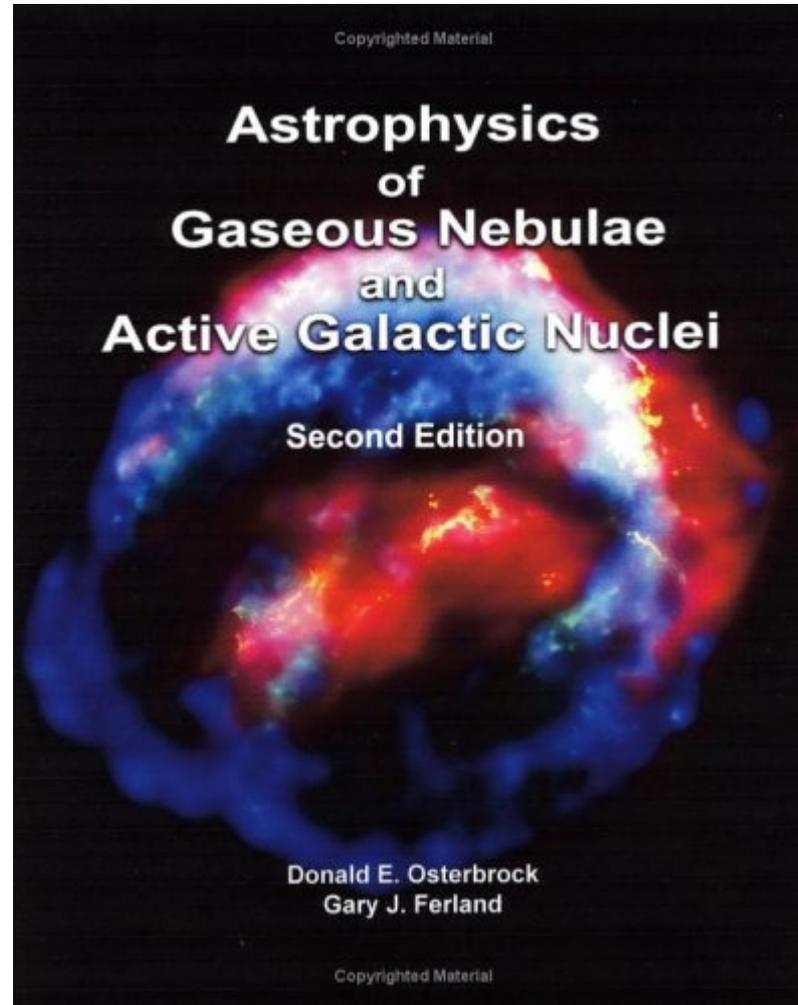


Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei



2006.11.16
Koizumi Osamu



2.5 Photoionization of He^+ to He^{++}

前回

通常のH II 領域

H と He からなる電離ガス雲

He の二階電離は起こらない

($h\nu > 54.4 \text{ eV}$)

$$Q(\text{He}^0) = \frac{4\pi}{3} r_2^3 n(\text{He}^+) n_e \alpha_B(\text{He}^0) \quad (2.27)$$

$$Q(\text{H}^0) = \frac{4\pi}{3} r_1^3 n(\text{H}^+) n_e \alpha_B(\text{H}^0) \quad (2.19)$$

r_1, r_2 : H, He の Strömgen 球半径

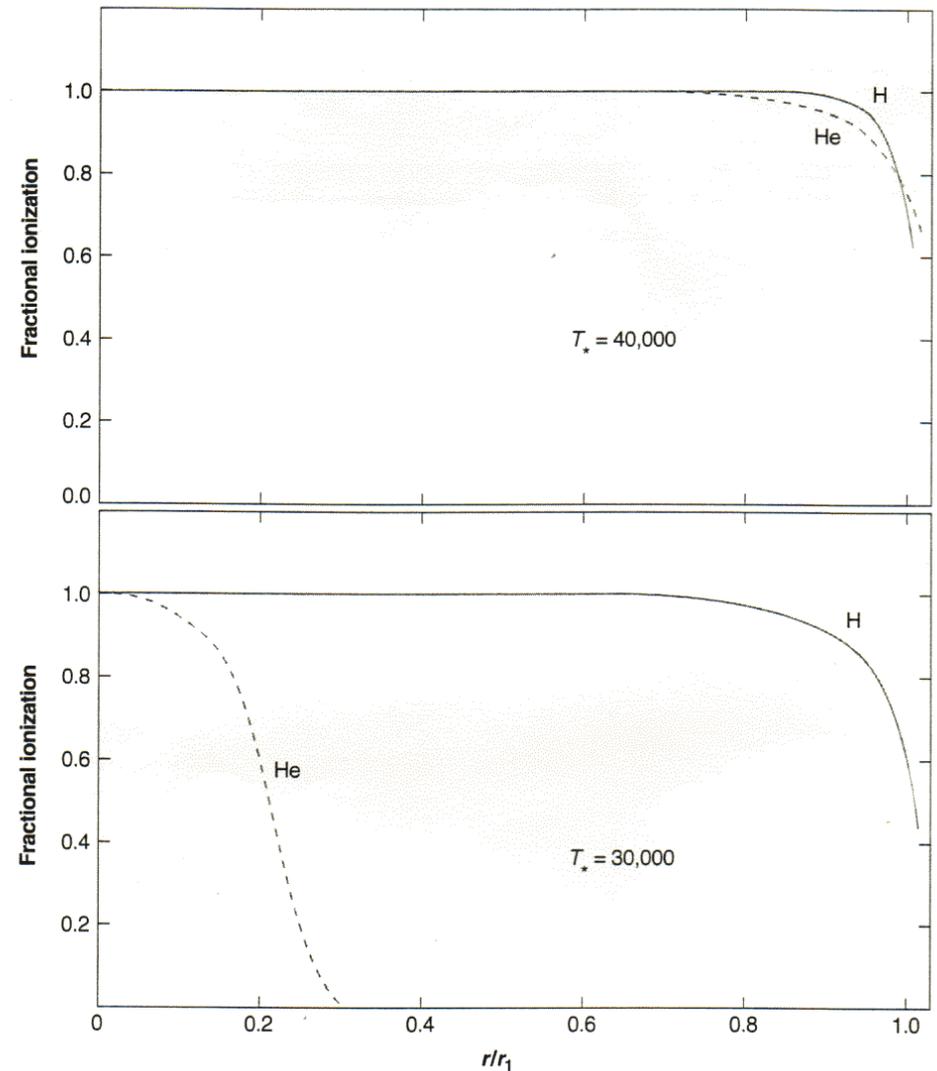


Figure 2.4

Ionization structure of two homogeneous H^+ He model H II regions.



