

왜신성에 대한 Accretion Disk의 수직구조*

崔圭弘, 金卿美

연세대 천문기상학과

(1985년 5월 20일 받음)

The Vertical Structure of Accretion Disks for Dwarf Novae*

Kyu Hong Choi and Kyung Mee Kim

Department of Astronomy & Meteorology, Yonsei University

(Received May 20, 1985)

요 약

Accretion rate 가 $\dot{M}=10^{16}$ g/sec와 $\dot{M}=10^{18}$ g/sec 인 경우의 정상상태의 Accretion disk의 모델들을 만들었다. 중심에 있는 별은 백색왜성으로 가정하고 질량은 $1M_{\odot}$ 이고 반경은 10^9 cm로 보았다.

이 모델을 왜신성인 Z Cha와 Z Cam에 응용하였다.

ABSTRACT

We have constructed models of steady state accretion disk with accretion rate $\dot{M} = 10^{16}$ g/sec or 10^{18} g/sec. The mass and the radius of white dwarf were taken as $1 M_{\odot}$ and 10^9 cm, respectively. The possible application of the results to Z Cha and Z Cam are discussed.

1. Introduction

왜신성에서 Accretion disk가 존재한다는 것은 Joy(1956), Crawford와 Kraft(1956),

* Yonsei University Observatory Contribution No. 32.

그리고 Robinson(1976) 등 수많은 학자들에 의하여 주장되어 왔다. Accretion disk가 왜 신성 뿐만 아니라 여러 천체현상에 적용되고 있음에도 불구하고 이론적으로 정립되지 못하는 이유는 Disk의 형태를 유지시키는 점성을 확실하게 설명할 수 없었기 때문이다. 이 점성은 우리가 이미 알고 있는 난류점성, 복사점성, 분자점성 ($\sim 1\text{cm}^2/\text{sec}$)보다 무척 큰 $\sim 10^{15}\text{cm}^2/\text{sec}$ 정도이기 때문이다 (Mantle과 Bath 1983).

Shakura와 Sunyaev(1973)은 각 운동량의 효율을 나타내는 변수 α 를 써서 점성이 대류층과 복사층에서 압력에 비례하는 α -disk model을 도입하여 Black hole을 가진 연성계에 적용하였다.

그러나, 같은 압력조건에서 낮은 온도의 복사층과 Non-laminar 층을 가진 대류층이 동일한 점성을 갖는다는 것은 α -disk model이 잘못되었다고 생각해서 Smak(1982a)은 복사층은 $\alpha = 0$, 대류층은 $\alpha = 0.1$ 로 가정한 Disk model을 만들었다. 이러한 model은 모든 거리에 Accretion disk의 중심부분까지 언제나 대류층만 갖게 되는 단점이 있다.

이 논문에서는 대류층은 복사층보다 큰 α 값을 가지는 Accretion disk model을 만들었다. 그리고, accretion rate $\dot{M} = 10^{16}\text{g}/\text{sec}$ 와 $\dot{M} = 10^{18}\text{g}/\text{sec}$ 에 대한 Accretion disk의 수직구조를 구하여 실제의 왜신성에 적용하여 보려고 한다.

2. Equation of disk structure

정상상태의 Accretion disk의 수직구조를 계산하기 위해서 다음과 같은 방정식을 사용하였다.

동경방향은 원심력과 동경방향의 중력이 평형을 이루지만, 수직방향은 수직방향의 중력성분과 가스압력에 의한 힘과 평형을 이루는 정역학적인 평형이므로 (그림 1 참조),

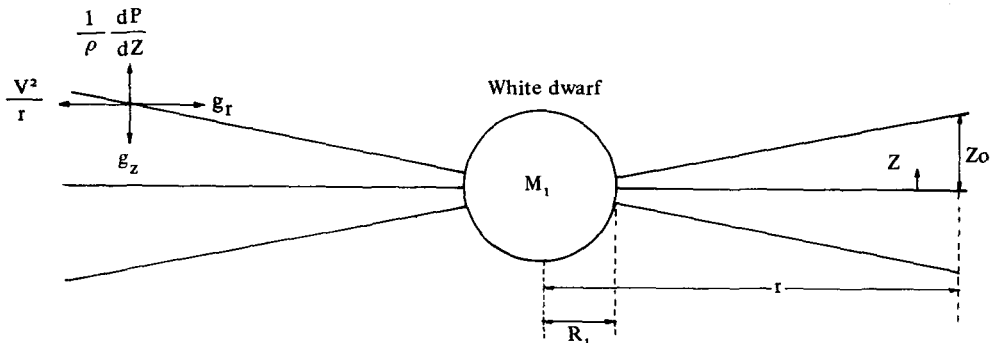


Fig. 1. Model of accretion disk.

$$\frac{dP}{dZ} = -\rho \frac{G M_1}{r^3} Z \dots\dots\dots (1)$$

이고, 여기서 P 는 압력, ρ 는 밀도, G 는 중력상수, M_1 은 백색왜성의 질량, Z 는 수직방향의 높이, r 는 백색왜성의 중심으로 부터의 거리이다.

