

공생별에서의 H α 날개의 편광연구
POLARIZATION OF H α WINGS RAMAN-SCATTERED IN SYMBIOTIC STARS

박지용, 이회원

연세대학교 천문우주학과

JIH-YONG BAK AND HEE-WON LEE

Department of Astronomy, Yonsei University:

jih2@galaxy.yonsei.ac.ke, hwlee@galaxy.yonsei.ac.kr

Received Jul. 5, 2000; Accepted Aug. 5, 2000

ABSTRACT

Symbiotic stars, believed to be binary systems of a mass-losing giant and a white dwarf with an emission nebula, are known to exhibit very broad wings around H α that extend to $\sim 10^3$ km s $^{-1}$. The wing formation mechanism is not a settled matter and recently Lee (2000) proposed that Raman scattering of Ly β by neutral hydrogen is responsible for the broad H α wings. In this model, it is predicted that the H α wings will be polarized depending on the geometric and kinematic distribution of the scatterers relative to the UV emission region. In this paper, we investigate the polarization of H α wings in symbiotic stars. Noting that many symbiotic stars possess bipolar nebular morphology, we assume that the distribution of neutral scatterers follows the similar pattern with a receding velocity of several tens of km s $^{-1}$ that mimics the expansion of the neutral envelope of the nebula. It is found that the red wing is more strongly polarized than the blue and main part and that the polarization direction is along the equatorial plane. We obtain a typical degree of polarization ~ 10 percent, however, it varies depending on the detailed distribution of H I scatterers. We conclude that spectropolarimetry will provide very important information on the origin of the H α wings.

Keywords: scattering — profile — polarization — symbiotic stars — accretion disk — cataclysmic variables

1. 서론

공생별은 질량 손실을 심하게 겪고 있는 거성과 방출선 성운을 거느리는 뜨거운 왜성의 쌍성계로 알려져 있다(Kenyon 1986). 방출선 성운은 뜨거운 왜성의 복사장에 의하여 광이온화된 것으로 추정되며, 이온화 에너지가 매우 큰 방출선에서 낮은 방출선까지 매우 다양한 방출선이 존재한다. 또한, 거성 성분은 Mira 변광성과 같은 수년에서 수십년에 이르는 긴 시간 규모에서 변광하기도 하며, 느린 항성풍의 형태로 나타나는 질량 손실은 왜성의 부착원반의 형성과 느린 신성 폭발과 긴밀한 관계가 있음을 추정할 수 있다.

이들 공생별의 분광자료에서 매우 특징적인 사실은 6830 Å과 7088 Å에서 매우 넓은 폭의 방출선이 나타난다는 것이다. 이들은 Schmid (1989)에 의하여 O VI $\lambda\lambda$ 1032, 1038 이중선이 중성 수소에 라만 산란되어 형성된다는 사실이 밝혀졌다. O VI 이중선의 라만 산란 단면적은

$\sigma \sim 10^{-23}$ cm 2 이므로 (Schmid 1989, Lee & Lee 1997), 자외선 방출선 지역에 가까이 중성 수소의 기동 밀도가 대단히 큰 산란 지역이 존재함을 추정할 수 있다. 이 라만 산란선은 순수하게 산란된 빛만으로 이루어져 있으므로 강한 편광을 보일 것으로 예측되었으며, 뒤이은 분광-편광 관측으로부터 이와같은 예측이 확인되었다 (e.g. Schmid & Schild 1994, Harries & Howarth 1996). 이들 관측에서 라만 산란선은 다중 마루의 선 윤곽과 적색 날개 부분에서 편광 방향의 뒤집힘이 나타남이 알려졌으며, Lee & Park (1999)은 공생별에 부착 원반 방출선 모형을 도입하여 이러한 모형에서 라만 산란선의 중요한 특징이 관측된 그것들과 일치함을 보였다. 또한 Lee (2000)은 공생별의 라만 산란에 대한 일반적 논의를 제시하였다.

