

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Rudolf Zajac

Max Planck a vznik modernej fyziky

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 28 (1983), No. 6, 311--319

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137952>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1983

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>

Max Planck a vznik modernej fyziky

Rudolf Zajac, Bratislava

V dejinách fyziky nás fascinujú obdobia, v ktorých sa spolu s novými objavmi menia zaužívané, zdanlivo neotrasiteľné názory a vytvára sa nový fyzikálny obraz sveta. Takéto obdobia potrebujú veľikánov a rodia veľikánov. Prvým z nich v našom storočí bol Max Karl Ernst Ludwig Planck, ktorého 125. výročie narodenia si v tomto roku pripomínáme.

Planck nebol buričom, nevyvolal obdiv širokej mimofyzikálnej verejnosti, jeho osud – aj keď neľahký*) – nepodnecoval obrazotvornosť básnikov.

A predsa ho z hľadiska významu pre fyziku môžeme prirovnať ku Galileovi Galileimu. Podobne ako Galilei v 17. storočí začal Max Planck (aj keď nechtiac) revolúciu vo fyzike 20. storočia, z ktorej sa zrodili základy modernej prírodovedy**).

Max Planck pochádzal zo starej švábskej rodiny. Narodil sa 23. apríla 1858 v Kiele ako šieste dieťa v rodine Johanna Juliusa Wilhelma von Plancka, univerzitného profesora práva. Planckov starý otec a prastarý otec boli profesormi na teologickej fakulte göttingenskej univerzity. Bolo teda prirodzené, že Max Planck si po absolvovaní mníchovského gymnázia zvolil akademickú dráhu. Nebolo už tak samozrejmé, že sa rozhodol pre štúdium fyziky. V tom čase totiž prevládal názor, že fyzika už dovŕšila svoj historický vývin. Podobne ako v Mendelejevovej tabuľke prvkov mohlo byť v uzavretom systéme tejto vedy kde-tu prázdne okienko, ale nové, principiálne objavy sa už nepredpokladali†).

Vo svojej autobiografii [2]††) Planck pripisuje predovšetkým svojmu stredoškolskému profesorovi H. Müllerovi zásluhu o to, že sa rozhodol študovať fyziku. Zrelý Planck potom retrospektívne svoje rozhodnutie zdôvodnil aj hlboko filozoficky:

„Čo ma privedlo k mojej vede, a čo ma na nej od mladosti nadchýňalo, je vonkoncom nie samozrejماً skutočnosť, že zákony nášho myslenia súhlasia so zákonitostami, ktoré prijímame z vonkajšieho sveta tak, ako sa postupne odvíjajú naše dojmy a že teda človek môže tieto zákonitosti vysvetliť čiste myslením. Pri tom je podstatné, že vonkajší svet, voči ktorému sme postavení, je čímsi od nás nezávislým, absolútnym. Hľadať zákony, ktoré platia pre toto absolútno, javilo sa mi ako najkrajšie vedecké životné poslanie.“

Toto filozofické krédo zrelého Plancka (v mladosti bol stúpencom filozofie E. Macha)

*) V prvej svetovej vojne mu padol syn, obe dcéry zomreli v mladom veku, v januári 1945 popravili druhého Planckovho syna v súvislosti s represiami voči organizátorom atentátu na Hitlera 20. júla 1944. Posledný syn ho prežil o rok.

***) Netreba vari zdôrazniť, že dejiny sa nikdy doslova neopakujú. Kríza stredovekej fyziky si vynútila popretie starých názorov, kríza vo fyzike na prelome 19. a 20. storočia privodila napokon nový, moderný fyzikálny obraz sveta, ktorý klasickú fyziku nezavrhuje, iba obmedzuje oblasť jej platnosti [1].

†) Takýto názor zdieľal aj vtedajší profesor fyziky na mníchovskej univerzite Philipp von Jolly, u ktorého Planck potom študoval.

