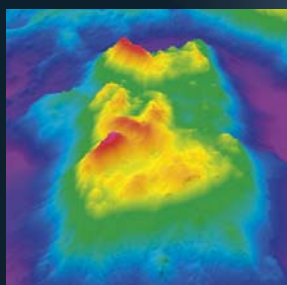


ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS PRO FYZIKU



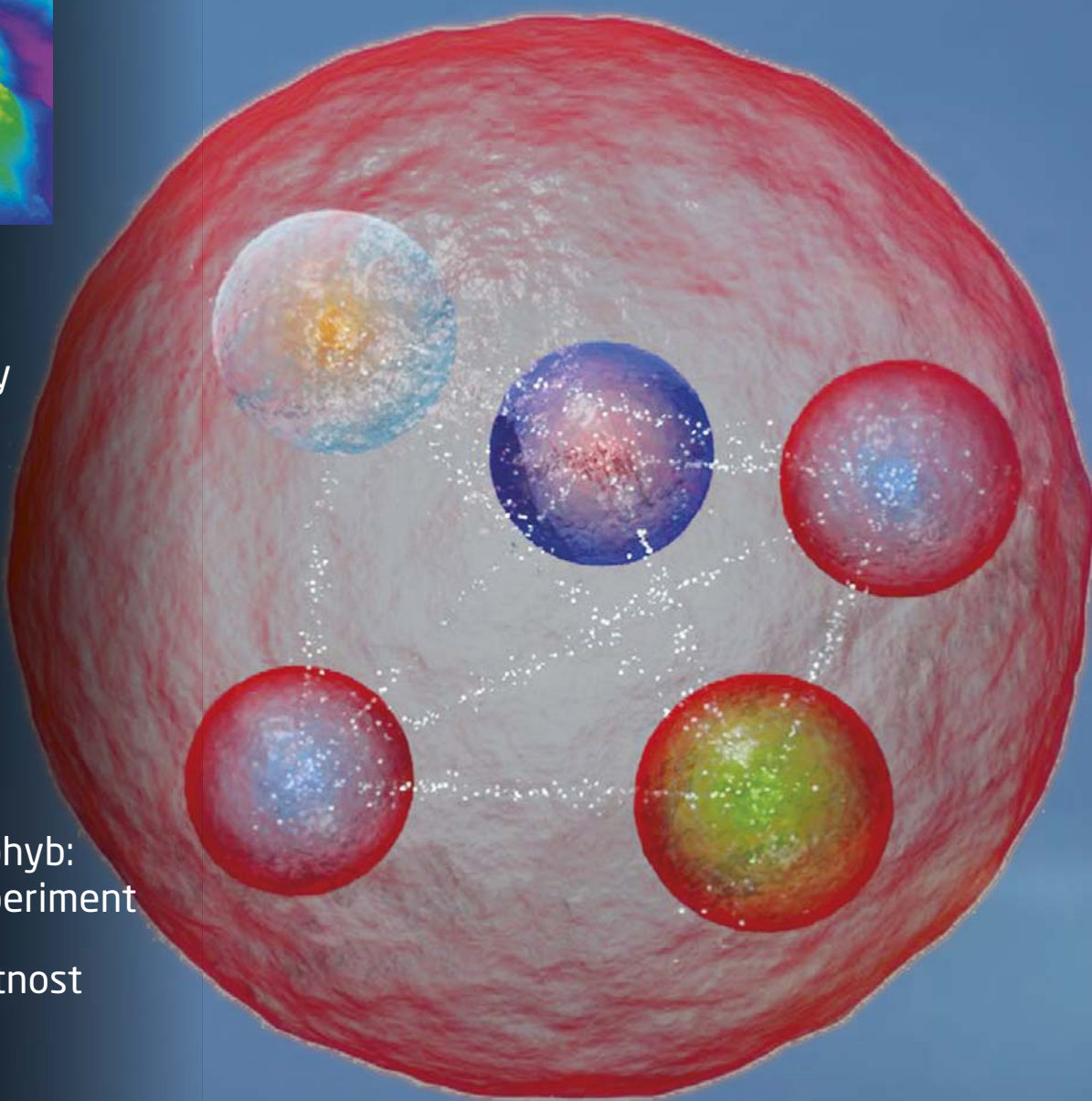
Pentakvarky
nalezeny?

Životnost
palivových
článků

Jak byl
objeven
Neptun

Brownův pohyb:
teorie a experiment

Jaká je hmotnost
fotonu?



ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS PRO FYZIKU

4/2015

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

Founded in 1872 as „Časopis pro pěstování
matematiky a fyziky“ “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 redaktori – 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 jednoho výtisku je 85 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,

číslo otevírá aktualita o pentakvarcích. Jiří Chýla se v ní snaží najít odpověď na otázku, jak skutečně významný je jejich objev, který byl v červenci tohoto roku široce medializován. Ve zkratce podává Vladimír Scholtz základy hudební akustiky. V některém z příštích čísel časopisu bude tato problematika rozšířena o příspěvek věnovaný fyzice hudebních nástrojů.

V prvním referativním článku diskutují Martin Tomáš a Pavel Novotný faktory omezující životnost vodíkových palivových článků. Pochopení mechanismů jejich degradace je klíčové například pro prodloužení životnosti jednotek určených k napájení elektromobilů. Vědecké podchycení procesů zodpovědných za stárnutí součástí technických zařízení je jedním z nejnaléhavějších úkolů fyzikálního a materiálového výzkumu motivovaného průmyslovými aplikacemi.

V příštím roce uplyne 170 let od jednoho z nejvýznamnějších činů lidského intelektu v historii nebeské mechaniky – objevu planety Neptun. Ten se udál za neobvyklých a částečně i dramatických okolností na několika místech Evropy. Proběhl zásluhou úspěšného propojení matematicky obtížných a časově náročných výpočtů ve Francii, Anglii a krátkého pozorování v Německu. Referát Vladimíra Štefľa řeší otázku, jak vlastně k objevu došlo. Šlo o náhodný nálezy, nebo by logika astronomického výzkumu vedla zákonitě ke zjištění nové planety?

V dalším referátu Aleš Lacina rekapituluje fyzikálněhistorické souvislosti a připomíná teoretické rozborů různých aspektů Brownova pohybu provedené Albertem Einsteinem (1879–1955) a Jeanem Perrinem (1870–1942). Ty po důvtipném a velice pracném Perrinově experimentálním ověření vedly dvěma odlišnými cestami k nepochybnému závěru o částicové struktuře látek.

Následuje blok textů věnovaných otázce klidové hmotnosti fotonu. Jeho jádrem je překlad článku, který o této otázce napsal jeden ze zakladatelů moderní fyziky Erwin Schrödinger (1887–1961) a jeho spolupracovník v irském Dublinu v letech 1954–55, pražský rodák Ludvík Bass. Příspěvky přinášíme u příležitosti „Mezinárodního roku světla“, jemuž bude zasvěceno dvojčíslo uzavírající tento ročník časopisu.

V rubrice „Mládež a fyzika“ nám Lubomír Konrád, Jan Kříž, Filip Studnička a Bohumil Vybíral předkládají vybrané akustické úlohy z FO a MFO.

Osmdesát let se dožívá paní docentka Eva Tomková, jež pedagogicky a vědecky působila na poli vakuové fyziky a fyzikální elektroniky. Toto jubileum v našem časopise připomínají její spolupracovníci a kolegové z KFPP MFF UK v Praze. Redakce i vydavatel časopisu se připojují s přáním zdraví a štěstí do mnoha příštích let.

