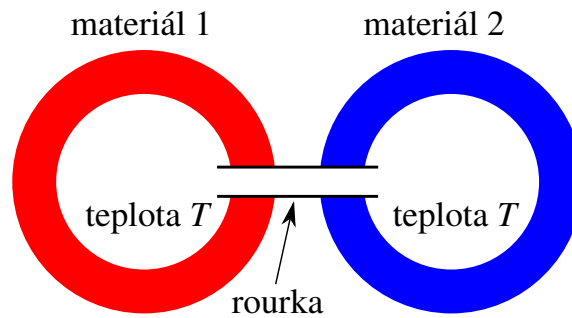


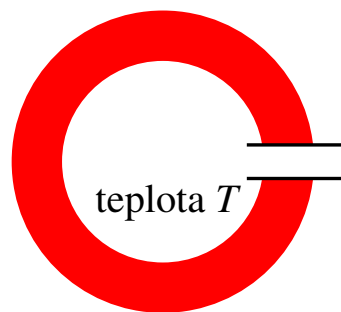
## Záření těles

- Pokus: nažhavíme různým způsobem několik těles (kus železa nad plamenem; samotný plamen, a to nesvitivý – modrý, i svítivý – žlutý; vlákno žárovky elektricky) a pozorujeme, jak září
- Proč tělesa září? V látce je spousta nabitých částic (především elektronů), které díky vysoké teplotě rychle neuspořádaně kmitají. Každý kmitající náboj je zdrojem elektromagnetických vln – takto funguje také např. anténa. Proto z látky vyletuje elektromagnetické záření – světlo.
- Frekvence tohoto světla je dána frekvencí kmitání elektronů. Ta je tím větší, čím vyšší je rychlost elektronů, a ta je zase tím vyšší, čím vyšší je teplota. Proto střední frekvence záření s teplotou roste.
- Proč různá tělesa září různě? Např. modrý plynový plamen skoro nesvítí, ale plamen svíčky nebo plynový plamen s malým přísunem vzduchu svítí více? Odpověď nám dá kvantová fyzika – bez ní vůbec nelze záření těles správně vysvětlit
- Elektrony nemohou zářit libovolně, jejich chování je dáno zákony kvantové mechaniky. V atomu může elektron nabývat jen určitých diskrétních hodnot energie – říkáme, že energie je kvantovaná
- Při přechodu z jedné hladiny na druhou se vyzáří foton, jehož energie je rovna rozdílu energií hladin,  $\Delta E = E_2 - E_1$  a pro frekvenci  $f$  platí  $\Delta E = hf$ ;
- Díváme-li se tedy na spektrum světla (např. hranolem nebo difrakční mřížkou) vyzařovaného atomy nějakého plynu, uvidíme spektrální čáry odpovídající diskrétním frekvencím; z nich pak odhalíme energiové hladiny a tedy i to, o jaký atom jde; takto např. zjišťujeme chemické složení hvězd
- Plamen plynového sporáku má tedy ostré spektrální čáry
- Jak je to s nebo kusem žhavého železa? Má světlo z něj také spektrální čáry?
- Nikoli. Atomy v kusu železa jsou k sobě pevně navázány, tvoří krystalickou mřížku, která se chová tak trochu jako jediná obrovská molekula. Energiové hladiny takové obří molekuly jsou u sebe mnohem těsněji než v jednotlivých atomech. Dokonce natolik, že diskrétní struktura se smývá a energiové spektrum elektronů už není diskrétní, ale spojitě.
- Lze ukázat, že pokud počet navázaných atomů roste řadou aritmetickou, roste počet hladin i jejich hustota řadou geometrickou. To proto, že hladiny různých atomů se libovolně kombinují, takže s každým dalším atomem se počet hladin vynásobí nějakým číslem.
- Elektrony tedy mohou mít v podstatě libovolnou energii a tedy i frekvence  $f$  může být libovolná
- Spektrum pak není diskrétní, ale spojitě
- Podobně se chová plamen svíčky. Zde jsou také kousky pevné látky, která září – saze (chemicky uhlík), které vznikají jako meziprodukt hoření při nedostatku kyslíku. V horní části plamene ale shoří i saze (pokud tedy svíčka nečadí).
- Pro zkoumání záření pevných těles je velmi vhodné zkoumat záření v dutině v nějakém pevném tělese; ukazuje se, že záření nezáleží na ničem jiném než na teplotě dutiny. Je tedy zcela jedno, v jakém materiálu je dutina vydlabaná

