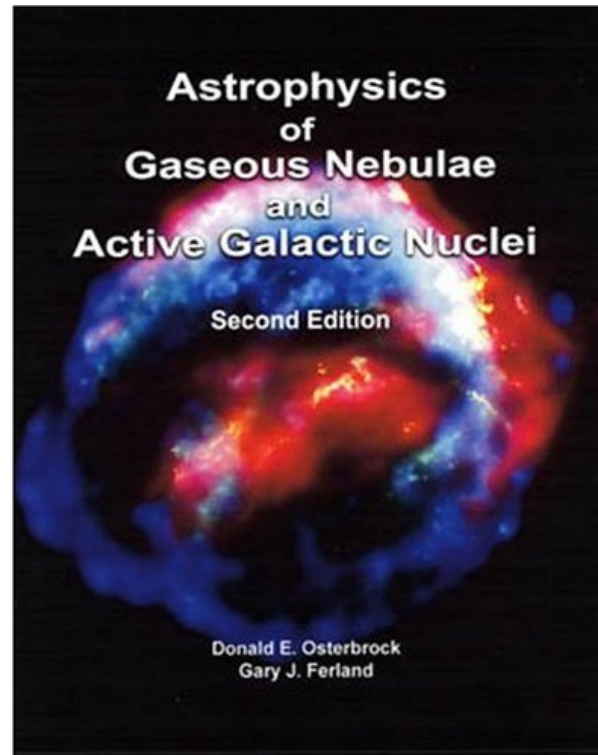


# Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei

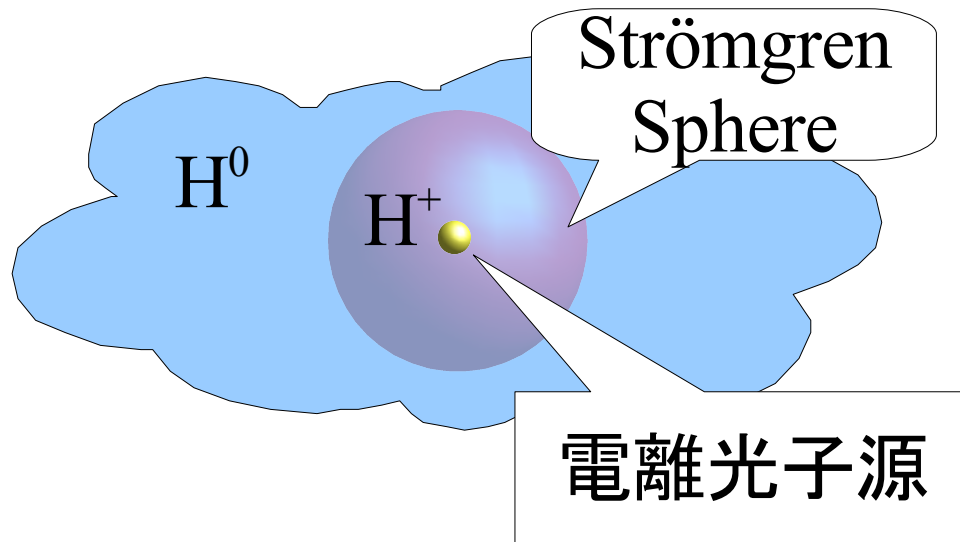


2006-11-30 (Thu.)  
Koizumi Osamu



# 前回まで

密度・温度が一様なガスの**電離平衡**を考えた



Optically thick な nebula では on-the-spot 近似が有効  
電離平衡は H, He について考慮すればよい



# 3.1 Introduction

static nebula

heating

- 光電離

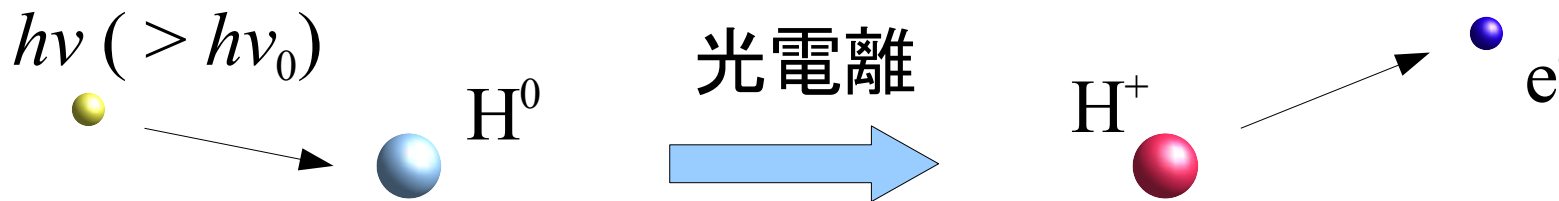


平衡  
(温度一定)

