

나비형 행성상 성운 M2-9에서 He II의 중성 수소에 의한 라만 산란선

이희원[†], 강영운
세종대학교 지구정보과학과

He II RAMAN SCATTERED LINE BY NEUTRAL HYDROGEN IN THE BIPOLAR PLANETARY NEBULA M2-9

Hee-Won Lee[†] and Young Woon Kang

Department of Earth Sciences, Sejong University
Seoul, 143-747, Korea
E-mail: hwlee@sejong.ac.kr

(Received April 5, 2001; Accepted May 10, 2001)

요 약

이 논문에서는 Cerro Tololo Inter-American Observatory의 1.5미터 망원경에 설치된 에셀 분광기로부터 얻은 나비형 행성상 성운 M2-9의 분광 자료에 나타나는 6545 Å의 방출선이 He II $n = 6 \rightarrow n = 2$ 천이의 방출선이 수소 원자에 라만 산란되어 형성됨을 제안한다. 또한, 이 천체에서 He II의 방출선인 6560 Å ($n = 6 \rightarrow n = 4$)와 6527 Å ($n = 12 \rightarrow n = 5$)이 분광 자료에 나타나지 않는다는 사실은 He II 방출선 지역이 뜨거운 백색 왜성 근처에서 형성되며, 광학적으로 두꺼운 성분에 쉽게 가려질 수 있지만, 중성 수소에 의한 라만 산란은 더 넓은 지역에서 형성되어 관측자 시선에 들어올 수 있음을 의미한다. 우리는 광이온화 모델을 사용하여, He II 방출선 지역의 크기를 계산하였다. 이 계산의 결과로부터 우리는 중심별의 온도가 적어도 10⁵ K보다 더 뜨겁고, He II 방출선 지역을 가리는 불투명한 성분의 크기가 10¹⁶ cm보다 크다고 추정한다. 이 크기는 M2-9까지 거리를 1 kpc으로 잡았을 때에 각거리로 1"로서, 허블 우주 망원경으로부터 알려진 적도면의 큰 소광을 일으키는 지역의 크기와 대체적으로 일치한다.

ABSTRACT

In the spectrum of the young bipolar planetary nebula M2-9 obtained from the 1.5 m telescope at the Cerro Tololo Inter-American Observatory, we detected the He II feature at 6545 Å that are proposed to be formed via Raman scattering by atomic hydrogen. However, in the same spectrum, the He II emission lines at 6527 Å and 6560 Å are absent, which implies that the He II emission region is hidden from our line of sight and that the H I scattering region is pretty much extended not to be obscured entirely. We performed photoionization computations to estimate the physical size of the He II emission line region to be 10¹⁶ cm, from which the location and dimension of the obscuring circumstellar region are inferred and the temperature of the central star must exceed 10⁵ K. The angular size of the circumstellar region responsible for the

[†]corresponding author

obscuration of the He II emission region is $\sim 1''$ with the assumption of the distance 01 kpc to M2-9, which is consistent with the recent image of M2-9 obtained with the *Hubble Space Telescope*.

Key words: planetary nebula, spectroscopy, radiative transfer, scattering

1. 서 론

행성상 성운 M2-9은 Minkowski (1947)가 발견하고 나비라고 명명한 천체로서, 양극 방향으로 펼쳐진 특이한 형태 때문에 매우 잘 알려진 천체이다. 특히, 허블 우주 망원경의 영상이 발표되면서, 다중 겹질의 구조와 필라멘트를 비롯한 여러 세부 구조가 존재함이 알려졌다. Balick (1989)은 이 천체를 분광 관측하여 수소 H α 에 11,000 km s $^{-1}$ 에 이르는 매우 넓은 폭의 날개 부분이 형성됨을 보고하였다. 또한, 그는 이 천체의 분광 자료는 일반적인 행성상 성운보다는 신성 폭발 현상을 보이는 공생별들인 HM Sagitae, RR Telescopii 혹은 V1016 Cygni의 스펙트럼이나, 밝은 청색 변광성 (luminous blue variable)인 η Carinae에 더 가깝다고 보았다. 특히, 이들 천체와 대표적인 유사점으로 언급한 분광 자료의 특징은 수소 H α 의 선 모양이 2중 마루를 보인다는 점을 들었으며, H α 의 이중 마루 선 모양은 공생별에서 매우 흔한 형태의 선 모양임이 후에 더 자세한 연구를 통하여 잘 알려졌다 (Ivison, Bode & Meaburn 1994, Van Winckel, Duerbeck & Schwarz 1993).

Doyle et al. (2000)은 수십년간 M2-9의 영상 자료를 모아 정밀한 비교를 통하여 M2-9에서 보이는 매듭 구조가 회전하고 있으며, 그 모습은 중심별에 대해서 점대칭 구조를 보이는 것이 아니라 성운의 허리가 있는 면에 대하여 거울 대칭 구조를 보임을 밝혔다. 그들은 수십년에 걸친 매듭 구조의 회전이 M2-9의 중심별이 이중성을 이루며, 이들의 약 120년을 주기로 하는 공전 운동에 기인한다고 해석하였다. 또한, 매듭 구조를 이온화하기 위해서는 0.01c의 속도로 운동하는 입자들의 흐름이 범을 이루어야 함을 주장하였다. 이 경우에 이와 같은 빠른 속도의 흐름을 만들기 위해서는 백색 왜성과 같은 고밀도 천체의 존재가 매우 자연스러워 보인다. 그러나, M2-9의 허리를 이루는 부분에서 소광이 매우 크기 때문에 중심별의 정확한 분광형이 알려져 있지 않으며, 동반성의 존재에 대해서 아직도 뚜렷한 결론을 내리지 못하고 있다.

