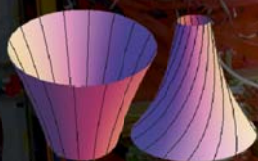


3/2012

ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS PRO FYZIKU



Rychlost neutrin
teorií relativity
nakonec
neotřásla

Urychlovače
nabitých částic

Periodická
řešení
Einsteinových
rovníc

Vodík v počítači,
v laboratoři
a ve vesmíru

Index lomu
vzduchu

Hodnocení
výsledků
výzkumu

ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS PRO FYZIKU

3/2012

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: červen 2012
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 Fárnik, Jiří Limpouch,
Peter Lukáč, Jan Mlynář, Karel Rohlena,
Patrik Španěl, Jan Valenta, Vladimír Vetterl,
Vladimír Wagner

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

**Sekretariát redakce –
Editorial Office Administration:**
Marie Niklová, 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://cscasfyz.fzu.cz

Jazyková úprava:
Stanislava Burešová, Lýdia Murtinová

Technický redaktor, DTP a grafik:
© 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

Registrace: MK ČR E 3103,
ISSN 0009-0700 (Print),
ISSN 1804-8536 (Online).

Copyright © 2012
Institute of Physics of the ASCR, v. v. i.

Editorial



Vážení čtenáři,

toto číslo otevírá aktualita vysvětlující příčiny chybného měření rychlostí neutrin v experimentu OPERA. Minulý rok vzbudily značnou pozornost odborné i laické veřejnosti oznámené hodnoty přesahující rychlost světla ve vakuu. Nyní se celá věc vysvětlila experimentálním pochybením. Speciální teorii relativity tedy není třeba nijak upravovat.

Předkládané číslo je zajímavé dvěma pokusy o přiblížení práce teoretických a matematických fyziků čtenářům našeho časopisu. Z podstaty věci na ně tyto příspěvky kladou poměrně vysoké nároky, avšak věříme, že zisk z porozumění zajímavé a užitečné matematice a fyzice onu námahu a koncentraci čtenáři bohatě vynahradí. Ve zkratce pojednává J. Musilová a M. Lenc o pozoruhodných vlastnostech a souvislostech odezвовých funkcí. Kromě užitečné a zajímavé fyziky navštívíme i matematický svět funkcí komplexní proměnné. Další text tohoto typu naleznete mezi referáty. M. Scholtz nás seznámí s vyšetřováním periodických řešení Einsteinových rovnic. Na tomto poli získal výsledky oceněné čestným uznáním v soutěži o Cenu Václava Votruby za rok 2011. K soutěži samotné (a nejen k ní) pak závěrem čísla přinášíme rozsahem nevelkou, avšak podnětnou úvahu předsedy výboru soutěže P. Exnera.

Dva referáty jsou věnovány problematice urychlovačů nabitých částic. M. Marčíšovský pojednal o americkém Tevatronu, jehož činnost byla nedávno ukončena. Článek shrnuje významné objevy elementárních částic, jichž bylo na tomto zařízení ve Fermilabu dosaženo. I. Janovský a Č. Šimáně podávají přehled historie a současnosti lineárních urychlovačů provozovaných v českých zemích. V některém z příštích čísel přineseme pokračování zaměřené na kruhové urychlovače. Příspěvek M. Čížka ukazuje, jak výpočty a laboratorní experimenty v oboru atomové a molekulové fyziky ovlivňují astrofyzikální a kosmologické představy a modely. Ze sféry technické fyziky přichází příspěvek o vlivu složení a stavu vzduchu na jeho index lomu v optickém spektrálním oboru. Referát S. Kučery dále popisuje, jak fluktuace indexu lomu vzduchu ovlivňují velmi přesná laserová interferometrická měření délek.

K diskusi o hodnocení a řízení vědy a vysokého školství jistě přispěje článek J. Pišúta o slovenské Akademické rankingové a ratingové agentuře (ARRA). Myšlenka vyvedení hodnotících aktivit mimo státní, na výsledku přímo zainteresované instituce do agentury popisovaného typu rozhodně stojí za úvahu. Vzhledem k tomu, že oba aktuální pokusy o hodnocení vědeckého výkonu skončily v ČR velmi špatně, měli bychom slovenskou zkušenost s ARRA pečlivě prozkoumat a pokud možno se jí inspirovat.

Opět přinášíme úlohy mezinárodních kol fyzikální olympiády. Jsou věnovány fyzice černých děr a Čerenkovovu záření. Číslo uzavírá vzpomínka na nedávno zesnulou Milenu Závětovou, významnou fyzičku, bádařící především na poli optických vlastností amorfních polovodičů.

Libor Juha
vedoucí redaktor



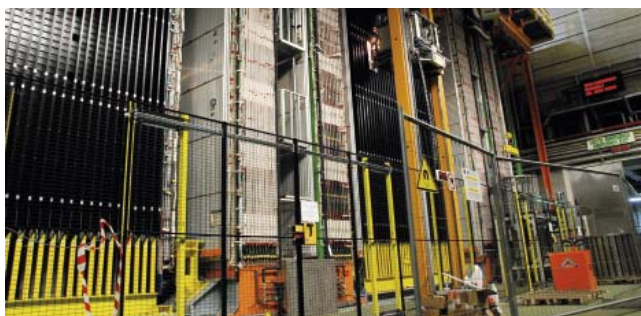
Obsah

AKTUALITY

Třetí dějství OPERY: konec neposlušných neutrin

144

Jiří Chýla

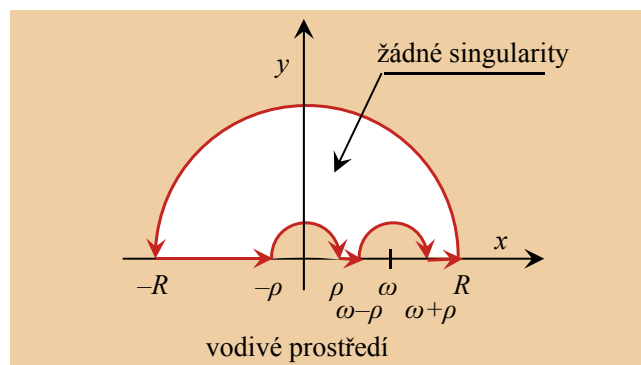


VE ZKRATCE

Jak interpretovat odezвовé funkce

147

Jana Musilová, Michal Lenc



REFERÁTY

Fermiho národní laboratorium (Fermilab) a urychlovač Tevatron

151

Michal Marčíšvský



REFERÁTY

Historie a současný stav urychlovačů částic v českých zemích

157

I. Lineární urychlovače

Igor Janovský, Čestmír Šimáně

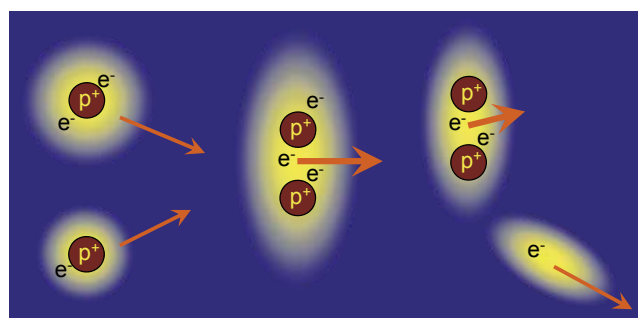


REFERÁTY

Jak souvisí tvorba prvních molekul a prvních hvězd ve vesmíru?

