definována i základní jednotka soustavy SI metr. V připravované úpravě soustavy SI by se dokonce rychlost světla sama měla základní jednotkou stát [4]. Kromě světla odpovídá c i rychlosti šíření gravitačních vln v obecné teorii relativity a vstupuje také do asi nejznámější fyzikální rovnice $E = mc^2$, relativistického vztahu mezi hmotností a energií. Protože v tomto textu se nebudeme zabývat šířením světla v látkových prostředích, budeme pod spojením rychlost světla vždy rozumět šíření ve vakuu nebo – v jistém přiblížení – ve vzduchu.

Dnes všeobecně užívaný symbol c se ve volnější souvislosti s rychlostí světla zřejmě poprvé objevuje ve čtyřicátých a padesátých letech 19. století v článcích *Wilhelma Eduarda Webera* (obr. 1) a *Rudolfa Kohlraushe* [5–6] ve vztahu pro sílu mezi dvěma pohybujícími se náboji. Konstanta c zavedená Weberem ale odpovídala hodnotě $(2/\varepsilon_0\mu_0)^{1/2}$, tedy rychlosti světla vynásobené odmocninou ze dvou. V 19. století se jinak nejčastěji při značení rychlosti světla setkáme se symbolem V, který používal jak *James Clerk Maxwell*, tak např. i *Albert Einstein* ve svém článku o elektrodynamice pohybujících se těles z roku 1905 [7]. Postupně se však stále častěji objevuje dnešní c, nejspíše poprvé je v této roli nacházíme u *Maxe Abrahama* [8] na přelomu let 1902 a 1903. Sám Einstein změnil značení v průběhu roku 1907; zatímco na jaře tohoto roku ještě v [9] najdeme vztah mezi hmotností a energií ve tvaru $\mu = E_0/V^2$, v přehledovém článku [10] (pravděpodobně na doporučení editora *Johannese Starka*) přešel k c i on. Podle *Isaaca Asimova* sehrál při výběru značení vztah k latinskému výrazu pro rychlost *celeritas* [5]; tento kořen nalézáme i v pojmu „akcelerace". U Wilhelma Webera však šlo původně nejspíše o prosté označení konstanty a v jeho článcích vidíme posun od symbolu a k c (možná ne nepodobně jako u Einsteina na kresleném vtipu Sidneyho Harrise, kde u tabule postupně píše a přeškrtává vztahy $E = ma^2$ a $E = mb^2$ [11]).



Obr. 1 Wilhelm Eduard Weber (1804–1891) na portrétu Gottlieba Biermanna z roku 1885.

Obrovská rychlost

Z hlediska lidského vnímání je rychlost světla skutečně obrovská. Naši republiku od východu na západ by překonalo za necelé dvě tisíciny sekundy, vzdálenost obvodu rovníku za 0,13 s, vzdálenost ze Země na Měsíc přibližně za sekundu (o čemž se můžeme přesvědčit např.

Světlo dávných časů

Petr Kulhánek

Katedra fyziky FEL ČVUT v Praze, Technická 2, 166 27 Praha 6; kulhanek@aldebaran.cz

Všude kolem nás je přítomno reliktní záření, světlo z období konce velkého třesku, které v sobě nese cenné informace o raném vesmíru a o prostředí, kterým k nám procházelo. Při poznávání vesmíru získáváme většinu informací o vzdálených objektech prostřednictvím elektromagnetického záření nejrůznějších vlnových délek. V mikrovlnném oboru sledují dnešní specializované sondy nejen nejchladnější zákoutí vesmíru, ale i světlo dávných časů, které se vydalo na svou pouť v období, kdy se ve vesmíru formovaly první atomy.

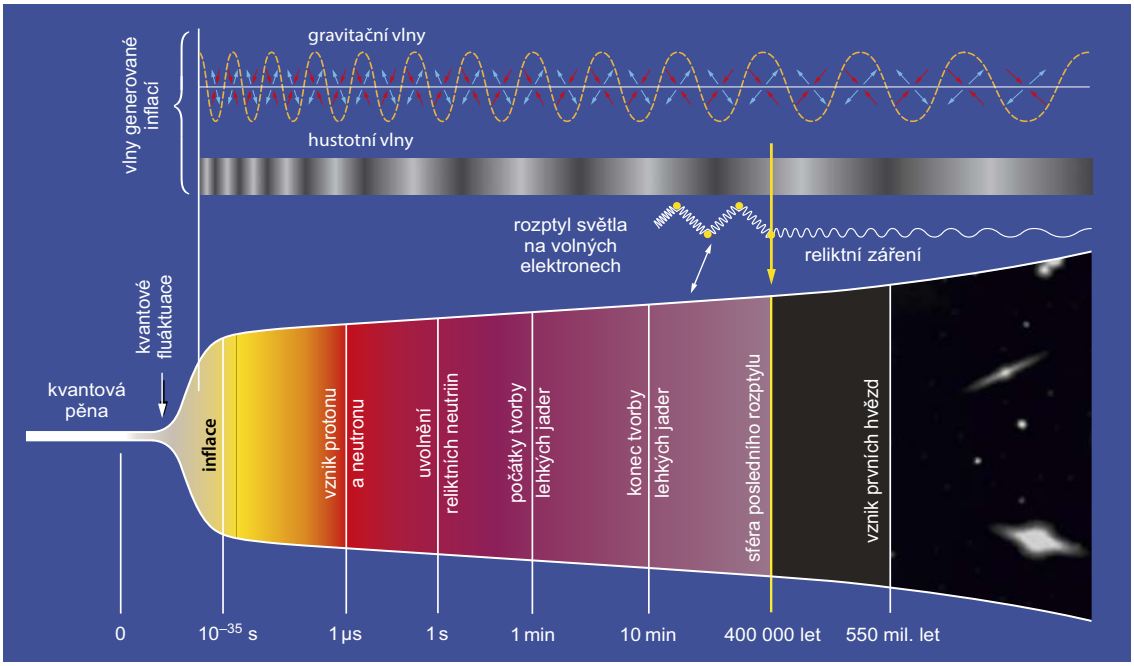
Plazmatická éra

Když v roce 1929 objevil Edwin Hubble expanzi vesmíru, začalo být jasné, že vesmír má svou minulost i budoucnost, že vesmír byl dříve jiný, než je dnes, a že za několik miliard let se jeho podoba podstatně změní. Kolem roku 1948 vyslovili George Gamow, Ralph Alpher a Robert Herman hypotézu, podle níž byl na počátku vesmír velmi hustý a horký. Toto počáteční zárodečné období dnes nazýváme velkým třeskem. Teorie velkého třesku měla z počátku značné množství odpůrců, kterých však, s rostoucím počtem důkazů o horkém vzniku světa, valem ubývalo.

Při zpětné extrapolaci prováděné na základě obecné teorie relativity dojdeme k počáteční singularitě, ve které by měla mít teplota, a stejně tak hustota, nekonečnou hodnotu. Tato extrapolace ovšem nepočítá s kvantovými procesy, které znemožní nekonečnou hustotu a teplotu látky. Nekonečné hodnoty jsou signálem o selhání teorie, nikoli skutečností. Původně se velkým třeskem nazývala právě tato počáteční singularita, dnes tímto pojmem rozumíme celé prvopočáteční horké období, kdy byl vesmír v plazmatickém skupenství.

Plazmatem nazýváme ionizovanou látku, v níž jsou volné nosiče nábojů, které vykazují kolektivní chování. V raném vesmíru vznikala lehká atomová jádra v prvních několika minutách jeho existence. Teplota okolního prostředí byla ale natolik vysoká, že znemožňovala formování atomárních obalů. Elektrony byly v tomto období volné a představovaly velmi důležitou součást zárodečné polévky – prvotního vesmírného plazmatu. Součástí atomárních obalů se staly až v období 400 000 let po vzniku vesmíru, kdy již teplota ochladla na pouhých několik tisíc kelvinů. Právě tuto změnu plazmatického skupenství v neutrální plyn chápeme dnes jako konec velkého třesku.

Prvopočáteční plazma obsahovalo lehká atomová jádra, protony, elektrony a samozřejmě také elektromagnetické záření. Toto záření velmi intenzivně interagovalo s volnými elektrony. Elektrická složka elektromagnetického vlnění rozkmitávala elektrony a předávala jim podstatnou část energie vlnění. Samot-



Obr. 1 Hlavní etapy historie vesmíru. *Upraveno z Wikipedie.*

O původu světla ze Slunce

Michal Švanda

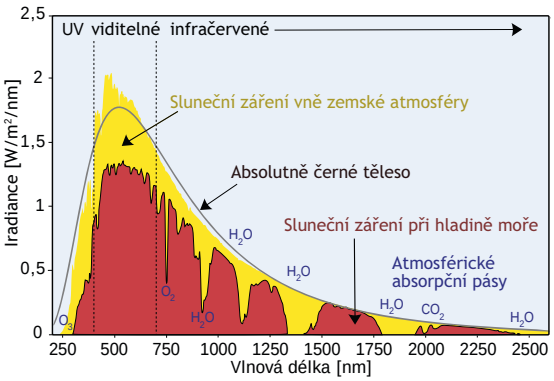
Astronomický ústav Univerzity Karlovy, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8; michal@astronomie.cz
Astronomický ústav AV ČR, v. v. i., Fričova 298, 251 65 Ondřejov

Slunce je zdrojem energie pro celou sluneční soustavu a je také hlavním zdrojem světla, ze kterého těží celá pozemská biosféra. Popis cesty kvanta energie vzniklé v nitru Slunce při termojaderné reakci až do jeho atmosféry je neodmyslitelně spojen s několika průlomovými objevy ve fyzice. Jak se zpřesňoval popis fyzikálních jevů, měnily se i možnosti energetického zdroje pro Slunce. Uspokojivého souladu bylo dosaženo až v polovině 20. století.

Na Zemi by to vypadalo o hodně jinak, kdyby nebylo Slunce. Je nepochybné, že Slunce je dárcem tepla a světla, a právě světlo hraje nezastupitelnou úlohu v rozvoji rozmanitých forem živých tvorů, které vidíme všude kolem sebe. Světlo od Slunce zásadně ovlivňuje i naše vnímání okolního světa. Naše oči se spektrálnímu rozložení slunečního záření přizpůsobily, a tak pás vlnových délek, v nichž je intenzita slunečního záření podstatně větší než v ostatních (400–700 nm), právě proto označujeme jako viditelné světlo. Spektrální rozložení slunečního záření definuje i naše vnímání barev. Avšak: jaké fyzikální pochody se podílejí na vzniku slunečního záření? Oproti obvyklým přístupům postupujme deduktivně, tedy odshora.

Je Slunce absolutně černým tělesem?

Slunce je hvězdou s povrchovou teplotou blízkou 5 800 K. Toto tvrzení je poněkud nepřesné, těžko mluvit o jedné povrchové teplotě, když díky moderním přístrojům i historickým pozorováním víme, že Slunce není homogenní koule. Na jeho povrchu nalezneme struktury s různou teplotou, od středů (umber) slunečních skvrn s teplotou kolem 4 500 stupňů po jasné body, jejichž zářivá teplota přesahuje 6 000 K. I když téměř nevýznamně, k celkovému spektru Slunce přispívají i další dvě vrstvy sluneční atmosféry, chromosféra a koróna, které jsou svými teplotami naprosto odlišné (10 000 K a 1–2 MK).



Obr. 1 Spektrum slunečního záření vně zemské atmosféry při hladině moře a porovnání se spektrem idealizovaného absolutně černého tělesa o teplotě Slunce. *Zdroj: Robert A. Rohde*

Chceme-li tedy sluneční těleso popsat jednou povrchovou teplotou, je vhodné zavést tzv. teplotu *efektivní*, tedy takovou, která vyhoví Stefanovu-Boltzmannovu zákonu. Ten říká, že celkový zářivý tok je úměrný čtvrté mocnině efektivní teploty. Celkový zářivý tok je měřitelná fyzikální veličina a konstanta úměrnosti je taktéž známa. Efektivní teplota Slunce je (5 770 ± 10) K [1].

Jenže měření ukazují, že jde o velmi hrubé přiblížení. Slunce se nechová docela jako idealizované absolutně černé těleso. Rozložíme-li jeho světlo hranolem nebo mřížkou na spektrum, již na první pohled vidíme odchylky od obálkové křivky blízké Planckovu zákonu. Ve spektru se objeví tmavé absorpční čáry. Ty spatřil poprvé v roce 1802 William Wollaston.

O dvanáct let později nezávisle objevil spektrální čáry ve světlu Slunce Joseph von Fraunhofer a systematicky je začal studovat. Pečlivě proměřoval jejich pozici ve spektru, měřil tedy jejich vlnovou délku. Celkově katalogizoval 570 útvarů ve spektru a ty nejvýraznější označil velkými písmeny abecedy. Fraunhoferovo označení se používá dodnes: sluneční fyzikové běžně mluví o „sodíkovém dubletu" D_1 a D_2 nebo o vápníkových čarách H a K. Trvalo téměř další půlstoletí, než si Gustav Kirchhof a Robert Bunsen povšimli, že vlnové délky tmavých čar ve slunečním spektru nápadně souhlasí se světlými (emisními) čarami pozorovanými v laboratoři ve spektru chemických prvků. Usoudilo se, že pozorované spektrální čáry tedy souvisejí s absorpcí světla chemickými prvky v atmosféře Slunce, některé čáry byly později identifikovány jako důsledek interakce světla Slunce se zemskou atmosférou.

Dnes víme, že na vzniku spektrálních čar se podílí celá plejáda fyzikálních jevů (excitace/deexcitace, ionizace/rekombinace, rozptyl), takže jejich správná interpretace není tak jednoduchá, jak by se mohlo zdát fyzikům 19. století. Z jednoduchých analýz poměrů intenzit jednotlivých čar totiž vycházelo, že sluneční atmosféra by musela být složena převážně z kovů. Průlom nastal až v roce 1925, kdy svoji doktorskou disertaci dokončila a obhájila Cecilia Payne [2]. Ta při modelování slunečního spektra poprvé korektně použila ionizační teorii zveřejněnou jen několik let

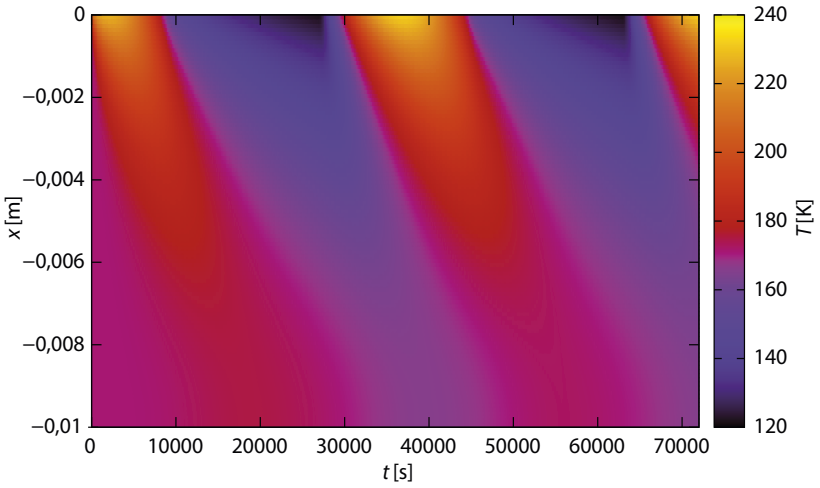
Dynamické účinky záření v nebeské mechanice

Miroslav Brož

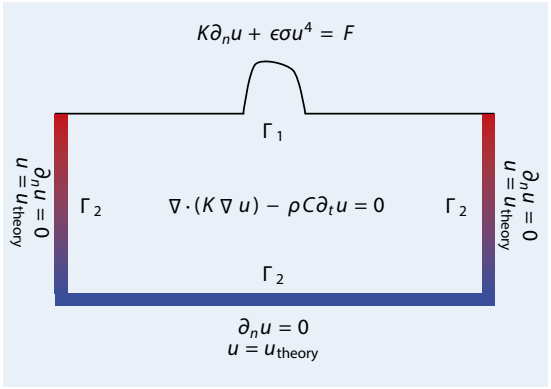
Astronomický ústav UK, Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova v Praze, Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2; mira@sirrah.troja.mff.cuni.cz

V užším slova smyslu se nebeská mechanika zabývá pohybem N těles v jejich gravitačním poli; se zářením tedy nemá společného vůbec nic. Pozorování ve sluneční soustavě a teoretické poznatky z posledních řekněme 15 let však ukazují, že záření má naprosto *zásadní* vliv na pohyb malých těles, to jest planetek a meteoroidů, o prachových zrnech nemluvě, nicméně vliv na ně je znám podstatně déle [1, 2]. Ba co víc, hluboké porozumění malým tělesům pomáhá nepřímo porozumět i pohybům a původu planet samotných. V následujícím textu proto stručně pojednáme o třech způsobech, jak pole záření a pevná tělesa vzájemně interagují. V zásadě může jít o: (i) klasickou absorpci a rozptyl, (ii) zářivé tření nebo (iii) tepelné vyzařování těles samotných.

