

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Viktor Trkal; Vlastimil Matějec

Dvě jubilea: 110 let Planckovy konstanty a 50 let LASERu

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 56 (2011), No. 3, 207--212

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/142008>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2011

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



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

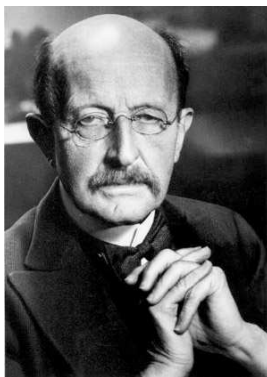
Dvě jubilea: 110 let Planckovy konstanty a 50 let LASERu

Viktor Trkal, Vlastimil Matějec, Praha

V minulém roce jsme si připomněli dvě jubilea. První se vztahuje k datu 14. prosince 2010, kdy uplynulo 110 let ode dne, kdy německý fyzik Max Planck zveřejnil svůj článek, v němž zavedl novou univerzální fyzikální konstantu:

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

Tím zahájil rozvoj kvantové mechaniky, neboť Planckova konstanta odráží velikost energetického kvanta. Za objev energetických kvant pak získal v roce 1918 Nobelovu cenu za fyziku [1]. Druhé, padesátileté, pak patřilo objevu laseru.



MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK, nositel Nobelovy ceny.

Nejprve věnujme svou pozornost prvnímu jubileu. Lze říci, že informace publikované v té době o Planckově konstantě zdaleka nenaznačovaly význam, který v dalších letech kvantová mechanika získala ve fyzice, chemii, biologii atp.

Planck zavedl tuto konstantu při svém pokusu vysvětlit výsledky německého fyzika *Gustava Kirchhoffa* v jeho vyzařovacím zákoně (1859), jenž říká, že při tepelné rovnováze záření uvnitř uzavřené dutiny nezávisí na materiálu dutiny [2]. Později se ukázalo, že při formulaci Kirchhoffova vyzařovacího zákona došlo k chybě a záření na materiálu dutiny závisí. Nezávislost na materiálu platí pouze pro absolutně černé těleso, pro které je vyzařovací zákon univerzálně platný. V praxi se vlastnostem absolutně černého tělesa blíží např. grafit [3]. Toto abstraktní černé těleso popsali Max Planck v roce 1901.

RNDR. VIKTOR TRKAL, CSc., ING. VLASTIMIL MATĚJEC, CSc.,
Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha-Kobylisy,
e-mail: viktor.trkal@seznam.cz, matejec@ufe.cz

Ukázal, že záření v dutině tělesa závisí pouze na vlnové délce a absolutní teplotě [4]. I když některé části této funkce byly již koncem 19. století popsány Wienovým či Rayleighovým-Jeansovým zákonem, celou funkci se popsat nepodařilo. Max Planck při pokusech odvodit Kirchhoffův vyzařovací zákon nejprve neúspěšně použil model lineárního oscilátoru a rovnic klasické termodynamiky.

V dalším pokusu postaveném na entropii a její vazbě na pravděpodobnost Planck ukázal, že pro výpočet pravděpodobnosti jisté distribuce energie v systému lineárních oscilátorů je třeba dvou univerzálních konstant. První z nich, tzv. Boltzmannova, souvisí s definicí absolutní teploty a byla zavedena na základě kinetické energie molekuly ideálního plynu. Je zajímavé, že tuto konstantu nikdy Boltzmann nezavedl a že byla prvně vypočítána na základě Wienova zákona. Teprve později byla její hodnota potvrzena na základě měření hmotnosti molekul plynu [5].

Druhou univerzální konstantu Planck nazval (vzhledem k fyzikálnímu rozměru) elementárním kvantem. A právě ta byla nezbytně nutná pro odvození správného vztahu pro entropii. Sám Planck zvažoval možnost, že zavedená konstanta je čistě fiktivní matematický prostředek bez fyzikálního významu, čímž se vyrovnal s tehdy přijímanou univerzální představou kontinuity základních fyzikálních veličin, zejména energie. Nakonec ale přijal jako fyzikálně reálný jiný pohled, v němž elementární kvantum odráží výměnu energie v diskretních kvantech o velikosti $h\nu$, kde ν je frekvence záření. Jeho práce byla z počátku přijata se značnou skepsí. Postupně však nalézala ve vědeckých kruzích pozitivní ohlas.