169

Martin Čížek

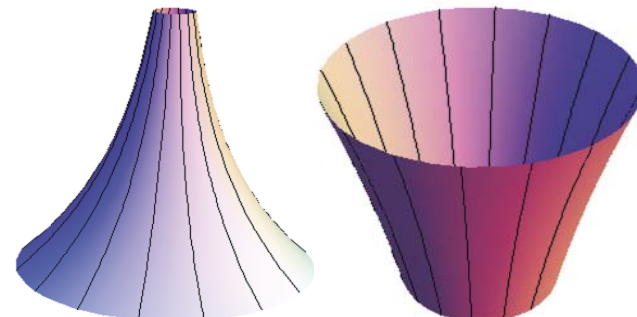


REFERÁTY

Periodická řešení Einsteinových rovnic

173

Martin Scholtz

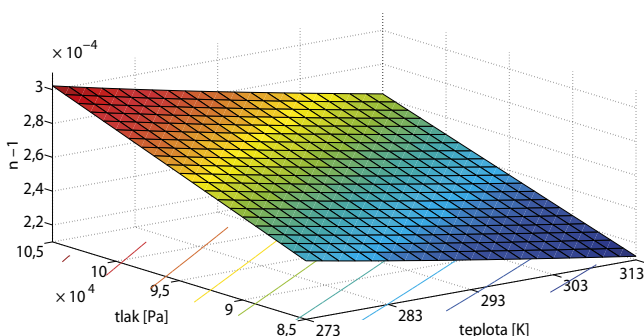


REFERÁTY

Index lomu vzduchu v laserové metrologii

Stanislav Kučera

191

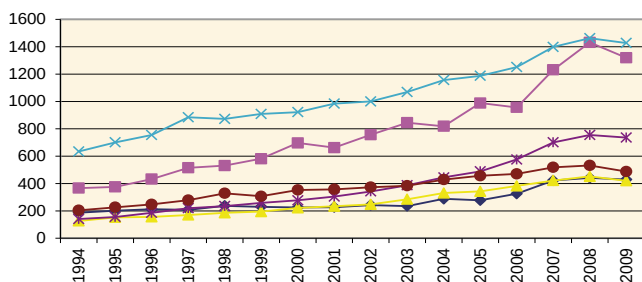


OTÁZKY A NÁZORY

O histórii a práci Akademickej rankingovej a ratingovej agentúry (ARRA) na Slovensku

Ján Pišút

196

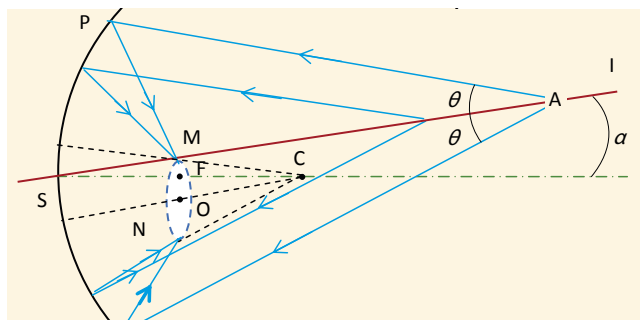


MLÁDEŽ A FYZIKA

Ukážky moderných teoretických úloh z Mezinárodní fyzikální olympiády

Jan Kříž, Bohumil Vybíral, Ivo Volf

203



ZPRÁVY

Vzpomínka na Milenu Závětovou

Vladimír Vorlíček, Josef Zemek

209



ZPRÁVY

O Votrubově ceně a soutěživosti

Pavel Exner

211



RECENZE KNIH

Petr Kulhánek:

Úvod do teorie plazmatu

Viktor Martišovits

212

A. M. Zagoskin:

Quantum Engineering.

Theory and Design of Quantum Coherent Structures

Karel Výborný

213



Třetí dějství OPERY: konec neposlušných neutrin

Jiří Chýla

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

Je tomu více než půl roku, co svět obletěla zpráva, která mnohým, veřejnosti i odborníkům, vyrazila dech: zdá se, že Einstein se mýlil a světlo lze i ve vakuu (v prostředí to není problém) předběhnout.

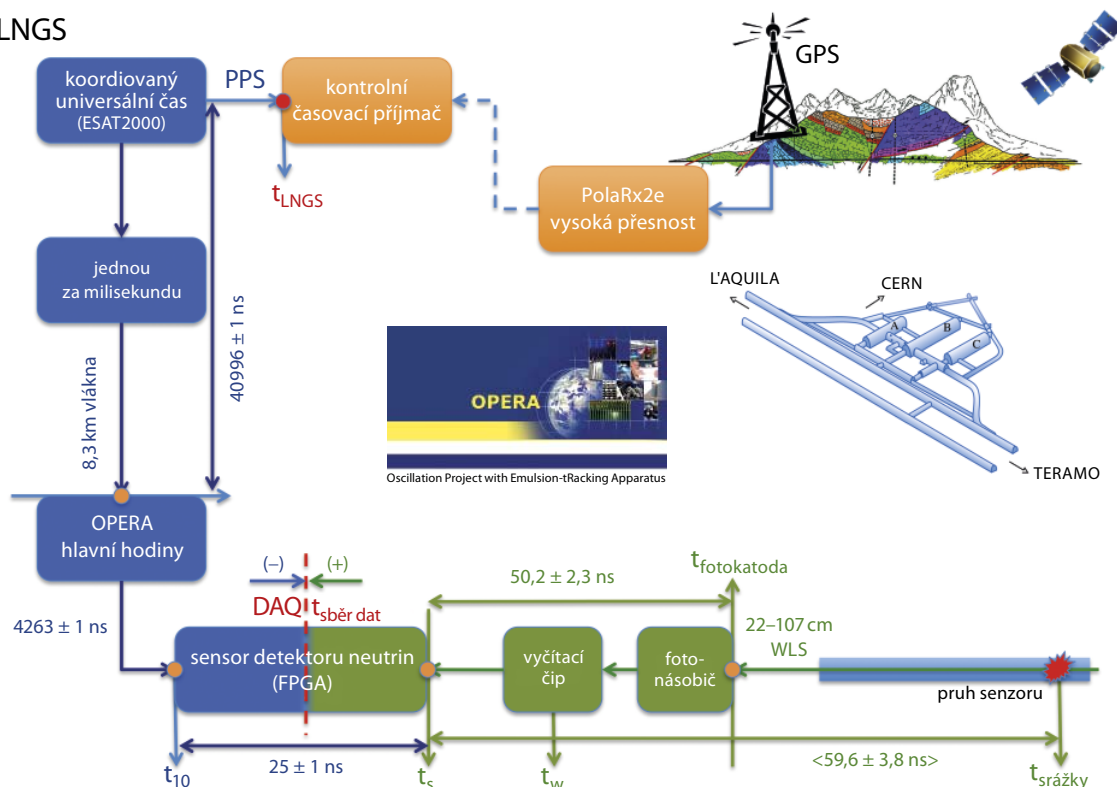
Tou neposlušnou částicí, která tohle měla dokázat, bylo neutrino, přesněji řečeno mionové neutrino vyrobené v CERNu při srážkách protonů s protony. V předchozím článku pro tento časopis [1] jsem popsal původní uspořádání experimentu OPERA s dlouhými pulzy neutrin a krátce zmínil i jeho modifikaci s velmi krátkými pulzy, jež výsledek měření rychlosti neutrin v původním uspořádání potvrdila. Protože tak zásadní objev, který by narušil jeden ze dvou hlavních pilířů moderní fyziky (druhým je kvantová teorie), bylo nutné podrobit dalším zevrubným prověrkám, a to jak v rámci samotného experimentu OPERA, tak především v jiných nezávislých experimentech, byl plánován na květen letošního roku další

běh experimentu OPERA s ještě jiným uspořádáním svazku neutrin.

Mezitím však došlo k vývoji, který situaci dramaticky změnil. Popíši sled klíčových událostí tak, jak je veřejnost zná dnes, resp. od konce února, ale které musely členy kolaborace zneklidňovat již od počátku prosince minulého roku. Ještě předtím však připomenu klíčový obrázek uspořádání sběru signálů z detektoru a základní metodu analýzy, jež byla společná prvnímu (tj. s dlouhými pulzy neutrin) i druhému (s krátkými pulzy) „dějství OPERY“.

Na obrázku 1 převzatém z původní práce OPERA [2] je schéma časovacího systému experimentu OPERA. Modře označená zpoždění oproti okamžiku sráž-

LNGS



Obr. 1 Schéma časovacího systému experimentu OPERA v LNGS. Modře označená zpoždění oproti okamžiku srážky v detektoru mají tu vlastnost, že při jejich růstu se δt zmenšuje, zatímco při růstu zeleně označených zpoždění δt roste. Převzato z [2].

