

## 32 CYGNI의 공전궤도 위상과 궤도면 기울기에 따른 선 윤곽<sup>1</sup>

김 경미 · 최 규홍

연세대학교 천문대기과학과

### PHASE- AND INCLINATION-DEPENDENT LINE PROFILES OF 32 CYGNI<sup>1</sup>

Kyung-Mee Kim and Kyu-Hong Choi

Department of Astronomy and Atmospheric Science, Yonsei University  
Seoul 120-749, Korea

(Received December 11, 1992; Accepted December 22, 1992)

#### ABSTRACT

The line profiles of 32 Cyg have been calculated by integrating the equation of transfer numerically. In order to determine the source function the two level atom and complete redistribution were assumed and Sobolev approximation was used. The peaks of line profiles for the phase 0.99 and 0.70 showed redshift and blueshift, respectively. The line profiles had dependence on the inclination of orbital plane. The result with small inclination showed higher flux of line profile.

#### 요 약

ζ Aur형의 쌍성계인 32 Cyg에 대해 복사 전달 방정식을 수치적분하여 이론적인 선 윤곽을 구하였다. 원천함수를 구하기 위해 2 준위 원자와 완전 재분배를 가정하고 Sobolev 근사를 이용하였다. 선 윤곽을 궤도위상에 따라 구한 결과, 공전궤도 위상 0.99에서는 선 윤곽이 적색편이를 보였으며, 공전궤도 위상 0.70에서는 파장이 짧은 쪽으로 약간 치우쳤다. 또한 궤도면 기울기에 따른 효과를 보기 위해 같은 위상에서 각기 다른 기울기를 주고 계산하였는데, 기울기가 작은 경우에 빛의 세기가 증가하였다.

#### 1. 서 론

32 Cyg는 매우 확장된 대기를 가진 초거성과 뜨거운 B형 별로 이루어진 ζ Aur형의 쌍성계이다. B형 별로부터 나온 광자는 초거성의 대기를 지나면서 산란, 흡수되어 P Cyg형의 선 윤곽을

<sup>1</sup> 이 연구는 교육부 1992년도 기초과학연구소 학술연구조성비로 수행된 것임

만드는데, 이는 초거성 대기의 특성인 항성풍을 규명하는데 유용하다.

항성풍을 연구하기 위한 접근 방법은 크게 두 가지로 분류될 수 있는데, 하나는 항성풍의 발생 원인을 역학적으로 설명하기 위한 노력이고 다른 하나는 항성풍에 의해 생긴 선 율곽을 관측과 잘 맞도록 이론적으로 계산하는 것이다. 그 어느것이든 초거성의 대기에서의 분광 관측이 중요한 정보를 제공하는데 특히 쌍성계인  $\zeta$  Aur 형의 별들은 뜨거운 B형 별이 광원 역할을 하면서 높이에서 따른 초거성의 대기 구조를 알려준다.

이론적인 선 율곽을 만들기 위해 적분되는 복사 전달 방정식에서 제기되는 문제점 중 하나는 선 원천함수 (line source function)를 결정하는 것이다. 그러나 Sobolev 이론에 의하면 속도 기울기 (velocity gradient)가 큰 대기층에서는 선 원천함수가 대기의 국부적 특성보다는 대기의 속도 분포에 의해 결정되므로, 선 원천함수는 항성풍에 의한 Doppler 효과로서 표현할 수 있다. 또한 Hempe (1982)에 의하면 복사 전달 방정식의 해를 구하는데 있어서, 그 해의 오차가 원천함수의 근사에서 보다 적분식을 근사 처리하는 과정에서 일어난다고 하였으며, 항성풍의 속도를 상수로 가정하고 궤도면 기울기  $90^\circ$  인  $\zeta$  Aur에 대해 궤도위상에 따른 선 율곽을 구하였다. 따라서 평창 대기에서 복사 전달 방정식의 적분식을 처리하는 것이 선 율곽을 계산하는 근원적인 문제로 귀결되며 이 논문에서는 복사 전달 방정식의 적분식을 근사로서 처리하지 않고 직접 수치적분하여 32 Cyg의 이론적인 선 율곽을 구하였다. 선 원천함수를 구하기 위해 2 준위 원자 (two level atom)와 완전 재분배 (complete redistribution)를 가정하고, Sobolev 이론을 이용하였다. 항성풍의 속도 분포를  $V(r) = V_\infty(1 - R_c/r)^{1/2}$ 로 가정하였으며 또한 쌍성계인 32 Cyg의 선 율곽이 궤도 위상과 궤도면 기울기에 따른 의존성을 보기 위하여 같은 궤도면 기울기를 갖는 두 경우의 위상에 대해 그리고 같은 위상에서의 다른 기울기에 대해 계산하였다.