2.5 Photoionization of He^+ to He^{++}

$$\text{He} \rightarrow \text{He}^+ \quad 24.6 \text{ eV} = h\nu_2$$

$$\text{He}^+ \rightarrow \text{He}^{++} \quad 54.4 \text{ eV} < h\nu$$

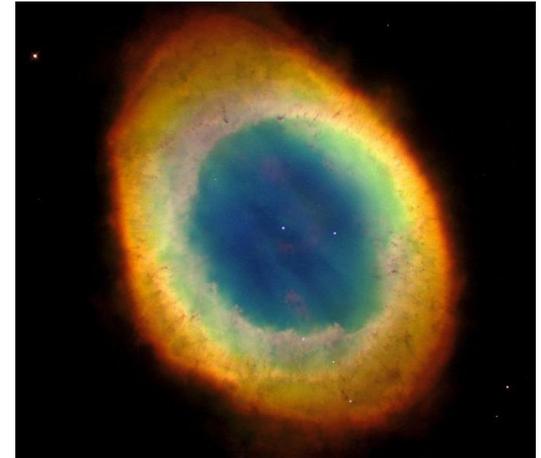
O型星でも $h\nu > 54.4 \text{ eV}$ の光子はほとんど出さない

Planetary Nebulae (中間質量の星の最期)

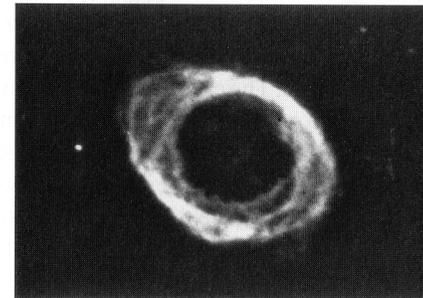
- 中心星がO3型星よりも十分に熱い
- He II の再結合線が観測されている
- 中心に He^{++} 領域ができる

He^{++} 領域については
pure H^+ zone のときと同様に考えられる

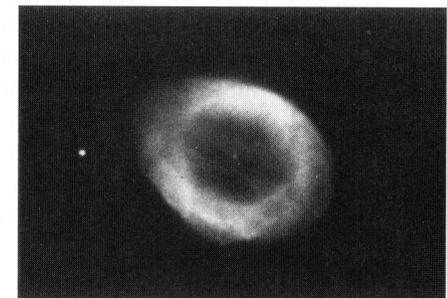
Planetary Nebula
NGC 6720 = M 57



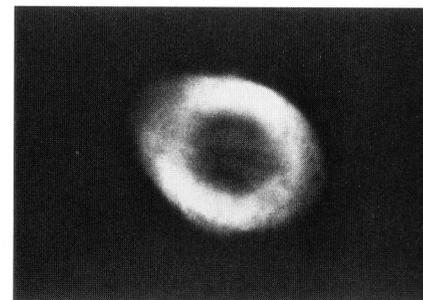
NGC 6720



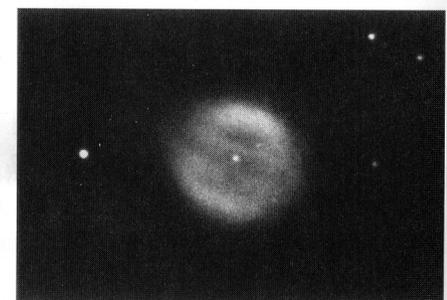
[O I] $\lambda 6300$



H I $\lambda 4861$



[O III] $\lambda 5007$



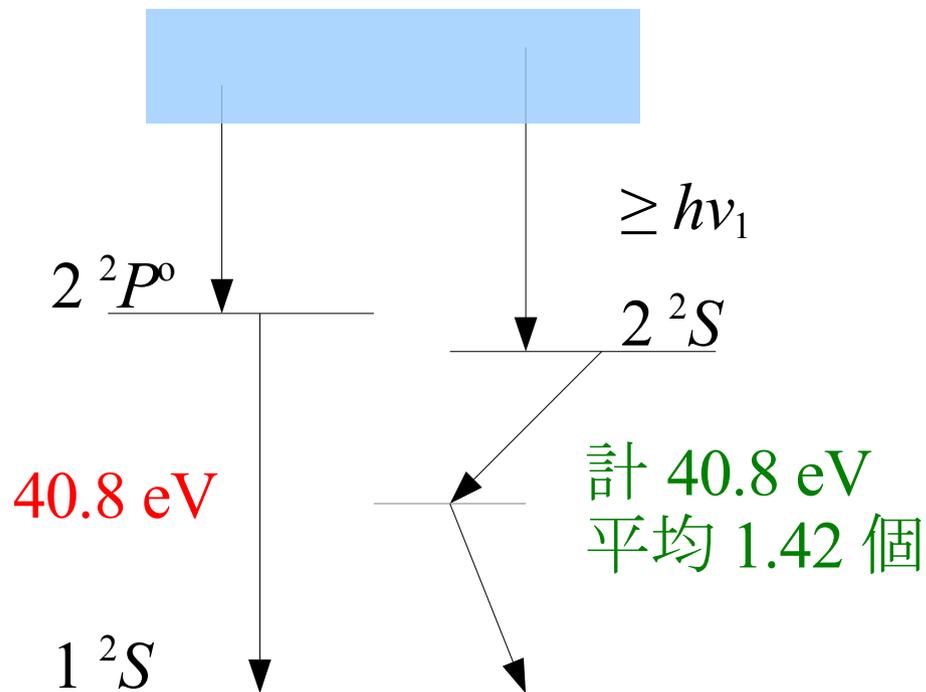
He II $\lambda 4686$



2.5 Photoionization of He⁺ to He⁺⁺

He⁺⁺ が H⁰ 電離光子を出す過程

1. He II Ly α 放射 40.8 eV
2. $2^2S \rightarrow 1^2S$ 二光子放射過程 計 40.8eV、平均 1.42 個の電離光子
3. $2^2S, 2^2P^0$ への直接的な再結合 \rightarrow He II Balmer continuum



He II Ly α 光子 \rightarrow 共鳴散乱

He II Ba cont. $\rightarrow hv_0$ あたりに集中

\rightarrow He⁺⁺ 領域の H⁰ を電離

2光子放射過程 \rightarrow He⁺⁺ 領域を脱出

\rightarrow He⁺ 領域での I_d に加えられる

近似的に、1と3が He⁺⁺ 領域の H⁰ を電離状態に保っていることができる



2.5 Photoionization of He⁺ to He⁺⁺

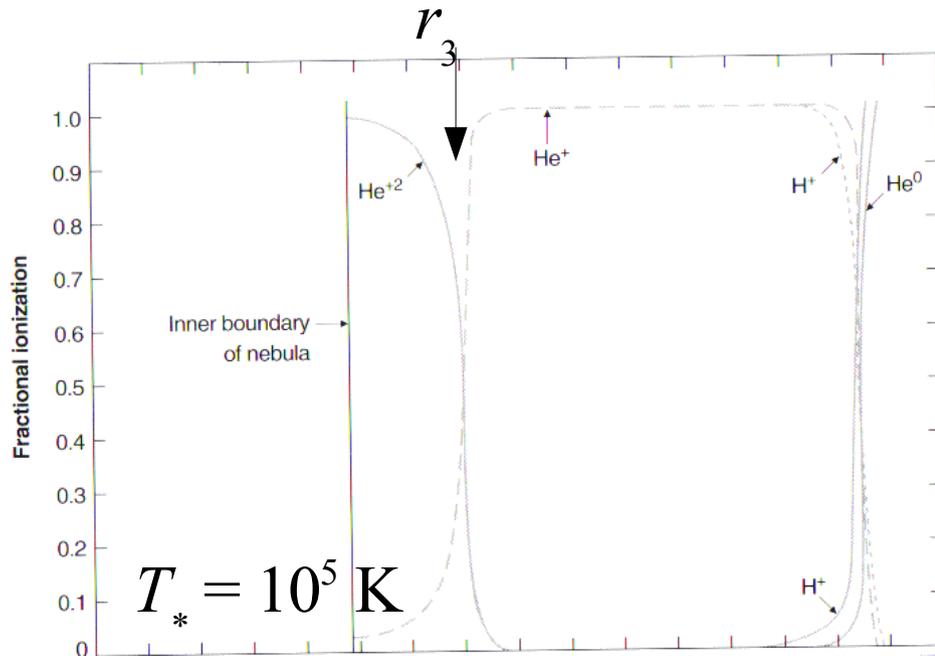
He⁺⁺ 領域で作られる電離光子の割合 (H 再結合あたり)

Table 2.6

Generation of H ionizing photons in the He⁺⁺ zone

Number generated per H recombination	$T = 10,000 \text{ K}$	$20,000 \text{ K}$	} ~ 1
$n(\text{He}^{++})q(\text{He}^+ \text{L}\alpha)/n(\text{H}^+)\alpha_B(\text{H}^0)$	0.64	0.66	
$n(\text{He}^{++})q(\text{He}^+ \text{2 photon})/n(\text{H}^+)\alpha_B(\text{H}^0)$	0.36	0.42	
$n(\text{He}^{++})q(\text{He}^+ \text{B}\alpha \text{c})/n(\text{H}^+)\alpha_B(\text{H}^0)$	0.20	0.25	

NOTE: Numerical values are calculated assuming that $n(\text{He}^{++})/n(\text{H}^+) = 0.15$.