Především šlo o Alberta Einsteina, který pojem elementárního kvanta energie použil pro vysvětlení řady jevů souvisejících se zářením, ať již jde o Stokesova pravidla, ionizaci plynů nebo fotoelektrický jev.

U *fotoelektrického jevu* (1905) Einstein ukázal, že vznik proudu elektronů při osvětlení kovového materiálu UV světlem lze vysvětlit na základě kvantové teorie (za to dostal v roce 1921 Nobelovu cenu). Einstein použil spojení Planckovy představy o výměně energie v kvantech pro vysvětlení, proč energie fotoelektronů závisí pouze na frekvenci záření, které jejich emisi způsobilo a ne na jeho intenzitě. To mu umožnilo popsat foton jako částici s určitou hmotností. Tento jev je základem dnešní fotovoltaiky.

Jiný jev, který vyžaduje pro vysvětlení korpuskulární teorii záření, je *Comptonův jev* (1922). Dopadem rentgenova záření, tedy paprsků X, na látku z lehčích prvků se jejich frekvence sníží a z hmoty se uvolní elektrony. To lze vysvětlit nárazem částice X na klidný elektron. Při této srážce elektron převezme část energie částice X a dá se do pohybu. Ztráta energie částice X musí zase být rovna součinu $h\nu$ a tudíž frekvence záření po srážce je nutně menší než před srážkou. Teorii vypracovali nezávisle na sobě A. H. Compton a P. Debye a byla potvrzena pokusy.

Albert Einstein (1906) odvodil na základě představy kvantovaného harmonického oscilátoru výrazy pro závislost specifického tepla pevných látek na teplotě a zavedl pojem fononů jako kvantovaných kolektivních vibrací mřížky pevných látek. Jeho model dále rozšířil Peter Debye (1912), který uvažoval kvantované vibrace fononů v uzavřeném prostoru.

Připomeňme, že již v roce 1917 A. Einstein popsal stimulovanou emisi, která se stala teoretickým základem pro pozdější objev maserů a laserů [6]. Další příklady použití pojmu elementárního kvanta v počátcích kvantové fyziky lze nalézt v přednáškách M. Plancka [1] a [5].

M. Planck při odvozování „elementárního kvanta“ vycházel ze znalosti fyziky lineárních oscilátorů rozpracované Heinrichem Hertzem (1879), klasické elektrodynamiky a termodynamiky. Připomeňme, že mohl navázat na významné vědecké výsledky 19. století. Byla to Johnem Daltonem již v roce 1803 zavedená *nová atomová hypotéza*, dále zavedení pojmu „*atomové váhy*“, zákonů chemického slučování, pojmu „*molekuly*“ (A. Avogadrem) jakožto nejmenší částice sloučeniny. Michael Faraday objevil úzkou souvislost mezi hmotou a elektřinou a Dimitrij Ivanovič Mendělejev (1869) vytvořil periodickou soustavu prvků ve vztahu k „atomovým vahám“. Fyzikové se věnovali studiu katodových paprsků a Konrad Wilhelm Roentgen při tom objevil (1895) záření X po něm nazvané a dnes mnohostranně využívané téměř ve všech oborech lidské činnosti. J. J. Thomson (1896) zjistil, že katodové paprsky mají charakter částic se záporným nábojem. J. Stoney (1900) zavedl pro tyto částice název elektron. Nesmírně důležitý objev učinil Henry Becquerel (1896), když zjistil, že uran a jeho sloučeniny vysílají záření, které stejně jako paprsky X procházejí hmotami neprostupnými pro světlo. Tím byl položen **základ k atomové a jaderné fyzice**, která si svým významem v současném světě zaslouží samostatný příspěvek.

Tento výčet ukazuje na korpuskulární stavbu látek z diskrétních stavebních kamenů. V této souvislosti je zajímavé, že fyzici v té době obecně přijímali tyto korpuskulární představy o stavbě látek, ale vycházeli z předpokladu kontinuity hlavních fyzikálních proměnných, jako je energie, impuls atp.

