

Rosette 星雲의 Exciting Stars 의 有効溫度

禹 鍾 玉

釜山大學校 師範大學

俞 景 老

서울大學校 師範大學

(1970年 11月 1日 接受)

Effective Temperature of the Six Exciting Stars of Rosette Nebula

Jong Ok Woo

College of Education, Pusan National University

Kyung Loh Yu

College of Education, Seoul National University

(Received Nov. 10, 1970)

Optical thickness of Rosette Nebula for Lyman Continuum is examined with W. Gebel's data. And the effective temperatures of the six exciting O stars of the nebula are obtained on the assumption that O stars emit black body radiation. The results are found to be generally in between Spitzers old and revised values

I. 序 論

Rosette 星雲 속에는 6개의 O型별이 觀測되어 있다. 이들의 有効溫度를 求하는 方法의 하나는 Zanstra의 理論을 適用하여 星雲이 내는 Balmer 線이나 電波連續輻射의 세기를 계산하고 다시 그것을 별의 可視連續輻射의 세기와 比較하는 것이다.

Gas 星雲에 이 Zanstra의 理論을 適用하려면 우선 그 星雲 自體가 Lyman 連續輻射에 대하여 光學的으로 충분히 두꺼운가를 알아야 可視領域에 대한 星雲과 地球 사이의 空間吸收를 알아서 實測值를 補正할 수 있다.

Rosette 星雲의 경우에는 觀測值로부터 계산되는 Lyman 連續輻射가 6개의 O型별 전체에서 나오는 것이 되므로 이것을 개개의 별에 分配하여서 각각의 可視輻射와 比較하여야 하는데 여기서는 O型별의 大氣의 model이 問題가 된다.

本論文에서는 우선 W. Gebel에 의한 Rosette 星雲의 H_{β} 線 및 6cm 電波의 觀測值와 可視光線의 Rosette 星雲과 地球 사이에서의 空間吸收의 값을 써서 그 星雲의 Lyman 連續輻射에 대한 光學的 두께를 求하여 Zanstra 理論의 適用의妥當性을 밝혔다.

그리고, 다시 6개의 O型별이 내는 Lyman 連續輻射를 계산하고 이를 O型별에 대한 몇개의 간단한 가정을 도입하여 그 Lyman 連續輻射를 6개의 별 각각에 分配하였다. 그리고, 이렇게 얻은 값과 각각의 별의 可視輻射와의 比較에서 각각의 O별의 有効溫度를 求하였다.

II. Rosette 星雲의 光學的 두께

Gas 星雲이 내포하고 있는 O型별에서 放出되는 Lyman 連續輻射는 둘레의 水素原子에 吸收되어 이들을 電離시켜서 HII 領域을 형성한다. 그러나, 이에 電子와 H-ion의 再結合이 일어나고, 電

子는 차례로 水素原子의 energy 準位가 낮은 방향으로 떨어져 내려가게 된다. 이 때 放出되는 輻射는 그에 인접한 原子에 의하여 吸收되어 위와 유사한 過程이 되풀이 된다. Zanstra에 의하면, 이러한 過程에서 결국 電離로 이 O型별이 내는 Lyman 連續輻射는 gas 星雲에 의하여 Lyman α , Balmer 系列 및 長波連續輻射로 分離되어 星雲 밖으로 나와서 우리에게 觀測되게 된다.

그러므로, gas 星雲이 Lyman 連續輻射에 대하여 충분히 두꺼울 때에만 Zanstra의 理論에 따라 별의 Lyman 連續輻射의 量을 계산할 수가 있고 또 여기서 그 有効溫度도 계산할 수 있다.

우리는 위와 같은 條件에서 gas 星雲이 放出하는 Balmer 線과 電波의 放出係數를 따질 수 있다. 1968年에 W. Gebel은 H_β 線에 대한 Pengelly의 研究와 電波輻射에 대한 Oster 와 Scheurer의 研究를 기초로 하여 이들 두 輻射의 放出係數의 比로서

$$j_\beta/j_\nu = 3.288 \times 10^4 \cdot (N_\beta/N_i) \cdot X(T, \nu) \cdot (T/10^4)^{-0.366} \quad (1)$$

$$\text{단 } X(T, \nu) = 17.718 + 15\ln T - \ln \nu \quad (2)$$

의 式을 얻었다. 여기서, T 는 gas 星雲의 電子溫度이고, N_β , N_i 는 각각 proton 과 일반 ion의 밀도이다.

