Tepelné záření těles

(počátek cesty ke kvantové teorii)

Vyzařování elektromagnetické energie zahřátým pevným tělesem - byl to zdánlivě velmi jednoduchý jev, ale stal se z něj neřešitelný problém klasické fyziky ve 2. polovině 19. století a byl prvním impulzem ke vzniku kvantové fyziky:

Jeho studium komplikoval ten fakt, že sice těleso **zahřáté** dodávanou tepelnou energii **emituje** ze svého povrchu elektromagnetické záření (vlnění), ale jeho povrch také současně **odráží** (a absorbuje) záření, které na něj dopadá z jiných těles v okolí.

Můžeme přitom zřejmě definovat **koeficient absorpce** a **odrazivosti** povrchu tělesa :

$$A = \frac{\text{absorbovaná energie}}{\text{dopadlá energie}} \qquad R = \frac{\text{odražená energie}}{\text{dopadlá energie}} \qquad \Rightarrow \qquad A + R = 1$$

Pro přesné změření **vlastního emitovaného záření** je proto potřebné, aby energie z okolí **odražená** povrchem tělesa byla co **nejmenší**, a současně, aby anergie absorbovaná z okolí byla co největší - ideálně tedy :

$$R \to 0$$ nebo-li také: $$A \to 1$$

To je charakteristika ideálního ***absolutně černé těleso*** …… absorbuje veškeré záření, které na něj zvnějšku dopadá.

Jde samozřejmě o teoretický pojem, ale **experimentální realizace** takového těleso je relativně dosti jednoduchá – ve formě ***dutinového zářiče*** :

- tvoří ho dutina v pevném tělese, jejíž vnitřní stěny mají co nejvyšší koeficient absorpce (například grafit),
- s velmi malým otvorem, kterým záření vystupuje ven.

Teoreticky je absolutně černé těleso jednoduchým kosinovým zářičem - jeho zářivost splňuje Lambertův zákon (viz kapitola Radiometrie a fotometrie).

Pro stanovení **veškeré elektromagnetické energie,** kterou emituje jeho povrch do prostoru se vhodně využívá veličina: **intenzita vyzařování** H_e ……. definovaná jako zářivý tok do celého poloprostoru (2π) z jednotky povrchu zdroje

Na základě termodynamických úvah (dutina včetně obsaženého záření je v termodynamické rovnováze se stěnami a lze je tedy popsat jedinou teplotou) odvodil německý fyzik Gustav Robert Kirchhoff tvrzení, že **intenzita vyzařování** zahřátého tělesa musí **záviset** na **absolutní teplotě** a na **koeficientu absorpce:**

$$\frac{H_e}{A} = f(T)$$ ***Kirchhoffův zákon*** (1859)

Z toho vyplývá, že záření absolutně černého tělesa ($A=1$) je tedy pouze **funkcí teploty**:

$$H_e = f(T)$$

Odvození této závislosti se s použitím klasické termodynamiky podařilo ještě před koncem století:

$$H_e = \sigma \cdot T^4$$

Stefan – Boltzmannův zákon (1879)

Její průběh byl také spolehlivě experimentálně potvrzen. Dále bylo zjištěno, že elektromagnetické vlnění emitované zahřátým tělesem obsahuje všechny možné vlnové délky (frekvence) od nuly až do nekonečna (***spojité spektrum***). Pro jeho popis se používá následující **spektrální veličina**:

Označíme jako dH_ν tu **část intenzity vyzařování**, která obsahuje elektromagnetické vlnění s frekvencemi v intervalu $(\nu, \nu + d\nu)$ ….. (tj. při dané, prakticky stejné frekvenci) … a pak definujeme:

$$H_\nu = \frac{dH_\nu}{d\nu}$$

spektrální hustota intenzity vyzařování

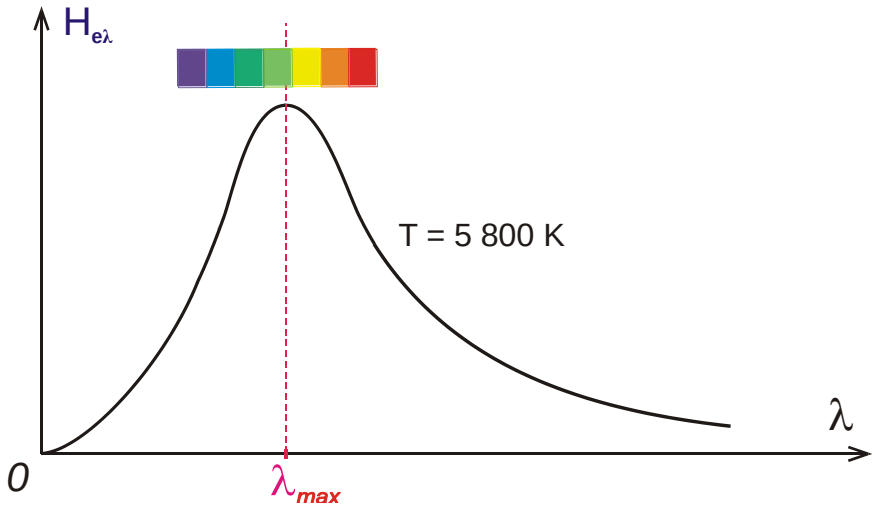
Je to intenzita vyzařování plošného zdroje, která obsahuje elektromagnetické vlnění s frekvencemi v jednotkovém intervalu frekvencí (při dané frekvenci ν)