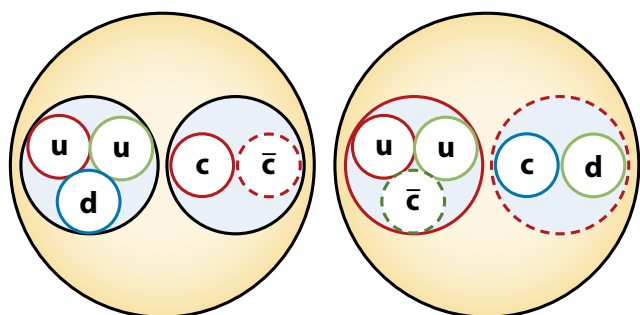
*Libor Juha
vedoucí redaktor*

Obsah

AKTUALITY

**Vzestup, pád
a znovuzrození pentakvarků** 206

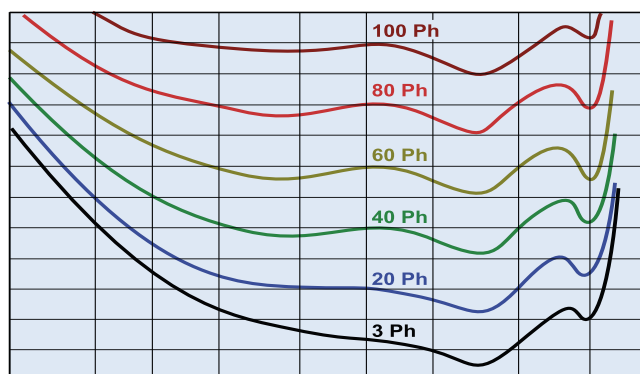
Jiří Chýla



VE ZKRATCE

Fyzika hudby 209

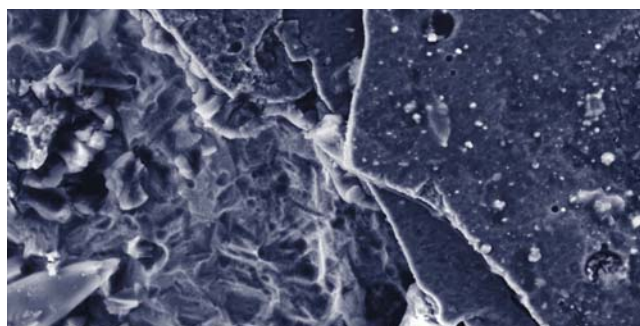
Vladimír Scholtz



REFERÁTY

**Faktory určující životnost
vodíkových palivových článků** 213

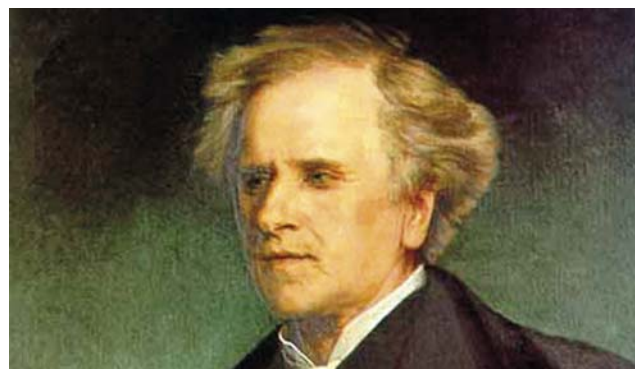
Martin Tomáš, Pavel Novotný



REFERÁTY

Byl objev Neptunu náhodný? 218

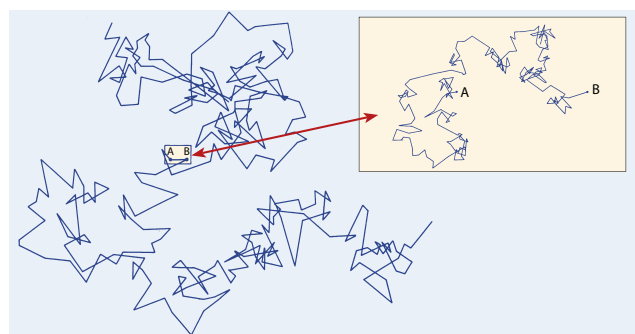
Vladimír Štefl



REFERÁTY

**Brownův pohyb jako důkaz
částicové struktury látek** 227

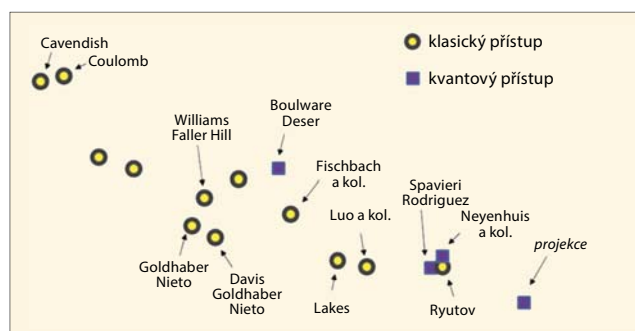
Aleš Lacina



REFERÁTY

**Skrývá před námi foton
ještě něco zásadního?** 234

Jan Novotný



Obrázek na obálce: Model pentakvarku v podobě s těsně vázanými kvarky.

Zdroj: CERN / LHCb Collaboration. Více na str. 206–208.

Menší vložený obrázek: Snímek z podmořského zvukového radaru (sonaru). Zdroj: NOAA. Více na str. 246–250.

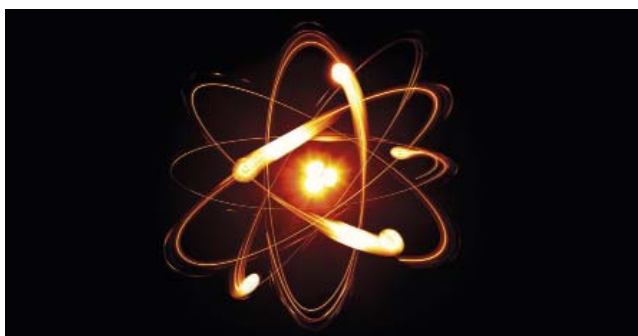
HISTORIE FYZIKY

Alexandru Proca

(16. 10. 1897 – 13. 12. 1955)

236

Ivo Kraus

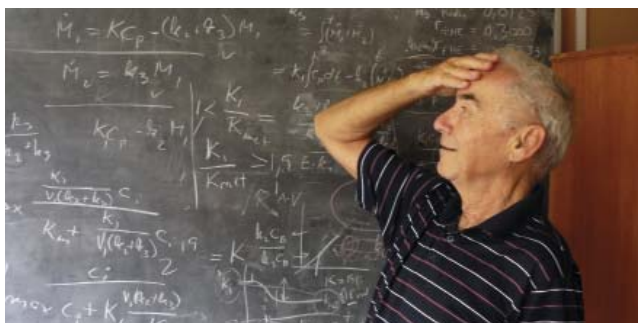


HISTORIE FYZIKY

Má mladá léta v Dublinu: spolupráce s Erwinem Schrödingerem

240

Ludvík Bass



HISTORIE FYZIKY

Musí být klidová hmotnost fotonu nulová?

241

Ludvík Bass a Erwin Schrödinger



HISTORIE FYZIKY

Komentáře a diskuse

244

k výše uvedeným výsledkům, jak byly prezentovány na Mezinárodní konferenci o elementárních částicích a 41. kongresu Italské fyzikální společnosti (Pisa, 12.–18. června 1956)

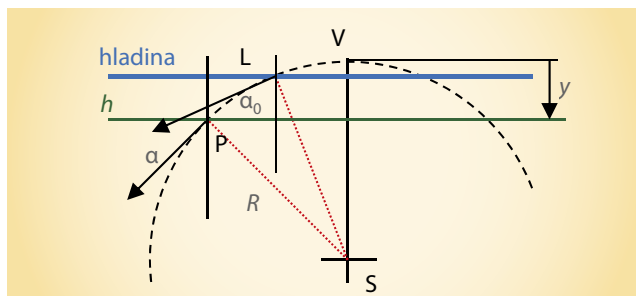


MLÁDEŽ A FYZIKA

Akustika a akustické radary (sonary) v úlohách Fyzikální olympiády

246

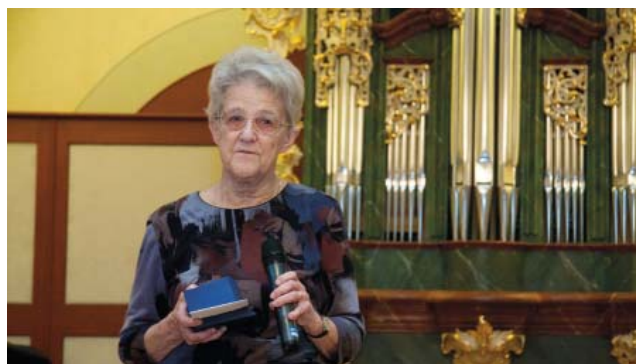
Lubomír Konrád, Jan Kříž, Filip Studnička, Bohumil Vybíral



ZPRÁVY

Blahopřání k 80. narozeninám doc. RNDr. Evy Tomkové, CSc.