Corradi & Schwarz (1995)의 연구에 따르면, 약 60퍼센트의 행성상 성운이 타원형의 성운 형태를 보이며, 약 10퍼센트가 구형, 그리고 약 10퍼센트에서 나비형 성운의 모습이 나타나며, 나머지 10퍼센트에서 점대칭형 혹은 특이형 성운으로 분류된다. 이들은 특히, 나비형 혹은 양극형이라고 불리우는 행성상 성운의 분광학적, 운동학적 특징을 조사하였으며, 그 결과 이들은 대체적으로 중심별이 타원형 행성상 성운에 비하여 질량이 큰 별임을 주장하였다. 이들의 형태학에 대한 원인은 정확히 알려져 있지 않지만, 중심별이 쌍성계를 이룰 때에 이러한 나비형 성운이 형성될 수 있다는 제안이 여러 연구자에 의하여 제기되어 있다 (e.g. Soker 2000). 이러한 주장의 근거로서 성운의 형태가 알려진 일부의 공생별이 대체적으로 나비형 성운을 보이며, 이를 공생별이 쌍성계임을 고려하면, 쌍성계의 공전 운동이 거성 단계의 질량 손실 과정에서 선택적으로 적도 방향에 많은 물질을 분포하게 할 수 있음을 제시하고 있다.

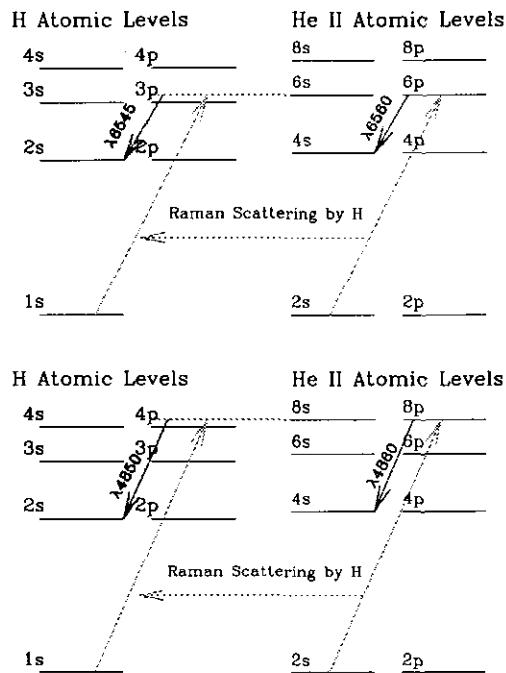


그림 1. He II 1025 ($n = 6 \rightarrow n = 2$) 방출선의 수소 원자에 의한 라만 산란 과정. He II 1025와 수소 Ly β 1025의 미세한 파장 차이에 의하여 6545 Å에 라만 산란선이 형성된다.

Post AGB 단계에 들어선 거성들의 질량 손실 과정에서도 비대칭성이 나타난다는 사실이 편광 관측 연구에서 알려졌다. 이것은 매우 흥미 있는 연구 결과로서, 중심별을 둘러싼 물질들의 형성 과정과 성운의 형태를 결정하는 원인이 행성상 성운의 단계에 접어들기 훨씬 이전에 존재함을 의미한다.

또한, 이 단계에 있는 천체에서 H α 에서 넓은 폭의 날개 부분이 형성된다는 사실이 보고되었다 (Van de Steene, Wood & van Hoof 2000). H α 에서 보이는 날개는 M2-9을 비롯한 일부의 행성상 성운에서 알려져 있지만, 공생별에서는 이러한 날개 부분이 매우 흔하게 나타나고 있다. 날개 부분의 형성 과정은 매우 빠르게 흘러나가는 이온화된 기체의 흐름이나 전자 산란으로 추정되어 왔다. 그러나, 최근 Lee & Hyung (2000)이 나비형의 어린 행성상 성운 IC 4997의 H α 의 날개가 Ly β 날개 영역의 광자가 중성 수소에 의하여 라만 산란될 때에 형성되는 H α 날개의 윤곽과 잘 일치함을 보였으며, Lee (2000)의 연구에서 많은 공생별에 대해서도 같은 과정을 통하여 H α 의 날개 부분을 설명할 수 있음을 보였다.