Dopadající sluneční záření je na pevném povrchu částečně rozptýleno (a částečně pohlceno). Nemůžeme však předpokládat platnost triviálního Snellova zákona dopadu a odrazu, protože plochy nebývají zrcadlové. Spíše se rozptyl na planetkách připodobňuje zákonu Lambertovu, kdy je naopak směr rozptýleného záření zcela *nezávislý* na směru dopadajícího záření. Abychom však vystihli všechny důležité vlastnosti



Obr. 1 Řešení rovnice vedení tepla ve zjednodušeném jednorozměrném případě. Na vodorovné ose je čas t, na svislé hloubka x pod povrchem, barevně je znázorněna termodynamická teplota T. Počáteční podmínky v čase $t = 0$ byly voleny jako izotermální ($T = T_{eq}$). Parametry ovlivňující řešení voleny následovně: rotační perioda $P = 10$ h, tepelná vodivost $K = 0{,}001$ W m^{-1} K^{-1}, měrná tepelná kapacita $C = 680$ J kg^{-1} K^{-1}, Bondovo albedo $A = 0{,}2$, infračervená emisivita $\varepsilon = 0{,}9$, vzdálenost od Slunce $r = 2{,}5$ au. Numerická integrace byla provedena metodou konečných diferencí (FDM), přičemž časový krok byl $\Delta t = 0{,}2$ s a prostorový $\Delta x = 10^{-4}$ m.



Obr. 2 Schéma výpočetní domény pro případ balvanu na rozlehlém povrchu planetky. Na povrchu neboli hranici Γ_1 je okrajovou podmínkou rovnost tepelného toku do nitra tělesa, tepelného vyzařování a celkového ozařování (tzn. od Slunce, rozptýleného záření a tepelného záření odjinud). Na hranici Γ_2 je průběh teploty $T(x, t)$ předepsán podle analytického jednorozměrného řešení vedení tepla. Uvnitř domény Ω požadujeme platnost trojrozměrné rovnice vedení tepla.

čili převážnou všesměrovost, zároveň však i částečnou směrovost a opoziční jev, musíme použít například netriviální dvousměrovou distribuční funkci odrazu nebo Hapkeho funkci, jejíž volné parametry se musejí vhodně kalibrovat.

Rozptyl i absorpce fotonů jsou podle zákona akce a reakce vždy spojeny se změnou hybnosti tělesa čili se silovým působením. Hybnost jednoho fotonu $p_\lambda = h/\lambda$, kde $h \doteq 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J s označuje Planckovu konstantu a λ vlnovou délku. Celková radiační síla je samozřejmě úměrná průřezu S tělesa, působí radiálně (ve směru od Slunce) a kvůli zákonu čtverců ubývá se čtvercem vzdálenosti r, tj. mimochodem stejné jako u gravitace. Proto, když spočteme poměr radiační síly ku gravitaci, se r^{-2} krátí a dostaneme pro dané těleso (o hmotnosti m) konstantu nazývanou parametr beta, $\beta = QL_\odot S/(4\pi mcGM_\odot)$, kde Q označuje účinnost rozptylu, $L_\odot$ zářivý výkon Slunce, c rychlost světla ve vakuu, G gravitační konstantu a $M_\odot$ hmotnost Slunce. Je-li $\beta \ll 1$, je přímý rozptyl bezvýznamný. Ale i kdyby bylo $\beta \lesssim 1$, nepozorovali bychom nějaké dlouhodobé změny trajektorie, neboť jde o konzervativní systém, pouze na těleso působí menší dostředivá síla a to obíhá po poněkud větší elipse. Velmi nápadným projevem takové radiační síly jsou zakřivené prachové ohony komet. Jen

http://ccf.fzu.cz

Adaptivní optika v astronomii

Jaroslav Řeháček, Bohumil Stoklasa

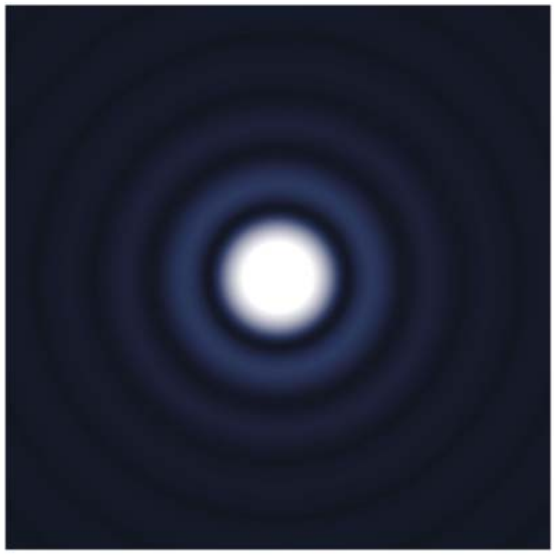
katedra optiky, Univerzita Palackého v Olomouci, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc

Adaptivní optické systémy se vyznačují schopností měnit své optické vlastnosti na požádání a v reálném čase. V tomto příspěvku jsou diskutovány základní prvky adaptivních optických systémů využívaných v astronomii ke kompenzaci vlivu atmosféry na zobrazení velkých pozemských teleskopů.

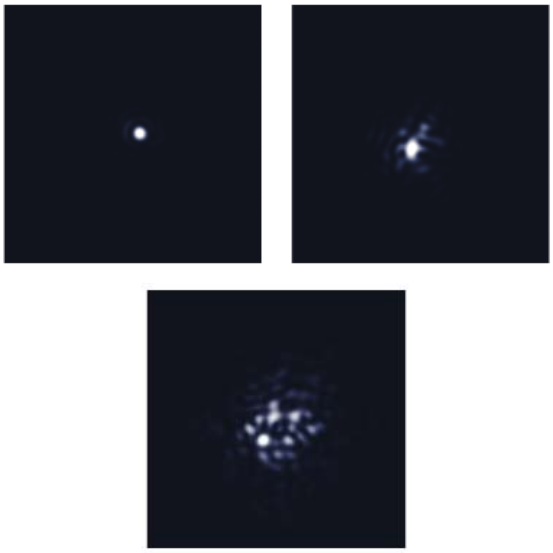
Vliv atmosféry na pozorování pozemskými teleskopy

Podstatné množství informace o vzdáleném vesmíru se k astronomovi dostává prostřednictvím světla, které je vyzařováno nebo interaguje se zkoumanými astronomickými objekty. Pokrok v astronomii byl proto vždy úzce svázán s pokrokem v astrooptice, zejména s dostupností výkonnějších optických teleskopů.

Z hlediska výkonu optického teleskopu a tedy i jeho užitečnosti pro praktickou astronomii je jednou z důležitých charakteristik úhlové rozlišení (dále jen rozlišení) neboli schopnost rozlišit dva blízké bodové zdroje světla, typicky dvě hvězdy nacházející se blízko sebe v zorném poli teleskopu. Experimenty s vizuálním pozorováním dvojhvězd prováděné v 19. století ukázaly, že rozlišení se zlepšuje s rostoucím průměrem objektivu. Teoretické zdůvodnění vychází z vlnového popisu zobrazení a zavedení rozptylové funkce optické soustavy (anglicky *point-spread function*, dále jen PSF) jako intenzity obrazu bodového předmětu, v astronomii realizovaném vzdálenou izolovanou hvězdou. Jak se ukazuje, tuto PSF lze za určitých zjednodušujících předpokladů



Obr. 1 Teoretická PSF pro teleskop s kruhovou aperturou bez vlivu atmosféry. Při převodu na stupně šedi byly nízké intenzity zesíleny, aby byla vedlejší maxima lépe patrná. Poloměr centrální jasné části, tzv. Airyho disku, je 1,22 λ/D rad.



Obr. 2 Simulované krátkočasové PSF stejného teleskopu pro různé atmosférické podmínky. Průměr apertury D je konstantní. Efektivní síla turbulence je $D/r_0 = 2$ (vlevo), $D/r_0 = 4$ (vpravo) a $D/r_0 = 8$ (dole).

vyjádřit jako intenzitu škálovaného Fraunhoferova difrakčního obrazce apertury optické soustavy. Pro kruhovou aperturu, typickou pro většinu optických teleskopů, je úhlová položířka centrálního maxima teoreticky určena vztahem $1{,}22\lambda/D$ rad, viz obr. 1, kde λ a D jsou vlnová délka a průměr vstupní pupily teleskopu [1]. Tato položířka zhruba odpovídá empirickému vizuálnímu rozlišení zkušeného pozorovatele. Zmiňme pro zajímavost, že skutečné rozlišení dosažené daným teleskopem při zanedbání všech aberací pak záleží na dalších faktorech, jako jsou vlastnosti detektoru (poměr signál/šum) a digitální zpracování dat a může být podstatně lepší než výše uvedený tzv. Rayleighův limit.

Zdálo by se, že zvětšováním apertury teleskopu lze PSF libovolně zmenšit a dosáhnout libovolného rozlišení. Ve skutečnosti ovšem toto platí jen pro malé průměry $D < r_0$, menší než tzv. Friedův parametr r_0, jehož hodnota závisí na vnějších podmínkách. Ve viditelné oblasti spektra na dobrém stanovišti je $r_0 \approx 20$ cm, zatímco průměry největších teleskopů jsou řádově větší. To lze vysvětlit vlivem atmosféry na detekovaný signál. Atmosféra se chová jako turbulentní prostředí, kde náhodné změny teploty, tlaku

Elektroluminiscenční revoluce osvětlovací techniky

Jan Valenta[1], Ivan Pelant[2]

[1] Katedra chemické fyziky a optiky, Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2; jan.valenta@mff.cuni.cz
[2] Oddělení tenkých vrstev a nanostruktur, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Cukrovarnická 10, 162 53 Praha 6; pelant@fzu.cz

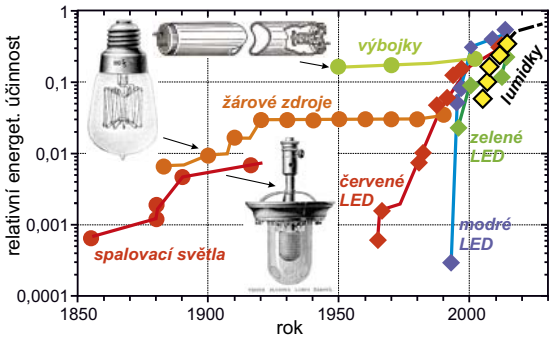
Motto: *„Pevnolátkové osvětlování je dnes tam, kde byl Internet v 80. letech. Stejně jako jsme tehdy nemohli předpovědět, jaký bude Internet, dnes, o 30 let později, nedokážeme předvídat, co všechno se stane se světelnou technikou a osvětlováním v příštích dekádách. Víme jen, že to bude úžasné a krásné."* Roland Haitz

Osvětlovací technika hraje bezesporu významnou roli v životě lidské civilizace, proto i plný název Roku světla 2015 zní *Mezinárodní rok světla a světelné techniky*. Oceněním významu tohoto oboru bylo i udělení Nobelovy ceny za fyziku v minulém roce třem japonským badatelům za vývoj účinné modré svítivé diody (LED), což bylo popsáno v našem článku v prvním čísle tohoto ročníku Čs. čas. fyz. [1]. Proto nyní můžeme volně navázat a zaměřit se především na současný vývoj osvětlovací techniky a výhled do budoucna.

Celkový pohled na vývoj osvětlování

Ve vývoji způsobů osvětlování můžeme vysledovat několik málo základních principů. Po dlouhou dobu byl jediným „umělým" zdrojem světla pro lidstvo oheň (spalování látek organického původu) upravený do praktičtějších podob od loučí, olejových lampiček a voskových svíček až po petrolejové a plynové lampy – zdrojem světla jsou zde především rozžhavené částečky uhlíku (saze) v plameni. Nejdokonalejší typ těchto *„spalovacích osvětlovadel"* představují tzv. Auerovy lampy[1] využívající speciální „punčošku", která se rozžhaví hořícím plynem, až začne vyzařovat viditelné světlo (spalování plynu je zde téměř dokonalé, takže plamen sám téměř nesvítí). Žárové punčošky Auerových lamp vlastně představují přechod k *tepelným – žárovým – zdrojům světla*, jejichž svícení je v zásadě tepelným zářením rozžhavených těles (vláken žárovek, konců uhlíkových elektrod obloukových lamp apod.). S rozšiřováním dostupnosti elektrické rozvodné sítě plynové lampy ustoupily obloukovým lampám a žárovkám. Žárovky s kovovými vlákny pak zcela ovládly osvětlovací techniku na několik desetiletí. Po druhé světové válce se k nim přidaly výbojky založené na elektrickém výboji v plynech – zejména v podobě zářivek, kde je výboj v parách rtuti doplněn fotoluminiscencí luminoforu deponovaného na vnitřní straně trubice.

1 **Carl Auer von Welsbach** (1858–1929), rakouský chemik a podnikatel, Bunsenův žák, objevitel některých prvků vzácných zemin, autor žárové punčošky a zakladatel značky Osram. Jeho úspěšná žárová punčoška tvořená oxidem thoria (99 %) a césia (1 %) byla uvedena na trh v roce 1892.



Obr. 1 Historický vývoj relativní energetické účinnosti hlavních typů osvětlovacích zdrojů (upraveno podle [3]).

V posledních padesáti letech se pak objevují *elektroluminiscenční (EL) zdroje světla*. Nejprve se jednalo o elektroluminiscenční panely založené na výboji ve vysokých polích [2], které však trpěly nízkou stabilitou a slabým plošným jasem. V posledním desetiletí nakonec přicházejí světelné zdroje využívající injekční elektroluminiscenci v polovodičových LED diodách. Ty představují asi nejúčinnější možný způsob přeměny elektrické energie na světlo. V anglické terminologii se pro tuto nejnovější generaci osvětlení ujalo označení *„solid state lighting"* (SSL), tedy „pevnolátkové osvětlování". Autorům se však zdá přesnější termín ***elektroluminiscenční osvětlování*** (ELO), který lépe vystihuje podstatu této techniky (koneckonců také žárovky byly založeny na svícení pevné látky – kovového vlákna). Vývoj hlavních typů osvětlovacích zdrojů shrnuje obr. 1 [3].

Jak bylo uvedeno v článku věnovaném Nobelově ceně za modré LED [1], jsou EL světelné zdroje vyzařující (přibližně) bílé světlo založeny buď na kombinaci RGB (červené, zelené a modré) LED, nebo na modrých LED a luminoforu – to je látka, která se excituje pohlcením modrých fotonů emitovaných z LED a pak účinně vyzařuje fotony s delší vlnovou délkou, nejčastěji žluté až červené barvy. Před nedávnem jsme navrhli pro tyto zdroje založené na elektro- a fotoluminiscenci příhodné české pojmenování *lumidky* [4].

Noční pohledy na Zemi přístrojem Day/Night Band družice Suomi-NPP

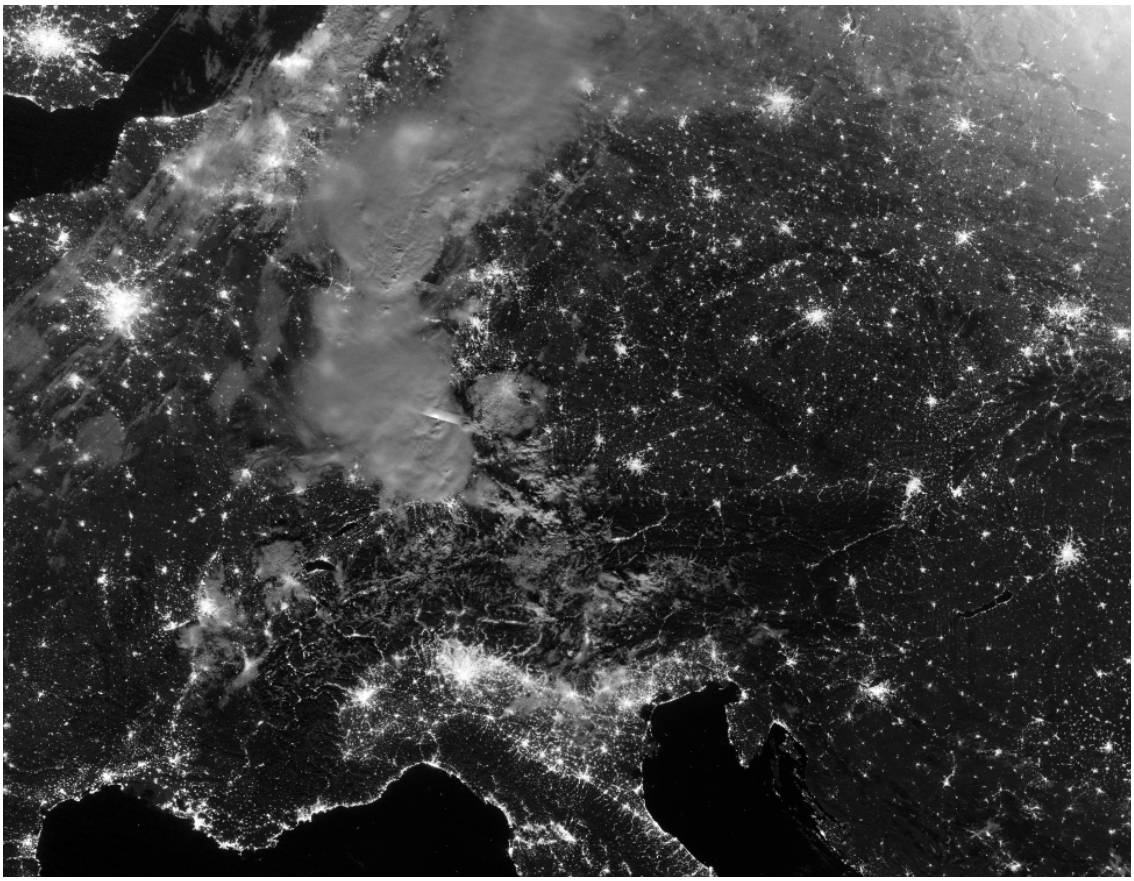
Martin Setvák

Družicové oddělení Českého hydrometeorologického ústavu, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4; setvak@chmi.cz

Družice Suomi-NPP je prototypem nové generace meteorologických družic JPSS. Jejím hlavním přístrojem je VIIRS, navazující na radiometry AVHRR a MODIS družic NOAA/POES, resp. Terra/Aqua. Jeho zcela novou součástí je vysoce citlivý přístroj DNB (Day/Night Band) určený primárně pro noční snímání Země a její atmosféry. Příspěvek dokumentuje citlivost přístroje DNB na několika vybraných příkladech.

