

차등보정법에 의한 항성풍인자의 결정

김유경 · 강영운

세종대학교 지구과학과, 대양천문대

DETERMINATION OF WIND PARAMETERS BY THE METHOD OF DIFFERENTIAL CORRECTIONS

You-Kyung Kim and Young Woon Kang

Daejang Observatory

Dept. of Earth Science, Sejong Univ., Seoul 133-747, Korea

e-mail: kangyw@astro.sejong.ac.kr

(Received May 18, 1994; Accepted June 8, 1994)

요 약

Zeta Aurigae형 쌍성의 항성풍인자들 즉, 질량손실을, 항성풍의 속도, stochastic velocity를 결정하는 방법을 제시하였다. 이들 인자들을 최소자승법으로 보정하기 위하여 Baade (1989)의 컴퓨터코드를 개선하였다. 이 개선된 코드는 차등보정법으로 반복계산하여 항성풍인자들을 수렴시키는 것이다. 개선된 코드를 32 Cyg에 대하여 IUE 인공위성이 관측한 Fe II 공명선에 적용하여 질량손실을 $2.18 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$, 항성풍의 속도 132.14km/s, stochastic velocity 39.82km/s를 구하였다.

ABSTRACT

This paper describes a method for the determination of wind parameters as mass-loss rate, wind velocity, stochastic velocity in Zeta Aurigae type binaries. We have modified the Baade's (1989) computer code to analyze the wind parameters of Zeta Aurigae type binaries according to the least squares criterion. The modified program adjusts the wind parameters by the method of differential corrections. We have applied this method to the IUE observations of 32 Cygni. We have fitted a theoretical line profile to the IUE observations of Fe II resonance line at various phases. The mass-loss rate, wind velocity and stochastic velocity of 32 Cygni obtained in this paper are $2.18 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$, 132.14km/s, 39.82km/s, respectively.

1. 서 론

식을 일으키는 쌍성 중에서 일부분은 대기에 의한 식을 일으키는데 이들 종류의 대표적인 쌍성계는 Zeta Aurigae형의 쌍성이다. 이 형에 속하는 쌍성은 ζ Aur, 31 Cyg, 32 Cyg, VV Cep 등이 있으며 이들 계는 온도가 낮은 거성 또는 초거성과 온도가 높은 주계열의 동반성으로 이루어져 있다. 이들의 특징은 초거성의 주위에 매우 확장된 대기가 형성되어 있는 것이다. 동반성에서 나오는 복사는 초거성의 차가운 대기를 지나면서 산란, 흡수되어 P Cyg형의 선을 형성한다. 이선의 분석은 초거성의 대기를 분석하는데 있어 매우 중요한 역할을 하며, 특히 이들 대기에서 일어나는 항성풍의 역할을 규명하는데 중요한 정보를 제공한다. 최근에는 IUE위성에서 얻어진 스펙트럼을 분석하여 자외선 영역에서의 대기에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Hempe (1982, 1983)는 초거성의 대기를 통과하는 주계열성의 광자가 산란되므로서 형성되는 P Cyg형의 이론적인 선유평의 모델을 제시하였다. 그의 모델은 Sobolev 근사를 이용하여 선원천함수를 구한 후 3차원의 좌표로부터의 적분을 이용하여 플럭스를 계산한 것이었다. 이들 형에 대해서 주계열성을 둘러싸는 H II영역이 있다고 하였고 선유평에 대해서는 도플러 선유평을 가정하였으며 초거성으로 부터의 항성풍의 속도는 주계열성에 이르는 곳에서 종속도에 이른다고 하였다. Che *et al.* (1983)은 Hempe (1982)가 제시한 방법으로 ζ Aur, 31 Cyg, 32 Cyg에 대해 이론적인 선유평을 계산하고 이를 Fe II, S II, Si II의 3선에 대해 적분하여 IUE의 관측자료와 비교하여 질량손실율을 구하였다. Schroder (1985)는 선원천함수를 구하는 과정에서 ζ Aur형 쌍성 등과 같이 항성풍의 속도와 stochastic velocity의 비율이 작은 곳에서는 Sobolev근사가 부적절함을 지적하였다. 한편 Baade (1989)는 Che *et al.* (1983)이 전개한 선유평의 형성에서 방출선의 세기를 만족스럽게 나타내지 못한 것에 대해 Schroder (1985)의 의견을 지지하고 Sobolev 근사를 사용하지 않고 선원천함수에 적분연산자 방법 (integral operator method) 을 적용하여 전달방정식을 풀어 질량손실율등을 구하였다. 현재까지 발표된 연구들은 ζ Aur형에서 나타나는 P Cyg형의 선유평을 이론적으로 계산하는 모형들을 제시할 뿐이며 실제 관측자료로부터 항성풍의 인자들을 구하는 방법에 대한 연구는 매우 미약하다.