Existovaly i další experimentální výsledky ukazující na diskrétní stránky spojitých fyzikálních jevů. Tyto výsledky souvisely zejména se světlem a jeho interakcí s látkami. Již v roce 1672 Isaac Newton objevil rozklad bílého světla hranolem na jednotlivé spektrální barvy tak, jak je známe z duhy. V roce 1864 zveřejnil James Clerk Maxwell svou elektromagnetickou teorii světla, záhy experimentálně prověřenou. V roce 1885 Johann Jakob Balmer publikoval svůj vztah vysvětlující viditelnou část vodíkového spektra. Dalšími pokusy bylo prokázáno, že vznik spektrálních čar různých prvků závisí na stavbě zkoumaných atomů. To byly tedy zhruba poznatky, které měl Max Planck k dispozici, když zavedl svou univerzální konstantu h .

Vývoj kvantové fyziky po zavedení Planckovy konstanty je spojen s řadou známých jmen. Mezi přední patří Niels Bohr se svým výkladem atomového spektra vodíku a modelem atomu. Upřesnění pak provedl Arnold Sommerfeld zavedením eliptických drah namísto Bohrových kruhových, následoval Louis de Broglie, který v roce 1924 obhájil doktorát za teorii hmotné elektronové vlny [7] a zavedl tím pojem korpuskulárně-vlnového dualismu částic. Za objev vlnového charakteru elektronů získal v roce 1929 Nobelovu cenu za fyziku. Z jeho představ vycházel Erwin Schrödinger, který v roce 1926 opublikoval svoji revoluční práci zavádějící vlnovou rovnici, spektrum energetických hladin a k tomu příslušných vlastních vlnových funkcí jako základ kvantové mechaniky [8]. I za tuto práci byla v roce 1933 udělena Nobelova cena za fyziku. Schrödingerova rovnice se stala základem pro výpočet energetických hladin a dalších vlastností atomů a molekul.

Podobný teoretický nástroj, jako je Schrödingerova rovnice, tj. maticovou formulaci kvantové mechaniky, zavedli v roce 1925 Werner Heisenberg spolu s Maxem Bornem a Pascuaelem Jordanem [9]. Se jménem Wernera Heisenberga je spojena kvantově-mechanická relace neurčitosti určující základní omezení v mikrosvětě, která byla oceněna Nobelovou cenou za fyziku v roce 1932 (viz [10]). Významný příspěvek k rozvoji

kvantové fyziky přinesl i Wolfgang Pauli, který v roce 1925 zformuloval známý vylučovací princip, který říká, že žádné dva fermiony (např. protony, elektrony) nemohou být ve stejném kvantovém stavu. To znamená, že tyto kvantové stavy musí být popsány alespoň jedním různým kvantovým číslem. W. Pauli byl oceněn Nobelovou cenou v roce 1945. K rozvoji kvantové teorie přispěla řada dalších vědců jako např. Paul Dirac, Enrico Fermi a další. O interpretaci výsledků získaných na základě kvantové teorie se do dnešní doby vedou diskuze [11].

Od zavedení Schrödingerovy rovnice řada odborníků rozvíjí metody pro její řešení. V této souvislosti lze připomenout jako jednu z prvních Hartreeovu-Fockovu metodu výpočtu energetických úrovní v mnohaelektronových atomech a molekulách. Tato metoda byla zavedena nezávisle D. R. Hartree (1926), J. C. Slaterem a V. A. Fockem (1930). Metoda využívá aproximace N -částicové vlnové funkce pomocí jednočásticových orbitálů. Každý orbitál je charakterizován čtveřicí vlastních (kvantových) čísel: hlavní n , úhlové l , magnetické m a spinové s . Více o tom nalezne čtenář v [12, 13].

Zatímco u prvních tří kvantových čísel lze vycházet z analogie s popisem klasickou fyzikou, čtvrté-spinové číslo je specifické jen pro kvantový popis. Již v roce 1921 provedli Otto Stern spolu s Walterem Gerlachem svůj známý pokus s úzkým paprskem atomů stříbra procházejícím ve vakuu nehomogenním magnetickým polem. Přitom došlo k rozdělení paprsku. Pozorovaný vliv nehomogenního magnetického pole souvisí s vlastním magnetickým momentem Ag atomů, rozdělení svazku ukazuje na kvantování tohoto momentu. Dalšími experimenty se prokázalo, že naprosto stejně se chovají atomy H, Li, Na, K, Rb, Cs, Cu a Au.

Vysvětlení tohoto jevu podali v roce 1925 G. E. Uhlenbeck a S. Goudsmit zavedením *elektronového spinu* (s), který může nabývat jen dvou hodnot ($+1/2h/2\pi$ nebo $-1/2h/2\pi$). Toto byl rozhodující experiment pro potvrzení kvantových stavů atomů i molekul a začátek *metody atomových a molekulárních svazků*.

