Interakce optického záření s látkou

- rovnovážné záření – tepelné záření černého tělesa, které je v tepelné rovnováze se svým okolím

- Wienův posunovací zákon - spektrum rovnovážného záření závisí jen na termodynamické teplotě

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad \textbf{(μm, K)}$$

- Stefan-Boltzmanův zákon - energie vyzářená černým tělesem za jednotku času z jednotkové plochy je přímo uměrná čtvrté mocnině absolutní teploty

$Q = \sigma T^4$, kde $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}\,\mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$ je Stefan-Boltzmanova konstanta;

- Planckův zákon – spektrální hustota energie záření

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

- Fotoefekt – podrobněji v kapitole Detekce optického záření

- kvantový charakter kvantová soustava, základní stav, excitace, deexcitace, přechody

- elementární procesy absorpce, spontánní emise a stimulované emise

- rezonanční podmínka

- absorpční a emisní spectrum látky

- populace energetické hladiny

- Einsteinovy koeficienty – vyjadřují pravděpodobnost elementárních procesů rezonanční interakce mezi elektromagnetickým zářením a kvantovou soustavou

(spontánní emise A_{nm}, absorpce B_{mn}, stimulovaná emise B_{nm})

$$\left(\frac{dN_n}{dt}\right)_{spont\acute{a}nn\acute{i}} = -A_{nm} N_n$$

$$\left(\frac{dN_m}{dt}\right)_{absorpce} = -B_{mn} N_m u(\nu_{mn})$$

$$\left(\frac{dN_n}{dt}\right)_{stimul.emise} = -B_{nm} N_n u(\nu_{nm})$$

- stimulovaně vyzářený foton má stejné vlatnosti jako dopadající foton, který tento přechod stimuloval – zesilování světla

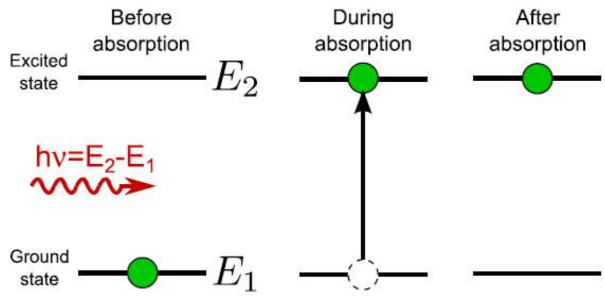
- doba života kvantové soustavy na hladině je nepřímo úměrná Einsteinovu koeficientu spontánní emise z této hladiny, tedy: $\tau_n = \frac{1}{A_{nm}}$

- elektromagnetické pole je tvořeno různými módy, které se liší frekvencí, polarizací a směrem šíření

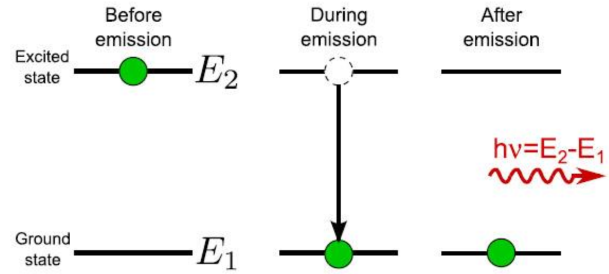
- vztahy mezi Einsteinovými koeficienty v souboru dvouhladinových kvantových soustav při termodynamické rovnováze látkového prostředí s okolním zářením (odvození viz přednáška)

$B_{21} = B_{12}$, $A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21}$, $A_{21} \sim \nu^3 B_{21}$

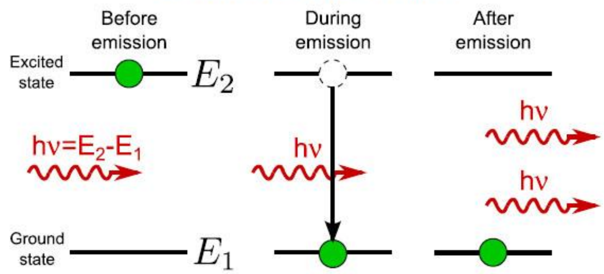
Absorpce



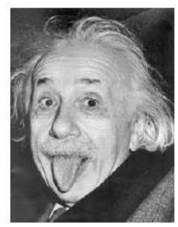
Emise



Stimulovaná emise



Einsteinovy koeficienty



B_{12}, B_{21}, A_{21}

Platí

$$B_{12}=B_{21};\ \frac{A_{21}}{B_{21}} \sim f^3$$

Příklad 4.1.
Pro vybraný přechod s vlnovou délkou v oblasti rentgenového záření (λ = 10 nm) je pravděpodobnost kvantového přechodu (Einsteinův součinitel) za jednotku času A_{21} = 10^6 s^{-1}. Určete koeficient B_{21} pro tento přechod. Jaká musí být objemová hustota energie záření v rezonátoru, aby byla pravděpodobnost stimulovaného vyzáření třikrát větší než pravděpodobnost spontánního přechodu?

