

식쌍성 DO Cas의 광도곡선과 시선속도곡선의 분석¹

안영숙[†], 김호일, 이우백
한국천문연구원

AN ANALYSIS OF THE LIGHT AND RADIAL VELOCITY CURVES OF DO CAS¹

Young Sook Ahn[†], Ho-II Kim, and Woo-Baik Lee
Korea Astronomy Observatory
E-mail: ysahn@kao.re.kr, hikim@kao.re.kr, wblee@kao.re.kr

(Received October 15, 2000; Accepted November 15, 2000)

요 약

DO Cas는 최근 Shaw (1990)에 의해 근접촉쌍성으로 분류된 공전주기 0.68일의 식쌍성이다. 짧은 공전주기를 가짐에도 불구하고 Mannino (1958) 이후 분광관측에 의한 시선속도 곡선이 발표되지 않고 있다. 그런데 Hill (1991)은 Mannino의 시선속도곡선이 오류를 포함하고 있는 것으로 보인다고 하였다. 이 연구에서 우리는 Asiago 천문대에 의뢰하여 Mannino가 분석한 분광관측 사진건판을 입수하여 PDS로 측정하여 IRAF로 재분석하였다. 이 시선속도곡선과 1998년에 관측한 BVR 광도곡선을 Wilson-Devinney 방법으로 동시에 분석하였다. 그 결과 DO Cas가 접촉 또는 주성이 로쉬엽을 채우고 있는 접촉에 매우 가까운 준분리형 쌍성임을 확인하였으며 또한 이 계의 절대량을 구하였다.

ABSTRACT

DO Cas is a short period ($P=0.68\text{day}$) eclipsing binary star and is classified as a near-contact binary by Shaw (1990). There is no published radial velocity curve for this short period binary after Mannino (1958). Hill (1991) suspected that Mannino's radial velocity curve had some serious mistake. So, we scanned the original plates used by Mannino with PDS and the spectra were employed to IRAF packages to estimate the radial velocities. The radial velocity curve and the BVR light curves made by us in 1998 were analyzed simultaneously with Wilson-Devinney code. We found that DO Cas is a contact or near-contact binary which the primary component fills its Roche lobe and we also estimated the absolute dimensions of each components of this system.

Key words : Near-Contact Binary - Light Curve - Radial Velocity Curve - Absolute Dimension

¹이 연구는 한국천문연구원 기관고유사업 2000-1-300-00 과제의 일부로 수행되었음.

[†]corresponding author

1. 서 론

보현산천문대에 중분산분광기가 완성됨에 따라 측광뿐만 아니라 분광관측까지 가능해져 우리나라의 광학관측에 새로운 전기가 만들어 졌다. 예를 들어, 식쌍성 연구의 경우 측광관측에 의한 광도 곡선에 더하여 분광관측으로 시선속도곡선을 얻음으로서 측광학적 궤도요소 뿐만 아니라 별의 절대량을 구할 수 있게되어 연구의 질을 한층 높일 수 있게되었다.

이 연구에서는 보현산천문대의 중분산분광기와 유사한 사양의 분광기를 이용해 이탈리아 Asiago 천문대에서 관측한 DO Cas의 분광자료와 소백산천문대에서 얻은 측광자료를 동시에 분석하고자 한다. 그리고 이것을 이용하여 근접측쌍성으로 분류되고 있는 DO Cas의 로쉬 모형과 궤도 요소 그리고 절대 물리량을 도출하고, 또한 향후 보현산천문대의 중분산분광기를 사용해 관측한 자료로 얻을 수 있는 정보의 유용성을 확인해 보고자 하는 것이다.