Jak interpretovat odezvvové funkce

$$I = -\frac{\pi}{\sin \pi \alpha} \exp(-i \pi \alpha) \sum_k$$

$$\tilde{\varepsilon}(\omega) - 1 = K \int_{\omega_g}^{\infty} \frac{\sqrt{\omega' - a}}{\omega' \left[(\omega')^2 - a^2 \right]}$$

Jana Musilová, Michal Lenc

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, 611 37 Brno

V optických úlohách a experimentech se často setkáváme s konstatováním, že index lomu a index absorpce látky, resp. její dielektrická susceptibilita či permitivita, z níž jsou odvozeny, tvoří komplexní veličiny a jsou závislé na frekvenci, popřípadě vlnovém vektoru světla, jehož prostřednictvím látku zkoumáme. Na druhé straně víme, že dielektrická permitivita, resp. susceptibilita, svazuje intenzitu elektrické komponenty elektromagnetického pole (podnět) a indukci, resp. polarizaci (odezva), které jsou obecně funkcemi času a prostorových souřadnic. Jak získáme závislost na frekvenci či vlnovém vektoru a k čemu to je dobré? Uvidíme, že za vším je obecně platný princip příčinnosti.

Úvod: Optický experiment a optická odezva

Optické experimenty slouží k získání dat pro ověření mikroskopických modelů veličin popisujících optickou odezvu látky na vnější podnět. Měřenou veličinou bývá odrazivost R (podíl intenzity odraženého a dopadajícího světla), jejíž spektrální závislost $R(\omega)$ na kruhové frekvenci světla ω je přímým výsledkem experimentu. Odrazivost umožňuje snadno určit modul koeficientu odrazivosti, chápaného jako komplexní veličina tvaru $\tilde{r}(\omega) = \rho(\omega) \exp[i\theta(\omega)]$ (pro přehlednost budeme komplexní funkce označovat vlnovkou). Platí $R(\omega) = |\rho(\omega)|^2$. Vypadá to, že při měření odrazivosti se „ztrácí“ informace o fázi $\theta(\omega)$. Měřením při jedné hodnotě frekvence ji skutečně neurčíme. Je-li však k dispozici spektrální závislost $R(\omega)$ v dostatečně velkém rozsahu frekvencí, můžeme fázi vypočítat pomocí *Kramersovy-Kronigovy relace* (KKR) představující integrální vztah mezi spektry odrazivosti a fáze,

$$\theta(\omega) = -\frac{\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\ln[R(x)/R(\omega)]}{x^2 - \omega^2} dx. \quad (1)$$

Index lomu n a index absorpce k , resp. dielektrická permitivita souvisí s koeficientem odrazivosti známými Fresnelovými vztahy. Například pro kolmý dopad světla na rovinný povrch látky je

$$\tilde{r}(\omega) = \rho(\omega) \exp[i\theta(\omega)] = \frac{n(\omega) + ik(\omega) - 1}{n(\omega) + ik(\omega) + 1},$$

$$\tilde{\varepsilon}(\omega) = [\tilde{n}(\omega)]^2 = [n(\omega) + ik(\omega)]^2. \quad (2)$$

Otázkou je, kde se vzala KKR pro fázi a zda platí podobné vztahy pro reálnou a imaginární část veličiny $\tilde{\varepsilon}(\omega)$ či pro index lomu a index absorpce. Tuto otázku za chvíli zodpovíme.

Všimněme si problematiky optické odezvy na příkladu. Jedná se o vztah mezi intenzitou $\vec{E}$ elektrického pole (podnět) a polarizací $\vec{P}$ nebo indukcí $\vec{D}$ (odezva). Každý se jistě setkal s velice jednoduchým lineárním tvarem pro izotropní prostředí



Hendrik
Anthony
Kramers,
1894–1952.
(zdroj: AIP)

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \alpha \vec{E} \text{ nebo } \vec{D} = \varepsilon_0 (1 + \alpha) \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}.$$

V něm $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ je permitivita vakua a ostatní veličiny obecně závisejí na poloze (nehomogenní pole) a na čase (časově proměnná pole), $\alpha = \alpha(\vec{r}, t)$ je *dielektrická susceptibilita* nebo též *polarizovatelnost*, která představuje *odezvvovou funkci*. Takový *lokální a synchronní* vztah, kdy je odezva v daném místě a čase jednoznačně dána podnětem v tomtéž místě v tomtéž čase, je však možné předpokládat jen tehdy, kdy prostředí „stihne“ sledovat změny podnětu. Pro změny na úrovni optických frekvencí, řádově $(10^{14} \div 10^{16} \text{ s}^{-1})$, tomu tak rozhodně není. Obecně závisí odezva v daném místě $\vec{r}$ a čase t na podnětu ve všech bodech prostoru (na bližších více, na vzdálenějších méně) a ve všech okamžicích, které ovšem okamžiku t předcházejí (princip příčinnosti). Při zachování linearit tak můžeme problém optické odezvy popsat nelokálním a nesynchronním, avšak *příčinným vztahem*, který má pro homogenní prostředí tvar *konvoluce*

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \int \alpha(\vec{r} - \vec{r}', t - t') \vec{E}(\vec{r}', t') dt' d^3 \vec{r}',$$

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{P}(\vec{r}, t). \quad (3)$$

Integračním oborem je časoprostorový kužel odpovídající minulosti události $(\vec{r}, t)$. Poznamenejme, že pro nehomogenní prostředí by odezvvová funkce mohla ještě zvlášť záviset na pro-

Fermiho národné laboratórium (Fermilab) a urýchľovač Tevatron

Michal Marčíšovský

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze, Břehová 7, 115 19 Praha 1
Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 1999/2, 182 21 Praha 8; marcisov@fzu.cz

Urýchľovač Tevatron v laboratóriu Fermilab (Batavia, Illinois) bol po takmer tri desaťročia najvýkonnejším colliderom na svete, s nástupom LHC (Large Hadron Collider, CERN) v Ženeve boli jeho dni spočítané a koncom septembra 2011 ukončil svoju činnosť. Jeho výsledky sa zapísali do dejín fyziky a aj na ich základe sa formuloval fyzikálny program LHC. Tevatron slúžil od prvých zrážok úctyhodných 25 rokov a minulý rok odovzdal štafetu do Európy.

Začiatky

História Fermilabu (<http://history.fnal.gov/>) je nerozlučne spojená s menom Robert Rathbun Wilson, ktorý bol menovaný splnomocnencom Rady amerických univerzít URA (Universities Research Association) pre nové národné laboratórium časticovej fyziky (National Accelerator Laboratory, NAL). Na základe svojich skúseností experimentálneho fyzika, najmä však kvôli požiadavke fyzikov na spravodlivý prístup k časticovým zväzkom, sa Wilson podujal postaviť laboratórium, ktoré by bolo „rajom pre fyzikov“. Do tej doby prebiehal výskum v univerzitných výskumných centrách (napr. SLAC, Cornell, Berkeley) a fyzici z inštitúcií, ktoré nevlastnili urýchľovače, boli odkázaní na dobrú vôľu veľkých výskumných centier pokiaľ išlo o zdieľanie času na urýchľovači. Po odsúhlasení rozpočtu na stavbu NAL sa v roku 1968 začalo budovať doslova na zelenej lúke [1].

V roku 1972 bol uvedený do prevádzky v tom čase najvýkonnejší urýchľovač sveta – Main Ring, ktorý urýchľoval protóny na energie až 200 GeV, o rok neskôr boli dosiahnuté energie dvojnásobné. Urýchľovač dodával pre experimenty zväzky protónov, po zrážke s pevnými terčmi aj zväzky neutrín a mezónov. Počas obdobia, kedy sa experimenty v laboratóriu uvádzali do prevádzky, nastala vo svete fyziky častic tzv. Novembrová revolúcia, a tak objav častice J/Ψ (vektorového mezónu, viazaný stav c a $\bar{c}$ kvarkov) v roku 1974 unikol jednak laboratóriu čerstvo premenovanému na Fermilab, tak aj európskemu CERNu.

