



## Výfučtení: Max Planck

Max Planck byl jednou z osobností zodpovědných za velkou revoluci ve fyzice na začátku 20. století. Narodil se 23. dubna 1858, v mládí studoval na gymnáziu v Mnichově, kde se naučil základy matematiky, astronomie a mechaniky. Kromě toho se i zajímal o hudbu – hrál na klavír, zpíval a složil pár vlastních skladeb. V průběhu jeho studia na univerzitě se seznámil např. s významným fyzikem Kirchhoffem, který byl jeho velkým vzorem. Pár let poté se sám stal profesorem na Berlínské univerzitě.

Po velkou část jeho života se zabýval zářením absolutně černého tělesa, úlohou, která stála za zrodem kvantové mechaniky. Za související objev kvant energie dostal v roce 1918 Nobelovu cenu. Mezitím se věnoval dalšímu rozvíjení kvantové mechaniky po boku Einsteina, se kterým se spřátelil.

V průběhu druhé světové války se musel odstěhovat na venkov. V roce 1944 jeho syn spolupracoval na pokusu o atentát na Hitlera, za což byl zabít rukou gestapa. Smrt jeho syna Plancka natolik zničila, že skoro ztratil chuť dál žít. Umírá 4. října 1947.



Obr. 1: Max Planck v roce 1933.

## Elektromagnetické záření

Jednu z prvních vědeckých představ o světle měl Isaac Newton, o kterém jste si mohli přečíst v minulém Výfučtení<sup>1</sup>. On si vysvětloval světlo pomocí tzv. korpuskulární hypotézy, podle které mělo být tokem nějakých částic. Věda se však od tohoto přístupu poměrně rychle odklonila poté, co Hooke, Huygens a Fresnel vysvětlili chování světla pomocí vln. Navíc tuto domněnku v roce 1801 potvrdil Youngův dvouštěrbinový experiment<sup>2</sup> a James Clerk Maxwell popsals světlo jako elektromagnetické vlnění, tedy prostorem se velmi rychle šířící vlnky střídavě silnějšího a slabšího elektrického a magnetického pole.

Toto vlnění je periodické, délka jedné vlny se nazývá vlnová délka a značí se  $\lambda$ , měřená v metrech. Šíří se rychlostí světla  $c \doteq 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a čas mezi průchodem dvou vln jedním bodem se nazývá perioda  $T$ , měřená v sekundách. Intuitivně tedy pro vlnovou délku platí

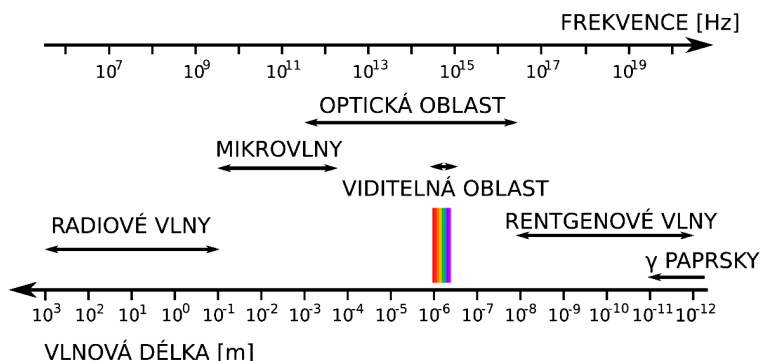
$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f},$$

kde  $f$  je frekvence vlnění, měřená v Hz, pro kterou samozřejmě platí  $f = 1/T$ .

<sup>1</sup><http://vyfuk.mff.cuni.cz/ulohy/vyfucteni>

<sup>2</sup>Známy a doma jednoduše realizovatelný pokus. Připravíte-li do temné neprůsvitné krabice s průzorem na jedné stěně dvě rovnoběžné, velmi tenké a blízké šterbiny, a necháte-li skrz ně svítit dovnitř ostrým a vzdáleným zdrojem světla, na protější stěně nebudou dva světlé pruhy vedle sebe, ale také spousta dalších navíc, jako by vašich šterbin bylo mnohem více než dvě.