질량보존이 성립되어야 하므로

$$\frac{dM_z}{dZ} = \rho \dots\dots\dots (2)$$

이고, 여기서 M_z 는 면적밀도 (g/cm^2)이다.

에너지보존법칙에서(Shakura와 Sunyaev 1973)

$$\frac{dF}{dZ} = \frac{3}{2} \Omega \alpha P \dots\dots\dots (3)$$

라고 가정하였다. 여기서 F 는 Energy flux($erg/cm^2 sec$), Ω 는 Kepler의 각속도($=\sqrt{\frac{GM}{r^3}}$)이고, α 는 Shakura와 Sunyaev의 viscosity parameter이다. 대류전달에서는 $\alpha=0.1$ 로, 복사전달에서는 $\alpha=0.01$ 으로 가정하였다.

열전달은 복사전달 혹은 대류전달이므로

$$\frac{dT}{dZ} = -\frac{3}{4} \frac{\kappa \rho}{ac} \frac{1}{T^3} F \quad \text{if } \frac{d \log T}{d \log P} < \nabla_{ad} \dots\dots\dots (4)$$

혹은

$$\frac{dT}{dZ} = \frac{T}{P} \frac{dP}{dZ} \nabla \quad \text{if } \frac{d \log T}{d \log P} > \nabla_{ad} \dots\dots\dots (4)'$$

여기서 T 는 온도이고, κ 는 opacity(cm^2/g), a 는 복사밀도 계수 ($7.565 \times 10^{-15} erg/cm^3 \text{ } ^\circ K^4$), c 는 광속도이다. ∇_{ad} 는 단열 Temperature gradient 이고, ∇ 는 실제 Temperature gradient이다.

대류전달일 때의 실제 Temperature gradient는 Mixing length theory에 의하여 다음과 같이 주어진다(Cox와 Giluli, 1968).

$$\nabla = (1 - \zeta) \nabla_r + \zeta \nabla_{ad} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 ∇_r 는 가상적인 Radiative temperature gradient이고, ζ 는 대류효율의 함수인데, $\zeta \ll 1$ 이면 대류의 효율이 거의 없는 경우이며, $\zeta \simeq 1$ 이면 대류의 효율이 최대값을 갖게 된다. Opacity는 Cox와 Stewart(1970)를 사용하였고, 상태방정식은 수소와 헬륨의 이온화되

는 Saha 방정식에 의한 식을 이용하였고, 화학성분은 $X=0.75$, $Z=0.001$ 인 종족 II 으로 가정하였다.

Accretion disk의 표면에서의 경계치 조건은

$$F = \frac{ac}{4} T_e^4 \dots\dots\dots (6)$$

$$\kappa P = \frac{2}{3} \frac{GM_1}{r^3} Z_0 \dots\dots\dots (7)$$

을 만족하여야 한다. 여기서 T_e 는 유효온도이고, Z_0 는 Accretion disk의 두께의 반의 값이다.

Accretion disk의 중심부에서는

$$M_z = 0 \dots\dots\dots (8)$$

$$F = 0 \dots\dots\dots (9)$$

을 만족하여야 한다.

3. Construction of models

중심에 있는 별은 $M_1 = 1 M_\odot$, $R_1 = 10^9 \text{ cm}$ 인 백색왜성이라고 가정하였다. 왜신성이 무활동(Quiescence) 중일 때는 질량유입이 $\dot{M} = 10^{16} \text{ g/sec}$ 이고, 왜신성이 폭발(outburst) 중일 때는 $\dot{M} = 10^{18} \text{ g/sec}$ 인 두 경우에 대하여 steady state accretion disk의 모델을 계산하였다.

Accretion이 일어날 때 accretion disk의 표면온도는 거리에 따라 다음과 같은 방정식으로 표시된다(Bath *et al.* 1974).

즉

$$T(r)^4 = \frac{3}{8\pi\sigma} \dot{M} \frac{GM_1}{r^3} \left[1 - \left(\frac{R_1}{r}\right)^{1/2} \right] \dots\dots\dots (10)$$

여기서 σ 는 Stefan Boltzman 상수 ($5.67 \times 10^{-5} \text{ erg/cm}^2 \text{K}^4 \text{ sec}$)이다.

백색왜성으로부터 임의의 거리에 대한 표면온도는 위식으로부터 계산된다. Accretion disk의 두께 Z_0 와 표면밀도 M_z 의 값들을 임의로 가정한 초기치를 가지고 식 (4)까지를 4th or-

der Runge-Kutta method로 수치적분하여 경계조건 식 (8)과 (9)가 만족하지 않으면 다시 Z_0 와 M_z 의 값들을 수정하여 다시 계산한다. 마지막 경계조건 식(8)과 (9)가 만족할 때까지 수치적분을 계속하는 방법을 사용하였다.

식 (10)을 거리에 관하여 미분하면 $r = \frac{49}{36} R_1$ 이 되는 지점에서 Accretion disk의 표면온도가 최대온도로 나타나며, 이러한 최대온도가 나타나는 Accretion disk 상의 지점에서의 수직구조도 아울러 계산하였다.