Objav b kvarku

Objav najťažšieho variantu elektrónu, leptónu τ , v laboratóriu SLAC v roku 1975 naznačil existenciu tretej generácie fermiónov, výskyt ktorej teoretici predpove-

dali už niekoľko rokov. Vo svete sa rozbehlo hľadanie a v lete roku 1977 bola po istých peripetiách vo Fermilabe v experimente E288 pod vedením Leona Ledermana objavená častica nazvaná Υ s hmotnosťou $9,5 \text{ GeV}/c^2$ v rozpadovom kanáli $\mu^+\mu^-$ [2]. Táto častica bola interpretovaná ako vektorový viazaný stav b (bottom alebo tiež beauty) a $\bar{b}$ kvarkov, ktorý vznikol pri dopadoch protónových zväzkov s energiou 400 GeV na platínový terč. Hybnosti produktov sa merali dvojramenným magnetickým spektrometrom. Ďalšie skúmanie v rozpadovom kanáli $\mu^+\mu^-$ prinieslo objav excitovaných



Obr. 1 Dominanta laboratória – Wilson Hall. Zdroj: FNAL.

Historie a současný stav urychlovačů částic v českých zemích

I. Lineární urychlovače

Igor Janovský^a, Čestmír Šimáně^b

^a Národní technické muzeum, Kostelní 42, 170 78 Praha 7

^b Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i., 250 68 Řež u Prahy

Úvodem podáváme krátký pohled na celosvětový vývoj urychlovačů částic. Pozornost je věnována především těm typům, které našly uplatnění u nás. Postupně jsou pak probrány lineární elektrostatické urychlovače, jako Cockroftův-Waltonův a Van de Graaffův generátor, Dynamitron, Tandetron aj. Následují lineární vysokofrekvenční urychlovače pro radiační technologie, defektoskopii a radioterapii.

ÚVOD – KRÁTKÝ POHLED DO HISTORIE URYCHLOVAČŮ

Dříve než přejdeme k vlastnímu tématu, považujeme za vhodné představit krátký historický celosvětový přehled vývoje urychlovačů částic od jejich počátků až do dnešního dne. V tomto úvodu se však omezíme především na typy urychlovačů částic, které našly uplatnění nebo byly vyvinuty a postaveny i v bývalém Československu a v současné České republice. Z historického přehledu tedy vyjímáme urychlovače sloužící především výzkumu ve fyzice vysokých energií. Přesto však se alespoň v malém rozsahu dotkneme některých projektů těchto zařízení, k jejichž realizaci nedošlo. Podrobnější přehled lze najít v řadě monografií [1–5].

Z historického hlediska lze za zcela první urychlovač považovat již katodovou trubici z konce 19. století, kde částice byly urychlovány vysokým napětím mezi elektrodami. Experimenty s katodovými trubicemi vedly k objevu Roentgenových paprsků.

Co se týče vlastních urychlovačů částic, počáteční impuls v jejich vývoji představuje první umělá jaderná reakce uskutečněná E. Rutherfordem roku 1919, a to transformace jádra dusíku na kyslík prostřednictvím částic alfa emitovaných radiem a thoriem. Započala tím nová éra, kdy fyzikové poznali, že k uskutečnění jaderných reakcí potřebují umělé zdroje energetických částic a Rutherford roku 1927 ve své řeči přednesené před Královskou společností [6] vyjádřil naději, že se podaří generovat částice o energii vyšší, než produkují radioaktivní látky: „*It has long been my ambition to have available for study a copious supply of atoms and electrons which have an individual energy far transcending that*

of the α - and β - particles from radioactive bodies. I am hopeful that I may yet have my wish fulfilled....“

Kolem roku 1929 začínají snahy o první proměnu atomového jádra bombardováním urychlenými protony ve vysokonapěťových výbojových trubicích nebo vakuových komorách na čtyřech pracovištích: v Cavendishově laboratoři v Cambridge, v Oddělení geomagnetismu Carnegieho ústavu ve Washingtonu, v Radiační laboratoři a Oddělení fyziky Kalifornské univerzity v Berkeley a v Kelloggově radiační laboratoři Kalifornského technologického institutu v Pasadena [7]. S podporou Rutherforda uspěli jako první J. D. Cockroft a E. T. S. Walton v Cavendishově laboratoři, kteří v roce 1932 podali zprávu o úspěšné deintegraci jádra lithia protony o energii asi 400 keV. Datum této první transmutace bývá často považováno za výchozí bod v historii urychlovačů. Stojí za zmínku připomenout, že v téže laboratoři na tomtéž typu urychlovače pracoval před druhou světovou válkou československý fyzik, později profesor Karlovy univerzity Václav Petržílka, který tak byl prvním naším jaderným fyzikem využívajícím při svých, stále v literatuře citovaných pracích urychlovače protonů.

V dřívější souborné práci [8] použil jeden z autorů (I. J.) rozdělení historie urychlovačů podle vývojových fází, spojených vždy s nástupem nové koncepce urychlování. V tomto přehledu bylo zvoleno dělení na základní typy urychlovačů a v úvodu jsou uvedeny některé z jejich obecných charakteristik, upřesňované v dalších kapitolách pro jednotlivé konkrétní případy.

Do první kategorie patří lineární elektrostatické urychlovače sestávající z urychlovací trubice a zdroje potenciálu. K urychlování dochází v urychlovací trubici

Jak souvisí tvorba prvních molekul a prvních hvězd ve vesmíru?

Martin Čížek

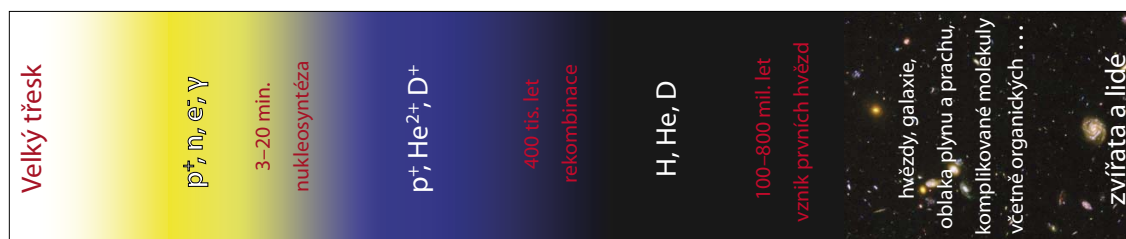
Ústav teoretické fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy v Praze, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8

Když se rozhlédneme kolem sebe, máme bezpočet příležitostí žasnout nad rozmanitostí světa, který nás obklopuje. Rozličné předměty neživé přírody i výtvary pokročilé civilizace, pestrost rostlinné i živočišné říše a nakonec i naše vlastní tělo překvapují mnohostí barev, vlastností a funkcí. Tato rozmanitost je umožněna tím, že látka je složena z atomů téměř stovky prvků, které jsou v dnešním vesmíru více či méně hojně zastoupeny. Věda se zabývá nejen studiem této rozmanitosti, ale jednou z klíčových otázek je rovněž to, co vedlo k jejímu vzniku. V polovině minulého století se v kosmologii objevila teorie velkého třesku. Jaderným fyzikům se podařilo spočítat, že když vesmír vychladl natolik, aby se zformovala samostatná jádra prvků, skládal se výlučně z atomů vodíku (včetně těžkého vodíku – deuteria) a helia s pouze stopovým zastoupením lithia a berylia. Veškeré bohatství těžších prvků, a tím i rozmanitost prostředí, které nás dnes obklopuje, je výsledkem syntézy jader probíhající v nitru hvězd. Její produkty byly následně, v průběhu více než deseti miliard let existence vesmíru, vyvrženy při zánících jednotlivých hvězd formou velkolepých explozí (při výbuších supernov).