筆者는 Mathis의 이론에 따라 HeII 와 HIII의 比를 0.13으로 취하여 $N_\beta/N_i=1/1.13$ 로 놓고, 위의 式에 의하여 H_β 및 $\nu=5000\text{MHz}(\lambda=6\text{cm})$ 電波의 放出係數의 比를 $T=10,000^\circ\text{K}$, $20,000^\circ\text{K}$ 에 대해서 각각 계산하여 표 I의 제1란 제2란과 같은 値을 얻었다.

표 I Rosette星雲의 H_β , $\nu=5000\text{MHz}$ 輻射의 放出係數比

$j_\beta/j_{5000\text{MHz}}$ 계산치 (cgs)		$j_\beta/j_{5000\text{MHz}}$ 관측치 (cgs)
$T=10,000^\circ\text{K}$	$T=20,000^\circ\text{K}$	
2.85×10^{13}	2.02×10^{13}	2.58×10^{13}

표 II Rosette星雲의 H_β , $\nu=5000\text{MHz}$ 輻射의 觀測值

H_β (ergs $\text{cm}^{-2}\nu_{5000\text{MHz}}$ (ergs cm^{-2} 星間吸收 H_β 的吸收 sec^{-1}) sec^{-1} cgs $^{-1}$)	$\nu_{5000\text{MHz}}$ (ergs cm^{-2} 星間吸收 H_β 的吸收 sec^{-1} cgs $^{-1}$)	AH_β (mag) 補正值
$(9.31 \pm 0.21) \times 10^{-9}$	$(2.24 \pm 0.1) \times 10^{-21}$	2.52 5.78×10^{-8}

그리고, 표 II의 제1, 2 란의 値은 H_β 와 $\nu=5000\text{MHz}$ 輻射에 대한 Gebel의 觀測值를 뒤의 계산에 편리하게 환산한 것이다. 그리고, H_β 의 實測值를

제3란의 空間吸收의 値으로 補正한 値이 제4란의 것이다. 이 표 II의 $\nu=5000\text{MHz}$ 輻射와 H_β 의 補正值의 比에서 $j_\beta/j_\nu=5000\text{MHz}$ 의 觀測值가 求해진다. 표 I의 제3란이 그것이다.

이제 표 I의 計算值와 觀測值를 比較할 때 兩者가 대단히 만족할만한 一致를 보인다.

이 $j_\beta/j_\nu=5000\text{MHz}$ 의 理論值와 觀測의 좋은一致는 바로 Rosette 星雲이 Lyman 連續輻射에 대하여 光學的으로 충분히 두껍고 H_β 와 電波輻射에 對하여는 대단히 얇다는 사실을 증명하는 것이다. 따라서, Rosette 星雲은 Zanstra 理論에 따라 그 電離星의 有効溫度를 求할 수 있는 것이다.

III. 6개의 O型별의 有効溫度

우선 Rosette 星雲이 내는 $\nu=5,000\text{MHz}(\lambda=6\text{cm})$ 電波에 대한 W. Gebel의 觀測值로부터 Zanstra의 理論에 의하여 6개의 O型별 전체가 내는 Lyman 連續輻射의 光子數를 계산한다. 이에 대하여는 星雲 内에서의 電子의 再結合數를 표시한 Spitzer의 式이 있으나 Burbidge, Gould, Pottasch가 지적한 바에 따라 Lyman 連續輻射를 散亂만 시키는 基底狀態로의 再結合은 제외하고 계산하여야 한다. 이렇게 계산된 Lyman 連續輻射와 電波의 光子數密度의 比는

$$q_{LC}/q_\nu = 3.202 \phi_2(\beta) \nu / X(T \cdot \nu) \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서

q_{LC} , q_ν 는 각각 Lyman 連續輻射와 振動數 ν 의 電波의 光子密度.

$\phi_2(\beta)$ 는 基底狀態를 除外한 모든 energy 準位로의 再結合係數의 합.

$X(T \cdot \nu)$ 는 (2)에 주어진 T, ν 의 函數이다.