DO Cas는 1940년 Hoffmeister (Winkler 1966)가 안시 관측자료를 분석하여 처음으로 그 변광을 발견한 이래 여러 학자들에 의해 측광 관측 자료가 구해지고 연구되어졌다. 이 별의 공전주기는 0.685일 정도이며, 주성의 분광형은 학자에 따라 A2 - A2II (Fehrenbach et al. 1966) 또는 A4 - A5 (Hill et al. 1975)로 분류되며, 반성의 분광형은 F2로 추측된다 (Koch 1973). 한편, 이 별의 로쉬 형태는 Cester et al. (1977), Kaluzny (1985), Rovithis-Livaniou & Rovithis(1986) 그리고 Oh & Ahn (1992) 등에 의해 접촉형으로 연구되어 졌으나 Giannone & Giannuzzi (1974), Karimie & Duerbeck (1985), Liu et al. (1988) 등은 준분리형으로 분류하였다. 이 계에 대한 불분명한 자료들을 명확히 해결하기 위해서는 분광관측 자료가 많이 필요하나 불행히도 이 쌍성계에 대한 분광관측자료는 Mannino (1958)가 구한 단선 시선속도 곡선이 유일한 자료이다.

2. 관측자료와 분석

2.1 측광관측 자료

이 연구에 사용한 측광관측자료는 소백산천문대 61cm 망원경과 CCD 카메라, BVR 필터를 사용하여 관측한 것으로 1998년 12월에 4일간 관측하여 구하였다. 이 관측 자료는 김호일 등 (1999)이 이미 분석에 사용하고 발표한 바 있다.

2.2 분광관측 자료

분광관측자료는 이탈리아 Asiago 천문대의 1.2m 망원경과 분광기를 사용하여 1955년 11월에서 1956년 1월말까지, 그리고 1957년 9월에서 1957년 12월까지 관측한 총 58개의 건판 중에서 분실되거나 자료의 질이 떨어지는 8개를 제외한 50개의 건판을 분석에 사용하였다. 이 건판은 증감 처리한 103aO이며 노출시간은 20분 - 40분이고 분해능은 $H\gamma$ 에서 $42\text{\AA}/\text{mm}$ 이다. 이 건판을 Asiago 천문대에서 대출하여 우리 연구원의 PDS를 사용하여 사진 농도를 측정하였으며, 자료 분석은 IRAF package를 이용하였다.

이 연구에서 사용한 건판은 이미 Mannino (1958)가 분석하여 발표한 바 있으나 자료처리 과정에서 오류가 있는 것으로 생각된다는 Hill (1991)의 제안에 따라 다시 분석하게 된 것이다. 실제로 우리의 자료처리 결과와 Mannino의 처리 결과를 비교한 바에 의하면 Mannino는 heliocentric Julian day를 사용하지 않았음을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 건판에 대해서 시선속도 값이 다르게 나타

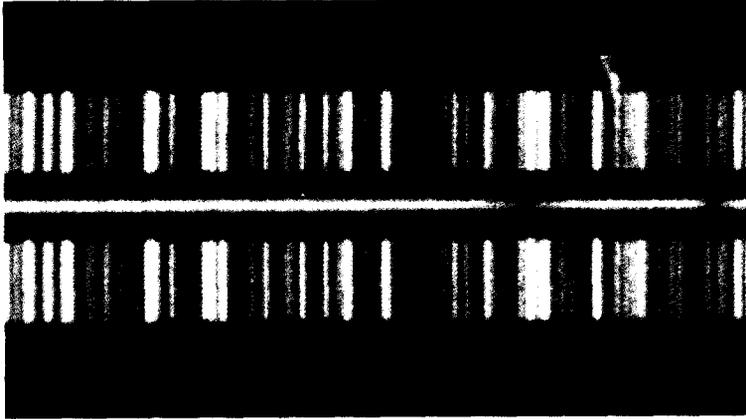


그림 1. 사진건판을 PDS로 scan하여 나타낸 모습. 오른쪽에 두 흡수선이 보인다.