Klíčovým okamžikem v této posloupnosti dějů, vedoucí až k naší existenci, je právě vznik prvních hvězd z materiálu tvořeného téměř výlučně vodíkem a heliem. Ukazuje se, že překvapivou roli v tomto procesu hrají molekuly vodíku, vlastně první molekuly ve vesmíru vůbec. V tomto článku bych chtěl čtenáři na posloupnosti (molekuly → hvězdy → prvky) přiblížit, jak je ve vesmíru překvapivě úzce svázáno mikroskopické s makroskopickým a jak spolupráce teoretických a experimentálních molekulárních fyziků s astronomy může přispět k objasnění tohoto řetězce dějů.

Počátek

Současné představy o vývoji vesmíru od velkého třesku až po dnešní stav jsou shrnuty ve formě časové osy na obr. 1 (o dobrodružství odhalování důkazů podporujících tyto představy se můžete dočíst například v [1]). V prvních zlomcích sekundy své existence byl vesmír natolik horký a hustý, že nelze mluvit o jednotlivých protonech a neutronech, natož pak jádrech atomů. Fyzikální vlastnosti vesmíru v tomto období popisují částicové teorie, ve kterých je navíc řada otevřených otázek. Na druhé straně několik minut po velkém třesku je vesmír již natolik chladný, že baryonová hmota je přítomna převážně ve formě protonů a neutronů, které se mohou spojovat do jader. K detailnímu modelování těchto procesů je potřeba znát účinné průřezy pro zachyt jednotlivých nukleonů na sobě navzájem, a to při energiích, které jsou již běžně dostupné v laboratorii. Model vývoje složení vesmíru v tomto období musí zahrnovat několik desítek jaderných reakcí fotonů, protonů a neutronů se vznikajícími jádry deuteria, tritia, ^3He , ^4He , případně těžších prvků. Pomocí takového modelu provedli již koncem 40. let Alpher s Gamowem a jejich následovníci [2] detailní výpočty vzniku jader atomů a povedlo se jim vysvětlit pozorovaný poměr počtu atomů vodíku a helia ve vesmíru (na jeden atom helia připadá dvanáct atomů vodíku). Ukazuje se, že z počátečního stavu složeného jen z fotonů, protonů a neutronů se po několika minutách vytvoří směs ionizovaného vodíku a helia, jejíž složení se již dále nemění a která neobsahuje žádné těžší prvky kromě stopového množství lithia a berylia. Tato směs se dále ochlazuje a po 400 000 letech vychladne natolik, že se elektrony zachytí na jádrech (rekombinují) a vytvoří se neutrální atomy.



Obr. 1 Časová osa vývoje vesmíru (délka jednotlivých úseků není ve stejné škále, konec osy, tj. stáří vesmíru, je 13,7 miliardy let). Významné časové milníky jsou vyznačeny červenými nápisy. Bílé nápisy udávají, z čeho je vesmír v daném období složen.

Periodická řešení Einsteinových rovnic

Martin Scholtz

Ústav aplikované matematiky, Fakulta dopravní ČVUT v Praze, Na Florenci 25, 110 00 Praha; scholtz@fd.cvut.cz

V newtonovské teorii gravitace jsou dobře známá přesná periodická řešení dvoučasticového systému, zatímco v obecné teorii relativity očekáváme, že periodická řešení Einsteinových rovnic nemohou popisovat izolované systémy. V článku podáváme rigorózní důkaz neexistence asymptoticky plochých periodických řešení Einsteinových rovnic a vysvětlujeme matematické metody v důkazu použité.

Úvod

Navzdory tomu, že fyzikové již léta usilují o nalezení sjednocené teorie kvantové gravitace, jedinou úspěšnou teorií gravitace zůstává Einsteinova obecná teorie relativity. Tato teorie zdárně prošla mnoha experimentálními testy a od jejího vzniku byly důkladně pochopeny mnohé její vlastnosti. Přesto i v rámci obecné teorie relativity existují dosud nezodpovězené otázky, z nichž některé jsou technického rázu, jiné bychom mohli označit za fundamentální.

Nejdůležitější předpovědi teorie relativity, která dosud nebyla přímo experimentálně ověřena, je existence gravitačních vln. Existence gravitačních vln byla dokázána pouze nepřímo měřením doby oběhu binárních systémů známých jako pulzary. Podle teorie relativity totiž binární systém (dvojhvězda) ztrácí energii vyzařováním gravitačních vln, což způsobuje, že součásti binárního systému se k sobě postupně přibližují a perioda jejich obíhání se zmenšuje. Pokles periody naměřený u pozorovaných pulzarů je plně v souladu s teorií relativity a představuje přesvědčivý, byť nepřímý důkaz existence gravitačních vln.

V newtonovské teorii gravitace mohou existovat izolované zdroje gravitačního pole, které se periodicky pohybují po uzavřených trajektoriích. Nejjednodušším příkladem periodického řešení je dvoučasticový neboli binární systém, kdy dva hmotné body obíhají po kruhových orbitách kolem společného těžiště stejnou úhlovou rychlostí ω . Podobné řešení existuje nejen pro hmotné body, ale i pro sférická tělesa tvořená ideální tekutinou. Typickými astrofyzikálními objekty, které taková řešení popisují, jsou dvojhvězdy. Podle newtonovské teorie gravitace mohou dvojhvězdy setrvávat v rovnovážném stavu nekonečně dlouhý čas.

V teorii relativity je situace jiná, neboť tělesa pohybující se po kruhových trajektoriích vyzařují gravitační vlny, podobně jako pohybující se náboje musejí vyzařovat vlny elektromagnetické. Vyzařováním gravitačních vln dvojhvězda ztrácí energii, a proto se její složky musejí postupně přibližovat. U dvojhvězd sestávajících z masivních neutronových hvězd nebo černých děr se předpokládá, že v závěrečné fázi sblížování, na jehož konci je vytvoření jediné černé díry, by gravitační záření mohlo být dostatečně intenzivní, takže by bylo možné detekovat jej pozemskými detektory.

Dospíváme tak k závěru, že izolované systémy se v teorii relativity nemohou pohybovat periodicky v důsledku postupné ztráty energie vyzařováním. To ovšem neznamená, že periodická řešení neexistují. Lze si představit, že energie odnášená odcházejícím zářením by mohla být kompenzována nějakým dopadajícím zářením, takže celková změna energie dvojhvězdy by byla nulová a periodický pohyb by byl možný. Taková řešení se nazývají *helikálně symetrická*. V elektrodynamice helicálně symetrická řešení skutečně existují (Schild [14]), přičemž dopadající záření se modeluje advansováním řešením Maxwellových rovnic. Protože advansování vlny efektivně představují vlny šířící se z přítomnosti do minulosti, nejsou tato řešení považována za fyzikálně realistická, přesto jejich existence vrhá určité světlo na vlastnosti příslušné teorie. V minulosti byly navíc pokusy vysvětlit strukturu elementárních částic jako vázané stavy bodových nábojů s helicální symetrií (Schild [15]).

Otázka, zda helicálně symetrická řešení existují i v teorii relativity, je otevřená. Není známo žádné helicálně symetrické řešení Einsteinových rovnic, ale samotný pojem helicální symetrie je v obecném zakřiveném prostoročase problematický

(Bonnazola [5], Friedman [8]). Na základě analogie s elektrodynamikou však lze očekávat, že helicálně symetrická řešení, ve kterých je vycházející záření kompenzováno zářením dopadajícím, existují.

Vedle čistě akademické otázky, zda tato nerealistická řešení alespoň v principu existují, zkoumání helicální symetrie má i praktický význam. Proces sblížování složek binárního systému, který jsme výše popsali, je samozřejmě natolik komplikovaný, že nalézt příslušné přesné řešení Einsteinových rovnic je nemožné a jeho analýza se opírá o numerické simulace. I tyto simulace jsou však značně náročné. Jeden z možných přístupů k simulaci uvedeného procesu spočívá v tom, že úvodní fáze celého procesu není simulována přesně, ale pomocí kvaziperiodických orbit, jejichž poloměr se postupně zmenšuje. V této počáteční fázi se tak během jednotlivých orbit předpokládá helicální symetrie celého systému. Když hvězda překoná hraniční orbitu označovanou jako ISCO¹, nelze již pohyb aproximovat helicální symetrií a následuje závěrečná fáze celého procesu, během níž je vyzařování gravitačního záření extrémně intenzivní a kterou je již nutné simulovat na bázi úplných Einsteinových rovnic. Pro tento přístup je důležité, zda je předpoklad o helicální symetrii v počáteční fázi kompatibilní s Einsteinovými rovnicemi.