cooling

- 再結合
- 放射

heating process



衝突後の電子が持つ運動エネルギー

$$\frac{1}{2} m u^2 = h(\nu - \nu_0)$$

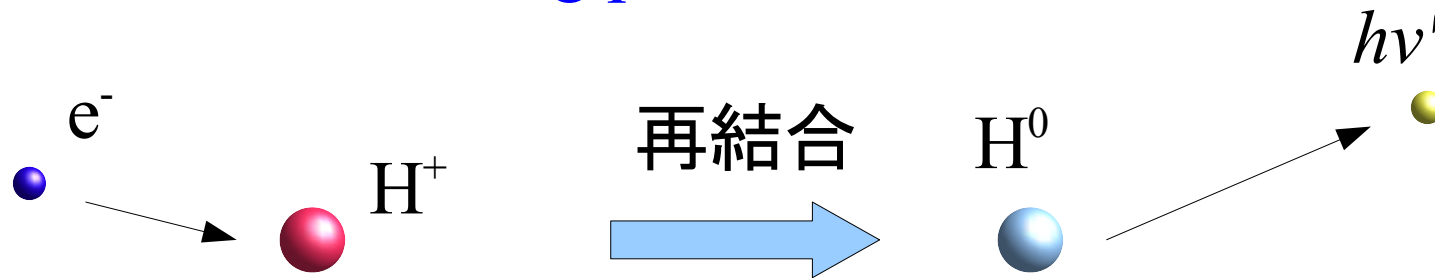


# 3.1 Introduction

光電離された電子は、すぐに thermalize される。  
(弾性散乱の断面積  $\gg$  その他の断面積)

電離平衡下では (光電離数) = (再結合数)

recombination cooling processes



この過程で運動エネルギー  $1/2 mu^2$  が消える



# 3.1 Introduction

$$(\text{正味のエネルギー獲得量}) = G - L_R$$

$G$  : 光電離によるエネルギー獲得量 (Gain)

$L_R$  : 再結合によるエネルギー損失量 (Loss)

平衡状態では

$$(\text{正味のエネルギー獲得量}) = (\text{放射による損失})$$

放射による損失

☺ abundant ion の束縛準位の電子衝突励起による放射 ( $L_C$ )

▲ free-free emission (bremsstrahlung) ( $L_{FF}$ )

→ それぞれの過程について詳しく見ていく



## 3.2 Energy Input by Photoionization

まずは pure H nebula を考える。

光電離による単位時間、単位体積あたりのエネルギー流入

$$G(\text{H}) = n(\text{H}^0) \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} h(\nu - \nu_0) a_{\nu}(\text{H}^0) d\nu \quad \text{erg cm}^{-3} \text{s}^{-1} \quad (3.1)$$

nebula は電離平衡状態にある

$$n(\text{H}^0) \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} a_{\nu}(\text{H}^0) d\nu = n_e n_p \alpha_A(\text{H}^0, T) \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \longrightarrow G(\text{H}) &= n_e n_p \alpha_A(\text{H}^0, T) \frac{\int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} h(\nu - \nu_0) a_{\nu}(\text{H}^0) d\nu}{\int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} a_{\nu}(\text{H}^0) d\nu} \\ &= n_e n_p \alpha_A(\text{H}^0, T) \cdot \frac{3}{2} k T_i \quad (3.2) \end{aligned}$$

電子が持つ平均の  
初期運動エネルギー



# 3.2 Energy Input by Photoionization

(3.2) は  $J_\nu$  が分かっているならば、数値計算できる。

Table 3.1

Mean input energy of photoelectrons

Model stellar atmosphere $T_*$ (K)	$T_i$ (K)			
	$\tau_0 = 0$	$\tau_0 = 1$	$\tau_0 = 5$	$\tau_0 = 10$
$3.0 \times 10^4$	$1.58 \times 10^4$	$1.87 \times 10^4$	$3.36 \times 10^4$	$5.02 \times 10^4$
$3.5 \times 10^4$	$2.08 \times 10^4$	$2.48 \times 10^4$	$4.24 \times 10^4$	$5.94 \times 10^4$
$4.0 \times 10^4$	$2.48 \times 10^4$	$3.01 \times 10^4$	$5.48 \times 10^4$	$8.15 \times 10^4$
$5.0 \times 10^4$	$3.33 \times 10^4$	$4.12 \times 10^4$	$7.50 \times 10^4$	$10.60 \times 10^4$

