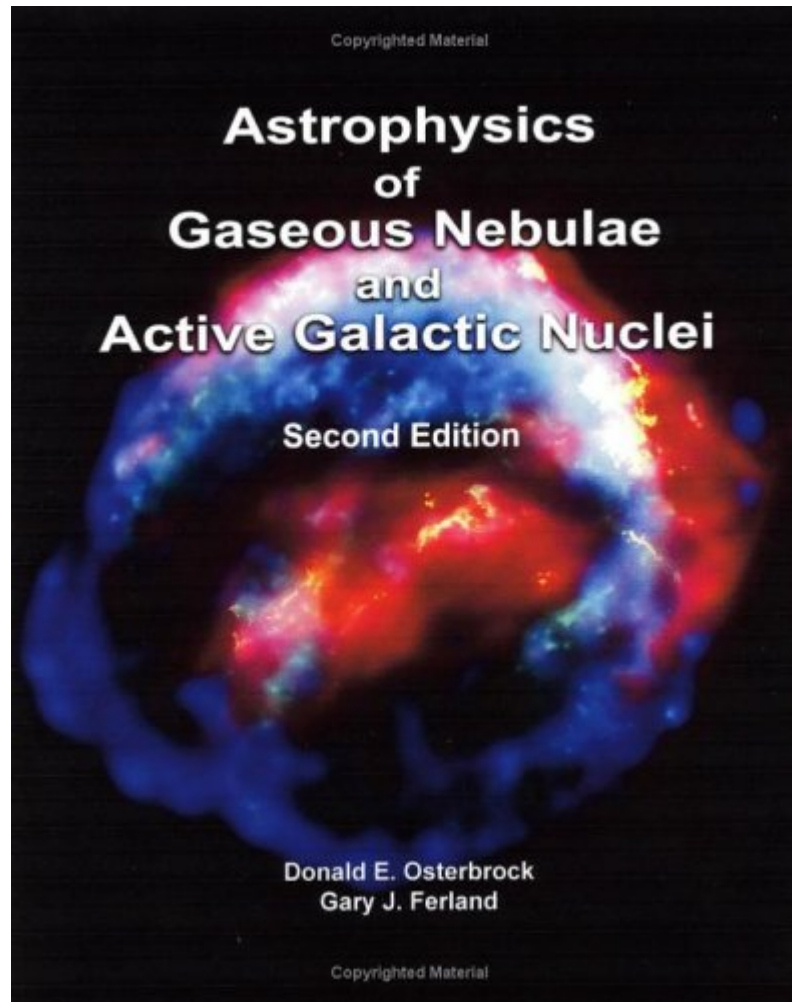


# Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei



2006 / 10 / 26 (Thu.)  
Koizumi Osamu

## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

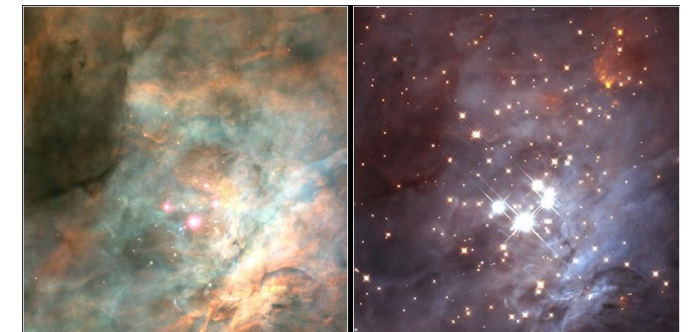
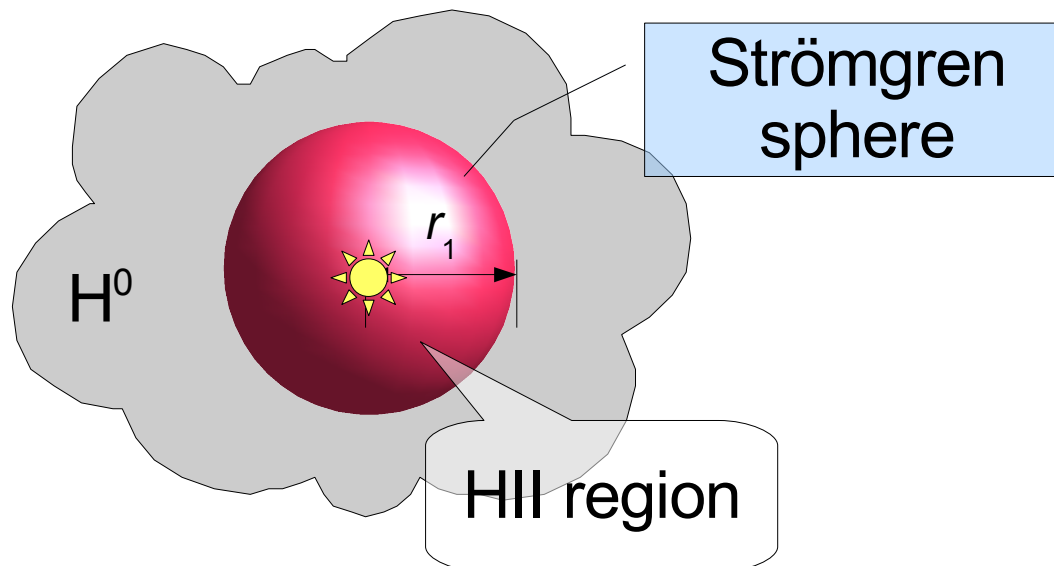
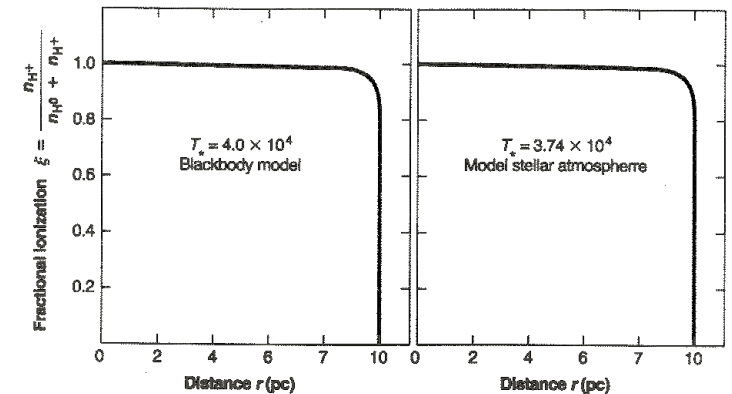
### 前回