이 논문에서는 항성풍의 인자를 결정하는 방법을 제시하기 위하여 가장 최근에 발표된 Baade (1989)의 컴퓨터 코드에 최소자승법을 추가하였다. 항성풍의 인자를 결정하는 과정에서 이전의 경험적인 방법을 탈피하여 관측값과 이론값의 차이를 최소화시키기 위하여 차등보정법으로 반복 계산하고 보정값을 최소자승법으로 객관화하여 각 인자들의 값을 수렴시켜 결정하는 방법을 제시한다. 그러므로 2장에서는 이용한 컴퓨터코드에 대해서 설명하고, 차등보정법을 이용한 이론적인 선이 관측된 선유평에 수렴이 되어가는 과정과 이때 구한 항성풍인자들의 값을 제시하였다. 그리고 3장에서는 이 연구의 결론과 앞으로의 연구 등에 관해 토론하고자 한다.

2. 차등 보정법에 의한 항성풍인자

현재까지 선유평을 이용하여 ζ Aur형의 항성풍인자를 구한 연구는 Che *et al.* (1983)과 Baade (1989) 등에 의해서 수행되었다. 그들의 연구는 항성풍인자들을 초기인자로 넣어 이론적인 선을

계산하기 위한 복사전달 방정식을 푸는데 중점을 두어 왔다. 그러므로 이론적인 선운곽을 관측된 선과 맞추기 위해 시행오차를 거쳐 항성풍인자를 구하였다. 이러한 과정에 있어 인자결정에 객관적인 방법이 결여되었고 주관적인 경험이 더욱 많이 작용하였다. 예를 들어 여러 인자들의 조합이 선운곽을 형성하는 과정에서 모든 조합을 다 검증할 방법이 없으므로 임의로 인자들의 조합을 선택하여 경험적으로 인자의 값을 결정하였다. 이 논문에서 이용한 Baade (1989)의 컴퓨터코드를 간단히 살펴보면, 입력파일에 항성풍의 인자들과 쌍성의 궤도요소를 넣어준다. 그리고 주계열성을 중심으로 한 구면좌표계 (r, θ, ψ)에서 각 위치에서의 선원천함수등을 시선방향을 따라 계산하도록 하는데 있어서 공간상에 임의의 격자를 만들어 그 격자마다 계산하는데 이때의 격자수를 조절할 수 있다. 이와 함께 분석할 선도 선택할 수 있다. 이렇게 구성된 입력파일을 넣어주면 계산을 통하여 출력파일은 파장대 규격화된 플럭스로 나오게 된다. 이것을 이용하여 선운곽을 그릴 수 있다. 이러한 이론적인 선형성은 항성풍인자들에 따라 선형성에 미치는 영향이 뚜렷함을 보여준다. 질량손실율이 클수록 P Cyg형의 선운곽이 더욱 뚜렷해짐을 볼 수 있으며 항성풍의 속도가 클수록 선은 청색편이 되어 나타난다. 또한 stochastic velocity가 클수록 선폭은 증가되어 나타난다. 이러한 사실을 기초로 항성풍인자들의 값을 구하기 위해 차등보정법을 이용하였다. 이 차등보정법의 일반식은 다음과 같다.

$$O - C = \frac{\partial f}{\partial M} \delta M + \frac{\partial f}{\partial V_{wind}} \delta V_{wind} + \frac{\partial f}{\partial V_{sto}} \delta V_{sto} \quad (1)$$

윗식에서 O 는 관측에서 나타나는 주어진 파장에서의 플럭스의 값이고 C 는 Baade의 컴퓨터 코드를 이용해 계산된 플럭스 값이다. 그러므로 관측값과 이론값의 차이가 최소가 되도록 최소자승법을 기초로 차등보정하여 수렴되는 값들을 구하는 것이 차등보정법의 기본원리이다. 보정하고자 하는 인자에 대한 편미분은 아래와 같은 방법으로 수행하였다.