특히, 약 절반의 공생별에서는 6830 Å과 7088 Å에서 강한 방출선이 관측되며, 이들은 Schmid (1989)에 의하여 O VI 1032, 1038이 중성 수소에 라만 산란되어 나타나는 산란선임이 밝혀졌다. 이들의 산란 단면적은 $\sigma_{OVI} \sim 10^{-22} \text{ cm}^2$ 으로 매우 작은 값이므로, 공생별에서는 온도가 낮은 거성의 외곽 부분에서 라만 산란이 일어날 수 있을 것으로 추정된다 (Lee & Lee 1997a). 그러나, 공생별에서 관측된 H α 의 날개가 형성되기 위한 산란 단면적은 σ_{OVI} 보다 백배 이상 크기 때문에 라만 산란이

일어나기 위하여 필요한 중성 수소의 기둥 밀도는 $N_{HI} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 으로 주어진다. 따라서, 공생별의 경우, 수소 Ly β 날개 부분의 광자는 O VI 광자에 비하여 훨씬 넓은 영역에서 산란될 수 있다.

현재까지 O VI 라만 산란선은 공생별에서만 관측되고 있으며, 그 원인은 이들 광자의 매우 작은 산란 단면적에 있는 것으로 추정된다. 따라서, 이보다 훨씬 큰 산란 단면적을 갖는 라만 산란은 공생별과 비슷한 진화 단계에 있는 더 넓은 범위의 천체에서 발견될 수 있을 것을 기대할 수 있다. 이것은 수소 H α 의 날개 부분이 라만 산란에 의하여 형성된다는 제안을 자연스럽게 뒷받침한다. 또한, 어린 행성상 성운 NGC 7027에서 He II $n = 8 \rightarrow n = 2$ 의 방출선은 수소 Ly γ 의 파장보다 약간 짧으며, 이 방출선은 수소에 의하여 라만 산란되면 H β 의 청색쪽인 4340 Å에서 산란선이 나타날 수 있으며, 실제로 어린 행성상 성운 NGC 7027에서 이 산란선이 발견되었다 (Péquignot et al. 1997). 이 He II의 방출선의 라만 산란 단면적은 대략 10^{-20} cm^2 이며, O VI 방출선의 그것보다 수백배 정도 크다. 따라서, H α 의 날개와 더불어, 공생별보다 더 넓은 범위의 천체에서 He II의 라만 산란선을 발견할 수 있을 가능성이 크다.

Lee, Kang & Byun (2001)은 나비형 행성상 성운 M2-9의 고분산 스펙트럼에서 He II $n = 6 \rightarrow n = 2$ 천이에 해당하는 방출선의 라만 산란선으로 추정되는 6545 Å 방출선을 검출하였으나, He II의 방출선은 검출되지 않았음을 보고하였다. M2-9에서 He II 방출선이 나타나지 않고 있음을 이미 선행 연구자들의 연구에서 잘 알려져 있었으며, 이러한 이유로 M2-9을 Low excitation planetary nebula로 분류해 왔다 (Gurzadyan 1997). 그러나, 나비형 성운의 형태를 만들기 위해서 빠른 입자의 흐름이 요구되며, 이러한 흐름을 만들기 위해서 밀도가 높고 뜨거운 백색 왜성의 존재가 필요하며, 이러한 천체 근처에서 He II 방출선 지역이 존재할 것으로 추측할 수 있다.

우리는 이 관측 사실이 모순이 아니며, He II의 방출선 지역이 뜨거운 중심별 가까이에서 형성되고, 광이온화 모델 계산을 통하여, 이 지역을 중심별 둘레에 두껍게 형성된 분자 상태의 광학적으로 두꺼운 성분이 가릴 때에 He II 방출선은 분광 자료에서 검출되지 않을 수 있음을 보이고자 한다. 이 경우에 중성 수소는 매우 넓은 지역에 분포하여 이 성분에 의하여 가려지지 않으며, 이 지역에서 라만 산란이 일어날 때에 6545 Å 방출선은 분광 자료에 나타날 수 있을 것으로 예측할 수 있다. 우리는 이 광이온화 계산을 통하여 행성상 성운 M2-9의 중심별과 이를 둘러싼 물질들의 분포에 대한 모형들을 검토하고자 한다.

2. M2-9의 H α 근처의 고분해능 스펙트럼

2.1 He II의 라만 산란 과정의 원자물리학적 고찰

Schmid (1989)가 공생별의 6830 Å, 7088 Å 방출선을 O VI 1032, 1038의 이중선이 수소 원자에 라만 산란되어 형성된 것임을 밝혔으며, Nussbaumer, Schmid & Vogel (1989)는 라만 산란 과정이 천체 물리학에서 매우 유용한 도구로 쓰일 수 있음을 제시하였다. 이 논문에서는 O VI 방출선의 라만 산란의 경우와 마찬가지로, 바닥 상태 1s에 있는 수소 원자가 다음 2s 상태로 천이하면서 라만 산란선 광자를 방출하는 경우를 중심으로 논의하고자 한다.

에너지 보존에 의하여 라만 산란된 광자의 파장 λ_o 는 입사파의 파장 λ_i 에 대해서

$$\lambda_o^{-1} = \lambda_i^{-1} - \Delta E/(hc) \quad (1)$$

의 관계로부터 얻을 수 있으며, 이 때에 ΔE 는 산란한 원자의 산란 후의 상태와 산란 전의 상태의 에너지 차이다. O VI 방출선의 경우 2s상태와 1s상태의 에너지 차를 의미한다.