251



Vzestup, pád a znovuzrození pentakvarků

Jiří Chýla

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 2, 182 21 Praha 8; chyla@fzu.cz

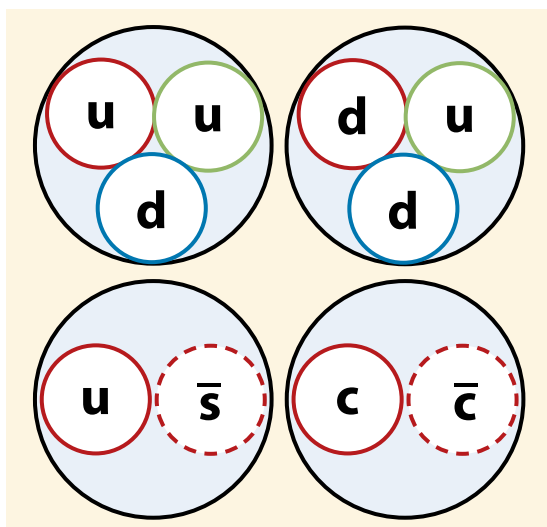
Ve středu 15. 7. 2015 ve většině našich hlavních médií proběhla zpráva, že v CERNu byla objevena nová částice, nazývaná pentakvark. Titulky zněly od střízlivého *CERN hlásí objev nové částice* přes *Průlomový objev: Fyzici CERNu izolovali nové částice atomu až po bombastické Pentakvark. Vědecká bomba! CERN objevil částici, kterou hledal půl století*. Jak skutečně významný je objev pentakvarku? Dříve než se pokusím na tuto otázku odpovědět, je třeba připomenout základní fakta o našich dnešních znalostech struktury hmoty a vysvětlit, co to jsou pentakvarky.

Podle našich současných znalostí shrnutých v tzv. *standardním modelu* je veškerá hmota, z níž jsme složeni my sami, naše sluneční soustava i další hvězdy, složená z elektronů, protonů a neutronů. Protony a neutrony jsou dále složeny z ještě menších objektů, kvarků, jež byly do fyziky zavedeny v roce 1964 Murrayem Gell-mannem a Georgem Zweigem pro vysvětlení vlastností tehdy známých částic. Tehdy stačily tři druhy kvarků, dnes víme, že jich existuje celkem šest, nazýváme je „vůně“ a označujeme u , d , s , c , b , t . Kvark dané vůně existuje dále ve třech mutacích, v optické analogii nazývané „barvy“. Tento klíčový pojem zavedl do kvarkového modelu Yoichiro Nambu, monumentální postava teoretické fyziky posledního půl-



století, který zemřel 5. července tohoto roku ve věku 94 let. Ke každému kvarku existuje i jeho antičástice, kterou označujeme proužkem nad symbolem, např. \bar{u} . Podobně jako mezi elektricky nabitými částicemi působí elektromagnetické síly, které drží pohromadě kladně nabitá atomová jádra se záporně nabitými elektrony v neutrálních atomech, působí mezi barevnými kvarky síly, které je drží pohromadě v protonech, neutronech a jim příbuzných částicích, jež nazýváme *hadrony*. V důsledku pozoruhodné vlastnosti těchto sil, která nemá analogii ve vlastnostech elektromagnetických sil, však existují v přírodě jen takové kombinace kvarků a antikvarků, které jsou ve smyslu optické analogie „bezbarvé“.

Protože barvy jsou tři, jsou potřeba nejméně tři kvarky, aby mohla vyniknout jejich bezbarvá kombinace. Tak např. proton je složen ze dvou kvarků u a jednoho kvarku d , z nichž každý nese jinou barvu a neutron obráceně. Existují i bezbarvé kombinace páru kvark a jeho antikvark, které odpovídají částicím, jež nazýváme mezony. Tak například kladně nabitý kaon K^+ je kombinací kvarku u a antikvarku \bar{s} . Podobně je mezon J/ψ kombinací kvarku c a antikvarku \bar{c} . Kvarky a antikvarky znázorněné na obrázku 1 představují tzv. konstituentní kvarky, s nimiž zacházíme podobně jako s nukleony v jádrech. Tento pojem je vhodný pro popis statických vlastností hadronů a pro vysvětlení jejich rozpadových módů. Nehodí se pro popis tvrdých



Obr. 1 Kvarkové složení protonu (vlevo nahoře), neutronu (vpravo nahoře) a mezonů K^+ (vlevo dole) a J/ψ (vpravo dole). Plně barevné kroužky označují barvu kvarků, čárkované kroužky dané barvy popisují doplňkovou barvu (antibarvu) k této barvě, černé kroužky obklopují bezbarvé kombinace tří kvarků nebo páru kvark-antikvark.

Fyzika hudby

Vladimír Scholtz

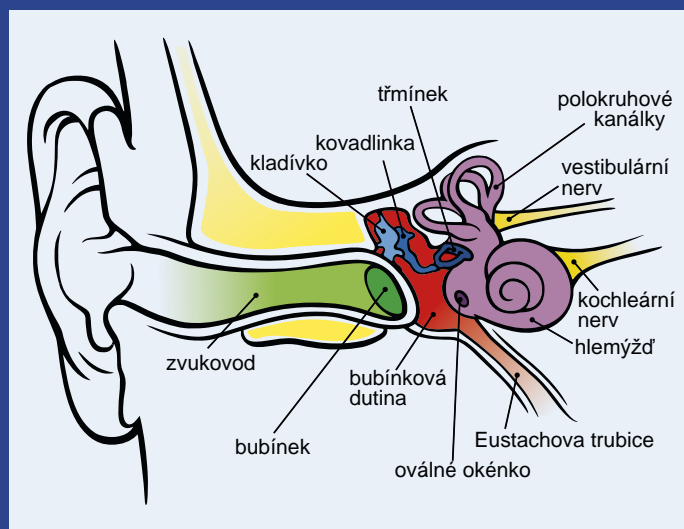
Ústav fyziky a měřicí techniky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6-Dejvice

Hudba je umění, dá se říci, že dokonce nejabstraktnější forma umění. Mizí v okamžiku, ve kterém byla stvořena, a po většinu času ji lidé nebyli schopni uchovávat jinak než pamětí nebo nějakou formou notového zápisu. Ani notový zápis však nepředstavuje skutečný záznam hudby, je to pouze předpis pro její opětovné stvoření a úspěch tohoto procesu závisí na zručnosti a vkusu interpreta. Vnímání hudby a její krásy je jedinečnou výsadou každého člověka a doprovodné subjektivní pocity závisejí na individuálním vkusu a kulturní predispozici. Otázku subjektivního vnímání ponecháme psychologii a na tomto místě se pokusíme popsat hudbu objektivně. Ve skutečnosti však nepůjde o skutečný popis hudby samotné. Objektivně jsme schopni popsat pouze hudební teorii, tj. nauku o tom, jak tvořit zvuky a souzvuky tak, aby to našemu uchu znělo libě – tedy spíše jak nevytvářet hluk. Tvorbu neboli skládání a interpretaci hudby ponecháme příslušným geniům – skladatelům a interpretům.

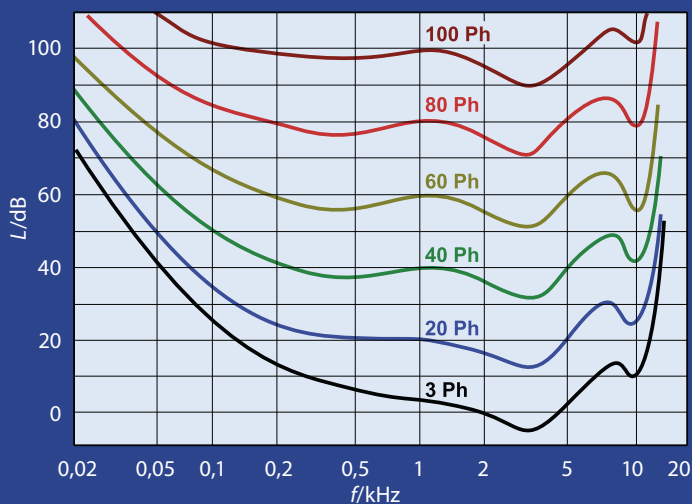
Zvuk a jeho vnímání

Hudba je jistou formou zvuku; zvuk je mechanické podélné vlnění prostředí, nejčastěji vzduchu. Každé vlnění je možné vytvořit součtem různých harmonických vlnění, která mohou být v nějakém bodě v prostoru popsána dvěma charakteristickými veličinami: frekvencí f a amplitudou A . V tom případě akustický tlak (např. tlak vzduchu) v daném bodě je popsán rovnicí harmonického oscilátoru $p = A \cdot \cos(2\pi f t)$, jehož energie se dále šíří do prostoru rychlostí v , a tento tok charakterizuje veličina nazvaná intenzita I , která je definovaná jako energie přenesená za jednotku času přes jednotku plochy.