4. Numerical results

$1 M_\odot$ 의 질량과 10^9 cm의 반경을 갖는 백색왜성의 주위에 Accretion disk가 형성되었다고 가정할 때 식 (1)~(4)을 수치적으로 계산하여 다음의 결과를 얻었다.

그림 2는 Accretion rate가 $\dot{M} = 10^{16}$ g/sec 일 경우의 면적밀도와 Accretion disk의 두께를 거리의 함수로 나타낸 것이다. 물결모양은 대류층을 나타내고 있고, 사선은 복사층을 나타내고 있는데 거리가 멀수록 Accretion disk의 두께는 조금씩 줄어드는 반면에 면적밀도는 기하급수적으로 크게 증가하는 것을 보여주고 있다.

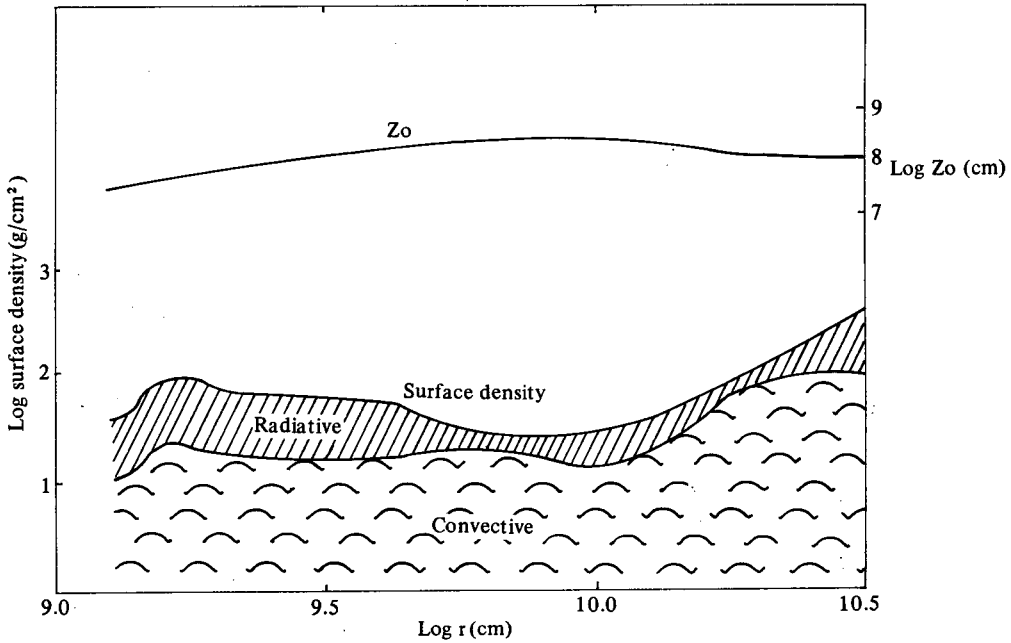


Fig. 2. Surface density and semithickness of disk Z_0 are given as a function of distance r from white dwarf for a steady state accretion disk with accretion rate $\dot{M} = 10^{16}$ g/sec.

그림 3은 Accretion rate가 $\dot{M}=10^{18}$ g/sec인 경우인데 Accretion disk의 두께는 거리가 멀수록 더욱더 커지며, 상대적으로 면적밀도는 작게 나타나고 있어, 그림 2와는 반대현상을 보여주고 있다.