공생별의 분광자료에서 또한 중요한 특징으로 지적할 수 있는 것은 H α 선에 날개 부분이 나타나며 그 폭이 $\Delta V \sim 10^3$ km s $^{-1}$ 에 이른다는 점이다. 이와 비슷한 H α 의 날개

가 IC 4997과 같은 어린 행성상 성운과 여러 post AGB 단계의 별들에서 나타남이 알려졌다. $H\alpha$ 선의 날개 영역의 형성 원인은 현재까지 잘 알려져 있지 않으며, 전자 산란 혹은 뜨거운 중심별 주변에서 나타나는 빠른 항성풍이 $H\alpha$ 날개가 만들어지는 원인으로 제시되어 있다.

한편, Nussbaumer et al. (1989)은 라만 산란의 천체 물리학적 응용 가능성을 논하면서, $Ly\beta$ 방출선이 중성 수소에 라만 산란될 때 $H\alpha$ 의 날개를 형성할 수 있음을 언급하였다. Lee & Hyung (2000)은 라만 산란된 $Ly\beta$ 가 형성하는 $H\alpha$ 의 날개 부분의 윤곽을 계산하여 행성상 성운 IC 4997의 분광 자료에 적용하였다. 이들의 계산에서 충분한 $Ly\beta$ 광자를 얻기 위해서 높은 밀도의 자외선 방출선 지역이 존재하며, 산란 지역의 중성 수소의 기동 밀도 $N_{HI} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 를 가정하였다. 이와 같은 중성 수소의 산란 지역의 존재는 팽창하는 다중 껍질 구조들과 관련하여 공생별의 질량 손실 과정을 연구하는데 중요한 실마리를 제공할 것으로 기대한다.

$H\alpha$ 의 날개가 라만 산란을 거쳐 형성되었다면, $H\alpha$ 의 날개는 산란 지역의 기하학적 배치에 따라서 매우 강한 편광을 보일 것이다. 이 논문에서는 공생별의 일반적인 기하학적 모델을 받아들여서 라만 산란된 $H\alpha$ 의 날개의 편광을 계산한다. 이 논문의 구성은 다음 절에서 계산에 사용한 공생별 모델의 기술, 3절에서 계산 결과, 마지막 절에서 결과에 대한 토의와 앞으로 연구할 과제를 제시하는 것으로 이루어져 있다.

2. 공생별의 라만 산란 모델

Lee & Hyung (2000)의 행성상 성운 IC 4997의 $H\alpha$ 형성 과정에서 논의되었듯이 자외선 방출선 지역에서 형성되는 $Ly\beta$ 의 윤곽은 방출선 지역의 광학적 두께와 운동학 그리고 먼지 티끌의 존재와 같이 다양한 요소들에 의하여 결정된다. 또한, $H\alpha$ 의 날개 부분의 형성에 가장 중요한 영향을 주는 물리량은 $Ly\beta$ 의 라만 산란 단면적이며, 선 중심 근처에서 1차 근사적으로

$$\sigma_{Ray,Ram} \propto (\lambda_i - \lambda_\beta)^{-2} \quad (1)$$

로 주어진다. 따라서, 이 논문에서는 입사하는 $Ly\beta$ 의 선 윤곽은 가장 간단한 상자 모양으로 주어진다고 가정한다. 이 경우 라만 산란된 $H\alpha$ 의 날개는 Δv^{-2} 의 윤곽을 가지게 된다. 이 때에 $H\alpha$ 날개 부분의 세기는 산란 지역의 기동 밀도와 입사하는 $Ly\beta$ 의 세기에 의하여 결정된다.

대부분의 공생별 성운의 형태는 현재 정확하게 알려져 있지 않지만, 일부의 공생별은 방출선 성운이 나비 모양을 보이는 것으로 알려져 있다. 나비 형태의 일반적인 형성 과정은 밝혀지지 않았지만, 양극 방향으로 구조를 갖추기 위해서 극 방향의 항성풍이 중요한 역할을 할 것이다. 또한, 이와 동시에 별로부터 이탈한 물질들이 선택적으로 극 방향보다는 적도 방향에 더 많이 모일 것이므로, 물질들의

분포는 전체적으로 중심 별을 기준으로 토러스 구조와 극 지역의 outflow로 개념적으로 나누어 고려할 수 있을 것이다. 문제를 단순화하기 위해서, 산란 지역의 중성 수소의 밀도는 균일하다고 가정하였으며, 일정한 두께를 가진다고 설정하였다. 따라서, 산란 지역의 두께는 중성 수소의 기동 밀도 N_{HI} 로서 표현된다.