Lidským orgánem pro vnímání zvuku je ucho, jehož náčrt je uveden na obrázku 1. Skládá se z ušního boltce fungujícího jako směrová anténa, zvukovodu zakončeného bubínkem, kde se mechanické vlnění (obvykle) vzduchu mění na mechanické vlnění tří kůstek pojmenovaných podle svého tvaru *kladívko*, *kovadlinka* a *třímínek*. Tato soustava kůstek slouží jako impedanční přizpůsobení k minimalizaci odrazů zvuku dopadajícího na bubínek a jeho co nejefektivnější přenos do vnitřního ucha. K samotnému vnímání zvuku dochází v hlemýždi vnitřního ucha,



Obr. 1 Náčrt lidského ucha. (Převzato z wikipedia.org.)



Obr. 2 Citlivost lidského ucha k různým frekvencím.

kde tekutina (endolymfa) svým chvěním dráždí citlivé buňky bazilární membrány.

Běžné zvuky kolem nás mají intenzitu v rozmezí několika řádů a z důvodu přežití jsme nejenom my, ale i většina živočichů byli nuceni je nějakým způsobem vnímat. Zdravý člověk vnímá harmonické vlnění o frekvenci $f = 1000$ Hz od tzv. prahové intenzity $I_0 = 10^{-12}$ W/m² až po tzv. práh bolesti $I_m = 10$ W/m² a toto subjektivní vnímání je logaritmické. Popisuje ho hladina intenzity L definovaná jako dekadický logaritmus podílu dané intenzity a prahové intenzity $L = \log(I/I_0)$ a je udávána v belech (B), běžně se však používá menší jednotka decibel (dB). Vnímání lidským uchem však není stejné pro všechny frekvence vlnění, a proto se zavádí veličina subjektivní hlasitosti, jejíž jednotkou je fón (Ph). Tato hlasitost je totožná s již definovanou hladinou intenzity pro vlnění o frekvenci $f = 1000$ Hz, pro jiné frekvence je ale definována tak, aby zachovávala subjektivní pocit konstantní hlasitosti. Na obrázku 2 jsou znázorněny izofony, křivky se stejným subjektivním vnímáním hlasitosti, na podkladu objektivní hladiny intenzity zvuku. Nejvyšší citlivost má lidské ucho na frekvenci kolem 3 kHz, která na obě strany v podstatě klesá. Mladý zdravý člověk slyší zvuky o frekvencích v rozsahu přibližně $f = 20$ – $20\,000$ Hz, který se s věkem zužuje z obou stran.

Faktory určující životnost vodíkových palivových článků

Martin Tomáš, Pavel Novotný

Nové technologie – výzkumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň; mtomas@ntc.zcu.cz, novotnyp@ntc.zcu.cz

Při pohledu na úspěchy vývoje vodíkových palivových článků si nelze neklást otázku, co limituje masivní využití těchto zařízení v každodenním životě. Provoz vodíkových palivových článků vede ke ztrátě požadovaných vlastností důležitých komponent. Určení a eliminace degračních mechanismů tak může napomoci širšímu využití vodíkových palivových článků.

Úvod

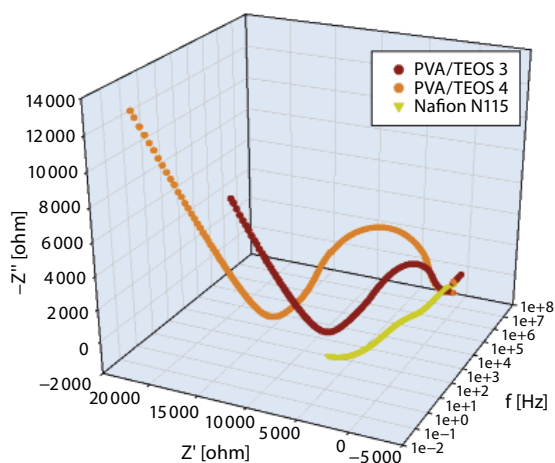
V současné době můžeme pozorovat výraznou podporu vývoje alternativních zdrojů elektrické energie. Mezi perspektivní oblast patří i vodíkové palivové články s protonově vodivou membránou [1, 2]. Nepopíratelnou výhodou vodíkových palivových článků je jejich provoz bez produkovaných emisí, což může být lákavé pro některé typy aplikací. Palivové články se mohou uplatnit v kosmických satelitech či v kombinovaných systémech s dalšími alternativními zdroji, kdy dochází například ke spojení fotovoltaických panelů, elektrolyzérů a palivového článku do podoby energeticky soběstačné jednotky [3, 4]. Pro určité aplikace lze u palivových článků nalézt nesporné výhody. Nicméně se ukazuje, že provoz palivového článku je doprovázen mnoha nežádoucími jevy, které výrazně ovlivňují jeho výkon a životnost. Jednotlivé komponenty článku jsou provozem namáhány a ztrácejí na funkčnosti [5]. Cílem tohoto článku je seznámení čtenáře se základními degračními mechanismy, se kterými se můžeme u vodíkových palivových článků setkat.

Struktura a funkce součástí vodíkového palivového článku

Zaměříme se na degradaci komponent, které tvoří nejdůležitější části vodíkového palivového článku. Přívod reaktantů a další vnější zařízení patří rovněž mezi důležité součásti palivového článku, ale z hlediska degračních mechanismů nás nejvíce zajímají části výrazně ovlivňující výkonové charakteristiky celého zařízení. Těmito částmi jsou bipolární desky, difuzní vrstvy, katalytické vrstvy a protonově vodivá membrána. Design bipolárních desek je navržen tak, aby došlo k plošnému rozložení reaktantů a na katalytické vrstvě mohlo reagovat co největší množství paliva. Bipolární desky se vyrábějí z oceli či uhlíkových kompozitů [1] a obsahují drobné kanálky. Tyto desky přiléhají k difuzní vrstvě, která zajišťuje homogenní distribuci paliva [6]. Difuzní vrstva je tvořena uhlíkovými vlákny a uhlíkovým prachem. Palivo nejdříve prochází mezi uhlíkovými vlákny a následně jemným uhlíkovým prachem s velmi malými póry. Tímto způsobem je rozprostřeno do plochy

a může efektivně reagovat na katalytické vrstvě. Právě na katalytické vrstvě dochází k rozdělení původně dvouatomových molekul vodíku či kyslíku na jednotlivé konstituenty a elektrony. V případě vodíku putují atomová jádra napříč membránou k druhé katalytické vrstvě, kde došlo k rozdělení molekul kyslíku. Elektrony jsou vedeny vnějším obvodem, kde mohou konat práci. Zpět do článku jsou přivedeny na opačné straně membrány a v této oblasti se spojují společně s kyslíkem a vodíkem do elektricky neutrálních molekul vody.

Důležitým předpokladem tohoto procesu je vysoká elektrická vodivost bipolárních desek, difuzní a katalytické vrstvy, protože tyto části se podílejí na vedení produkovaného elektrického proudu. Požadavkem na membránu je nepropustnost pro nezreagované palivo a vysoký elektrický odpor (obr. 1), který zajistí, že elektrony uvolněné na katalytické vrstvě neprojdou přímo skrz membránu, ale vykonají požadovanou práci ve vnějším obvodu. Funkcí membrány je přivedení vodíkových jader (protonů) k rozštěpeným molekulu-



Obr. 1 Impedanční spektra PVA membrán s odlišnými koncentracemi tetraethylorthosilikátu v porovnání s membránou Nafion N115 (znázorněna reálná a imaginární část impedance v závislosti na frekvenci za standardních laboratorních podmínek, Solartron 1260/1287).

Byl objev Neptunu náhodný?

