

Epsilon Aurigae의 1982~85년 광전 관측*

김 영 수

연세대학교 천문기상학과

(1989년 10월 1일 받음; 1989년 11월 29일 수리)

PHOTOELECTRIC OBSERVATIONS OF EPSILON AURIGAE FROM 1982 TO 1985*

Young-Soo Kim

Dept. of Astronomy & Meteorology, Yonsei University, Seoul 120-749

(Received October 1, 1989; Accepted November 29, 1989)

Abstract

The *UBV* observations of Epsilon Aurigae from April 1982 to May 1985 had been made at Yonsei University Observatory. The light curves drawn from the observational data are combined with other light curves which are well fitted. In these light curves, secondary light variations, flare activity, mid-eclipse light brightening, and others are checked precisely. Contact times and time of mid-eclipse are determined and compared with the values which were presented on the other papers. Compared with previous eclipses, it is noted that the duration of totality is gradually contracted and the duration of total eclipse is gradually enlarged. Though these phenomena are applied to the disk model which has been more accepted than any other models, those are not explained explicitly. So, a new model, comet model, is suggested and is found to make a neat description to the phenomena revealed on the light curves.

요 약

연세대학교 천문대의 60cm와 40cm 반사망원경을 이용하여 1982년 4월부터 1985년 5

* Yonsei University Observatory Contribution No. 79.

월까지 Epsilon Aurigae를 *UBV* 광전측광하여 총 1065 관측점을 얻었다. 우리의 광도곡선에 다른 천문대들의 관측자료를 합하여 제1극심의 광도곡선을 완성하였다. 이 광도곡선에서 2차적인 광도변화, 폭발현상, 식중심의 밝아짐 등에 관하여 자세히 조사하고, 제1극심의 각 접촉시각들과 중심식 시각을 결정하여 다른 연구자들이 정한 값들과 비교하였다. 과거의 식들에서 구한 값들과 비교한 결과, 식이 일어나는 진체기간은 계속 감소하는 반면 완전식의 기간은 계속 증가하였다. 현재 가장 널리 통용되는 디스크 모델에 위의 여러 현상들을 적용하여 보았으나 명확히 설명되지 않았다. 그래서 새로운 모델인 혜성 모델을 만들어 광도곡선에 나타난 현상들을 해석하여 보았다.

1. 서 론

주기가 가장 긴(27.1년) 식변광성으로 알려진 Epsilon Aurigae는 FOIap형의 별이 아직 명확히 규명되지 않은 천체에 의해 가려지는, 매우 특이한 구조로 이루어져 있다. 1921년에 Fritsch(Struve and Elvey 1930)에 의해 처음으로 변광성임이 밝혀진 후, Schmidt(Huffer 1932)의 42년간의 관측을 비롯하여 Struve and Elvey(1930)의 분광관측, Struve, Pillans, and Zeberg(Wood 1985)의 분광사진관측, Gyldenkerne(1970)의 광전관측, van de Kamp(1978)의 astrometric 분석 등 여러 가지의 관측과 해석이 끊임없이 이루어져 왔었다. 그리고, 식을 일으키는 천체에 대한 모델들은 거대한 적외선 별(Kuiper, Struve, and Stromgren 1937)이론으로부터, 편평한 원반(Kopal 1954), 복잡한 가스구름(Struve 1956), 심지어는 블랙홀(Wilson 1971)이론까지 등장하여, Struve(Sabade and Wood 1978)의 말대로 "Epsilon Aurigae의 연구 역사는 20세기 초부터의 천체 물리학의 역사"라고 가히 말할 수 있다.