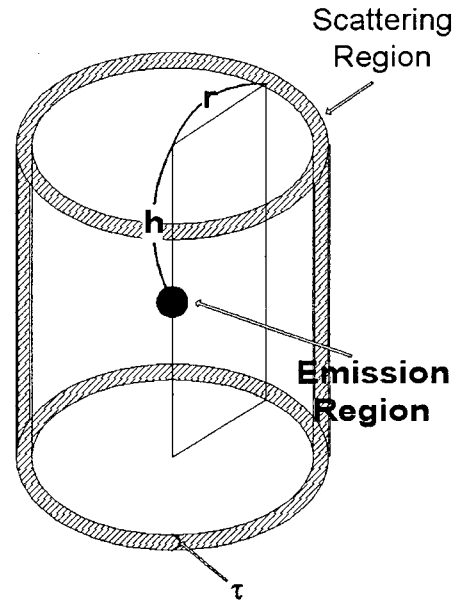


그림 1.—h:r 원통 모형.

이 논문에서는 $Ly\beta$ 광자를 산란하는 중성 수소의 분포가 이러한 분포를 따른다고 가정하고, 산란 지역이 토러스/원기둥 분포와 극 방향으로 후퇴하는 outflow로 구성된다고 가정한다. 그림 1에서 중성 수소의 분포가 토러스/원기둥으로 근사되는 경우와 극 방향의 outflow의 형태로 존재하는 2가지 경우에 대하여 개략적으로 나타내었다. 이 때에 극 방향의 outflow는 중심 별로부터 40 km s^{-1} 로 후퇴한다고 가정한다. 이러한 후퇴 속도는 행성상 성운의 다중 껍질 구조에서 흔히 나타나는 속도 규모로서 중심 별로부터 나타나는 빠른 항성풍과 이전의 거성 단계에서 잃어 버린 물질과 상호 작용하면서 나타나는 운동 성분으로 흔히 이해되고 있다. 또한, Lee (2000)에서 지적하였듯이, 6830 \AA , 7088 \AA 에 나타나는 라만 산란선의 적색 날개 부분을 만드는 산란 지역은 부착 원반 모형에서는 극 방향의 outflow이다. 그러나, 이 O VI 라만 산란선의 경우 outflow의 속도 규모는 여기에서 가정한 40 km s^{-1} 보

다 거의 같거나 약간 더 큰 값인 듯하다.

이 논문에서 H α 의 날개 부분의 편광을 몬테 칼로 방법을 사용하여 계산한다. 중심에 있는 자외선 방출선 지역에서 Ly β 는 상자 모양의 윤곽을 가지고 등방적으로 방출되며, 산란 지역의 기동 밀도에 따라서 주어진 Ly β 광자는 수 차례 이내의 레일리 산란과 마지막 라만 산란을 거쳐 H α 광자로 전환되어 날개 부분을 이룬다. 10⁶개의 광자를 발생하여 H α 날개의 선 윤곽과 편광을 계산한다. 레일리-라만 산란은 산란의 위상 함수가 전자 산란의 그것과 같기 때문에, 전자 산란의 경우와 마찬가지로 입사광에 원편광 성분이 없고 자기장이 없는 경우에 산란과도 원편광 성분을 가지지 않는다 (Lee 2000). 따라서, 이 논문에서도 편광은 선편광 성분만 고려할 것이며, 편광의 방향을 편광도의 부호로 표현하여 양인 경우 원기동 축 방향의 편광, 그리고 음인 경우 적도 방향으로 편광된 산란광을 나타내기로 한다.