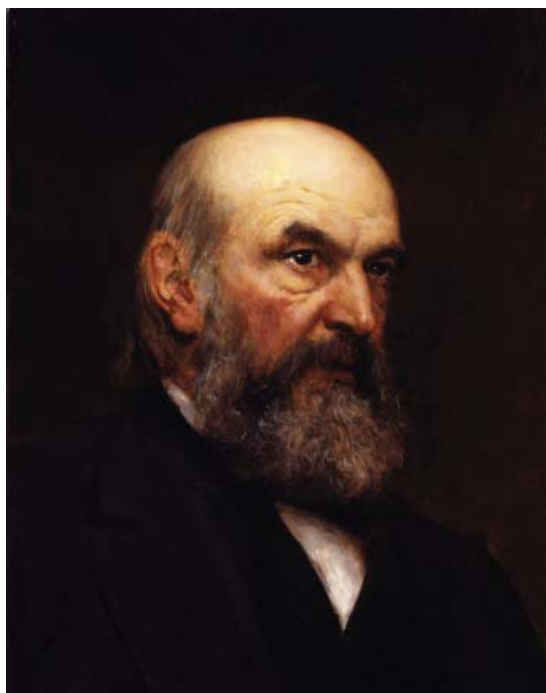
Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, 611 37 Brno; stefl@astro.sci.muni.cz

Pro hloubavého čtenáře jsou v hlavní části článku shromážděna v historické posloupnosti fakta k zamyšlení se nad výše položenou otázkou. V roce 2016 uplyne 170 roků od jednoho z nejvýznamnějších činů lidského intelektu v historii nebeské mechaniky – objevu planety Neptun. Udál se za neobvyklých a částečně i dramatických okolností na různých místech Evropy. Proběhl zásluhou úspěšného propojení matematicky obtížných a časově náročných výpočtů ve Francii, Anglii a krátkého pozorování v Německu.

Zřetelně formulovaná myšlenka o existenci planety vyvolávající zrychlování a zpomalování pohybu Uranu, podložená rozsáhlými korektními výpočty, se objevila již v září 1845 u Johna Couche Adamse (1819–1892), viz obr. 1. Priorita objevu planety především na základě určení její polohy zveřejněné koncem srpna 1846 však náleží Urbainu Jeanu-Josephu Le Verrierovi (11. 3. 1811–23. 9. 1877), viz obr. 2. Zásluhou publikací učinil svoje výsledky dostupné celému světu a současně navíc dokázal přesvědčit německé astronomy k jejímu hledání završenému rychlým úspěšným nalezením.

Vraťme se k červnu roku 1845, kdy se ředitel Pařížské hvězdárny Dominique François Arago (1786–1853) obrátil na Le Verriera s námětem na objasnění nepravidelností pohybu Uranu. Planeta v období let 1780–1830 zrychlovala a následně od roku 1831 zpomalovala svůj pohyb. Jak se ukázalo později po objevu Neptunu, v roce 1821 proběhla jeho opozice vzhledem k Uranu, proto následně s určitým zpožděním nastou-



Obr. 1 John Couch Adams.



Obr. 2 Urbain Jean-Joseph Le Verrier.

pilo zpomalování pohybu sledované planety, které se po roce 1831 stalo výrazným, narůstalo přibližně 6"–7" za rok. Pověření Le Verriera nebylo náhodné, neboť od roku 1839 se zabýval propočty drah planet, stabilitou sluneční soustavy, pohybem Merkuru, v roce 1842 publikoval dvě poznámky týkající se poruch pohybu Uranu.

Již v předchozím období před Le Verrierem se Laplaceův žák Alexis Bouvard (1767–1843), viz obr. 3, pokoušel nalézt výklad nepravidelností pohybu Uranu. Jako jeden z prvních vyslovil domněnku o existenci další gravitačně působící planety. Bouvard do propočtů pohybu Uranu zahrnoval pouze poruchové působení planet s největší hmotností Jupiteru a Saturnu, gravitační interakci ostatních planet zanedbával. Matematické výpočty poruch prováděl Laplaceovou metodou, přímou integrací pohybových rovnic, tzv. mechanickou kvadraturou (numerickým výpočtem určitých integrálů), což byl tehdy standardní postup.

Brownův pohyb jako důkaz částicové struktury látek

Aleš Lacina

Ústav fyzikální elektroniky, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, 611 37 Brno

Dnešní výklad Brownova pohybu vychází z předpokladu, že kapalina či plyn mají nespojitou strukturu a současné učebnice mu zpravidla nevěnují více než několik řádků. Jak z fyzikálního, tak z pedagogického hlediska je však podstatně cennější (i zajímavější) historický postup, který k tvrzení, že látky sestávají z částic, dospívá jako k nevyhnutelnému důsledku existence tohoto jevu a jeho experimentálně zjištěných vlastností. Příspěvek rekapituluje fyzikálněhistorické souvislosti a připomíná teoretické rozborů různých aspektů Brownova pohybu – provedené Albertem Einsteinem a Jeanem Perrinem –, jež po svém důvtipném a velice pracném Perrinově všestranném experimentálním ověření přivedly dvěma odlišnými cestami k nepochybnému závěru o částicové struktuře látek.

Brownův objev a jeho bezprostřední ohlas

Přibližně uprostřed časového intervalu mezi položením základů chemického atomismu a molekulárně-kinetické teorie plynů [1] vydal skotský botanik Robert Brown soukromý tisk pod názvem *Stručná zpráva o mikroskopickém pozorování prováděném v měsících červnu, červenci a srpnu 1927 na částicích pylu a o všeobecné existenci aktivních molekul v organických i anorganických tělesech* [2]. Informoval v něm o neustálém chaotickém pohybu pylových zrněk lokanky sličné (*Clarkia pulchella*) o průměru asi 5 μm ve vodní suspenzi, kterého si všiml při jejich mikroskopickém zkoumání.

Brown nebyl první, kdo učinil podobné zjištění. Na rozdíl od svých dávnějších předchůdců (Leeuwenhoek, Ingenhousz, Buffon aj.) však měl kvalitnější mikroskop s achromatickým objektivem a všechny – i své současníky (Bywater, Brongniart aj.) – pak předčil svou důsledností: nespokojil se totiž s lákavým prvoplánovým vysvětlením, že jde o projev života suspendovaných částic. Zprvu sice rovněž sledoval i tuto ideu a své experimenty prováděl s pylovými zrny různých rostlin a srovnatelně velkými částicemi pocházejícími z jiných částí rostlinných těl. Od nich však přešel k pylovým zrnům rostlin dávno mrtvých, drobným částicím získaným drcením více než sto let vyschlých rostlinných tkání, fosilií a konečně také minerálů, meteoritů, londýnských sazí či okenního skla. Jejich stejné chování jej přivedlo k poznatku, že existence pozorovaného pohybu nesouvisí s charakterem suspendovaných částic a že jeho příčiny nejsou tudíž biologické, nýbrž fyzikální. Pečlivým experimentálním studiem dále zjistil, že

- tento pohyb není způsoben lokálními toky v kapalině (protože i částice vzdálené méně, než činí jejich průměr, se pohybují nezávisle);
- jeho aktivita závisí nepřímo na velikosti zrněk;



Vizualizace Brownova pohybu prostřednictvím počítače a laseru. (Foto: Justin J. Clayden)

- není způsoben možným vypařováním (neboť existuje také v kapkách vodní suspenze rozptýlených v olejové lázni).

Na závěr svých pozorování vyjádřil Brown přesvědčení, že existence chaotického pohybu suspendovaných částic, který byl následně označen jeho jménem, má svůj původ uvnitř suspenze (viděl jej ovšem spíše v částicích samotných než v okolní kapalině), a nikoli v případném vnějším působení na ni. Žádnou konkrétnější domněnku o jeho příčině však nevyložil.

Brownovy současníky jeho sdělení nijak zvlášť nezaujala, pokud je ovšem úplně neignorovali. Biologové na Brownův pohyb převážně pohlíželi jako na nezbytnou komplikaci svých mikroskopických pozorování, přičemž si na jeho původ většinou udržovali tradiční názor nebo se jím ani nezabývali. A nemnozí fyzici, kteří o tomto jevu vůbec věděli, jej pak zpravidla nepovažovali za hoden důkladnějšího studia. Ve skutečnosti byl jeho hlubší význam ještě po několika dalších desetiletích mimo dosah tehdejšího stupně vědeckého poznání. Z tohoto období tak pochází jen řada navzájem rozpor-

Skrývá před námi foton ještě něco zásadního?