전자가 하나인 원자 혹은 이온들은 양자 역학적으로 파동함수가 잘 알려져 있으며, 특히, 수소 원자와 헬륨 이온 He II은 우리 우주에서 가장 흔하게 존재하는 것들이다. 따라서, 이들 두 원자-이온 사이에서 일어날 수 있는 산란 과정을 간단한 양자 역학적 고찰을 통하여 정리해 놓는 것이 매우 의미 있는 일일 것이다.

전자의 spin이 1/2이므로, 이 입자를 상대론적인 영역에서까지 잘 기술하기 위해서는 Dirac의 방정식을 사용해야 한다. Coulomb potential에 대하여 Dirac 방정식의 에너지 고유치는 교과서에 잘 소개되어 있으며, 그 결과를 벌어 적으면

$$E = \frac{\mu c^2}{\sqrt{1 + \frac{Z^2 \alpha^2}{(n' + \sqrt{(j + \frac{1}{2})^2 - Z^2 \alpha^2})^2}}} \quad (2)$$

과 같이 나타난다 (e.g. Sakurai 1967) 여기에서 Z 는 원자핵의 전하량을 뜻하고, $\alpha \equiv \hbar c/e = 1/137$ 는 미세 구조 상수, j 는 궤도와 스펀 각운동량을 합한 전체 각운동량을 뜻한다. 그리고, μ 는 전자와 원자핵의 환산 질량을 뜻한다. 수소와 He II과 같이 Z 가 작은 원자들에 대해서 위 식을 전개하면

$$E = \mu c^2 \left[1 - \frac{1}{2} \frac{(Z\alpha)^2}{n^2} - \frac{1}{2} \frac{(Z\alpha)^4}{n^3} \left(\frac{1}{j + \frac{1}{2}} - \frac{3}{4n} \right) - \dots \right] \quad (3)$$

을 얻는다. Dirac 방정식에서는 스펀과 궤도 상호 작용이 자연스럽게 융화되어 있으므로, 미세 구조의 분리가 j 값에 따라서 나타난다. 이에 따라, 수소 원자와 He II의 에너지 준위의 차이는 전자와 원자핵의 환산 질량에 따른 차이가 대부분의 차이를 주며, He II의 원자핵의 전하량에 의하여 미세한 차이를 더해 준다. 특히, He II의 $2n \rightarrow 2$ 의 천이에 해당하는 방출선이 수소의 Lyman 계열의 광자의 아주 가까운 청색쪽에 놓이므로, 이들이 수소 원자에 산란되어 Balmer 계열의 청색쪽으로 라만 산란될 수 있다. 수소 원자와 He II의 환산 질량의 차이 Δm_{red} 는 $\Delta m_{red} = \frac{m_e m_p}{m_e + m_p} - \frac{m_e m_{He}}{m_e + m_{He}} \simeq -\frac{3}{4} \left(\frac{m_e}{m_p} \right) m_e$, 로 주어지고, 미세 구조를 무시할 때에 수소 원자의 n 번째 Lyman 계열과 He II $2n \rightarrow 2$ 천이의 에너지 차이가

$$\Delta E_n \simeq \frac{3}{4} \frac{m_e}{m_p} E_{Ryd} (1 - n^{-2}) \quad (4)$$

이다. 이 때 E_{Ryd} 는 수소 원자의 Rydberg 에너지이다. 따라서, He II $2n \rightarrow 2$ 천이의 광자가 바닥 상태에 있는 수소 원자에 입사하여 ms (혹은 $m > 2$ 일 때에는 md) 상태로 천이하는 라만 산란이 일어날 때에, 산란된 광자가 갖는 파장은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_o &= \Delta \lambda_i (\lambda_o / \lambda_i)^2 \\ &\simeq \frac{3}{4} \frac{m_e}{m_p} \lambda_i m^4 \left[\frac{n^2(n^2 - 1)}{(n^2 - m^2)^2} \right] \\ &= 0.037 m^4 \left[\frac{n^2(n^2 - 1)}{(n^2 - m^2)^2} \right] \text{ nm} \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 $\lambda_i = hc/E_{Ryd} = 912 \text{ \AA}$ 은 수소 Lyman limit에 해당하는 파장이다. 따라서, $m = 2$ 일 때, 즉, 수소가 2s상태로 천이하는 경우 라만 산란선은 Balmer 계열의 청색쪽에 생긴다. 특히, $n = 3$ 일

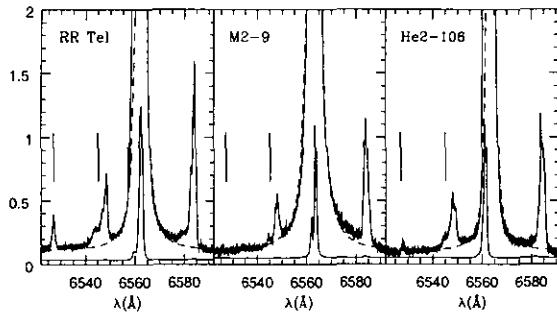


그림 2. CTIO 1.5미터 망원경에 부착된 Bench Mounted Echelle Spectrograph로 얻은 공생별 RR Tel, He2-106와 행성상 성운 M2-9의 $H\alpha$ 근처의 스펙트럼.