W. Gebel은 星雲의 電子溫度를 $T=10,000^\circ\text{K}$ 로 놓고, $\nu=5,000\text{MHz}$ 電波에 대하여

$$q_{LC}/q_{\nu=5,000\text{MHz}} = 2.4 \times 10^9 \quad (4)$$

를 얻었다.

우리는 W. Gebel의 6cm 電波에 대한 觀測值 (표 II의 제2란)를 $h\nu$ 로 제하여 그 電波光子 flux $Q_{\nu=5,000\text{MHz}}$ 를 구하고, 다시 (4)식을 써서 그 Lyman

표 III 星雲 및 電離星이 내는 光子 flux

$Q_{\nu=5000\text{MHz}}$	Q_{LC}
2.24×10^{-21}	1.62×10^5

連續輻射의 光子 flux Q_{LC} 를 구하여 표Ⅲ과 같은 값을 얻었다. 물론, 이렇게 얻은 Q_{LC} 는 6개의 電離星이 내는 Lyman 連續輻射 光子 flux 를 전부 합한 것이다.

다음에는 이 全體로서의 Q_{LC} 를 6개의 별에 分配하여 각각의 별의 Lyman 連續輻射 光子 flux Q_{LCi} 를 구하여 이것을 각각의 可視連續輻射 光子 flux Q_{vi} 와 比較하여야 한다. 이에 대한 基本資料로서 6개의 O型별의 分光型과 眼視等級은 Osterbrock, Stockhausen의 論文에 있는 값을 취한다.

각별의 可視輻射光子 flux Q_{vi} 는 그 眼視等級 m_v 에서 구한다. 이미 太陽에 대하여 얻은 Minnaert의 換算值를 사용한다. 그에 의하면 太陽의 眼視等級 $m_v = -26.73$ 은 $\lambda = 5,000\text{\AA} \sim 6,000\text{\AA}$ 의 波長의 光子 flux로 換算하여 $Q_{v0} = 5.20 \times 10^{16} \text{ photons/cm}^2 \text{ sec}$ 1000\AA이 된다. 이 관계를 6개의 각각의 별에 적용하여 Q_{vi} 를 계산하면 표V의 제4란과 같다.

다음에 全體로서의 Q_{LC} 를 6개의 별에 分配하는데는 다음과 같은 假定을 한다.

- i) O型별의 輻射를 黑體輻射라고 한다.
- ii) 같은 分光型이면서도 眼視等級이 다른 3개의 O8型별은 그 有効溫度는 같고 半徑이 다르다고 한다.

제1의 假定은 물론 옳은 것은 아니다. 그러나, O型별의 細分型에 대한 大氣모델이 完全히 確定된 것이 아닌 現在로서 여러개의 모델과의 比較의 基準이 될 것을 예상하고 설정한 假定이다. 제2의 假定은 星團 NGC2244의 별들이 같은 距離에 있다고 가정하고 分光과 測光의 觀測이 정확하다고 했을 때 어쩔 수 없이 받아들여야 할 假定이다.

이 두 假定이 인정될 때 각각의 별이 내는 Lyman 連續輻射의 光子 flux Q_{LCi} 는

$$Q_{LCi} = \text{const} \cdot 4\pi R_i^2 \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{8\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT_i} - 1} \frac{d\nu}{h\nu} \quad (5)$$

단, ν_0 는 Lyman 限界의 振動數로서 $\nu_0 = 3.29 \times 10^{15} \text{ cgs}$.

로 표시된다. 마찬가지로 可視連續輻射의 光子 flux 도

$$Q_{vi} = \text{const} \cdot 4\pi R_i^2 \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{8\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT_i} - 1} \frac{d\nu}{h\nu} \quad (6)$$

단, $\nu_1 = 6 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1} (\lambda = 5,000\text{\AA})$

$\nu_2 = 5 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1} (\lambda = 6,000\text{\AA})$

로 표시된다.

이제 각 별의 半徑을 비교함에 있어 這의 상 HD46150를 기준으로 잡으면 다른 별의 半徑은

$$R_i^2/R_{46150}^2 = (Q_{vi}/Q_{v46150})$$

$$\cdot \left(\int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{\nu^2}{e^{h\nu/kT_{46150}} - 1} d\nu / \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{\nu^2}{e^{h\nu/kT_i} - 1} d\nu \right) \quad (7)$$

로 되어 可視連續輻射光子 flux Q_v 와 有効溫度 T 의 函數로 얻어진다.