Jan Novotný

Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, 611 37 Brno; novotny@sci.muni.cz

Student fyziky si rychle zvykne na to, že rychlost světla a mezní rychlost (šíření interakcí a informace) jsou téměř synonyma – foton jako světelné kvantum se pohybuje mezní rychlostí a musí tedy mít nulovou (klidovou) hmotnost. (Poznamenejme, že v částicové fyzice vítězí v posledních desetiletích tendence jinou než klidovou hmotnost nezavádět.) Více než 50 let starý Bassův a Schrödingerův článek dokumentovaný v tomto čísle Československého časopisu pro fyziku by se proto mohl jevit jako okrajová kuriozita. Podrobnější seznámení s literaturou (výstižné shrnutí dějin fotonu a problémů s ním spojených viz [1]) ukazuje, že tomu tak zdaleka není.

Raná historie fotonu začíná zároveň s 20. stoletím Planckovým zavedením kvanta záření, pokračuje Lenardovým výzkumem základních zákonů fotoefektu a vrcholí slavnou Einsteinovou prací z roku 1905. Název *foton* zavedl Gilbert Lewis v roce 1926, a i když jeho představa fotonu neodpovídala kvantovému pojetí, samotný název se rychle vžil hlavně Comptonovou zásluhou. Vícekrát zazněl na pátém Solvayově setkání roku 1928. Již po několika letech se objevila modifikace Maxwellovy teorie, o níž se dosud opírají diskuse o možnosti nenulové hmotnosti fotonu a jejího experimentálního zjištění.

Tyto rovnice, na nichž je založen i článek Basse a Schrödingera, formuloval ve své dizertační práci z roku 1933 Alexandru Proca (životopis a přehled díla viz [2]). Proca se narodil v Bukurešti roku 1897 a v roce 1927 odešel do Paříže s úmyslem „jednoho dne něčím přispět fyzice“. Nejprve spolupracoval s Marií Curie, ta však rozpoznala jeho talent teoretika a povzbudila ho ke změně orientace. Až do své smrti roku 1955 pracoval Proca většinou v Paříži, s výjimkou válečných let, kdy působil v Portugalsku a později v Anglii. Od roku 1946 vedl proslulý *Proca seminar*. Kromě Maxwellových-Procových speciálně relativistických rovnic jsou často připomínány také Einsteinovy-Procovy obecně relativistické rovnice.

Maxwellovy-Procovy rovnice podávají ucelenou a konzistentní teorii elektromagnetických jevů. Zahrnují Maxwellovu teorii jako limitní případ. Jejich výraznou vlastností je, že dávají přímý fyzikální význam čtyřpotenciálu a ruší kalibrační invarianci. Lorentzova podmínka není – jako v čistě Maxwellově teorii – jen vhodným způsobem kalibrace, ale stává se fyzikálním zákonem (je nezbytná pro zaručení platnosti zákona zachování elektrického náboje). Podrobnější rozbor ukazuje, že tato modifikace Maxwellovy teorie ztěžuje možnost jiného rozšíření zahrnujícího existenci magnetických monopolů.

<http://ccf.fzu.cz>



Gilbert Newton Lewis

Maxwellovy-Procovy rovnice jsou zajímavé i z klasického (tj. nekvantového) hlediska. Vyplývají z lagrangianu, v němž k výrazu odpovídajícímu Maxwellově elektrodynamice přibývá člen úměrný kvadrátu čtyřpotenciálu. Pro kvantovou teorii je důležité, že z něho plyne Procova rovnice popisující hmotné bosony se spinem jedna (k nimž by patřil i hmotný foton).

Převážná část literatury o možnosti nenulové hmotnosti fotonu pojednává fakticky o hledání odchylek od Maxwellovy teorie vyplývajících z Procovy modifikace. Podle rozsáhlého rozboru současné situace [3, 4] je lze rozčlenit do tří okruhů. (A) Rychlost šíření světla ve vakuu by měla záviset na jeho frekvenci. (B) Pro



Alexandru Proca

(16. 10. 1897 – 13. 12. 1955)

Ivo Kraus

Katedra inženýrství pevných látek, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze, Trojanova 13, 120 00 Praha 2; ivo.kraus@fffi.cvut.cz

Několik příspěvků v tomto čísle cituje dílo A. Procy v souvislosti s problémem možné nenulové hmotnosti fotonu. Ukážeme zde, že dílo tohoto francouzského teoretického fyzika rumunského původu je mnohem rozsáhlejší. Byl skutečně významným a všestranným fyzikem.



Alexandru Proca

Běh života

Alexandru Proca pocházel z rodiny inženýra konstruktéra působícího u železniční správy v Ploješti. Středoškolské i vysokoškolské vzdělání získal v Bukurešti, v roce 1915 absolvoval lyceum Gheorgha Lazara (*Colegiul National „Gheorghe Lazar“*, zal. 1860), potom se přihlásil ke studiu matematiky na univerzitě (*Universitatea din Bucuresti*). Když byla škola po německé okupaci (1916–1918) uzavřena, absolvoval kurz po záložní důstojníky a v létě 1918 narukoval k ženistům. Po válce vstoupil na polytechniku (*Universitatea Politehnica din Bucuresti*), v roce 1922 ji jako elektromechanický inženýr s vyznamenáním ukončil.¹

Svou technickou kvalifikaci však využil jen krátce (1922–1923) ve společnosti *Electrica din Campina*, kde vypracoval studii o elektrifikaci provozů naftového průmyslu². Ve stejné době byl asistentem katedry elektřiny a elektroniky, kterou na bukureštské polytechnice vedl jeden z nejvýznamnějších rumunských inženýrů fyziků profesor Vasilescu Karpen (1870–1963).

Tím Alexandru Proca v podstatě skončil s inženýrskou kariérou. Tradují se jeho slova: „*I have something to say in Physics.*“ Měl k tomu všechny formální i odborné předpoklady: vynikající prospěch z matematiky i fyziky, jazykové vybavení – dobře mluvil francouzsky, německy a anglicky, pasivně znal i latinu a klasickou řečtinu.

Svůj talent mohl dále rozvíjet v Německu, Velké Británii nebo Francii. Rozhodl se pro Sorbonnu. Čtyřletý program studia matematiky a fyziky zvládl za pouhé dva roky. Mezi těmi, které při zkouškách udivoval svými znalostmi, byli např. Paul Langevin (1872–1946), Marcel Brillouin (1854–1948) a Marie Curie (1867–1934). V roce 1925 mu dvojnásobná laureátka Nobelovy ceny (fyzika 1903, chemie 1911) předala diplom bakaláře věd a krátce na to i nabídku, aby nastoupil jako vědecký pracovník do Ústavu radia (*Institut du radium*, nyní *Institut Curie*). Procovým úkolem byl výzkum paprsků beta emitovaných produkty rozpadu thoria. Že Marii Curie nezklamal, svědčí její hodnoce-

ní: „*Any time I have a difficult scientific problem in the institute, which requires great patience, skill, dexterity of the experimenter and meticulousity, I call Mr. Proca ... you, Romanians, can pride yourself with a researcher in science, the size of Mr. Proca.*“ Když Marie Curie poznala, že se více než o experiment zajímá o teorii, doporučila mu přejít do nového Ústavu Henriho Poincaré (*Institut Henri Poincaré*)³.

Mezníkem v Procově životě byl přelom dvacátých a třicátých let: převzal funkci vedoucího redaktora prestižního časopisu *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, získal francouzské občanství, oženil se⁴ a pod vedením Louise de Broglieho začal pracovat na doktorské disertaci *About relativistic theory of Dirac's electron in null field*. Obhajoba proběhla v roce 1933 před komisí, v níž zasedali Jean Perrin (1870–1942), Léon Brillouin (1889–1969), Louis de Broglie (1892–1962) a Aimé Cotton (1869–1951). V této souvislosti si zaslouží připomenout dalšího významného rumunského fyzika dvacátého století Horiu Hulubeie, který ve stejném roce jako Proca na Sorbonně obhájil disertaci *Contribution to the study of quantum diffusion of X-rays*.

