

X-선 밀집성 (X-ray compact star)

충북대학교 김 용 기

학문 분야로서의 천문학과 천체물리는 인간의 우주 탐험에 대한 열정으로부터 엄청난 이익을 보았다. 즉 1970년까지는 우리에게 아주 좁은 광학적 창문만이 관측을 위해 제공되어 왔지만, 최근에는 인공위성 기술이 발달하여, 가시광선보다 단파장 쪽으로는 UV-, X-선 그리고 감마선천문학을, 또 다른 쪽으로는 IR 천문학의 발전을 초래하였다. 우리 나라에서도 우리별 1, 2호에 이어 올해는 무궁화 위성이 발사될 예정이어서, 우주과학과 관련된 관측기기의 이용과, 부가적 기기의 개발 그리고 관측과 연관된 이론들의 연구가 활성화될 것으로 기대되어, 조만간 우리 나라에서도 우리가 쓰야 올린 인공위성이 관측한 자료들을 분석하여 우주과학을 연구하는 시대가 열린 것으로 전망된다. 이런 관측 기술의 발달은 무엇보다도 우주 플라즈마에 대한 이해를 높여 주었는데, 특히 위성에 탑재된 X-선 탐지기가 측정한 우주에서 오는 X-선의 밝기와 양은 고온의 플라즈마가 밀도가 높은 별들 표면에 끌려 들어지거나, 하전된 입자들이 자기장과 상호작용을 하면서, 핵 에너지가 방출되는 메커니즘과 아주 다른 물리과정을 통해 전자기파가 발생한다는 것이 알려졌다. 그래서 X-선을 내는 밀집성 (X-ray compact star)들의 물리가 어떻게 이해되고 있는지 소개하려 한다.

1. 서론

밀집성들은 백색왜성, 중성자별 그리고 블랙홀을 말한다. 백색왜성의 발견은 한 세기 전으로 거슬러 올라가게 되는데, 즉 Friedrich Bessel이 1834년 처음으로 북쪽 하늘에서 제일 밝은 시리우스가 하나의 동반자별을 가지고 있음을 알아냈고, 그후 Alvan Graham Clark은 1862년에 이 동반자별을 망원경으로 관측하였다. 그러나 이런 천체들이 태양질량 정도의 질량을 지니고 있고, 크기가 지구반경정도되며, 그리고 아주 높은 표면온도를 갖고 있다는 물리적 성질을 알게 되기까지는 또 50년이 걸렸다. Fermi-Dirac 통계역학이 완성된 바로 직후인 1926년에야 Fowler는 백색왜성이 중력수축하지 못하게 막고 있는 압력이 축퇴된 전자가스압력임을 알게 되었다. 그리고 나서 1930년에는 Chandrasekhar가 백색왜성이론을 발표하게 되고, 상대론적 축퇴로 백색왜성이 생성될 때 최고질량이 태양질량의 1.4배가 됨을 계산해 냈는데, 이는 화학적 성분비에 따라 약간 달라진다.

쌍성계 시리우스는 백색왜성을 지닌 쌍성계의 대표적인 예인데, 시리우스A는 태양질량의 두배정도되고 10,000 K의 표면온도를 가진 주계열별이고, 시리우스B는 A별보다 가시광선 광도가 104배 정도 약하지만, 표면온도가 30,000 K 정도되는 태양질량 정도의 백색왜성이다. 이 표면온도에서 방출되는 흑체복사 전자기파는 주로 낮은 에너지 X-선 (soft X-ray)

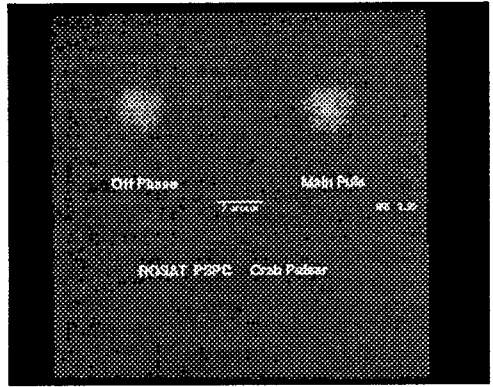
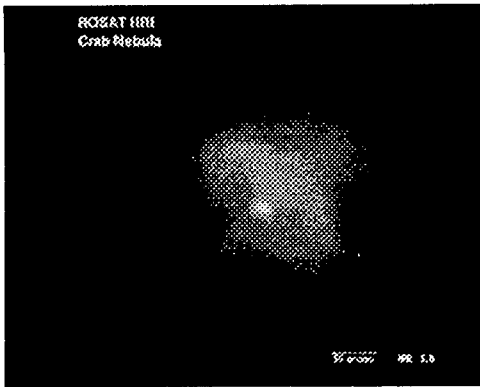
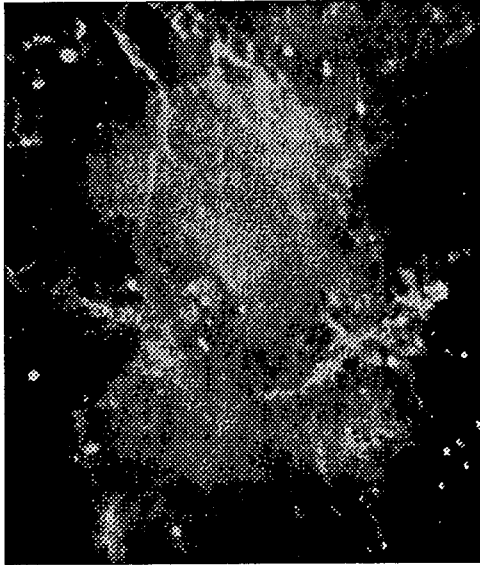


