J. Astron. Space Sci. 19(1), 25–30 (2002)

블랙홀 쌍성계의 비대칭 광도 곡선과 DOPPLER BEAMING 효과

이희원[1†], 이창환[2], 강영운[1]
[1]세종대학교 지구정보과학과, [2]한국 고등과학원

ASYMMETRIC LIGHT CURVES OF BLACK HOLE BINARIES AND THE DOPPLER BEAMING EFFECT

Hee-Won Lee[1†], Chang-Hwan Lee[2], Young Woon Kang[1]
[1]Department of Geoinformation Sciences, Sejong University, Seoul, Korea
[2]Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea
E-mail: hwlee@sejong.ac.kr

(Received February 5, 2001; Accepted February 19, 2001)

요 약

블랙홀 쌍성계는 10 $M_\odot$ 정도의 블랙홀과 K 또는 M 분광형을 갖는 만기형 항성의 쌍성계로 10여 개가 보고되어 있다. 블랙홀의 동반성은 Roche lobe를 채우기 때문에, 궤도 위상에 따라서 이들의 밝기가 달라져서, 타원체형 광도 곡선을 나타내는 것으로 알려져 있다. 이들 쌍성계의 광도 곡선에서 최대 밝기 위상에서 수퍼센트 정도의 비대칭성이 보고되었으며, 이 현상은 흔히 항성 흑점 모형 또는 hot impact point 모형을 사용하여 설명되고 있다. 이 논문에서는 블랙홀 쌍성계의 공전 속도가 대략 400 km s^{-1}일 때에 Doppler 효과에 의한 흑체의 온도 차이는 $\Delta T/T \sim 1/400$에 이르며, 이에 의한 광도의 차이가 관측된 비대칭성에 충분히 크게 영향을 줄 수 있음을 지적한다. 따라서, 광도 곡선의 해석에서 특수 상대론적 효과가 고려될 때에, 단순히 계산된 항성 흑점 혹은 hot impact point의 온도와 규모에 중대한 수정이 필요할 것으로 예상된다.

ABSTRACT

Black hole binary candidates are known to be composed of a black hole with 10 $M_\odot$ and a K or M type companion. Because the companion is believed to fill the Roche lobe that is very aspherical, the light curves of black hole binaries are characterized by an ellipsoidal variation. It has been known that the ellipsoidal light curves exhibit asymmetric maximum brightness at the orbital phases 0.25 and 0.75, which has been attributed to star spots or the hot impact points of the accretion flow on to the accretion disk around the black hole. In this paper, it is pointed out that the special relativistic beaming effect contributes to the asymmetry of several percent often observed in the light curves. The typical orbital velocity 400 km s^{-1} observed in black hole binaries may induce the temperature difference $\Delta T/T \sim 1/400$ of the late type companion star in the observer's rest frame, because of the special relativistic Doppler beaming effect. This difference in temperature can result in several per cent

†corresponding author

of brightness sensitively dependent on the wavelength band, which is comparable to what has been observed in most black hole binary candidates. Considering the significant contribution of the special relativistic Doppler beaming effect, we conclude that the estimation of the sizes and temperatures of the star spots or the hot impact point needs serious revision.

Keywords : black hole binary, light curve, photometry

1. 들어가는 말

우리 우주에서 논의되는 블랙홀 후보들은 초기 우주에서 아직까지 증발하지 않고 남아 있으리라고 예측되는 원자핵 크기 정도의 primordial black hole에서 퀘이사를 비롯한 활동성 은하핵의 막대한 에너지를 생성하리라고 추정되는 10^9 $M_\odot$의 질량을 갖는 거대한 블랙홀에 이르기까지 매우 큰 범위의 질량과 크기를 가질 것으로 기대되고 있다. 우리 은하에서 발견되는 항성 규모의 블랙홀 후보들은 X-선 관측을 통하여 그 존재가 드러나고 있다. 우리 은하에서는, X-선을 지속적으로 방출하는 천체 Cyg X-1과, X-선 신성 혹은 X-선 transient source로 발견되는 블랙홀 후보들은 현재 10여개가 알려져 있다. 이들 천체들은 모두 쌍성계로 알려져 있으며, 분광 관측으로부터 이들 블랙홀의 질량은 대개 10 $M_\odot$ 안팎으로 알려져 있다. 이 값은 중성자별이 존재할 수 있는 최대 질량을 크게 웃도는 값이므로, 블랙홀로 추정할 수 있는 강한 증거로 받아들여지고 있다.