Z praktických důvodů došlo k rozdělení vlnění do různých typů, kterým říkáme obory elektromagnetického záření (obory elektromagnetického spektra). My nejlépe známe viditelné světlo, které je elektromagnetickým zářením o vlnových délkách 400 až 750 nanometrů (750 až 400 THz, tj.  $750 \cdot 10^{14}$  Hz až  $400 \cdot 10^{14}$  Hz), kde 400 nanometrů odpovídá fialovému konci viditelného spektra (duhy) a 750 nanometrů odpovídá červenému konci. Za červenou následuje infračervené záření, které už pouhým okem nevidíme, ale například hadi jej vidět dokážou. Když se dostáváme na vlnové délky v řádech milimetrů a centimetrů, hovoříme o mikrovlnách. Ty například využíváme v mikrovlnných troubách na ohřev potravin nebo se jimi přenáší WiFi a mobilní signál. Ještě delším vlnám říkáme vlny rádiové. Na opačné straně spektra, kde máme vlny ještě kratší než ty odpovídající fialovému světlu, nacházíme ultrafialové záření, které sice na jednu stranu způsobuje rakovinu kůže a chrání nás před ním ozonová vrstva, ale na druhou stranu také v těle pohání tvorbu vitamínu D pro naše zdraví. Extrémnější verzí ultrafialového záření je záření s ještě kratší vlnovou délkou, které nazýváme rentgenové záření a jehož využití znáte – je možné s ním skrz naskrz prosvítit lidské tělo nebo jiné předměty. A pokud bychom šli ještě dále, narazili bychom na záření gamma, které pozorujeme třeba při radioaktivním rozpadu některých látek, nebo na obloze ve formě záhadných gamma záblesků.



Obr. 2: Elektromagnetické spektrum se všemi zmíněnými obory. Proužek v pravé dolní části znázorňuje barevné viditelné spektrum (opravdu barevné v PDF verzi Výfučení na našem webu).

## Absolutně černé těleso

Každé těleso, které má nějakou teplotu, vyzařuje elektromagnetické záření. Nevyzařuje však jen jednu jeho frekvenci, ale celé spektrum naráz s tím, že každá z frekvencí (vln. délek) je zastoupena méně nebo více podle teploty. Pokud budeme tedy pro elektromagnetické spektrum uvažovat také nějaké rozložení toho, jak silně je která frekvence vyzařována, mluvíme o *vyzařovací spektru*. Obecně platí, že čím vyšší teplota, tím silnější jsou krátké vlnové délky (tím modřejší záření).

Takzvané *absolutně černé těleso* ideálně pohlcuje veškeré záření na všech vlnových délkách a při dané teplotě vyzařuje nejvyšší možné množství energie (jeho záření není na žádné frekvenci vynecháno např. pohlcováním v nějakém ději nebo zastíněním). Nic ve skutečnosti není

absolutně černým tělesem, ale většinu věcí, které září proto, že jsou teplé (například vlákna žárovek, hvězdy, rozžhavené plotýnky a podobně), můžeme za absolutně černá tělesa považovat. Jde totiž o to, že pokud zanedbáme jakoukoliv odrazivost nebo třeba barvu těles, zajistíme tak, že jediné z nich pocházející záření bude díky jejich teplotě, čímž se o nich můžeme bavit v kontextu tohoto Výfučení. Navíc množství tepelné energie vyzařované jakýmkoli tělesem je často mnohem větší než záření, díky kterému ho vidíme jako ne-černé. Absolutně černé těleso je tedy vhodné zjednodušení, bavíme-li se o záření.

Chladné vesmírné plyny (mají nejvýše 100 K/zhruba  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pozorujeme převážně v rádiovém a mikrovlnném oboru. Například my lidé a předměty o pokojové teplotě vyzařujeme záření infračervené. Žhnoucí plamen svíčky, roztavený kov nebo fotosféra Slunce vyzařuje záření viditelné. Dále hvězdy typu bílých trpaslíků září převážně v ultrafialovém oboru, stejně jako silné elektrické výboje (např. při sváření, proto si musejí svářeči dávat masky). Převážně rentgenové záření pak vydává hmota o teplotách řádově milionů stupňů, což může být například hvězdný materiál padající do černých děr, nebo jádra explodujících hvězd – (super)nov.

## Vyzařovací spektrum

O sto let později po Youngově experimentu přišel Max Planck s kvantovou teorií. Vše začalo tak, že Německý ústav pro průmyslovou normalizaci poprosil Maxe Plancka, aby pracoval na zefektivnění žárovek – na jakou teplotu by mělo být rozžhaveno wolframové vlákno, aby co nejvíce vyzařené energie spadalo do viditelné části spektra (jinak bychom je rovnou mohli zneužívat jako topení, a ne svítidla). Do té doby nejlepší model popisující záření teplých těles byl takzvaný Rayleigh-Jeansův zákon, který poměrně dobře vystihuje záření chladných těles, ale selhává pro vyšší teploty. Rayleigh-Jeansův zákon vypadá takto:

$$B_f(T) = a \cdot f^2 \cdot T,$$

kde  $a$  je konstanta úměrnosti,  $f$  je frekvence záření a  $T$  je teplota zářiče v kelvinech.<sup>3</sup> Výsledná veličina  $B_f(T)$  je tedy závislá na teplotě  $T$  a udává nám, jak hodně je záření o frekvenci  $f$  zastoupené ve vyzařovacím spektru. Správným přepočtem můžeme dostat např. výkon ve wattch pro nějaký úsek vyzařovacího spektra. V takovémto tvaru je i dnes běžně používán například radioastronomy, kteří zkoumají chladná plynová mračna nebo radiové signály z povrchu planet naší Sluneční soustavy – je jednoduchý na použití. Všimněte si ale, že pro danou teplotu tento vztah nedává rozumnou maximální hodnotu frekvence. S rostoucí frekvencí pro všechny teploty roste i intenzita záření, což je značný problém. To by znamenalo, že maximum vyzařování všech teplých těles by bylo při nějaké nesmírně krátké vlnové délce a v ní by každé těleso vyzařovalo nejvíce bez ohledu na svojí teplotu, a to tak silně, že by okamžitě přišlo o veškeré své teplo. Nedostatečnost tohoto teoretického modelu se historicky nazvala *ultrafialovou katastrofou*, se kterou si dlouho nikdo nevěděl rady.

Z pozorování je ale jasné, že všechny teplé věci okamžitě nezmrznou a nevyzáří všechnu energii ve formě UV nebo rentgenu, ale v závislosti na teplotě mění maximum svého vyzařování. Tutto skutečnost se Planckovi podařilo vysvětlit právě pomocí kvantové teorie: že vyzařovaná energie přichází v diskrétních balíčcích (kvantech), které v případě elektromagnetického záření

<sup>3</sup>Připomínáme, že teplota v kelvinech se měří úplně stejně jako ve stupních Celsia jen s rozdílem, že stupnice začíná o 273,15 K níže a nemůžeme pod 0 K. To znamená, že co má např. 263,15 K, tak má  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  v Celsiově stupnici. Kelvinovy jednotky se ve fyzice hojně využívají.

nazýváme fotony. U fotonů můžeme stále mluvit o jejich vlnové délce nebo frekvenci, ale můžeme mluvit i o energii a hybnosti daného fotonu. Energii můžeme popsat jako

$$E = hf,$$

kde  $f$  je frekvence a  $h \doteq 6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s je Planckova konstanta. Hybnost fotonu můžeme popsat jako

$$p = \frac{E}{c},$$

kde  $E$  je jeho energie. Proč však pro hybnost fotonu nepoužijeme klasický vztah  $p = mv$ ? Hmotnost totiž nemůžeme používat pro všechno kolem nás. Zjednodušeně řečeno: fotony jsou jedny z elementárních částic přírody, které mají nulovou hmotnost samy o sobě, ale přesto existují jako přenašeče hybnosti – např. když si ohříváme oběd v mikrovlnné troubě, elektrony v obvodech trouby svým kmitáním vysílají do okolí fotony. Ty jsou pak přijaty molekulami našeho oběda, a to je tepelně rozkmitá. Po fotonech zde tedy dochází k předávání hybnosti v podobě vibrací, ale ne hmotnosti. Rozměrovou správnost vztahu výše si také můžete rozmyslet tak, že pokud za energii dosadíte Einsteinův vztah  $E = mc^2$ , krátí se  $c$  ve jmenovateli a dostanete součet hmotnosti a rychlosti světla – tedy alespoň rozměrově má jít o hybnost.

Spektrum absolutně černého tělesa popisuje Planckova křivka, která je dána Planckovým vyzařovacím zákonem (symbol  $B$  má podobný význam jako minule):

$$B_f(T) = \frac{A f^3}{e^{\frac{h \cdot f}{k_B T}} - 1},$$

kde  $A$  je opět jiná konstanta úměrnosti, která upravuje tvar křivky,  $e$  je Eulerovo číslo<sup>4</sup> a  $k_B$  je Boltzmannova konstanta. Výsledkem tohoto vztahu je hodnota tzv. spektrální záře, která se dá zase snadno přepočítat na výkon v nějaké situaci. Hlavně byste ale měli znát výslednou Planckovu křivku, kterou můžete vidět na obrázku 3, a která v historii fyziky poprvé přesně popsala záření teplých těles.