Experimentální podklady o energetických poměrech u molekul poskytovala infračervená a později i mikrovlnná spektroskopie. Zde je třeba připomenout zásadní objev prvního zdroje mikrovlnného záření „magnetronu“ prof. A. Žáčka z roku 1924 [14]. Mikrovlnná spektroskopie se rozvíjela již od 30tých let minulého století a nabyla širokého uplatnění zejména těsně po ukončení II. světové války. Tak byly např. nalezeny dvě energeticky odlišné konfigurace molekuly NH_3 , které s využitím Rabiho metody molekulárního svazku, vycházejícího ze Sternova-Gerlachova experimentu, o němž již byla řeč, vedl k objevu NH_3 MASERu (MASER=Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) [15]. To pak dalo podnět ke vzniku *kvantové elektroniky*.

Obecně nejznámější a nejrozšířenější výsledek kvantové elektroniky je spojován s pojmem *LASER* (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Padesát let od jeho první realizace jsme si nedávno důstojně připomenuli. Tomuto významnému výročí bylo např. věnované obsáhlé dvojčíslo 4–5 (2010) Československého časopisu pro fyziku, kde čtenář může načerpat řadu poznatků o výzkumu laserů ve světě i v ČR. Další informace jsou uvedeny ve sborníku příspěvků z konference AV ČR Laser 50 v Třešti [16], nebo byly uvedeny na obrazové dokumentární výstavce na MFF UK, přenesené na jaře t.r. do vstupních prostor budovy presidia AV ČR na Národní třídě. Proto dále budou uvedeny pouze některé významné momenty z historie laserů.

Teoretické základy laserů a maserů, popisující absorpci, spontánní emisi a stimulovanou emisi světla, vycházely z kvantové teorie světla a byly publikovány A. Einsteinem

již v roce 1917 [6]. V roce 1939 V. A. Fabrikant navrhl použití stimulované emise pro zesílení „krátkých“ vln. V roce 1947 V. E. Lamb a R. C. Retherford experimentálně pozorovali stimulovanou emisi ve spektrech vodíku. V roce 1950 A. Kastler objevil princip optické excitace, za který se v roce 1966 stal spolunositel Nobelovy ceny. O dva roky později tento princip Brossel, Kastler a Winter experimentálně prokázali.

V roce 1953 Charles Hard Townes spolu se svými studenty realizovali první maser, který zesiloval mikrovlnné záření. Ten však neumožňoval kontinuální režim. Maser s kontinuálním režimem ve stejném období v Sovětském svazu realizovali N. Basov a A. Prokhorov. V roce 1957 C. H. Townes a A. L. Schawlow začali v Bell Laboratories intenzivně studovat možnost realizace „optických maserů“ pro infračervenou a viditelnou oblast spektra [17]. Bell Laboratories v roce 1958 zažádaly o patent na optický maser. Termín LASER byl poprvé zaveden Gordonem Gouldem v roce 1959 [18]. Je zajímavé, že G. Gould vedl patentový spor s Bell Laboratories, který vyhrál v roce 1987 a získal patent na laserové přístroje využívající optickou excitaci a výboj v plynech. Nakonec to nebyly ani Bell Laboratories, ani G. Gould, ale T. H. Maiman, který v roce 1960 ukázal fungování prvního laseru [19].

S kvantovou mechanikou je od roku 1967 neodmyslitelně spojena i realizace sekundy definované jako trvání 9 192 631 770 cyklů záření odpovídajícího přechodu mezi dvěma energetickými hladinami hyperjemné struktury základního stavu atomu nuklidu cesia ^{133}Cs . Pro tuto realizaci se využívá cesiový rezonátor (tzv. atomové hodiny), jehož základní formu vytvořil L. Essen se svými spolupracovníky [20]. Činnost tohoto rezonátoru vychází ze Sternových-Gerlachových a Rabiho pokusů. Tento rezonátor umožnil definici času využívající kvantové přechody a tím pak další rozvoj současné vědy včetně kosmonautiky.

Zavedením Planckovy konstanty h se podstatně změnil za uplynulých 110 let zcela náš svět poznání. Popsat vývoj tohoto poznání by si vyžádalo mnohem rozsáhlejší článek. Snad tato malá reminiscence nám všem připomene její význam a možná i vzbudí hlubší zájem o tuto problematiku.