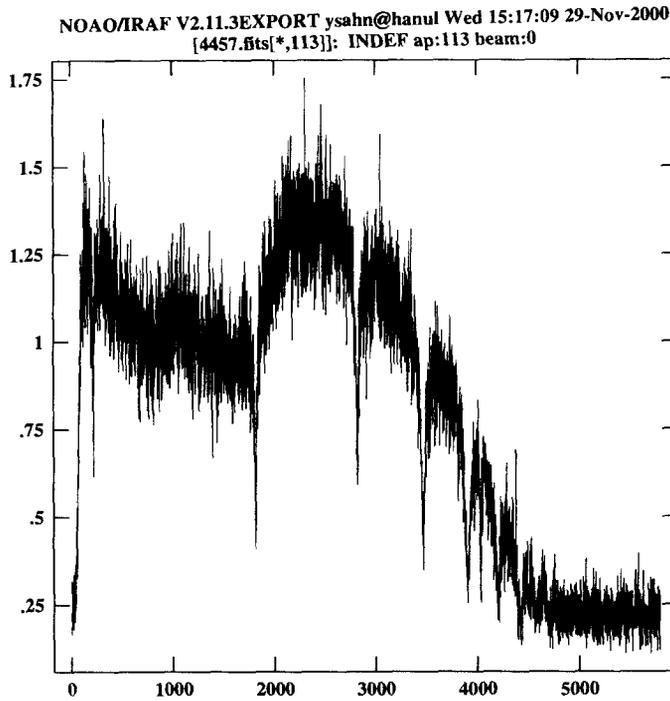


그림 2. 사진 건판을 처리하여 얻은 DO Cas의 스펙트럼. 가로축은 파장단위가 아닌 임의의 값이고, 세로축은 건판의 농도를 나타내주는 상대값이다.

표 1. DO Cas의 시선속도곡선 자료.

JD_{\odot} 2430000+	phase	V_{\odot} km/sec	JD_{\odot} 2430000+	phase	V_{\odot} km/sec	JD_{\odot} 2430000+	phase	V_{\odot} km/sec
5440.33127	0.113	-47.25	6116.36193	0.500	69.59	6190.21070	0.361	13.67
5440.34252	0.129	-62.62	6117.33073	0.961	41.94	6190.23153	0.392	-20.69
5446.17910	0.667	104.24	6117.40363	0.022	-26.03	6190.25237	0.422	32.46
5449.26099	0.155	-40.98	6118.35160	0.406	15.96	6190.27320	0.452	20.97
5449.36863	0.312	10.23	6118.43633	0.530	39.24	6190.29403	0.483	38.82
5449.42765	0.399	32.09	6119.26899	0.746	109.69	6190.31487	0.513	91.5
5450.47902	0.474	63.52	6119.29679	0.787	86.40	6191.20858	0.819	77.03
5494.34920	0.010	-39.57	6119.29769	0.949	54.18	6192.20855	0.279	-17.10
5498.22339	0.668	108.12	6119.39887	0.936	46.83	6192.22938	0.310	-25.54
5498.37392	0.888	88.91	6120.35448	0.332	-18.99	6192.29188	0.340	-4.570
5498.38850	0.909	89.99	6121.37467	0.822	100.08	6192.36827	0.512	81.10
5500.22938	0.598	89.760	6122.29414	0.165	-42.57	6192.40993	0.573	103.38
5500.24325	0.618	99.270	6122.31569	0.196	-69.01	6192.45160	0.634	110.06
5500.25212	0.638	113.03	6122.38998	0.305	-13.68	6192.47243	0.665	84.89
6088.53309	0.854	99.72	6142.42755	0.507	68.40	6192.49604	0.699	95.96
6115.36395	0.043	-67.54	6142.40463	0.537	71.78	6192.51687	0.729	114.77

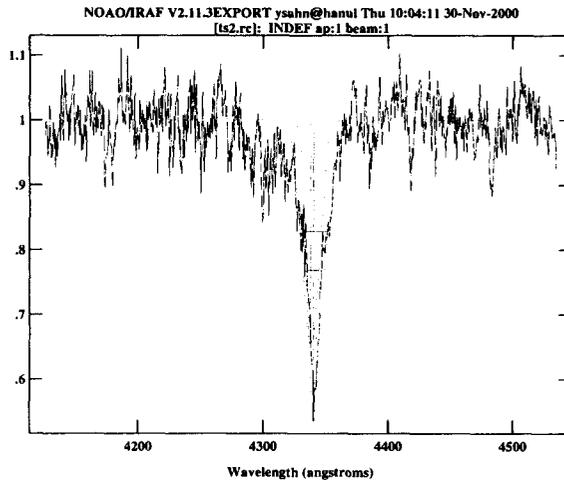


그림 3. 흡수선 중심 파장 구하기.