블랙홀 쌍성계의 생성 과정에 대한 최근의 흥미 있는 연구 결과는 이들이 감마선 폭발 천체 혹은 하이퍼노바 폭발과 연관을 갖고 있을 것이라는 제안이다. 동반성의 화학 조성에서 중원소 함량비가 비정상적으로 크게 나타난다는 사실이 알려져 있다. 이러한 중원소 함량비는 블랙홀이 형성될 때에 하이퍼노바와 같은 강력한 폭발의 잔해에서 예상되므로, 이러한 이론적 제안은 무척 흥미있다(Lee, Brown & Wijers 2002).

X-ray transient source들에서 X-선 방출이 고요한 수준으로 내려갈 때에, 가시광 영역의 밝기는 거의 대부분 동반성이 결정한다. 동반성은 주로 K 또는, M형의 분광형을 갖는 만기형 항성들이며, Roche lobe를 채우고 있는 것으로 추정되고 있다. 이러한 추정을 뒷받침하는 중요한 관측적 증거로서, 블랙홀 쌍성계의 광도 곡선을 들 수 있다. Roche lobe은 그 모양이 구대칭에서 벗어나므로, 궤도 기울기가 0이 아닌 경우에, 궤도 위상에 따라서 Roche lobe의 표면적이 다르게 나타난다. 따라서, 광도가 궤도 위상에 따라서 달라지며, 흔히 타원체형 변광 곡선을 나타낸다. 마루와 골 사이의 변광의 폭은 0.3 등급 정도에서 보이며, 전체적인 광도 곡선은 Roche lobe에서 예상되는 광도 곡선과 잘 일치한다.

블랙홀 쌍성계의 광도 곡선에서 매우 흥미 있는 현상은 궤도 위상이 0.25와 0.75에서 예상되는 최대 광도에서 비대칭성을 보인다는 점이다. 이러한 비대칭성은 수 퍼센트에 이르며, 종종 최대 광도가 나타나는 위상이 자리 바꿈을 하기도 한다. 최대 광도의 비대칭성은 W UMa형 접촉 쌍성계에서도 흔히 알려져 있으며, 이를 O'Connell 효과라고 부른다(Oh 1994). 이 효과는 태양의 흑점과 같이 항성 표면에 온도가 평균 광구 온도보다 낮은 지역인 star spot이 존재한다고 가정하여 설명하고 있

다. 특히, O'Connell 효과를 보이는 쌍성계에서 자기장 활동을 암시하는 Ca II H, K 방출선과, Mg II h, k 방출선이 검출되고 있으며, 이것은 항성 흑점 모형을 지지하는 관측적 증거로 받아들여지고 있다(Kang & Oh 1999). 블랙홀 쌍성계에서 나타나는 최대 광도의 비대칭성은 동반성의 자기장 활동에서 생길 수 있는 항성 흑점이 가장 큰 영향을 줄 것으로 추정되고 있다. 또한, Roche lobe에서 넘쳐나는 기체의 흐름이 블랙홀 주위에 있는 부착 원반에 충돌할 때에 예상되는 hot impact point가 광도 곡선에 영향을 줄 수 있을 것으로 추정된다.

블랙홀의 질량에 대하여 동반성의 질량은 태양 질량 정도에 머무를 것으로 추정되고 있다. 또한, 이들 쌍성계의 궤도 주기는 대부분 하루 미만으로 관측되고 있으며, 동반성의 궤도 공전 속도가 수백 km s^{-1}에 이른다. 따라서, 궤도 위상 0.25와 0.75에서 동반성의 관측자에 대한 시선 속도는 1000 km s^{-1}에 이를 수 있다. 특수 상대성 이론에 따르면, 이러한 상황에서 Doppler 효과에 의하여, 광원이 운동하는 방향으로 Doppler beaming과 청색 편이가 일어난다. 이것은 광원이 관측자를 향하여 운동할 때에 더 밝아짐을 의미하여, 블랙홀 쌍성계에서도 이러한 효과가 최대 광도의 비대칭성에 충분한 영향을 줄 수 있을 가능성을 남긴다.