††) Vedecká autobiografia Maxa Plancka vyšla v preklade J. KOMRSKU a B. PROCHÁZKU v Čs. časopise pro fyziku *A 28* (1978) 603–612.

si nevyžaduje nijaký komentár. Nachádzame v ňom aj vysvetlenie, prečo sa Planck neuspokojil odpoveďami na otázky, ako prebiehajú fyzikálne procesy, ale snažil sa zdôvodniť, prečo tak prebiehajú. S tým súvisí aj štýl jeho práce, v ktorom dominuje úsilie o jasné vymedzenie základných fyzikálnych pojmov a detailné rozpracovanie problematiky. Pri tom bol Max Planck teoretikom, ktorý svoje výpočty vždy doviedol k výsledkom, ktoré sa dali bezprostredne porovnať s experimentami. Zdá sa, že v týchto metódach práce je popri húževnatosti a mimoriadnej invencii tajomstvo jeho životného úspechu, ku ktorému sa napokon dopracoval už nemladý, v roku 1900.

Po skončení vysokoškolských štúdií v Mníchove a v Berlíne (u Jollyho, Kirchhoffa a Helmholtza) v rokoch 1874–1878 obhájil na mníchovskej univerzite *summa cum laude**) dizertačnú prácu na tému *O druhej hlavnej vete náuky o teple* [3]. Od roku 1880 bol súkromným docentom na mníchovskej univerzite, ale až v roku 1885 ho povolali za mimoriadneho profesora teoretickej fyziky na univerzitu do Kielu**). Z Planckovej autobiografie sa zdá, že všetko, čo robil pred príchodom do Berlína bolo devalvované či už nevšímavosťou iných, či už tým, že ho druhí predbehli, alebo preto, že sa pri písaní prác dal viesť svojím presvedčením a nie názormi potenciálnych oponentov. Svedčí to o jeho principiálnosti, ale aj o skromnosti, veď dodnes obdivujeme napríklad jeho 247stránkovú prácu *Princíp zachovania energie* z roku 1887.

Na univerzitu do Berlína povolali Maxa Plancka zanedlho po smrti Gustava Roberta Kirchhoffa (1824–1887), a to v roku 1889 ako mimoriadneho profesora teoretickej fyziky. O tri roky ho potom vymenovali za riadneho profesora.

Maxovi Planckovi po príchode do Berlína prichodilo realizovať Kirchhoffov odkaz. Kirchhoff v článku *O pomere emisnej a absorpčnej mohutnosti telies pre teplo a svetlo* (Ann. Phys. 19 (1860) 275–301)†) zaviedol rozdeľovaciu funkciu $e(\lambda, T)$ energie žiarenia absolútne čierneho telesa. V ďalšom nahradíme rozdelenie energie podľa vlnových dĺžok rozdelením podľa frekvencie v pri danej absolútnej teplote T a Kirchhoffovu funkciu označíme

$$(1) \quad \varrho(\nu, T).$$

Kirchhoff v spomínanom článku ukázal, že pomer emisnej a absorpčnej mohutnosti††) je pre lúč danej vlnovej dĺžky a pri danej teplote pre všetky telesá rovnaký a rovná sa emisnej mohutnosti absolútne čierneho telesa, t.j. takého ideálneho telesa, ktoré pohltí

*) t. j. s významenaním, hoci z jeho skromne napísanej autobiografie sa zdá, ako by s touto prácou bol uspel iba tak-tak.

***) Ako sa mali veci už v tých časoch, o tom svedčí Planckov názor, podľa ktorého za túto šťastnú udalosť vďačil nie tak svojim vedeckým výsledkom ako priateľstvu svojho otca s profesorom Karstonom v Kiele.

†) Článok je v skrátenom znení v [4]. Táto publikácia vyšla aj v ruskom preklade (Izdateľstvo „Mir“, Moskva 1981).