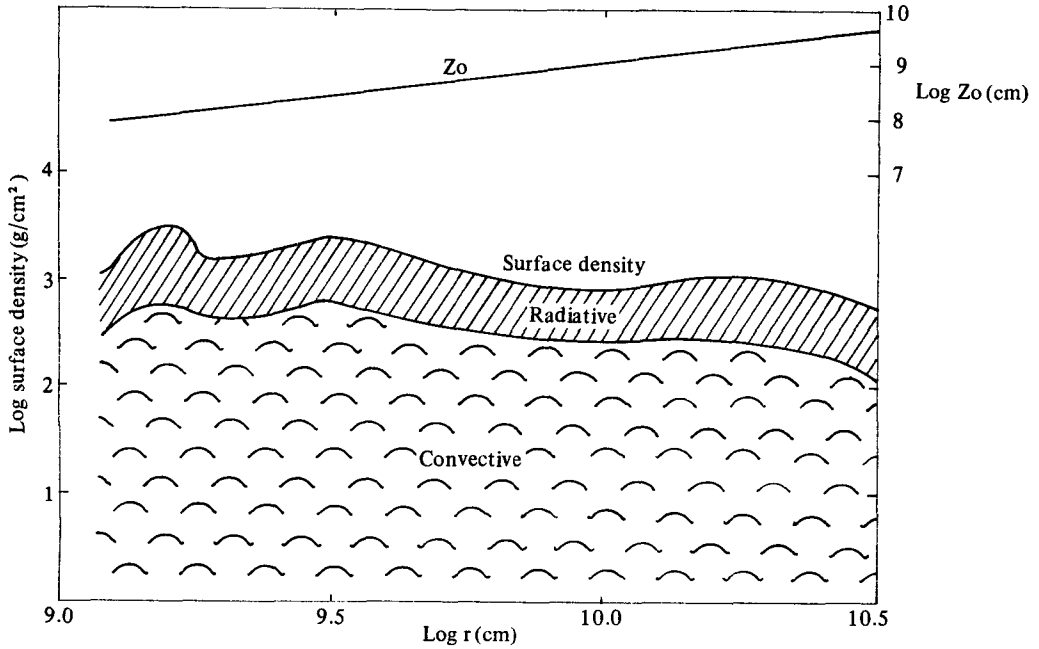


Fig. 3. Same as Fig. 2 but for accretion rate $\dot{M} = 10^{18}$ g/sec.

그림 4는 Accretion disk의 두께와 거리의 비를 거리의 함수로 나타낸 것이다. $\dot{M}=10^{16}$ g/sec인 경우는 거리가 멀수록 Disk의 두께가 그림 2와 같이 급격히 줄어드는 것으로 보아 왜신성의 무활동(Quiescence)한 상태라고 생각할 수 있다. $\dot{M}=10^{18}$ g/sec인 경우는 거리가 멀수록 Disk의 두께가 그림 3과 같이 계속 증가하므로 왜신성이 폭발(outburst)하는 상태에 해당한다고 볼 수 있다.

그림 5에서 그림 13까지는 Accretion disk 표면에서의 유효온도가 최대값을 갖는 지점인 $r = 10^{9.134}$ cm에서 수직구조를 나타내고 있는데, 압력, 온도, 압력, 표면밀도, 헬륨의 이온화율, Temperature gradient의 수직구조 분포를 보여주고 있다.

그림 12와 그림 13은 Temperature gradient를 나타내고 있는데, 대류층은 Disk의 중심부에서만 일어나기 때문에 ∇ 와 ∇_r 와 ∇_{ad} 가 중심부에서만 보이고 있다. Accretion rate $\dot{M}=10^{16}$ g/sec인 경우에는 Disk의 표면에서 헬륨의 이온화가 완전히 되지 않았기 때문에 단열 Temperature (∇_{ad})가 0.4의 값을 갖지 않고 변하고 있는 것을 알 수 있다.

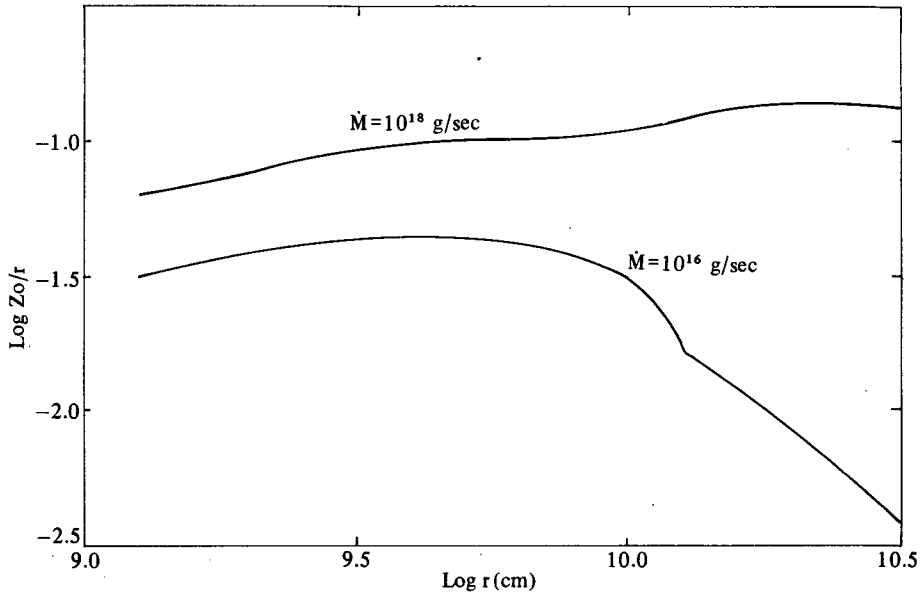


Fig. 4. The plot of semithickness of the disk to distance r from white dwarf vs. distance r from white dwarf for different accretion rate \dot{M} .