Důležitou úlohu v Procově vědecké kariéře sehrálo Rockefellerovo stipendium ke studijnímu pobytu v Berlíně a v Kodani. Dostal příležitost celý rok 1934 spolupracovat s Erwinem Schrödingerem (1887–1961) a několik měsíců s Nielsem Bohrem (1885–1962), v jehož ústavu navázal osobní kontakt s Wernerem Heisenbergem (1901–1976) a Georgem Gamowem (1904–1968).

Nejvýznamnější práce Procovy vědecké kariéry jsou datovány letopočty 1936 až 1941. Tehdy uveřejnil svou vektorovou mezonovou teorii jaderných sil a relativistickou rovnici kvantového pole. Jednoznačně příznivý ohlas měly Procovy závěry u takových teoretických fyziků, jako byli Japonci Hideki Yukawa, Shoichi Sakata (1911–1970) nebo Němci Gregor Wentzel (1898–1978), Walter Heitler (1904–1961) nebo Herbert Fröhlich (1905–1991).

O tom, že Procova teorie vzbudila ve fyzikálních kruzích mimořádnou pozornost, svědčí pozvání na

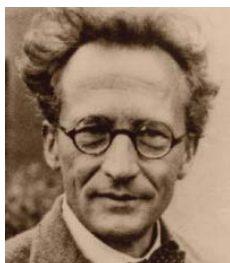
1 Během svého studia na polytechnice Proca navštívil krátce USA.

2 Práce vyšla v roce 1924 s názvem *Electricity use within oil industry*.

3 Ústav založený v roce 1928 je nyní součástí Univerzity Paříž VI.

4 Jeho manželkou, s níž měl později syna Georga, se stala Rumunka Marie Berthe Manolesco.

Má mladá léta v Dublinu: spolupráce s Erwinem Schrödingerem



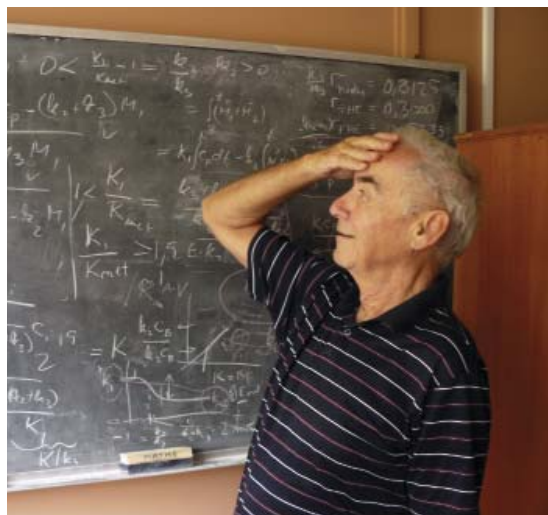
Ludvík Bass

Katedra matematiky Queenslandské univerzity v Brisbane, Austrálie; lb@maths.uq.edu.au

Naše spolupráce na přechodu k singulární, ale všeobecně přijatelné limitě klidové hmotnosti fotonu ([1], zde na str 241–243) spadala do mnohaletého období Schrödingerovy nespokojenosti se stavem teoretické fyziky, kvantové mechaniky obzvlášť. Nepřestával hledat překvapující aspekty všeobecně přijatých, tehdy již dobře zavedených fyzikálních teorií, v naději na nalezení inspirace k novému převratu.

Naše společná práce se týkala celé řady konkrétních fyzikálních jevů a problémů (např. užitečných modifikací Maxwellových rovnic [2, 3], tepelné bilance Země [4], ale i nepublikovaných kosmologických úvah), kdežto většina Schrödingerových vlastních úvah byla věnována výkladu kvantové teorie. Především jej zajímal problém její úplnosti jako fyzikální teorie. Pro Schrödingerovu generaci byl uspokojivý výklad těchto jejich vlastních zásadních objevů věcí zásadní důležitosti: Bohr příznačně poznamenal, že kdo při studiu kvantové teorie netrpěl pocitem závratí, ten jí neporozuměl. Myslím, že po půl století plynulého vývoje a celé řadě úspěšných aplikací kvantové teorie přijímá naše mladší generace školení v tomto předmětu už bez závratí.

Schrödinger působil v *Dublin Institute for Advanced Studies* od jeho založení v roce 1939 až po svůj návrat do Vídně roku 1956. Z Čechů tam s ním v le-



tech 1947–48 pracoval Miroslav Brdička [5], pozdější docent a profesor Karlovy univerzity a následně Českého vysokého učení technického v Praze, a pak, v letech 1954–56, já. Schrödingerovo stanovisko k Čechům je plně vystiženo několika řádky, jimiž mi věnoval jednu ze svých knih: „*Seinem jungen Freund und alten Landsmann zugeignet von E. S., 8. 11. 1955*“. Jako starý Rakušan nejlepšího druhu považoval nás za své krajany. Walter Moore napsal o Schrödingerovi biografii [2], znamenitou lidsky i vědecky. Pojednal jsem o ní v eseji-recenzi otištěné před lety v tomto časopise [3].

Literatura

- [1] L. Bass, E. Schrödinger: „Must the photon mass be zero?“, *Proc. Roy. Soc. London* **A232**, 1 (1955).
- [2] Rukopisné poznámky E. Schrödingera k tématu.
- [3] L. Bass: „Radiation with a finite rest-mass and the heat balance on the Earth“, *Nuov. Cim.* **3**, 1204 (1956).
- [4] L. Bass: „Heat balance on the Earth“, *Nature* **198**, 980 (1963).
- [5] J. Langer: „Miroslav Brdička devadesátiletý“, *Čs. čas. fyz.* **53**, 384 (2003) a citace tam uvedené.
- [6] W. J. Moore: *Schrödinger: Life and Thought*. Cambridge University Press, Cambridge 1989.
- [7] L. Bass: „Schrödinger: filozof Planckovým následníkem“, *Čs. čas. fyz.* **41**, 75 (1991); esej byl spolu s dalšími úvahami vydán i knižně v L. Bass: *Eseje z obou džbánů*. Dokořán, Praha 2004. Více na WWW: http://www.dokoran.cz/index.php?Eseje_z_obou_dzbanu&p=book&id=159.

Autor (*1931), emeritní profesor *katedry matematiky Queenslandské univerzity v Brisbane*, zahájil svá vyšší studia přírodních a exaktních věd na Karlově univerzitě v Praze, odkud byl v roce 1951 vyloučen. Ve studiu pokračoval ve Vídni a v Dublinu. V Dublinu spolupracoval v letech 1954–56 s Erwinem Schrödingerem na řešení problému klidové hmotnosti fotonu. Schrödinger podnítil jeho zájem o biofyziku a lékařskou fyziku, jimž pak převážně zasvětil svou následující vědeckou a pedagogickou kariéru. Je zahraničním členem *Dánské královské akademie věd*.

Musí být klidová hmotnost fotonu nulová?

Ludvík Bass a Erwin Schrödinger

zahr. člen Královské společnosti Dublin Institute for Advanced Studies (přijato 9. května 1955)

Přeložil **Martin Zdráhal**

Dávná otázka týkající se existence podélných vln, která sužovala již elastickou teorii světla, se v dnešní době opět vynořuje v podobě otázky z nadpisu tohoto článku. Maxwellovy rovnice jsou speciálním limitním případem, který připouští existenci pouze příčných vln. Pokud by toto omezení platilo jen jako blízká aproximace, objevil by se v některých fundamentálních zákonech záření z důvodu „třetího stupně volnosti“ dodatečný faktor $3/2$. V tomto případě bychom mohli oprávněně považovat Maxwellovu teorii za podezřelou, neboť neradi připouštíme, že by vhodným popisem přírody mohla být mezní teorie, jejíž předpovědi se podstatně a nespojitě liší od předpovědí teorie platné při jakkoliv blízkém přiblížení k limitnímu případu. V tomto článku na jednoduchém (i když fiktivním) případě ideálního vodiče ukážeme, že vhodným rozšířením Procových rovnic do látek se těmto nespojitostem vyhneme a dostaneme tak správný faktor ve všech vztazích (tj. bez dodatečných $3/2$) i pro klidovou hmotnost fotonu rovnou současné horní mezi vyplývající ze známých úvah.