Úvod

Družice Suomi-NPP (*National Polar-orbiting Partnership*), vypuštěná na oběžnou dráhu Země 28. října 2011, je prototypem nové generace amerických meteorologických polárních družic JPSS (*Joint Polar Satellite System*) organizací NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Družice systému JPSS postupně nahradí dosavadní družice NOAA/POES (NOAA *Polar-orbiting Operational*



Obr. 1 Noční pohled na část střední a západní Evropy zachycený přístrojem DNB družice Suomi-NPP 6. června 2015, přibližně v 01:00 UTC (03:00 SELČ). Scéna je nasvícena Měsícem, který byl v té době čtyři dny po úplňku. Podrobnější komentář viz text příspěvku.

Světelné znečištění

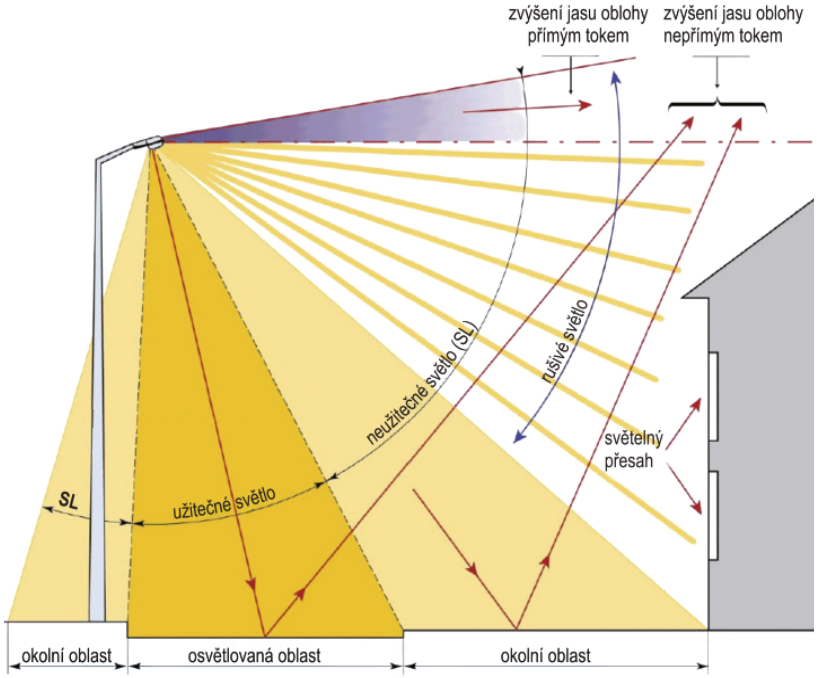
Milada Moudrá

Členka Výkonného výboru Pražské pobočky ČAS; milada.moudra@gmail.com

Světelné znečištění odjakživa představuje palčivý problém zejména pro astronomy, kterým snižuje viditelnost noční oblohy. V posledních letech je však tomuto fenoménu věnováno mnohem více pozornosti i v jiných vědních oborech vzhledem k jeho negativním důsledkům, například v oblasti ochrany přírody, lidského zdraví, bezpečnosti či financí. V článku jsou tyto dopady stručně nastíněny a podrobněji jsou rozebrány fyzikální aspekty světelného znečištění, možnosti jeho měření a modelování a prognóza do budoucna.

Světelné znečištění (*light pollution*) je termín, jenž je definován jako soubor nepříznivých účinků umělého osvětlení [1–3]. Pro odlišení nepříznivých účinků umělého osvětlení ve dne a v noci se také používá termín ALAN (*artificial light at night*) označující umělé osvětlení v noci.

Světelné znečištění se projevuje v několika formách: jako umělý jas oblohy (*sky glow*, též lidově nazývaný „světelný smog“) nad městy způsobený rozptylem světla v atmosféře, jako oslnění (*glare*), kdy je překročena adaptační schopnost oka, jako neúměrná intenzita osvětlení (*over-illumination*) objektu nebo interiéru a také jako světelný přesah (*light intrusion/trespass*) do nevhodných prostor. Původcem světelného znečištění je obecně každý umělý světelný zdroj – vzhledem k podstatě viditelnosti objektů, kdy musí na sítnici pozorovatele dopadnout světlo odražené od osvětlovaného povrchu, je tedy jistá míra světelného znečištění při používání umělého světla v noci nevyhnutelná (obr. 1). Podíl jednotlivých druhů osvětlení na světelném znečištění se nedá stanovit obecně – liší se u jednotlivých obcí podle jejich charakteru, zvyklostí při osvětlování a místních legislativních úprav. Na různých formách světelného znečištění se navíc různé druhy mohou projevovat odlišně, a to i v závislosti na čase a vzdálenosti.



Obr. 1 Světlo vyzařované osvětlovací soustavou lze podrobněji rozdělit na užitečné světlo, které míří do osvětlované oblasti, neužitečné světlo, které míří mimo osvětlovanou oblast, a rušivé světlo, jež je neužitečným světlem, které má negativní vedlejší účinky. Každá z těchto kategorií částečně přispívá ke světelnému znečištění. *Zdroj: Habel a Žák, 2015 [6].*

Většina zbytečného světelného znečištění ovšem vzniká kvůli následujícím nešvarům: a) osvětlováním mimo nutné časové období (např. osvětlení parkoviště nákupního centra mimo otevírací dobu); b) směrováním světla do nežádoucích prostor (např. na nebe nebo okny do interiérů); c) použitím zdrojů s nevhodnými spektrálními charakteristikami. Těmto problémům se dá v řadě případů vyhnout již ve fázi návrhu světelné soustavy, jímž by se měl zabývat světelný technik. Při návrhu by měly být brány v úvahu požadavky bezpečnostně-dopravní, architektonicko-urbanistické a hledisko rušivých vlivů na okolí. Dbá se tedy mj. na osvětlenost, možnost oslnění, rovnoměrnost a kontrast jasů, barevné podání a tón či možnost stmívání. S přihlédnutím k zatím neúplnému poznání lidského vidění a množství rozdílných (někdy i protichůdných) parametrů a požadavků jde o velmi komplexní problém, jehož řešení se stále vyvíjí podle nových poznatků a technického pokroku.

Pro základní vhled do světelné techniky si pojďme představit několik nejdůležitějších termínů. Světelný zdroj, potažmo svítidlo („lampa“), je definován svou spektrální distribucí (obr. 2) a dalšími parametry; měrný výkon [$\mathrm{lm \cdot W^{-1}}$] určuje množství produkovaného světelného toku na dodávaném příkonu [W] – současné nejúčinnější světelné zdroje disponují měrnými výkony 200 $\mathrm{lm \cdot W^{-1}}$ (pro srovnání, měrný výkon obyčejné žárovky je pouze 6–15 $\mathrm{lm \cdot W^{-1}}$). Zejména u LED zdrojů je často zohledňovaným parametrem tzv. náhradní teplota chromatičnosti – T_c [K], jež úzce souvisí se spektrálním složením. Čím vyšší je T_c, tím „studenější“ (modřejší) je odstín světla. Svítidlo má pak ve vztahu ke světelnému znečištění ještě jednu významnou charakteristiku, a tou je ULOR (*upward light output ratio*), procento světelného toku vyzařovaného nad horizontální rovinu[4].

Ultraslabá emise fotonů z biologických systémů: fyzikální podstata a potenciální aplikace

Michal Cifra[1], Pavel Pospíšil[2]

[1] Ústav fotoniky a elektroniky, AV ČR, v. v. i., Chaberská 58, 182 51, Praha 8; cifra@ufe.cz

[2] Katedra biofyziky, Centrum regionu Haná pro biotechnologický a zemědělský výzkum, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, Šlechtitelů 27, 783 71 Olomouc; pavel.pospisil@upol.cz

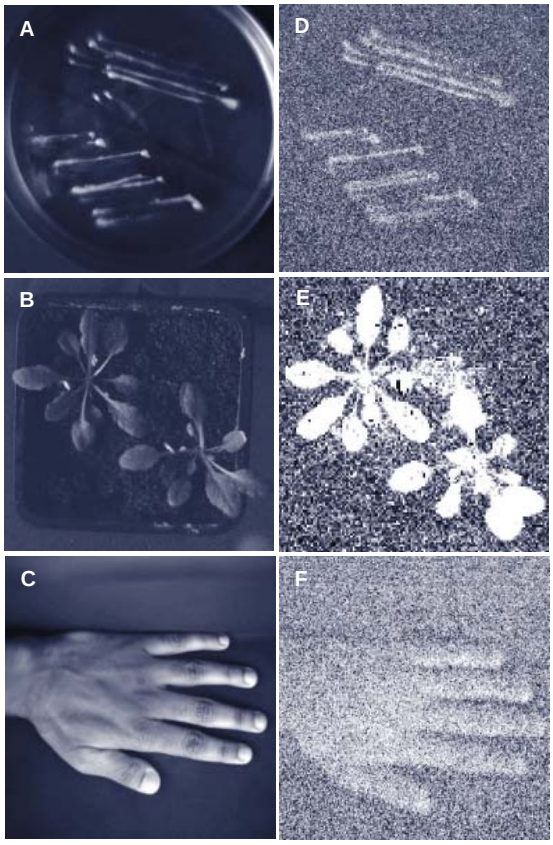
Ultraslabá emise fotonů se vyskytuje prakticky u všech metabolicky aktivních biologických systémů. Jejím zdrojem jsou elektronově excitované stavy molekul vznikající v průběhu oxidativních reakcí biomolekul. Ultraslabá emise fotonů detekovatelná citlivými a nízkošumovými fotonásobiči a CCD kamerami může najít uplatnění v neinvazivních diagnostických metodách v zemědělství a biomedicíně.

Úvod

Vyzařování světla organismy fascinovalo lidstvo od nepaměti. Pozorováno bylo volným okem viditelné světélkování živých organismů, které je dnes známo jako bioluminiscence. Fenomén vyzařování světla biologickými systémy není však omezen pouze na úzkou skupinu organismů se specializovaným enzymatickým aparátem, který bioluminescenci způsobuje. Je pozoruhodné, že veškeré metabolicky aktivní organismy jsou zdrojem velice slabého světla. Tento fenomén se nazývá *ultraslabá emise fotonů*[1] a je měřitelný pouze pomocí citlivých detektorů světla. Nabízejí se otázky, jaké molekulární mechanismy stojí za tímto vyzařováním fotonů, jaké jsou jeho fyzikální vlastnosti a zda může mít využití v diagnostice procesů probíhajících v biologických systémech.

Co je ultraslabá emise fotonů?

V biologických systémech na všech stupních evolučního vývoje, včetně mikroorganismů, rostlin a živočichů (obr. 1), dochází v průběhu metabolismu k oxidativním procesům [1]. Při těchto chemických procesech vznikají elektronově excitované molekuly, které při přechodu z excitovaného do základního stavu vyzařují fotony. Tato chemiluminiscence z živých organismů se nazývá ultraslabá emise fotonů [2]. Na rozdíl od bioluminiscence, která vyžaduje přítomnost enzymatické reakce (luciferin a luciferáza) pro bezprostřední vytvoření elektronově excitovaného stavu, elektronově excitované molekuly spojené s ultraslabou emisí fotonů jsou tvořeny jako druhotné produkty metabolických nebo stresem vyvolaných oxidativních procesů. Ultraslabou emisi fotonů spojenou s metabolickými oxidativními



Obr. 1 Ultraslabá emise fotonů je generována metabolicky aktivními organismy, jako jsou mikroorganismy, rostliny a živočichové včetně člověka. Obrázek ukazuje v levém sloupci černobílé fotografie (A–C) a v pravém sloupci zobrazení ultraslabé emise fotonů (D–F) kvasinek *Saccharomyces cerevisiae* na Petriho misce s agarem (A a D), rostliny *Arabidopsis thaliana* (B a E) a lidské ruky (C a F). Převzato z [1] a upraveno.

1 V literatuře se někdy uvádějí i pojmy *autoluminiscence, biofotony/emise biofotonů, ultraslabá chemiluminiscence.*

Optické komunikační prostředky

Radan Slavík[1], Jiří Čtyroký[2]

[1] Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, Highfield Campus, Southampton, Hampshire, SO17 1BJ, United Kingdom; r.slavik@soton.ac.uk
[2] Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8; ctyroky@ufe.cz

Bez přenosu informací pomocí optických vláken by nemohl existovat internet v současné podobě. Objem dat přenášených prostřednictvím internetu roste exponenciálně již více než deset let. To vyžaduje rychlý vývoj technologií, které tento růst umožňují. Článek popisuje základní principy přenosu informací pomocí optických vláken a ukazuje hlavní směry, kterými se vývoj v této oblasti ubírá.

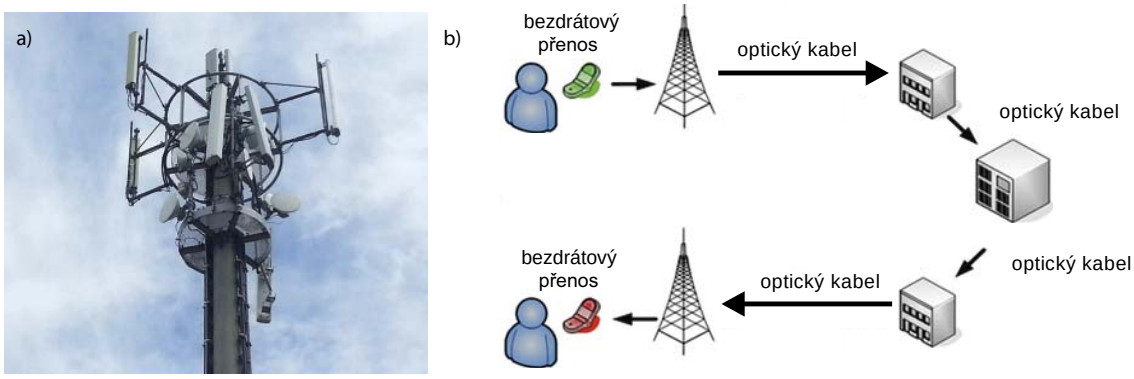
Úvod

Téměř při každém použití mobilního telefonu (ať už je to volání či posílání SMS zpráv) nebo internetu (e-mailování, prohlížení webu či stahování filmů) jsou data převedena na optické signály a přenášena neuvěřitelně rozsáhlou sítí optických vláken. Celosvětově již byly instalovány více než dvě miliardy kilometrů optického vlákna – to je délka, kterou by se dala zeměkoule obtočit kolem rovníku více než 50 000krát [1]! Více než 100 milionů uživatelů má zaveden optický kabel až domů [1]. Optická vlákna také spojují většinu vysílačů mobilních sítí (BTS – *Base Transceiver Station*), s nimiž přímo komunikují miliardy mobilních zařízení (telefony, tablety) a které lze spatřit téměř všude (obrázek č. 1a). Tyto vysílače jsou místem, kde se informace nesená radiovými vlnami převede na světelné vlny a je pak přenášena optickými vlákny (obrázek č. 1b) v městských, regionálních, páteřních, či dokonce podmořských optických telekomunikačních sítích.

Vzhledem k tomu, že v oblasti komunikací (mezi lidmi, ale nově i mezi počítači a přístroji) neustále vznikají nové a nové aplikace a technologie (internet, web, mobilní telefony, tablety atd.), již po několik desetiletí zaznamenáváme exponenciální růst objemu přenášených informací [1]. V dnešní době je takovou nově přicházející aplikací „internet věcí", který nám v blízké době například umožní zjistit, které parkovací místo ve městě je volné, protože každé bude připojeno k internetu, a popelnice budou (přes internet) informovat popeláře, když budou zrovna plné. I když optické sítě nerostou rovnoměrně ve všech oblastech světa, uvádí se, že nárůst činí v průměru asi 20 % až 90 % ročně [1]. Celkový informační objem přenášený ve světě za jednu hodinu bude brzy stejný jako za celý rok 2000. Takový nárůst klade pochopitelně vysoké nároky na výzkum a vývoj v této oblasti – je potřeba nejen přenášet stále větší objem informací, ale je také třeba neustále zlevňovat komunikační technologie a výrazně snižovat jejich energetickou náročnost. Přenos informací totiž dosáhl takového rozsahu, že na jeho provoz už se vynakládá asi 10 % celosvětové spotřeby elektrické energie [2] (odtud i heslo skalních ekologů: „Kdo ‚googlí', ničí planetu").

Proč přenášet informace světlem?