Intuitivně je však zřejmé, že i když helicálně symetrická řešení existují, nemohou popisovat izolované zdroje gravitačního pole, neboť helicální symetrie vyžaduje přítomnost záření dopadajícího na uvažovaný systém, který tak přestává být izolovaný. V sekci 1 uvidíme, že gravitační pole izolovaných zdrojů je modelováno asymptoticky plochými prostoročasy. Očekáváme, že

¹ Innermost stable circular orbit neboli poslední stabilní kruhová orbita.

Index lomu vzduchu v laserové metrologii

Stanislav Kučera

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, Technická 3058/10, 616 00 Brno

Článek přináší stručný úvod do problematiky popisu, měření a vyloučení fluktuací indexu lomu vzduchu, s konkrétní aplikací v laserové metrologii. Rozebírá Edlénovy formule, včetně historického vývoje dané problematiky. Popisuje parametry vzduchu s majoritním vlivem na průběh indexu lomu, kterými jsou: teplota, tlak, relativní vlhkost a zastoupení CO_2 , vztahy pro výpočet jsou platné pro vlnové délky v rozsahu 300–1 700 nm.

Úvod

Přesná znalost aktuální velikosti indexu lomu vzduchu je základním předpokladem pro využití možností, které poskytuje metrologie založená na principu měření velmi malých délek pomocí laserového svazku. Metoda laserové interferometrie využívá jako pomyslnou stupnici měřidla vlnovou délku laserového záření, v případě laserů využitelných v metrologii jde o rozsah vlnových délek odpovídající viditelné a blízké infračervené oblasti spektra, tedy stovek nanometrů. Základní úsek pomyslné stupnice lze dále dělit tzv. interpolací a dosáhnout rozlišení i desetin nm. V případě, že neznáme přesnou velikost vlnové délky v daném prostředí, přesnost měření je výrazně omezena. Vlnová délka záření ve vzduchu podstatně závisí na aktuálních atmosférických podmínkách, zejména na teplotě, tlaku, relativní vlhkosti (RV) a chemickém složení vzduchu. I malé změny zmíněných veličin, zvané fluktuace atmosféry, které probíhají neustále a je nutné jejich průběh zachytit, mají podstatný vliv na velikost indexu lomu vzduchu. Prakticky pozorovatelným, vůbec nejhorším vlivem je přítomnost pracovníka v laboratoři, který svojí činností ovlivňuje nejvýznamnější parametry – teplotu (tepelným vyzařováním těla, dýcháním), tlak (turbulence způsobené pohybem), relativní vzdušnou vlhkost a množství CO_2 , jakožto produkty dýchání. Přestože změny indexu lomu a tedy vlnové délky ve vzduchu probíhají nejvýše v řádu 10^{-4} , vysoká míra ovlivnění měřené délky je dána skutečností, že dráha laserového svazku v optické soustavě může dosahovat stovek tisíc až několika milionů násobků vlnové délky. Výsledný efekt nežádoucích změn na celé dráze svazku může dosahovat až několika vlnových délek, což výsledek měření zcela znehodnocuje. Fluktuace indexu lomu vzduchu způsobují nežádoucí posuv, indikovaný na výstupu interferometru. Zejména u velmi citlivých a pomalých měření nelze rozlišit, zda k němu dochází vlivem posuvu optického systému nebo změnou vlnové délky v prostředí (pokud toto není cílem u některých speciálních typů měření). Pokud jde o měření rychlých a velkých výchylek, lze nežádoucí nízkofrekvenční

fluktuace z výsledků měření odfiltrovat některou digitální metodou. V současné době je metoda laserové interferometrie využívána nejen k přesnému měření délkových posunutí a návazných geometrických veličin, ale i ke snímání vibrací, diagnostice povrchů, spektroskopii, testům optických systémů, studiu proudění plynů a plazmatu, měření elektrických a magnetických polí, koncentrací iontů a mnohých dalších veličin.

Index lomu

Elektromagnetické vlnění, a tedy i viditelné světlo, se šíří vakuem rychlostí c , přesně definovanou podle vztahu:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}, \quad (1.1)$$

kde $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ udává permitivitu vakua a $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ permeabilitu vakua. Jedná se o elektrické a magnetické vlastnosti prostředí.

V ostatních prostředích je rychlost šíření vlnění vždy menší:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}, \quad (1.2)$$

vztah pro výpočet se liší v přidáných konstantách ϵ_r , μ_r udávajících relativní permitivitu (dielektrická konstanta) a permeabilitu (magnetická konstanta) daného prostředí v poměru s těmito veličinami ve vakuu. Obě relativní konstanty pro vzduch nabývají hodnot jen o málo větších než 1, fluktuace parametrů atmosféry a jejího chemického složení mají vliv právě na permitivitu.

Ze vztahu mezi kmitočtem záření f , rychlostí šíření v a vlnovou délkou λ

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.3)$$

vyplývá přímá úměra mezi rychlostí šíření a vlnovou délkou za předpokladu, že frekvence záření je konstantní. Nutno uvést, že stabilita vlnové délky laserů ve vakuu dosahuje hodnoty minimálně $1 \cdot 10^{-8}$ (nejčastěji používaný plynový HeNe stabilizovaný v parách jodu). To je o 4 řády lepší hodnota než naprosto extrémní změny indexu lomu vzduchu způsobené kombinací

O histórii a práci Akademickkej rankingovej a ratingovej agentúry (ARRA) na Slovensku

Ján Pišút

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

ARRA Bratislava, Bárdošova 2/A, 831 01 Bratislava

Príspevok poskytuje osobný pohľad autora na históriu Akademickkej rankingovej a ratingovej agentúry (ARRA) a na niektoré výsledky jej činnosti. Väčšia časť textu sa zaoberá prípravou správ ARRA o hodnotení vysokých škôl a ich fakúlt, najmä hodnotením zverejneným v decembri roku 2011. Zvyšok textu hovorí o iných prácach ARRA, najmä o faktoroch, ktoré prispeli k úspešnej vedeckej práci súčasných vedeckých špičiek na Slovensku a o porovnaní výsledkov slovenskej vedy s okolitými krajinami a s priemerom OECD.

ARRA nedávno identifikovala a analyzovala špičkové tímy v ústavoch SAV. Hoci je to veľmi aktuálna téma, teraz sa ňou nebudeme z priestorových dôvodov zaoberať a možno sa k nej vrátime neskôr.

Úvod

Nedávno sa ma spýtal pán šéfredaktor „žltého časopisu“, či by som nespísal niečo o histórii a práci ARRA. Súhlasil som a neskôr som si uvedomil, že budem vedieť spísať len osobný pohľad na túto tému, ktorý bude nutne neúplný. ARRA pripravila počas svojej existencie viacero správ a analýz, z ktorých sa tu zmienim len o niektorých. Takýto výber závisí od autora a je nutne vychýlený. Navyše sa v takomto texte nedá vyhnúť chybám a nepresnostiam, vopred sa za ne ospravedlňujem. V príspevku budem hovoriť najmä o poslednej správe [1] ARRA z roku 2011. Okrem tejto témy spomeniem stručne výsledky výskumu faktorov [2], ktoré prispeli k rastu slovenských vedeckých špičiek. Považujem to za dôležitú tému, pretože ak chceme podporiť rast nových vedeckých špičiek, potrebujeme pre nich vytvoriť obdobné podmienky. Ako dôležité vidím aj porovnanie výsledkov výskumu na Slovensku s okolitými krajinami a s priemerom OECD [3]. Podľa môjho názoru sa týmito otázkami bude potrebné zaoberať aj v budúcnosti.