††) Absorpčná mohutnosť telesa $A(\nu, T)$ je definovaná ako pomer medzi pohltanou a dopadajúcou energiou žiarenia s frekvenciou ν dopadajúceho na povrch telesa. Emisná mohutnosť $E(\nu, T)$ je rovná energii vyžiarenej z jednotky povrchu telesa za jednotku času do jednotkového intervalu ν . Kirchhoffov zákon hovorí, že pomer $E(\nu, T)/A(\nu, T) = f(\nu, T)$ nezávisí od vlastností telesa, ale len od ν a T . Funkcia $f(\nu, T) = (c/4\pi) \varrho(\nu, T)$. Čierne teleso je definované podmienkou $A(\nu, T) = 1$.

všetko naň dopadajúce žiarenie. Kirchhoff tiež v závere svojej stati poukázal na to, že povrch absolútne čierneho telesa možno simulovať otvorom v zahriatej dutine.

Od Kirchhoffa po Plancka

Od Kirchhoffa po Plancka pracovalo na určení rozdeľovacej funkcie (1) veľa experimentátorov a teoretikov*). Najvýznamnejšími Planckovými predchodcami boli Ludwig Eduard Boltzmann (1844–1906), Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864 až 1928) a lord Rayleigh (sir John William Strutt, 1842–1919).

Boltzmann po Bartolím úspešne aplikoval fenomenologickú termodynamiku na čierne žiarenie, keď v r. 1884 teoreticky zdôvodnil Stefanov zákon

$$(2) \quad E = aT^4,$$

kde E je celková energia žiarenia v danom objeme, a je konštanta úmernosti, T absolútna teplota**). Vzťah (2) sa uvádza v literatúre ako Stefanov-Boltzmannov zákon.

Wien bol od r. 1890 Helmholtzovým asistentom vo Fyzikálnotechnickom ríšskom ústave, ktorý založil v Berlíne Werner Siemens†). Spolu s Lummerom realizoval od roku 1895 merania spektrálnej hustoty čierneho žiarenia pomocou porcelánových dutín s malým otvorom. Teoreticky odvodil v roku 1893 veľmi významný vzťah

$$(3) \quad T\lambda_{\max} = T_0\lambda_{0_{\max}} = \text{konšt.},$$

kde T je absolútna teplota a λ_{\max} je vlnová dĺžka, na ktorú pripadá maximum rozdeľovacej funkcie. Vzťah (3) s veľkou presnosťou potvrdili mnohé merania. Lummer a Pringsheim ho v roku 1899 nazvali posunovacím zákonom (Verschiebungsgesetz), lebo v súlade s ním sa maximum rozdeľovacej funkcie v tvare (1) s rastúcou teplotou posúva po priamke.

V roku 1900 lord Rayleigh ukázal, že zo vzťahu (3) vyplýva pre rozdeľovaciu funkciu (1)

$$(4) \quad \varrho(\nu, T) d\nu = \nu^3 \Phi(T/\nu) d\nu,$$

*) Spomenieme JOSEPHA STEFANA (1835–1893), S. P. LANGLEYA (1834–1906), vynálezcu bolognometra, FRIEDRICHU PASCHENA (1865–1947), OTTU RICHARDA LUMMERA (1860–1925), CHRISTIANA CHRISTIANSENA (1843–1917), EDWARDA ST. JOHNA, FRIEDRICHU KURLBAUMA (1857–1927) a ERNSTA PRINGSHEIMA (1859–1917). Z teoretikov sa ako prví pokúšali určiť rozdeľovaciu funkciu (1) EUGEN LOMMEL (1837–1899) v roku 1878 a VLADIMÍR ALEXANDROVIČ MICHELSON (1860–1927) v roku 1888. ADOLFO BARTOLI (1851–1896) ako prvý aplikoval termodynamické úvahy na čierne žiarenie. Bližšie o tom v publikácii [5].)

***) Boltzmannov článok *Odvozenie Stefanovho zákona — týkajúceho sa závislosti tepelného žiarenia od teploty — z elektromagnetickej teórie svetla* nájde čitateľ v publikácii [4], str. 152. Podrobnejšie výpočty sú v Planckovej učebnici [6], str. 59–69.