Třetí stupeň volnosti

Elektromagnetické vlny ve vakuu jsou za nepřítomnosti všech nábojů a proudů velmi singulární, což se projevuje několika způsoby. Stopa Maxwellova tenzoru je nulová. Rovinné vlny mají pouze dva možné stavy polarizace, a ne tři, jak bychom očekávali pro vektorové vlny (např. elastické vlny, viz historické dilema týkající se elastických vlastností éteru). V případě rovinných vln oba invarianty elektromagnetického tenzoru vymizí, a to je také důvod, proč nemůžeme přejít do klidové soustavy rovinné vlny – pokud se o to pokusíme, pole slábne a slábne, až je nakonec v této „klidové soustavě“ nulové. V kvantové teorii se dá toto singulární chování stručně vystihnout větou: klidová hmotnost fotonu je nulová.

Uvážíme-li zásadní význam elektrodynamiky pro naše chápání světa, je otázka, zda se opravdu jedná o mezní případ úplný, nebo jen přibližný, přirozená a důležitá. Důsledkem nenulové hmotnosti fotonu (zůstaneme-li ve formulaci kvantové teorie) by bylo snižování grupové rychlosti *dlouhých* vln. Protože nepozorujeme žádný barevný jev u vzdálených zákrytových dvojhvězd, de Broglie [1] odhadl, že by klidová hmota fotonu neměla být větší než 10^{-44} g. Přesnosti napomáhá dlouhá dráha letu těchto fotonů, zatímco jejich žalostně krátká vlnová délka ji snižuje. Použitím opačného extrémního případu, *statického* pole na velkých vzdálenostech, získal Schrödinger [2] omezení s využitím pozorovaného průběhu zemského magnetického pole. Jeho nepatrná (a možná jen zdánlivá) odchylka od Gaussova zákona vede k odhadu klidové hmoty m na 10^{-47} g, což odpovídá odhadu délky $\frac{h}{2\pi mc}$ na 30 000 km, přímo určené z výše zmíněné odchylky. *Polovinu* této hodnoty, tedy 15 000 km, můžeme s klid-

ným svědomím odhadnout jako její *dolní* mez (to pak znamená, že je hodnota μ ve vztahu (2.1) níže určité menší než 10^{-9} cm⁻¹; odpovídající dolní mez „Comptonovy vlnové délky“ je potom okolo 100 000 km).

Tyto úvahy nás však *v každém případě* přivádějí k vážným teoretickým problémům a autoři si nejsou vědomi, že by již byly v literatuře diskutovány. Jedná se o následující: Dokud se nezabýváme přesně Maxwellovým mezním případem, tj. dokud není Comptonova délka fotonu přesně nekonečná, nebo lépe její převrácená hodnota přesně nulová, může se pro libovolné dvě Maxwellovy příčné vlny se stejným směrem šíření objevit polarizace třetí, a sice podélná vlna. Ta se pohybuje stejnou rychlostí a existuje nezávisle na tom, jak malou nenulovou klidovou hmotnost fotonu zvolíme. Při kvantování této vlny není důvod upírat jí schopnost přenášet energii a hybnost. Navíc, jak dále uvidíme, stav polarizace není vlastností zachovávající se při Lorentzových transformacích – lineárně polarizovaná T-vlna (jak ji zde budeme nazývat; podle slova *transverzální*) může být lorentzovsky přetransformována na L-vlnu (*longitudinální*) a naopak, i když tato transformace bude pro velmi malou hmotnost extrémní.

Pokud by tyto L-vlny přispívaly do tepelných efektů a tlaku záření černého tělesa, očekáváme, že pak by konstanta ve Stefanově zákoně, konstanta v Planckově rovnici a tlak záření byli rovné $3/2$ násobkům současně udávaných hodnot. Měřené hodnoty tedy mohou být chápány jako indikace toho, že se v přírodě opravdu realizuje mezní případ nulové hmotnosti fotonu.

To by však bylo chabé a jak věříme i nesprávné řešení popsaneho dilematu. V rozumné teorii by totiž nemělo ani hypoteticky dojít k situaci, kdy určitý typ li-



James Clerk Maxwell
(1831–1879)

Akustika a akustické radary (sonary) v úlohách Fyzikální olympiády

Lubomír Konrád^b, Jan Kříž^a, Filip Studnička^a, Bohumil Vybíral^a

^aÚstřední komise Fyzikální olympiády, Univerzita Hradec Králové, Rokitanského 62, 500 03 Hradec Králové

^bGymnázium, Velká okružná 22, 010 01 Žilina

Téma akustiky není v úlohách Fyzikální olympiády příliš často využíváno. Jádrem několika úloh, které se přece jen na téma zvukového vlnění ve Fyzikální olympiádě objevily, bývá buď použití Dopplerova jevu, nebo šíření akustických vln formou „paprsků“, podobně jako se řeší šíření světelných vln v geometrické optice. Uvedeme příklady na oba takové typy úloh.

Ačkoliv je akustika poměrně rozsáhlým oborem (nejen) fyziky, v úlohách Fyzikální olympiády (FO) se vyskytuje spíše sporadicky. Prošli jsme archivy úloh FO na Slovensku a Mezinárodní fyzikální olympiády (MFO) a představíme vám zde tři úlohy – dvě ze slovenské FO a jednu z MFO.

Je zajímavé, že různí autoři úloh FO mohou mít stejný nápad při návrhu úlohy. Např. Juraj Slabeycius vytvořil úlohu „Sonar“ pro 37. ročník FO, tedy pro školní rok 1995/96. Základním předpokladem této úlohy je lineární závislost rychlosti zvuku v moři na hloubce. Stejný předpoklad byl ale použit australskými autory úloh pro jednu z teoretických úloh s názvem „Šíření zvuku“ na 26. MFO v roce 1995. Obě úlohy musely vzniknout ve stejném období a není tedy možné, aby

od sebe autoři „opisovali“. Pro srovnání obě úlohy níže uvádíme. U úlohy z MFO se jedná o upravený český překlad, který je dílem autorů tohoto příspěvku, originál navržený australskými autory po úpravách vyplývajících z diskuse mezinárodní rady je k dispozici na webu [1]. Úloha J. Slabeycia je převzata z publikace [2]. V obou úlohách se řeší šíření zvukového „paprsku“, jedná se tedy o analogii s geometrickou optikou. Velmi zajímavá úloha na toto téma byla zadána v celostátním kole letošního ročníku FO na Slovensku. Zadání i řešení úlohy „Stan ako akustická šošovka“ naleznete na webu [3].

S šířením zvukových vln je neodmyslitelně spojen Dopplerův jev. Úloh s akusticko u motivací postavených na Dopplerově jevu se ve FO objevilo několik. Příkladem může být např. série úloh D. Kluvance z 39. ročníku slovenské FO. V krajském kole kategorie A byla např. zadána úloha „Koncert v autobuse“, v kole celostátním úloha „Siréna sanitky“. Texty těchto úloh jsou např. v publikaci [2]. V tomto příspěvku ale představíme úlohu novější, z 54. ročníku FO na Slovensku, tedy ze školního roku 2013/14. Úloha má stejný název jako úloha J. Slabeycia „Sonar“ a jejími autory jsou L. Konrád a D. Nemeč. Znění úlohy je také dostupné na webu [4].

Úloha z 37. ročníku FO na Slovensku: Sonar

Na zisťovanie lodí plávajúcich na hladine používajú na ponorkách sonar (akustický radar), ktorý využíva šírenie zvuku vo vode. Voda v mori sa v dôsledku zmeny tlaku a chemického zloženia vyznačuje premennou rýchlosťou zvuku s meniacou sa hĺbkou. Uvažujte ponorku, ktorá sa nachádza v hĺbke $h = 500$ m pod hladinou. Rýchlosť zvuku vo vode pri hladine je $c_0 = 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a na úrovni ponorky $c = 1480 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

- Dokážte, že v prípade lineárneho poklesu rýchlosti zvuku vo vode s hĺbkou majú lúče zvukovej vlny tvar kružnic a určte polomer zakrivenia lúča v závislosti od počiatočného uhla medzi smerom lúča pri hladine a kolmicou k hladine.
- V akej maximálnej vodorovnej vzdialenosti (mera-nej od bodu na hladine zvislo nad ponorkou) je so-



Česká reprezentace IPhO Austrálie 1995: čtyři z pěti studentů a vedoucí prof. Ivo Volf a prof. Bohumil Vybíral v doprovodu dvou českých exulantů z roku 1968 (muži na okraji skupiny) při prohlídce Sydney.