나고 있는데 이는 흡수선 맞추기 방법의 차이 또는 시선속도를 계산하는 과정에서의 오류에 기인하는 것으로 보인다.

PDS로 읽어 재현한 스펙트럼의 예를 그림 1에 보였고, 관측된 전체 파장 영역의 에너지 분포 예를 그림 2에 보였다. 그림 2에서 보듯이 이 스펙트럼에는 많은 흡수선이 있는데 이 중에서 특히 수소선들과 칼슘선들이 강하게 나타나는 것으로 보아 주성의 분광형이 A형이라는 연구자들의 주장을 확인할 수 있었다. 우리는 강하게 나타나는 수소선들 ($H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$)과 CaII H선을 이용하여 시선속도를 측정하였다. $He\epsilon$ 과 CaII K 라인도 강한 선이기는 하나 이 별의 스펙트럼에서는 서로 blending되어 구별하기가 어려워 사용하지 않았다. 이때 각 선의 동정에 사용한 비교 스펙트럼은 Fe 아크였다. 앞에서 언급한 4개의 흡수선들의 시선속도 값들을 구하여 각각의 선에 대해 가중 평균치를 취하여 한 스펙트럼의 평균시선속도를 결정하고, 최종적으로 태양중심 시선속도 값으로 바꾸어 주었다. 시

표 2. 접촉형 쌍성인 경우와 준분리형 쌍성인 경우의 DO Cas의 측광학적인 해.

Parameter	mode 3(접촉형)	mode 4(준분리형)
i	85.4 ± 0.18	87.4 ± 0.24
q	0.328 ± 0.001	0.331 ± 0.002
Ω_1	2.5029 ± 0.0030	2.5327
Ω_2	2.5029 ± 0.0030	2.5415 ± 0.0065
A_1	1.0	1.0
A_2	0.5	0.5
T_1	8200K	8200K
T_2	$4604 \pm 16K$	$4666 \pm 23K$
$L_1/(L_1 + L_2)B$	0.984 ± 0.001	0.983 ± 0.001
$L_1/(L_1 + L_2)V$	0.974 ± 0.001	0.973 ± 0.001
$L_1/(L_1 + L_2)R$	0.966 ± 0.001	0.964 ± 0.001
$x_1, y_1(B)$	0.598 , 0.000	0.802 , 0.306
$x_1, y_1(V)$	0.507 , 0.000	0.694 , 0.281
$x_1, y_1(R)$	0.402 , 0.000	0.567 , 0.248
$x_2, y_2(B)$	0.933 , 0.000	0.832 , -0.230
$x_2, y_2(V)$	0.776 , 0.000	0.803 , -0.041
$x_2, y_2(R)$	0.638 , 0.000	0.747 , 0.083
g_1	1.0	1.0
g_2	0.32	0.32
r_1 side	0.488 ± 0.001	0.484 ± 0.001
r_2 side	0.285 ± 0.001	0.277 ± 0.003
M_1/M_\odot	1.71	1.67
M_2/M_\odot	0.56	0.55
R_1/R_\odot	2.09	2.04
R_2/R_\odot	1.27	1.22

선속도 값을 구하기 위해 사용한 광도요소는 Oh & Ahn(1992)의 광도요소인

$$\text{Min } I = \text{HJD } 2433926.4573 + 0^d.6846661E \tag{1}$$

이다.

IRAF 패키지를 이용하여 관측된 흡수선으로부터 시선속도를 결정하는 과정을 그림 3에 보였다. 결정된 시선속도 값들은 표 1에 나타내었다.