水素だけから成る、密度・温度一定のガス雲の電離平衡

optically thin  $Q(\text{H}^0) = 4\pi/3 r_1^3 n_{\text{H}}^2 \alpha_{\text{A}}$

optically thick  $Q(\text{H}^0) = 4\pi/3 r_1^3 n_{\text{H}}^2 \alpha_{\text{B}}$

O3型、O4型星( $\sim 50000\text{K}$ ) :  $r_1 \sim 100 \text{ pc}$



オリオン星雲 (M 42)

## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

He は H について多い → 数で 10 % のオーダー  
H だけでなく He を含めて考えることで、より良い近似となる。

He の電離ポテンシャル  $h\nu_2 = 24.6 \text{ eV}$

He<sup>+</sup> の電離ポテンシャル  $54.4 \text{ eV}$

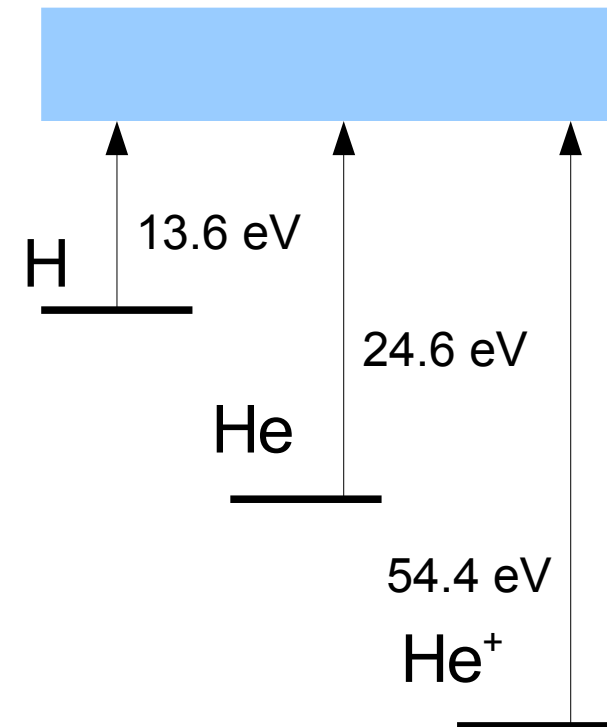
最も熱い O 型星でも、事実上  $h\nu > 54.4 \text{ eV}$  の光子は出さない  
→ 通常の H II 領域では He の二階電離は起きない

$13.6 \text{ eV} < h\nu < 24.6 \text{ eV}$     H を電離

$24.6 \text{ eV} < h\nu$     H, He を電離

ガス雲の電離構造は次の二つに依存

- 電離光子帯のスペクトル
- He の abundance

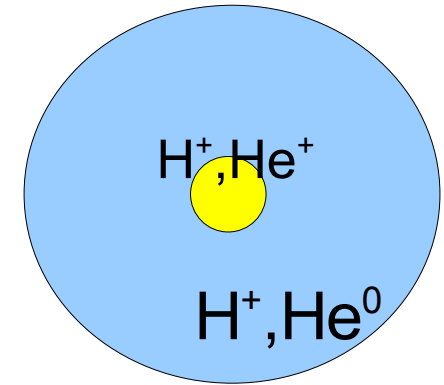


## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

### 二つの極限

電離光子のスペクトルが  $13.6 \text{ eV}$  に集中、  
 $24.6 \text{ eV} > h\nu$  の光子はわずか

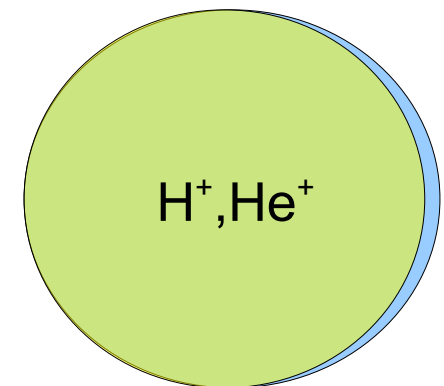
$13.6 \text{ eV} < h\nu < 24.6 \text{ eV}$     水素を電離  
 $24.6 \text{ eV} < h\nu$                     He によって全て吸収



→ 中心に  $\text{H}^+$  と  $\text{He}^+$  の小さな領域、周りを  $\text{H}^+$  と  $\text{He}^0$  が取り囲む

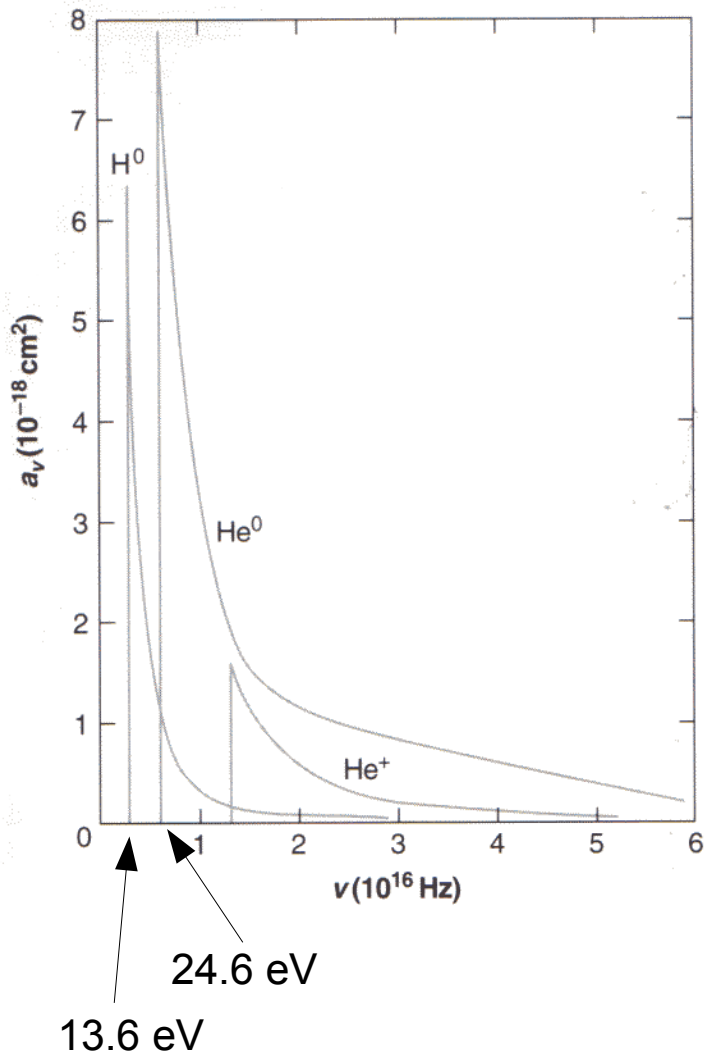
スペクトルが  $24.6 \text{ eV} < h\nu$  の光子を多く含み、  
これらの光子が H と He の電離を支配している場合