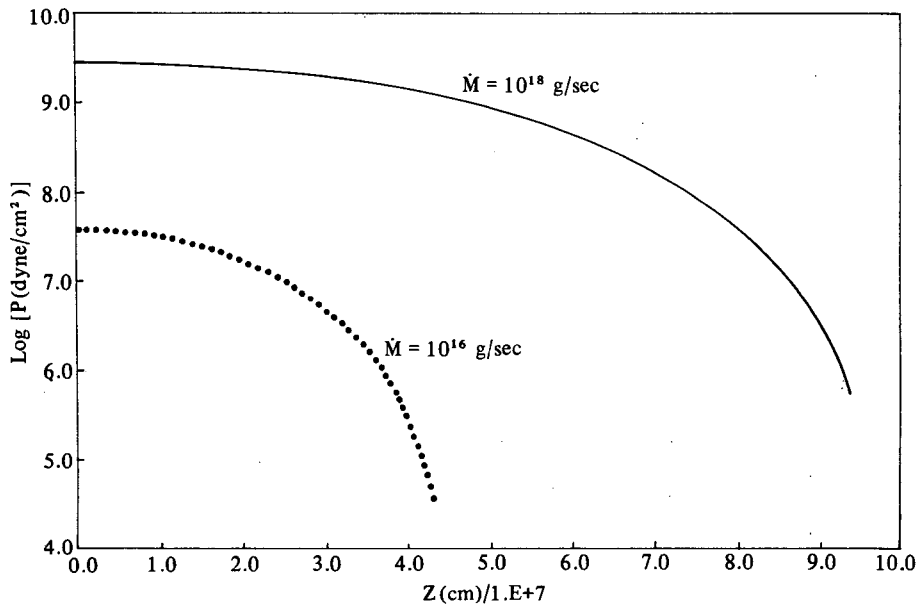


Fig. 5. Vertical structure of pressure for different accretion rate \dot{M} at distance $r = 10^{9.134}$ cm from white dwarf.

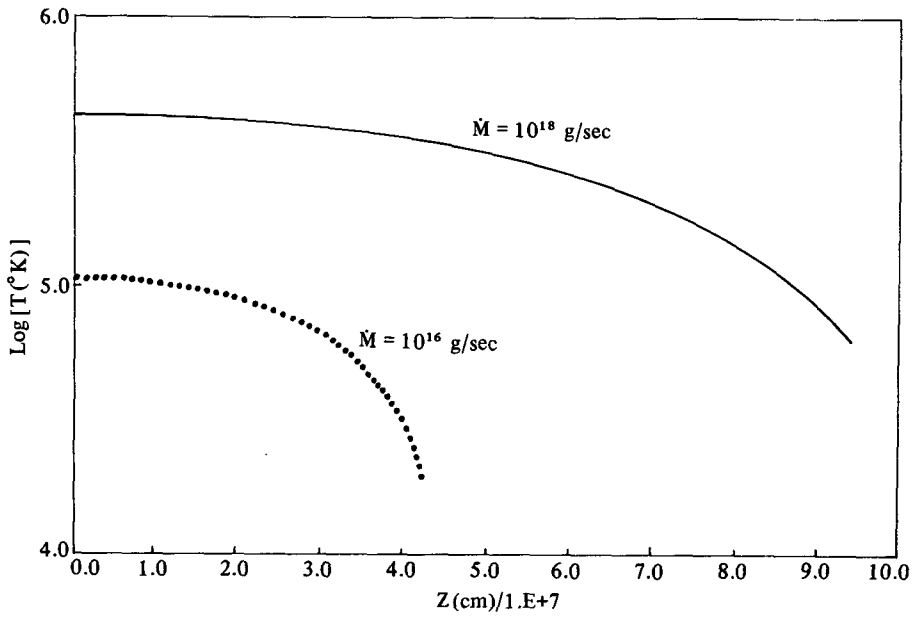


Fig. 6. Vertical structure of temperature for different accretion rate \dot{M} at distance $r = 10^{9.134}$ cm from white dwarf.

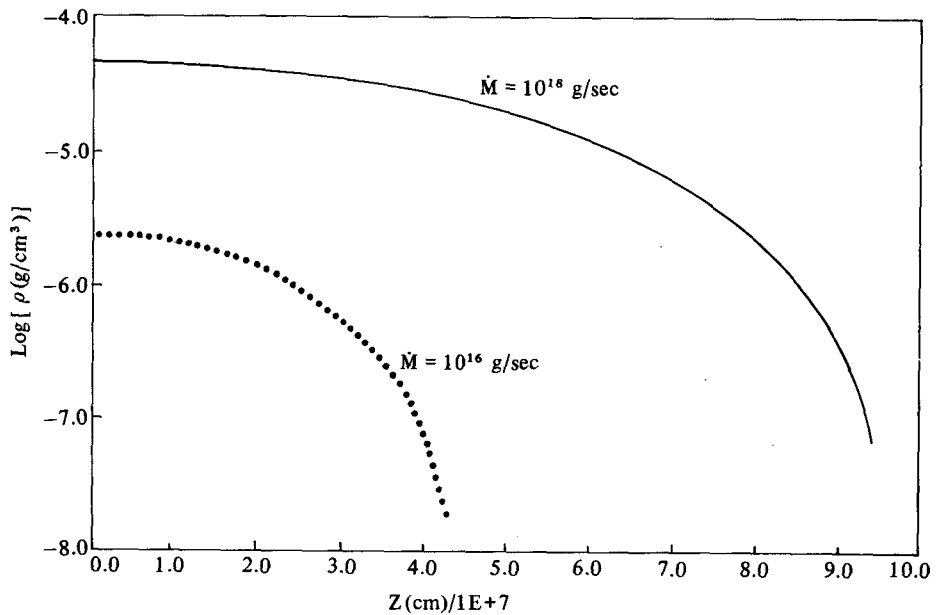


Fig. 7. Vertical structure of density for different accretion rate \dot{M} at distance $r = 10^{9.134}$ cm from white dwarf.