3. 결과

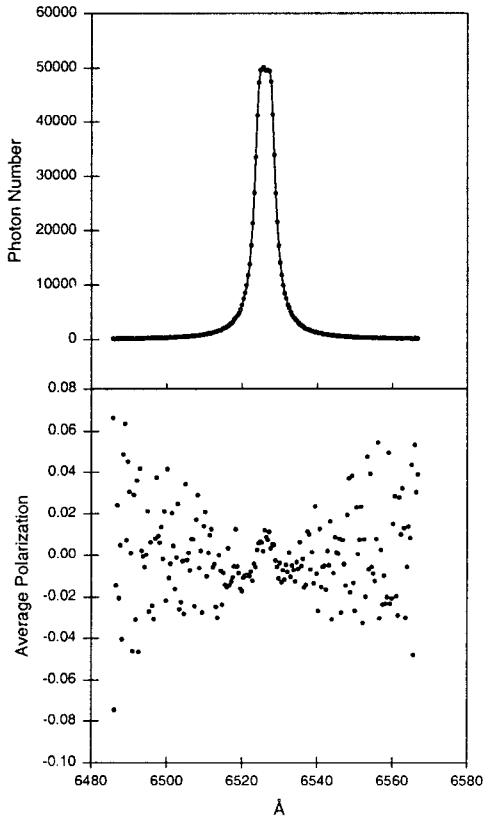


그림 2.— 5:1 원통모형에서 관측자가 적도방향에 있을 때 관측되는 플럭스와 편광.

그림 2에서 토러스/원기동 산란 지역에서 산란된 H α 의

선 윤곽과 편광을 나타냈다. 선 윤곽은 앞 절에서 기술하였듯이 Δv^{-2} 의 윤곽을 보이며, 편광은 극 방향으로 나타난다. 이 사실은 극 방향으로 입사한 광자가 산란광에 거의 기여하지 못한 결과로 해석할 수 있다. 또한, 편광도가 H α 날개의 모든 부분에서 거의 같은 값을 보여 준다. 선 중심으로부터 먼 부분에서 광학적 두께가 매우 작기 때문에 산란된 광자는 거의 대부분 단 한 번만 산란을 겪었을 것으로 추정할 수 있다. 또한, 선 중심 근처에서 산란과의 편광도가 먼 날개 부분의 편광도와 비슷한 값이므로, 선 중심 근처의 광학적 두께가 큰 부분에서도 단일 산란만을 한 광자들이 편광 플럭스에 압도적으로 기여함을 짐작할 수 있다.

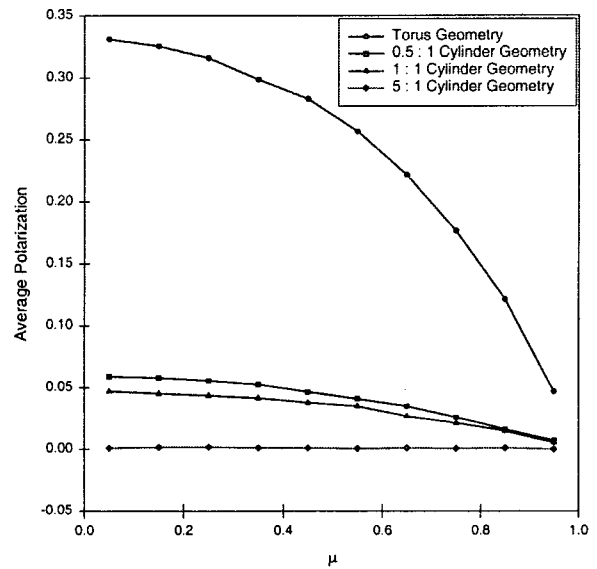


그림 3.— 다양한 h:r 비의 원통에서 관측자의 각에 따른 편광의 변화.

그러나, 다중 산란이 편광 감소에 주는 영향에 대한 자세한 논의는 앞으로 연구할 과제로 남겼으며, 뒤에서 다시 논의하기로 한다. 산란 지역의 적도 방향 크기 r 과 극 방향 크기 h 의 비율에 따라 산란 광자의 편광은 예민하게 달라진다. 그림 3에서는 h/r 의 비율을 달리하면서, 산란광의 편광을 나타냈다. 편광의 방향은 모두 극 방향이며, 편광도는 h/r 의 비율이 작을수록 큰 값을 보여주며, 최대 비등방성이 나타나는 $h/r \rightarrow 0$ 의 극한에서 적도 방향의 관측자는 30%를 넘는 높은 편광도를 보인다. 이 값은 단일 산란의 근사에서 예측되는 값(33%)과 거의 같은 값이다. 또한 h/r 이 1을 넘으면서 전체적인 편광도는 매우 작아지며 수분의 1% 정도를 보인다. 따라서, 토러스/원기동 모델에서는 산란 지역의 크기가 커지면서 전반적으로 산란이 등방적이 되며, 편광은 매우 약해짐을 알 수 있다.