우리는 이 논문에서 특수 상대론적 효과가 최대 광도의 비대칭성에 상당한 영향을 줄 수 있음을 보이고자 하며, 이에 따라 항성 흑점 모형과 hot impact point 모형을 적용할 때에 반드시 고려되어야함을 지적할 것이다.

2. 계산

블랙홀 쌍성계에서 X-선이 고요한 상태에 있을 때에 자외선 영역과 고에너지 영역에서는 블랙홀 주위에 형성된 부착 원반에서 대부분의 전자기파가 방출되며, 가시광과 적외선 영역에서는 동반성으로부터 방출되는 전자기파가 대부분을 차지한다고 추정된다. 우리는 이 논문에서 가시광과 적외선 영역의 광도 곡선이 동반성으로부터 오는 흑체 복사로 가정하고자 한다. 동반성에서 방출되는 전자기파 스펙트럼은 동반성의 대기에 의한 효과와 limb-darkening 효과에 의하여 흑체 복사에서 벗어나지만, 흑체 복사의 가정은 특수 상대론적 효과를 정량화하는 데에 매우 단순하지만, 효율적인 가정일 것이다. 블랙홀 질량이 동반성 질량에 비하여 약 10배 크므로, 궤도 운동은 전적으로 동반성에 의한 것이라고 볼 수 있다.

특수 상대성 이론에서 위상 공간의 부피는 Lorentz 불변량이다. 따라서, 위상 공간에서 광자가 차지하는 occupation number 역시 Lorentz 불변량이 된다. 열평형에 있는 광자의 계인 흑체는 Bose-Einstein 통계를 따르므로 이 값은 $n_{occ} = 1/[e^{h\nu/kT} - 1] = [c^3/2h\nu^3]I_\nu$로 주어진다. 따라서, I_ν/ν^3이 Lorentz 불변량이다. 따라서, 광원의 정지 좌표계를 primed system이라고 하고, unprimed system인 관측자 정지 좌표계에 대하여 광원이 v의 속도로 각 θ를 이루며 운동한다고 할 때에, 두 관성 좌표계에서 주어진 광자의 주파수 ν와 ν'은

$$\nu' = [\gamma(1 - \beta\cos\theta)]^{-1}\nu = \mathcal{D}\nu \tag{1}$$

으로 나타난다. 이 때에 $\beta \equiv v/c$이고 Lorentz 인수 $\gamma \equiv 1/\sqrt{1-\beta^2}$이며, Doppler인수 $\mathcal{D} \equiv [\gamma(1 - \beta\cos\theta)]^{-1}$로 정의된다 (Rybicki & Lightman 1979).

따라서, 두 관성 좌표계에서 나타나는 복사장의 모습은

$$I'_\nu = (\nu'/\nu)^3 I_\nu = \frac{2h\nu'^3}{c^3}\frac{1}{e^{h\nu/kT}-1} = \frac{2h\nu'^3}{c^3}\frac{1}{e^{h\nu'/k\mathcal{D}T}-1} \tag{2}$$

으로 쓸 수 있다. $T' = \mathcal{D}T$로 쓰면, I'_ν는 정확히 온도 T'의 흑체 복사장이 된다. 따라서, 주어진 파장폭에서 광도의 밝기는 두 관성 좌표계의 관측자가 보는 온도차에 기인한다.

궤도 위상 0.25와 0.75일 때에 궤도 공전 속도의 시선 성분의 절대값을 $v = c\beta$라고 놓고 $\beta \ll 1$을 만족할 때에, 두 위상에서 관측자가 보게되는 온도 차이 ΔT는

$$\Delta T = 2\mathcal{D}T \simeq 2\beta T \tag{3}$$

이다. 따라서, 관측자에게 나타나는 파장 λ에서 흑체 복사장의 intensity 차이는

$$\Delta I_\lambda \simeq \Delta T\frac{\partial I_\lambda}{\partial T} \tag{4}$$

$$\simeq 2\beta I_\lambda \frac{ye^y}{e^y-1} \tag{5}$$

$$= 2\beta I_\lambda f(y) \tag{6}$$

으로 나타난다. 이 때에 매개 변수 $y \equiv hc/(k\lambda T)$, 이고 $f(y) = y/(1-e^{-y})$ 로 정의된다.