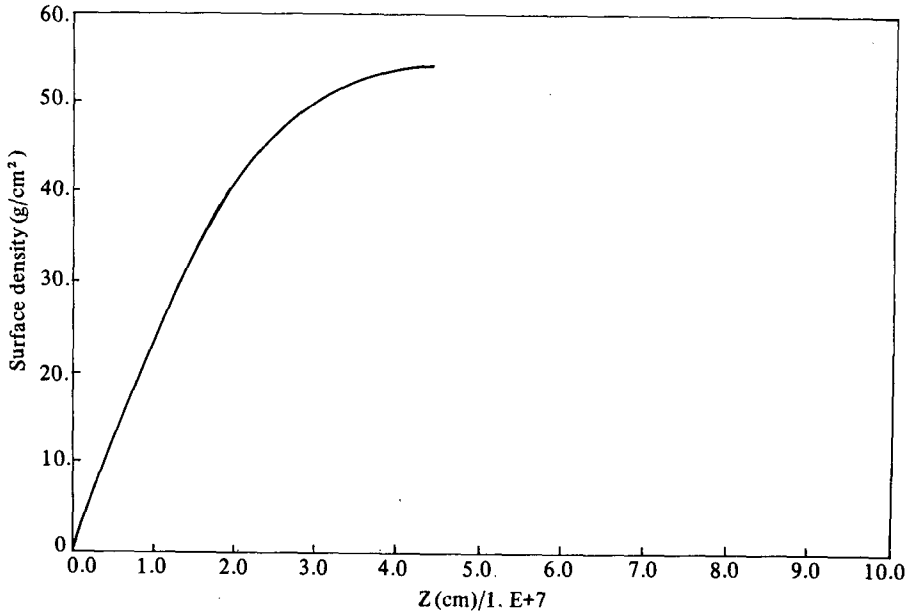


Fig. 8. Vertical structure of surface density for accretion rate $\dot{M} = 10^{16}$ g/sec at distance $r = 10^{9.134}$ cm from white dwarf.

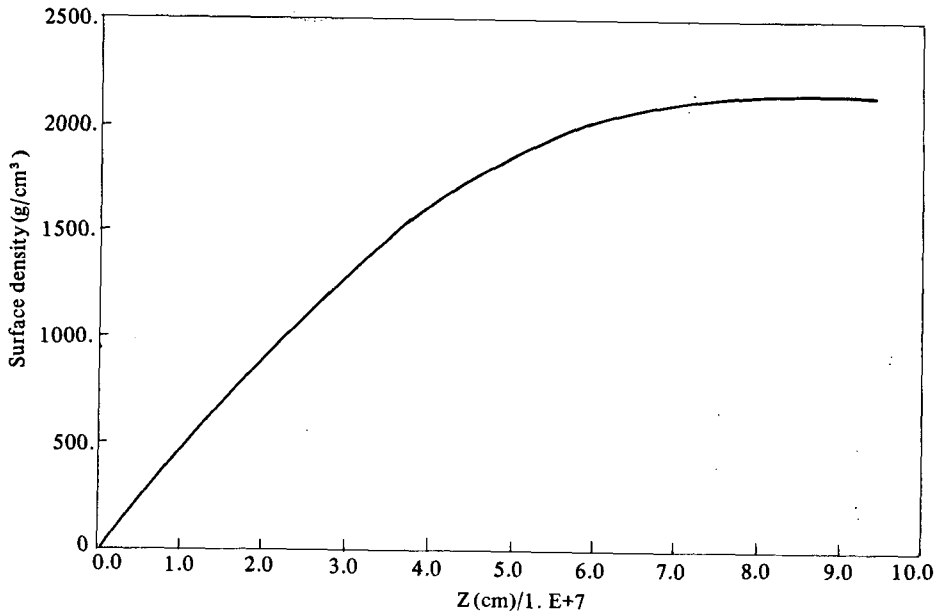


Fig. 9. Same as Fig. 8 but for accretion rate $\dot{M} = 10^{18}$ g/sec.