He⁺⁺ Strömngren 球半径 r_3

$$\begin{aligned}
 Q(\text{He}^+) &= \int_{4\nu_0}^{\infty} \frac{L_\nu}{h\nu} d\nu \\
 &= \frac{4\pi}{3} r_3^3 n(\text{He}^{++}) n_e \alpha_B(\text{He}^+, T)
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

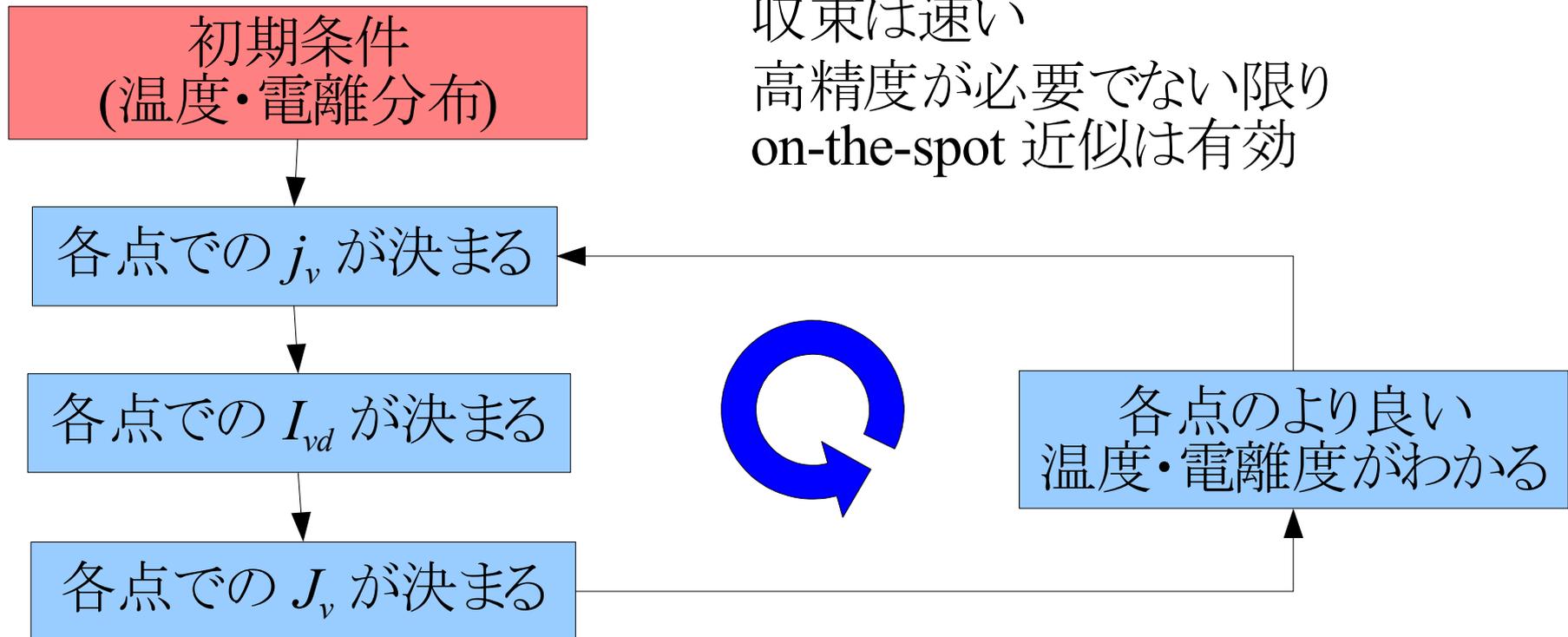


2.6 Further Iterations of the Ionization Structure

On-the-spot 近似

$$J_{vd} = \frac{j_v}{n(\text{H}^0) a_v}$$

On-the-spot 近似は温度・電離分布に対する第一次近似



2.7 Photoionization of Heavy Elements

O, C, Ne, N, Si, Fe など abundance が $10^{-3} - 10^{-4}$ の元素について考える

元素 X に対する $i \rightarrow i+1$ への電離平衡方程式 (2.30)

$$n(X^{+i}) \int_{\nu_i}^{\infty} \frac{4\pi J_{\nu}}{h\nu} a_{\nu}(X^{+i}) d\nu = n(X^{+i}) \Gamma(X^{+i}) = n(X^{+i+1}) n_e \alpha_G(X^{+i}, T)$$

$n(X^{+i}), n(X^{+i+1})$

それぞれの密度

$a_{\nu}(X^{+i})$

元素 X^i の基底状態に対する光電離断面積

$\alpha_G(X^{+i}, T)$

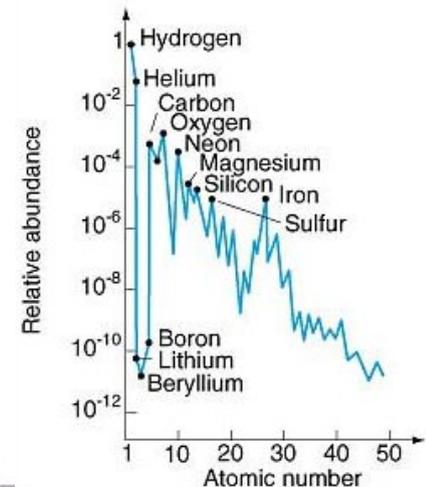
X^{+i} の全ての準位に対する再結合定数

$$n(X^0) + n(X^{+1}) + n(X^{+2}) + \dots + n(X^{+n}) = n(X)$$

これらの方程式から各点での電離平衡を決定可能

J_{ν} の diffuse part は abundance が小さいので無視できる。

→ H, He, He⁺ による放射を考慮すれば良い



cosmic abundance

2.7 Photoionization of Heavy Elements

重元素は通常 optical depth には寄与しないが、
ある種の状況下(特に He^0 の閾値以下近辺)では寄与する。

$$\frac{d\tau_\nu}{dr} = n(\text{H}^0)a_\nu(\text{H}^0) + \sum_{X,i} n(X^{+i})a_\nu(X^{+i}) \quad \text{for } \nu_0 < \nu < \nu_2 \quad (2.31)$$