Komunikační technologie, které denně používáme (telefon, počítač atd.) využívají většinou bezdrátové spojení nebo kabely s kovovými vodiči. Tak proč je přenos pomocí světla tak výhodný? Výhod je celá řada. Vezměme to popořádku. Ztráty světla šířícího se v optickém vlákně jsou stále stejně nízké bez ohledu na to, kolik informací se jím přenáší. To v kovovém kabelu neplatí – čím více informací chceme přenést, tím vyšší kmitočty musíme pro přenos používat a s rostoucí frekvencí rostou ztráty (útlum kabelu). Kapacita již



Obr. 1 a) Vysílač mobilní sítě BTS. b) Data se mezi BTS přenášejí pomocí optických kabelů obsahujících optická vlákna.

Světlo v multimódových optických vláknech

Tomáš Tyc

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 611 37 Brno; tomtyc@physics.muni.cz

Úvod

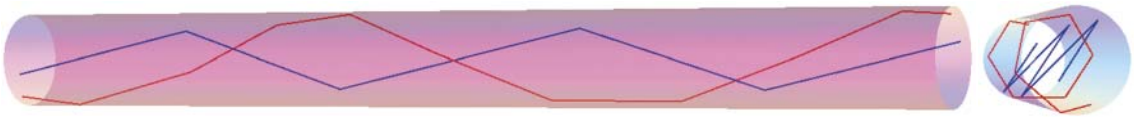
Optické vlákno je pozoruhodný fyzikální systém: téměř dokonalý průhledný válec, v němž se světlo nerušeně šíří stovky kilometrů a přitom může přenášet nepředstavitelné množství informací zakódovaných do jemné modulace jeho frekvence či amplitudy. Jindy zase vlákno přenáší jediný pixel obrazu vnitřní stěny žaludku či jiného orgánu, když lékař vyšetřuje pacienta endoskopem. Optická vlákna jsou dnes v řadě oblastí lidské činnosti nepostradatelná. Je proto užitečné podívat se na to, co se vlastně se světlem ve vlákně děje. To je cílem tohoto článku, který odhalí i některé méně známé zajímavosti doprovázející šíření světla ve vláknech.

Paprsky v optickém vlákně

Podívejme se na světlo v optickém vlákně nejprve očima geometrické optiky. Tento pohled funguje dobře, jestliže je poloměr vlákna mnohem větší než vlnová délka světla, které se v něm šíří.

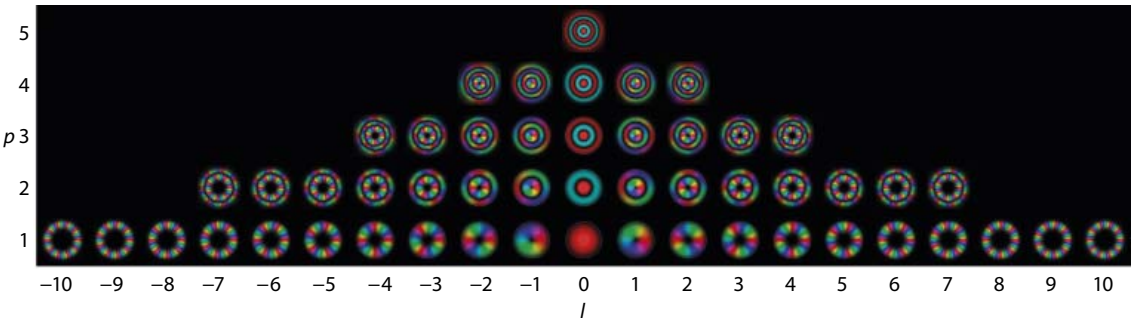
Jak je všeobecně známo, světlo je uvnitř vlákna vázáno díky úplnému odrazu, který nastává na rozhraní jeho jádra s větším indexem lomu a pláště s menším indexem lomu. Paprsek se tak ve vlákně neustále odráží a šíří se podél klikaté čáry. Tato klikatá čára může protínat osu vlákna – v takovém případě leží celá v jedné rovině. Pokud paprsek osu vlákna neprotíná, připomíná jeho trajektorie spíše jakousi lámanou šroubovici, viz obr. 1. Není těžké si představit, že v tomto případě má světlo vzhledem k ose vlákna nenulový moment hybnosti, protože při pohledu podél osy světlo jakoby obíhá po klikaté čáře dokola. Takovémuto momentu hybnosti světla říkáme orbitální, abychom jej odlišili od spinového momentu hybnosti, který nese kruhově polarizované světlo.

Je užitečné si uvědomit, že různým paprskům trvá různou dobu, než proběhnou vláknem dané délky. Skutečně, jestliže paprsek svírá s osou vlákna úhel α, pak ve vlákně délky l urazí dráhu $l/\cos\alpha$. Ve vlákně se mohou



Obr. 1 Dva paprsky v optickém vlákně. Modrý paprsek leží v jedné rovině (která obsahuje i osu vlákna) a má proto nulový moment hybnosti. Červený paprsek obíhá po lomené šroubovici a moment hybnosti má nenulový. Pro lepší představu je zobrazen pohled na vlákno ze dvou směrů. Válec na obrázku znázorňuje jádro vlákna.

šířit paprsky s různými hodnotami úhlu α – od nuly pro paprsek šířící se rovnoběžně s osou vlákna až po maximální hodnotu $\alpha_{\max}$ danou mezním úhlem úplného odrazu, $\alpha_{\max} = \arccos(n_2/n_1)$, kde n_1 a n_2 je po řadě index lomu jádra a pláště. Proto se také budou lišit časy potřebné pro proběhnutí vláknem. Pošleme-li do vlákna velmi krátký světelný pulz, v němž bude obsaženo světlo odpovídající nejrůznějším úhlům α, vyjde z druhého konce vlákna pulz mnohem delší díky nestejným časům šíření. A podobně, jestliže na světelnou vlnu namodulujeme vysokofrekvenční signál, bude ze stejného důvodu na druhém konci vlákna tento signál porušen a pomíchán.



Obr. 2 Módy světla o vlnové délce $\lambda = 532$ nm v optickém vlákně o poloměru jádra $R = 12\,\mu$m a numerické apertuře $NA \equiv n_1 \sin\alpha_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 0{,}1$. Na vodorovné ose je úhlový index l, na svislé ose je radiální index p. Jas barvy vyjadřuje amplitudu vlny, odstín („hue“) pak její fázi. Tenká kružnice vyznačuje hranici jádra. Vlny evanescentně zasahují ještě kousek za tuto hranici do pláště.

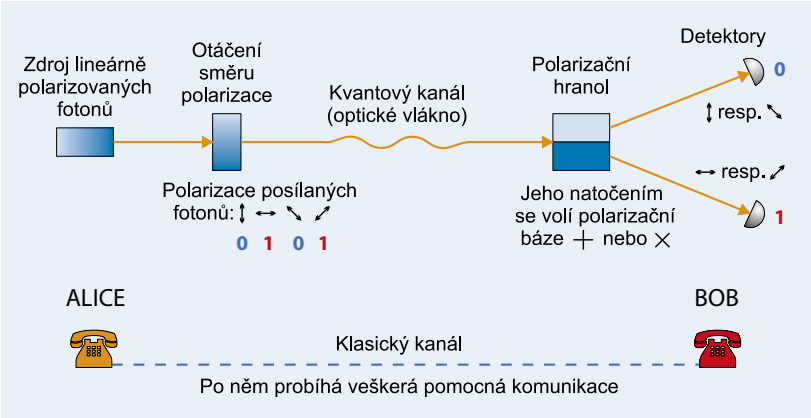
Kvantová kryptografie

Miloslav Dušek

Katedra optiky, Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci; dusek@optics.upol.cz

Úvod

Kvantová teorie, nezbytná pro popis mikrosvěta, postavila v minulém století fyziky před úplně nové paradigma. Kvantové systémy se chovají mnohem podivněji než ty, které známe z klasické fyziky. Částice se např. může nacházet v superpozici stavů odpovídajících dvěma různým polohám. Dvě nebo více částic se může vyskytovat v tzv. provázaném stavu, kdy lze pozorovat jisté nelokální vlastnosti, projevující se mj. ve výsledcích korelačních měření. Kvantová fyzika nám, zdá se, odhalila skutečnost, že součástí přírody je jakási vnitřní náhodnost, kterou nelze obejít a která se projevuje neurčitostí výsledků kvantového měření. Kromě toho každé měření nebo jakákoli interakce s kvantovým systémem obecně podstatným způsobem ovlivňuje jeho stav. Role pozorovatele je tedy v kvantové fyzice jiná než ve fyzice klasické. Ukazuje se nicméně, že tyto kontraintuitivní vlastnosti lze velmi zajímavým způsobem využít při zpracování a přenosu informace. Informace je sice abstraktním konceptem, ale to, co můžeme s informací provádět, hodně závisí na fyzikálním systému, který ji nese. V tomto smyslu zpracování informace je vždy proces fyzikální. Využití kvantových systémů při zpracování informace nabízí řešení některých problémů, které jsou v rámci klasické teorie informace neřešitelné nebo jejichž klasické řešení není známé. Jedná se např. o bezpečný přenos kryptografického klíče nebo o faktorizaci velkých čísel v polynomiálním výpočetním čase. Kvantová informatika tak nabízí dvě zajímavé aplikace: kvantovou kryptografii, což je metoda pro utajenou komunikaci, jejíž bezpečnost je garantována zákony fyziky a nespoléhá na výpočetní složitost, a kvantové počítače, které mohou efektivně řešit některé náročné výpočetní problémy. Kvantová kryptografie už dozrála do komerční podoby. Kvantové počítače a obecně kvantové zpracování informace jsou však stále ve stadiu laboratorního výzkumu. V obou případech se nicméně významně uplatňují moderní optické technologie. Fotony jsou velmi dobrými nositeli informace zakódované do kvantových stavů, zvláště pro komunikační účely, neboť jsou málo náchylné k dekoherenci. V tomto článku se zaměříme na kvantovou kryptografii a její optické implementace.



Obr. 1 Modelové uspořádání pro kvantový přenos kryptografického klíče prostřednictvím polarizačních stavů fotonů.

Kvantová distribuce klíče

Většina současných kryptosystémů spoléhá na omezené výpočetní nebo technologické možnosti útočníka. Např. asymetrické šifry, které pracují s veřejným a privátním klíčem, využívají toho, že šifrování je operace matematicky jednoduchá, ale rozluštění zprávy bez znalosti privátního klíče je výpočetně extrémně náročné. V případě algoritmu RSA je např. potřeba rozložit obrovské číslo na dva prvočinitele. U všech známých (nekvantových) algoritmů pro faktorizaci roste počet nutných elementárních operací s délkou čísla rychleji než polynomiálně. Efektivnější algoritmus není znám, ale není dokázáno, že neexistuje. Navíc kvantové počítače by faktorizaci zvládly v polynomiálním výpočetním čase. Kryptografie nicméně zná jednoduchou šifru, jejíž bezpečnost je matematicky dokázána [1]. Jde o tak zvanou *Vernamovu šifru* [2]. Zpráva se jednoduše „sečte“ s tajným klíčem, který sdílejí obě komunikující strany. V případě binárních dat jde o sčítání jednotlivých bitů modulo 2. Dešifrování pak probíhá analogicky „odečtením“ klíče. Klíčem je náhodná sekvence stejné délky jako zpráva. Má-li být ale komunikace bezpečná, nesmí být klíč použit více než jednou. Pro každou zprávu se tedy musí bezpečně přenést nový klíč stejné délky a to může být velmi problematické. Jak zajistit, aby klíč nezískal nikdo třetí? Řešení zdánlivě neřešitelného problému přenosu klíče nabízí kvantová fyzika. Klíč se nepřenáší konvenčním způsobem. Informace se kóduje do obecně *neortogonálních* stavů kvantových systémů, např. do polarizačních stavů jednotlivých fotonů. Případný odposlech není nic jiného než interakce s fyzikální entitou nesoucí informaci. Každý pokus o odposlech proto ovlivní kvantové stavy některých přenášených částic, takže může být odhalen. Pokud je odposlech zjištěn, klíč se nepoužije. Klíč sám žádnou důležitou informaci nenese.

Princip kvantové distribuce klíče si ukážeme na protokolu BB84 [3]. Představme si jednoduché uspořádání zachycené na obrázku 1, které využívá pro kódování informace lineární polarizace jednotlivých fotonů. Komunikující strany budeme označovat tradičně Alice a Bob. Ti se domluví, jak budou kódovat nuly a jedničky, např. 0 bude buď vertikální, nebo antidiagonální li-

http://ccf.fzu.cz

Detektory jednotlivých fotonů a jejich použití pro velmi přesná měření v kosmu

Ivan Procházka, Josef Blažej

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská Českého vysokého učení technického v Praze, Břehová 7, 115 19 Praha 1; ivan.prochazka@fjfi.cvut.cz

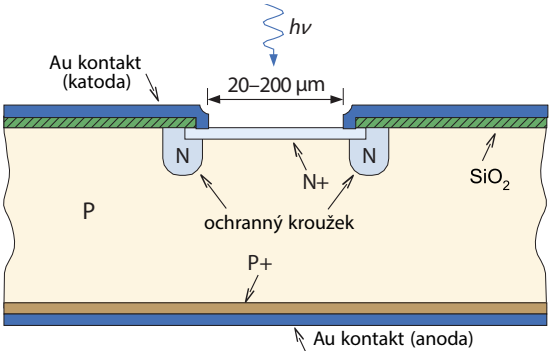
Článek popisuje konstrukci polovodičových detektorů jednotlivých fotonů a jejich použití při velmi přesných měřeních vzdáleností a přenosu přesného času v kosmických projektech. Detektory vyvinuté v posledních třiceti letech na Českém vysokém učení technickém v Praze úspěšně pracují v laboratořích po celém světě i na palubě pěti kosmických sond.

Úvod

Světlo, stejně jako veškeré elektromagnetické záření, je kvantováno. Elementární množství energie v optické části spektra se nazývá foton. Jediný foton ve viditelné části spektra je nositelem pro laika těžko představitelného množství energie řádově 10^{-19} joulů. Detekce tak malých množství energie je technickou výzvou. Detekce jednotlivých fotonů je ale zároveň atraktivní měřicí technikou, která se používá v řadě rozmanitých oborů: ve spektroskopii, při měření vzdáleností, při měření znečištění atmosféry, v astronomii, při konstrukci optických vláknových senzorů, v kvantové kryptografii a v mnoha dalších. Důvodů, proč použít detekci jednotlivých fotonů, je několik. Prvním z nich je ten nejlogičtější – detekce extrémně slabých optických signálů. Druhým důvodem je využití kvantové povahy jednotlivých fotonů. Dalším je využití faktu, že při použití detekce jednotlivých fotonů při měření je možné omezit výrazně množství měřicích chyb. Jinými slovy použití jednotlivých fotonů umožňuje měřit extrémně přesně. Detektory jednotlivých fotonů lze rozdělit například podle jejich časového rozlišení, s jakým jsou schopny určit čas, kdy k detekci došlo. Jednou z možností, jak detekovat jednotlivé fotony s velmi vysokým časovým rozlišením, je použít lavinovou polovodičovou strukturu, která je impulzně napájena nad prahem průrazu. Takové detektory byly vyvinuty na Českém vysokém učení technickém v Praze a byly velmi úspěšně použity, kromě jiných, pro velmi přesná měření v řadě mezinárodních kosmických projektů.

Konstrukce polovodičového detektoru jednotlivých fotonů

Polovodičový detektor jednotlivých fotonů se skládá z lavinového přechodu a řídicího elektronického obvodu. Lavinový přechod je impulzně napájen v závěrném směru na napětí, které je vyšší než jeho průrazné napětí. V této konfiguraci stačí energie jediného fotonu absorbovaného v aktivní vrstvě struktury k tomu, aby spustila proces lavinového násobení nosičů náboje v polovodiči. Lavinové násobení probíhá velmi rychle, počet nosičů náboje, tedy i proud protékající součástkou, se zdvojnásobuje každých několik pikosekund (1×10^{-12} sekundy) – tak vzniká proudový impulz. Náběžná hrana tohoto proudového impulzu označuje s vysokým časovým rozlišením okamžik detekce fotonu. Za čas kratší než jedna nanosekunda dosáhne proud protékající přechodem prakticky použitelných hodnot jednotek miliampérů. V tomto okamžiku je nutné proces násobení nosičů rychle zastavit tak, aby nedošlo k přetížení nadměrným protékajícím proudem a následnému zničení vlastní detekční struktury. K tomu slouží elektronický obvod, který řídí napájení detektoru. Tento obvod zajišťuje jednak napájení detektoru impulzně nad práh průrazu, detekuje nárůst proudu strukturou, snižuje napájecí napětí pro zastavení lavinového násobení a generuje výstupní impulz. Prvním, kdo sestrojil takto pracující polovodičový detektor jednotlivých fotonů a zavedl pro něj název



Obr. 1 Schéma polovodičové struktury pro detekci jednotlivých fotonů.