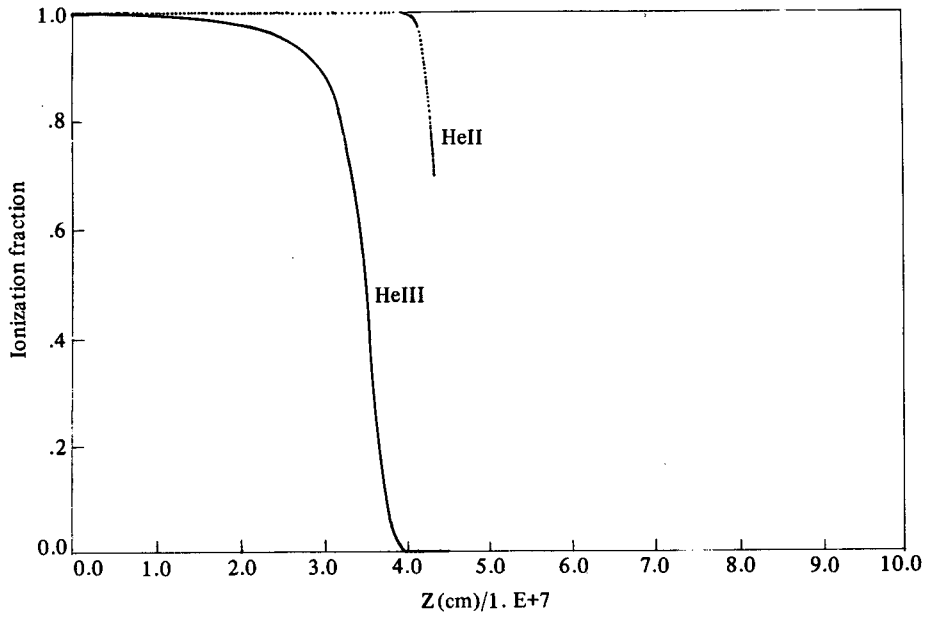


Fig. 10. Vertical structure of ionization fraction for accretion rate $\dot{M} = 10^{16}$ g/sec at distance $r = 10^{9.134}$ cm from white dwarf.

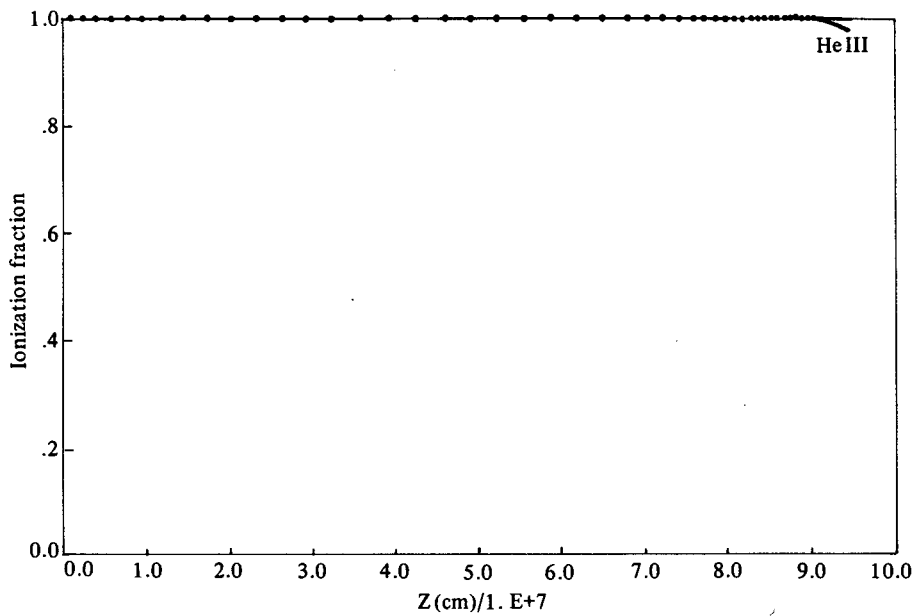


Fig. 11. Same as Fig. 10 but for accretion rate $\dot{M} = 10^{18}$ g/sec.

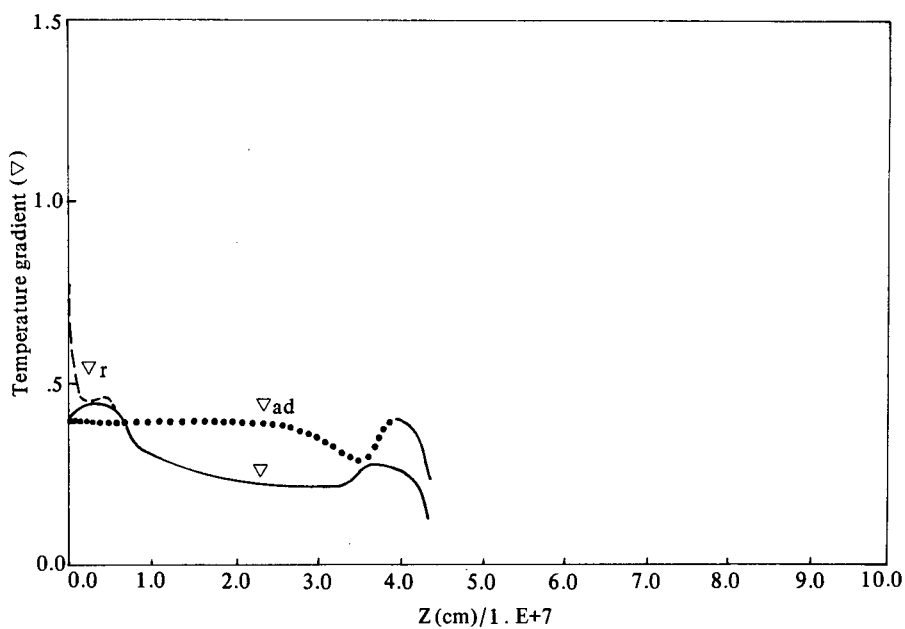


Fig. 12. Vertical structure of temperature gradients for accretion rate $\dot{M} = 10^{16}$ g/sec at distance $r = 10^{9.134}$ cm from which dwarf.