$$\frac{\partial f}{\partial M} = \frac{f(M + \Delta M) - f(M)}{\Delta M} \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial V_{wind}} = \frac{f(V_{wind} + \Delta V_{wind}) - f(V_{wind})}{\Delta V_{wind}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial V_{sto}} = \frac{f(V_{sto} + \Delta V_{sto}) - f(V_{sto})}{\Delta V_{sto}} \quad (4)$$

이와 같은 차등보정법으로 개선된 코드를 사용하기 위해서는 실제 관측값과 비교하면서 실행되어져야 하므로 입력파일에 관측선의 파장과 플럭스를 추가하여 넣어주었다. 이때의 관측자료는 연속선에 대해 규격화하고 대표점을 선정하여 이용하였다. 위의 방법으로 인자들의 값이 결정되어 나오면, $O - C$ 가 최소화될 때까지 계속 반복계산하게 된다. 식 (2)~(4)에서 각 인자에 대한 증가분(Δ)은 보정값에 영향을 미친다. 그러므로 여러번의 실험과정을 통해 각각의 증가분에 대해 질량손실율 $1 \times 10^9 M_{\odot}/yr$, 항성풍의 속도 $2km/sec$, stochastic velocity $1km/sec$ 로 놓았다. 이 과정에 있어 제시된 선운곽이 수렴되어져 나가는 과정은 그림 1에 보였다. 그림 1에서 보는 바와 같