최근에 있었던 1982-84년의 식현상을 관측하기 위해서 NASA와 IAPPP(International Amateur Professional Photoelectric Photometry)가 구성한 국제적인 캠페인에 많은 관측자들이 참여하여, 여러 가지의 관측방법을 동원하였다. Nha *et al.*(1985, 1986), Schmidtke(1985), Flin, Winiarski, and Zola(1985), Hopkins(1985) 등은 광전관측을 하고 광도곡선을 분석하였다. Chapman, Kondo, and Stencel(1983)과 Parthasarathy and Lambert(1983), Boehm, Ferluga, and Hack(1984), Ake(1985), Altner *et al.*(1986) 등은 IUE관측을 하였고, Backman *et al.*(1984), Hinkle and Simon(1987) 등은 적외선관측을 하였으며, Xuefu, Songuan, and Guanwei(1984), Ferluga and Hack(1985), Lambert and Sawyer(1986), Barsony, Lutz, and Mould(1986), Tompson *et al.*(1987) 등은 분광관측을 하였고, Kemp *et al.*(1985, 1986)은 편광관측을 하였다. 식현상이 끝난 후인 1985년 1월에 Arizona의 Tucson에서 이 별에 대한 workshop이 개최되었었다. 연세대학교 천문대는 장주기 변광성 관측계획(Nha *et al.* 1986)의 일환으로 1982년부터 계속하여 이 별을 관측하고 있으며, 1982~84년의 식 현상을 관측하기 위하여 결성된 국제적인 캠페인에 적극 참여하였다. 이 논문은 1982년 4월부터 1985년 5월까지

PHOTOELECTRIC OBSERVATIONS OF EPS AUR

지의 관측 자료를 분석하고 연구한 결과에 대해서 발표하고자 한다.

II. 관측과 광도 곡선

연세대학교 천문대는 일산관측소의 60cm 반사망원경과 교내관측소의 40cm 반사망원경으로 Epsilon Aurigae의 *UBV* 광전측광을 하였는데, 1982년 4월부터 1985년 5월까지 총 1065점 (*U*: 301점, *B*: 328점, *N*: 328점)의 관측점을 얻었다. 제1비교성은 Lamda Aurigae인데, Epsilon Aurigae의 *UBV* 등급을 계산하는 데 이용한 Lamda Aurigae의 *UBV* 등급은 각각 5.^m48, 5.^m38, 4.^m71이었다(Johnson and Morgan 1953, Shao 1964). 그리고 관측오차는 *UBV* 각각 $\pm 0.^m02$, $\pm 0.^m01$, $\pm 0.^m01$ 이었다.

연세대학교 천문대에서 관측한 *V*와 *B-V*, *U-B* 광도곡선은 그림 1과 같으며, 가로축은 Julian day이고 세로축은 Epsilon Aurigae의 *V*, *B-V*, *U-B* 등급이다. 이 광도곡선을 외국의 15 천문대에서 관측하여 만든 광도곡선과 비교하여 보니, 9군데 천문대의 광도곡선과는 잘 일치하였고, 4천문대의 광도곡선은 광도가 변화하는 모양은 같았으나 등급의 차이가 있었으며, 두 천문대의 광도곡선은 전혀 맞지 않았다. 우리의 광도곡선과 잘 맞는 다른 천문대의 관측자료 중에서, 연세대 천문대가 관측하지 못했을 때에 관측한 *V*관측점들을 연세대 천문대의 광도곡선에 덧붙여서 그림 1에 '○'표로 나타냈다. 덧붙인 관측점들은 Epsilon Aurigae Campaign Newsletter No.9(1983)와 No.13(1985), Hopkins(1985), 그리고 Flin, Winiarski, and Zola(1985)에서 취한 값들이다.