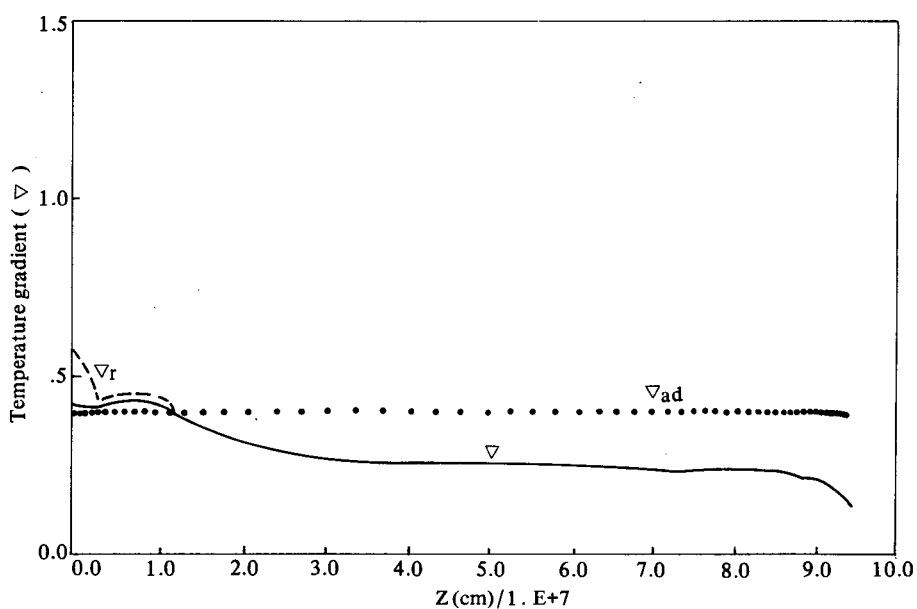


Fig. 13. Same as Fig. 12 but for accretion rate $\dot{M} = 10^{18}$ g/sec.

5. Conclusion

$\dot{M} = 10^{16}$ g/sec 와 10^{18} g/sec 를 가정해서 구한 Accretion disk 는 대류층이 Disk 의 중심 부분에 조금 생기고, 대부분은 복사층으로 구성되어 있다.

그림 2-4 에서 보는 바와 같이 Accretion rate $\dot{M} = 10^{16}$ g/sec = 1.6×10^{-10} M_{\odot} /yr 는 왜신성의 무활동 (Quiescence) 인 상태라고 생각되며, $\dot{M} = 10^{18}$ g/sec = 1.6×10^{-8} M_{\odot} /yr 는 왜신성의 폭발 (Outburst) 하는 상태에 해당한다고 볼 수 있다.

Bath *et al.* (1974) 와 Vogt (1981) 와 Smak (1982b) 에 의하면 Z Cha 는 $\dot{M} = 10^{16}$ g/sec 인 경우에 해당되어 심한 폭발을 하지 않는 상태라고 볼 수 있다.

그리고, Smak (1982b) 에 의하면 Z Cam 은 $\dot{M} = 5 \times 10^{17}$ g/sec 이므로 우리의 모델 $\dot{M} = 10^{18}$ g/sec 에 해당하는 극심한 폭발 (Outburst) 을 하고 있는 왜신성이라고 생각된다.

감 사

이 연구는 1983 년 후반기 과학재단 일반연구비의 지원으로 이루어졌으며 한국과학 재단에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Bath, G. T., Evans, W. D., Papaloizou, J. C. B., and Pringle, J. E. 1974, *M. N. R. A. S.*, **169**, 447.
 Cox, A. A., and Stewart, J. N. 1970, *Ap. J. Suppl.*, **19**, 243.
 Cox, J. P., and Giuli, R. T. 1968, *Principles of Stellar Structure* (New York: Gordon and Breach), Chap. 14.
 Crawford, J. A., and Kraft, R. P. 1956, *Ap. J.*, **123**, 44.
 Joy, A. H. 1956, *Ap. J.*, **124**, 317.
 Mantle, V. J., and Bath, G. T. 1983, *M. N. R. A. S.*, **202**, 151.
 Robinson, E. N. 1976, *Ann. Rev. Astr. Ap.*, **14**, 119.
 Shakura, N. I., and Sunyaev, R. A. 1973, *Astr. Ap.*, **24**, 337.
 Smak, J. 1982a, *Acta Astro.*, **32**, 199.
 ————. 1982b, *Acta Astro.*, **32**, 213.
 Vogt, N. 1981, *Ap. J.*, **252**, 653.