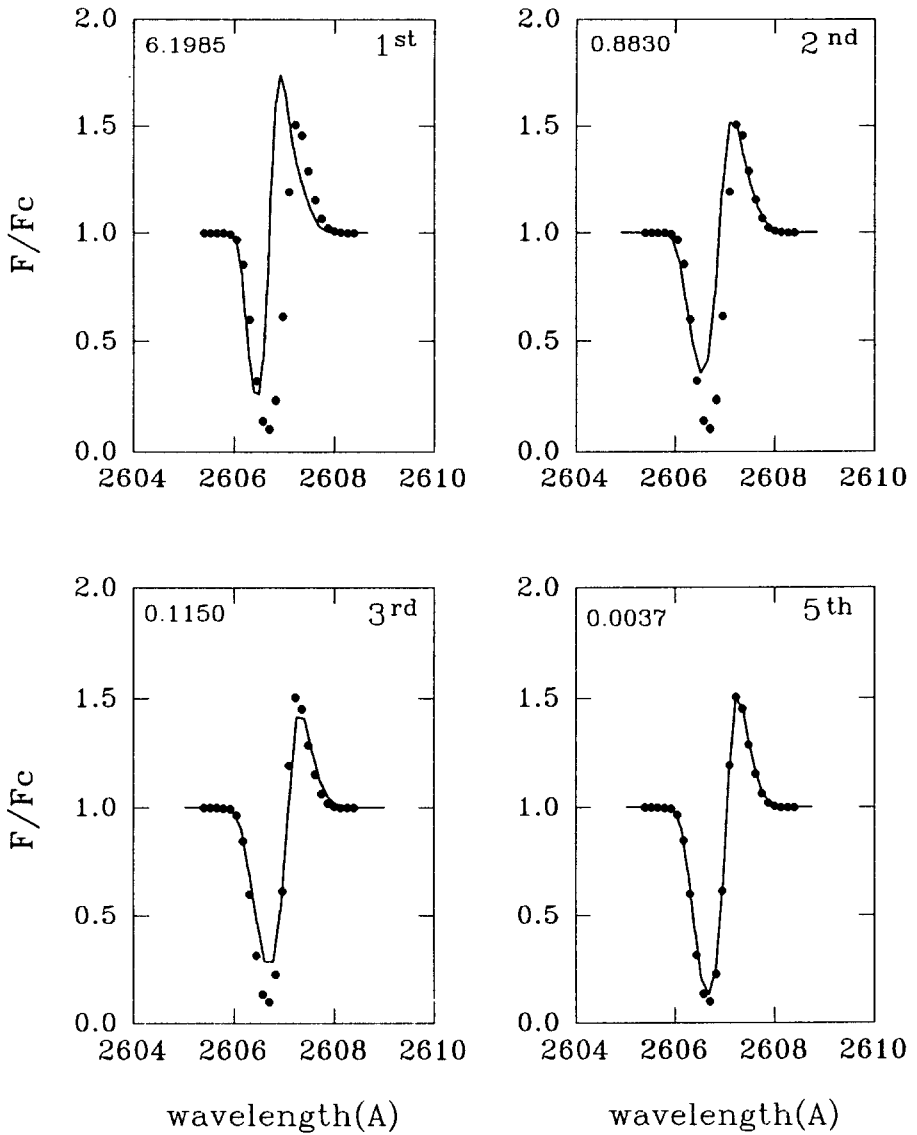


그림 1. 선운곽이 수렴되어져 가는 과정. 실선은 이론적인 선이고 검은점은 가상적인 관측선이다. 5회의 반복과정에 의해 선의 윤곽이 수렴되어 가는 것을 나타낸다. 각 그림의 왼쪽 윗편에 $O-C$ 를 나타내었다.

표 1. 32 Cyg의 IUE 스펙트럼.

관측일	Image No.	관측시각 (J.D.)	위상
82/172	LWR13540	2445142.328	0.38
82/324	LWR14672	2445293.707	0.51
83/212	LWR16487	2445547.019	0.73
83/267	LWR16862	2445602.033	0.78

표 2. 항성풍인자의 비교.

	Che <i>et al.</i> (1983)	Baade (1989)	이 논문
질량손실율 (M_{\odot}/yr)	2.8×10^{-8}	1.5×10^{-8}	2.18×10^{-8}
Wind velocity (km/s)	30 ~ 60	90	132.14
Stochastic velocity	15 ~ 30	30	39.82

이 처음에 주어진 임의의 인자값으로부터 인자들을 최소자승법으로 5회 반복하여 수립시킨 결과 이론적인 선윤곽이 주어진 선윤곽에 잘 일치되고 있다. 첫번째 계산에서의 $O - C$ 는 6.1985로 나타났는데 5회의 반복계산후에 얻어진 $O - C$ 는 0.0037이었다. 그러므로 우리는 이 차등보정법을 이용한 프로그램을 실제 관측자료에 적용시켜 항성풍의 인자를 결정하였다. 이것을 위해 ζ Aur형 쌍성에 속하는 32 Cyg의 관측자료를 이용하였다. 이 자료는 IUE 인공위성에서 관측한 자료로서 1982-83년도에 수행된 관측중 4가지 위상에 대한 것을 택하였고 각 자료의 정보는 표 1에 수록하였다.

항성풍인자를 구하기 위하여 중심파장이 2607.09Å인 Fe II선을 이용하였다. 실제 관측된 선윤곽에 이론적인 선윤곽을 수립시키는 과정에서 언급한 바와 같이 증가분에 따라 보정값이 더욱 영향을 받는다. 특히 질량손실율에 있어 민감하게 작용하여 반복계산 과정에서 인자값이 수립하기 보다는 발산되는 경우가 있다. 그러므로 실행과정에 있어서 2회 반복계산까지는 질량손실율에 대한 보정을 고정시켜서 다른 두인자에 의해 어느 정도 선윤곽을 수립시킨 후에 질량손실율에 대한 보정이 함께 수행되도록 하였다. 이때 각위상에 넣은 항성풍인자들의 초기값은 질량손실율 $1.5 \times 10^{-8} M_{\odot}/yr$, 항성풍의 속도 60km/sec, stochastic velocity 20km/sec로 놓았다. 실제 관측자료의 적용에 있어서 실험과정과 같은 정도의 작은 $O - C$ 는 나타나지 않았으므로 각각 10회씩 반복계산 하도록 하였다. 각 위상에 따라 차등보정법으로 구한 선윤곽과 관측된 선윤곽의 비교는 그림 (2-1)과 (2-2)에 제시하였다. 각 위상의 그림에서 가로축은 파장이고 세로축은 규격화된 플럭스이다. 각 그림에서 보는 바와 같이 관측된 선윤곽에 잘 일치함을 볼 수 있다. 우리가 고