그림 1의 광도곡선은 다음과 같은 몇 가지의 광도변화를 보인다. (1)제2접촉 후에 밝아졌는데 JD 2445354 부근에서 최대가 되었다. 최대 밝기는 제2접촉 후의 평균 등급보다 *UBV*가 각각 0.^m12, 0.^m09, 0.^m05 더 밝았다. (2)제2접촉 후인 1983년 1월 21일(JD 2445356)에 폭발현상이 관측되었다. 이 폭발현상은 *V*에서 0.2등급, *B*에서 0.4등급의 변화를 보였는데, 약 20분간 일어났다(Nha and Lee 1983). (3)식의 중심 부분에서 0.25등급 정도 밝아졌는데, 이 부분은 스웨덴의 TAO(Tjornisland Astronomical Observatory)에서만 관측되었었다. (4)제3접촉 전에 밝아졌는데, JD 2445709에 최대 밝기가 나타났다. 밝아진 등급차는 *UBV*에서 각각 0.^m03, 0.^m18, 0.^m11이었다. 제3접촉 바로 전인 JD 2445737에는 *U*등급만 0.11등급 밝아졌다. (5)제4접촉 후에는 약 60일 주기로 광도변화가 일어나는데, 밝기의 변화 폭은 제4접촉에서 멀어질수록 커졌었다. (6)식이 시작하는 부분의 광도곡선의 기울기가 완만하며 약간의 굴곡을 보인 반면, 식이 끝나는 부분의 광도곡선은 기울기가 급하며 거의 직선을 이룬다. (7)제2접촉 후의 평균광도와 제3접촉 전의 평균광도에 약간의 차이가 있었다. *V*등급은 제2접촉 후의 밝기보다 제3접촉 전의 밝기가 0.^m01 더 밝은 반면에, *B*등급은 0.^m01 더 어두워졌고, *U*등급은 0.^m01 더 어두워졌다. 이러한 현상은 자외선 영역에서는 더욱 뚜렷이 보인다(Ake 1985). 그리고