- Jak lze takové tvrzení dokázat? Překvapivě jednoduše a elegantně. Představme si dvě dutiny z různých materiálů, ale na stejné teplotě, z každé vede světlotěsná rourka (viz obr.), jejíž vnitřní stěny dobře odrážejí světlo



- Pokud by např. v levé dutině bylo záření intenzivnější než v pravé, rourkou by začala proudit elektromagnetické záření doprava, tím by se levá dutina ochlazovala a pravá ohřívala. To by ale byl rozpor s druhou větou termodynamickou (jedním z nejvýznamnějších postulátů fyziky), podle které se nemůže jedno těleso samovolně ohřívat nebo ochlazovat od tělesa téže teploty. Intenzita záření proto musí být v obou dutinách stejná.
- Ovšem nejen to. Musí být dokonce stejné i frekvenční spektrum záření. Pokud by se totiž lišily hustoty energie připadající na nějaký interval frekvencí, stačilo by do rourky vložit vhodný filtr, který by propouštěl záření jen v tomto intervalu, a dospěli bychom ke sporu stejným způsobem jako předtím.
- Záření je tedy identické v obou dutinách. Pokud nyní dutinu trochu pootevřeme (např. opět pomocí rourky), bude záření vylétující z dutiny opět nezávislé na materiálu dutiny, ale závislé na teplotě



- Bude tomu tak i tehdy, když dutinu pootevřeme hodně (viz obrázek)?



- Nikoli. Abychom zjistili, co se bude dít, musíme považovat, jaké světlo vlastně ze žhavého tělesa vychází. Je to jednak jeho vlastní záření, jednak světlo, které bylo odraženo, tedy odražená část dopadajícího světla. Tato část závisí na pohltivosti tělesa, která je 0% pro zcela bílé těleso a 100% pro zcela černé těleso

- Pokud se v noci (absence vnějšího osvětlení) díváme na nějakou plošku do otevřené dutiny, uvidíme méně světla než v případě pohledu do téměř uzavřené dutiny. Ploška je totiž nyní méně osvětlena zářením z okolí, takže k nám přichází méně odraženého světla.
- Na druhou stranu, pokud by teplota tělesa byla nulová a těleso nezářilo, pak při pohledu ve dne (vnější osvětlení) do rourky bychom viděli jen tmou, zatímco při pohledu do otevřené dutiny bychom viděli odražené světlo. Je to podobné jako pohled do oken domu, která se jeví ve dne tmavá, zvláště pokud jsou otevřená, přestože je uvnitř bíle vymalováno. Světlo zvenčí se totiž v místnosti odráží a pohlcuje, zpátky ven jej vyjde jen málo.
- Vypadá to tedy tak, že čím je těleso „černější“, tím více vydává vlastního záření. To je hluboký a obecný princip.
- Představme si dvojici desek z různých materiálů a stejné teploty, které k sobě přiléhají (je mezi nimi malá mezera) a jsou tepelně izolované od okolí. Horní deska je skoro bílá, dolní černá:



- Od dolní desky k horní jde jen její vlastní záření, protože černá deska nic neodráží. Směrem opačným ale jde jak vlastní záření bílé desky, tak od ní odražené světlo. Protože jsou desky v tepelné rovnováze, tok záření v obou směrech musí být stejný.
- Vlastní záření černé desky tedy musí být silnější než vlastní záření bílé desky – černé těleso září více než bílé
- Jak pozorovat jen vlastní záření? Umístíme těleso tak, aby nebylo ničím osvětleno. Např. v noci nebo ve tmavé místnosti umístíme žhavou bílou a černou kuličku téže teploty; černá bude svítit více
- Není důležité, jak „černost“ tělesa realizujeme – zda materiálem nebo dutinou. Pokaždé září černé těleso více.
- Když toto víme, můžeme si ještě položit tuto otázku: Co uvidíme při pohledu malou dírkou do pece, jejíž vnitřek i všechna tělesa v ní mají stejnou teplotu, a je v ní umístěno bílé a černé těleso?
- Mohlo by se zdát, že černé bude jasnější. Ale to je omyl – sice více září, ale bílé těleso zase více odráží záření, které všude v horké peci je, takže to vyjde nastejno. Uvidíme jen homogenně zářící plochu, nerozeznáme ani tělesa, ani stěny pece.
- Pro černé těleso je zářivý výkon do všech směrů roven

$$I = \sigma T^4,$$

kde  $\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  je Stefan-Boltzmannova konstanta a  $T$  je termodynamická teplota (teplota ve stupních Celsia + 273,15)

- Např. pro 1000 st. Celsia je  $T = 1273 \text{ K}$  a  $I = 150 \text{ kW/m}^2$ . Tedy ploška  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  dává výkon 1,5 kilowattu.
- Pro teplotu lidského těla  $T = 310 \text{ K}$  je  $I = 530 \text{ W/m}^2$ . Takový výkon bychom ztráceli, pokud bychom byli umístěni v prázdném prostoru a nedopadalo by na nás záření zvenčí.

- Odhad teploty na Zemi – nejprve určíme dopadající výkon ze Slunce. Celkový zářivý výkon Slunce je

$$P_S = 4\pi r_S^2 \sigma T_S^4 = 4,6 \times 10^{26} \text{ W}$$

kde jsme použili  $r_S = 0,7$  mil. km a  $T = 6000\text{K}$ . Tento výkon se rozdělí na povrch koule o poloměru rovném oběžné vzdálenosti Země, tj.  $R = 150$  mil. km. Tedy výkon na jednotku plochy (solární konstanta) bude

$$S = \frac{P_S}{4\pi R^2} = \sigma T^4 \left( \frac{r_S}{R} \right)^2 \approx 1600 \text{ Wm}^{-2}$$

Skutečná hodnota solární konstanty je  $1360 \text{ Wm}^{-2}$ .

- Země z této energie absorbuje výkon

$$P_Z = S\pi r_Z^2 = \pi\sigma T^4 \left( \frac{r_S r_Z}{R} \right)^2 \approx 5,8 \times 10^{16} \text{ W},$$

což odpovídá v přepočtu podle Einteinova vzorce  $E = mc^2$  asi půl kilogramu světla za sekundu

- Pokud by měla Země všude stejnou teplotu  $T$ , vyzářila by výkon  $4\pi r_Z^2 \sigma T_Z^4$ , který musí být v rovnováze roven  $P_Z$ , tedy

$$4\pi r_Z^2 \sigma T_Z^4 = \pi\sigma T_S^4 \left( \frac{r_S r_Z}{R} \right)^2 \quad \Rightarrow \quad T_Z = \sqrt{\frac{r_S}{2R}} T_S$$

Po dosazení  $T_Z \approx 290 \text{ K} = 17 \text{ C}$ , což velmi dobře odpovídá průměrné teplotě na Zemi

- Jaká by byla teplota na Zemi, kdyby Slunce mělo dvakrát větší poloměr? Byla by větší  $\sqrt{2}$  krát, tj. asi  $136 \text{ C}$ .
- A co kdyby Slunce zabíralo celou oblohu? Tehdy by byla Země v rovnováze se Sluncem, takže by zde byla teplota  $6000 \text{ K}$ . To ovšem za předpokladu, že by takto byl ozářen celý povrch Země (a tedy energie by neproudila na neosvětlenou stranu).