## 2. 복사 전달 방정식

관측자계에서 B형별로부터  $n$  방향으로 나온 빛은 아래와 같은 복사 전달 방정식을 통하여 초거성의 대기에 도달한다.

$$(n \cdot \nabla)I(\nu, r, n) = k_l(r)\phi(\nu - \frac{\nu_0}{c}n \cdot v(r), r)(S_l(r) - I(\nu, r, n)) \quad (1)$$

여기에서  $k_l$ 은 선 흡수계수,  $\phi$ 는 선 율곽함수이며, 위 식에서 보는 바와 같이 방정식은 주파수, 광원으로부터의 거리, 방향에 의존하며  $S_l$ 은 선 원천함수이다. 32 Cyg는 쌍성계이므로 궤도면 ( $Z, P, Q$ ) 좌표계를 천구상의 좌표계 ( $Z'', P'', Q''$ )로 투영하면 복사 전달 방정식은 다음과 같이 바뀌어 쓸 수 있다 (Hempe 1982).

$$I(\nu, P'', Q'') = I_0 \exp(-\tau_m(\nu, P'', Q'')) + \int_0^{\tau_m} S(Z'', P'', Q'') \exp(-t(\nu, Z'', P'', Q'')) dt \quad (2)$$

$$I_0 = \begin{cases} I_c & \text{for } (P''^2 + Q''^2)^{1/2} \leq 1 \\ 0 & \text{for } (P''^2 + Q''^2)^{1/2} > 1 \end{cases}$$

$Z''$  축은 시선방향이고  $P''$  와  $Q''$  는 천구면 상에서의 충돌계수 (impact parameter)이며,  $\tau_m$  은 최대 광학적 깊이이다.

### 3. Sobolev 근사에 의한 선 원천함수

Sobolev 근사를 이용하면 항성풍이 있는 32 Cyg 와 같이 속도 기울기가 큰 대기층에서는 선 윤곽이 대기의 속도분포에 의한 Doppler 효과로서 결정된다. 따라서 2준위 원자와 완전 재분배를 가정하면 선 원천함수는 다음과 같이 표시된다.

$$S_l(r) = \frac{(1-\epsilon)\beta_c I_c + \epsilon B}{(1-\epsilon)\beta + \epsilon} \quad (3)$$

여기서  $I_c$  는 연속선의 세기,  $B$  는 Planck 함수,  $\epsilon$  은 충돌 되가라앉음 (collisional de-excitation) 에 의해 산란에 참여하지 않는 광자의 비율이다.  $\beta$  와  $\beta_c$  는 탈출 확률인데 각각 차지하는 입체각에 의해 결정된다.  $\beta$  는 계산하려는 점이 어떤 방향과 B형 별까지의 거리에 의해 결정되는 각을 전 방향으로 적분함으로써 얻어지고,  $\beta_c$  는 계산하려는 점이 B형 별의 반경과 이루는 각에 의해 결정되는데 이들 모두 계산하고자 하는 점의 좌표에 의존하는 양이다.

광학적 깊이는 계산하려는 점과 대기를 갖는 초거성으로부터의 거리  $r'$  에 따라 정해지고 대기의 속도분포에 영향 받는다 (Hempe 1982). 그러나 실제로 광학적 깊이는 선 흡수계수와 선 윤곽함수에 관계하지만, 계산하고자하는 주파수에 맞는 속도를 갖는 지점에서 선 윤곽함수는  $\delta$ -함수처럼 작용한다. 따라서 계산을 고려하는 특정 주파수에 대해서 충돌계수의 적분간격마다 선 윤곽함수가  $\delta$ -함수가 되는 좌표를 찾았다면 선 윤곽함수를 정규화 할 수 있다.

### 4. 계산 및 결과

B형 별을 천구면 상의 좌표 중심에 놓고 B형 별로부터 나온 광자가 시선방향으로 초거성의 대기를 지나면서 작용하는 경로를 수치적분하였다. 이 때 초거성의 항성풍 속도 분포는  $V(r) = V_\infty(1 - R_c/r)^{1/2}$  로 가정하였으며  $R_c$  는 초거성의 반경이다. 항성풍의 시선방향 속도와 초거성의 시선방향 공전궤도 속도와와의 합으로서 총 속도가 표시된다. 계산하려는 파장변이가 일어나는 총 속도의 등속도면 상에서 원천함수를 계산하였는데 순수하게 산란만 일어나도록  $\epsilon = 0$  로 놓았다. Hamman (1981)에 의하면 팽창대기에서는 밀도 변화가 광학적 깊이에 미치는 영향이 작다. 질량보존을 가정한다면 밀도는 거리와 속도의 함수로서 쓰여지고 따라서 광학적 깊이는 단지 거리에 따라 결정된다. 간단하게 선 윤곽의 궤도위상 의존성을 보기 위하여 진동자 세기와 파장은 상수로 가정하였다.