2.3 관측 자료의 분석

DO Cas는 β Lyrae형 식쌍성으로 알려진만큼 두 별 사이의 상호 작용이 활발할 것으로 생각된다. 따라서 궤도요소들도 학자간에 서로 다르고, 로쉬모형도 연구자에 따라 접촉형 또는 준분리형 쌍성으로 분류되고 있다. 다시 말하면 지금까지 구해진 그 어떤 궤도요소도 이 계를 잘 나타내 주지 못하고 있고, 그만큼 이 계의 상태가 복잡하다고 말할 수 있다. 따라서 우리는 보다 정확한 로쉬 모형을 알아보기 위해 접촉형 쌍성인 경우와 준분리형 쌍성인 경우에 대해서 해를 구해 보았다. 측광자료와 분광자료는 Wilson-Devinney 프로그램을 이용하여 동시에 분석하여 이 쌍성계의 측광학적 요소들은 물론 분광 요소들을 구하고, 이 계의 절대량을 구하였다.

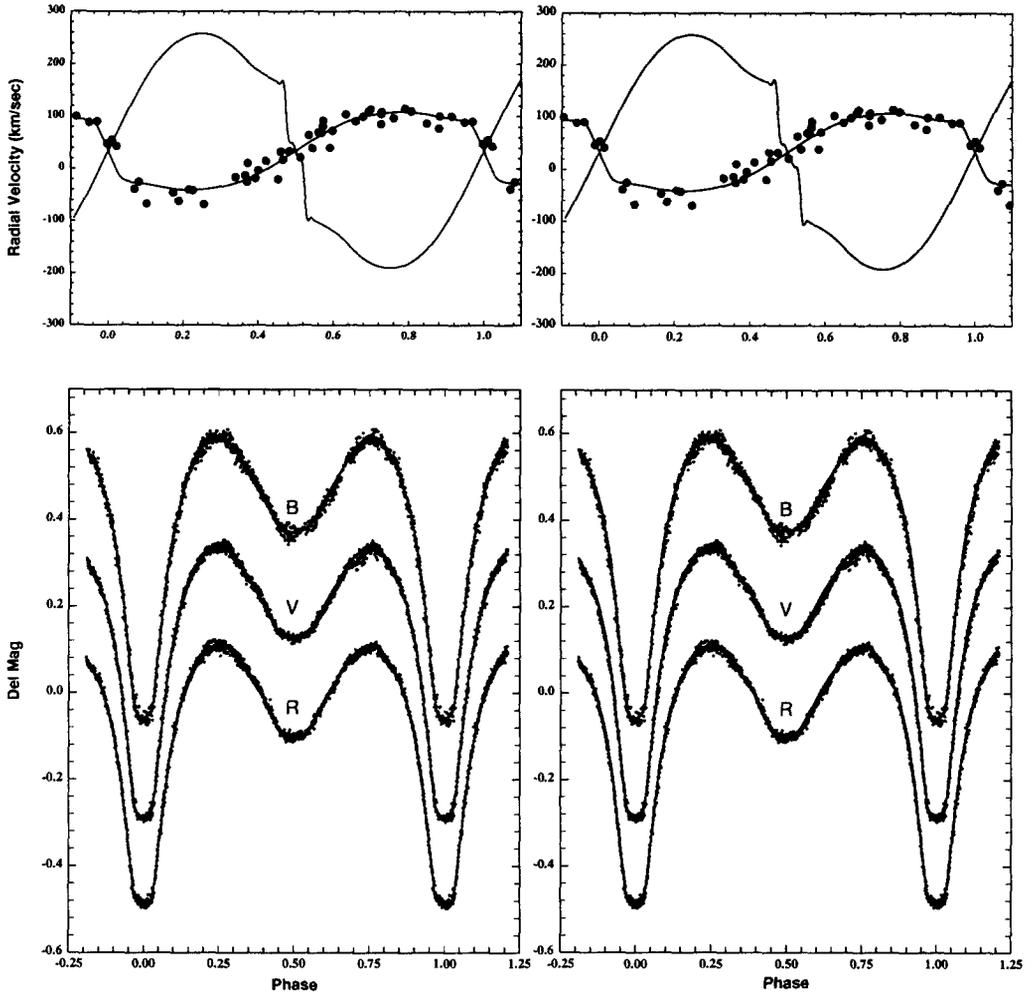


그림 4. DO Cas의 시선속도곡선, 광도곡선. 왼쪽은 접촉형쌍성계인 경우이고 오른쪽은 준분리형 쌍성인 경우이다.