때에, $\Delta\lambda_o \simeq 18 \text{ \AA}$ 가 되어 Balmer α 6563 \AA 로부터 이 값을 빼면 $\lambda_o \simeq 6545 \text{ \AA}$ 을 얻어, 질소 금자선 [N II] 6548 \AA 의 청색쪽에 나타날 것을 기대할 수 있다. 그림 1은 He II 1025 방출선이 라만 산란되어 6545 \AA 산란선을 만드는 과정을 모식도로 표현한 것이다. $n = 4$ 일 때에, $\Delta\lambda_o \simeq 9.9 \text{ \AA}$ 이고 $H\beta$ 4861로부터 $\lambda_o \simeq 4851 \text{ \AA}$ 에서 라만 산란선이 형성된다. 이 산란선은 이미 행성상 성운 NGC 7027에서 나타남을 Péquignot et al. (1997)이 보고 하였으며, 공생별 RR Telescopii에서도 역시 나타난다는 사실이 van Groningen (1993)의 연구에서 밝혀졌다. $m = 3$ 일 때에, He II 방출선은 라만 산란되어 Paschen 계열의 청색쪽에 들어온다. 이 때에 $n = 4$ 에 대해서 $\Delta\lambda_o = 148 \text{ \AA}$ 이 되어, $Pa\alpha 1.875\mu$ 에 대하여 1.861μ 에서 형성될 것을 기대할 수 있다. 또한, $Pa\beta 1.281\mu$ 에 대하여 1.274μ 에서 라만 산란선을 기대한다.

2.2 관측

그림 2는 Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO)의 1.5 미터 망원경에 Bench Mounted Echelle Spectrograph를 써서 얻은 공생별 RR Tel, He 2-106와 행성상 성운 M2-9의 $H\alpha$ 근처의 고분해능 스펙트럼이다. 관측은 2000년 8월 14일에서 16일까지 수행하였으며, 이 분광 자료를 얻은 날의 시상은 1" 이하이었다. SiTe 2K CCD를 사용하였고 슬릿 폭은 100μ , 에셀 분산은 31.6 mm^{-1} 로서 분광 분해능 $\lambda/\Delta\lambda \sim 70,000$ 이었다. 이 그림에서 세로 막대는 He II ($6 \rightarrow 2$) 천이에 해당하는 방출선이 바닥 상태의 수소에 라만 산란되어 나타난 6545 \AA 산란선의 위치를 나타내고 있다. 또한, 6827 \AA 의 방출선이 공생별 RR Tel에 나타나는데 이것은 He II ($n = 12 \rightarrow n = 5$)의 천이에 해당하는 방출선이다. 공생별 RR Tel은 또한 He II 6560 ($n = 6 \rightarrow n = 4$)의 강한 방출선을 보여 주고 있으며, 행성상 성운 M2-9에서 이들 방출선은 모두 보이지 않는다. 또한, 이들 천체 모두 $H\alpha$ 근처에서 매우 넓은 폭의 날개를 보이고 있다. 이것은 $H\alpha$ 의 날개와 6545 \AA 방출선이 모두 라만 산란에서 비롯한다면 일관성 있는 해석이라고 볼 수 있다.

[N II] $\lambda\lambda 6548, 6584$ 는 $^1D \rightarrow ^3P_{1,2}$ 의 천이에서 나타나며, 들뜬 상태를 공유하고 금자선이기 때문에 광학적으로 약아서 이들의 세기는 언제나 1:3으로 고정되어 관측된다. 따라서, 이 사실을 이용하여 6545 \AA 라만 산란선을 빼낼 수 있다. 우리는 Gaussian 맞추기를 통하여 M2-9의 6545 \AA 의 라만 산란선의 세기는 [N II] $\lambda 6548$ 의 방출선 세기의 약 10분의 1임을 확인하였다.

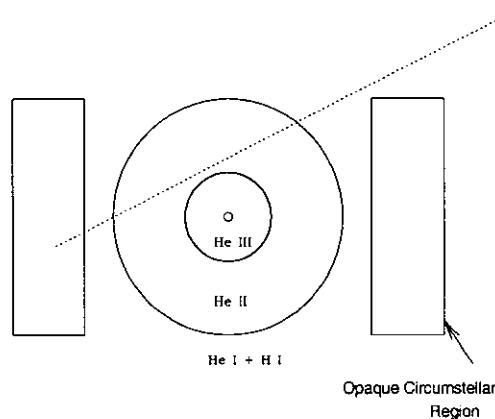


그림 3. 행성상 성운 M2-9의 광이온화 모델과 중심별과 He II 방출선 지역을 가리는 불투명한 도넛 성분. 불투명한 도넛 성분의 크기가 He II 방출선 지역보다 크다는 조건에서 도넛 성분의 크기를 추정할 수 있다. He II 방출선 지역은 대략 He III 지역으로 볼 수 있으며, 이 크기를 광이온화 수치 계산 코드인 Cloudy94을 사용해서 대략 10^{16} cm임을 알 수 있다.