복사 전달 방정식을 적분하는 과정에서 광학적 깊이와 거리에 관계하는 원천함수를 얻기 위하여, 적분간격으로 시선방향을 증분하면서 그 때에 해당하는 광학적 깊이를 구하였다. 32 Cyg 를 천구면상으로 좌표변환하고 궤도위상에 따른 선 윤곽을 계산하는데 사용된 변수들을 표 1에 나타냈다.

주파수와 시선방향에 따라 복사 전달 방정식을 적분함으로써 빛의 세기를 구했으며, 이 빛의 세기를 Simpson 방법을 통하여 다시 수치적분하여 관측자를 향한 총 복사속을 얻었다.

표 1. 32 Cyg의 물리적 변수와 궤도요소.

	32 Cyg A	32 Cyg B	
분광형	K5 Iab	B4 IV-V	
별의 질량 ( $M_{\odot}$ )	19-21	8-10	
궤도 장반경 ( $\times 10^{13}$ cm)	3.2	6.4	Stencel <i>et al.</i> (1979)
궤도 기울기 ( $^{\circ}$ )	72-82		
공전 주기 (일)	1147.8		
이심률	.301		
근성점 시간 (J.D.)	2433141.8		Che <i>et al.</i> (1983)
식 시간 (J.D.)	2433224.8		
근성점 경도 ( $^{\circ}$ )	218.2		
별의 반경 ( $\times 10^{11}$ cm)	127	1.75	Baade(1993)

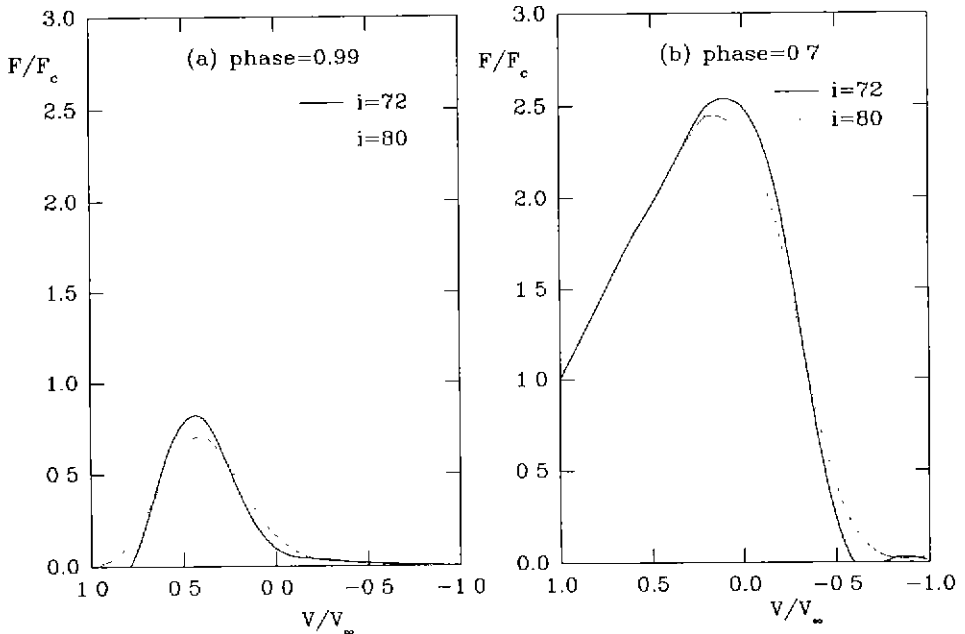


그림 1. 32Cyg의 궤도 위상에 따른 선 윤곽. (a) 위상 0.99에서의 선 윤곽. (b) 위상 0.70에서의 선 윤곽.  $V/V_{\infty} > 0$ 은 적색편이,  $V/V_{\infty} < 0$ 은 청색편이를 가리키며, 실선은 기울기가  $72^{\circ}$  이고 점선은  $80^{\circ}$  이다.