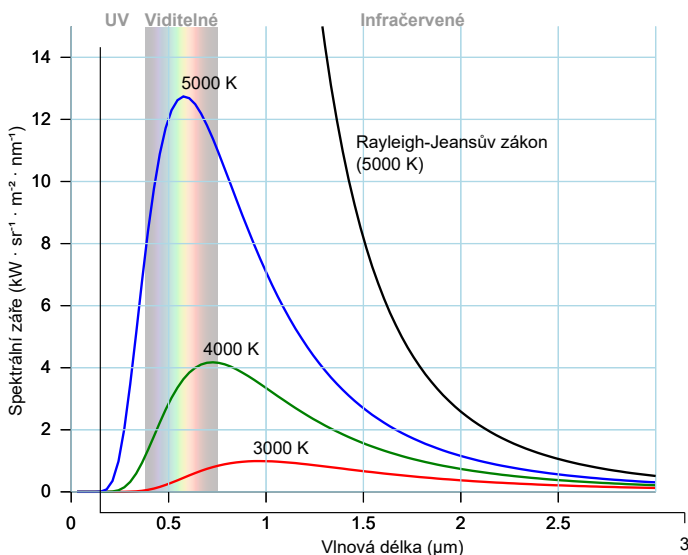
Pokud by nás zajímal celkový výkon vyzářený absolutně černým tělesem o teplotě  $T$  a ploše  $S$ , můžeme jej určit pomocí Stefanova-Boltzmannova zákona:

$$P = S\sigma T^4,$$

kde  $\sigma \doteq 5,67 \cdot 10^{-8}$  W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-4</sup> se nazývá Stefanova-Boltzmannova konstanta. Tento zákon byl znám již mnohem dříve. Prvně byl určen experimentálně Jožefem Stefanem v roce 1879, je to jeden z mála případů, kdy ve fyzice narazíte na čtvrtou mocninu. O pět let později byly Stefanovy výsledky teoreticky odůvodněny Ludwigem Boltzmannem.

Se znalostí tohoto vztahu byla poprvé rozumně odhadnuta teplota Slunce. Pokus byl proveden tak, že byl umístěn kruhový kus kovového plechu do takové vzdálenosti, aby měl stejný úhlový průměr jako Slunce. Ze známé teploty kovového plechu, která byla zhruba 1900 až 2000 stupňů Celsia udělali odhad, že zhruba třetina Slunečního světla je pohlcena atmosférou. Odhadli tak, že záření ze Slunce je asi 40krát intenzivnější, než záření z kovového plechu. Z toho odhadli, že teplota Sluneční fotosféry je 5700 K, což se od správné hodnoty 5778 K o mnoho neliší.

<sup>4</sup>má přibližnou hodnotu 2,7183 a o jeho významu a využití se můžete dočíst ve Výfučení o radioaktivitě z 2. ročníku: <http://bit.ly/2PEdfRÜ>.



Obr. 3: Planckovy křivky pro různé teploty. Všimněte si různých maxim vyzařování pro různé teploty. Také si povšimněte, jakou předpověď dává klasická teorie: ta nemá maximum a tudíž by všechna energie byla vyzařena na krátkých vlnových délkách.

Nejvíce energie absolutně černé těleso o dané teplotě vyzaří na té vlnové délce, kde má Planckova křivka pro danou teplotu maximum. Tuto vlnovou délku popisuje Wienův posunovací zákon, který byl také objeven dříve než Planckův zákon (v roce 1893, tedy o čtrnáct let později než Stefanův-Boltzmannův zákon).

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

kde  $b \doteq 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$  a nazýváme jej Wienovou konstantou. Pochopitelně to platí i obráceně: pokud pozorujeme, že nějaké horké těleso září nejvíce na vlnové délce  $\lambda$ , můžeme určit teplotu tělesa jako

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}}.$$

Vidíte-li něco, co je rozžhavené do bíla nebo bělomodra, z Wienova posunovacího zákona si můžete odvodit, že se jedná o teplejší těleso, než třeba takové, které žhne červeně nebo jenom sálá infračervené záření.

## Závěr

Max Planck byl spolu s Einsteinem jedním z nejvýznamnějších fyziků dvacátého století. V mnoha zemích (hlavně ale v Německu) najdete institut Maxe Plancka. Je po něm pojmenovaná řada rovnic a Planckova konstanta. Existuje také celá soustava jednotek nesoucí jeho jméno. (Jedná se o soustavu jednotek, ve které není potřeba lidské dohody! Veškeré jednotky, třeba délky,

čas, hmotnosti atd. jsou vyjádřeny pouze pomocí základních fyzikálních konstant, jako je třeba rychlost světla, gravitační a Planckova konstanta.) Byl po něm také pojmenován kosmický dalekohled, který byl vypuštěn roku 2013, zkoumající anizotropii kosmického mikrovlnného pozadí<sup>5</sup> (díky kterému známe přesný věk a složení vesmíru). Na jeho počest byl také pojmenován kráter na Měsíci.

*Marco Souza de Joode*  
joode@vyfuk.mff.cuni.cz

*Jiří Kohl*

---

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.  
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

---

<sup>5</sup>nerovnoměrnost v míře k nám přicházejícího mikrovlnného záření z různých směrů hlubokého vesmíru