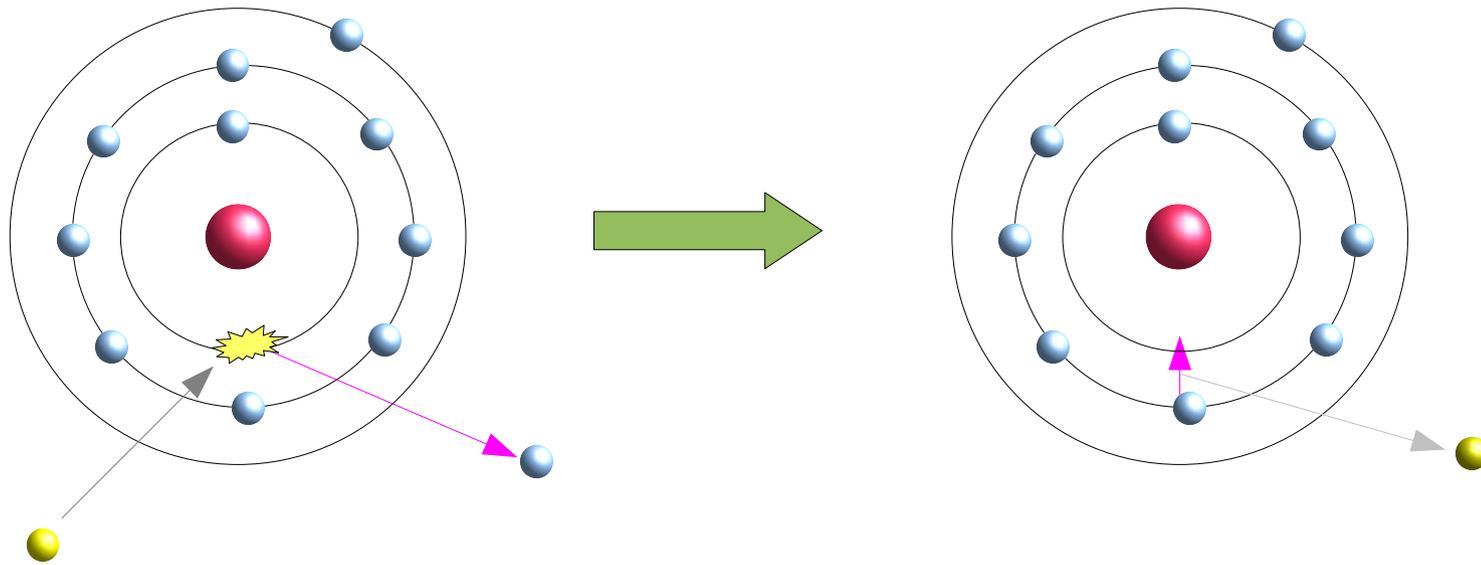
$$\frac{d\tau_\nu}{dr} = n(\text{H}^0)a_\nu(\text{H}^0) + n(\text{He}^0)a_\nu(\text{He}^0) + \sum_{X,i} n(X^{+i})a_\nu(X^{+i}) \quad \text{for } \nu_2 < \nu$$

※(2.26) の自然な形での一般化



2.7 Photoionization of Heavy Elements

多くの重元素は内殻にも電子を持っている
高エネルギー光子がくれば、殻内電子が電離される可能性がある



外殻電子により空乏内殻が埋まる。
または Auger 効果(二光子過程)によって埋まる。

これらは X 線スペクトルに対して重要な働きをするが、今は無視する。



2.7 Photoionization of Heavy Elements

複雑なイオンへの再結合は radiative part と dielectric part に分けられる

$$\alpha_G(X^{+i}, T) = \alpha_R(X^{+i}, T) + \alpha_d(X^{+i}, T) \quad (2.32)$$

radiative part は単純な bound-free recapture を表している。

Hydrogen-like に対しては、放射再結合係数 α_R が良い近似になる

Table 2.7

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

	T				
	1,250 K	2,500 K	5,000 K	10,000 K	20,000 K
$\alpha_A = \sum_1^{\infty} \alpha_n$	1.74×10^{-12}	1.10×10^{-12}	6.82×10^{-13}	4.18×10^{-13}	2.51×10^{-13}
$\alpha_B = \sum_2^{\infty} \alpha_n$	1.28×10^{-12}	7.72×10^{-13}	4.54×10^{-13}	2.59×10^{-13}	1.43×10^{-13}
$\alpha_C = \sum_3^{\infty} \alpha_n$	1.03×10^{-12}	5.99×10^{-13}	3.37×10^{-13}	1.87×10^{-13}	9.50×10^{-14}
$\alpha_D = \sum_4^{\infty} \alpha_n$	8.65×10^{-13}	4.86×10^{-13}	2.64×10^{-13}	1.37×10^{-13}	6.83×10^{-14}

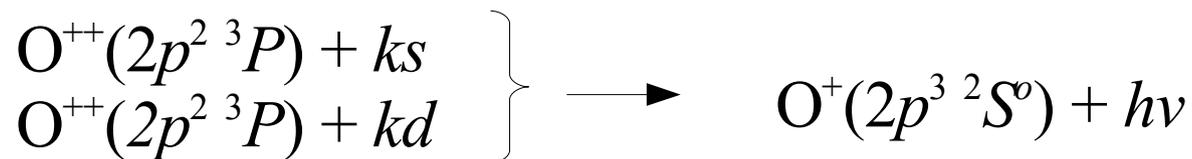
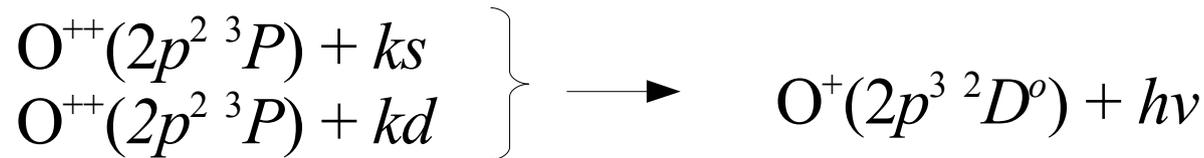
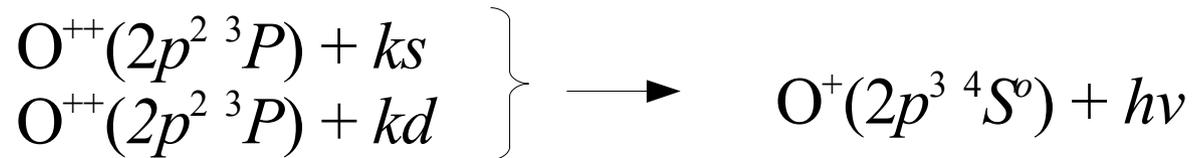
NOTE: In this table $Z = 1$; for other values of Z , $\alpha(Z, T) = Z\alpha(1, T/Z^2)$.