星からの距離が大きい  $\rightarrow$  吸収の影響で電離スペクトルに修正

series limit に近いところで減光がもっとも大きい

$\rightarrow$  高エネルギー光子ほど遠くへ

$\rightarrow \tau_0(r)$  が大きいほど  $T_i$  が大



# 3.3 Energy Loss by Recombination

再結合による電子ガスの運動エネルギー損失

$$L_R(H) = n_e n_p k T \beta_A(H^0, T) \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (3.3)$$

where

$$\beta_A(H^0, T) = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n(H^0, T) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{L=0}^{n-1} \beta_{n,L}(H^0, T) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (3.4)$$

with

$$\beta_{nL}(H^0, T) = \frac{1}{kT} \int_0^{\infty} u \sigma_{nL}(H^0, T) \frac{1}{2} m u^2 f(u) du \quad (3.5)$$

再結合断面積  $\propto u^{-2}$  なので、  
速度の遅い電子ほど捕獲されやすい。

→ 捕獲される平均エネルギーは  $3/2 kT$  よりやや小さい





# 3.3 Energy Loss by Recombination

放射損失のない pure H nebula での熱平衡方程式

$$G(\text{H}) = L_{\text{R}}(\text{H}) \quad (3.6)$$

速度の遅い電子が吸収されやすいので、 $T > T_i$  となる

$$n_e n_p \alpha_{\text{A}}(\text{H}^0, T) \frac{3}{2} k T_i = n_e n_p k T \beta_{\text{A}}(\text{H}^0, T)$$

$$\longrightarrow \frac{T}{T_i} = \frac{3}{2} \frac{\alpha_{\text{A}}(\text{H}^0, T)}{\beta_{\text{A}}(\text{H}^0, T)} > 1$$

Table 3.2

Recombination cooling coefficient (in  $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ ).

$T(\text{K})$	$\beta_{\text{A}}$	$\beta_{\text{I}}$	$\beta_{\text{B}}$
2,500	$9.02 \times 10^{-13}$	$3.22 \times 10^{-13}$	$5.80 \times 10^{-13}$
5,000	$5.48 \times 10^{-13}$	$2.23 \times 10^{-13}$	$3.24 \times 10^{-13}$
10,000	$3.25 \times 10^{-13}$	$1.52 \times 10^{-13}$	$1.73 \times 10^{-13}$
20,000	$1.88 \times 10^{-13}$	$1.00 \times 10^{-13}$	$8.75 \times 10^{-14}$

Table 2.1

Recombination coefficients (in  $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ )  $\alpha_n {}^2L$  for H

	5,000 K	10,000 K	20,000 K
$\alpha_1 {}^2S$	$2.28 \times 10^{-13}$	$1.58 \times 10^{-13}$	$1.08 \times 10^{-13}$
$\alpha_2 {}^2S$	$3.37 \times 10^{-14}$	$2.34 \times 10^{-14}$	$1.60 \times 10^{-14}$
$\alpha_2 {}^2P^o$	$8.33 \times 10^{-14}$	$5.35 \times 10^{-14}$	$3.24 \times 10^{-14}$
$\alpha_3 {}^2S$	$1.13 \times 10^{-14}$	$7.81 \times 10^{-15}$	$5.29 \times 10^{-15}$
$\alpha_3 {}^2P^o$	$3.17 \times 10^{-14}$	$2.04 \times 10^{-14}$	$1.23 \times 10^{-14}$
$\alpha_3 {}^2D$	$3.43 \times 10^{-14}$	$1.73 \times 10^{-14}$	$9.49 \times 10^{-15}$
$\alpha_4 {}^2S$	$5.23 \times 10^{-15}$	$3.59 \times 10^{-15}$	$2.40 \times 10^{-15}$
$\alpha_4 {}^2P^o$	$1.51 \times 10^{-14}$	$9.66 \times 10^{-15}$	$5.81 \times 10^{-15}$
$\alpha_4 {}^2D$	$1.90 \times 10^{-14}$	$1.08 \times 10^{-14}$	$5.68 \times 10^{-15}$
$\alpha_4 {}^2F^o$	$1.09 \times 10^{-14}$	$5.54 \times 10^{-15}$	$2.56 \times 10^{-15}$
$\alpha_{10} {}^2S$	$4.33 \times 10^{-16}$	$2.84 \times 10^{-16}$	$1.80 \times 10^{-16}$
$\alpha_{10} {}^2G$	$2.02 \times 10^{-15}$	$9.28 \times 10^{-16}$	$3.91 \times 10^{-16}$
$\alpha_{10} {}^2M$	$2.7 \times 10^{-17}$	$1.0 \times 10^{-17}$	$4.0 \times 10^{-18}$
$\alpha_{\text{A}}$	$6.82 \times 10^{-13}$	$4.18 \times 10^{-13}$	$2.51 \times 10^{-13}$
$\alpha_{\text{B}}$	$4.54 \times 10^{-13}$	$2.59 \times 10^{-13}$	$1.43 \times 10^{-13}$