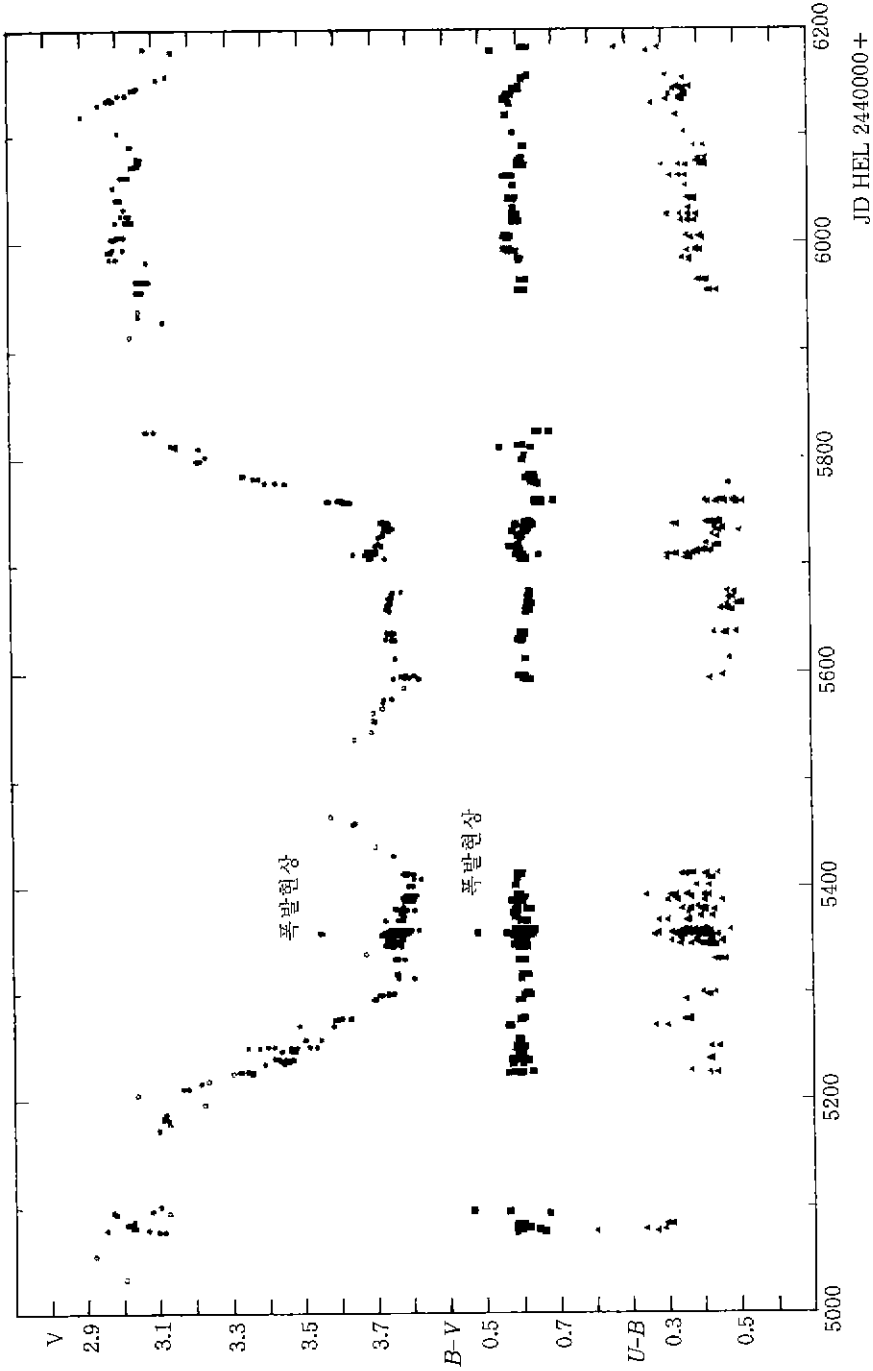


그림 1. 지금까지 수집된 관측자료로 만든 ϵ Aur의 광도곡선. V관측점의 표(●)과 (○)는 각각 연세대학교 천문대의 관측과 문헌에서 얻은 관측이다. B-V와 U-B의 관측점은 연세대학교 천문대의 관측점으로서, 각각 표(■)과 (▲)으로 표시했다.

PHOTOELECTRIC OBSERVATIONS OF EPS AUR

Kemp *et al.*(1985, 1986)의 편광관측 결과에서도 같은 현상이 나타났었다. (8)Xuefu, Songuan, and Guanwei(1985)는 20분에서 2시간의 주기로 0.2등급의 변화가 있다고 하였으나, 우리의 관측자료는 이러한 현상을 보이지 않았다.

식중심을 기준으로, 제2접촉 후의 평균등급과 제3접촉 전의 평균등급을 따로 계산하고, 식 바깥부분도 식 이전과 식 이후 부분의 평균등급을 별도로 계산하여, 이 값으로부터 각 접촉 시각들을 결정하였다. 이로부터 구한 평균 식 깊이는 *UBV* 각각 0.84, 0.74, 0.73 등급이었고 접촉시각들은 *UBV* 세 광도곡선이 모두 같은 값을 보였다. 각 접촉 시각들을 다른 연구자들이 구한 값과 함께 표 I에 나타냈는데, 우리의 값들은 Ohki and Sakai(Saito *et al.* 1987)의 값과는 비슷한 반면, Schmidtke(1985)와 Parthasarathy and Frueh(1986)의 값과는 많은 차이를 보인다. 이러한 차이는 접촉시각들을 구하는 방법이 다르기 때문에 발생하는 것으로 해석할 수도 있겠지만, 제4접촉의 경우 Schmidtke(1985)의 값은 아직 식이 벗어나지 않은 부분이고, Parthasarathy and Frueh(1986)의 값은 식을 훨씬 벗어난 곳임을 우리의 광도곡선을 보면 명확히 드러난다.

각 접촉시각들 간의 경과시간을 계산하여서, 이전의 식들과, 다른 연구자들의 값과 비교하여 표 II에 수록하였다. 1982~84년의 식에 대해서 각 연구결과가 일치하지는 않지만, 이전

표 I. 각 접촉시각들. 숫자는 Julian day(JD 24+)로 표시한 것이다.

연구자	제1접촉	제2접촉	제3접촉	제4접촉
Gyldenkerne(1970)의 예측	45180	45315	45709	45850
Schmidtke(1985)	45165	45302	45748	45812
Parthasarathy and Frueh(1986)	45165	45300	45740	45890
Ohki and Sakai(Saito <i>et al.</i> 1987)	—	45310	45736	—
김영수	45191	45309	45732	45838

표 II. 식의 경과시간들. 숫자는 날수를 나타낸다.