†) Priemyselné kruhy mali v období prudkého rozvoja elektrifikácie eminentný záujem na výskume žiarenia vysielaného z elektrických žiaroviek a v tejto súvislosti veľkoryso podporovali základný fyzikálny výskum.

kde $\Phi(T/\nu)$ je nejaká ešte neurčená funkcia jediného argumentu. D. ter Haar [7] v roku 1966 ukázal, že maximum toho, čo možno „vytĺcť“ z klasickej termodynamiky je práve Wienov posunovací zákon v tvare (4).

V roku 1896 Wien odvodil rozdeľovací zákon, ktorý bol v súlade so vzťahom (4) a s Paschenovým empiricky získaným vzťahom. V závislosti od frekvencie možno Wienov rozdeľovací zákon zapísať takto

$$(5) \quad \varrho(\nu, T) d\nu = b\nu^3 e^{-a(\nu/T)} d\nu,$$

kde a, b sú konštanty.

Wienovo odvodenie vzťahu (5) bolo neuspokojivé, Kirchhoffova funkcia tvrdojšie ostávala teoretickou záhadou.

Pozoruhodný a príznačný pre anglický dôvtip bol postup lorda Rayleigha. Určil počet stojatých vln v jednotkovom objeme dutiny tvaru kocky, pripadajúcich na frekvenčný interval od ν po $\nu + d\nu$, spôsobom doteraz zaužívaným

$$(6) \quad \frac{8\pi\nu^2}{c^3} d\nu,$$

kde c je rýchlosť svetla. Výraz pre energiu dutinového žiarenia danej frekvencie, odvodený z Maxwellovej teórie elektromagnetického poľa, je izomorfný s výrazom pre celkovú energiu súboru nezávislých lineárnych harmonických oscilátorov. Bolo teda treba výraz (6) len vynásobiť strednou energiou lineárneho harmonického oscilátora v takomto súbore, t.j. podľa ekvipartičného teóremu klasickej štatistickej fyziky výrazom kT , kde k je Boltzmannova konštanta a T absolútna teplota*). Potom výraz

$$(7) \quad \varrho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

predstavoval spektrálnu hustotu energie žiarenia v jednotkovom objeme dutiny. Toto vyjadrenie Kirchhoffovej funkcie bolo veľmi elegantné, ibaže nesúhlasilo s výsledkami experimentov, dokonca ani so Stefanovým-Boltzmannovým zákonom, lebo integrál výrazu (7) cez všetky frekvencie diverguje. Rayleigh sa usiloval situáciu zachrániť faktorom $\exp(-a\nu/T)$, poľahky výrazom $\exp(-c_2/\lambda T)$. Dostal potom pre rozdelenie energie žiarenia podľa vlnových dĺžok výraz úmerný

$$c_1 T\lambda^{-4} e^{-c_2/\lambda T} d\lambda.$$

Planck ako domáci teoretik Fyzikálnotechnického ústavu

Planck po príchode do Berlína sa stal akýmsi domácim teoretikom Fyzikálnotechnického ríšskeho ústavu. Jeho zodpovednosť ešte vzrástla, keď W. Wien v roku 1896 odišiel

*) Rayleigh uvažoval iba úmernosť strednej energie oscilátora k absolútnej teplote. Boltzmannova konštanta nebola ešte zavedená, ani jej číselná hodnota nebola známa. Namiesto nášho vzťahu (7) Rayleigh iba uviedol, že rozdeľovacia funkcia (1) je priamo úmerná druhej mocnine vlnočtu a absolútnej teplote.

do Cách, kde vystriedal na tamojšej univerzite slávneho, neskoršie smutne presláveného bratislavského rodáka Philippa Lenarda.

Planck si vytýčil za úlohu teoreticky zdôvodniť Wienov rozdeľovací zákon (5). Ak v Rayleighovom postupe vyniká elegancia a schopnosť rýchle dospieť k cieľu, v Planckových prácach sa prejavuje až zanovité úsilie vniknúť detailne do problematiky, nevyhýbať sa úskaliam, úmorne korigovať chyby. Vo svojich spomienkach [8] Planck uvádza, ako mu Boltzmann pri tom pomohol. Prvý raz priamo, keď upozornil, že z Maxwellových rovníc nevyplýva nevratnosť procesu vyžarovania z Hertzovho dipólu, obklopeného zrkadliacimi stenami, druhý raz nepriamo, keď Planck pristúpil na Boltzmannovu štatistickú interpretáciu entropie, ktorej predtým neprikladal nijaký význam.