그림 1. 게성운의 광학영역 사진(위, [1])과 X-선영역 사진(아래, [4])

영역에 놓인다.

중성자란 입자가 발견된지 2년 후인 1934년에 Baade와 Zwicky는 별들이 아주 큰 밀도를 가진 중성자별로 구성될 수 있다고 제안하면서 다음과 같이 서술하였다:

"With all reserve, we advance the view that supernovae represent the transitions from ordinary stars into neutron stars which in their final stages consist of extremely closely packed neutrons".

중성자별은 그러나 1967년 Anthony Hewish und Jocelyn Bell-Burnell에 의해 비

로소 그 존재가 확인되었는데, 그들은 전파관측을 통해 펄서(pulsar)가 자전하는 중성자별이라는 것을 발견하였다. 이 공로로 그들은 노벨상을 수상하였다. 1968년 게성운에서 펄서의 발견은 초신성폭발시 중성자별의 생성을 입증해 주었다. 그림 1은 광학영역(위)과 X-선영역(아래)에 본 게성운과 게성운펄서를 보여 주고 있다. 이 펄서는 1054년 7월 4일 즉 지금부터 941년 전에 폭발한 초신성으로, 자전주기는 33ms이다. 그림에서 아래 왼쪽은 ROSAT X-선 인공위성의 HRI (High Resolution Imager)로 찍은 게성운 펄서이고, 오른쪽은 PSPC (Position Sensitive Proportional Counter)로 관측한 것으로, 펄서의 빛이 우리 쪽으로 향할 때 (main pulse)와 반대쪽을 향할 때(off phase)를 보여주고 있다. 컴퓨터 그림의 뿌옇게 나타내진 부분은 펄서에 의해 생성된 싱크로트론성운이다. 이와 같은 그림으로부터 우리는 아마도 가열된 극뚜껍 (polar cap)밖에서 중성자별의 열적방출에 대한 상한치를 구해 낼 수 있다. X-선 펄스는 중성자별의 자기구에서도 생겨난다고 믿어진다.

상태방정식에 의하면, 중성자별은 태양질량의 1.6과 3배 사이의 한계질량을 지닌다. 그래서 중성자별이 어떤 면에서는 백색왜성의 극한상황이라고 할 수도 있다. 태양질량의 3배가 넘는 천체는 블랙홀로 수축됨이 틀림없다. 자전하지 않는 블랙홀 주변에서의 물질 움직임은 Karl Schwarzschild의 Einsteinsch 중력장방정식 풀이에 의해 주어지는데, 이는 아인슈타인의 논문이 발표된 후 한달밖에 지나지 않은 1915년 12월에 발표되었다. 그런데 그 당시만 해도 그 응용 가능성이 확실하게 보이지 않았던 관계로, 처음에는 이 연구가 황토밭에 떨어진 썸이 되었었다.

그후 50년이 지난 후에야 비로소 항성블랙홀의 첫 번째 후보자로서 밝은 X-선원을 발견하는데 성공했다. 밀집성 발견사의 두 번째 시대를 연 이 부분은 1961년에 태양의 X-선복사파가 달에 의해 산란됨을 증명하기 위해 발사된 로케트관측에서 Scorpius X-1라 이름지어진 아주 밝은 X-선원이 발견되면서 시작되었다. 이 발견은 뜻밖으로 여겨졌었는데, 왜냐하면 그 당시만 해도 알려진 별들에서 X-선이 기대되지 않았기 때문이다. 지구공전 인공위성이 처음으로 발사된지 10년이나 늦게 1970년에서야 미국 인공위성 UHURU가 발사되어 keV-영역의 X-선하늘을 survey하게 되었다.