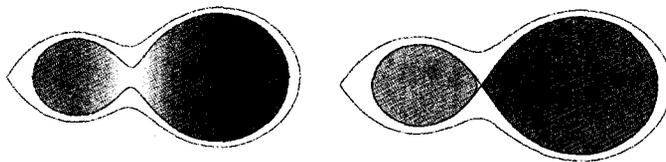


그림 5. DO Cas의 로슈 모형. 왼쪽은 접촉형쌍성계인 경우이고 오른쪽은 준분리형 쌍성인 경우이다.

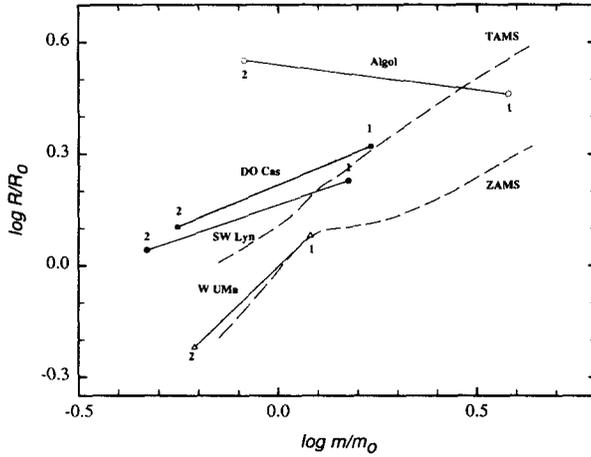


그림 6. 반경-질량도. 파선은 영년주계열과 중년주계열을 나타내며, 1과 2는 주성과 반성을 의미한다.

표 2는 이번 연구를 통해 구한 궤도요소 값들로 접촉형 쌍성계인 경우와 주성이 로쉬엽을 채우고 있는 준분리형 쌍성계인 경우를 각각 나타내었다. 그림 4에 우리가 얻은 두 경우의 궤도 요소들을 이용해 구한 이론적인 시선속도곡선과 광도곡선을 관측자료와 함께 나타내 보였으며, 그림 5에 각각의 형태에 따른 쌍성계의 로쉬 모형을 함께 나타내 보였다.

김호일 등 (1999)의 연구에서는 분광형을 가정하고, 이에 해당하는 절대량을 사용하였으나 이 연구에서는 시선속도곡선을 분석하여 절대량을 구할 수 있어서 보다 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 접촉형인 경우와 주성이 로쉬엽을 채우고 있는 준분리형인 경우, 그리고 반성이 로쉬엽을 채우고 있는 준분리형인 경우에 대하여 분석을 하였는데, 반성이 로쉬엽을 채우고 있는 경우를 제외한 나머지 두 모형에 대해서는 만족스러운 해를 얻을 수는 있으나 접촉형인 경우가 관측된 자료를 약간 더 잘 만족시키고 있음을 알 수 있었다. 하지만 이 경우에도 두 별이 공동대기를 가지고 있지 않은 것으로 보아 접촉에 매우 가까운 근접형 쌍성일 가능성을 배제할 수 없을 것으로 생각된다. 근접형 쌍성이라고 알려진 쌍성들에 대하여 이와 같은 연구를 계속함으로써 근접형 쌍성의 분류의 타당성을 조사할 필요가 있다고 생각된다.

그림 6의 반경 - 질량도는 Menzel et al. (1979)의 항성진화모형에서 $Y=0.20$, $Z=0.01$ 의 경우를 선택해 그린 그림으로 파선은 영년 주계열과 중년 주계열을 의미한다. 이 그림에 표시한 1과 2는 이 연구에서 구한 접촉 쌍성계인 경우의 절대량을 사용해 나타낸 값으로 각각 주성과 반성을 의미한다. 이 계의 반성은 이미 TAMS의 단계를 벗어났고, 주성은 TAMS의 단계에 있는 것으로 보인다.