Po prvej Boltzmannovej kritike formuloval Planck postulát úplnej nekoherentnosti čierneho žiarenia. Vlny, ktoré vysiela Hertzov dipól (lineárny oscilátor), nemajú sinusový priebeh. Možno ich opísať Fourierovým radom alebo integrálom, pričom amplitúdy jednotlivých rozvojových členov sú úplne náhodné. Táto predstava korešponduje s hypotézou molekulového chaosu v Boltzmannovej teórii ideálnych plynov*). Maximálna neusporiadanosť, charakterizujúca maximum entropie v Boltzmannovom plyne je podmienená veľkým počtom molekúl, ktorých rýchlosti sú pred vzájomným pôsobením štatisticky nezávislé a v rovnovážnom stave binárne zrážky sú kompenzované „opačnými zrážkami“, takže rozdelenie podľa rýchlosti je v čase konštatné. Planckovi stačil jediný dipól, vyžarujúci nekoherentné svetlo. V rovnovážnom stave dipól za jednotku času vyžiari a pohltí rovnaké množstvo energie.

Táto podmienka vedie na vzťah

$$(8) \quad \varrho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U,$$

kde U je stredná energia nabitého harmonického oscilátora frekvencie ν pri teplote T . Ako sme už uviedli, Rayleigh ukázal, že v klasickej teórii veličina U nezávisí od frekvencie. V roku 1905 potom Jeans použil výraz (8), pričom za U dosadil $U = kT$.

Planck však volil inú cestu. Bol presvedčený, že závislosť Kirchhoffovej funkcie od teploty môže získať, len ak určí entropiu žiarenia, pretože termodynamická teplota je pri danom objeme určená vzťahom

$$(9) \quad \frac{dS}{dE} = \frac{1}{T},$$

kde S je celková entropia, E energia a T teplota žiarenia. Pre oscilátory danej frekvencie

$$(9a) \quad \frac{dS}{d\varrho} \sim \frac{1}{T},$$

$$(9b) \quad \frac{dS}{dU} = \frac{1}{T}.$$

*)Planck si, pravda, túto analógiu v plnom rozsahu ani neuvedomoval.

Vo vzťahoch (9a), (9b) je dS zmena hustoty entropie oscilátorov danej frekvencie.

Spočiatku jednoducho postuloval entropiu rovnovážneho čierneho žiarenia oscilátorov danej frekvencie v tvare

$$(10) \quad S = - \frac{U}{\beta v} \ln \frac{U}{a e v},$$

kde a , β sú konštanty, e je základ prirodzených logaritmov. Planck ani po rokoch neuviedol, čo ho viedlo k tomu, aby postuloval vzťah (10). Možno sa však presvedčiť, že dosadenie (9a) do Wienovho rozdeľovacieho zákona (5) a integrácia dávajú s využitím (8) výraz (10).

V roku 1900, keď ho Lummer, Pringsheim a Paschen upozornili, že najnovšie merania nepotvrdzujú pre dlhé vlny Wienov rozdeľovací zákon, Planck sa usiloval nájsť vzťah medzi energiou a entropiou oscilátora, ktorý je v rovnováhe so žiarením, na základe nejakej hlbšej úvahy. Uvažoval správanie sa N identických nezávislých oscilátorov danej frekvencie a určil fluktuáciu energie takýchto oscilátorov. Dospel k výrazu

$$(11) \quad \frac{d^2 S}{dU^2} = - \frac{\alpha}{U},$$

kde α je kladná konštantá, U je stredná energia oscilátora. Prevrátená hodnota výrazu (11) predstavuje vlastnorednú kvadratickú odchýlku energie oscilátora od jej strednej energie. Ľahko sa možno presvedčiť, že výrazy (10) a (11) sú ekvivalentné, takže Planckovi sa nepodarilo vylepšiť Wienov rozdeľovací zákon. Až v roku 1905 A. Einstein ukázal, že výrazy (10) a (11) vyjadrujú entropiu súboru nezávislých klasických častíc s kvantovanou energiou. Pre súbor klasických lineárnych oscilátorov je správny výraz

$$(12) \quad \frac{d^2 S}{dU^2} = - \frac{C}{U^2},$$

kde C je kladná konštantá.