Laserové chladenie elementárnych častíc

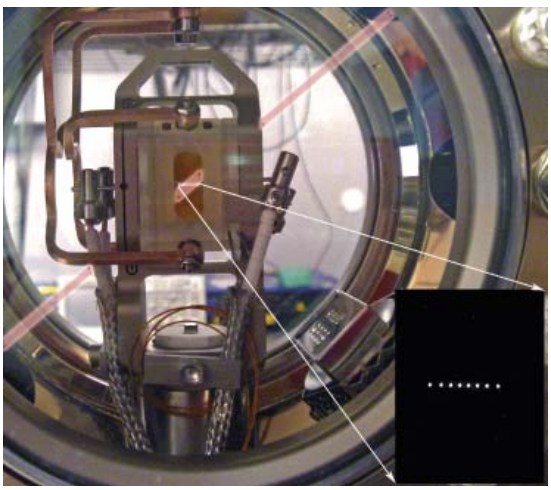
Lukáš Slodička

Katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc; slodicka@optics.upol.cz

Svetlo je využívané pre manipuláciu s atómami a na štúdium ich vlastností. Počas posledných desaťročí táto oblasť výskumu výrazne expandovala a priniesla dramatické objavy, ktoré viedli k možnostiam chladenia atómov do extrémne nízkych kinetických energií, či k udržaniu izolovaných atomárnych obláčikov vo vákuových systémoch desiatky sekúnd. V tomto článku uvádzame základné princípy chladenia elementárnych častíc svetlom.

Ako to začalo

Skutočnosť, že elektromagnetické žiarenie pôsobí silou, začala byť síce kvantitatívne chápaná až s Maxwellovou teóriou elektromagnetizmu (1873), avšak predpoklad o existencii tejto sily vznikol už oveľa skôr, čiastočne kvôli pozorovaniam chvostov komét smerujúcich od slnka. Na prelome 19. a 20. storočia predviedol ruský fyzik Piotr Lebedev prvé kvantitatívne merania tlaku svetla na makroskopické objekty meraním sily, ktorou pôsobí svetlo pri odraze na malé sklíčko zavesené na niti vo vákuovej komore. Významný krok smerom k nášmu dnešnému chápaniu radiačného tlaku prišiel s uvedením kvantovomechanického pohľadu na svetlo Albertom Einsteinom v roku 1917. Einstein ukázal, že svetelné kvantum-fotón s energiou $h\nu$ má moment hybnosti $h\nu/c$, kde h je Planckova konštanta, ν je frekvencia a c rýchlosť svetla. V roku 1933 demonštroval rakúsky fyzik Otto Robert Frisch prvé odchýlenie smeru pohybu sodíkových atómov pomocou svetla generovaného sodíkovou lampou [1]. S príchodom laserov, o štyridsať rokov neskôr, rozpoznal Arthur Ashkin potenciál intenzívneho a úzkopásmového svetla pre manipuláciu s atómovými pohybovými stupňami voľnosti [2] a po pár rokoch, v roku 1978, prichádzajú prvé demonštrácie laserového chladenia magnéziových [3] a báriových iónov [4]. David Jeffrey Wineland a Hans Georg Dehmelt, ktorí sa významne na týchto experimentoch podieľali, dostali v rokoch 1989 a 2012 aj vďaka týmto výsledkom Nobelove ceny. Tri roky po prvých demonštráciách laserového chladenia iónov pozoroval Vladimir Georgievich Minogin s kolegami prvý jasný znak spomalenia zväzku neutrálnych atómov protibežným laserovým zväzkom [5]. Po ďalšom úsilí viedli tieto pokusy v roku 1985 k úplnému zastaveniu neutrálnych atómov sodíka nezávisle v dvoch experimentálnych tímoch vedených Williamom D. Phillipsom [6] a Johnom Hallom [7]. Väčšina počiatočných prác v oblasti chladenia neutrálnych atómových zväzkov a obláčikov bola realizovaná práve s atómami sodíka kvôli jeho takmer ideálnej štruktúre hladín a možnosti excitácie jeho chladiaceho prechodu pomocou jedným z vtedy najspoľahlivejších farbivových laserov. Neskôr sa s rozvojom diódových a titán-zafírových laserov výber používaných prvkov posunul smerom k ťažším alkalickým kovom, hlavne k rubídiu a céziu. Profesor Phillips za vývoj metód laserového chladenia neutrálnych atómov zdieľal v roku 1997 Nobelovu cenu spolu so Stevenom Chu a Claude Cohen-Tannoudjim, prof. Hall zase dostal Nobelovu cenu za príbuznú tému precíznej laserovej spektroskopie a vývoj frekvenčných laserových hrebeňov spolu s Theodorom Hänschom o osem rokov neskôr, v roku 2005. Oblasť fyziky zaoberajúca sa skúmaním laserového chladenia elementárnych častíc sa od týchto prvých demonštrácií nesmierne rozvinula a vyprofilovala do niekoľkých samostatných smerov. Zdokonaľujúce sa experimentálne techniky chladenia častíc umožnili chladenie atómov do extrémne nízkych teplôt zodpovedajúcich kinetickým energiám oveľa nižším ako je energia atómu získaná pri spontánnej emisii jediného fotónu. Chladenie prinieslo možnosť udržania obláčikov izolovaných atómov vo vysokom vákuu po dobu mnohých sekúnd. Tieto unikátne schopnosti kontroly atómového pohybu umožnili v 90. rokoch minulého storočia začať skúmanie vlastností



Obr. 1 Ochladené ióny dopplerovským chladením.

Optické víry aneb jak roztočit světlo

Zdeněk Bouchal[1], Petr Bouchal[2]

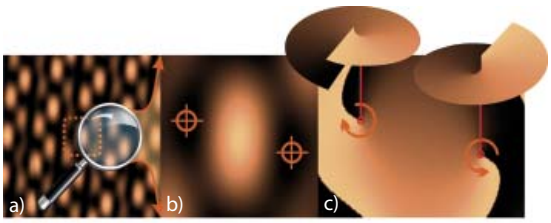
[1] Katedra optiky, PřF UP Olomouc, 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc; bouchal@optics.upol.cz

[2] Ústav fyzikálního inženýrství, FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno; CEITEC – Středoevropský technologický institut, Technická 10, 616 00 Brno

Světelné víry se objevují v jevech, které jsou v optice známy od počátku 19. století. Je proto překvapivé, že první ucelená práce byla v této tematice publikována až v roce 1974 a výzkum se plně rozvinul v posledních 20 letech. V příspěvku jsou prezentovány jednoduché geometrické představy o světelných vírech a jejich fyzikálních vlastnostech a naznačena podstata základních experimentů a aplikací.

Přirozený vznik světelných vírů

Přesné objasnění fyzikální podstaty a vlastností světelných vírů je poměrně náročné, základní představu o jejich vzniku lze ale získat už z jednoduché úvahy o Youngově interferenčním experimentu. Je-li experiment proveden se dvěma otvory umístěnými v ohniskové rovině čočky, na stínítku interferují rovinné vlny, které vytvářejí světlé a tmavé proužky. Pokud se stínítko od otvorů interferometru vzdaluje, situace se nemění a místa nulové intenzity vytvářejí rovinné plochy. Tato situace je speciální a nevystihuje obecný případ interference. Ten je získán, pokud je v Youngově experimentu přidán jeden nebo více otvorů. Místa nulové intenzity v tomto případě odpovídají odděleným bodům, které při vzdalování stínítka od otvorů vytvářejí čáry nulové intenzity. Při změně počtu a rozmístění otvorů interferometru se mění pozice světlých a tmavých stop interferenčního obrazce, místa nulové intenzity jsou však stále reprezentována jednotlivými body v rovině stínítka a čárami v prostoru. Komplexní amplituda U interferenčního pole může být vyjádřena pomocí výsledné amplitudy A a fáze Φ, $U = A\exp(i\Phi)$. Kvadratickým detektorem je zaznamenána intenzita $I \propto |U|^2 = A^2$. Pro diskusi světelných vírů je ale důležitá změna fáze Φ v blízkém okolí bodů, ve kterých je intenzita světla nulová. Situace je zřejmá z obr. 1, který znázorňuje profil intenzity a fáze interferenčního pole, vytvořeného součtem čtyř koherentních vln s náhodnou volbou směrů šíření. V okolí bodů s nulovou intenzitou fáze postupně narůstá nebo klesá s azimutálním úhlem φ a při jednom plném oběhu se změní o hodnotu $\Delta\Phi = \Phi(\varphi) - \Phi(\varphi + 2\pi) = \pm 2\pi$. Plocha konstantní fáze, v optice nazývaná *vlnoplocha*, představuje v okolí čar nulové intenzity uzavřenou šroubovou plochu, která je buď levotočivá, nebo pravotočivá. Na ose šroubovité plochy není fáze jednoznačně určena a vykazuje singularitu. Fázové struktury šroubovitého typu mají přímou souvislost s vířivým tokem elektromagnetické energie a nazývají se *světelné víry*. Typickým příkladem přirozeného vzniku velkého počtu světelných vírů je speckle obrazec vytvořený rozptylem koherentního záření na drsném povrchu.



Obr. 1 Světelné víry v interferenčním poli čtyř koherentních vln s náhodnou volbou směrů šíření: a) celkový interferenční obrazec, b) intenzita ve výřezu, c) fáze ve výřezu se znázorněním levotočivé a pravotočivé šroubovité vlnoplochy.

V uvedené představě tato situace odpovídá Youngovu interferometru s velkým počtem náhodně rozmístěných otvorů. Šroubovité fázové singularity mají přímou analogii s dislokacemi krystalů, které se objevují při růstu nebo působení mechanického napětí. Toto srovnání bylo využito už v průkopnické práci J. Nye a M. Berryho *Dislocations in wave trains* [1]. Kromě dislokací fáze jsou v optice studovány rovněž paprskové, polarizační a koherenční singularity. Pro oblast, která se těmito jevy zabývá, navrhl M. Soskin označení *Singulární optika* [2].

Světelné šroubovice v laserových svazcích

Světelné víry pozorované v interferenci mnoha náhodně směrovaných rovinných vln mají anizotropní šroubovité singularity s fázovou nespojitostí $\Delta\Phi = 2\pi$ a jejich pozice není kontrolovatelná. Hlavní pozornost byla proto věnována světelným vírům, jejichž parametry lze v experimentech plně ovládat a jsou přenášeny dobře směrovanými laserovými svazky. Jejich šroubovitá singularita je navíc izotropní a fáze Φ se s azimutálním úhlem mění lineárně. S použitím válcových souřadnic r a φ může být skalární komplexní amplituda takového vírového svazku zapsána ve tvaru

$$U = u(r, z)\exp(im\,\varphi), \qquad (1)$$

kde je předpokládáno, že svazek je monochromatický s kruhovou frekvencí ω a postupuje podél osy z (časové oscilace byly vynechány). Šroubovitá singularita se objevuje na ose svazku ($r = 0$) a fázová nespojitost nabývá

Silové působení laserových svazků na nesférické objekty

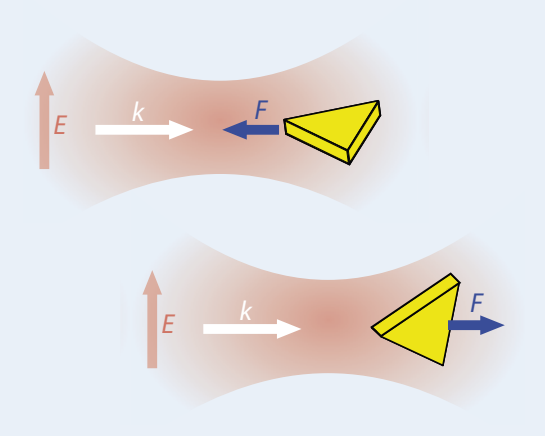
Pavel Zemánek, Petr Jákl a Oto Brzobohatý

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., Královopolská 147, 61264 Brno; pavlik@isibrno.cz

Silové působení světla na objekty je registrováno patrně od 17. století, kdy Johanes Kepler zmínil tento mechanismus na základě pozorování odklonu chvostů komet od Slunce. Od této ukázky radiačního tlaku našly silové účinky světla řadu podob a aplikací ve všech přírodních vědách – od zachycení mikroorganismů ve fokusovaném laserovém svazku přes optická síta ke třídění částic, chlazení pohybu nanočástic až po stabilizaci orientace satelitu Kepler (jak zajímavá historická shoda). V předkládaném článku se zaměříme na chování nanočástic a mikročástic nekulového tvaru ozářených laserovými svazky různých vlastností.

Úvod

V minulém příspěvku [1] jsme zmínili principy silového působení světla a uvedli dnes již klasické geometrie a aplikace, mezi něž patří např. optická pinzeta, holografická optická pinzeta, ramanovská pinzeta a měření sil molekulárních motorů. Rovněž jsme velmi stručně zmínili některá pokročilejší uspořádání a využití, např. optické třídění mikroobjektů, opticky vázané mikrostruktury, optický natahovač apod. V dnešním příspěvku se soustředíme na manipulace s nesférickými mikročásticemi a nanočásticemi [2, 3, 4]. Bouřlivě se rozvíjející oblast optických manipulací a optického chlazení objektů ve vzduchu a ve vakuu je v tomto čísle zmíněna v příspěvku L. Slodičky (str. 347) a problematika optických vírů nesoucích orbitální moment hybnosti v příspěvku Z. Bouchala (str. 351). Drtivá většina aktivit v oblasti optických mikromanipulací se zabývala kulovými částicemi a až v relativně nedávné době se úsilí zaměřuje i na nesférické objekty [5, 6, 7]. Popis silové interakce je však v tomto případě třeba rozšířit i o působící momenty sil a následnou rotaci částic [8, 9]. Ustáleného rotačního pohybu částic lze dosáhnout kontinuálně působícím momentem hybnosti, který vznikne např. šroubovicovým tvarem částice, která je osvícena běžným gaussovským svazkem [5], osvícením dvojlomné [10, 11, 12], absorbující [13] nebo nekulové částice [5, 6, 14, 15] kruhově polarizovaným světlem gaussovského svazku. Často se v tomto případě mluví o přenosu tzv. spinového momentu hybnosti světla na částici. Existuje však i orbitální moment hybnosti svazku, který se přiřazuje tzv. vírovým svazkům se spirální vlnoplochou [16, 17, 18]. V posledních 20 letech byl studován přenos orbitálního momentu hybnosti na částice [19, 20, 17, 21, 22, 23, 24] nebo různé kombinace svazku se spinovým momentem hybnosti a nekulovým tvarem částic [25, 6]. Opticky zachycená a rotující částice našla uplatnění např. v reologii jako opticky poháněná mikropumpa



Obr. 1 Vliv natočení nanočástice na sílu, která na ni působí v ose šíření svazku. Vlevo: částice je tažena do rovnovážné polohy umístěné za ohniskem svazku. Vpravo: částice je tlačena ve směru šíření světla a zachycena nebude.

[26, 14, 27, 28] nebo jako nástroj kvantifikující vlastnosti tekutin a plynů s mikrometrovým prostorovým rozlišením [29, 30, 26, 31, 32]. Opticky zachycené nekulové částice představují novou generaci mikroskopů s lokální sondou zachycenou v laserovém svazku [33] s unikátní možností detekovat kromě velmi slabých sil (0,1–100 pN) i velmi slabé momenty hybnosti (1–10 000 pN nm) [34, 35, 36].

Nanočástice

V rámci tzv. Rayleighovy aproximace, kdy rozměry částice jsou mnohem menší než vlnová délka chytacího svazku, lze odvodit analytické vztahy pro sílu F_ξ, (kde $\xi = x, y, z$) a moment síly M_ξ působící na nekulovou nanočástici [38, 40]

$$F_\xi = \frac{1}{2}\Re\{\boldsymbol{p}^* \cdot \partial_\xi \boldsymbol{E}\}, \qquad (1)$$

Ultrakrátké světelné pulzy

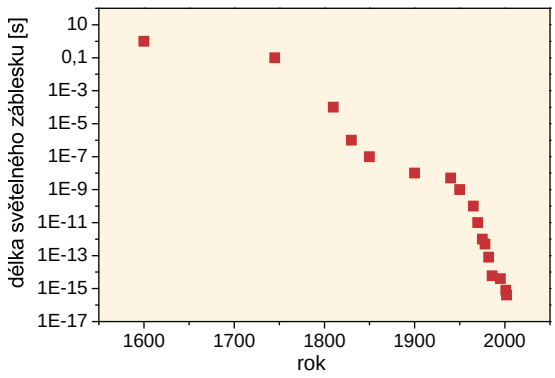
Petr Malý

Oddělení kvantové optiky a optoelektroniky, Katedra chemické fyziky a optiky, Matematicko-fyzikální fakulta UK, Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2; pmaly@karlov.mff.cuni.cz

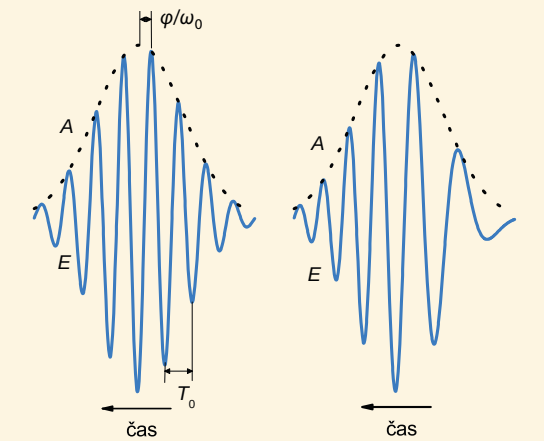
Ultrakrátké světelné pulzy, tedy pulzy pikosekundové nebo kratší časové délky, jsou velmi významné ve vědě i ve stále větším počtu aplikací. Uvádíme základní vlastnosti světelných pulzů, způsob jejich generace lasery se synchronizací módů a připomínáme některé oblasti jejich použití.