연구자	Ingress	Totality (d)	Egress	Duration (D)
1928-30년의 식				
Huffer(1932)	197	360	197	754
Gussow(Gyldenkerne 1970)	182	330	203	714
1955-57년의 식				
Gyldenkerne(1970)	135	394	141	670
1982-84년의 식				
Schmidtke(1985)	137	446	64	647
Parthasarathy and Frueh(1986)	135	440	150	725
Ohki and Sakai(Saito <i>et al.</i> 1987)	—	426	—	—
김영수	118	423	106	647

KIM

표 III. 제1극심의 극심시각과 공전주기. 극심시각은 Julian day이고 주기는 날수로 표시했다.

연구자	극심시각	주기	비고
이전의 식들			
Huffer(1932)	2405960		주기는 3번의 식으로부터 평균하여 구하였다.
	2415840		
	2425739	9888	
Gussow(Gyldenkerne 1970)	2425739	9888	
Gyldenderne(1970)	2435624	9885	
1982-84년의 식			
Schmidtke(1985)	2445489	9865	
Flin, Winiarski, and Zola(1985)	2445510±5	9886	트레이싱지 방법
	2445512.2±1	9888	Gaussian 방법
	2445511.0	9887	Gyldenkerne 방법
Ohki and Sakai(Saito <i>et al.</i> 1987)	2445523	9899	
김영수	2445510	9886	

의 식들과 비교하여 보면, 일정한 경향이 있음을 알 수 있다. 즉, 식을 거듭하면서 완전식의 기간은 계속 증가하는 반면 식의 전체 기간은 계속 감소함을 보인다. 그리고 제1점측 시각과 제4점측 시각의 중간값을 극심 시각으로 정하고 주기를 구하였다. 주기를 계산할 때 사용한 1955-57년 식의 극심시각은 Gyldenderne(1970)의 값을 기준하였다. 다른 연구자들이 구했던 극심시각과 주기를 표 III에 같이 수록하였는데, 주기는 Schmidtke(1985)와 Ohki and Sakai(Saito *et al.* 1987)의 값 외에는 모두 비슷하여 주기의 변화는 나타나지 않고 있다.

III. 모델과 결론

현재 가장 널리 인정되는 반성의 모델은, 디스크가 주성을 가려서 식이 생기는 디스크 모델이다. 위의 광전관측 결과를 디스크 모델에 적용시켜 보면 다음과 같은 여러 문제점이 드러난다. 식이 진행되는 동안의 광도를 보면, 제2점측 이후의 등급과 제3점측 이전의 등급에 차이가 있는데, 이것은 디스크의 전반부와 후반부의 구성 입자가 다르기 때문으로 해석되어야 할 것이다. 그리고 식 부분과 식의 바깥부분의 2차적인 광도곡선의 모양이 같지 않은 것은 디스크가 균일하지 않음을 의미한다. 식을 거듭하면서 식 전체의 경과시간이 짧아지고 완전식의 기간이 길어진 현상을 나타낸 것은, 디스크가 수축하거나 또는 질량을 잃어서 작아졌다고 볼 수 있다. 그렇지만 이 디스크가 수축하려면 로시한계 밖에 있어야 하는데, 즉 밀도가 $1.6 \times 10^{-9} \text{g/cm}^3$ 보다 커야만 하는데, Tucson에서 열렸던 workshop의 결과는 디스크의 밀도가 이보다 훨씬 작음을 나타낸다. 그러므로 디스크가 수축하였다고 보다는 질량을 잃어서 작아졌

PHOTOELECTRIC OBSERVATIONS OF EPS AUR

다고 해석해야 할 것이다. 제1극심 부분에서 밝아지는 현상을 해석하는 이론은 몇 가지가 있다. 디스크의 중심에 밝은 별이 있어서 식중심 부분에서 밝아진다는 이론(Parthasarathy and Lambert 1983)이 있는데, 이 이론의 문제점은 디스크의 중심에 있는 밝은 별이 식의 중심부 부분에서만 보일 수는 없다는 것이다. 디스크가 도우넛 모양으로 되어 있어서, 비어 있는 가운데로 주성의 빛이 통과하여 보임으로써 식중심 부분이 밝아진다는 이론(Kemp *et al.* 1985)은, 디스크의 생성원인에 문제점이 생긴다. 그리고, Hopkins(1985)와 Schmidtke(1985)는 디스크에 의한 중력회절에 의해서 식중심이 밝아졌다고 하였지만, Schmidtke 자신도 인정하듯이, 디스크의 질량이 중력회절을 일으킬 만큼 크지 못하다.