Řešení 4.1.
Mezi Einsteinovými koeficienty platí vztah:
$\boxed{A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21}}$ a tedy:

$$B_{21} = \frac{c^3}{8\pi h \nu^3} A_{21} = \frac{c^3}{8\pi h \left(\frac{c}{\lambda}\right)^3} A_{21} = \frac{\lambda^3}{8\pi h} A_{21} = \frac{\left(10 \times 10^{-9}\right)^3}{8.\pi.6,626 \times 10^{-34}}.10^6 = 6 \times 10^{13} m^3 J^{-1} s^{-2}$$

Aby byla pravděpodobnost stimulovaného vyzáření třikrát větší než pravděpodobnost spontánního přechodu, musí platit:

$$3.\left(-A_{21}\right).N_2 = \left(-B_{21}\right).N_2.u\left(\nu, T\right)$$

$$u\left(\nu, T\right) = 3.\frac{A_{21}}{B_{21}} = 3.\frac{10^6}{6 \times 10^{13}} = 5 \times 10^{-8} m^{-3}.J.s$$

Příklad 4.2.
Platí-li, že B_{21} = 10^9 $m^3 J^{-1} s^{-2}$, určete A_{21} a odpovídající dobu života $\tau_{21} = 1/A_{21}$ pro záření s vlnovou délkou:
a) λ = 600 nm (viditelná oblast)
b) λ = 6 μm (infračervená oblast)
c) λ = 60 nm (ultrafialová oblast)
d) λ = 0.6 nm (rentgenová oblast)

Řešení 4.2.
Použijeme vztahy:

$$A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21} \text{ a } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

a) $$A_{21} = \frac{8\pi h}{\lambda^3} B_{21} = \frac{8.\pi.6,626 \times 10^{-34}}{\left(600 \times 10^{-9}\right)^3}.10^9 = 4,62 \times 10^{-5} s^{-1}$$

$$\tau_{21} = 1/A_{21} = 0,21 \times 10^5 s$$

Podobně se postupuje v dalších příkladech.

Příklad 4.3.
Typický kontinuální CO_2 laser používá směs *He, Ne* a CO_2 v poměru 8:1:1 a celkový tlak plynu při pokojové teplotě je 2 kPa. Výstupní výkon kontinuálního laseru při λ = 10.6 μm z optimalizované CO_2 laserové trubice 1 cm v průměru a 1 m dlouhé je 50 W. Kolikrát za sekundu je při této hodnotě výstupního výkonu CO_2 molekula excitována na horní laserovou úroveň a pak stimulovaně přechází na dolní laserovou hladinu?

Řešení 4.3
Protože výkon laseru v kontinuálním režimu je 50 W, je z laseru kontinuálně dodávaná energie záření 50 J za sekundu. To znamená, že za sekundu je potřeba uskutečnit *m* počtu laserových kvantových přechodů:

Energie jednoho fotonu (kvanta) pro daný laserový přechod (λ = 10,6 μm) je:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = 6,626\times10^{-34}.\frac{3\times10^{8}}{10,6\times10^{-6}} = 1.875\times10^{-20}\,J$$

$m = 50/(1.875\text{x}10^{-20}) = 26,6\text{x}10^{20}$

Relace mezi tlakem *p* a hustotou částic *N* v plynu je:
$N(\text{cm}^{-3}) = 7.33\text{x}10^{16}\, p(Pa)/T(K)$.

Objem dané laserové trubice je:

$$V = \pi.r^2.l = 3,14.(0,5)^2.100 = 78,5cm^3$$

Hustota částic *N* v plynné směsi při daném tlaku *p* = 2 kPa a dané teplotě *T* = 300 *K* je:

$$N = \frac{7.33\times10^{16}.2\times10^{3}}{300} = 4,88\times10^{17}\,cm^{-3}$$

Počet částic *n* v plynné směsi je:
$n = N.V = 4,88\text{x}10^{17}.78,5 = 3,8308\text{x}10^{19}$

Počet molekul CO_2 ve směsi plynů je 1/10 celkového počtu částic, tedy:
$n(CO_2) = 1/10.n = 3,8308\text{x}10^{18}$

Protože ve směsi plynů je celkem $n(CO_2) = 1/10.n = 3,8308\text{x}10^{18}$ aktivních laserových molekul, každá tato molekula CO_2 musí být za každou sekundu *p*-krát excitována a následně v důsledku stimulované emise přechází na dolní hladinu:
$p = m/n = 26,6\text{x}10^{20}/3,8308\text{x}10^{18} = 694$.

Závěr příkladu 4.3.
Každá CO_2 molekula ve směsi je excitována na horní laserovou úroveň a pak stimulovaně přechází na dolní laserovou hladinu celkem 694-krát za každou sekundu.