Ultrakrátkými světelnými pulzy se myslí záblesky viditelného elektromagnetického záření definované pikosekundové nebo kratší časové délky (délka pulzu) a tvaru [1]. Pokud pulzy obsahují i jiné než viditelné vlnové délky, mluví se spíše pulzech optických. Historie postupného zkracování generovaných světelných záblesků je znázorněna na obr. 1. Původně byly světelné pulzy získávány modulací intenzity světla kontinuálních nekoherentních zdrojů světla. Například když se Galileo Galilei pokoušel změřit (1607) rychlost šíření světla, umístil na dva kopce pozorovatele, kteří odkrývali střídavě lucerny na vzdálených kopcích.

Mechanické způsoby modulace intenzity světla se používaly s úspěchem k přesnějšímu měření rychlosti světla do konce 19. století. Zvládnutí elektřiny posunulo délku pulzů až k nanosekundovým (10^{-9} s) délkám. Světelné zdroje založené na jiskrovém výboji nebo elektrooptické modulaci světla se používaly do začátku šedesátých let 20. století. Při snaze o generaci stále kratších světelných pulzů modulací jejich intenzity není problémem jen zajištění opravdu rychlého spínání, ale také velké intenzity původního zdroje, která by vedla k dostatečné energii v pulzu. Po objevu laseru (1960) začal rozvoj pulzní laserové technologie, během něhož byly získávány postupně kratší a intenzivnější pulzy, které bylo možné ladit ve stále větším spektrálním intervalu a jejichž vlastnosti bylo možné stále lépe řídit. Kolem roku 1990 dosáhly délky světelných pulzů jednotek femtosekund (1fs = 10^{-15} s). V posledním desetiletí se podařilo dokonce generovat záblesky elektromagnetického záření s attosekundovým trváním (1 as = 10^{-18} s), ovšem v ultrafialové, resp. rentgenové, spektrální oblasti (např. pulzy délky 67 as v roce 2012



Obr. 1 Zkracování délek optických světelných pulzů.



Obr. 2 Časový průběh elektrického pole E a amplitudy obálky A světelného pulzu (nalevo: pulz frekvenčně nemodulovaný, napravo frekvenčně modulovaný $\Phi(t) \sim t^2$).

[2]). Zkracování časové délky pulzů a zlepšování jejich vlastností vede k postupnému rozšiřování jejich aplikačních možností. Výraznou roli hrají v základním výzkumu nejen v optice, resp. fyzice (podle relevantní časové škály se často v poslední době používají módní pojmy femtověda nebo attověda), ale stále více pronikají i do běžných praktických aplikací.

Uvedeme zde některé vlastnosti ultrakrátkých optických pulzů, způsoby jejich generace a připomeneme některé jejich aplikace.

Vlastnosti ultrakrátkých optických pulzů

„Klasický" světelný pulz si lze představit jako vlnu nosné frekvence ω_0 (střední frekvence spojená s periodou kmitu $T_0 = 2\pi/\omega_0$), která je modulována obálkou (obr. 2, časová škála obrázku je zvolena tak, že pulz „letí zleva doprava"). Elektrické pole pulzu je možné psát

$$E(t) = A(t)\cos(\omega_0 t + \varphi + \Phi(t)).$$

Zde $A(t)$ je časově závislá amplituda pole (například gaussovská funkce), $\Phi(t)$ vyjadřuje eventuální závislost fáze pulzu na čase a φ je fázový posun mezi maximem obálky a maximem oscilací pole.

Spektrální průběh pulzu dostaneme Fourierovou transformací časového průběhu. Světelné pulzy se obvykle charakterizují časovou délkou t_p, která se určuje jako plná šířka v polovině maxima intenzitního

Holografie a difraktivní optika, jak jsme je pěstovali v ÚRE ČSAV

Miroslav Miler

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8-Kobylisy; miler@ufe.cz

V r. 1971, když už se holografie i u nás v tuzemsku vymanila z dětských plenek, dostal její objevitel Dennis Gabor (tedy objevitel principu rekonstrukce, nebo spíše reprodukce vlnoplochy z r. 1948) Nobelovu cenu za fyziku. Tenkrát se výjimečně o tuto cenu nedělil s nikým, jak se stalo pravidlem zvláště v následných dobách, ačkoliv se později ukázalo, že bez vzniku laseru a práce dalších vynikajících vědců, jako byla dvojice Emmett Leith a Juris Upatnieks z USA a Jurij Děnisjuk z SSSR, by myšlenka zapadla. Tento časopis hodlal tehdy otisknout překlad Gaborovy nobelovské přednášky [1] a šéfredaktor se o tom zmínil autorovi tohoto článku při náhodném setkání, protože oba sídlili v jedné a téže budově tehdejšího Ústavu radiotechniky a elektroniky ČSAV. Šéfredaktor vyjádřil obdiv nad myšlenkou záznamu trojrozměrného předmětu na dvojrozměrném záznamovém prostředí s možností jeho vybavení jako trojrozměrného obrazu. Když to autor poněkud zlehčil tvrzením, že nejde o nic jiného než využití klasické interference světla při záznamu a klasické difrakce světla při reprodukci obrazu, byl viditelně rozčarován a na odchodu poznamenal, že přece není možné, aby taková klasika dostala Nobelovu cenu, a že tam musí být něco z pokročilejší fyziky.

Od té doby už uplynulo 44 let a holografie se rozvinula v široký obor, který zasahuje do řady vědeckých a technických oblastí, ačkoliv se zdá, že její uplatnění jaksi nesplnilo ta očekávání, která byla do ní vkládána, jak se to jeví těm, kdo u ní byli od samého jejího počátku. Neexistuje např. žádná aplikace v kinematografii, ačkoliv očekávání byla enormní. Holografická interferometrie a defektoskopie nejsou tak rozšířené, jak by jim snad příslušelo. V holografické mikroskopii jsou výsledky také omezené.

Prvních deset let po znovuvzkříšení holografie dvojicí Leith-Upatnieks v důsledku použití laseru, od r. 1964 asi do r. 1974 nebo o něco déle, bylo ve znamení vybudování základů moderní holografie [2]. Byla to překotná doba se stovkami nebo i více časopiseckých prací ročně. Nebylo jednoduché tento vývoj sledovat a zapojovat se do něj vlastními pracemi. Na našem pracovišti jsme se po zvládnutí rutinního získávání hologramů zaměřili na holografickou interferometrii zejména vibračních pohybů a snažili jsme se být nápomocni našemu elektrotechnickému průmyslu zejména v oblasti kmitání elektroakustických převáděčů [3]. Ne vždy se však naše snaha setkala s pochopením, protože jsme také odhalovali jejich nedostatky. Na obr. 1 je zobrazena poslední prosincová stránka kalendáře ČSAV z r. 1975 s naším motivem. Malý horní obrázek je trojexpozice jednak holografického uspořádání, dále rekonstrukce holografického interferogramu a konečně zviditelnění laserových svazků.



Obr. 1 Prosincová stránka kalendáře ČSAV z r. 1975 s motivem holografické interferometrie. Malý horní obrázek je trojexpozice jednak holografického uspořádání samého, dále rekonstrukce holografického interferogramu a konečně zviditelnění laserových svazků.

Pro nás v pravý čas se z Vývojových dílen ČSAV ozval někdy koncem sedmdesátých let požadavek na vývoj holografických difrakčních mřížek pro laboratorní přístroje, které tam vyvíjeli. Byly to především kapalinové chromatografy vyšších typů, které namísto optických filtrů pro vydělení potřebných vlnových délek světla měly používat k tomuto účelu difrakční mřížky. V tuzemsku existovaly snahy o výrobu rytých mřížek, např. u dr. Milana Křížka ve Fyzikálním ústavu ČSAV, ale ty neměly předpokládané výsledky. Na našem pracovišti jsme poměrně brzy zvládli sériovou výrobu holografických mřížek [4] pro spektroskopické účely a dodávali je Vývojovým dílnám v desítkových sériích. Později se přihlásila firma Laboratorní přístroje, s. p., a jí jsme začali dodávat mřížky již ve stovkových sériích. Šlo v podstatě o reflexní mřížky na rovinnných podložkách o velikosti strany 20–30 mm s 1 200 přímými čarami na milimetr, které měly tak hlubokou (spíše mělkou) modulaci, aby maximum difrakce bylo v ultrafialovém oboru kolem 250 nm. Samozřejmě jsme se zabývali i jinými typy spektroskopických mřížek, např. na nerovinných podložkách, s různými počty čar od 600 přes

Optická mikroskopie od van Leeuwenhoeka k Nobelově ceně za chemii v roce 2014

Jaromír Plášek

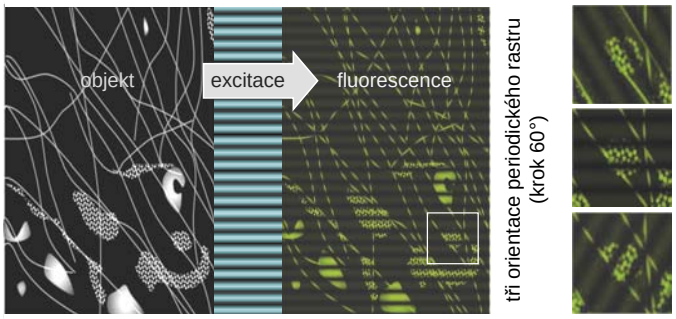
Matematicko-fyzikální fakulta UK, Ke Karlovu 3, 121 16 Praha; plasek@karlov.mff.cuni.cz

Díky optické mikroskopii mohla vzniknout buněčná biologie. Významnou roli hraje tato mikroskopie též v materiálovém výzkumu a dalších vědních oborech, jakož i v mnoha praktických činnostech. Od konce 19. století je zásluhou Lorda Rayleigha a Ernsta Abbeho známo, že rozlišovací schopnost standardních optických mikroskopů je rovna zhruba polovině vlnové délky použitého světla. V uplynulém čtvrtstoletí však vzniklo několik převratných metod, které zlepšily rozlišovací schopnost optických mikroskopů natolik, že místo o mikroskopii můžeme dnes již mluvit o nanoskopii.

Lidský zrak, zvětšující optické přístroje a difrakční hranice rozlišovací schopnosti mikroskopů

Až 80 % informací o okolním světě nám přináší světlo skrze obrazy vznikající na oční sítnici, ze které informace proudí dál přes zrakový nerv do mozku s rychlostí blížící se 10 Mb/s [1, 2]. Kvůli ohybu světla na kruhovém otvoru oční pupily a konečné velikosti fotocitlivých receptorů se však rozlišovací schopnost lidského oka za optimálních podmínek nanejvýše blíží jedné úhlové minutě, což přibližně odpovídá objektu o velikosti 70 μm vzdálenému od oka 250 mm. Menší objekty je proto možné pozorovat pouze pomocí zvětšujících optických přístrojů – jednoduché lupy nebo mikroskopu složeného z objektivu a okuláru.

Běžně používané lupy tvořené jednoduchou spojnou čočkou zvětšují 3× až 10×. Pokud bude lupou miniaturní skleněná kulička o průměru kolem 2 mm, může zvětšení dosáhnout až hodnoty 250. Takové kuličky se naučil brousit a skrz ně pozorovat nejrůznější objekty holandský samouk Antony van Leeuwenhoek, který o svých pozorováních publikoval ve druhé polovině 17. století celkem 122 sdělení v Philosophical Transactions of the Royal Society (viz *https://royalsociety.org/collections/*). Ve složeném mikroskopu, jehož princip vynalezli otec a syn Janssenové v holandském Middleburgu koncem 16. století, se navzájem násobí zvětšení obrazu vytvářeného objektivem se zvětšením okuláru, kterým jako lupou pozorujeme obraz vytvořený objektivem. Takto lze dosáhnout velkého zvětšení i komfortnějších podmínek pozorování mnohem snáze než s miniaturními skleněnými kuličkami. Avšak už Robert Hooke (1635–1703), další z pionýrů mikroskopie a autor proslulého díla Micrographia [3], si uvědomil, že použití více čoček vede kromě lepšího zvětšení také k nežádoucímu zvýraznění vad zobrazení – konkrétně vady sférické a zejména pak vady barevné, kvůli které nelze jednoznačně zobrazit kontury pozorovaných objektů. Jeho úchvatné kresby mikroskopických objektů nejsou proto věrnými reprodukcemi toho, co mohl ve svém nedokonalém mikroskopu skutečně spatřit. Jedná se o kreativní syntézu mnoha pozorování objektů při jejich různé orientaci a osvětlení, viz např. známý obraz blechy.



Obr. 1 Schematické znázornění způsobu osvětlení vzorků při metodě SIM.

Kvůli zmíněným vadám zobrazení se složený mikroskop stal všeobecně uznávaným a masivně používaným nástrojem vědeckého bádání až během 19. století, kdy se podařilo dostatečně úspěšně korigovat jak vadu barevnou, tak vadu sférickou. S rostoucí kvalitou korekcí se také postupně dařilo zlepšovat rozlišovací schopnost složených mikroskopů. Ještě před koncem 19. století však nezávisle na sobě ukázali Lord Rayleigh a Ernst Abbe, že maximální rozlišovací schopnost těchto přístrojů je omezena difrakčními jevy, které jsou důsledkem vlnové povahy světla. Bodový objekt se proto zobrazí jako trojrozměrný difrakční obrazec, kterému říkáme impulzová odezva (anglicky *point spread function*, PSF). Průřez PSF s rovinou zaostřeného obrazu má podobu Airyho disku obklopeného sadou koncentrických kroužků, jejichž jas progresivně klesá s pořadovým číslem vedlejšího maxima.

Lasery v měřicí technice – měření délek

Josef Lazar a kolektiv oddělení koherenční optiky

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., Královopolská 147, 612 64 Brno; joe@isibrno.cz

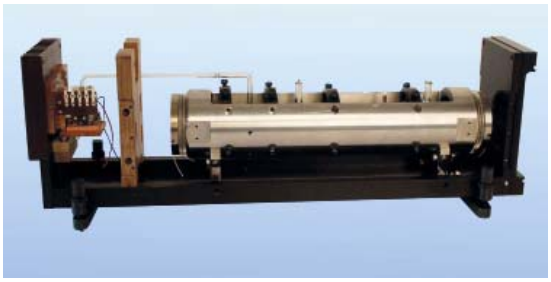
Úvod

Role světla v metrologii (nauce o měření, nezaměňovat s meteorologií, nauce o počasí) je dvojí – světlo jako měřený předmět a světlo jako nástroj měření. Zatímco měření světla je doménou radiometrie, v tomto příspěvku se budeme zabývat druhým případem, kdy světlo slouží k měření jiných veličin. Především jde o délku, ale v širším slova smyslu spadají do metrologie veškerá tzv. dimenzionální měření. Má se tím na mysli veškeré měření rozměrových veličin, nejen délky, ale též tvaru, rovinnosti, přímosti, úhlů a řada dalších, víceméně technických měření.

Světlo jakožto nástroj měření přišlo na řadu s opuštěním první definice metru, která byla odvozena z rozměrů zeměkoule a realizací metru (primárním normálem) byl artefakt – mechanický standard. Nová fyzikální definice je odvozena od základní fyzikální konstanty – rychlosti šíření světla ve vakuu – a do definice délky vstupuje čas; jedná se o délku, kterou urazí světlo za stanovenou dobu. Podle definice ale reálně přímo měřit nelze, její smysl lze vnímat v určení návaznosti. Rychlost světla je konstantou neztíženou nejistotou a jednotka času vstupující do definice určuje návaznost na definici času. Prvkem reálně použitelným k měření délky je ovšem vlnová délka světla. Za vakuových podmínek je vlnová délka světla přes rychlost šíření vázána na optický kmitočet – převrácenou hodnotu periody, tedy na čas. Vlnová délka je již uchopitelným etalonem, který jakožto elementární délka může sloužit ke skutečnému odměřování a který nahradil mechanický artefakt v podobě platinové tyče.

Primární metrologie délky

Každý metrologický systém představuje soubor normálů, měřidel a měřicích metod, kdy přesnější měřicí přístroje slouží ke kalibraci méně přesných. Na vrcholu pyramidy stojí základní, primární normál, který již není čím kalibrovat a jeho přesnost (lépe řečeno nejistotu) lze toliko odhadnout srovnáváním více primárních normálů mezi sebou. V případě délky jsou primární normály de facto normály optických frekvencí, jejichž realizací je vysoce stabilní laser. Porovnávání a kalibrace se dějí v kmitočtové doméně. Je to technicky jednodušší a vazba na vlnovou délku je z definice dána pevnou hodnotou rychlosti světla.



Obr. 1 Primární normál délky/optického kmitočtu, stabilizovaný He-Ne laser s referencí v podobě kyvety plněné jódem realizovaný v Ústavu přístrojové techniky AV ČR.

V éře před objevem laseru byly jakožto zdroje záření používány výbojové lampy s omezenou koherencí (sodíková, kryptonová). Skutečný převrat v oboru přišel, jak jinak, s laserem. Dominantní pozici brzy získal He-Ne laser nabízející viditelné světlo (633 nm), velmi dobrou koherenci, slušnou primární stabilitu a také jednofrekvenční provoz. Pro stabilitu optické frekvence je určující spektrální šířka profilu optického zisku a délka optického rezonátoru. Každý laser je ovšem technické zařízení zatížené řadou vlivů. Rezonátor je mechanická konstrukce podléhající deformacím a dilataci, což limituje frekvenční stabilitu. Ke slovu musí přijít regulační smyčka udržující optickou frekvenci laseru na hodnotě vázané na vhodnou referenci.