그림 2는 X-선 인공위성 UHURU가 관측한 X-선원들의 분포를 보여준다. 이 그림은 모든 X-선원을 그 밝기를 고려하지 않고 균일하게 한 점으로 표시해서 X-선복사파의 에너지에 따라 영상 처리한 가상그림을 제공한다. 약한 X-선원은 주로 높은 은위에서 나타나는데 이들은 활동하는 은하들이다. X-선 인공위성 관측들의 주된 결과는 X-선원들이 주로 은하평면에 분포되어 있고, 또한 우리은하에 속해 있는 밝기가 센 X-선을 100개 이상 발견한 것이다. 이들 중 밝은 것 중의 하나가 백조자리 첫 번째 X-선원 Cygnus X-1 인데, 강력한 블랙홀 후보로 여겨지고 있다. UHURU가 가죽 조리기개로 만든 방향성이 예민한 비례계수기를 장착한 반면, ROSAT는 화상 X-선망원경 (X-ray imager)을 장착하여, 큰 분해능으로, 낮은 에너지의 X-선영역에서 최초로 전하늘의 survey를 하였다. 이전까지의 X-선 survey에서 약 840개의 X-선원이 동정된 것에 반해, ROSAT Survey는 지금까지 약 60,000개

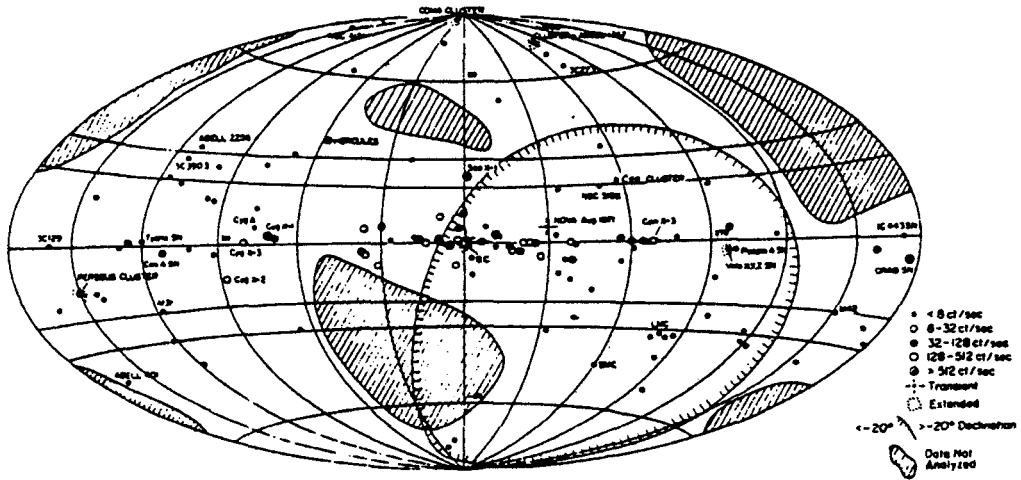


그림 2. UHURU인공위성이 본 X-선하늘[6]

의 X-선원을 발견하였다. 즉, ROSAT 위성이 관측한 X-선원들은 거의 새로운 발견이 되는 것이다. 이들 X-선원들의 광학적 동정은 현재 많은 학자들에 의해 행해지고 있는 아주 방대한 과제이다. 이런 과정 중에서 X-선밀집성이, 특히 자기백색왜성이 많이 동정되고 있다.

이제 sky survey에서 제공하는 몇개의 그림들을 보면서 어떤 정보를 얻어낼 수 있는지 살펴 보자. 먼저 그림 3에 보인 은하중심영역의 광학적그림과 X-선그림을 대비하여 살펴본다. 왼쪽그림은 궁수자리와 전갈자리 사이 30도x40도 각영역을 포함하는 광역사진촬영의 그다음은 큰마젤란성운 (LMC)의 경우를 살펴보자. 이 성운은 우리 은하에 가장 이웃에 있는