이 차이를 겉보기 등급으로 다시 변환하면

$$\Delta m = \frac{2.5}{\ln 10}\frac{\Delta T}{T}\frac{y}{1-e^{-y}}$$

$$\simeq 2.17\,\beta\,\frac{y}{1-e^{-y}}, \tag{7}$$

를 얻는다.

Wien의 법칙에서 주어진 흑체의 최대 에너지가 발생하는 파장은 함수 $f(y)$가 5의 값을 가질 때이다. 또한, 함수 $f(y)$는 변수 y에 대하여 단조증가 함수이다. 따라서, 측광 관측이 동반성의 최대 에너지 파장에서 이루어진다면, 겉보기 등급의 차이는 $\Delta m = 11\beta$가 되며, 겉보기 등급 차이는 단파장으로 갈수록 증가하게 된다. 따라서, $\beta = 10^{-3}$인 블랙홀 쌍성계에서 1 퍼센트 정도의 비대칭성을 예상할 수 있다. 또한, 특수 상대론적 효과에 의한 겉보기 등급의 차이는 쌍성계의 절대 등급과 무관하고 단지 y의 함수로 주어진다는 점을 주목할만 하다.

3. A0620-00 (V616 Mon)의 CASE STUDY

여러 블랙홀 쌍성계 가운데, 가장 많이 연구된 천체가 A0620-00일 것이다. 이 천체는 Soft X-ray Transient 천체의 대표적인 천체로서, 1975년 8월3일 Ariel-5 위성으로부터 발견되었다. 동반성은 K5-K7의 왜성이며 (Oke 1977), 궤도 주기는 7.7 시간으로 보고되었다. 주성의 질량함수는 2.72 ± 0.06 $M_\odot$로 측정되었으며, 이것은 궤도 기울기를 고려할 때에, 이 천체는 블랙홀로 추정된다. 이 천체의 광도 곡선은 McClintock & Remilard(1986)이 가시광 영역에서 처음으로 보고하였으며, Froning & Robinson(2001)이 적외선 영역에서 광도 곡선을 발표하였다. 이들이 얻은 광도 곡선은 최대 밝기의 비대칭성이 안시 등급으로 $\Delta m \sim 0.01 - 0.03$으로 나타났다. 또한, 최대 밝기의 궤도 위상은 동반성이 관측자를 향하여 운동하는 0.75위상에서 얻어졌다. McClintock & Remilard(1986)가 측정

한 동반성의 온도는 $T = 4600$ K이며, 동반성의 궤도 운동 시선 속도가 433 km s^{-1}이다. 이 값들을 사용하면, Doppler 효과에 의한 두 위상에서의 안시 등급 차이는 V, R, J 영역에서 $\Delta m_V = 0.018$, $\Delta m_R = 0.015$과 $\Delta m_J = 0.008$이다. 파장이 짧을수록 비대칭이 커지며, 이 값들은 위에서 보고된 관측값들과 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 따라서, Doppler 효과에 의한 비대칭성이 광도 변화의 상당한 부분을 설명할 수 있음을 확인할 수 있다.

최근의 A0620-00의 측광 관측의 보고는 Gelino, Harrison & Orosz(2001)의 연구에서 볼 수 있다. 이들은 적외선 영역의 *J, H, K* band에서 광도 곡선을 얻었으며, 이들의 연구 결과에 의하면, 최대 광도는 궤도 위상이 0.75가 아닌 0.25에서 나타나며, 동반성이 관측자에 대하여 후퇴할 때에 일어난다. 이들은 항성 흑점 모형을 도입하여 자신들의 연구 결과를 설명하였다. 이들의 결과를 빌자면, 항성 흑점의 온도는 $T_{spot} = 3600$ K이며, 그 크기는 별의 전체 표면적의 4%를 차지한다. 이 항성 흑점은 *J* band에서 1.9%의 복사량 감소를 일으킨다. 그러나, 동반성이 관측자에 대하여 후퇴하고 있으므로, Doppler 효과에 의한 1%의 광도 증가를 보상하여야 하므로 실제로 관측 결과를 설명하기 위해서는 4%보다 훨씬 큰 star spot이 필요하다.