Zde musí přijít na řadu opět fyzika, jmenovitě spektroskopické metody a vhodné absorpční spektrální čáry, které lze laserem detekovat. Metody stabilizace, které už dnes můžeme s trochou nadsázky považovat za „tradiční“ nebo „klasické“, vycházejí z kombinace laser + vhodné absorpční médium, které má úzkou spektrální čáru v koincidenci s rozsahem přeladění laseru. Regulační smyčka pak udržuje (stabilizuje) laser na optickém kmitočtu příslušného přechodu.

Hledání přesnějšího, tedy stabilnějšího laseru bylo hledáním vhodných absorpčních prostředí pro existující lasery. Ve viditelné spektrální oblasti (červená až zelená) se nejlépe uplatnil plynný molekulární jód se svým bohatým spektrem úzkých čar, v infračervené pak alkalické kovy (cesium, rubidium) nebo organické sloučeniny (acetylen, metan) a řada dalších. Praktická realizace primárního normálu představuje tedy kombinaci absorbér a laser se stabilizací. Je zřejmé, že primární normál není jediný. Mezinárodní poradní komise pro délku stanovila seznam absorpčních médií a přechodů vhodných ke stabilizaci laserů s uvedením parametrů, které musí systém splňovat. Charakteristiky přechodu pak určují limit stability, jehož lze dosáhnout. He-Ne laser stabilizovaný prostřednictvím spektroskopie jódu a realizovaný na ÚPT je na obr. 1.

Spektroskopická elipsometrie

Josef Humlíček

Ústav fyziky kondenzovaných látek, Přírodovědecká fakulta a CEITEC MU; Masarykova univerzita, Kotlářská 2, Brno; humlicek@physics.muni.cz

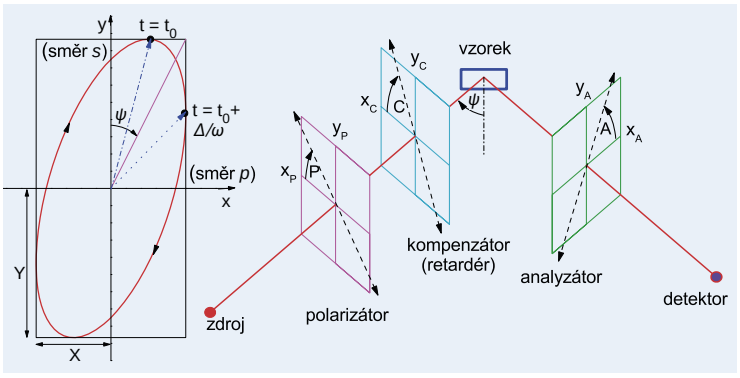
Předkládáme stručnou informaci o využití polarizačních vlastností světla ve spektroskopické elipsometrii. Ukazujeme příklady aparatur a diskutujeme ilustrativní spektra. Vybíráme několik ukázek aplikací a současných trendů.

Úvodem

Polarizace je fundamentální vlastnost světla spojená se směrovým působením na nabité částice (elektrony a atomová jádra). Objev E.-L. Maluse z roku 1808 předchází Maxwellově teorii elektromagnetismu a vybudování základních představ o mikroskopické stavbě hmoty. Podrobný rozbor, s různými důrazy, najdeme v mnoha učebnicích a monografiích, např. [1, 2]. Vlastnosti polarizovaného světla jsou nejlépe vystiženy v rámci kvantové fyziky, polarizace fotonů bývá používána jako prominentní ilustrace superpozice stavů [3]. Superpozice dvojice ortogonálních stavů vede k „polarizační elipse“. Od ní je odvozeno jméno experimentální techniky, jíž bylo a je věnováno značné úsilí, viz např. [4] a [5]. V tomto článku připomínáme základní pojmy a ukazujeme příklady elipsometrických aparatur. Dále stručně diskutujeme spektra pro legovaný GaAs, jako příklad výsledků, které je možné očekávat v jednoduché situaci. Nakonec předkládáme několik informací o současných aplikacích a trendech.

Eliptická polarizace a elipsometrická měření

Superpozici dvou ortogonálních polarizačních stavů můžeme znázornit elipsou, v klasickém pohledu jsou na ní koncové body intenzity elektrického pole světelné vlny. Protože velikost intenzity je nepodstatná, charakterizují elipsu dva reálné parametry; standardem v elipsometrii je používání dvojice úhlů, ψ a Δ, podle obr. 1. Jejich význam je následující: tanψ je relativní velikost složky pole podél x vůči složce podél y, Δ je fázový posun mezi nimi. V obr. 1 jsou vyznačeny body maxima intenzity podél y (čas t_0) a podél x (s posunem



Obr. 1 Polarizační elipsa (vlevo) a schéma elipsometru PCSA (vpravo).

v čase o Δ/ω, ω je kruhová frekvence světelné vlny). Důležitý je i smysl oběhu po elipse, odlišující pravo- a levotočivou polarizaci.

Směrové působení světelné vlny na náboje v kondenzované hmotě vystihují materiálové vztahy mezi intenzitou elektrického pole $\vec{E}$ a indukovanou proudovou hustotou $\vec{j}$ nebo indukcí $\vec{D}$:

$$\vec{j} = \sigma\vec{E}, \quad \vec{D} = \varepsilon\vec{E}.$$

Vodivost σ a permitivita ε jsou obecně komplexní tenzory, protože indukovaný pohyb nábojů nemusí být ve fázi s dopadající světelnou vlnou a nemusí mít směr její elektrické intenzity. V pravé části obr. 1 je typické uspořádání elipsometrického měření; na vzorek dopadá světlo s polarizačním stavem daným nastavením (lineárního) polarizátoru P a kompenzátoru C (za ním má vlna eliptickou polarizaci). Odraz na vzorku S polarizaci změní a (lineární) polarizátor A ji „analyzuje“.



Obr. 2 Elipsometr prof. A. Vašíčka ve vitríně na ÚFKL (vlevo), spektroskopický elipsometr V-VASE v laboratořích CEITEC (vpravo).

Ramanova spektroskopie

Od nesmělých počátků až po odvážné kosmické zítřky

Vladimír Kopecký Jr., Josef Štěpánek

Fyzikální ústav Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze, Ke Karlovu 5, 121 16 Praha 2; kopecky@karlov.mff.cuni.cz

Ramanova spektroskopie pracuje s neelasticky rozptýleným světlem, které odráží vibrační stavy molekul. Její historie je svázaná s technickým rozvojem zdrojů intenzivního monochromatického světla i detekce slabého světelného záření. Ve svém vývoji prošla od chemické analýzy přes geologické vědy a materiálový výzkum až po biofyziku, biologii a medicínskou praxi a již míří k výzkumu vesmíru.

Historie objevu

Příběh začíná v září 1921 na lodi, na níž se vrací do Bombaje z první zahraniční cesty do Evropy mladý indický fyzik Chandrasekhara Venkata Raman (1888–1970). Během plavby je fascinován opojnou modří Středozemního moře, a protože má s sebou čistě náhodou, a aby se nenudil, malý dalekohled a sadu polarizátorů, věnuje se studiu spojenému s otázkou, „proč je moře modré“. Zatímco lord Rayleigh (1842–1919) vysvětlil „proč je nebe modré“ teorií rozptylu slunečního světla na molekulách v horních vrstvách atmosféry – jeho vysvětlení modře oceánů Ramana neuspokojuje. Nemůže být pouhým odrazem nebeské modře, jak soudí Rayleigh, ale musí jít o rozptyl světla na molekulách vody [1, 2]. Od té chvíle je Raman pohlcen problematikou rozptylu světla v kapalinách a pevných látkách. Od roku 1923 uvažuje o optické analogii Comptonova jevu, tedy o novém typu neelastického rozptylu světla podmíněného kvantovou teorií [3].



Obr. 1 Chandrasekhara Venkata Raman (1888–1970) během své návštěvy v Praze v roce 1958.

Mezitím rakouský teoretický fyzik Adolf Smekal (1895–1959) publikuje práci, v níž ukazuje, že rozptýlené monochromatické světlo bude tvořeno nejen elasticky rozptýlenou složkou o původní vlnové délce, ale i neelasticky rozptýlenou složkou, jejíž frekvence budou rozložené symetricky kolem frekvence elasticky rozptýleného světla [4]. Teorii vzápětí rozpracovali Heindrik Kramers (1894–1952) a Werner Heisenberg (1901–1976) [5, 6]. (Budiž poznamenáno, že detailní teorie neelastického rozptylu byla počátkem 30. let vypracována českým fyzikem, brněnským rodákem Georgem Placzekem (1905–1955) [7].) Žádná z těchto teoretických předpovědí však neměla přímý vliv na skutečný objev Ramanova jevu.

V Kalkatě zatím usilovně pracuje C. V. Raman (obr. 1) se svým studentem K. S. Krishnanem (1898–1961) a hledají analogii Comptonova jevu. Pro výzkum neelastického rozptylu v kapalinách sestavili aparaturu, kde sluneční světlo z heliostatu bylo fokusováno sedmipalcovým objektivem dalekohledu a krátkoohniskovou čočkou přes modrofialový filtr do baňky s kapalinou. Do dráhy rozptýleného světla byl umístěn druhý, zelený filtr. Očima sledovali ve více než 60 druzích kapalin cosi jako slabou fluorescenci (obr. 2); jev byl však příliš slabý na to, aby bylo možné zaznamenat jeho spektrum. To, že nejde o fluorescenci, si uvědomili po sérii polarizačních pokusů 7. února 1928 (fluorescence neposkytuje tak polarizované záření, jaké bylo pozorováno). Objev nejprve publikovali 16. února 1928 jako krátké jednostránkové sdělení v časopise *Nature* (bez fotografií spekter či jakýchkoli podrobností) [8]. Teprve 28. února poprvé zaznamenali spektrum „nového typu záření“, přičemž tyto výsledky s fotografiemi spekter publikovali 31. března 1928 v *Indian Journal of Physics* [9].

Fotovoltaické využití energie světla ze Slunce

Antonín Fejfar, Martin Ledinský

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Cukrovarnická 10, 162 00 Praha 6; fejfar@fzu.cz

Sluneční světlo je zdrojem energie pro velkou většinu dějů na povrchu Země, včetně téměř všech forem života – s částečnou výjimkou lidské civilizace. Rozmach civilizace v posledních stoletích je umožněn využitím fosilních paliv, tedy sluneční energie v palivech uskladněné. Lidé spotřebovávají v průměru energetický výkon okolo 18 TW[1] , tedy jen malý zlomek z asi 174 000 TW výkonu záření Slunce dopadajícího na Zemi.

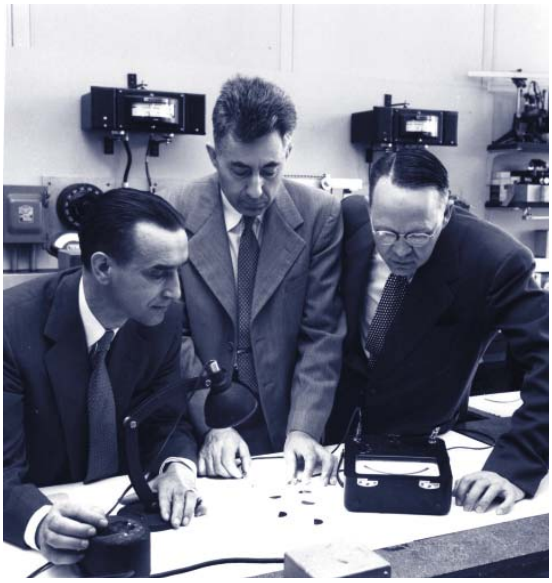
Pro srovnání – fotosyntetická aktivita na Zemi odpovídá střednímu výkonu asi 130 TW [1], tedy jen několikrát více než spotřebovává lidská civilizace. Je třeba dodat, že lidé z fotosyntézy probíhající na Zemi využívají pro své účely asi jednu čtvrtinu [2], tedy o mnoho více než výkon všech dosud nainstalovaných slunečních elektráren, který dosáhl v roce 2014 cca 200 GW_p (jednotka W_p, anglicky *watt peak*, označuje maximální výkon fotovoltaického článku nebo systému při plném osvětlení a v optimálních podmínkách).

Je také zajímavé, že soudobé fotovoltaické články dosahují podstatně vyšší účinnosti přeměny energie než fotosyntéza [3]. Ve výzkumu, který vedl k současným vysoce účinným slunečním článkům, lze vysledovat příběh, který obsahuje překvapivé inspirace i dramatické zvraty, a stojí za to ho vyprávět.

Využití energie slunečního svitu je předmětem úvah od pradávných dob: tradují se příběhy o Archimedovi a obraně Syrákús parabolickými zrcadly, uvažoval o něm Leonardo da Vinci a uskutečnilo se ve strojích Augustina Mouchota [4] – to vše ale směřovalo k využití termální energie. Objev fotovoltaické přeměny se datuje do roku 1839, kdy ve svých 19 letech Alexandre Edmond Becquerel v laboratoři svého otce pozoroval elektrické děje v elektrolytickém článku vyvolané dopadajícím světlem [5]. Jev brzy našel i praktické uplatnění v expozimetrech pro fotografii, ale účinnost přeměny energie tehdejších článků založených na amorfním selenu nebo oxidu měďném byla příliš malá pro praktické použití. Ještě v roce 1931, kdy Thomas Alva Edison v rozhovoru s Henrym Fordem prohlásil, že by investoval do sluneční energetiky, účinnost nepřekročila 1 %.

Přelomový moment přišel v roce 1953 v Bellových laboratořích, tedy výzkumném středisku Bellovy telefonní společnosti [6]. Telefonní linky potřebují zdroje energie pro opakovací zesilovače a používané baterie byly nespolehlivé. Společnost proto pověřila Daryla Chapina, aby prověřil jiné možné energetické zdroje (zadání zmiňovalo větrníky, termoelektrické zdroje i parní generátory). Chapin navrhl použití fotovoltaických článků, ale existující selenové články poskytly max. 5 W ze čtverečního metru. Bellovy laboratoře byly však také místem, kde vznikly první polovodičové součástky (včetně tranzistoru v roce 1947). Chapinovi přátelé Gerald Pearson a Calvin Fuller pracovali na metodách dopování křemíku a dokázali připravit plošný pn přechod v křemíkových destičkách. Cílem bylo dosáhnout 6% účinnosti a to se skutečně podařilo použitím křemíkových destiček dopovaných arsenem a s povrchovou vrstvou dopovanou fosforem (viz obr. 1). Připravený článek měl plochu přibližně jako klasická žiletka, poskytoval napětí přes 0,5 V a výkon ~60 W/m^2 [7, 8].

Objev byl ohlášen na tiskové konferenci 25. dubna 1954. Tisk označil objev za „počátek nové éry využití neomezené energie Slunce“ (Times) a spekuloval, že „jednoho dne mohou sluneční články vyrobit více energie než zdroje založené na uhlí, ropě či jádru“ (New York Times). Každý z trojice autorů pak dostal



Obr. 1 Trojice objevitelů prvního křemíkového slunečního článku. Zleva Gerald Pearson, Daryl Chapin a Calvin Fuller. *Převzato z http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33947.pdf [10].*

1 Mezinárodní energetická agentura (IEA) uvádí energetickou spotřebu lidstva 155 505 TWh za rok 2012.

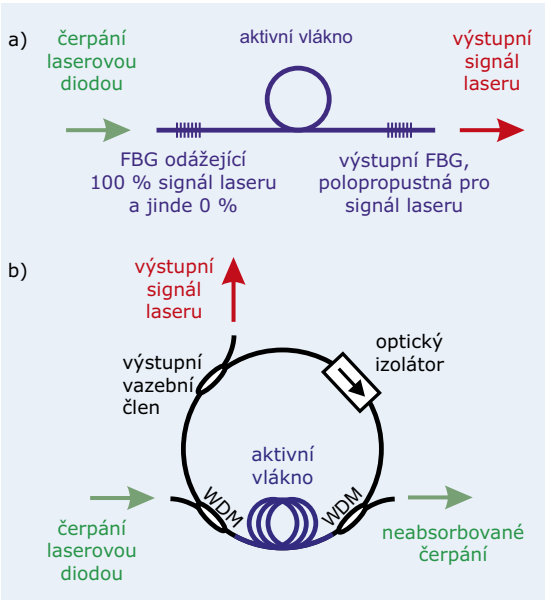
Vláknové lasery: nový nástroj pro průmysl a medicínu

Pavel Peterka, Pavel Honzátko a Ivan Kašík

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8; peterka@ufe.cz

Optická vlákna nemusejí sloužit jen pro přenos informace. Pokud do tenkého jádra ve středu vlákna umístíme chemické prvky schopné laserové akce (stimulované emise záření), můžeme generovat velmi intenzivní a přitom kvalitní svazek záření. Vláknové lasery začínají nahrazovat starší typy laserů a otevírají zcela nové obzory v řadě oborů: od lékařství, řezání a sváření v průmyslu až po obranné systémy.