V októbri roku 1900 upozornil Kurlbaum Plancka, že spolu s Pringsheimom namerali pre infračervenú oblasť čierneho žiarenia pri vysokých teplotách v protiklade s Wienovým rozdeľovacím zákonom úmernosť vyžiarenej energie k absolútnej teplote. Planck okamžite zapísal tento poznatok do tvaru $U = CTa$ s použitím (9b) dostal $S = C \ln U$, z čoho vyplýva (12). Interpoláciou vzťahov (11) a (12) dostal Planck

$$(13) \quad \frac{d^2 S}{dU^2} = - \frac{1}{avU + \frac{U^2}{C}}$$

a integráciou

$$(14) \quad \frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} = \frac{1}{av} \ln \left(1 + \frac{a'v}{U} \right),$$

kde $a' = aC$.

Keď potom Kurlbaum na zasadnutí Nemeckej fyzikálnej spoločnosti 19. októbra

1900 oboznámil prítomných s výsledkami najnovších meraní, vystúpil Planck s pripraveným diskusným príspevkom, ktorý vošiel do zápisu tohto zasadnutia pod názvom *O vylepšení Wienovej spektrálnej rovnice* [9]. Tu uviedol vzťah (13) s inými konštantami α , β v tvare

$$(13a) \quad \frac{d^2S}{dU^2} = \frac{\alpha}{U(\beta + U)}.$$

Pomocou (9b), integráciou a použitím Wienovho posunovacieho zákona v tvare $S = f(U/\nu)$, ďalej prechodom od rozdelenia podľa frekvencií $\varrho(\nu, T)$ k rozdeleniu podľa vlnových dĺžok $E(\lambda, T)$ dostal

$$(15) \quad E(\lambda, T) = \frac{C\lambda^{-5}}{e^{c/\lambda T} - 1}.$$

Ako Planck viackrát spomínal [2, 8, 10], v období od októbra do decembra 1900 nastali najpernejšie týždne jeho života, keď sa podujal teoreticky zdôvodniť svoj rozdeľovací zákon (15). Vráťme sa k výrazu (14). Integráciou tohto výrazu dostal pre entropiu oscilátorov danej frekvencie

$$(16) \quad S = \frac{a'}{a} \left[\left(\frac{U}{a'\nu} + 1 \right) \ln \left(\frac{U}{a'\nu} + 1 \right) - \frac{U}{a'\nu} \ln \frac{U}{a'\nu} \right].$$

„Aby som mohol dať fyzikálny zmysel tomuto výrazu“ – spomínal Planck po rokoch – boli nutné úplne nové úvahy o povahe entropie, ktoré prekračovali rámec elektrodynamiky“ (a tiež klasickej termodynamiky, pozn. R. Z.). Boli to úvahy, vychádzajúce z Boltzmannovej pravdepodobnostnej interpretácie entropie. Planck podľa Boltzmannu strednú energiu oscilátora U , vzatú cez veľmi dlhý čas, nahradil strednou energiou N rovnakých oscilátorov danej frekvencie ν v danom časovom okamihu. Energia tohto fiktívneho súboru je $U_N = NU$. Aby mohol použiť Boltzmannovu metódu oddelení a pododdelení (Abzählungsmethode), rozdelil energiu U_N na P rovnakých konečných kvánt veľkosti ϵ . Tieto kvantá energie považoval za nerozlišiteľné. Ak jedno z možných zadelení P kvánt do N oddelení, reprezentujúcich oscilátory, nazveme mikrostavom (podľa Plancka komplexiou), potom počet všetkých mikrostavov (komplexií)*

$$(17) \quad W = \frac{(P + N - 1)!}{P!(N - 1)!}.$$

Planck potom použil Boltzmannov vzťah

$$(18) \quad S = k \ln W,$$

kde k vystupovala spočiatku iba ako konštanta úmernosti. Planck potom ukázal, že táto