4. 결론과 토의

W UMa 형 접촉 쌍성계의 광도 곡선에서도 비대칭 최대 광도가 흔히 나타나는 O'Connell 효과에서도 특수 상대론적 효과가 영향을 줄 것으로 기대한다. 그러나, 그 영향의 크기는 블랙홀 쌍성계에 비하여 작을 것으로 추정된다. 그 이유는 쌍성계를 구성하는 두 별의 질량 차이가 블랙홀 쌍성계에 비하여 매우 작기 때문에, 한 별이 관측자를 향하여 움직이는 정도와 견줄만한 속도로 다른 별이 관측자로부터 멀어지기 때문이다. 더구나, 접촉형 쌍성계에서는 두 별이 대기를 거의 공유하기 때문에 두 별의 온도 차이가 그리 크지 않게 나타난다. 그러나, 두 별의 질량 차이나 혹은 흑체의 온도 차이가 크게 나타나면서 공전 속도가 수백 km s^{-1}에 달하는 쌍성계라면, 특수 상대론의 Doppler beaming 효과가 광도 곡선의 비대칭성에 관측될 수 있는 수준으로 영향을 줄 수 있을 것이다. 이러한 쌍성계를 찾는 일은 무척 의미가 있을 것이다.

특수 상대론적 효과가 앞에서 언급된 항성 흑점과 hot impact point 모형과 구별되는 중요한 점은 동반성 광구의 전체 온도가 10 K 안팎으로 전체적으로 오르내린다는 점이다. A0620-00의 경우에서 보았듯이, 현재 수행되고 있는 측광의 정밀도 한도 이내에서 최대 광도의 궤도 위상은 0.25나 0.75 사이를 오가고 있는 듯하다. 특수 상대론적 효과는 궤도 위상이 0.75에서 동반성이 관측자를 향하여 운동할 때에 광도가 더 커지게 되므로, 최대 광도가 0.25에서 나타난다면, 최대 광도의 비대칭에서 특수 상대론적 효과는 상대적으로 적은 기여를 하게되는 것이다. 반대로, 최대 광도가 0.75에서 일어난다면, 앞절에서 계산된 최대 광도의 비대칭성과 관측되는 비대칭성의 정도가 비슷하므로, 특수 상대론적 효과가 압도적으로 기여하는 것으로 볼 수 있다. 따라서, Doppler beaming 효과를 고려하지 않고 항성 흑점 모형이나 hot impact point 모형을 적용한다면, 항성 흑점 혹은 hot impact point의 크기를 지나치게 과소 혹은 과대 평가하는 결과를 초래한다.

블랙홀 쌍성계의 광도 곡선에서 특수 상대론적 효과는 동반성이 관측자로 향할 때에 온도가 높아지는 효과이므로, 파장이 짧을수록 더 크게 나타난다. 따라서, 이 효과를 검증하기 위해서는 여러 파장대에서 측광이 이루어져야 한다. 다만, 단파장으로 갈수록 블랙홀 주위에 형성된 부착 원반의 성

분에서 기여가 점점 커지므로, 동반성의 성분만을 골라내야하는 어려움이 있다. 적외선 영역의 장파장에서는 부착원반의 기여가 작지만, 특수 상대론적 효과 역시 줄어들기 때문에 부착 원반의 천체물리적 모형을 정밀하게 세우고, 측광의 정밀도를 높이는 과정이 필요할 것이다.

감사의 글: 장헌영, 안상현 박사와 나눈 의견이 많은 도움이 되었음을 밝힌다. 원고를 세밀하게 읽고 많은 점을 지적하여 준 심사 위원께 감사드린다. 이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2001-003-D00105).

참고문헌

Lee, C. -H., Brown , G. E., & Wijers, R. A. M. J. 2002, ApJ submitted (astro-ph/0109538)

Froning, C. S., & Robinson, E. L. 2001, AJ, 121, 2212

Gelino, D. M., Harrison, T. E., & Orosz, J. A. 2001, AJ, 122, 2668

Kang, Y. W., & Oh, K. D. 1999, Ap&SS, 268, 415

McClintock J. E., & Remillard, R. A. 1986, ApJ, 308, 110

Oh, K. D. 1994, JA&SS, 11, 196

Oke, J. B. 1977, ApJ, 217, 182

Rybicki, G. B., & Lightman, A. P. 1979, Radiative Processes in Astrophysics (New York: John Wiley & Sons, Inc.)