→ 両イオンの境界は共存、領域は  $\text{H}^+, \text{He}^+$  のみ



## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

### Helium の再結合断面積



$L \geq 2$  の He の total な再結合定数は  
 良い近似で水素と同程度。  
 $L \geq 2$  では準位が水素原子様なため。

ただし、He では singlet と triplet 準位に  
 わかれる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{n^1 L}(\text{He}^0, T) &\simeq \frac{1}{4} \alpha_{n^2 L}(\text{H}^0, T) \\ \alpha_{n^3 L}(\text{He}^0, T) &\simeq \frac{3}{4} \alpha_{n^2 L}(\text{H}^0, T) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} L \geq 2 \\ (2.20) \end{array}$$

S軌道とP軌道については、値が大きく異なる

# 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

Table 2.1

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

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

Table 2.4

Recombination coefficients (in  $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ ) for He

	T		
	5,000 K	10,000 K	20,000 K
$\alpha(\text{He}^0, 1 \text{}^1S)$	$2.17 \times 10^{-13}$	$1.54 \times 10^{-13}$	$1.10 \times 10^{-13}$
$\alpha(\text{He}^0, 2 \text{}^1S)$	$7.62 \times 10^{-15}$	$5.55 \times 10^{-15}$	$4.07 \times 10^{-15}$
$\alpha(\text{He}^0, 2 \text{}^1P^o)$	$1.97 \times 10^{-14}$	$1.26 \times 10^{-14}$	$7.57 \times 10^{-15}$
$\alpha(\text{He}^0, 3 \text{}^1S)$	$2.20 \times 10^{-15}$	$1.62 \times 10^{-15}$	$1.19 \times 10^{-15}$
$\alpha(\text{He}^0, 3 \text{}^1P^o)$	$7.87 \times 10^{-15}$	$5.01 \times 10^{-15}$	$2.99 \times 10^{-15}$
$\alpha(\text{He}^0, 3 \text{}^1D)$	$7.53 \times 10^{-15}$	$4.31 \times 10^{-15}$	$2.26 \times 10^{-15}$
$\alpha_B(\text{He}^0, \sum n \text{}^1L)$	$1.09 \times 10^{-13}$	$6.23 \times 10^{-14}$	$3.46 \times 10^{-14}$
$\alpha(\text{He}^0, 2 \text{}^3S)$	$1.97 \times 10^{-14}$	$1.49 \times 10^{-14}$	$1.16 \times 10^{-14}$
$\alpha(\text{He}^0, 2 \text{}^3P^o)$	$8.52 \times 10^{-14}$	$5.60 \times 10^{-14}$	$3.52 \times 10^{-14}$
$\alpha(\text{He}^0, 3 \text{}^3S)$	$4.78 \times 10^{-15}$	$3.72 \times 10^{-15}$	$2.96 \times 10^{-15}$
$\alpha(\text{He}^0, 3 \text{}^3D)$	$2.95 \times 10^{-14}$	$1.95 \times 10^{-14}$	$1.23 \times 10^{-14}$
$\alpha_B(\text{He}^0, \sum n \text{}^3L)$	$3.57 \times 10^{-13}$	$2.10 \times 10^{-13}$	$1.21 \times 10^{-13}$
$\alpha_B(\text{He}^0)$	$4.66 \times 10^{-13}$	$2.72 \times 10^{-13}$	$1.56 \times 10^{-13}$

## 水素の再結合係数

$$\alpha_3 \text{}^2D = 3.43 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{1}{4} \alpha_3 \text{}^2D = 8.57 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{3}{4} \alpha_3 \text{}^2D = 2.57 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

## ヘリウムの再結合係数

$$\alpha(\text{He}^0, 3 \text{}^1D) = 7.53 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\alpha(\text{He}^0, 3 \text{}^3D) = 2.95 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$3.7 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

### 電離平衡方程式

H, He 電離平衡方程式は  $24.6 \text{ eV} < h\nu$  の輻射場を通じて結合

### 1. He 基底状態への再結合

He の基底状態への再結合で放射される光子(  $24.6 \text{ eV} < h\nu$  )が、水素に吸収される割合

$$y = \frac{n(\text{H}^0)a_{\nu_2}(\text{H}^0)}{n(\text{H}^0)a_{\nu_2}(\text{H}^0)+n(\text{He}^0)a_{\nu_2}(\text{He}^0)} \quad (2.21)$$