Prakticky veľmi dôležitou témou, ktorá by si zaslúžila samostatný príspevok je otázka financovania vedy a výskumu podľa ich výsledkov. Dobré dlhodobé výsledky majú v tejto oblasti vo Veľkej Británii. Na Slovensku sa k tomuto tiež pristúpilo, ale podľa môjho názoru, je potrebné schému použitú na Slovensku prepracovať a priblížiť ju skutočne k schéme používanej vo Veľkej Británii [4]. Informácia o metódach použitých na Slovensku je v prácach [5,6].

V osemdesiatych rokoch minulého storočia sa v časopisoch objavili prvé rebríčky vysokých škôl. Prvý z nich bol asi ranking amerických vysokých škôl v U. S. News & World Report v roku 1983, ďalšie boli publikované vo Veľkej Británii v Times Higher Education Supplement [7] a The Times Good University Guide a v Spolkovej republike Nemecko v Sterne a v Spiegeli. Známe rebríčky publikuje Shanghai Jiao Tong University, tzv. Šanghajskej rebríček. Isté informácie o kvalite vysokých škôl sa objavili v denníkoch a v týždenníkoch aj v Slovenskej a v Českej republike. ARRA má dlhodobú spoluprácu s týždenníkom TREND, v ktorom sa začiatkom decembra objavujú podstatné výsledky z každoročného hodnotenia vysokých škôl a ich fakúlt.

Cieľom publikovaných rebríčkov má byť, okrem iného, pomôcť čitateľom a ich potomkom pri výbere univerzity, na ktorej budú študovať. Poznamenajme, že v jednom z výskumov ARRA sa ukázalo, že len asi štvrtina absolventov stredných škôl sa zaujíma o kvalitu vysokej školy, na ktorú si podávajú prihlášku. Je možné, že informácie o kvalite vysokých škôl majú aj pozitívny efekt na náklad časopisu.

Hodnotením kvality práce vysokých škôl a ich fakúlt sa zaoberajú aj akreditačné komisie. Na základe zákona o vysokých školách 172/90 zo 4. mája 1990, prijatého Federálnym zhromaždením, vznikli v Českej aj v Slovenskej republike Akreditačné komisie. Ich primárnou úlohou nie je ranking (zostavovanie rebríčkov) ale rating, teda odpoveď na otázku, či je fakul-

Ukázky moderních teoretických úloh z Mezinárodní fyzikální olympiády



Jan Kříž, Bohumil Vybíral, Ivo Volf

Ústřední komise Fyzikální olympiády, Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové, Rokitsanského 62, 500 03 Hradec Králové

V loňském roce jsme v Československém časopise pro fyziku prezentovali příklady úloh z Mezinárodních fyzikálních olympiád (MFO) věnované atomovému jádru u příležitosti 100 let Rutherfordova modelu, viz [1]. V úvodu k příkladům úloh jsme uvedli, že je na MFO možné zadávat i úlohy z poměrně moderní fyziky přesahující rámec běžných středoškolských znalostí. Potřebná teoretická fakta jsou soutěžícím předložena v úloze samotné. Rádi bychom zde uvedli dva příklady takovýchto velmi náročných úloh. První úloha se týká fyziky černých děr včetně jejich interakce s reliktním zářením a byla zadána soutěžícím na 38. MFO v Iránu v roce 2007. Druhý příklad je z roku 2008, z 39. MFO ve Vietnamu a pojednává o prstencovém Čerenkovově detektoru (RICH z anglického „Ring Imaging Cherenkov Counter“). Pro zajímavost uvádíme, že studenti mají 5 hodin času na řešení tří teoretických úloh podobného typu, jako jsou úlohy zde uvedené.

Původní texty íránských a vietnamských organizátorů v konečné podobě po diskusi mezinárodní jury jsou dostupné na internetové stránce MFO [2]. Úlohy do češtiny přeložili vedoucí české delegace Bohumil Vybíral a Jan Kříž.

Úloha z 38. MFO – Fyzika černých děr

Máme-li ve fyzice jakoukoli rovnost, resp. rovnici, musí být obě její strany stejného typu, tzn. musí mít stejný rozměr. Nemůžete mít například situaci, kdy veličina na pravé straně rovnosti reprezentuje délku a veličina na levé straně časový interval. Pomocí tohoto faktu můžete někdy odhadnout formu fyzikálního vztahu, aniž byste problém řešili analyticky. Například, máme-li za úkol určit dobu, za kterou spadne těleso z výšky h vlivem konstantního tíhového zrychlení g , můžeme argumentovat, že stačí nalézt veličinu s rozměrem času závislou jen na veličinách g a h . Jediný vztah, který tuto úlohu řeší, má tvar $T = a(h/g)^{1/2}$. Povšimněte si, že toto řešení obsahuje dosud neurčený koeficient a , který je *bezrozměrový*, a nemůže být tudíž určen touto metodou. Tento koeficient může být číslo jako 1, $1/2$, $\sqrt{3}$, π nebo jakékoliv jiné reálné číslo. Tato metoda odhadu fyzikálních vztahů se nazývá *rozměrová analýza*. V rozměrové analýze jsou

bezrozměrové koeficienty nepodstatné a nemusíme je psát. Naštěstí jsou tyto koeficienty ve většině fyzikálních problémů řádu 1 a jejich vynechání nemění řád velikosti fyzikálních veličin. Tedy použitím rozměrové analýzy na výše zmíněný problém dostáváme $T = (h/g)^{1/2}$.

Obecně se rozměry fyzikálních veličin píší pomocí rozměrů čtyř základních veličin: M (hmotnost), L (délka), T (čas) a K (teplota). Rozměr jakékoliv veličiny x značíme $[x]$. Jako příklad vyjádříme rozměry rychlosti v , kinetické energie E_k a tepelné kapacity C_V : $[v] = LT^{-1}$, $[E_k] = ML^2T^{-2}$, $[C_V] = ML^2T^{-2}K^{-1}$.

1. Fundamentální konstanty a rozměrová analýza

- Určete rozměry *fundamentálních konstant*, tj. Planckovy konstanty h , rychlosti světla c , gravitační konstanty G a Boltzmannovy konstanty k_B užitím délky, hmotnosti, času a teploty. Stefanův-Boltzmannův zákon říká, že intenzita vyzařování dokonale černého tělesa je rovna $\sigma\theta^4$, kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta a θ je absolutní teplota dokonale černého tělesa. Intenzita vyzařování je číselně rovna celkové energii vyzařené jednotkovou plochou povrchu za jednotku času, jde tedy o plošnou hustotu výkonu záření.
- Určete rozměr Stefanovy-Boltzmannovy konstanty pomocí rozměrů délky, hmotnosti, času a teploty. Stefanova-Boltzmannova konstanta není fundamentální konstantou a lze ji napsat pomocí fundamentálních konstant, tj. můžeme psát $\sigma = ah^\alpha c^\beta G^\gamma k_B^\delta$. V tomto vztahu je a bezrozměrový parametr řádu 1. Jak bylo zmíněno výše, přesná hodnota a není zde pro nás podstatná, položme ji tedy rovnou 1.
- Vypočítejte α , β , γ a δ pomocí rozměrové analýzy.

