Lokální termodynamická rovnováha

- TE neplatí – vidíme hvězdy, pozorujeme spekt. čáry
- pro každé $\vec{r}$ jiné $T(\vec{r})$ a $n_e(\vec{r})$
- lokálně platí maxwellovské rozdělení rychlostí – teplota $T(\vec{r})$ – pružné srážky
  + rozdělení excitací a ionizací – nepružné srážky
- neplatí rovnovážné rozdělení záření – neplatí už $I_\nu = B_\nu$
  ale platí $S_\nu = B_\nu$
- platí Kirchhoffův zákon $B_\nu = \frac{\eta_\nu}{\chi_\nu}$

Opacita, emisivita

- četnost absorpcí a emisí:

$$r_{lu}(\vec{n},\nu) = n_l B_{lu} I(\vec{n},\nu)$$

$$r^{stim}_{ul}(\vec{n},\nu) = n_u B_{ul} I(\vec{n},\nu)$$

$$r^{spont}_{ul}(\vec{n},\nu) = n_u A_{ul}$$

- vztahy mezi koeficienty:

$$A_{ul} = \frac{2h\nu^3}{c^2} B_{ul}$$

$$g_l B_{lu} = g_u B_{ul}$$

• pro vázaně-vázané přechody

A_{ul}^{-1} ... bez záření odpovídá střední době života ve stavu u

$$B_\nu = \cancel{\frac{r^{spont}_{ul}}{r_{lu} - r^{stim}_{ul}}} = \frac{n_u^* A_{ul}}{n_l^* B_{lu} - n_u^* B_{ul}}$$

Boltzman

$$B_\nu \overset{\downarrow}{=} \frac{A_{ul}}{B_{ul}} \frac{1}{\frac{g_l B_{lu}}{g_u B_{ul}} e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

$$F(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} G(\nu)$$

$$G(\nu) = \frac{m_e}{h}\left[\frac{n_0^*}{n_1^* n_e^*(v)}\right] p_\nu e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

$$\Rightarrow p_\nu = \frac{8\pi m_e^2 v^2}{h^2}\frac{g_1}{g_0} G(\nu)$$

• vztahy pro kontinuum

pravděpodobnost fotoionizace fotonem $(\nu, \nu + d\nu)$

$r_{bf}(\vec{n},\nu) = n_0 p_\nu I(\vec{n},\nu)\, d\nu$ ... četnost fotoionizací

pravděp. spont. zachycení e^-

$r^{spont}_{fb}(\vec{n},\nu) = n_1 n_e(v) F(v)\, v\, dv$ ... četnost spont. rekombinací

pravděp. stim. zachycení e^-

$r^{stim}_{fb}(\vec{n},\nu) = n_1 n_e(v) G(v) I(\vec{n},\nu)\, v\, dv$ ... četnost stim. rekombinací

$\Rightarrow$ v TE platí: $n_0^* p_\nu B_\nu\, d\nu^{\text{-ný}} = n_1^* n_e^*(v)\left[F(v) + G(v) B_\nu\right] v\, dv^{\text{-ké}}$

- makroskopická emisivita v kontinuu:

$$\eta_{fb}\,d\nu = \tilde{n}_0^* \alpha_{bf}(\nu)\left(1-e^{-\frac{h\nu}{kT}}\right) B_\nu(T)\,d\nu,$$

kde $\alpha_{bf} = h\nu p_\nu$ ... fotoionizační příčný účinný průřez

a $\tilde{n}_0^* = n_1 n_e(\nu)\left(\frac{n_0}{n_1 n_e(\nu)}\right)^*$

- makroskopická opacita v kontinuu:

$$\chi_{bf}(\nu) = \left(n_0 - \tilde{n}_0^* e^{-\frac{h\nu}{kT}}\right)\alpha_{bf}(\nu) \overset{TE}{=} n_0^* \alpha_{bf}(\nu)\left(1-e^{-\frac{h\nu}{kT}}\right)$$

- makroskopická opacita a emisivita v čarách:

síla čáry: $S(l,u) = \sum_{l',u'} \langle l' | \vec{d} | u' \rangle$ ..... dipólové maticové elementy

$$g_u A_{ul} = \frac{c^2}{2h\nu^3} g_u B_{ul} = \frac{c^2}{2h\nu^3} g_l B_{lu} = \frac{64\pi^4}{3}\frac{\nu_{ul}^3}{hc^3} S(l,u)$$

účinný průřez dipólového přechodu: $\sigma_{cl} = \frac{\pi e^2}{m_e c}\int_0^\infty \frac{\frac{\gamma}{4\pi^2}\,d\nu}{(\nu-\nu_0)^2 + \frac{\gamma}{4\pi^2}} \doteq \frac{\pi e^2}{m_e c}$

místo A_{ul}, B_{ul}, B_{lu} se používá síla oscilátoru: $f_{ul} = \frac{\alpha_{ul}}{\sigma_{cl}}$

$\Rightarrow$ $\alpha_{lu} = f_{lu}\sigma_{cl} = \frac{h\nu_{lu}}{4\pi} B_{lu}$

$$g_l f_{lu} = \frac{8\pi^2 m_e \nu_{lu}}{3e^2 h} S(l,u)$$

- popis pomocí profilu spekt. čáry:

$$\chi(\nu) = \frac{h\nu}{4\pi}\left(\phi(\nu) n_l B_{lu} - \psi^{stim}(\nu) n_u B_{ul}\right)$$

$$\eta(\nu) = \frac{h\nu}{4\pi}\psi^{spont}(\nu) n_u A_{ul}$$

$\Rightarrow$ vydatnost v čáře $S_l(\nu) = \frac{\eta_\nu}{\chi_\nu}$

$$S_l = \frac{2h\nu_{lu}^3}{c^2}\frac{1}{\frac{n_l g_u}{n_u g_l} - 1}$$

$$\alpha_{lu} = f_{lu}\sigma_{cl}\phi(\nu) = \frac{h\nu}{4\pi} B_{lu}\phi(\nu)$$