그림 4에서 극 방향으로 후퇴하는 산란 지역에서 나타난 산란 플럭스를 표현하였다. 후퇴 속도를 40 km s⁻¹로 잡았기 때문에 산란 플럭스는 적색 부분으로 치우친다. 특

히, 이 성분은 적도 방향으로 편광되어 있기 때문에 앞에서 고려한 토러스/원기둥 산란 지역에서 산란된 성분과 반대 방향으로 편광되어 있다. 이 경우에도, 입사파의 모양이 상자형으로 주어졌기 때문에 산란파의 모양은 계속 Δv^{-2} 의 형태를 보인다.

또한 그림 4에서 토러스/원기둥 산란 지역과 극 방향 outflow 산란 지역을 혼합한 모델에서 예상되는 H α 날개를 나타냈다. 산란 지역이 토러스/원기둥 지역이 방출선 지역에 대한 입체각이 훨씬 더 크기 때문에 산란 플럭스는 이 산란 지역에서 산란된 성분에 의하여 결정된다. 그러나, 여기에서 h/r 의 값을 1보다 크게 잡았기 때문에 편광 플럭스는 극 방향에서 편광된 성분이 결정하며, 이들은 후퇴 속도 때문에 H α 날개의 적색 부분을 형성한다. 따라서, 플럭스의 윤곽은 여전히 Δv^{-2} 의 모양을 유지하지만, 편광은 적색 부분으로 치우치며 편광의 방향은 적도 방향으로 나타나게 된다.

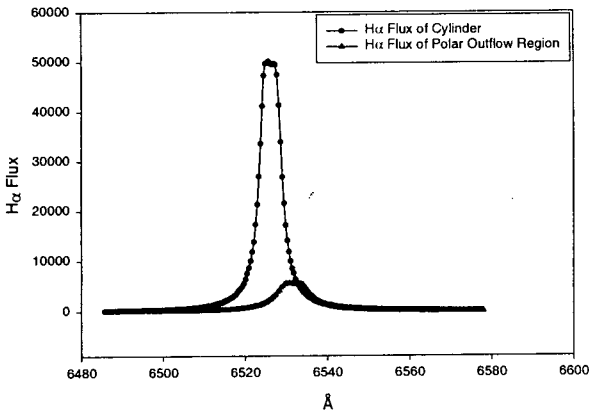


그림 4.— Outflow와 원통모형을 합한 모델에서의 플럭스

4. 토의와 앞으로 연구할 과제

서론에서 언급하였듯이 진화 마지막 단계에 도달한 많은 천체들이 H α 에서 날개 부분을 보인다. 이들 천체들은 공통적으로 심한 질량 손실을 겪고 있거나 혹은 과거에 겪었으며, 매우 뜨거운 자외선원을 가지고 있다. 라만 산란이 뜨거운 자외선원과 두꺼운 중성 수소 지역이 공존하는 조건에서 일어나기 때문에 H α 날개 부분이 라만 산란이 원인이 되어 형성되는 것이라면, 위 사실은 우연이 아닌 자연스러운 사실이 된다.

공생별의 H α 날개 부분의 형성 과정에 대한 합의된 이론은 아직 등장하지 않았다. H α 날개가 Ly β 의 라만 산란에 의하여 일어났고, 공생별에서 중성 수소가 나비형 성운의 윤곽을 따라간다면, 우리는 H α 의 날개에서 편광을 기대할 수 있다. 공생별에서 H α 에 대한 세밀한 분광-편광 자료는 현재 드물며, BI Crucis에 대한 Harries (1996)의 관

측 결과가 있다. 그에 따르면, 나비형 성운을 보이는 이 공생별에서 H α 는 적색 부분에서 거의 편광이 없으며, 적색 부분에서 뚜렷한 편광이 적도 방향으로 나타남을 보고하였다. 그는 이 결과를 부착 원반에서 후퇴하는 방출선 지역의 H α 광자가 부착 원반 주변의 자유 전자에 산란되어 나타날 수 있다고 해석하였다. 그러나, 그의 분광-편광 자료는 이 논문의 그림 4에 요약된 결과와 잘 일치한다. 따라서, Ly β 의 라만 산란에 의한 H α 의 날개 형성은 BI Cru의 분광-편광 자료를 새롭게 해석할 수 있는 이론적 틀이 될 수 있다. 더 세밀한 관측과 정밀한 이론으로부터 H α 의 날개 형성 원인을 밝히는 것이 앞으로 수행해야 할 매우 중요한 연구 과제라고 생각한다.