L i t e r a t u r a

- [1] *Max Planck and the quanta of energy*. Nobel Prize Lecture. http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Extras/Planck_quanta.html.
- [2] KIRCHHOFF, G.: *Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht*. Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie 109 (1860), 275–301 [English translation - *On the relation between the radiating and the absorbing powers of different bodies for light and heat*. Phil. Mag., ser. 4, v. 20 (1860), 1–21].
- [3] ROBITAILLE, P.-M. L.: *Blackbody radiation and the carbon particle*. Progress in Physics 3 (2008), 36–55.
- [4] PLANCK, M.: *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*. Annalen der Physik 4 (1901), 553–563 [English translation by TER HAAR, D.: *M. Planck. On the theory of the energy distribution law in the normal spectrum*. The old quantum theory. Pergamon Press (1967), 82–90].
- [5] PLANCK, M.: *„Quantum Theory“ Lecture*. http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Extras/Planck_quantum_theory.html.

- [6] EINSTEIN, A.: *Zur Quantentheorie der Strahlung (On the quantum mechanics of radiation)*. Physikalische Zeitschrift 18 (1917), 121–128.
- [7] DE BROGLIE, L.: *Recherches sur la théorie des quanta (Researches on the quantum theory)*. Thesis, Paris 1924.
- [8] SCHRÖDINGER, E.: *Quantisierung als Eigenwertproblem*. Annalen der Physics 79 (1926), 361–376.
- [9] BORN, M., HEISENBERG, W., JORDAN, P.: *Zur Quantenmechanik II*. Zeitschrift für Physik 35 (1925), 557–615. [English translation in: VAN DER WAERDEN, B. L. (ed.), *Sources of quantum mechanics*. Dover Publications (1968).
- [10] HEISENBERG, W.: *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*. Zeitschrift für Physik 43 (1927), 172–198. [English translation: WHEELER, J. A. AND ZUREK, H.: *Quantum theory and measurement*. Princeton Univ. Press (1983), 62–84].
- [11] WITMER, E. E.: *Interpretation of quantum mechanics and future physics*. Amer. J. Phys. 35(1) (1967), 40–52.
- [12] TRKAL, V.: *Stavba atomů a molekul*. SNTL, Praha 1968 a 1980.
- [13] ECHENIQUE, P., ALONSO, J. L.: *A mathematical and computational review of Hartree-Fock SCF methods in quantum chemistry*. Molecular Physics: An International Journal at the Interface Between Chemistry and Physics, 1362–3028, Vol. 105, Issue 23 (2007), 3057–3098.
- [14] ŽÁČEK, A.: *Nová metoda k vytvoření netlumených oscilací*. Časopis pro přest. math. a fyz. 53 (1924), 378 a *Über eine methode zur erzeugung von sehr kurzen elektromagnetischen wellen*. Zeitschrift f. Hochfrequenztechnik 32, H.5 (1928), 172.
- [15] GORDON, J. P., ZEIGER, H.J., TOWNES, C.H.: *Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of NH₃*. Phys. Rev. 95 (1954), 282 a BASOV, N. G., PROCHOROV, A.M.: *Primenenie mekul-yarnykh puchkov dlya radiospektroskopicheskogo izucheniya vraschatelnykh spektrov molekul*. Z. Exper. Teoret. Fiziki 27 (1954).
- [16] Elektronická verze sborníků příspěvků multioborové konference Laser 50, Třeš u Jihlavy 4.-6.10. 2010, <http://alisi.isibrno.cz/upload/files/laser50-sbornik-prispevku.pdf>.
- [17] SCHAWLOW, A. L., TOWNES, C.H.: *Infrared and optical masers*. Phys. Rev. 112(6) (1958), 1940–1949.
- [18] GOULD, R. G.: *The LASER, „Light amplification by stimulated emission of radiation“*. FRANKEN, P. A., SANDS, R. H. (Eds), The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the University of Michigan, June 15–18, 1959.
- [19] MAIMAN, T. H.: *Stimulated optical radiation in ruby*. Nature 187(4736) (1960), 493–494.
- [20] ESSEN, L.: *An atomic standard of frequency and time interval: A caesium resonator*. Nature 176 (1955), 280–282.