공전궤도 위상을 달리하여 계산된 32 Cyg의 선 윤곽을 그림 1에 보였는데 그림에서 가로축  $V/V_{\infty}$ 는 종속도 (terminal velocity)에 대한 속도 비율로서 곧 파장변이를 가리키며, 세로축  $F/F_0$ 는 연속선으로 정규화한 복사속의 값이다. 그림 1-(a)는 공전궤도 위상 0.99의 선 윤곽으로서 B형별이 초거성에 의해 가려지는 완전한 식이 일어날 때이다. 관측자로부터 멀어지는 속도성분을 가진 초거성의 대기영역이 주로 산란되므로 Doppler 효과에 의해 파장변이가 붉은 쪽으로 약간 기울어 있다. 그림 1-(b)는 공전궤도 위상이 0.70으로서 부분식이 끝난 후이다. 이 위상에서는 B형별을 좌표 중심으로 보았을 때 초거성의 시선방향의 공전궤도 속도가 매우 작은 속도를 갖고, B형별로부터 나오는 광자는 관측자를 향하는 대기영역에서 부딪히게 된다. 이 때 위상 0.99와는 달리 B형별이 가리워지지 않았으므로 연속선과 중첩되어 나타나며, 속도변이 즉, 파장변이가 없는 곳에서 최대 빛의 세기가 나타났고 파장이 짧은 쪽으로 약간 치우쳤다. 위상이 0.70의 경우  $\zeta$  Aur에 대한 Hempe (1992)의 결과와 비교할 때 선윤곽의 최대 높이에서 나타났던 약간의 흡수가 32 Cyg의 결과에서는 보이지 않는데, 이는 궤도면 기울기가 작음에 따라 흡수로 나타났던 지점에서의 빛의 세기가 증가했기 때문으로 보인다. 32 Cyg는 쌍성계이므로 이 두 별의 궤도면을 천구면 상으로 투영시키는 과정에서 궤도면 기울기는 중요한 역할을 한다. 그리고 장반경을 결정하는데 있어서도 기울기의 효과를 무시할 수 없으므로, 기울기가 선 윤곽에 미치는 영향을 고려하지 않을 수 없다. 그림 1에서 기울기를  $72^\circ$ 와  $80^\circ$ 의 두가지 경우에 대해 비교하였다. 기울기가 작은 경우에 빛의 세기가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 식이 일어나는 경우에는 기울기가 클수록 B형 별이 더 많이 가려지기 때문에 빛의 세기가 커졌다고 볼 수 있다. 그러나 두 결과의 기울기 차가 크지 않은 점과 위상 0.70에서도 비슷한 경향을 보인 점으로 보아 이는 광학적 깊이에서 비롯되는 것으로 생각된다. 빛의 세기를 계산할 때 쓰이는 원천함수는 광학적 깊이의 지수함수에 반비례하므로 광학적 깊이가 크면 그 산란값이 작게 나타난다. 궤도면을 천구면에 투영했을 때 기울기가 작은 경우는 큰 경우에 비해 B형별로부터의 거리가 크게 나타난다. 그런데 거리에 따른 광학적 깊이는 두 기울기에 대해 같은 식으로 적용되었고 같은점에서 기울기가 작은 경우에 더 작은 광학적 깊이를 가지므로 산란값이 커지게 되어 빛의 세기가 증가한 것으로 생각된다.

## 5. 논 의

32 Cyg는 쌍성계이므로 궤도 위상과 궤도 요소에 따라 이른적인 선 윤곽을 계산 하였다. 그림 1에서와 같이 공전궤도 위상에 따라 선 윤곽의 세기가 달라졌다. 그리고 같은 궤도 위상에서 궤도면 기울기를 달리 하여 비교한 결과는 기울기가 작을 수록 선 윤곽의 세기와 폭이 더 증가하였는데 이는 초거성에 의해 B형 별이 덜 가려지기 때문이다. 비슷한 기울기를 가지고 계산하였던 VV Cep의 결과 (김경미와 최규홍 1992)와 다르게 나타난 이유는 김경미와 최규홍 (1992)이 선 원천함수를 계산 할 때 특정 구간에서 광학적 깊이를 상수로 가정했기 때문이다. 그러나 원천함수가 광학적 깊이에 대해 비선형이므로, 이 논문에서는 각 적분구간마다 대응되는 값을 구하였으며, 따라서 김경미와 최규홍 (1992)에 비해 좀 더 좋은 결과를 얻은 것으로 기대된다. 앞으로 이 논문에서 계산된 선 윤곽을 실제의 관측과 비교하고 궤도면 기울기에 의한 오차를 줄이기 위해서는 광학적 깊이에서 상수로 놓았던 진동자 세기, 파장 그리고 전자의 갯수 밀도에 대한 정보가 필요하다.

참 고 문 헌

- 김 경미, 최 규홍 1992, 한국우주과학회지, 9, 120.  
Baade, R. 1993, private communication.  
Che, A., Hempe, K. & Reimer, D. 1983, A&A, 126, 225.  
Hamman, W.-R. 1981, A&A, 93, 353.  
Hempe, K. 1982, A&A, 115, 133.  
Stencel, R. E., Kondo, Y., Bernet, A. P. & McCluskey, G. E. 1979, ApJ, 233, 621.