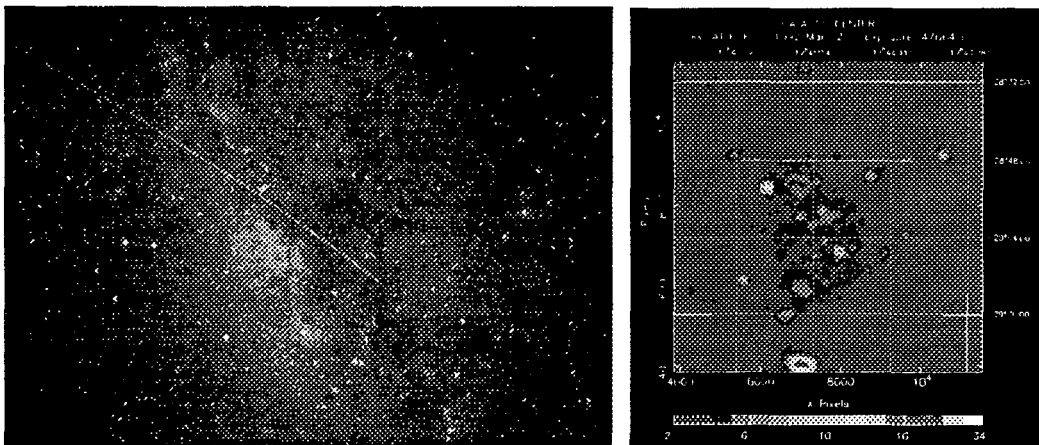


그림 3. 광학영역(왼쪽 [2])과 X-선영역(오른쪽 [4])으로 본 우리 은하중심

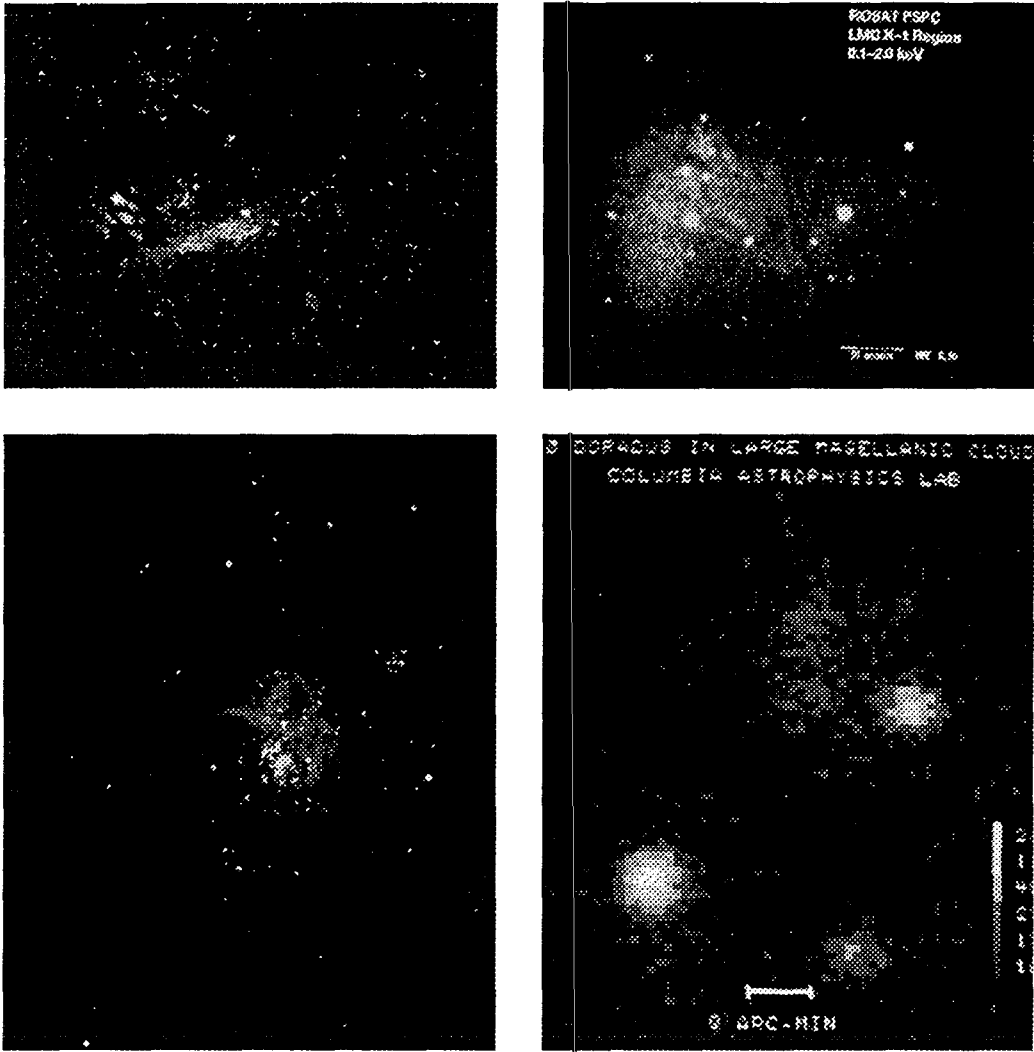


그림 4. LMC의 광학영역과 X-선영역 사진들
 a): (왼쪽 위 [5]) LMC의 광학사진; b): (오른쪽 위 [4]) LMC의 ROSAT PSPC 관측;
 c): (왼쪽 아래 [2]) 30 Doradus영역의 광학사진;
 d): (오른쪽 아래 [2]) 30 Doradus영역의 Einstein X-선위성 관측

외부은하로서 약 160,000광년떨어져 있다. 그림 4a의 광학사진에서는 수많은 보통별의 빛들을 다시 볼수가 있고, X-선그림 (그림4b)에서는 수 10^7 K 정도로 뜨거운 성간가스와 그리고 전방별과 LMC의 아주 밝은X-선원의 덩어리로부터 나오는 형광을 볼 수 있다. X-선원들은 중성자별을 지니고 있거나, 또는 블랙홀의 좋은 후보로 간주되고 있다. 또 몇몇 X-선원들은 아주 낮은 에너지를 방출하는데, 이들이 광학적으로 동정되는데 많은 시간이 필요했었고, ROSAT에 의해 비로소 X-선원 형태가 알려진 새로운 X-선원들이다. 여기선 아마 표면

근처에서 반성으로부터 포획한 수소를 거의 정상적(stationary)연소시키고 있는 백색왜성이 작용하는 것 같다.