2.7 Photoionization of Heavy Elements

正確に計算するには Hydrogen-like からのずれを考慮

一番内側の殻への直接的な再結合はパウリ原理から他の電子の影響を受け、Hydrogen-like から離れる。たとえば



これらの場合の再結合係数は Milne relation を用いて光電離断面積を計算することから求まる。



2.7 Photoionization of Heavy Elements

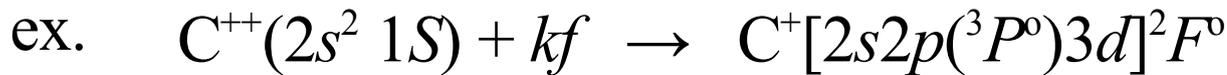
nebula の温度では、dielectric part は多くの重元素イオンで radiative part よりも大きい

再結合断面積があるエネルギーで共鳴を起こす結果

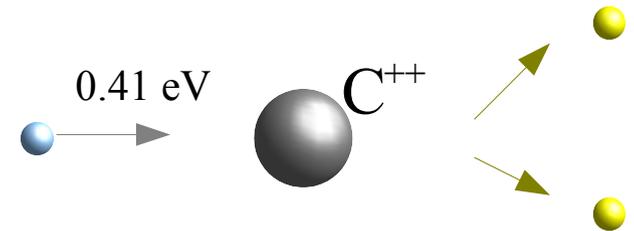
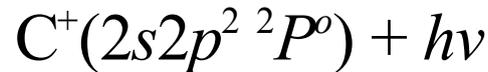
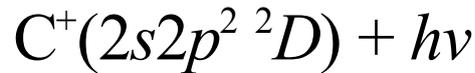
(入射自由電子の運動エネルギー) \div (イオンのbound level のエネルギー)



最終的には ground level へおちる



0.41 eV



これは nebula の温度では C⁺⁺ の主要な再結合過程。

さらに高エネルギーの共鳴も存在するが nebula の温度では小さい。
(精確な計算には含めるべき)

2.7 Photoionization of Heavy Elements

Table A5.1

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

$X^{+i} \setminus T$	5,000 K	10,000 K	20,000 K
O^0	5.89×10^{-13}	3.99×10^{-13}	3.25×10^{-13}
O^+	5.54×10^{-12}	3.66×10^{-12}	2.42×10^{-12}
O^{+2}	1.67×10^{-11}	1.72×10^{-11}	1.38×10^{-11}
O^{+3}	6.99×10^{-11}	4.67×10^{-11}	3.30×10^{-11}
Si^0	1.82×10^{-12}	1.35×10^{-12}	6.35×10^{-12}
Si^+	3.89×10^{-12}	5.21×10^{-12}	2.13×10^{-11}
Si^{+2}	2.21×10^{-11}	1.92×10^{-11}	3.68×10^{-11}
Si^{+3}	1.18×10^{-11}	7.05×10^{-12}	4.14×10^{-12}
Fe^0	2.69×10^{-13}	7.21×10^{-13}	4.08×10^{-12}
Fe^+	1.84×10^{-12}	1.02×10^{-12}	6.20×10^{-13}
Fe^{+2}	5.61×10^{-12}	3.33×10^{-12}	1.98×10^{-12}
Fe^{+3}	1.26×10^{-11}	7.82×10^{-12}	4.87×10^{-12}
Fe^{+4}	2.46×10^{-11}	1.51×10^{-11}	9.31×10^{-12}
Fe^{+5}	4.35×10^{-11}	2.62×10^{-11}	1.58×10^{-11}

nebula 中の重イオンへの再結合係数

α_D は exp の振る舞いで変化するので、
再結合係数の温度依存性も単純ではない

ほとんどの重イオンで α_D の重要性は
温度とともに増大する。

Table A5.2

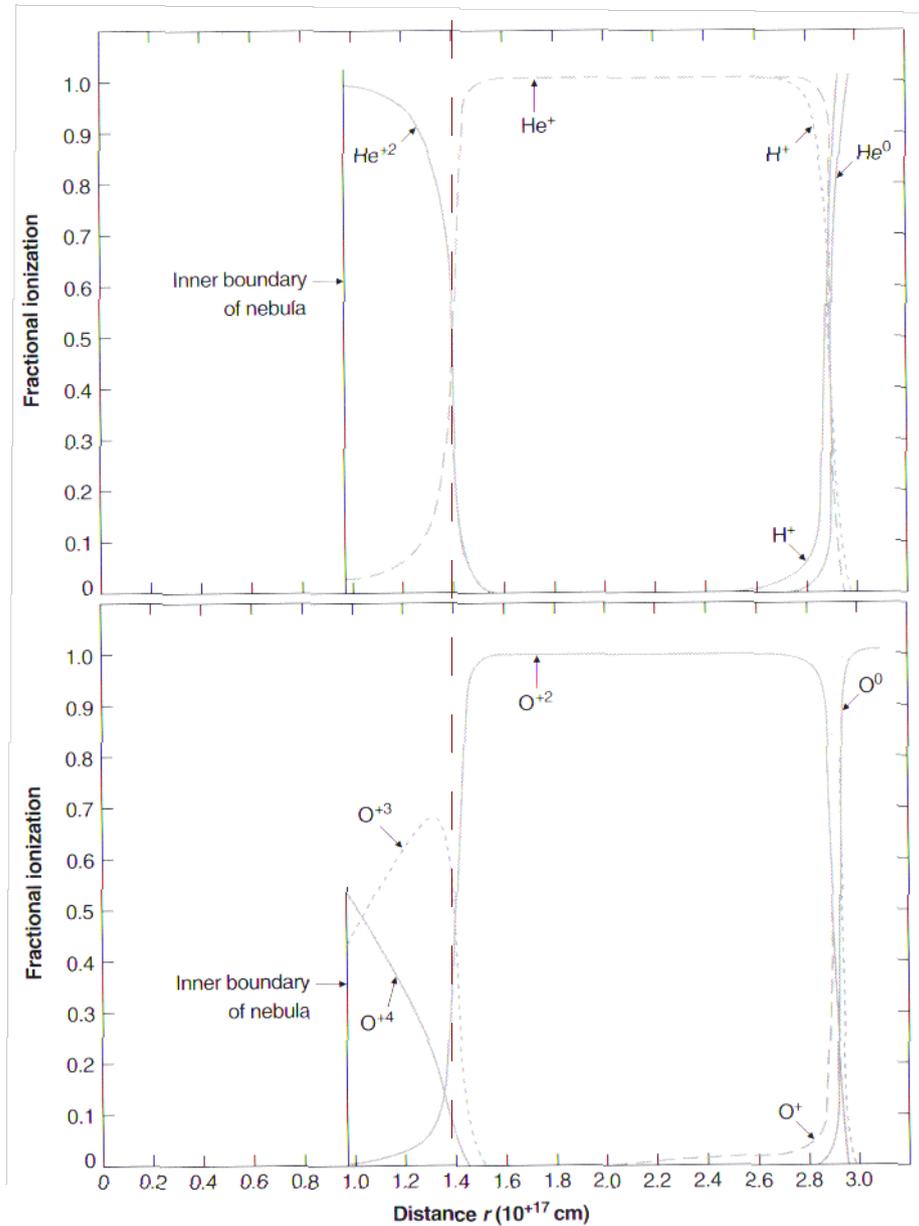
Recombination coefficients (in $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$) for ions in AGN