이 T 가 바로 우리가 구하고자 하는 것인므로 여기서는 알길이 없다.

그리므로, 그 第1次 近似值로서 Spitzer의 値 (1969)을 취하고 이후 iteration의 方法으로 求한 바 정확한 値을 얻기로 한다.

Spitzer가 준 O型별의 有効溫度와 그 Lyman連續輻射 및 可視輻射의 光子 flux 比는 다음의 표IV와 같다.

표 IV Spitzer에 의한 O型별의 溫度와 Q_{LC}/Q_v

分光型	05	06	07	08	09
有効溫度(°K)	56,000	44,000	36,000	30,000	25,000
Q_{LC}/Q_v	28.5	12.3	5.47	3.12	

이제 위에서 求한 Q_{vi} 와 T_i 에 대한 近似值에 依해서 별 HD46150에 대한 다른 별들의 半徑의 比의 自乘을 구한것이 표V의 제5란과 같다.

한편, 이미 계산한 Q_{LC} 는

$$Q_{LC} = \text{const} \cdot \sum_{i=1}^6 R_i^2 \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{\nu^2}{e^{h\nu/kT_i} - 1} \frac{d\nu}{h\nu} \quad (8)$$

이므로 위에서의 T_i 와 $(R_i/R_{46150})^2$ 의 値을 써서 각각의 Q_{LCi} 와 Q_{LC} 의 比를 구할 수 있다. 그 계산 결과는 표V의 제6란과 같다. 이값과 $Q_{LC} = 1.62 \times 10^5 \text{ photons/cm}^2 \text{ sec}$ 에서 각각의 별의 Q_{LCi} 를 구한 것이 표V의 제7란과 같고 이 Q_{LCi} 와 Q_{vi} 의 比가 제8란과 같게 구해진다.

다음에는 Spitzer의 T 와 Q_{LC}/Q_v 의 관계曲線을 그려서 그림 1을 얻는데 표V 제7란의 Q_{LCi}/Q_{vi} 의 値을 이 $T-Q_{LC}/Q_v$ 曲線에 적용하여 6개의 O型별의 有効溫度를 求할 수 있다. 그 計算結果는 표V의 제8란과 같다.

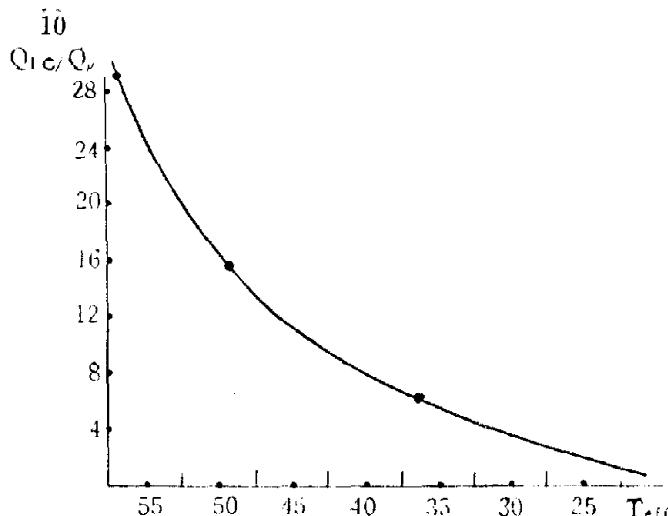


그림 1. Lyman-Visual colors 와 有効溫度關係

이 T_i 의 값을 다시 이 (7)式에 代入하여 같은計算을 하여 第 2 近似值를 얻는다. 그러나, 結果는 별 差異가 없으므로 표 V의 제 8 란의 T_i 의 값이 우리가 구하는 값이 된다.

이렇게 해서 얻은 O5, O6, O8, O9의 별의 有効溫度를 이제까지 研究 發表된 O型별의 有効溫度의 값과 比較하면 표 VI과 같다.