마지막으로 방출성은 30 Dorado와 SN1987A가 있는 LMC의 작은 부분을 보자 (그림 4c 와 d). X-선그림(그림 4d)에서 중심부분의 약한 X-선원은 폭발 5년후에 발견된 초신성이다. 이 그림은 성간 가스에서 생긴 희미한 방출외에 다른 흥미있는 광원을 포함하고 있다 (왼쪽아래의 밝은 X-선원). 이 광원은 LMC X-1으로 블랙홀 후보중 하나이다. 이는 5ms 주기의 짧은 펄서로서 초신성 잔해이다. 이들 X-선원들은 큰 망원경 ROSAT에 의해 관측되어 연구되어지고 있고 1999년부터는 ESA의 XMM (X-ray Multi Mirror Mission)이 X-선 천문학의 새로운 시대를 열게 될 것이고, 이들 X-선 관측과 동시에 큰 광학 망원경으로 관측이 병행되게 되어 다중과장대 연구가 진행될 전망이다.

2. 밀집성과 X-선

UHURU X-선 인공위성의 관측들은 우리 은하계와 큰 마젤란 성운에서의 강한 X-선원들이 주계열성 별과 밀집성으로 구성된 근접 쌍성계들 이라는 중요한 사실을 밝혀 주었는데, 이 쌍성계에서 X-선은 주계열성에서 밀집성으로 물질들이 끌려 들어지는 현상 (물질모임, accretion)에 의해 생성이 된다. 밀집성을 설명하기 위해 우선 별진화의 마지막 단계에 대해 잠깐 살펴 보기로 한다 (그림 5). 여기에서는 현재 이해되고 범위 내에서 이들 밀집 천체들 사이의 일반적인 연관성을 소개한다. 성간물질이 모여져서 어느 질량이 되면, 자체 수축을 하게 되고, 수축되는 압력이 수소 핵 융합을 일으킨 물질 덩어리는 성인별로 그 빛을 발하기 시작한다. 수소 연료를 다 소모한 성인별은 이제 껍질이 폭발하는 갱년기 현상을 겪으면서 적색거성과 맥동별을 오가는 급변 현상을 거치고, 그 초기질량에 따라 초신성으로 폭발하든지 (질량이 클 경우) 또는 백색왜성으로 진화한다(그림의 3 과정). 초신성을 거친 별 또한 그 초기질량에 따라 백색왜성, 중성자별 (그림의 2 과정), 블랙홀 (그림의 1 과정)을 거치면서 마지막 단계를 이루고, 그 일부는 다시 성간물질로 환원된다.

백색왜성은 수소를 다 태우고 난 후 껍질이 다 벗겨진 별의 핵이라고 할 수 있다. 축퇴된 전자압력이 1.4M_☉보다 더 큰 질량을 허용하지 않기 때문에, 별이 백색왜성으로 그 생애를 마무리하는 초기 질량의 상한 값이 존재하게 된다. 이 상한치는 홀별의 경우 약 8-10 M_☉ 정도가 된다. 이 보다 더 무거운 별에서는 적색거성 상태에서 껍질이 손실될 때 핵부분이 Chandrasekhar 질량을 이미 넘어서게 되어 초신성 형태로 폭발하게 된다. 주계열성 별의 질량이 40M_☉ 정도까지에서는 중성자별이 생기게 되고, 그 이상에서는 질량이 수 M_☉에서 수십 M_☉ 정도의 질량을 지닌 블랙홀이 생기게 된다. 주계열성 별의 빈도가 질량이 낮아지면서 급속히 감소하기 때문에, 별의 마지막 단계 중 백색왜성이 가장 흔하게 관측되고, 블랙홀의 관측 빈도가 가장 낮다. 그러나 쌍성의 진화에서는 마지막 산물의 빈도가 초기 쌍성의 질량 비 분포와 주기분포에 의해 주어지기 때문에 이런 주장이 달라질 수 있다. 즉, 쌍성계의 한

성분이 초신성 폭발한 후 접촉 쌍성이 되는지, 또는 분리 쌍성이 되는지의 여부가 아주 중요한 역할을 한다. 큰 질량이 구조계에 남아 있을 때 쌍성계의 생존 가능성이 높기 때문에 블랙홀을 지닌 쌍성계의 형성이 우세하게 일어날 수 있다. 자세한 연구 결과나 많은 문제점들의 언급은 오히려 이해를 더욱 어렵게 할 것 같아 여기선 근본적으로 어떤 형태들이 기대되고 있는지만을 설명한다. 어떤 공간 밀도를 가지고 각각의 형태들이 관측되고 있으며, 궤도 주기의 분포가 어떻게 되는지에 대해 확실한 설명하기는 매우 어렵다.