ヘリウムに吸収される割合は  $(1 - y)$

## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

### 2. ヘリウムの励起状態への再結合

励起準位への再結合は、近似的に 3/4 が triplet 準位へ、1/4 が singlet 準位へ。

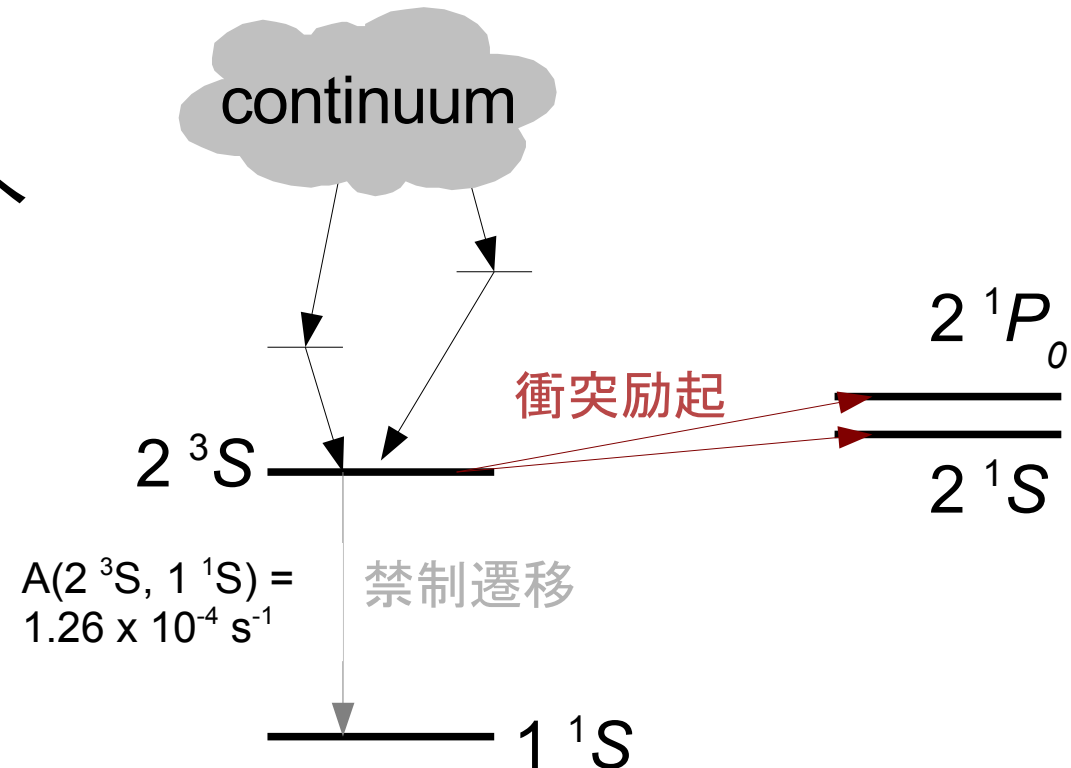
### 2.2 triplet 準位へ再結合した場合

放射遷移を繰り返し、最終的に準安定な  $2^3S$  へ。 ( $\because \Delta S = 0$ )

$2^3S$  からは次の二つの可能性

- 19.8 eV の光子を出して  $1^1S$  へ
- $2^1S$  または  $2^1P_0$  へ衝突励起

singlet 準位への励起はスピンの変化を伴うので、電子が原因となる。





# 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

## 2.2 triplet 準位へ再結合した場合

衝突励起による遷移確率

$$n_e q(2^3S, 2^1L) = n_e \int_{\frac{1}{2}mu^2 = \chi}^{\infty} u \sigma(2^3S, 2^1L, u) f(u) du$$

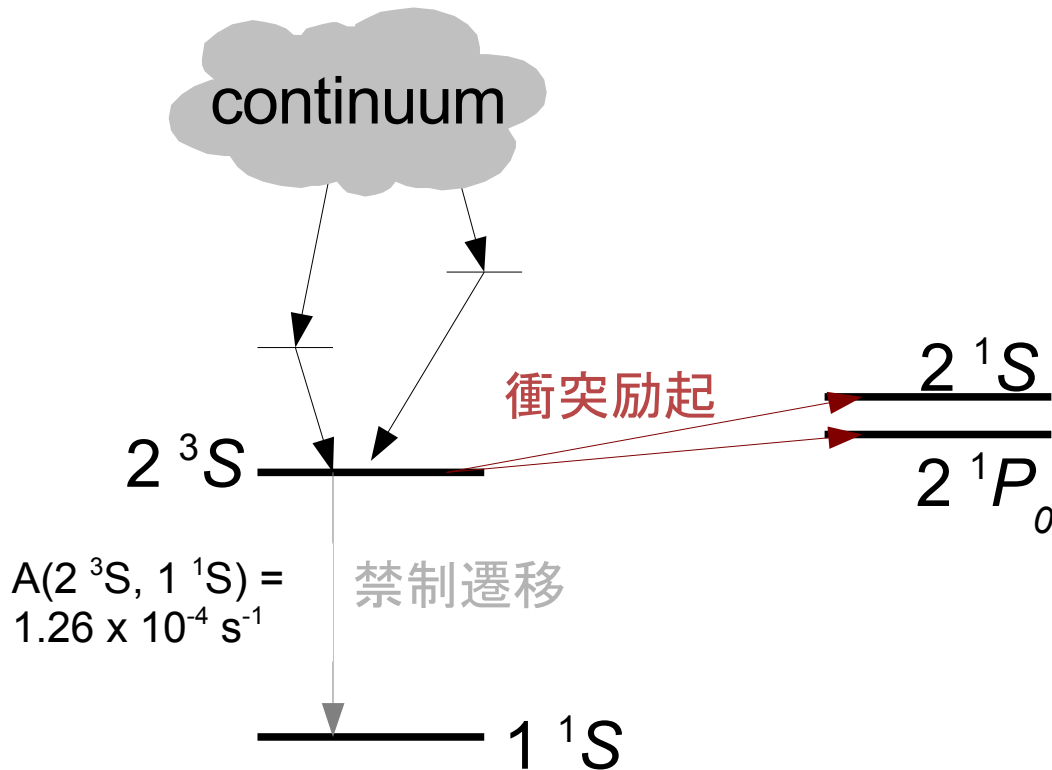


Table 2.5

Collisional rate coefficients (in cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) from He<sup>0</sup>(2<sup>3</sup>S)