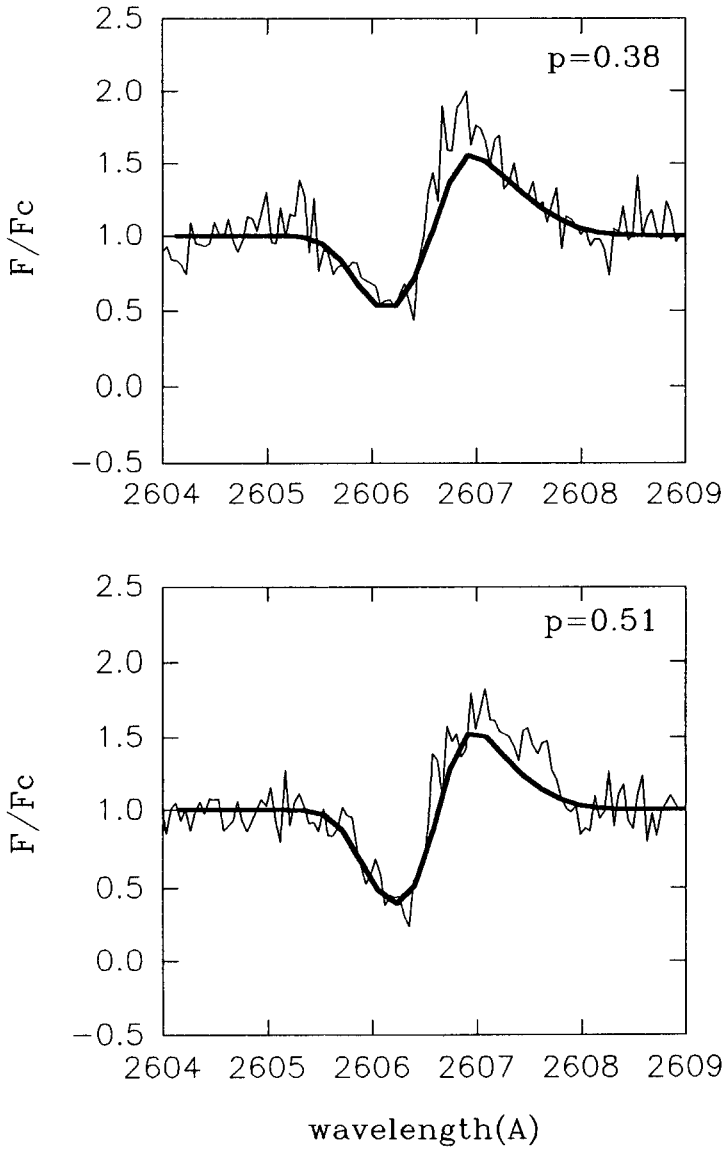


그림 2-1. 차등보정법을 이용한 이론적인 선윤편과 관측된 선윤편의 비교. 가는 실선은 관측선이고, 두꺼운 실선은 이론적인 선이다. 윗 그림은 위상이 0.38일 때이고 아래는 위상이 0.51일 때이다.