$X^{+i} \setminus T$	20,000 K	50,000 K	100,000 K	1,000,000 K
O^{+4}	2.29×10^{-11}	4.30×10^{-11}	4.27×10^{-11}	4.60×10^{-12}
O^{+5}	1.35×10^{-11}	7.04×10^{-12}	4.24×10^{-12}	9.13×10^{-13}
O^{+6}	2.26×10^{-11}	1.23×10^{-11}	7.72×10^{-12}	1.48×10^{-12}
O^{+7}	2.64×10^{-11}	1.41×10^{-11}	8.66×10^{-12}	1.43×10^{-12}
Si^{+4}	7.23×10^{-12}	3.68×10^{-12}	2.21×10^{-12}	3.24×10^{-12}
Si^{+5}	1.29×10^{-11}	6.76×10^{-12}	8.22×10^{-12}	1.78×10^{-11}
Si^{+6}	1.85×10^{-11}	1.03×10^{-11}	1.84×10^{-11}	2.22×10^{-11}
Si^{+7}	2.68×10^{-11}	1.61×10^{-11}	3.43×10^{-11}	2.88×10^{-11}
Si^{+8}	3.57×10^{-11}	2.14×10^{-11}	4.71×10^{-11}	3.61×10^{-11}
Si^{+9}	4.71×10^{-11}	2.68×10^{-11}	5.52×10^{-11}	4.89×10^{-11}
Si^{+10}	8.10×10^{-11}	4.62×10^{-11}	5.70×10^{-11}	1.43×10^{-11}
Si^{+11}	6.90×10^{-11}	3.71×10^{-11}	2.30×10^{-11}	4.20×10^{-12}
Si^{+12}	9.27×10^{-11}	5.13×10^{-11}	3.25×10^{-11}	6.67×10^{-12}
Si^{+13}	9.62×10^{-11}	5.28×10^{-11}	3.31×10^{-11}	6.26×10^{-12}
Fe^{+6}	2.43×10^{-11}	1.21×10^{-11}	9.38×10^{-12}	8.37×10^{-11}
Fe^{+7}	3.49×10^{-11}	1.70×10^{-11}	1.25×10^{-11}	1.01×10^{-10}
Fe^{+8}	4.64×10^{-11}	1.05×10^{-10}	3.74×10^{-10}	1.65×10^{-10}
Fe^{+9}	6.11×10^{-11}	8.04×10^{-11}	2.57×10^{-10}	1.32×10^{-10}
Fe^{+10}	7.43×10^{-11}	3.50×10^{-11}	2.68×10^{-11}	1.19×10^{-10}
Fe^{+11}	9.12×10^{-11}	4.27×10^{-11}	2.53×10^{-11}	1.20×10^{-10}
Fe^{+12}	1.11×10^{-10}	5.69×10^{-11}	1.51×10^{-10}	1.92×10^{-10}
Fe^{+13}	1.04×10^{-10}	5.66×10^{-11}	9.54×10^{-11}	1.35×10^{-10}
Fe^{+14}	1.20×10^{-10}	9.85×10^{-11}	2.57×10^{-10}	1.04×10^{-10}
Fe^{+15}	1.22×10^{-10}	6.54×10^{-11}	4.04×10^{-11}	9.30×10^{-12}
Fe^{+16}	1.49×10^{-10}	8.43×10^{-11}	5.80×10^{-11}	2.41×10^{-11}
Fe^{+17}	1.74×10^{-10}	1.10×10^{-10}	8.91×10^{-11}	4.26×10^{-11}
Fe^{+18}	2.00×10^{-10}	1.19×10^{-10}	1.04×10^{-10}	5.43×10^{-11}
Fe^{+19}	2.20×10^{-10}	2.03×10^{-10}	2.08×10^{-10}	7.82×10^{-11}
Fe^{+20}	2.41×10^{-10}	1.41×10^{-10}	9.19×10^{-11}	7.13×10^{-11}
Fe^{+21}	2.70×10^{-10}	1.58×10^{-10}	1.03×10^{-10}	7.82×10^{-11}
Fe^{+22}	3.97×10^{-09}	1.14×10^{-09}	4.79×10^{-10}	6.74×10^{-11}
Fe^{+23}	3.36×10^{-10}	1.86×10^{-10}	1.17×10^{-10}	2.35×10^{-11}
Fe^{+24}	4.03×10^{-10}	2.26×10^{-10}	1.45×10^{-10}	3.12×10^{-11}
Fe^{+25}	3.91×10^{-10}	2.20×10^{-10}	1.40×10^{-10}	2.93×10^{-11}

AGN 中の重イオンへの再結合係数



2.7 Photoionization of Heavy Elements



He⁺ の電離ポテンシャル 54.4 eV
O⁺⁺ の電離ポテンシャル 54.9 eV



- He⁺⁺ の outer edge
 - O⁺³ の outer edge
 - O⁺⁺ の inner edge
- がほぼ同じ場所に来ている

実際の電離ガス雲では密度集中が重要な役割を演じる。

これらの単純化したモデルは大局的な描像を与えている。

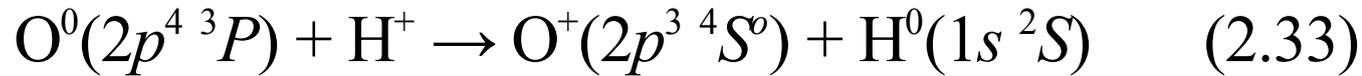
Fig. 2.6 model planetary nebula 電離構造



2.7 Photoionization of Heavy Elements

水素との二体電荷交換反応

特定の軽元素で、特に radiation-bounded nebula の境界付近で重要になる過程。酸素を例にとる。



O^0 と H^+ のあいだには引力が働く (attractive polarization force)
 O と H の電離ポテンシャルはほぼ同じで、(2.33) は共鳴過程に近い。



この反応に対する断面積は相対的に大きい。反応率は

$$n_{\text{O}} n_{\text{p}} \delta(T) \quad \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1} \quad (2.34),$$

$$\delta(T) = \int_0^{\infty} u \sigma(u) f(u) du \quad (2.35)$$

u は OH^+ の質量中心系での速さ、 $\sigma(u)$ は反応断面積、 $f(u)$ は Maxwell-Boltzmann 分布

電離ポテンシャル

O^0 13.618 eV

H^0 13.599 eV

(理科年表2005)



2.7 Photoionization of Heavy Elements

Table A5.3

Charge-transfer ionization rate coefficients (in $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$) $\delta(T)$ for $X^{+i} + \text{H}^+ \rightarrow X^{+i+1} + \text{H}^0$ ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)

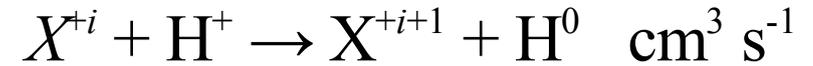
$X^{+i} \setminus T$	5,000 K	10,000 K	20,000 K
O^0	9.10×10^{-10}	9.13×10^{-10}	9.13×10^{-10}
Si^0	7.09×10^{-10}	1.50×10^{-9}	3.05×10^{-9}
Si^+	2.97×10^{-12}	6.71×10^{-11}	3.42×10^{-10}
Fe^0	3.00×10^{-9}	3.00×10^{-9}	3.00×10^{-9}
Fe^+	1.04×10^{-10}	1.04×10^{-10}	4.93×10^{-10}

Table A5.4

Charge-transfer recombination rate coefficients (in $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$) $\delta'(T)$ for $X^{+i+1} + \text{H}^0 \rightarrow X^{+i} + \text{H}^+$ ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)

$X^{+i} \setminus T$	5,000 K	10,000 K	20,000 K
He^0	5.12×10^{-15}	8.99×10^{-15}	3.13×10^{-14}
He^+	1.00×10^{-14}	1.00×10^{-14}	1.00×10^{-14}
O^0	1.01×10^{-9}	1.04×10^{-9}	1.04×10^{-9}
O^+	9.53×10^{-10}	1.05×10^{-9}	1.25×10^{-9}
O^{+2}	3.83×10^{-9}	4.14×10^{-9}	4.78×10^{-9}
O^{+3}	2.05×10^{-10}	2.60×10^{-10}	3.90×10^{-10}
Si^+	3.82×10^{-9}	4.16×10^{-9}	4.67×10^{-9}
Si^{+2}	3.94×10^{-10}	4.10×10^{-10}	4.27×10^{-10}
Si^{+3}	6.67×10^{-9}	7.71×10^{-9}	9.80×10^{-9}
Fe^+	1.18×10^{-9}	1.26×10^{-9}	1.33×10^{-9}
Fe^{+2}	2.35×10^{-9}	3.42×10^{-9}	4.87×10^{-9}
Fe^{+3}	3.35×10^{-9}	5.32×10^{-9}	8.40×10^{-9}
Fe^{+4}	9.60×10^{-9}	9.60×10^{-9}	9.60×10^{-9}
Fe^{+5}	1.15×10^{-8}	1.15×10^{-8}	1.15×10^{-8}