# 3.3 Energy Loss by Recombination

$$G(\text{H}) = L_{\text{R}}(\text{H}) \quad (3.6)$$

$$G(\text{H}) = n(\text{H}^0) \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} h(\nu - \nu_0) a_{\nu}(\text{H}^0) d\nu \quad \text{erg cm}^{-3} \text{s}^{-1} \quad (3.1)$$

$J_{\nu}$  は diffuse radiation ( $J_{\nu\text{d}}$ ) も含む

on-the-spot 近似のもとでは、 $J_{\nu\text{d}}$  は nearby spot での  $n = 1$  への再結合と釣り合っている。

$J_{\nu\text{d}}$  と基底状態への再結合は、 $G(\text{H})$  と  $L(\text{H})$  から消去できる



# 3.3 Energy Loss by Recombination

$$\begin{aligned} G_{\text{OTS}}(\text{H}) &= n(\text{H}^0) \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu s}}{h\nu} h(\nu - \nu_0) a_{\nu}(\text{H}^0) d\nu \quad \text{erg cm}^{-3} \text{s}^{-1} \\ &= n_e n_p \alpha_B \frac{\int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu s}}{h\nu} h(\nu - \nu_0) a_{\nu} d\nu}{\int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu s}}{h\nu} a_{\nu} d\nu} \quad (3.7) \end{aligned}$$

and

$$L_{\text{OTS}} = n_e n_p k T \beta_B(\text{H}^0, T) \quad (3.8)$$

where  $\beta_B(\text{H}^0, T) = \sum_{n=2}^{\infty} \beta_n(\text{H}^0, T) \quad (3.9)$



# 3.3 Energy Loss by Recombination

He も含めて一般化する場合

$$G = G(\text{H}) + G(\text{He}) \quad (3.10)$$

$$G(\text{He}) = n_e n(\text{He}^+) \alpha_A(\text{He}^0, T) \frac{\int_{\nu_2}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} h(\nu - \nu_2) a_{\nu}(\text{He}^0) d\nu}{\int_{\nu_2}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} a_{\nu}(\text{He}^0) d\nu} \quad (3.11)$$

$$L_R = L_R(\text{H}) + L_R(\text{He}) \quad (3.12)$$

$$L_R(\text{He}) = n_e n(\text{He}^+) k T \beta_A(\text{He}^0, T) \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (3.13)$$

$G$  も  $L_R$  もイオン密度に比例する

→ abundance の小さい重元素は良い近似で無視できる



# 3.4 Energy Loss by Free-Free Radiation

**free-free (bremsstrahlung)** は、  
再結合とは異なる**放射冷却過程**

他の電荷が作り出すクーロン場中を、  
電荷が加速度運動するときの放射

ほとんどの状況下で再結合よりも重要な冷却過程

→ **熱平衡を支配する**

$$\begin{aligned} L_{\text{FF}}(Z) &= 4\pi j_{\text{ff}} \\ &= \frac{2^5 \pi e^6 Z^2}{3^{3/2} h m c^3} \left( \frac{2\pi k T}{m} \right)^{\frac{1}{2}} g_{\text{ff}} n_e n_+ \quad \text{erg cm}^{-3} \text{s}^{-1} \\ &= 1.42 \times 10^{-27} Z^2 T^{\frac{1}{2}} g_{\text{ff}} n_e n_+ \end{aligned}$$

$n_+$  はイオンの数密度

$g_{\text{ff}}$  は nebula condition では  $\sim 1.3$