2. Fyzika černých děr

V této části úlohy bychom rádi našli některé vlastnosti černých děr pomocí rozměrové analýzy. Podle věty známé jako „*no hair theorem*“ („Černá díra nemá vlasy!“) závisí všechny vlastnosti černé díry pouze na její hmotnosti. Jednou z charakteristických veličin černé díry je plošný obsah povrchu jejího *horizontu událostí*. Zhruba řečeno, horizont událostí je hranicí černé díry. Pod touto hranicí je gravitace natolik

PETR KULHÁNEK

Úvod do teorie plazmatu

AGA 2011, ISBN 978-80-904582-2-2,

cena: 300 Kč

<http://www.aldebaran.cz/produkty/tpla/form.html>

Teória úplne ionizovanej plazmy sa neustále rozvíja pod vplyvom riešenia úloh súvisiacich s udržaním plazmy pomocou silných magnetických polí pri riadenej termionukleárnej syntéze, ale aj na vysvetlenie niektorých javov vo vesmíre. Teória používa komplikovaný matematický aparát (aj keď iba v rámci klasickej fyziky), ktorý vyžaduje dobrú teoretickú prípravu. Relatívne bohatá literatúra, ktorá priebežne vychádza z zahraničí, opisuje tieto javy vyčerpávajúcim, i keď nie vždy jednotným spôsobom. Úspešné pochopenie javov preto vyžaduje zvládnuť náročný matematický aparát najmä pri štúdiu nestabilit plazmy a šírenia rôznych druhov vln v plazme za prítomnosti magnetického poľa. Preto treba uvítať vydanie učebnice, ktorá vysvetľuje teoretický prístup k tejto problematike. Učebnica tak nadväzuje na dlhoročnú tradíciu českých teoretikov v oblasti interakcie vln a zväzkov nabitých častíc s plazmou.

Kniha (rozsah 375 strán) predpokladá základné poznatky z teoretickej mechaniky a štatistickej fyziky, ďalej znalosti z parciálnych diferenciálnych rovníc, komplexnej analýzy, všetko na úrovni bakalárskeho štúdia. Ostatný matematický aparát je priebežne vysvetľovaný v texte a v prípade náročnejších oblastí v pripojených dodatkoch.

Prvá kapitola opisuje pohyby nabitých častíc v homogénnom elektrickom i magnetickom poli. V krátkosti sa uvažujú aj relativistické pohyby. Ďalej autor vysvetľuje v adiabatickom priblížení (už nerelativisticky) základné driftové pohyby nabitých častíc v magnetickom poli pod vplyvom elektrických i neelektrických síl, nehomogenity magnetického poľa a v pomaly sa meniacom elektrickom poli (polarizačný drift). Odvodené sú adiabatické invarianty (prvý až tretí) a následne je vysvetlený princíp magnetického zrkadla a nakoniec dôsledky driftových pohybov na pohyb nabitých častíc v zrkadlových nádobách, v poli magnetického dipólu, v závitovom poli tokamaku a v azimutálnom poli plazmového vlákna (pinch effect). Záver kapitoly sa venuje numerickým schémam na simuláciu pohybu nabitých častíc v silových poliach (schéma leap-frog, Newtonova-Eulerova, Rungeho-Kuttova a tiež Borisova-Bunemanova). Všetky schémy sú uvedené aj v tvare vhodnom pre relativistické pohyby.

V druhej kapitole je uvedený štatistický opis plazmy. Jej úvod sa venuje kinetickej rovnici s rôznymi typmi zrážkového člena: Boltzmannov, Landauov, BGK a Vlasovov tvar. Nasledujú momentové rovnice a z prvých troch momentov sú potom odvodené jednoduché transportné a relaxačné javy v BGK priblížení: Ohmov, Fickov zákon, ambipolárna difúzia a transport tepla. Pre silné magnetické polia nasleduje vysvetlenie klasickej a Bohmovej difúzie. Veľký priestor v tejto kapitole je venovaný Coulombovej interakcii a Fokkerovej-Planckovej rovnici.

Konečný výpočet stredných hodnôt, ktoré vystupujú na pravej strane tejto rovnice, je vykonaný, v protiklade s mnohými knihami renomovaných autorov, veľmi presne pomocou Rosenbluthových potenciálov. Na základe získaných výsledkov sa diskutuje efekt ubiehajúcich (runaway) nabitých častíc a uvádza sa Spitzerov vzťah pre konduktivitu plazmy.

V závere kapitoly sú metódy Monte Carlo na simuláciu úloh v štatistickej fyzike: generátory náhodných čísel, realizácia požadovaného rozdelenia pravdepodobnosti (metóda strelby a superpozície, von Neumannov a Metropolisov algoritmus). Metóda Monte Carlo je aplikovaná na simuláciu zrážky dvoch nabitých častíc.

Magnetohydrodynamika je náplňou tretej kapitoly, kde sa plazma uvažuje ako spojité prostredie, pričom sa analyzujú momentové rovnice doplnené Maxwellovými rovnicami. Opisuje sa difúzia a zamŕzanie magnetického poľa v plazme. Nasleduje modifikácia Navierovej-Stokesovej rovnice pre elektricky vodivé prostredie. Uvedené poznatky sa aplikujú na prúdenie vodivých tekutín v magnetickom poli (Hartmannovo prúdenie), opis vln s konečnou amplitúdou (Alfvénove vlny), na helicitu v plazmových vláknach a stavy s minimálnou magnetickou energiou. Uvedené sú aj niektoré ap-

likácie v astrofyzike: tekutinové dynamo (omega a alfa efekt). Pozornosť je venovaná aj rekonekcií magnetických indukčných čiar. Gradova-Šafranovova rovnica, Benetova rovnováha a reverzný pinch predstavujú úvodnú náplň teórie rovnovážnych konfigurácií v plazme. Ako ďalšie rovnovážne útvary sú uvedené dvojvrstvá a prúdová stena a konečne nasleduje opis rázových vln v plazme.

Tretia kapitola končí metódami na numerické riešenie parciálnych diferenciálnych rovníc pomocou diferenčných schém. Vysvetľujú sa základné explicitné schémy (napr. Laxove-Wendrofove) aj implicitné schémy (Du Fortove-Frankelove, Crankove-Nicolsonovej a Richtmyerove-Mortonovej) a posudzuje sa ich stabilita.

Štvrtá kapitola je zameraná na lineárne vlny v plazme. Po vysvetlení základných pojmov sa opisuje spôsob odvodenia disperzných vzťahov (napr. pomocou Fourierovej transformácie) a ich fyzikálna interpretácia. Na jednoduchých prípadoch sa ilustruje postup na lineárnej teórii (elektromagnetické vlny) a taktiež aj na nelineárnej teórii (zvukové vlny). Ako príklad sa uvádza Jeansovo kritérium stability vesmírnych objektov. Po tejto príprave sa hľadajú disperzné vzťahy pre plazmové oscilácie a vlny bez prítomnosti magnetického poľa. Následne v magnetickom poli sa opisuje disperzný vzťah pre magnetoakustické vlny a určujú sa tvary vlnoploch pre Alfvénovu vlnu, pomalú a rýchlu magnetoakustickú vlnu. Analýzou disperzných vzťahov pre elektromagnetické vlny sa opisujú všetky hlavné typy vln, ktoré sa šíria pozdĺž i kolmo na magnetické pole. Tento prehľad končí zavedením Stixových koeficientov a zobrazením tvaru vlnoploch v CMA diagrame. V magnetosfére Zeme sa analyzujú nízkofrekvenčné pravotočivé vlny – tzv. hvizdy. No a nakoniec je odvodený tenzor permitivity pre elektromagnetické vlny šíriace sa v plazme v prítomnosti magnetického poľa.

Táto kapitola je doplnená matematickým aparátom na hľadanie koreňov polynómov v disperzných rovniciach. Uvádza sa Weylov a Newtonov algoritmus.

Piata kapitola je venovaná nestabilitám a mikronestabilitám plazmy. Najprv sa v neohraničenej studenej plazme skúmajú rôzne typy zväzkovej nestability (dvojzväzková, zväzok v plazme a Weibelova, resp. Bunemanova). Nasleduje teória nestabilit hranice plazmy a výmenných nestabilit pre rovinné i valcové rozhrania v prípade nekonečnej vodivosti plazmy. Teória je ilustrovaná na nestabilitách plazmového vlákna s prúdom tečúcim po jeho povrchu s diskusiou o stabilizujúcom účinku osového magnetického poľa. Ďalej sa vysvetľujú niektoré typy nestabilit rozhraní dvoch tekutín (Rayleighova-Taylorova, Kelvinova-Helmholtzova, diocotronová a Richtmyerova-Meškova