3. 광이온화 모델

M2-9의 분광 자료에서 He II 방출선 지역이 나타나지 않지만, 성운의 형태 형성 과정에서 필요한 빠른 기체 흐름을 만들기 위해서 백색 왜성이 중심별을 형성할 것으로 추측된다 (Doyle et al. 2000, Solf 2000). 또한, 중심별이 쌍성계라면, 중심별의 공전 운동에 의하여 왜성 단계에 진입하기 전에 거성 단계에서 질량 손실을 겪을 때에 극방향에 비하여 공전 운동이 일어나는 적도면에 훨씬 더 많은 물질들을 쏟아냈을 것이다. 이들 물질들은 중심별을 적도면에서 도넛 모양으로 감싸고 있다면, 관측자 시선 방향으로 중심별은 심한 소광을 받게 된다. 실제로 매우 심한 소광과 적도면에서 적외선 초과 현상, 그리고 전파 영역에서 많은 분자선의 관측이 이루어져 있다 (Phillips, White & Harten 1985, Bachiller et al. 1988). 따라서, 우리는 그림 3에서 보는 바와 같이 중심별로부터 나오는 자외선 복사에 의하여 He II 방출선 지역이 형성되고, 중심별을 둘러싼 매우 불투명한 도넛 모양의 성분이 있으며, 이 성분에 의하여 He II 방출선 지역이 완전히 가려진다고 가정한다. 이 때에, He II 방출선은 He III와 자유 전자의 재결합에 의하여 일어나므로 주로 He III 지역에서 생성되고, He III 지역과 He II 지역의 경계가 무시할 수 있을 정도로 얇으므로, 우리는 He III 지역을 He II 방출선 지역으로 볼 것이다.

M2-9까지 거리가 현재까지 매우 불확실하게 알려져 있지만, 대략 1 kpc 내외로 많은 연구자들이 추정하고 있다. 광이온화 모델 계산을 관측 자료와 비교하기 위해서는 주어진 천체까지 정확한 거리를 알아야 하지만, 우리는 거리에 대한 불확실성을 중심별 천체의 절대 밝기에 대한 불확실성에 포함시키려고 한다. 광이온화 모델 계산은 Cloudy94을 사용하며, 이 수치 계산 코드의 구성은 Ferland (2001)에 잘 소개되어 있다. 광이온화 모델은 전자 밀도가 $n_e = 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 으로 일정하다고 놓고, 중심별에 대하여 구형으로 분포한다고 가정하였다. 이 때에 중심별은 온도 T 로 흑체로 놓고, 온도를 $5 \times 10^4 - 2 \times 10^5 \text{ K}$ 의 범위에서 계산하였다. 정확한 적도면의 성분에 의한 정확한 소광 계수가 알려

표 1. Cloudy94를 이용하여 얻은 광이온화 모델 계산 결과.

| L_* ¹ | T_* ² | R_{He+} ³ | $R_{He^{2+}}$ ⁴ | $F_{1025}/F_{H\beta}$ ⁵ | $F_{6548}/F_{H\beta}$ ⁶ |
|--------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $10^2 L_\odot$ | 5×10^4 | 3.3×10^{13} cm | 3.6×10^{15} cm | 0.0099 | 0.1713 |
| $10^2 L_\odot$ | 7×10^4 | 1.8×10^{15} cm | 7.0×10^{15} cm | 0.0098 | 0.1687 |
| $10^2 L_\odot$ | 10×10^4 | 3.3×10^{15} cm | 7.1×10^{15} cm | 0.0574 | 0.2094 |
| $10^2 L_\odot$ | 12×10^4 | 3.9×10^{15} cm | 7.1×10^{15} cm | 0.1087 | 0.2331 |
| $10^2 L_\odot$ | 15×10^4 | 4.6×10^{15} cm | 6.9×10^{15} cm | 0.1969 | 0.2634 |
| $10^3 L_\odot$ | 5×10^4 | 1.5×10^{15} cm | 1.4×10^{16} cm | 0.0014 | 0.0990 |
| $10^3 L_\odot$ | 7×10^4 | 3.9×10^{15} cm | 1.5×10^{16} cm | 0.0096 | 0.0971 |
| $10^3 L_\odot$ | 10×10^4 | 7.1×10^{15} cm | 1.5×10^{16} cm | 0.0565 | 0.1222 |
| $10^3 L_\odot$ | 12×10^4 | 8.6×10^{15} cm | 1.5×10^{16} cm | 0.1069 | 0.1368 |
| $10^3 L_\odot$ | 15×10^4 | 1.0×10^{16} cm | 1.5×10^{16} cm | 0.1939 | 0.1546 |

¹ 광이온화를 일으키는 광원 즉, 행성상 성운의 중심별의 태양 밝기에 대한 밝기² 중심별의 온도³ 중심별로부터 He II와 He III 지역의 경계까지 거리⁴ He I과 He II 지역의 경계의 위치⁵ He II 1025의 방출선 세기를 $H\beta$ 의 세기와 비교한 값⁶ [N II]6548의 세기를 $H\beta$ 의 세기와 비교한 값

지지 않았으므로, 중심별의 밝기를 태양의 100배와 1000배로 놓고 각각 계산하였다.