電荷輸送電離係数 (Table A5.3)



電荷輸送再結合係数 (Table A5.4)



Oに着目する。

ex. $n_p = 10 \text{ cm}^{-3}$ の H II 領域

O原子 1個あたりの電離率 $\sim 10^{-8} \text{ s}^{-1}$

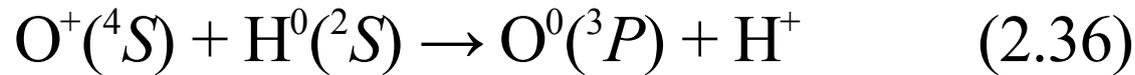
→ 典型的な条件下の光電離と同等



2.7 Photoionization of Heavy Elements

逆反応の反応率

$$n(\text{O}^+)n(\text{H}^0)\delta'(T)$$



$\delta'(T)$ は Milne 関係式の積分形を通じて $\delta(T)$ と次の関係

$$\frac{\delta'}{\delta} = \frac{9}{8} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (2.37)$$

$\Delta E = 0.19 \text{ eV}$ は O^0 と H^0 の電離ポテンシャルの差



2.7 Photoionization of Heavy Elements

Table A5.1

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

$X^{+i} \setminus T$	5,000 K	10,000 K	20,000 K
O^0	5.89×10^{-13}	3.99×10^{-13}	3.25×10^{-13}
O^+	5.54×10^{-12}	3.66×10^{-12}	2.42×10^{-12}
O^{+2}	1.67×10^{-11}	1.72×10^{-11}	1.38×10^{-11}
O^{+3}	6.99×10^{-11}	4.67×10^{-11}	3.30×10^{-11}
Si^0	1.82×10^{-12}	1.35×10^{-12}	6.35×10^{-12}
Si^+	3.89×10^{-12}	5.21×10^{-12}	2.13×10^{-11}
Si^{+2}	2.21×10^{-11}	1.92×10^{-11}	3.68×10^{-11}
Si^{+3}	1.18×10^{-11}	7.05×10^{-12}	4.14×10^{-12}
Fe^0	2.69×10^{-13}	7.21×10^{-13}	4.08×10^{-12}
Fe^+	1.84×10^{-12}	1.02×10^{-12}	6.20×10^{-13}
Fe^{+2}	5.61×10^{-12}	3.33×10^{-12}	1.98×10^{-12}
Fe^{+3}	1.26×10^{-11}	7.82×10^{-12}	4.87×10^{-12}
Fe^{+4}	2.46×10^{-11}	1.51×10^{-11}	9.31×10^{-12}
Fe^{+5}	4.35×10^{-11}	2.62×10^{-11}	1.58×10^{-11}

nebula 中の重イオンへの再結合係数

$$n(\text{O}^+) n_e \alpha(\text{O}^+) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

典型的な H II 領域の条件では α_R と α_D は同程度だが、nebula の outer edge では H^0 の密度が大きくなるので電荷交換反応が支配的になる。

planetary nebula では電離領域の outer edge を除いて重要ではない。

O , O^+ の密度は小さいので電荷交換反応は H の電離平衡に影響しない

Table A5.4

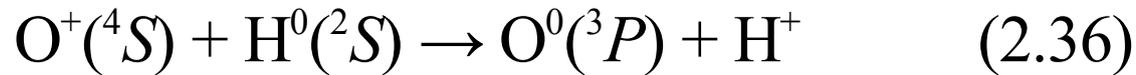
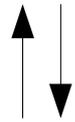
Charge-transfer recombination rate coefficients (in $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$) $\delta'(T)$ for $X^{+i+1} + \text{H}^0 \rightarrow X^{+i} + \text{H}^+$ ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)

$X^{+i} \setminus T$	5,000 K	10,000 K	20,000 K
He^0	5.12×10^{-15}	8.99×10^{-15}	3.13×10^{-14}
He^+	1.00×10^{-14}	1.00×10^{-14}	1.00×10^{-14}
O^0	1.01×10^{-9}	1.04×10^{-9}	1.04×10^{-9}
O^+	9.53×10^{-10}	1.05×10^{-9}	1.25×10^{-9}
O^{+2}	3.83×10^{-9}	4.14×10^{-9}	4.78×10^{-9}
O^{+3}	2.05×10^{-10}	2.60×10^{-10}	3.90×10^{-10}
Si^+	3.82×10^{-9}	4.16×10^{-9}	4.67×10^{-9}
Si^{+2}	3.94×10^{-10}	4.10×10^{-10}	4.27×10^{-10}
Si^{+3}	6.67×10^{-9}	7.71×10^{-9}	9.80×10^{-9}
Fe^+	1.18×10^{-9}	1.26×10^{-9}	1.33×10^{-9}
Fe^{+2}	2.35×10^{-9}	3.42×10^{-9}	4.87×10^{-9}
Fe^{+3}	3.35×10^{-9}	5.32×10^{-9}	8.40×10^{-9}
Fe^{+4}	9.60×10^{-9}	9.60×10^{-9}	9.60×10^{-9}
Fe^{+5}	1.15×10^{-8}	1.15×10^{-8}	1.15×10^{-8}

電荷交換による重イオンへの再結合係数
 $n(\text{O}^+) n(\text{H}^0) \delta(\text{O}^+) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

2.7 Photoionization of Heavy Elements

kT が O^0 と H^0 の電離ポテンシャルのあいだにあるとき
→ 電荷交換反応は平衡状態へ



$T \sim 10,000$ K でこのような状態が実現する。
nebula では電荷交換過程が O の電離バランスを支配し、次式から
O の電離度は H の電離度によって制限される。

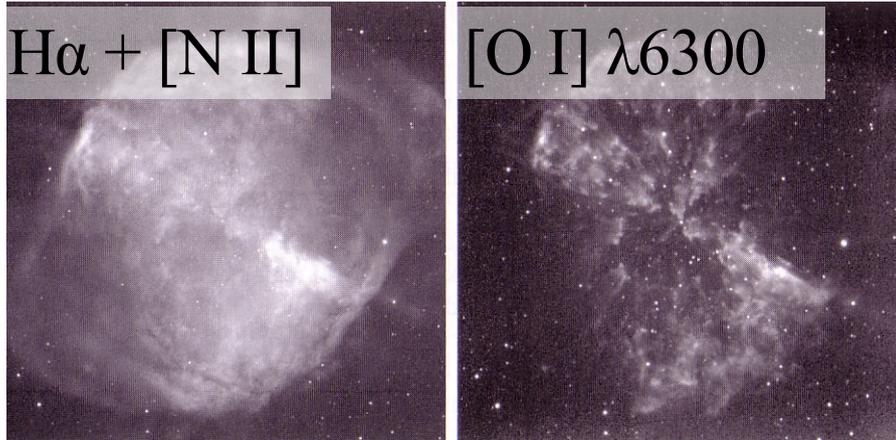
$$\frac{n(O^0)}{n(O^+)} = \frac{9}{8} \frac{n(H^0)}{n_p} \quad (2.38)$$