* S myšlienkou zadelenia nerozlišiteľných častíc do rozlišiteľných oddelení predčil Planck N. S. BOSEHO a A. EINSTEINA o štvrt storočia.

konštanta je univerzálna plynová konštanta predelená Avogadrovým (podľa Plancka Loschmidtovým) číslom. Neskôr ju nazvali Boltzmannovou konštantou. Vo vzťahu (18) je W počet všetkých mikrostavov v termodynamicknej rovnováhe. Je to modifikácia Boltzmannovej metódy podľa ktorej v termodynamicknej rovnováhe je entropia úmerná najpravdepodobnejšiemu makrostavu W_{\max} za vedľajších podmienok konštantného počtu častíc a konštantnej energie úplne izolovaného systému. Planck v [11] navrhol súčasne aj túto metódu pre systém oscilátorov rôznych frekvencií. Výpočty, ktoré Planck už v tejto stati neurobil, vedú k rovnakému výsledku ako pôvodný výpočet.

Planck vo vzťahu (17) zanedbal jednotky voči veľkým číslam N , P a do (18) dosadil na ľavú stranu $S_N = NS$, takže (s použitím Stirlingovej formuly $\ln n! \approx n \ln n - n$)

$$NS = k'(P + N) \ln(P + N) - P \ln P - N \ln N$$

alebo

$$(19) \quad S = k \left\{ \left(\frac{P}{N} + 1 \right) \ln \left(\frac{P}{N} + 1 \right) - \frac{P}{N} \ln \frac{P}{N} \right\}.$$

Porovnaním posledného vzťahu s výrazom (16), ktorý je zapísaný s ohľadom na platnosť Wienovho posunovacieho zákona, máme

$$k = \frac{a'}{a}, \quad \frac{P}{N} = \frac{U}{a'v}.$$

Vzťahom na $NU = P\varepsilon$ musí platiť

$$\varepsilon = a'v.$$

Konštantu a' , ktorá nezávisí od povahy oscilátorov, označil Planck písmenom h a nazval elementárnym kvantom účinku. Teraz sa táto konštanta nazýva Planckovou konštantou. Planck aj určil s obdivuhodnou presnosťou z výsledkov meraní pomocou (14) číselné hodnoty konštant h a k .

Planck sa dlho nemohol zmieriť s výsledkami svojho vlastného objavu. Ešte v roku 1913 zamietol Einsteinovu teóriu svetelných kvánt [12], ktoré Compton potom v roku 1926 na návrh G. Lewisa nazval fotónmi. V roku 1943 Planck spomínal: „Po dlhé roky som sa opätovne pokúšal akosi zabudovať elementárne kvantum účinku do systému klasickej fyziky. Ale to sa mi nepodarilo ...“ [8]. Ešte v roku 1923 v piatom vydaní svojej *Teórie tepelného žiarenia* hovoril s rezervou o Bohrových kvantových skokoch. Vari preto mu z tvorcov kvantovej mechaniky najviac prirástol k srdcu E. Schrödinger. 2. apríla 1926 Planck písal Schrödingerovi: „Čítam Vaše pojednanie tak, ako si zvedavé dieťa plné napätia vypočuje vyriešenie hlavolamu, s ktorým sa dlho trápilo ... [13].“ Keď sa potom v lete toho istého roku chystal Schrödinger na prednášku o vlnovej mechanike do Berlína, navrhol mu Planck, aby sa zložil v jeho dome, čo Schrödinger s radosťou prijal. Schrödinger potom v roku 1927 prevzal katedru teoretickej fyziky na berlínskej univerzite, aby odbremenil Plancka. Zotrval tam do roku 1933.