이와 같이 디스크 모델을 광전관측 결과에 적용하였으나, 각 현상들을 명료하게 설명하지 못하였다. 그래서 새로운 모델인 혜성모델을 제안하여 보았다. Epsilon Aurigae의 식깊이는 V 파장 영역에서 0.73등급이므로, 식을 일으키는 물체가 주성의 빛을 1/2 정도 가려야 하는데, 혜성은 이 정도의 식을 충분히 일으킬 수 있다고 본다. 태양의 주위를 도는 혜성의 경우, 혜성이 태양으로부터 IAU 떨어져 있을 경우에는, 일반적으로 코마(coma)의 크기가 태양의 크기와 거의 같고, 꼬리의 길이는 태양 직경의 7배 정도가 된다. 또한 혜성 모델은 디스크 모델이 해결하지 못하는 문제들을 설명할 수 있다. 혜성이 계속해서 질량을 잃어가게 되면 그 크기가 작아져서 식 전체의 경과시간은 짧아지고 식 전체기간은 길어진다. 또한 혜성이 식의 중간에 이르면 가스꼬리가 시선방향과 일치하게 되어 주성을 덜 가리게 되고, 따라서 식중심 부분에서는 약간 밝아지게 된다. 제2접촉 이후와 제3접촉 이전의 등급 차이는 혜성의 가스꼬리와 먼지꼬리에 의한 빛의 흡수량의 차이 때문으로 해석될 수 있다. 그리고 코마는 가끔 폭발현상을 일으킨다(Plaut and Houk 1974). 이처럼 광도곡선에 나타난 식현상은, 식을 일으키는 물체가 혜성이라고 가정하면 간단히 해석된다.

앞으로 혜성모델에 분광관측 결과 등, 다른 여러 관측결과를 적용하고, 물리적, 역학적인 값들을 계산하여 이 모델의 타당성을 재검토해야 할 것이다. 이를 위해서는 주성에 관하여 정확하게 알아야 하나, 아직 주성의 특성도 제대로 규명되지 못하고 있다. 주성의 성질을 알기 위해서는 식 이외의 부분을 계속해서 관측하여야 할 것이다. 그리고 앞으로 올 2009~11년의 식 기간에는 광전관측과 분광관측뿐만 아니라, 전파관측과 X선 관측도 같이 하여 분자선들의 변화와 높은 에너지의 변화를 같이 측정하면 Epsilon Aurigae를 분석하는 데 더욱 좋을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구가 완성이 되기까지 지도하여 주신 나일성 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 관측을 하는 동안 많은 도움을 주시고 자료를 정리하는 데 많은 배려를 하여 주신 이용삼 박사님과

KIM

정장해 박사님, 그리고 연구를 진행하는 동안 조언과 협조를 아끼지 않은 김호일 박사님 이하 연세대학교 관측자 여러분께 감사드립니다.

이 연구는 연세대학교 대학원 석사학위 논문의 일부임.