2.7 Photoionization of Heavy Elements

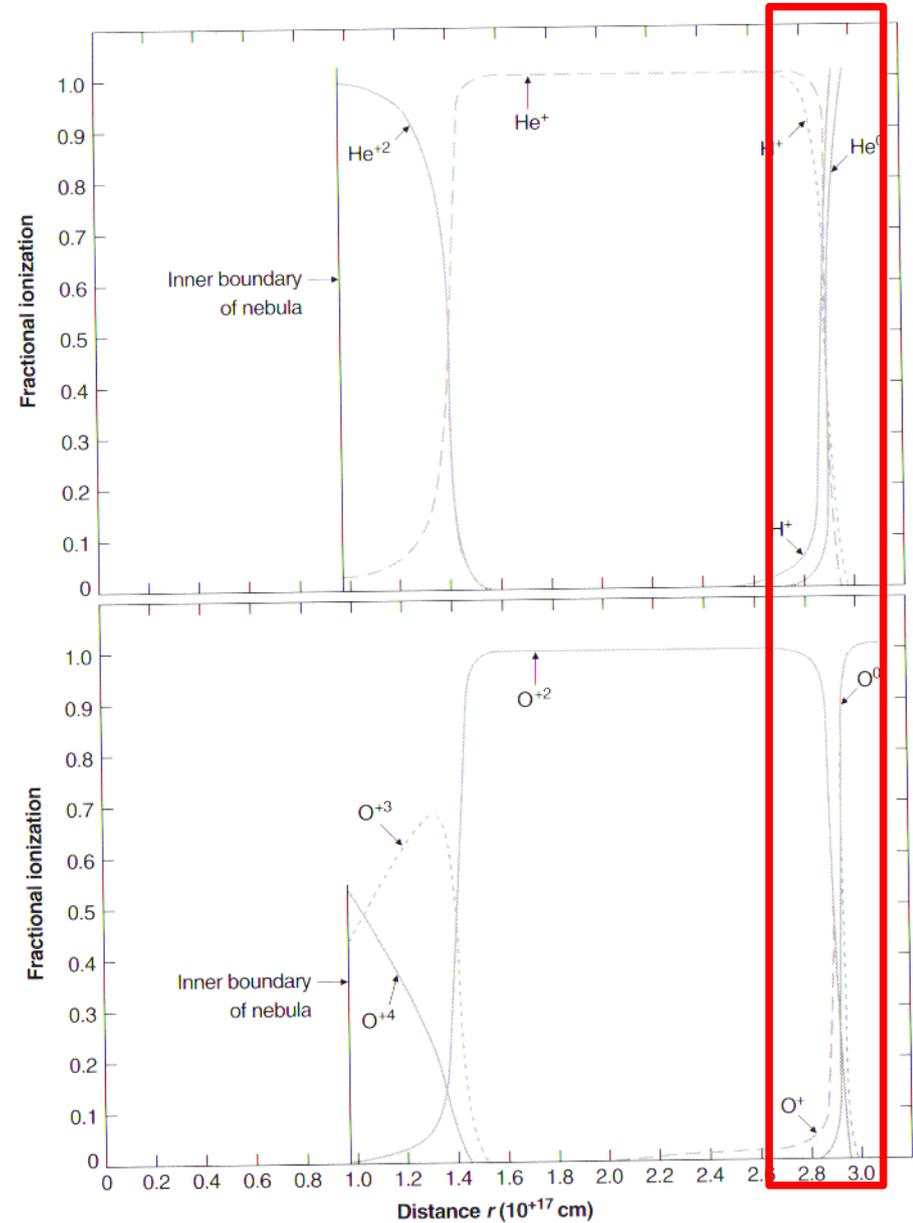
$$\frac{n(\text{O}^0)}{n(\text{O}^+)} = \frac{9}{8} \frac{n(\text{H}^0)}{n_p} \quad (2.38)$$

O^0 の密度が高くて、かつ、自由電子が存在するのは outer edge のみ。



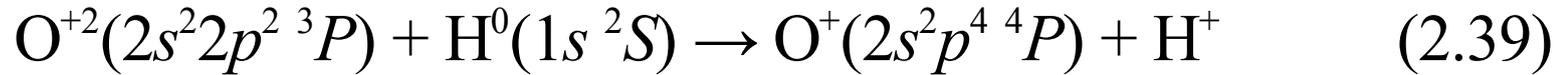
planetary nebula NGC 6853

図右ではそのような領域が見えている。



2.7 Photoionization of Heavy Elements

もう一つの重要な電荷交換反応

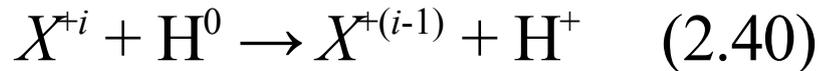


O^+ が励起状態のまま、かつ、 $\Delta E = 6.7 \text{ eV}$ の強い発熱反応
 $\text{O}^+(2s^2 p^4 \ ^4P)$ (励起エネルギー **14.9 eV**) は **nebula** にはほとんどない



基本的に逆反応は進まない。

一般的に書くと



$$n(\text{X}^{+i}) n(\text{H}^0) \delta'(T)$$

このような反応では生成物がクーロン力で反発するので、逆反応がおきにくい $\rightarrow \delta'(T)$ が大 \rightarrow 重イオンの電離計算で重要

Table A5.4

Charge-transfer recombination rate coefficients (in $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$) $\delta'(T)$ for $\text{X}^{+i+1} + \text{H}^0 \rightarrow \text{X}^{+i} + \text{H}^+$ ($\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$)

$\text{X}^{+i} \setminus T$	5,000 K	10,000 K	20,000 K
He^0	5.12×10^{-15}	8.99×10^{-15}	3.13×10^{-14}
He^+	1.00×10^{-14}	1.00×10^{-14}	1.00×10^{-14}
O^0	1.01×10^{-9}	1.04×10^{-9}	1.04×10^{-9}
O^+	9.53×10^{-10}	1.05×10^{-9}	1.25×10^{-9}
O^{+2}	3.83×10^{-9}	4.14×10^{-9}	4.78×10^{-9}
O^{+3}	2.05×10^{-10}	2.60×10^{-10}	3.90×10^{-10}
Si^+	3.82×10^{-9}	4.16×10^{-9}	4.67×10^{-9}
Si^{+2}	3.94×10^{-10}	4.10×10^{-10}	4.27×10^{-10}
Si^{+3}	6.67×10^{-9}	7.71×10^{-9}	9.80×10^{-9}
Fe^+	1.18×10^{-9}	1.26×10^{-9}	1.33×10^{-9}
Fe^{+2}	2.35×10^{-9}	3.42×10^{-9}	4.87×10^{-9}
Fe^{+3}	3.35×10^{-9}	5.32×10^{-9}	8.40×10^{-9}
Fe^{+4}	9.60×10^{-9}	9.60×10^{-9}	9.60×10^{-9}
Fe^{+5}	1.15×10^{-8}	1.15×10^{-8}	1.15×10^{-8}

電荷交換による重イオンへの再結合係数

2.7 Photoionization of Heavy Elements

まとめ

- 重元素は abundance が小さいので diffuse part への寄与は無視
- 重元素の再結合係数は α_R と α_d に分けられる
- α_d は共鳴過程や電荷交換反応により、しばしば α_R よりも重要
- 精確な計算を行うには、全てを考慮する必要がある