앞에서도 잠깐 언급하였지만, 편광을 결정하는 중요한 요소 가운데 하나는 광자의 산란 횟수이다. 산란을 여러 번 하게 되면서 산란파의 방향이 무작위적이 되고, 편광은 급히 감소하게 된다. 따라서, 단일 산란의 경우 가장 큰 편광을 기대할 수 있다. 다중 산란의 영향에 따라서, 날개 부분의 위치에 따른 편광 변화를 예상할 수 있으며, 이것은 H α 방출선의 중심과 날개를 개념적으로 구분하는 기준의 역할을 담당할 수 있을 것이다. 그리고, 이러한 정보로부터 산란 지역의 광학적 두께의 기하학적 분포와 같은 정보를 얻을 가능성도 있다.

또한, 다중 산란의 영향은 전자 산란에서도 중요한 의미를 가진다. 그 이유는 전자 산란하는 방출선 광자는 산란 횟수에 따라서 주파수 공간에서 확산하는 거리가 달라지기 때문에, 선 중심에서 멀어짐에 따라서 더 많은 산란을 겪은 광자가 적은 산란을 겪은 광자보다 더 큰 기여를 한다. 그러나, 산란을 많이 겪은 광자의 편광도는 감소하므로, 방출선의 전자 산란의 경우, 선 중심에서 멀어질수록 편광도가 감소할 것을 예상할 수 있다. 따라서, 산란된 광자의 평균 산란 횟수에 따른 편광의 변화에 대한 연구가 산란 기작에 따라 연구를 수행한다면, 공생별의 H α 의 날개 형성의 원인을 밝히는 데에 도움을 줄 것이다.

H α 의 날개가 라만 산란에 원인이 있다면, H α 의 편광에 영향을 주는 요소들은 이 논문에서 고려한 물리적 요소 외에 매우 다양하게 존재한다. 중성 수소 지역에 섞여 있을 것으로 짐작할 수 있는 먼지 티끌은 입사하는 Ly β 광자를 흡수할 수 있으므로 먼지 티끌의 양과 성분 그리고 반사율과 같은 물리량들이 중요한 영향을 줄 것이다. 또한, 먼지 성분이 크면, 일부 산란 지역이 가려지기 때문에, 이 논문에서 가정한 원기둥 대칭성이 깨진다. 이 때에는 관측자의 시선에 따라 산란 지역의 그늘짐 현상(occultation)이 달라지므로 관측자 시선에 따른 편광의 양상이 더 복잡해질 수 있다.

H α 에서 날개를 보이는 행성상 성운 IC 4997에서는 전파 관측을 통하여 중성 수소 성분을 확인하였으며 (Altschuler et al. 1986), 그 기둥 밀도와 팽창 속도는 이 논문에서 고려한 값들과 매우 비슷하게 측정되었다. 따라서, 공생별과

H α 의 날개를 보이는 post AGB 별들에 대한 전파 관측 연구를 통한 중성 수소의 탐색도 매우 흥미 있는 연구 과제가 될 것으로 믿는다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 연구는 교육부의 BK21 사업에서 지원 받았음을 밝힙니다. 광학 천문학 워크샵2000을 준비하는 데에 많은 노력을 기울여 주신 준비 위원들께 감사 드립니다.

참고문헌

- Harries, T. J., 1996, A&A, 315, 499
 Harries, T. J. & Howarth, I. D., 1996, A&AS, 119, 61
 Lee, H. -W., 2000, 보현산 분광 천문 워크샵
 Lee, H. -W. & Hyung, S., 2000, ApJL, 530, L49
 Lee, H. -W. & Lee, K. W., 1997a MNRAS, 287, 211
 Lee, H. -W. & Park, M. -G., 1999, ApJL, 515, L89
 Nussbaumer, H., Schmid, H. M., & Vogel, M., 1989, A&A, 211, L27
 Schmid, H. M., 1989, A&A, 211, L31
 Schmid, H. M., & Schild, H. 1994, A&A, 281, 145