표 1은 Cloudy94을 사용해서 얻은 광이온화 계산의 결과를 나타냈다. He II의 라만 산란선이 관측 결과에서 나타난 바와 같이 6548 Å의 질소 금지선의 약 10분의 1의 세기로 나타난다. 따라서, 이 관측 결과를 설명하기 위해서는, He II 1025 방출선이 모두 라만 산란되어 6545 Å의 라만 산란선으로만 나온다고 할 때에, He II 1025 방출선 광자가 [N II] 6548 광자보다 6배의 에너지를 갖고 있으므로, He II 1025 방출선이 [N II] 6548 방출선 세기의 약 1.6배 약해야 한다. 그러나, 실제로 라만 산란을 일으키는 중성 수소의 성분이 He II 방출선 지역을 완전히 가리지 않을 것이며, 레일리 산란으로 탈출하는 He II 1025 광자의 비율이 작지 않을 것이므로, 이 가정은 매우 비현실적이다. 실제로, Lee & Lee (1997b)의 O VI 방출선 광자에 대한 결과를 본다면, 50퍼센트 정도의 광자가 표면에서 레일리 산란으로 탈출하고 나머지가 라만 산란되며, 비슷한 결과를 He II 광자에 대해서 기대할 수 있을 것이다. 따라서, 산란 효율이 수분의 일 정도라고 가정한다면, He II 1025 방출선의 세기는 [N II] 6548 방출선 세기와 거의 비슷하거나 혹은 더 강해야 한다. 이러한 조건이 만족되는 것은 표 1에서 보는 바와 같이 중심별의 온도가 1.2×10^5 K 이상으로 대단히 뜨겁고, 태양의 1000배 밝기를 갖는 조건에서 나타난다. 또한, 중심별의 온도가 5×10^4 K 이하에서는 He II 방출선의 세기가 지나치게 약하기 때문에 라만 산란선을 만들 수 없음을 알 수 있다. 특히, He II 방출선 지역의 크기를 정하는 가장 중요한 물리량은 중심별의 온도이며, 중심별의 밝기와 전자 밀도는 2차적인 영향을 주는 듯하다. 이 부분에 대해서, 더 넓은 매개 변수 공간에서 후속 연구가 필요하다.

이러한 조건에서 He III 지역과 He II 지역을 나누는 Strömgren 구의 반지름은 10^{16} cm로 주어지며, He II 지역과 He I 지역을 나누는 Strömgren 구의 반지름은 앞의 값의 1.5에서 2배의 값을 보인다. 따라서, 적도면에 불투명한 성분이 He II 방출선 지역을 가리기 위해서, 이 성분이 가질 수 있는 최소한의 크기가 이 값에 해당함을 알 수 있다.

4. 결론과 토의

M2-9의 분광 자료에서 He II 방출선이 나타나지 않기 때문에 방출선 지역의 이온화도가 높지 않을 것이라는 제안은 나비형 성운의 형태를 만들기 위한 양극 방향으로 매우 빠른 가스의 흐름을 설명하기 위하여 중심별이 뜨거운 백색 왜성일 가능성이 높다는 제안과 모순되어 보였다. 그러나, He II 방출선의 라만 산란선의 검출로부터 M2-9 주변에 매우 이온화도가 높은 방출선 지역이 존재 하며, 이 지역이 불투명한 도넛 형태의 성분에 가려져 있음을 의미한다. 이 도넛 성분의 크기는 대략 10^{16} cm로 추정되며, 이 크기는 중심별이 Doyle et al. (2000)과 Schwarz et al. (1997) 등의 제안과 같이 약 120년의 공전 주기를 갖는 쌍성계라고 가정할 때에 쌍성계의 공전 궤도의 수십 배의 크기에 해당한다. 이 크기는 거리 1 kpc에서 약 1''의 각 크기를 갖고 있으며, 이 값은 HST 영상 자료에서 보이는 M2-9의 적도면을 둘러싼 성분의 크기와 대체적으로 일치한다. 또한, 54.4 eV의 이온화 에너지를 갖는 He II 방출선 지역을 만들기 위해서 중심별은 온도가 적어도 $T = 10^5$ K인 백색 왜성이 존재해야 한다.

M2-9의 H β 근처에서 고분해능 분광 관측을 수행할 필요가 있다. NGC 7027에서 H β 의 청색 부분인 4340 Å에서 He II 방출선의 라만 산란선이 발견되었듯이 6545 Å 방출선이 He II의 라만 산란선이라면, 4340 Å에서도 라만 산란선이 보일 것으로 예측할 수 있다. 또한, 6545 Å가 He II의 라만 산란선이라면, 많은 공생별에서 나타나는 O VI의 라만 산란선 6830 Å, 7088 Å 방출선에서 나타나는 매우 넓은 선폭과 이중 혹은 삼중 마루와 같은 복잡한 구조가 6545 Å 방출선에서도 기대된다. 따라서, 대형 망원경으로부터 양질의 분광 자료를 확보하여 이 산란선의 자세한 선 모양을 연구할 필요가 있다.