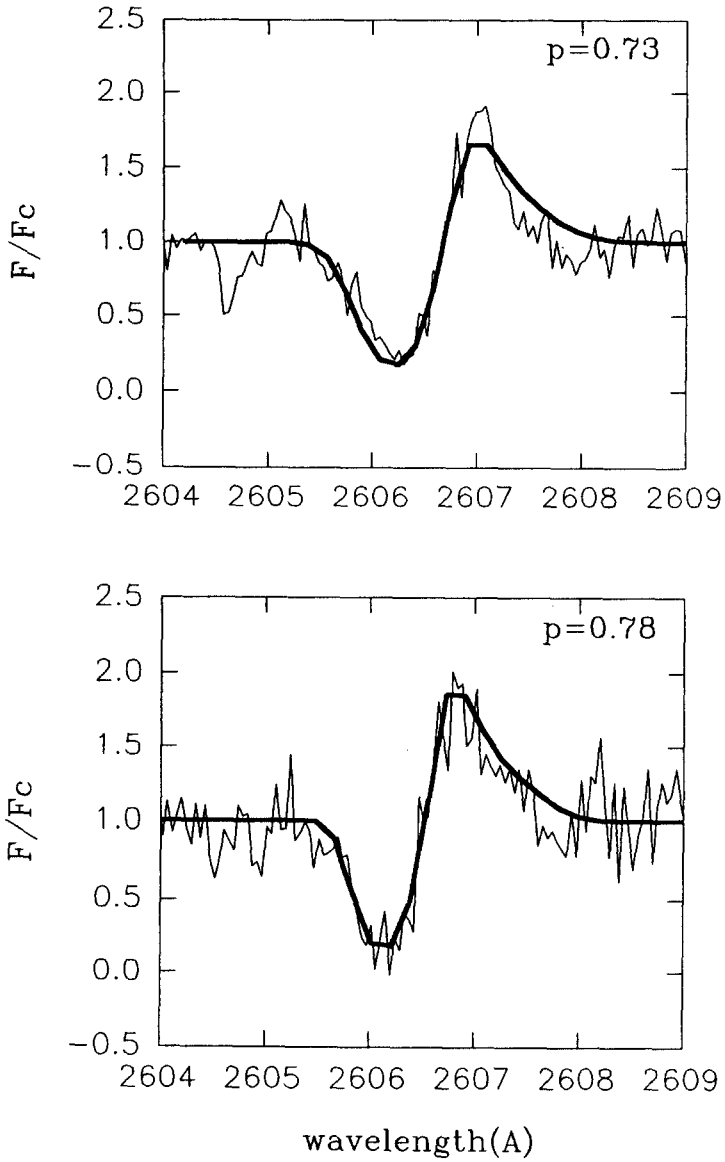


그림 2-2. 윗 그림은 위상이 0.73일 때이고 아래는 위상이 0.78일 때이다.

려한 4개의 위상에 대해서 각기 얻은 값들을 평균하여 구한 32 Cyg의 항성풍인자의 값은 질량손실을 $2.18 \times 10^{-8} M_{\odot}/yr$, 항성풍의 속도 132.14km/sec, stochastic velocity 39.82 km/sec로 나타났으며 표 2에서 우리가 구한 값과 예전에 발표된 값들을 비교하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 질량손실율과 stochastic velocity는 이전의 결과와 비교적 잘 일치하나 항성풍 속도는 이전의 값보다 크게 나타남을 보여준다.

3. 토의 및 결론

우리는 항성풍인자의 객관적인 값을 결정하기 위해 관측자료와 비교하여 이론적인 선윤곽과의 차이를 최소화시키는 차등보정법을 이용하여 항성풍인자들을 구하였다. 이때 차등보정법에 이용한 컴퓨터 코드는 Baade (1989)의 것을 이용하였으며 선원천함수를 구하는데 있어서는 Sobolev 근사를 이용한 방법을 사용하였다. 차등보정법을 이용하여 구한 이론적인 선윤곽이 0.38의 위상에서는 방출선의 부분이 우리의 기대보다 관측값과 이론값의 차이인 $O - C$ 가 크게 나타났다. 이것의 차이는 ζ Aur형 쌍성에 대해서 Sobolev 근사를 이용하여 선원천함수를 구하는 것이 속도 기울기가 작은 물리구조를 갖는 이들형의 대기에서는 이 근사가 적절치 않다는 것에 기인한 결과로 풀이된다는 Schroder (1985)의 결과를 확인하였다. 그러므로, 개선된 방법에 의한 선원천함수의 풀이를 이용하면 좀 더 정확한 인자들의 값을 결정할 수 있을 것으로 보인다. 앞으로 정확한 항성풍인자들의 값을 얻기 위해서는 더 다양한 위상에 대한 분석이 필요할 것이며 자외선 영역에 나타나는 많은 선들에 대해서도 종합적인 연구가 필요할 것이다. 이 과정에 있어서 차등보정법은 만기형별의 항성풍인자들을 결정하는데 있어서 도움을 줄 수 있을 것이라 기대된다.

참고 문헌

- Baade, R. 1986, A&A, 154, 145
 Baade, R. 1989, in Review in Modern Astronomy 2, ed. G. Klare, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, p. 324
 Baade, R. 1990, A&A, 233, 486
 Baade, R. 1992, in Review in Modern Astronomy 5, ed. G. Klare, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, p. 49
 Che, A., Hempe, K. & Reimers, D. 1983, A&A, 126, 225
 Hempe, K. 1982, A&A, 115, 133
 Hempe, K. 1983, A&A Suppl. Ser., 56, 115
 Rybicki, G. B. & Hummer, D. G. 1978, ApJ, 219, 654
 Schroder, K.-P. 1985, A&A, 147, 103
 Schroder, K.-P. 1986, A&A, 170, 70