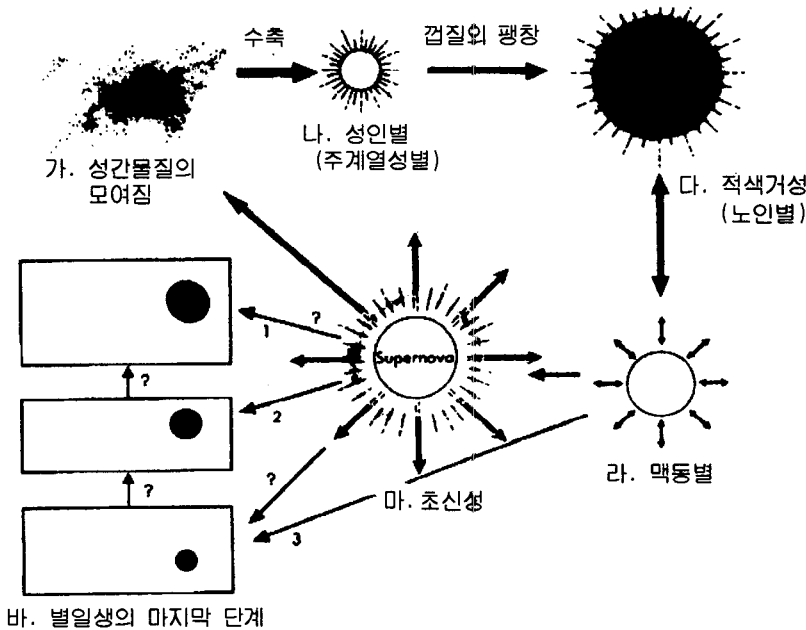


그림 5. 도식적 별진화 ([3])

두개의 보통별에서 분리 쌍성계가 형성될 때는 각 성분별의 등 포텐셜면 (Roche 면)이 서로 접촉하지 않는다. 이런 경우에는 질량 이동이 일어나지 않아서 X-선이 나오지 않거나, 나오더라도 약한 X-선이 방출된다. 백색왜성을 지닌 쌍성계는 잘 알려진 쌍성계에 속하는데, 이 백색왜성이 아직 젊고, 뜨거울 때는 광구 X-선을 방출한다. 중성자별과 쌍을 이루는 펄서의 경우 중성자 별이 자기화 되어서 자전효과에 따른 전파변조를 일으키는 쌍성계들로 확인되었다. PSR 0437-47은 ROSAT 관측에서 우연히 발견된 X-선 원이다. 블랙홀을 지닌 쌍성계는 존재하는 것 같으나 아직 확실하게 검증되지는 못했다.

질량교환이 일어나는 쌍성은 거의 모두 접촉쌍성에 속한다. 여기에선 덜 밀집된 별이 자신의 Roche 체적을 꽉 채우고 (또는 막 채우고) 있어서, 넘치는 물질들이 밀집성으로 끌려 들어진다. 이런 현상들이 자전하는 구조계에서 일어나고, 끌려 들어지는 물질들이 각운동량을 지니고 있기 때문에 선형경로를 따라 모여지지 않고, 모임원반 (accretion disc)이라

불리는 형태로 밀집성 표면에 모여진다. 밀집성이 충분히 큰 자기장을 지닌다면 모임 원반은 중심근처에서 깨지게 되고 물질들은 자기력선을 따라 밀집성으로 끌려 들어간다. 결과적으로 별표면에는 한 개 또는 여러 개의 뜨거운 반점들이 생기게 될 것이며, 그 형태는 자기장 기하, 그리고 바깥쪽 자기구에서의 자기장과 모임 원반의 상호작용에 의해 결정되게 된다. 만일 이런 반점들에서 나오는 X-선을 지닌 별이 자전을 하게 되면 빛의 강도는 자전에 따라 변하게 되고, X-선 펄서 형태로 관측되게 된다 (등대효과). 이와 비슷한 기본 구조를 지니며, 비슷한 물리적 상태에 놓이지만 여러 가지 다른 형태로 관측되는 많은 쌍성계들이 존재한다.

X-선을 내는 쌍성계 중 백색왜성이 물질을 모으는 경우 격변 변광성 (CB; Cataclysmic Binaries)이라 부르고, 중성자별 또는 블랙홀에 의해 물질모임이 일어나는 경우를 X-선 쌍성계 (XB; X-ray Binaries)라고 부른다. 질량을 방출하는 별은 두 경우 모두 주계열성 별일 수도 있고 백색왜성이 될 수도 있다. 백색왜성의 경우 궤도주기는 질량 방출하는 별의 작은 반경에 상응해서 아주 짧은데, 즉 4U 1820-30의 경우 11분밖에 되지 않는다. 이런 쌍성계의 중력 다중극 복사에 의한 각 운동량 손실에 대한 수명은 수십만 년 (10^5 년)정도 밖에 되지 않으며, 각 운동량 손실은 질량 이동을 수반한다.