H α 의 분광-편광 관측으로부터 H α 날개 부분의 형성 원인을 추정할 수 있을 것이다. 특히, 이들 부분이 라만 산란으로 이루어졌고, 중성 수소의 분포가 나비형 성운의 외곽을 따라 구대칭에서 벗어난다면, 편광을 떨 것으로 예측할 수 있다 (Bak & Lee 2000). 특히, 공생별에서 O VI 방출선의 라만 산란선은 강한 편광을 보이며, 이 산란선의 경우 산란 단면적이 작기 때문에 중성 수소가 밀집되어 있는 거성 주변에서 산란이 일어나기 때문으로 추정된다 (Schmid & Schild 1994, Harries & Howarth 1996). 그러나, H α 의 날개의 경우 산란 단면적이 더 크기 때문에 훨씬 더 넓은 범위에 걸쳐 분포하는 중성 수소 지역에서 산란될 것이 예상되므로, 약한 편광이 예상되며, 매우 정밀한 편광 관측이 요구된다.

Hyung et al. (2000)의 관측 결과로부터 상당히 많은 행성상 성운에서 6545 Å에서 방출선이 검출되고 있다 (Hyung & Aller 1995). 이 방출선이 He II 1025 방출선의 라만 산란 과정으로부터 나타난다면, 이들 천체들은 공통적으로 중성 수소의 기둥 밀도가 $N_{HI} \sim 10^{20}$ cm $^{-2}$ 인 성분이 중심별 주변에 존재함을 의미하며, 이 성분은 거성 단계로부터 지속된 질량 손실 과정에서 형성된 것으로 추정할 수 있다. 따라서, 이 방출선 근처의 He II 6527, 6560 방출선의 세기와 질소 금지선과 같은 방출선들과 세기의 비교를 통하여 중심별의 온도를 비롯한 물리량과 산란 지역의 기하학적 배치와 같은 매우 유용한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 우리는 행성상 성운에서 라만 산란 과정이 거성 단계의 질량 손실 과정을 이해하는 데에 매우 중요한 진단 도구가 될 수 있음을 다시 한번 강조한다.

감사의 글: 관측을 도와준 CTIO 스텁에 감사드린다. 원고를 세밀하게 읽고 많은 점을 지적하여 준 심사 위원께 감사드린다. 이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었습니다

(KRF-00-DP0443).

참고문헌

- Bachiller, R., Gomez-Gonzalez, J., Bujarrabal, V., & Martin-Pintado, J. 1988, A&A, 196, L5
- Bak, J. -Y., & Lee, H. -W. 2000, Journal of the Korean Astronomical Society, 15S, 147
- Balick, B. 1989, AJ, 97, 476
- Corradi, R. L. M., & Schwarz, H. E. 1995, A&A, 293, 872
- Doyle, S., Balick, B., Corradi, R. L. M., & Schwarz, H. E. 2000, AJ, 119, 1339
- Ferland, G. 2001, *Hazy, a brief introduction to Cloudy94.00*
- Gurzadyan, G. A. 1997, The Physics and Dynamics of Planetary Nebulae (Springer-Verlag: Berlin)
- Harries, T. J., & Howarth, I. D. 1996, A&AS, 119, 61
- Hyung, S., & Aller, L. H. 1995, MNRAS, 273, 958
- Hyung, S., Aller, L. H., Feibelman, W. A., Lee, W. B., & de Koter, A. 2000, MNRAS, 318, 77
- Ivison, R. J., Bode, M. F., & Meaburn, J. 1994, A&AS, 119, 61
- Lee, H. -W. 2000, ApJ, 541, L25
- Lee, H. -W. & Hyung, S., 2000, ApJ, 530, L49
- Lee, H. -W., Kang, Y. W., & Byun, Y. I. 2001, ApJ, 551, L121
- Lee, H. -W., & Lee, K. W. 1997a, MNRAS, 287, 211
- Lee, K. W., & Lee, H. -W. 1997b, MNRAS, 292, 573
- Minkowski, R. 1947, PASP, 59, 237
- Nussbaumer, H., Schmid, H. M., & Vogel, M. 1989, A&A, 211, L27
- Péquignot, D., Baluteau, J.-P., Morisset, C., & Boisson, C. 1997, A&A, 323, 217
- Phillips, J. P., White, G. J., & Harten, R. 1985, A&A, 145, 118
- Sakurai, J. J. 1967, Advanced Quantum Mechanics, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts
- Schmid, H. M. 1989, A&A, 211, L31
- Schmid, H. M., & Schild, H. 1994, A&A, 281, 145
- Schwarz, H. E., Aspin, C., Corradi, R. L. M., & Reipurth, B. 1997, A&A, 319, 267
- Solf, J. 2000, A&A, 354, 674
- Soker, N. 2000, ApJ, 496, 833
- Van de Steene, G. C., Wood, P. R., & van Hoof, P. A. M. 2000, in Asymmetrical Planetary Nebulae II: From Origins to Microstructures, ed. J. H. Kastner, N. Soker, & S. Rappaport (San Francisco: ASP), p.191
- van Groningen, E. 1993, MNRAS, 264, 975
- Van Winckel, H., Duerbeck, H. W., & Schwarz, H. E. 1993, A&AS, 102, 401