Vláknové lasery patří mezi nejmladší a nejrychleji se rozvíjející odvětví laserů. Jejich rychlý rozvoj začal až po roce 2000. Navazoval na znalosti získané při výzkumu a aplikacích erbiových vláknových zesilovačů v telekomunikacích. První vláknový laser byl ovšem navržen již v roce 1960 [1], tedy v době, kdy Theodore Maiman rozzářil koherentním světlem krystal rubínu a sestavil tak první laser. Tehdy Elias Snitzer navrhl a záhy realizoval laser, ve kterém jako aktivní, zesilující prostředí použil skleněné vlákno s jádrem dopovaným neodymem. Tento vláknový laser generoval záření na vlnové délce 1,06 μm a byl čerpaný výbojkou, kolem které bylo vlákno obtočené ve spirále. Zatímco odvětví pevnolátkových laserů zaznamenávalo rychlý pokrok od dnů jejich objevu, po prvních pracích Eliase Snitzera upadly vláknové lasery v zapomnění a jsou považovány spíše za laboratorní kuriozitu. Optickým vláknům samotným však začal bouřlivý rozvoj jako bezkonkurenčnímu přenosovému médiu pro telekomunikace. Robert Maurer ze skláren Corning v USA si již v 50. letech všiml, že vysoký útlum křemenného skla způsobují především příměsi a samotné křemenné sklo může mít velmi nízký útlum. Tým francouzské společnosti CSF (*Compagnie générale de télégraphie Sans Fil*) pod vedením Ericha Spitze, původem z Brna, zase vyrobil první skutečně jednomódové optické vlákno. V laboratořích CSF si dobře uvědomovali, že nejnižší známý útlum mají křemenná skla, avšak neměli pec schopnou zahřát preformu na vysokou teplotu zpracování, kolem 2 000 °C, aby z ní mohli táhnout vlákno z křemenné preformy. Proto první jednomódové vlákno vyrobili z multikomponentního skla s nižší teplotou tání, které však mělo vysoký útlum. Zkušenosti a poznatky Roberta Maurera a Ericha Spitze pomohly Charlesi Kaovi v jeho výzkumu optických vláken, za který získal v roce 2009 Nobelovu cenu za fyziku. První nízkoztrátové optické vlákno se pak podařilo připravit týmu Roberta Maurera v roce 1970 [2, 3].



Obr. 1 Typická uspořádání vláknového laseru. a) Fabryův-Perotův (lineární) rezonátor, b) kruhový rezonátor.

Vláknový zesilovač – klíč ke globálnímu internetu

Optická vlákna vhodná pro lasery byla znovuobjevena až v polovině osmdesátých let, kdy týmy kolem Davida N. Payna z univerzity v Southamptonu v Anglii a Francouze Emmanuela Desurvira v Bellových laboratořích v New Jersey nezávisle na sobě ukázaly, že ionty prvku vzácné zeminy erbia mohou ve vláknech vyvolat zisk na vlnové délce kolem 1 550 nm, která je využívána v komunikačních systémech. Erbiem dopovaný vláknový zesilovač (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*) umožnil výstavbu dálkových vysokokapacitních datových spojů a způsobil revoluční změny v telekomunikacích. Byl to právě vláknový zesilovač, který v polovině 90. let minulého století přispěl ke skutečně globálnímu rozvoji internetu.

Současně s výzkumem EDFA se prováděl i výzkum vláknových laserů, jejichž rozmach se ještě urychlil po splasknutí tzv. telekomunikační bubliny v roce 2001, kdy řada výrobců hledala intenzivně nové aplikace optických vláken mimo telekomunikace. Je vskutku obdivuhodné, jak jsou vláknové lasery univerzální. Některé

Vývoj pulzních vysokovýkonných laserů v centru HiLASE

Ondřej Novák, Martin Smrž, Michal Chyla, Siva S. Nagisetty, Hana Turčičová, Jiří Mužík, Patricie Severová, Pawel Sikocinski, Jakub Měsíček, Jaroslav Huynh, Tomáš Hambálek, Jens Linnemann, Alina Pranovich, Taisuke Miura, Akira Endo, Martin Divoký, Ondřej Slezák, Magdalena Sawicka-Chyla, Venkatesan Jambunathan, Petr Navrátil, Lucie Horáčková, David Vojna, Jan Pilař, Stefano Bonora, Antonio Lucianetti, Tomáš Mocek

Centrum HiLASE, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Za Radnicí 828, 252 41 Dolní Břežany; ondrej.novak@hilase.cz

V polovině roku 2014 začalo fungovat laserové centrum HiLASE v nové budově v Dolních Břežanech nedaleko Prahy (obr. 1). V centru jsou vyvíjeny vysokovýkonné lasery, které budou použity pro pokročilé aplikace. Čtyřletý výzkum již přinesl řadu původních výsledků a první lasery jsou již v provozu [1, 2]. V článku uvádíme přehled používaných laserových technologií, vyvíjených laserových systémů a nových diagnostických metod.

Aplikace pulzních výkonných laserů

Výkonné lasery jsou dnes běžně používány v průmyslu, např. na řezání a svařování materiálů. Pro tyto aplikace se téměř výhradně používají lasery s kontinuálním výstupním zářením. Pro přesné opracování materiálů jsou však mnohem výhodnější lasery s velmi krátkými pulzy délek v rozsahu pikosekund (10^{-12} s) nebo dokonce femtosekund (10^{-15} s). K opracování tak dochází bez tavení materiálu, které způsobuje méně přesné opracování. Velmi krátké pulzy také umožňují opracování materiálů, které jsou jinak laserovým zářením opracovatelné jen obtížně. Příkladem mohou být kompozity z uhlíkových vláken, u nichž lze očekávat široké využití, např. v leteckém průmyslu. Lasery vyvíjené v centru HiLASE budou využívány především v nových oblastech cíleného výzkumu a vývoje. Vytvrzování materiálu rázovou vlnou, která vznikne v materiálu po dopadu laserového pulzu na jeho povrchovou vrstvu, jež je prudce odpařena, zvýší odolnost namáhaných materiálů, jako jsou např. součásti turbín. Pikosekundové pulzy umožňují efektivně generovat extrémní ultrafialové záření (vlnové délky přibližně 10–100 nm). Toto záření nalezne využití v nové generaci (tzv. EUV) litografie pro výrobu polovodičových součástek s vyšší integrací nebo v mikroskopii s větším rozlišením, než umožňuje optická mikroskopie. V neposlední řadě bude umožněn další vývoj laserových technologií. Energetické pulzy umožní studovat práh poškození optických prvků. Zvýšení prahu poškození je nutné pro další vývoj spolehlivých vysokovýkonných pulzních i kontinuálních laserů. Vyvíjené lasery mohou též sloužit k čerpání femtosekundových laserů, jejichž pulzy dosahují obrovských špičkových výkonů v řádech terawattů (10^{12} W) až petawattů (10^{15} W). Využití těchto laserů pro aplikace bude vyžadovat zvýšení průměrného výkonu, a tedy i opakovací frekvence pulzů. Proto je vývoj vysokovýkonných pulzních laserů vysoce žádoucí.



Obr. 1 Nová budova laserového centra HiLASE.

Diodově čerpané pevnolátkové lasery

Lasery jsou založeny na stimulované emisi záření v aktivním prostředí, kdy dopadající záření vynutí přechod z vyšší na nižší energetickou hladinu aktiv-

Role a využití plazmatu při laserovém svařování

Libor Mrňa, Martin Šarbort

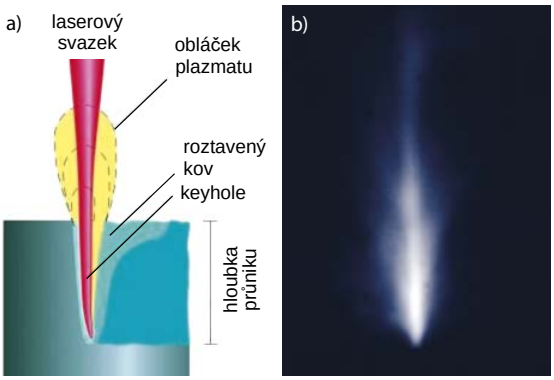
Ústav přístrojové techniky AV ČR, Královopolská 147, 612 64 Brno; mrna@fme.vutbr.cz

Článek se zabývá principy laserového penetračního svařování a souvisejícími kmity svarové lázně obklopující dutinu, tzv. keyhole, absorbující dopadající laserový svazek. Svařování doprovází vznik plazmatu uvnitř keyhole, které expanduje v podobě obláčku nad materiál. Záření obláčku má impulzní charakter s časově náhodným průběhem. Jsou uvedeny možné metody analýzy záření plazmatu pomocí Fourierovy transformace a nově pomocí autokorelační funkce. V článku je popsán nový mechanismus generace plazmatu vysvětlující jeho impulzní charakter. Na absorpci záření v plazmatu lze pohlížet jako na systém s pozitivní zpětnou vazbou, koeficient absorpce totiž pozitivně závisí na teplotě. V prostředí Matlab/Simulink byl sestaven jednoduchý model s pozitivní zpětnou vazbou, který pomocí variace vstupních parametrů umožňuje studovat impulzní chování laserem indukovaného plazmatu. Vzhledem k lavinovitému nárůstu teploty elektronů v plazmatu byl navržen název jevu: plazmový burst. Vzhledem k citlivosti časování procesu na počáteční teplotu lze tímto mechanismem vysvětlit náhodný charakter a impulzní chování záření, ale také souvislost s kmity keyhole.

Úvod

Technologie laserového svařování se v průmyslu používá již řadu let. Teprve v poslední době, díky technologickému pokroku, se začínají široce využívat pevnolátkové lasery s pracovní vlnovou délkou okolo 1 μm. Díky své robustnosti, vysoké účinnosti (dnes kolem 50 %), možnosti přívodu výkonového svazku optickým vláknem a snižující se ceně došlo k širšímu uplatnění této technologie v technické praxi. Stále důležitější roli hraje při laserovém svařování související diagnostika a řízení procesu, vzhledem k tomu, že laserové svařování je prakticky plně strojní – hlava je vedena pomocí CNC řízení. S tím souvisí požadavek na lepší pochopení všech fyzikálních procesů tvořících dohromady laserový svařovací proces.

Při svařování se nejčastěji využívá tzv. penetrační režim, jehož podstata je následující: díky vysoké hustotě dopadajícího fokusovaného laserového svazku dosahuje v místě dopadu hustota výkonu až 10^{12} W·m^{-2}. Materiál začne sublimovat a vytvoří se štíhlá hluboká dutina, nazývaná keyhole. Po dosažení stavu tepelné rovnováhy plocha keyhole již dokáže absorbovat dopadající záření (formou vícenásobných odrazů) a její povrch má teplotu varu daného materiálu (obr. 1a). Z toho plyne, že stěny keyhole jsou tvořeny kapalným kovem a její stabilita je podmíněna i tlakovou rovnováhou, kde (při určité míře zjednodušení zanedbávajíce další síly) proti sobě působí povrchové napětí kapalného kovu a tlak par odpařujícího se materiálu. Obecná rovnováha této soustavy závisí nejen na procesních parametrech (výkonu laseru, posuvné rychlosti, parametrech zaostření), ale i na fyzikálních vlastnostech svařovaného materiálu (úhlové a teplotní závislosti absorpce, tepelné vodivosti a dalších). V řadě prací byla teoreticky studována dynamika tohoto kapalného obalu keyhole [1]. Ze studií vyplynulo, že kapalný obal může kmitat na řadě kmitových módů, přičemž frekvence oscilací by měla být v řádu stovek Hz a měla by záviset i na množství kmitajícího kapalného kovu. Dále bylo předpovězeno, že většina kmitových módů by měla vykazovat silný útlum vlivem viskozity tekutého kovu [2]. Důkladná znalost kmitů svarové lázně okolo keyhole je důležitá kvůli stabilitě svařovacího procesu a vznikajícím svarovým vadám. Je zřejmé, že frekvence kmitů závisí na geometrii keyhole a velikosti svarové lázně. Se vzrůstající hloubkou průvaru kmitová frekvence klesá. Toho by se dalo například využít pro měření hloubky průvaru. V experimentech však tyto kmitové módy byly zjištěny ne zcela průkazně pomocí Fourie-



Obr. 1 a) Penetrační režim při svařování laserem; b) reálný vzhled obláčku plazmatu nad keyhole.

Medzinárodný rok svetla v Medzinárodnom laserovom centre v Bratislave

Alžbeta Marček Chorvátová, František Uherek

Medzinárodné Laserové Centrum, Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava; alzbeta.chorvatova@ilc.sk, uherek@ilc.sk

Rok 2015 bol organizáciou UNESCO vyhlásený za Medzinárodný rok svetla a svetelných technológií v snahe zvýšiť globálne povedomie o tom, ako svetlo a technológie na báze svetla (**fotonika**) podporujú udržateľný rozvoj a poskytujú riešenia globálnych problémov v oblasti energetiky, školstva, poľnohospodárstva, umenia a zdravotníctva. Medzinárodný rok svetla bol slávnostne zahájený v dňoch 19.–20. februára 2015 v sídle UNESCO v Paríži a na Slovensku otvoril nové možnosti informovať širokú verejnosť o laseroch a fotonike – vedecko-technickom odbore zaoberajúcom sa vlastnosťami a možnosťami využitia fotónov (častíc svetla). Slovo fotonika sa objavuje okolo roku 1960, kedy bol Theodorom Maimanom skonštruovaný prvý laser. Dnes fotonika podporuje technológie každodenného života od smartfónov, cez televízory a notebooky, optický internet, laserové technológie, lekárske aplikácie, až k osvetľovacej technike. Dnes už vieme, že 21. storočie bude závisieť na fotonike tak, ako 20. storočie záviselo na elektronike.

Medzinárodné laserové centrum (MLC) v Bratislave sa zapája do viacerých projektov, ktoré sa týkajú využitia a propagácie svetla, ako aj technológií založených na svetle a ich aplikáciách. Možno napr. spomenúť účasť MLC v európskych projektoch **SMASH, GoPhoton!, Photonics4All, Light2015** a **Laserlab Europe III**, ktorá je pre Slovensko významnou príležitosťou pre prezentáciu možností a potenciálu fotoniky a technológií na báze svetla, ako aj pre rozvoj infraštruktúry pre lasery a optické technológie, s ktorou sa slovenskí vedci môžu rovnocenne podieľať na špičkovom európskom výskume a zapájať sa do riešenia aktuálnych výziev vo vede, technike a priemysle 21. storočia.



Detská univerzita sv. Cyrila a Metoda v Trnave.

Počas roku svetla prebiehajú viaceré akcie pre mladých študentov. Už v roku 2014, v rámci **Vedeckej cukrárne** organizovanej Centrom vedecko-technických informácií SR (CVTI SR) boli zahájené série prednášok pre školy: Fotonika – svet svetla. Od začiatku roku 2015, v rámci **Bratislavskej superškoly, Detskej Univerzity v Trnave, ako aj Festivalu fyzikálnych filmov**, pokračovali na slovenských základných školách viaceré akcie, ktorých cieľom bolo zvýšiť povedomie žiakov a učiteľov o fotonike. Súčasne mali mnohé školy po celom Slovensku možnosť vyskúšať si ***Photonics Toolkits*** **(GoPhoton!)**, ktorý prezentuje rôzne vlastnosti svetla a technológií založených na svetle.

Aktivity v rámci Medzinárodného roku svetla umožnili tiež zvýšiť v EU povedomie o Slovensku, keď vďaka podpore projektu EU **Laserlab Europe III** Univerzita sv. Cyrila a Metoda v Trnave, v spolupráci s MLC, hostila 2.–4. septembra „**Workshop on Light-based technologies**“ pre doktorandov a vedeckých pracovníkov z celej Európy. Na tomto workshope, venovanom technológiám založeným na svetle a ich aplikáciám v organickej a anorganickej chémii, materiálových a senzorických vedách, biomedicíne a pod., sa zúčastnilo 60 poslucháčov, z toho 32 študentov z celého Slovenska, ale tiež z Maďarska, Litvy, Nemecka, Talianska, Holandska, Portugalska a Rumunska, ako aj viacero zahraničných prednášateľov.

Rok svetla 2015 vyvrcholil na Slovensku v októbri dvoma týždňami fotoniky, organizovanými MLC s podporou aliancie „**European Centers for Outreach in Photonics**“ **(ECOP)** v rámci akcie Photonics Splash. Rad akcií v rámci **Photonics Splash Bratislava** otvorilo 10. októbra inauguračné podujatie počas Bielej noci a Festivalu svetla, pokračovalo Študentským kongresom fotoniky 14.–15. októbra, dňom otvorených dverí MLC 19. októbra a vyvrcholilo Medzinárodným dňom fotoniky 21. októbra. Aktivity Photonics Splash prebiehať pod záštitou ministra školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky s podporou grantov EÚ GoPhoton!, Photonics4All a Light2015.

Biela noc v Bratislave predstavila v sobotu 10. októbra diela domácich aj zahraničných umelcov a do programu zapojila širokú kultúrnu komunitu hlavného mesta. Kolektív MLC predstavil počas Bielej noci inštalácie „**Resonator**“ – interaktívnu laserovú harfu a „**Tower of**



Prof. Ing. Dušan Pudiš, Ph.D. na *Workshope on Light-based technologies* v Trnave.