물질 모임 밝기 (accretion luminosity)은 물질 모임을 \dot{M} 로 물질이 모여질 때 전체 방출되는 중력에너지로 주어지는데, 어떤 경로를 통해 에너지가 방출되는지는 아직 확실하게 결정되지는 않았다. 이 방출은 복사 형태일 수도 있지만, 중심 영역으로부터의 복사압에 의해 불어지는 "성풍"의 입자흐름일 수도 있다. 이런 성풍을 통해 끌려들어오는 물질 중 상당량이 다시 회전축을 따라 쌍성계 밖으로 배출되어 질 수 있다 (제트). 구형 물질 모임 (spherical accretion)인 경우 밝기는 에딩턴 밝기 L_{Edd} 에 의해 주어지는데, 에딩턴 밝기는 입사물질의 이온에 작용하는 중력작용과 전자에 작용하는 복사압을 같다고 했을 때의 밝기로 정의된다. 주어진 \dot{M} 에 대해 에딩턴 밝기는 이 물질모임에 의해 얻어질 수 있는 최대 밝기를 의미한다. 물질모임이 되는 플라즈마에서 도달되는 온도는 유체역학과 복사전달의 상호작용에 의해 결정되고, 간단한 방법으로는 추정할 수 없다. 복사스펙트럼의 어떤 성분은 그러나 흑체로서 어렵적으로 서술될 수 있다. 즉, 가열된 밀집성 표면에서의 복사와 방출된 중력에너지에 의해 가열된 모임원반의 안쪽 부분에서는 흑체복사로 어렵되는 복사파가 방출된다. 이런 아이디어로 X선 스펙트럼의 분석을 하면 쌍성계에 포함되어 있는 복사성분을 어느 정도 규명할 수 있다.

이런 중력에 의한 물질모임 밝기의 효율성은 그림 6에 보여진 것과 같이 에너지원으로서의 중력과 핵융합에너지의 비교를 통해 알아 볼 수 있다. 에딩턴 밝기에 사용되는 GM/R 의 질량-반경관계는 1g/s의 물질이 모여질 때 단위 g당 방출되는 중력 에너지의 척도를 나타낸다. 수소나 헬륨의 핵융합 에너지에 비교할 만한 에너지를 얻기 위해 태양 같은 주계열성 별에 대해선 엄청나게 큰 질량모임을 \dot{M} 이 요구된다. 즉 물질모임 과정에 의한 전자기