T(K)	q(2 <sup>3</sup> S, 2 <sup>1</sup> S)	q(2 <sup>3</sup> S, 2 <sup>1</sup> P <sup>o</sup> )	n <sub>c</sub> <sup>a</sup>
6,000	1.95 × 10 <sup>-8</sup>	2.34 × 10 <sup>-9</sup>	6.2 × 10 <sup>3</sup>
8,000	2.45 × 10 <sup>-8</sup>	3.64 × 10 <sup>-9</sup>	4.6 × 10 <sup>3</sup>
10,000	2.60 × 10 <sup>-8</sup>	5.92 × 10 <sup>-9</sup>	3.9 × 10 <sup>3</sup>
15,000	3.05 × 10 <sup>-8</sup>	7.83 × 10 <sup>-9</sup>	3.3 × 10 <sup>3</sup>
20,000	2.55 × 10 <sup>-8</sup>	9.23 × 10 <sup>-9</sup>	3.3 × 10 <sup>3</sup>
25,000	2.68 × 10 <sup>-8</sup>	9.81 × 10 <sup>-9</sup>	3.4 × 10 <sup>3</sup>

a. Critical density in cm<sup>-3</sup>.

He<sup>0</sup>(2<sup>3</sup>S) からの衝突率係数

## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

### 2.2 triplet 準位へ再結合した場合

electron critical density

$$n_c(2^3S) = \frac{A(2^3S, 1^1S)}{q(2^3S, 2^1S) + q(2^3S, 2^1P^0)} \quad (2.23)$$

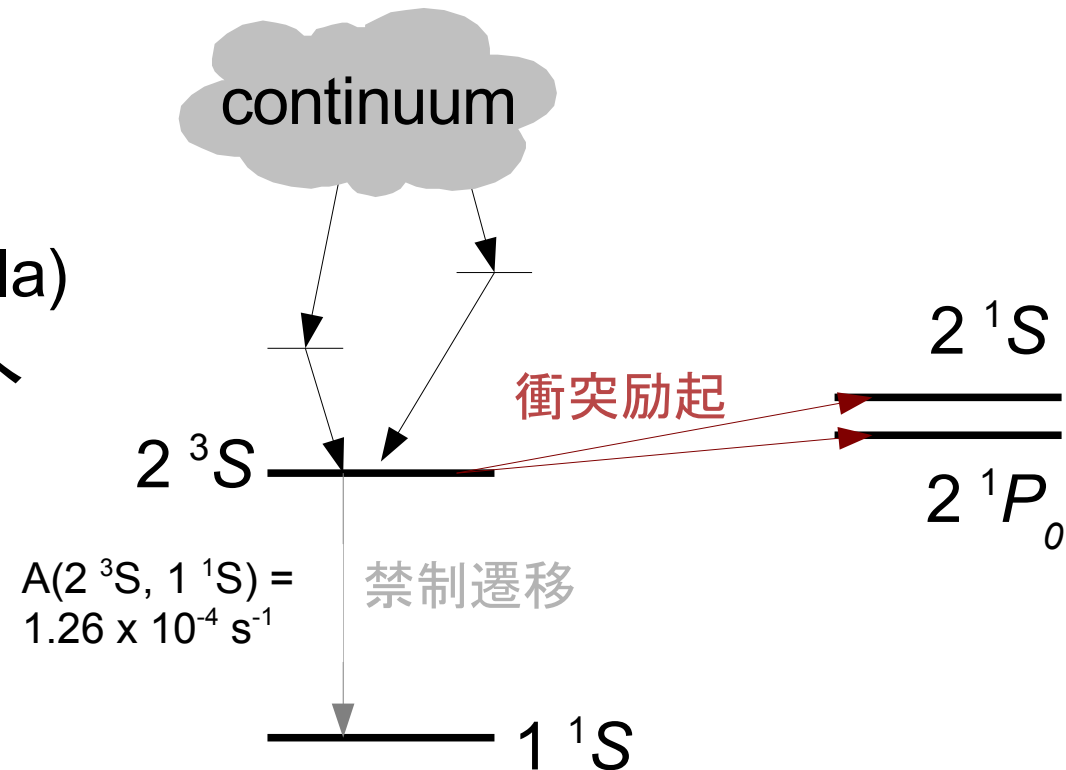
放射遷移と衝突遷移の起こる確率が等しくなる電子密度

$n_e < n_c$  (ex. H II 領域  $\sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$ )

19.8 eV の光子放射で  $1^1S$  へ

$n_c < n_e$  (ex. bright planetary nebula)

放射遷移する前に  $2^1S$  or  $2^1P^0$  へ



# 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

## 2.2 triplet 準位へ再結合した場合

Table 2.5  
Collisional rate coefficients (in  $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ ) from  $\text{He}^0(2^3S)$

$T(\text{K})$	$q(2^3S, 2^1S)$	$q(2^3S, 2^1P^o)$	$n_c^a$
6,000	$1.95 \times 10^{-8}$	$2.34 \times 10^{-9}$	$6.2 \times 10^3$
8,000	$2.45 \times 10^{-8}$	$3.64 \times 10^{-9}$	$4.6 \times 10^3$
10,000	$2.60 \times 10^{-8}$	$5.92 \times 10^{-9}$	$3.9 \times 10^3$
15,000	$3.05 \times 10^{-8}$	$7.83 \times 10^{-9}$	$3.3 \times 10^3$
20,000	$2.55 \times 10^{-8}$	$9.23 \times 10^{-9}$	$3.3 \times 10^3$
25,000	$2.68 \times 10^{-8}$	$9.81 \times 10^{-9}$	$3.4 \times 10^3$

a. Critical density in  $\text{cm}^{-3}$ .