참고문헌

- Ake, T.B. 1985, *Workshop on the Recent Eclipse of Epsilon Aurigae*(Tucson, Arizona).
- Altner, B., Chapman, R.D., Kondo, Y., and Stencel, R.E. 1986, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **65**, 199.
- Backman, D.E., Becklin, E.E., Cruikshank, D.P., Joyce, R.R., Simon, T., and Tokunaga, A. 1984, *Astrophys. J.*, **284**, 799.
- Barsony, M., Lutz, B.L., and Mould, I.R. 1986, *Publ. A. S. P.*, **98**, 637.
- Boehm, C., Ferluga, S., and Hack, M. 1984, *Astron. Astrophys.*, **130**, 419.
- Chapman, R.D., Kondo, Y., and Stencel, R.E. 1983, *Astrophys. J.*, **269**, L17.
- Ferluga, S. and Hack, M. 1985, *Workshop on the Recent Eclipse of Epsilon Aurigae*(Tucson, Arizona).
- Flin, P., Winiarski, M., and Zola, S. 1985, *Inf. Bull. Var. Stars*, No.2678.
- Gyldenkerne, K. 1970, *Vistas in Astronomy*(Oxford: Pergamon Press), **12**, 199.
- Hinkle, K.H. and Simon, T. 1987, *Astrophys. J.*, **315**, 296.
- Hopkins, K.L. 1985, *Workshop on the Recent Eclipse of Epsilon Aurigae*(Tucson, Arizona).
- Huffer, C.M. 1932, *Astrophys. J.*, **76**, 1.
- Johnson, H.L. and Morgan, W.W. 1953, *Astrophys. J.*, **117**, 313.
- Kemp, J.C., Henson, G.D., Kraus, D.J., and Beardsley, I.S. 1985, *Workshop on the Recent Eclipse of Epsilon Aurigae*(Tucson, Arizona).
- Kemp, J.C., Henson, G.D., Kraus, D.J., Beardsley, I.S., Carroll, L.C., Ake, T.B., Simon, T., and Collins, G.W. 1986, *Astrophys. J.*, **300**, L11.
- Kopal, Z. 1954, *Observatory*, **74**, 14.
- Kuiper, G.P., Struve, O., and Strömngren, B. 1937, *Astrophys. J.*, **86**, 570.
- Lambert, D.L. and Sawyer, S.R. 1986, *Publ. A. S. P.*, **98**, 389.
- Nha, I.-S. and Lee, S.J. 1983, *Inf. Bull. Var. Stars*, No.2405.
- Nha, I.-S., Lee, Y.-S., Chun, Y.-W., Kim, H.-I., and Kim, Y.-S. 1985, *Workshop on the Recent Eclipse of Epsilon Aurigae*(Tucson, Arizona).
- Nha, I.-S., Lee, Y.-S., Chun, Y.-W., Kim, H.-I., and Kim, Y.-S. 1986, *J. Astron. Space Sci.*, **3**, 1.

PHOTOELECTRIC OBSERVATIONS OF EPS AUR

- Parthasarathy, M. and Frueh, M.L. 1986, *Astrophys. Space Sci.*, **123**, 31.
- Parthasarathy, M. and Lambert, D.L. 1983, *Publ. A. S. P.*, **95**, 1012.
- Plaut, L. and Houk, N. 1974, *Outline of Astronomy*(Leyden: Noordhoff International Publishing), p.93.
- Sahade, J. and Wood, F.B. 1978, *Interacting Binary Stars*(Oxford: Pergamon Press), p.152.
- Saito, M., Kawabata, S., Saijo, K., and Sato, H. 1987, *Publ. A. S. J.*, **39**, 135.
- Schmidtke, P.C. 1985, *Epsilon Aurigae Campaign Newsletter*, No. **13**, 17.
- Shao, C.Y. 1964, *Astron. J.*, **83**, 975.
- Struve, O. 1956, *Publ. A. S. P.*, **68**, 27.
- Struve, O. and Elvey C.T. 1930, *Astrophys. J.*, **71**, 136.
- Thompson, D.T., Lutz, B.L., Lockwood, G. W., and Sowell, J.R. 1987, *Astrophys. J.*, **321**, 450.
- van de Kamp, P. 1978, *Astron. J.*, **83**, 975.
- Wilson, R.E. 1971, *Astrophys. J.*, **170**, 529.
- Wood, F.B. 1985, *Workshop on the Recent Eclipse of Epsilon Aurigae*(Tucson, Arizona).
- Xuefu, L., Songuan, P., and Guanwei, C. 1984, *Publ. of the Beijing Astronomical Observatory*, **6**, 125.