Analogicky je možné definovat spektrální hustotu intenzity vyzařování pomocí intervalu vlnových délek :

$$H_\lambda = \frac{dH_\lambda}{d\lambda}$$

Je to intenzita vyzařování plošného zdroje, která obsahuje elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami v jednotkovém intervalu vlnových délek (při dané vlnové délce λ)

Tuto spektrální hustotu energie elektromagnetické vlnění emitované zahřátým tělesem se také podařilo velmi přesně změřit :



Pro polohu maxima platí:

$$\lambda_{max} \cdot T = konst.$$

Wienův posouvací zákon

Na obrázku je průběh funkce pro teplotu 5 800 K - přibližně teplota povrchu Slunce, kdy maximun připadá na vlnovou délku asi 550 nm (žlutozelená) – na niž je lidské oko také maximálně citlivé.

Teoretické odvození této závislosti se však až do konce 19. století nezdařilo !

Bylo pouze nalezeno **částečné řešení** pro **nízké** frekvence (Rayleigh a Jeans, ultrafialová katastrofa) a pro **vysoké** frekvence (Wien,).

Až roku 1900 dospěl německý fyzik Max Karl Ernst Ludwig Planck ke správnému vztahu - nejprve pouze **matematickou extrapolaci** obou výše uvedených závislostí pro nízké a vysoké frekvence:

$$H_{e\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$$

$$H_{e\nu} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Planckův zákon

Teprve v průběhu následujícího roku dospěl Planck k jeho fyzikálnímu zdůvodnění - za neuvěřitelného předpokladu, že ***vyzařování elektromagnetické energie*** povrchem zahřátého tělesa se děje ne spojitě - ale po částech – ***kvantech*** – o velikosti :

$$\varepsilon = h \cdot \nu$$

kde $h \approx 6{,}62618 \,.\, 10^{-34}\ J.s$ je nová univerzální konstanta – **Planckova konstanta**.

Planck ovšem nepochyboval, že po této emisi se elektromagnetická energie dále v prostoru šíří jako **spojité (elektromagnetické) vlnění**.

Další krok učinil až ***Albert Einstein***, když při vysvětlování fotoelektrického jevu (1904, Nobelova cena) předpokládal, že elektromagnetické vlnění nejen vzniká, ale také se i šíří jako kvanta energie.

Tato kvanta nazval je ***fotony*** …. a přiřadil jim **vlastnosti jako klasickým částicím** - rychlost, hmotnost, hybnost a energii - následujícími úvahami:

Rychlost fotonu musí být stejná jako rychlost elektromagnetického vlnění, tedy jako rychlost světla :

$$v = c = 299792458 \quad m/s$$

Pro takové vysoké rychlosti je nutno použít vztahy ze speciální teorie relativity - pro hmotnost platí:

$$m = m(v) = \frac{m_o}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Protože při rychlosti světla nemá tento vztah smysl, je jedinou možností **nulová klidová hmotnost** fotonu (tj. foton v klidu neexistuje) :

$$m_o = 0$$

Pro celkovou energii fotonu platí Planckův vztah:

$$E = h \cdot \nu$$

A jestliže použijeme další známý relativistický vztah:

$$E^2 = p^2 \cdot c^2 + m_o^2 \cdot c^4$$

pak z něho pro foton s nulovou klidovou hmotností dostaneme další vztah pro energii:

$$E = p \cdot c$$

Porovnáním obou výrazů :

$$h \cdot \nu = p \cdot c$$

pak získáme hybnost fotonu :

$$p = \frac{h \cdot \nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Elektromagnetické vlnění tedy může (za různých podmínek - experimentů) projevit jak vlastnosti typické pro **vlnění** (frekvence, vlnová délka), tak i vlastnosti **hmotných částic** (hmotnost, hybnost) – to je tzv. „**částicově – vlnový dualismus**“ elektromagnetického vlnění.

O posledním vztahu pro hybnost pak vyslovil roku 1924 francouzský fyzik **Louis de Broglie** hypotézu, že by mohl platit také **obráceně** – tedy že i **hmotná částice** s hybností ***p*** by se mohla za nějakých podmínek chovat jako vlnění s vlnovou délkou λ o velikosti:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

de Broglieho vlnová délka

Tato hypotéza byla za tři roky skvěle potvrzena experimenty (**Davisson–Germer**) s difrakcí elektronů na krystalické mřížce.

Moderní **kvantová fyzika** pak připisuje vlnové vlastnosti všem částicím mikrosvěta.

Korpuskulárně – vlnový dualismus tedy charakterizuje všechny kvantové částice, včetně fotonů.

---

konec **K. Rusňák, verze 04/2016, upr. 04/2020**