衝突係数の比から  $T = 10^4 \text{ K}$  で

$$2^3S \rightarrow 2^1S \quad 0.83$$

$$2^3S \rightarrow 2^1P^o \quad 0.17$$

$1^1S$  への遷移も考慮すると

$$2^3S \rightarrow 2^1S \quad 0.78$$

$$2^3S \rightarrow 2^1P^o \quad 0.16$$

$$2^3S \rightarrow 1^1S \quad 0.06$$

## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

### 2.3 singlet 準位へ再結合した場合

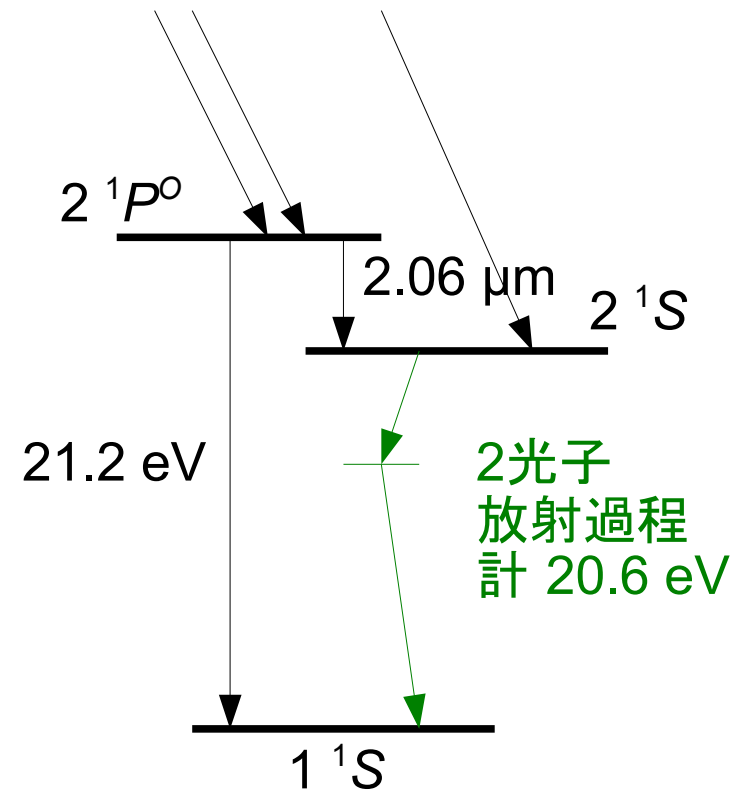
近似的に  $2/3$  が  $2^1P_0 \rightarrow 1^1S$  へ、 $1/3$  が  $2^1S$  へ。

$2^1P_0 \rightarrow 1^1S$       21.2 eV 共鳴線光子

$2^1P_0 \rightarrow 2^1S$       2.06  $\mu\text{m}$  線 ( $10^{-3}$ )

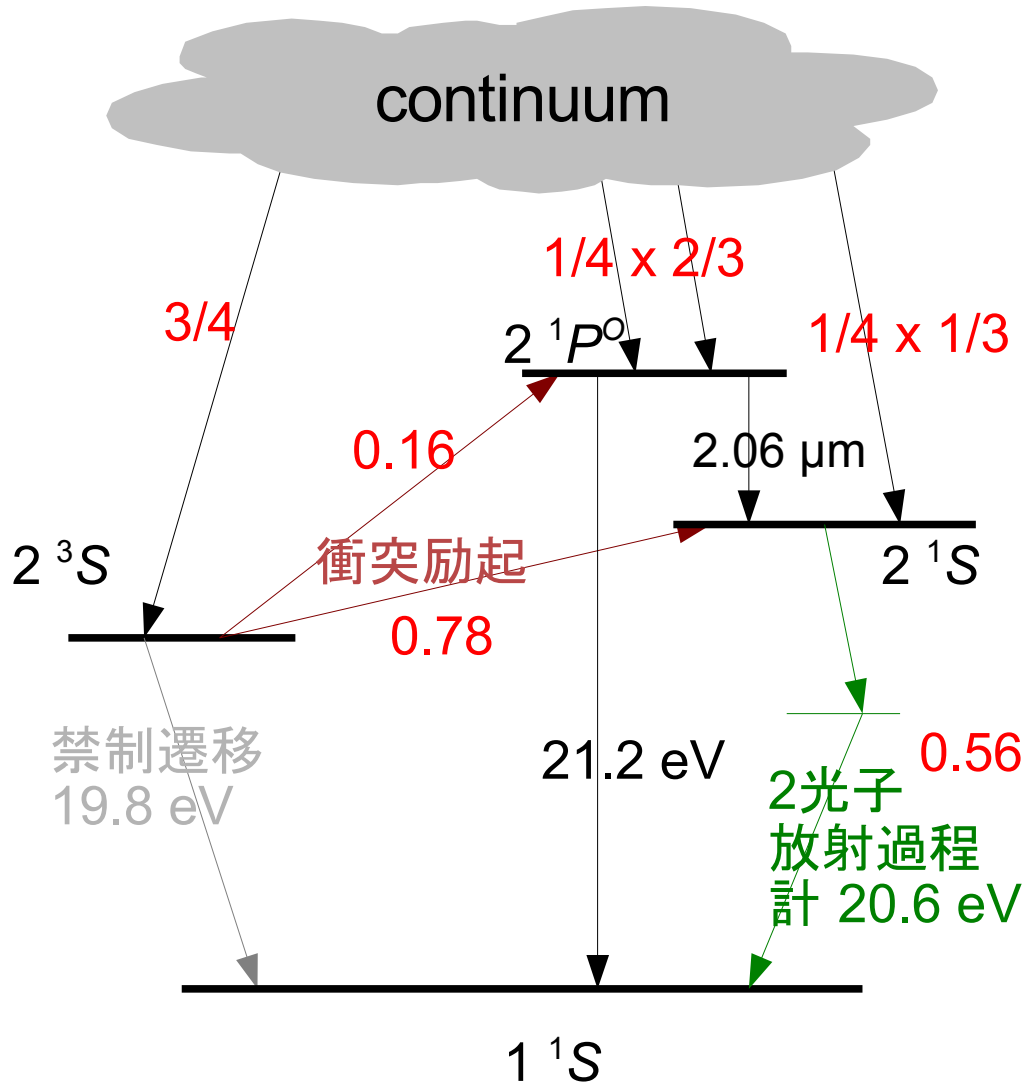
$2^1S \rightarrow 1^1S$       遷移確率 =  $51.3 \text{ s}^{-1}$