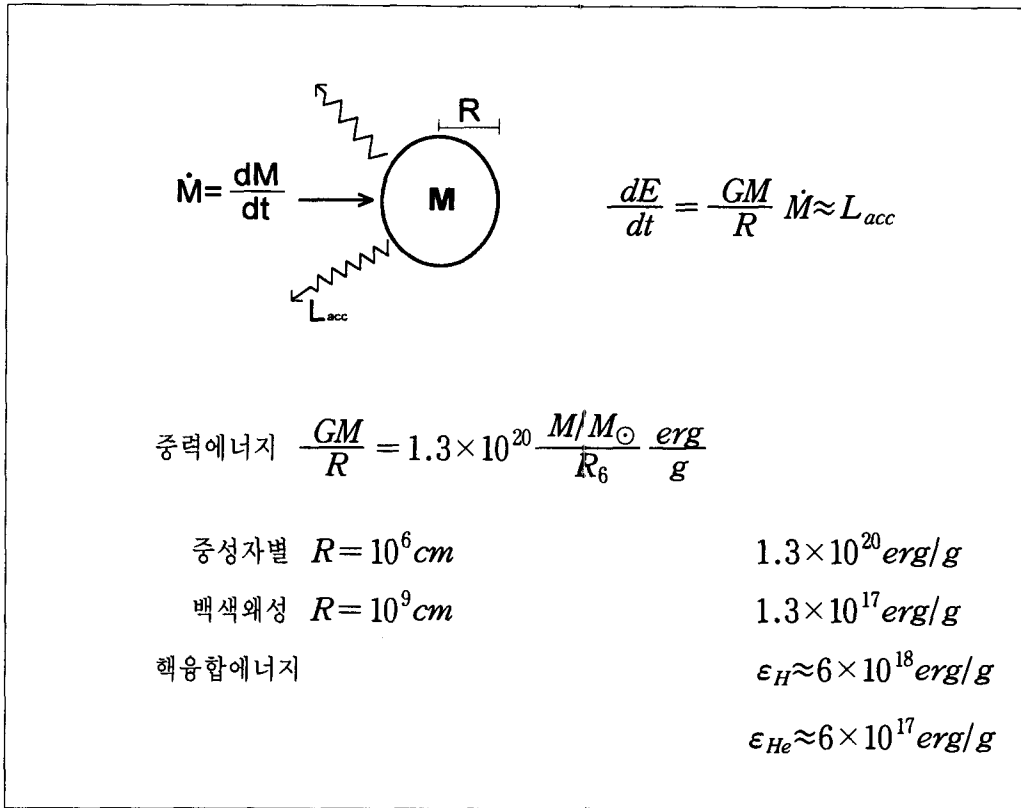


그림 6. 에너지 원으로서의 물질 모임

파는 태양과 같은 크기의 별일 경우 무시할 정도이다. 그러나 백색왜성 ($R \sim 10^9 \text{ cm}$)에 대해 물질모임 효율성은 상당히 높고, 중성자별 ($R \sim 10^6 \text{ cm}$)인 경우 단위질량당 방출되는 에너지는 핵융합에너지를 훨씬 증가하게 된다. 물질모임을 하는 블랙홀의 경우 물질모임에 의한 전자기파 방출이 매우 효율적이 될 것임은 또한 명확하게 된다. 이런 간단한 묘사에서 단위 g 당 방출되는 중력 에너지의 척도가 핵융합에너지와 비슷한 백색 왜성의 경우 M 값이 높아지면 핵융합에너지를 훨씬 증가할 수 있음을 볼 수 있다. 실제로 관측되는 X-선 강도는 중성자별에 대해 $>10^5 L_{\odot}$ 이고, 백색왜성의 경우 $>10^2 L_{\odot}$ 가 되어서 이런 밝기가 물질모임에 의한 중력에너지에 의해 방출된다면 적어도 물질 모임률은 $\dot{M} = 10^{18} \text{ g/s}$ 이 되어야 하기 때문에 백색왜성에서 나오는 X-선도 물질모임에 의한 것이라고 해석될 수 있다. 그러나 현재의 상황으로는 이런 X-선 밝기 하나만 가지고는 밀집성의 성질을 알아낼 수 없게 된다. 즉, LMC에서 거의 에딩턴 밝기 정도의 빛을 내는 아주 약한 X선원들이 ROSAT에 의해 새롭게 발견

되었는데, 이 한 경우에 대해 물질을 모으고 있는 H연소 백색왜성모델, 중성자별모델 그리고 중심의 블랙홀 모델 등을 사용하는 연구들이 각각 발표되는 우스꽝스러운 일들이 생긴다. 중성자별의 경우 중성자별은 껍질에 둘러 쌓여 있을 것이고, 이 껍질은 톰슨 산란에 대해 큰 광학적 깊이를 지니고 있을 것이다. 두 천체가 거의 비슷한 반경을 가지고 있다면 이 쌍성계는 핵연소하는 백색왜성과 구별되지 않을 것이다. 또한 Chandrasekhar한계 근처에 있는 백색왜성에당던 밝기가 $1.4 M_{\odot}$ 의 표준 중성자별의 에당던 밝기와 큰 차이를 보이지 않는다. 이런 점이 이런 천체의 관측사실 분석을 어렵게 만든다. 또한 이런 쌍성계 중 몇몇에서 블랙홀의 존재를 확실하게 해주는 특별한 표증도 아직은 없다.

밀집성의 본성에 대한 확실한 표증은 그 표면에서 일어나는 현상과 관계 있는 것들로서 Stark효과로 넓어진 백색왜성 스펙트럼이나 Zeeman 효과로 편이된 백색왜성 Balmer선과 같은 분광학적 특징들이다. 중성자별의 스펙트럼에서 이것과 비슷한 구조를 찾아내는 것이 앞으로 해내야 할 연구 과제이다. 중성자별의 밀집성 특징으로 중성자별의 표면 가까이에는 He층이 폭발적으로 연소되는 열핵반응을 들 수 있다. 이런 반응은 전체 밝기에 상당량을 기여할 수 있는데, 이런 과정은 그러나 매우 빨리 진행된다. 백색왜성 표면의 열핵폭발은 신성으로 알려졌다. 차이점은 단지 중성자별의 경우 연소 조건에 다달을때까지 수 $10^{-13} M_{\odot}$ 정도의 물질 모임만이 필요한 반면, 백색왜성의 낮은 밀도에서는 질량에 따라 $10^{-3} \sim 10^{-7} M_{\odot}$ 가 필요하다는 것이다 X선 망원경의 분해능이 좋아지면서 많은 약한 X선원이 중성자별과 블랙홀을 지닌 밝은 쌍성계로 동정이 되었다.

이상에서 우리는 밀집성에서 나오는 X-선과 그 관측적인 사실들을 일반적으로 간단하게 살펴보았다. 다음 호에는 밀집성으로서 백색왜성, 중성자별, 블랙홀에 대한 현재까지의 물리적 이해에 대해 소개해 보겠다.

그림 문헌

- [1]: Bethe H. A., 1990, Physics Today, 43(9), 24
- [2]: Henbest, N. and Marten, M., 1984, Die Neue Astronomie, Stuttgart, Birkhaeuser
- [3]: Hermann, J., 1987, dtv-Atlas zur Astronomie, Muenchen, Deutsche Taschenbuch Verlag, 190
- [4]: Rosat Archiv from sao-ftp.harvard.edu/pub/rosat
- [5]: Stoerig H. J., 1983, Knaurs moderne Astronomie, 225
- [6]: Truemper, J., 1973, Mitteilung der Astronomischen Gesellschaft, 32, 91