표 V Exciting Stars의 Lyman-Visual Photon數

별의 목록번호	分光型	m_{vi}	Q_{vi}	R_i^2/R_{46150}^2	Q_{LCi}/Q_{LC}	Q_{LCi}	Q_{LCi}/Q_{vi}	T_e
HD46223	O5	5.66	6.65×10^3	0.951	0.583	9.39×10^4	14.1	45,700
HD46150	O6	5.41	8.33×10^3	1.000	0.321	5.02×10^4	6.02	36,800
HD46485	O8	6.35	3.51×10^3	0.364	0.338	5.41×10^3	1.54	24,000
HD46149	O8	6.11	4.52×10^3	0.467	0.0433	6.97×10^3	1.54	24,000
HD46056	O8	6.65	2.69×10^3	0.278	0.0258	4.16×10^3	1.54	24,000
HD46202	O9	(6.88)	2.26×10^3	0.099	0.00154	2.48×10^2	1.10	22,000

표 VI O型별의 有効溫度 比較

研究者	方 法	O5	O6	O7	O8	O9
Spitzer(1960)	Gas 星雲	35,000	32,000	29,000	26,000	23,000
Spitzer(1968)	Gas 星雲	56,000	44,000	36,000	30,000	25,000
Underhill(1951)	Model大氣	44,600	—	—	—	—
Traving(1957)	Model大氣	—	—	—	—	37,450
Allen(1963)		35,000	—	—	—	—
본연구 (1970)	Rosette星雲	45,700	36,800	—	24,000	22,000

IV. 結 論

Rosette 星雲의 觀測에서 일은 水素의 H_δ 와 $\nu=5,000\text{MHz}$ 電波의 輻射係數의 比가 理論으로 부터 計算된 값과 거의一致됨을 제 II 절에서 보았다. 이는 Rosette 星雲이 Lyman 連續輻射에 對하여 光學的으로 充分히 두껍다는 事實을 立證하는 것이다. 따라서, Rosette 星雲은 Zanstra의 理論을 適用할 수 있는 條件을 滿足한다.

제 III 절에서는 6cm 電波의 觀測資料에서 Zanstra의 理論을 適用하여 Rosette 星雲의 6개의 O型별이 내는 Lyman 連續輻射의 光子 flux 를 計算했고 다시 이를 별의 輻射를 黑體輻射라고 假定하고서 6개의 별 각각이 내는 Lyman連續輻射 光子

flux로 分配했다. 그리고 各별의 可視輻射의 光子 flux와 比較하므로서 各各의 별의 有効溫度를 求했다. 그 O5, O6, O8, O9型의 有効溫度는 計算過程에서 晚期型 쪽에서 보다 큰 誤差를 가졌음으로 大體로 Spitzer의 1960年의 값과 1969年의 改正值와의 中間값을 나타낸다고 볼 수 있다.

그러나, 이렇게 얻은 값은 6개의 Exciting stars의 大體的인 温度일 뿐이고 보다 정확한 값은 各細分型의 正確한 大氣 model이 얻어져야 비로소 얻어질 것임은勿論이다.

參 考 文 獻

1. Aller, L. H., 1956, "Gaseous Nebula" (London; Chapman & Hall Ltd.) Chap. VIII.

2. Burbidge, G. R., Gould, R. J., and Pottasch, S. R., 1968, *Ap. J.*, **138**, 945.
3. Gebel, W. L., 1968, "Interstellar Reddening for H II Regions and Lyman Visual Colors of their Exciting Stars." 1968, *Ap. J.*, **153**, 743.
4. Mathis, J. S., 1962", Photometry of Emission Lines in Certain Gaseous Nebulae" *Ap. J.*, **136**, 374.
5. Minnaert, T. K. 1953, "The Sun,"ed. G. P. Kuiper (University of Chicago Press) Chap. III, Table II.
6. Osterbrock and Stockhausen, 1960," Photoelectric Photometry of Diffuse Nebulae., **131**, 310.
7. Osterbock and Stockhausen, Rad iometry of Gaseous Nebulae." 1961, *Photometry and Ap. J.*, **133**, 2.
8. Pengelly, R. M., 1964, "Recombination Spectra." *M. N.*, **127**, 145
9. Spitzer, L., 1968, "Dynamics of Interstellar Matter and the Formation of Stars in Stars" and Stellar Systems Vol. 7. ed. by Middlehurst and Aller (University of Chicago Press).