2光子放射過程で計 20.6 eV の光子を放射  
水素を電離できる光子が放射される確率は 0.56



## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

### 励起準位への再結合のまとめ



励起準位への再結合総数

$$n(\text{He}^+)n_e \alpha_B(\text{He}^0, T)$$

H 電離光子を生み出す割合  $p$

low-density limit  $n_e \ll n_c$

$$p \simeq \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \left[ \frac{2}{3} + \frac{1}{3} (0.56) \right] = 0.96$$

high-density limit  $n_e \gg n_c$

$$p \simeq \left[ \frac{3}{4} (0.78) + \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{3} \right] (0.56) + \left[ \frac{3}{4} (0.16) + \frac{1}{4} \cdot \frac{2}{3} \right] = 0.66$$

## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

### H に対する電離平衡方程式

$$\begin{aligned} & \frac{n(\text{H}^0) R^2}{r^2} \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{\pi F_{\nu}(R)}{h\nu} a_{\nu} \exp(-\tau_{\nu}) d\nu + y n(\text{He}^+) n_e \alpha_1(\text{He}^0, T) \\ & + p n(\text{He}^+) n_e \alpha_B(\text{He}^0, T) = n_p n_e \alpha_B(\text{H}^0, T) \end{aligned} \quad (2.24)$$

### He に対する電離平衡方程式

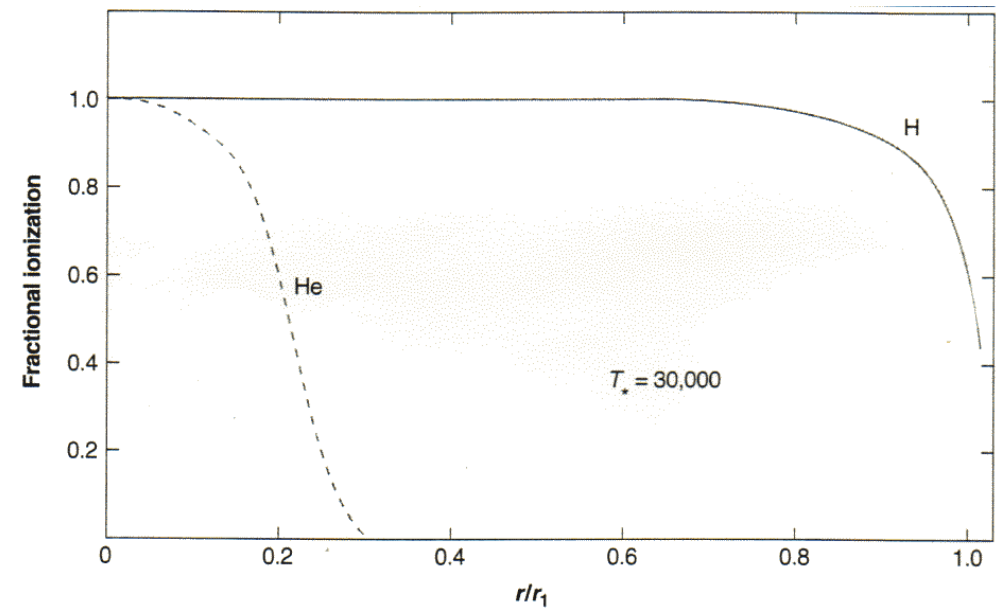
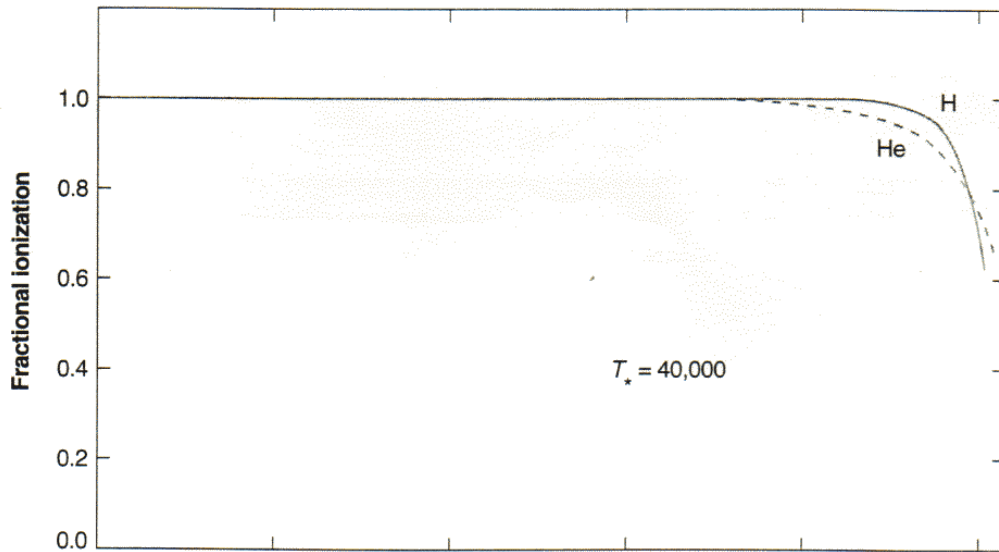
$$\begin{aligned} & \frac{n(\text{He}^0) R^2}{r^2} \int_{\nu_2}^{\infty} \frac{\pi F_{\nu}(R)}{h\nu} a_{\nu}(\text{He}^0) \exp(-\tau_{\nu}) d\nu + (1-y) n(\text{He}^+) n_e \alpha_1(\text{He}^0, T) \\ & = n(\text{He}^+) n_e \alpha_A(\text{He}^0, T) \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{d\tau_{\nu}}{dr} = n(\text{H}^0) a_{\nu}(\text{H}^0) \quad \text{for } \nu_1 < \nu < \nu_2, \\ & \frac{d\tau_{\nu}}{dr} = n(\text{H}^0) a_{\nu}(\text{H}^0) + n(\text{He}^0) a_{\nu}(\text{He}^0) \quad \text{for } \nu_2 < \nu, \\ & n_e = n_p + n(\text{He}^+) \end{aligned} \right. \quad (2.26)$$

## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

(2.24)~(2.26)は外側へ向けて逐次解いていくことができる。

diffuse nebula  $n(\text{H}) = 10 \text{ cm}^{-3}$ ,  $n(\text{He})/n(\text{H}) = 0.15$  について  
 $T_* = 40,000 \text{ K}$ 、 $30,000 \text{ K}$  の場合



He も、ある距離  $r_2$  を越えると電離割合が急激に落ちる。

## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

He<sup>+</sup> 領域の近似的な大きさ (水素による吸収を無視)

$$\begin{aligned} & \frac{n(\text{He}^0) R^2}{r^2} \int_{\nu_2}^{\infty} \frac{\pi F_{\nu}(R)}{h\nu} a_{\nu}(\text{He}^0) \exp(-\tau_{\nu}) d\nu + (1-y) n(\text{He}^+) n_e \alpha_1(\text{He}^0, T) \\ & = n(\text{He}^+) n_e \alpha_A(\text{He}^0, T) \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\frac{d\tau_{\nu}}{dr} = n(\text{H}^0) a_{\nu}(\text{H}^0) + n(\text{He}^0) a_{\nu}(\text{He}^0) \quad \text{for } \nu_2 < \nu \quad (2.26)$$

(2.25) で  $y = 0$  , (2.26) で  $n(\text{H}^0) = 0$  とすると

$$\int_{\nu_2}^{\infty} \frac{L_{\nu}}{h\nu} d\nu = Q(\text{He}^0) = \frac{4\pi}{3} r_2^3 n(\text{He}^+) n_e \alpha_B(\text{He}^0) \quad (2.27)$$

$r_2$  は He<sup>+</sup> 領域の半径



## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

$p \doteq 1$  のとき、He による吸収は H に対する電離光子を減らさない

$$\int_{\nu_0}^{\infty} \frac{L_{\nu}}{h\nu} d\nu = Q(\text{H}^0) = \frac{4\pi}{3} r_1^3 n(\text{H}^+) n_e \alpha_B(\text{H}^0) \quad (2.19)$$

$r_1$  は  $\text{H}^+$  領域の半径

---

$\text{He}^+$  zone  $\ll$   $\text{H}^+$  zone とすると

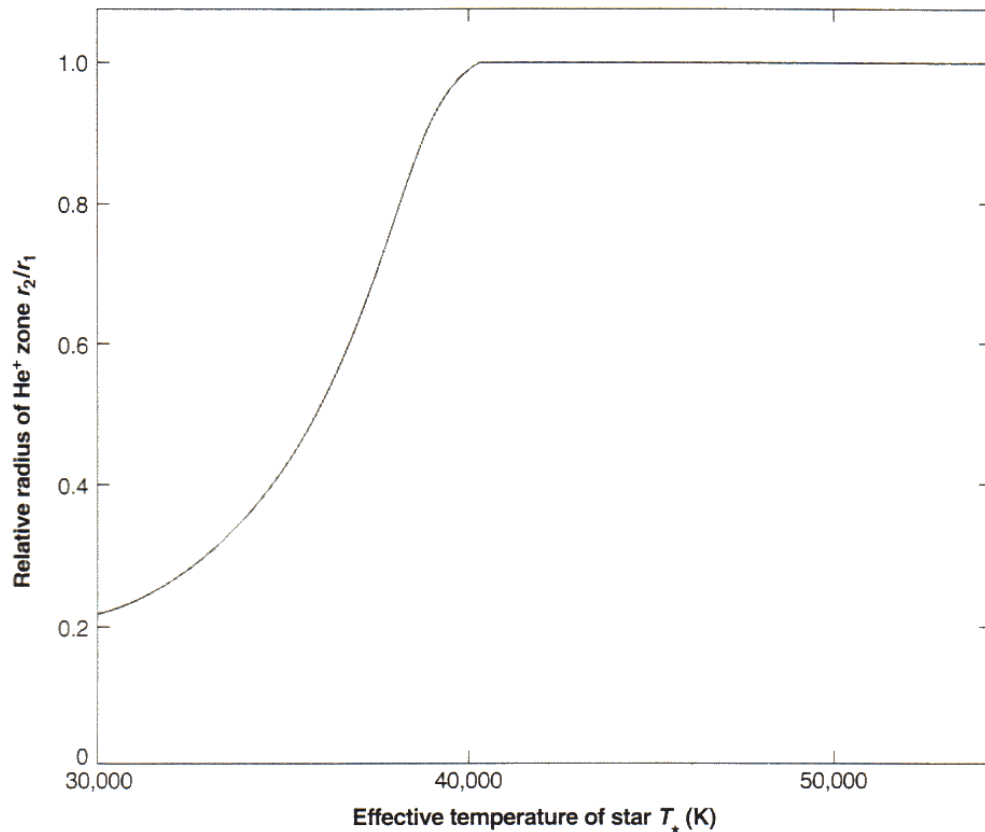
- $\text{H}^+$  領域の電子は H から出てきている
  - $\text{He}^+$  領域の電子は He, H からでてきている
- と近似できる。つまり、

$$(2.19) \text{ の } n_e \rightarrow n(\text{H}^+) = n_{\text{H}}$$

$$(2.27) \text{ の } n_e \rightarrow n(\text{He}^+) + n(\text{H}^+) = n_{\text{He}} + n_{\text{H}}$$

## 2.4 Photoionization of a Nebula Containing Hydrogen and Helium

$$\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3 = \frac{Q(\text{H}^0)}{Q(\text{He}^0)} \frac{n_{\text{He}}}{n_{\text{H}}} \left(1 + \frac{n_{\text{He}}}{n_{\text{H}}}\right) \frac{\alpha_B(\text{He}^0)}{\alpha_B(\text{H}^0)} \quad (2.28)$$



$n(\text{He})/n(\text{H}) = 0.15$ 、 $T = 7,500 \text{ K}$   
として (2.28) をプロット

近似をしているが、  
おおざっぱな傾向は正しい。