Osobitne vrely bol tiež vzťah Plancka a Einsteina (pravda, tiež iba do roku 1933). Planck bol vari prvý, čo pochopil význam Einsteinovej práce o špeciálnej teórii relativity,

ktorá vyšla v roku 1905. Už na prvom kolokviu v zimnom semestri tohože roku o nej referoval. V lete 1906 zrejme z Planckovho podnetu navštívil Einsteina v Berne Max von Laue, vtedy Planckov asistent. Sám Planck už 23. marca 1906 predniesol na zasadnutí Nemeckej fyzikálnej spoločnosti referát o relativistickej dynamike [14].

Einstein bol zase prvý, čo rozvinul Planckovu kvantovú hypotézu, a to oveľa smelšie ako sám Planck [12]. Vari najužšie sa prejavila príbuznosť Planckových a Einsteinových názorov v teórii tepelnej rovnováhy medzi čiastočkami látky a žiarením. Planck už v roku 1900 uvažoval negatívnu absorpciu, teda vlastne stimulovanú emisiu pri vzájomnom pôsobení Hertzovho oscilátora a elektromagnetického žiarenia. Neprikladal jej však význam pre čierne žiarenie. Einstein potom v roku 1917 ukázal, pravda len pomocou kvantovoteoretických úvah, že bez zavedenia stimulovanej emisie nemožno odvodiť Planckov zákon žiarenia na základe detailnej analýzy rovnováhy medzi časticami látky a žiarením.

Z najbližších Planckových spolupracovníkov treba spomenúť ešte Maxa von Laueho. Planck ho charakterizoval ako človeka, ktorý mu bol zo všetkých žiakov najbližší [8].

Max von Laue zotrval s Planckom v Nemecku aj po roku 1933. Jeho negatívny postoj k nacizmu bol jednoznačný už od začiatku. Vari jeho vplyvu treba pripísať, že staručký Planck, ktorý stelesňoval tradície nemeckej korektnosti a vernosti k pruskému štátu, zvolil tú ťažšiu cestu, keď sa čoraz viac presviedčal o nezlučiteľnosti týchto dvoch vlastností.

Planck napokon prežil aj nacistickú tretiu ríšu. Po druhej svetovej vojne s jeho súhlasom premenovali Ústav cisára Wilhelma na Ústav fyziky a astrofyziky Maxa Plancka. Max Planck zomrel vo veku 89 rokov dňa 4. októbra 1947 v Göttingene. Tam je aj pochovaný, rozlúčkovú reč povedal Max von Laue.

Literatúra

- [1] ŠEBESTA, J.: *Revolúcie v dejinách fyziky*. Inedita.
- [2] PLANCK, M.: *Physikalische Abhandlungen und Vorträge*. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1958, zv. 3, str. 374–401. V ďalšom citujeme z tohto diela pod skratkou PLANCK, M.: *Spisy*.
- [3] PLANCK, M.: *Spisy*, zv. 1, str. 1–61.
- [4] SCHÖPF, H. G.: *Von Kirchhoff bis Planck*. Akademie Verlag Berlin 1978, str. 131–151.
- [5] MEHRA, J.; RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1, Part 1*. Springer Verlag, New York, Heidelberg, Berlin, 1982, str. 24–45.
- [6] PLANCK, M.: *Theorie der Wärmestrahlung*. J. A. Barth, Leipzig, 1966.
- [7] TER HAAR, D.: *Quantentheorie*. Akademie Verlag, Berlin, 1970.
- [8] PLANCK, M.: *Spisy*, zv. 3, str. 255–267.
- [9] PLANCK, M.: *Spisy*, zv. 1, str. 687–689.
- [10] PLANCK, M.: *Spisy*, zv. 3, str. 121–136.
- [11] PLANCK, M.: *Spisy*, zv. 1, str. 698–706.
- [12] ZAJAC, R.: Pokroky matematiky, fyziky a astronómie 24 (1979) 61.
- [13] SCHRÖDINGER-PLANCK-EINSTEIN-LORENTZ: *Briefe zur Wellenmechanik*. Ed. K. Przibram, Wien, Springer Verlag 1963.
- [14] PLANCK, M.: *Spisy*, zv. 2, str. 115–120.