3. 결 론

식쌍성의 물리적 특성을 연구하는데 있어 측광자료에 분광자료를 더하므로써 절대량의 산출을 포함한 여러 측면에서 보다 믿을만한 결과를 얻을 수 있었다. 이 연구에서도 측광자료만으로 구했던 궤도요소들에 비하여 분광관측자료를 같이 사용해서 구함으로써 보다 신빙성있는 결과를 구할 수 있었으며 나아가 별의 질량과 반경 등의 절대량을 얻을 수 있었다.

DO Cas의 스펙트럼을 보면 주성의 분광형이 A형에 속함을 알 수 있었으나 시선속도곡선과 광도곡선을 동시에 분석한 결과 주성의 질량이 $1.7M_{\odot}$ 정도여서 기존 연구자들의 주장처럼 A2-5 사이 보다는 조금 더 만기형일 가능성을 확인할 수 있었다. 또한, 이 계가 접촉형이거나 접촉에 매우 근접한 근접쌍성임을 알 수 있었다. 만일 이 별이 준분리형이라면 그림 4에서 보듯이 주성이 로쉬엽을 채우고 반성은 로쉬엽에 매우 근접한 형태를 취하고 있을 것이므로 주성에서 반성으로 질량이동이 있을 것으로 예측할 수 있으며 이는 이 계의 공전주기가 차츰 짧아지는 것을 의미한다. 따라서 이 별의 극심시각을 관측하여 공전주기 변화에 대해 연구함으로써 이 별의 정확한 로쉬모형을 검증할 수 있을 것으로 생각된다.

앞으로 이 계를 포함한 여러 근접쌍성계에 대한 계속적인 측광 관측과 더불어 분광관측자료가 얻어질 수 있다면 보다 정확하게 접촉쌍성계와 근접쌍성계에 대한 이해에 기여하리라 생각된다. 이 연구에서 사용한 분광자료는 보현산천문대의 망원경보다 작은 망원경을 이용해 사진 건판에 찍은 것을 PDS로 측정된 것으로 보현산천문대의 망원경과 CCD 카메라를 이용해 얻을 경우 보다 정확한 자료를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글 : 이 연구의 수행과정에서 분광관측자료처리방법에 대해 많은 도움을 주신 성언창박사에게 감사드립니다.

참고문헌

- 김호일, 이우백, 성언창, 경재만, 윤재혁 1999, 한국우주과학회지, 16, 209
- Cester, B., Giurichin, G., Mardirossian, F., & Pucillo, M. 1977, *A&AS*, 30, 223
- Fehrenbach, Gh., Duflot, M., Boulon, J., Rebeiro, E., & Lanoe, C. 1966, *Publ. Obs. de Haute Provence*, 8, 289
- Giannone, P., & Giannuzzi, M. A. 1974, *Ap&SS*, 26, 289
- Hill, G. 1991, *Private communication*
- Hill, G., Hildritch, R. H., Younger, F., & Fisher, W. A. 1975, *MNRAS*, 79, 131
- Kaluzny, J. 1985, *Acta Astron*, 35, 327
- Karimie, M. T., & Duerbeck, H. W. 1985, *AP&SS*, 117, 375
- Koch, R. H. 1973, *AJ*, 78, 410
- Liu, Q.-C., Zhang, Y.-I., & Zhang, Z.-S. 1988, *Acta Astron. Sinica*, 29, 1
- Mannino, G. 1958, *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 29, 433
- Menzel, J. G., Sweigart, A. V., Demarque, P., & Gross, P. G. 1979, *ApJS*, 40, 733
- Oh, K. D., & Ahn, Y. S. 1992, *Ap&SS*, 187, 261
- Rovithis-Livaniou, H., & Rovithis, P. 1986, *Ap&SS*, 119, 381
- Shaw, J. S. 1990, in *Active Close Binaries*, ed. C. Ibanoglu (Dordrecht: Kluwer), 241
- Winkler, L. 1966, *AJ*, 71, 40