일반상대성이론의 100년과 그 미래

고중력별과 천체폭발현상

DOI: 10.3938/PhiT.24.009

이 창 환

Compact Stars and Explosive Astrophysical Phenomena

Chang-Hwan LEE

Compact stars, which include black holes, neutron stars and white dwarfs, are key research topics in modern astrophysics. Due to the very high density of compact stars, Einstein's general relativity is essential for understanding their properties and related astrophysical phenomena. Compact stars are born, as a result of stellar evolution, at the ends of the lifetimes of massive stars, and they are believed to be the origins of the most energetic stellar explosions, such as supernovae, hypernovae, and gamma-ray bursts. In this article, the role of general relativity in the research on compact stars and on related explosive astrophysical phenomena is discussed.

현대인들은 밤하늘을 바라보면서 별자리에 얹힌 신화를 넘어 눈에 보이지 않는 블랙홀과 중성자별을 얘기하고, 한걸음 더 나아가 암흑물질과 암흑에너지에 의해 가속팽창하고 있는 우주를 얘기하고 있다. 불과 100여 년 전만 해도 상상도 하지 못했던 일이다. 천체물리학으로 일컬어지는 학문의 발전이 하늘을 바라보는 우리의 시각을 완전히 바꾸어 놓은 것이다. 천체물리학의 발전은 상대성이론을 필두로 한 현대물리학 이론의 뒷받침이 없었다면 불가능한 것이었다. 천체물리학은 관측을

바탕으로 한 천체 현상을 물리학 이론으로 설명하는 융합 학문 분야로서 실험, 관측, 이론 및 수치계산 연구를 모두 포함하고 있다. 주요 연구 주제로는 별의 구조와 진화, 고중력별, 양자중력, 수치상대론 및 우주론 등이 있다. 이 글에서는 고중력별을 중심으로 상대성이론이 천체물리학 발전에 미친 영향에 대해 살펴보고자 한다. 백색왜성, 중성자별 및 블랙홀을 포함하는 고중력별은 현대 천체물리학의 핵심 연구주제로서 다양한 형태의 천체폭발의 원인이 되고 있으며 우주론 및 양자중력 연구에 필수적인 정보를 직간접적으로 제공하고 있다. 천체물리학에서 고중력별이 차지하는 중요성은 아래 노벨물리학상이 모두 고중력별과 직간접적으로 관련된 사실이 대변하고 있다.

- 1967년 한스 베테(Hans A. Bethe): 태양과 같은 항성에서 CNO 순환과정에 의해 에너지가 생성되는 과정을 밝혀 항성의 진화를 이해하는 근거를 제공함. 노벨상 수상 후 중성자별에 의한 초신성폭발과 블랙홀 연구를 수행함. 항성 진화의 마지막 단계에서 백색왜성, 중성자별 및 블랙홀이 형성됨.
- 1974년 마틴 라일(Sir Martin Ryle), 앤터니 휴이시(Antony Hewish): 전파 천문학 분야를 개척하였으며 펄사를 발견함. 펄사는 강한 자기장을 가지고 빠르게 회전하는 중성자별로 밝혀짐.
- 1983년 수브라마니안 찬드라세카르(Subramanyan Chandrasekhar): 백색왜성을 포함한 별의 구조와 진화에 관한 물리학적 연구를 수행하였으며 상대성이론과 양자역학이 백색왜성과 같은 별의 구조를 결정함을 보임.
- 1993년 러셀 헐스(Russell A. Hulse), 조셉 테일러 주니어(Joseph H. Taylor Jr): 중성자별 쌍성계 발견으로 중력과 연구의 새로운 가능성을 개척하였음. 중력파는 아인슈타인의 일반상대성이론에 의해 예측되었으며 중성자별 쌍성계에서 발생하는 중력과 검출 실험이 현재 진행 중임.
- 2002년 리카르도 지아코니(Riccardo Giacconi): 엑스선 천체물리학을 개척함. 엑스선 관측을 통하여 현재 태

저자약력

이창환 교수는 1995년 중성자별 내부 구조에 관한 연구로 서울대학교에서 박사학위를 받았고, 스톨니브록 뉴욕주립대학교, 고등과학원 및 서울대 BK 사업단을 거쳐 2003년부터 현재까지 부산대학교 교수로 재직 중이다. 중성자별 내부 구조 및 중성자별 쌍성계의 형성과 진화에 대한 연구를 수행하고 있으며, 2009년부터 현재까지 국제중력파연구단의 일원으로서 중성자별 쌍성계에서 발생하는 중력파 연구를 병행하고 있다. (cleeh@pusan.ac.kr)

Fig. 1. Distant galaxies in arc shape due to the gravitational lensing effect. [NASA]

양의 수 배 질량을 가진 블랙홀이 10여 개 확인이 됨.

- 2011년 솔 펄머터(Saul Perlmutter), 브라이언 슈미트(Brian P. Schmidt), 애덤 리스(Adam G. Riess): 백색왜성이 폭발하는 Ia형 초신성폭발 관측 결과를 이용하여 우주가 가속팽창하고 있음을 밝힘.

일반상대성이론과 천체의 운동

아인슈타인 이전에는 시간과 공간 그리고 물질은 독립적인 것으로 생각되었다. 시간은 방향성이 있어서 과거에서 미래로 한 방향으로만 흘러가지만 공간은 특정한 흐름의 방향이 없고, 물질은 방향과 무관한 양이기 때문이다. 뉴턴은 이러한 시간, 공간 및 물질의 성질을 바탕으로 만유인력, 즉 중력 법칙을 제안하였고 태양계 행성들의 운동을 설명하였다. 천체 현상을 물리학적법칙으로 설명하는 천체물리학의 역사가 뉴턴에 의해 시작되었다고 해도 과언은 아닐 것이다. 하지만 뉴턴은 태양과 지구 사이의 빈 공간에서 어떻게 중력이 전달되는지는 설명하지 못했다.

아인슈타인은 특수상대성이론을 도입하여 시간과 공간이 상대적으로 서로 얽혀 있으며 질량도 에너지의 일종임을 밝혔다. 특수상대성이론에 의하면 우리는 시간과 3차원 공간이 통합된 4차원 시공간에 살고 있는 것이다. 이후 탄생한 일반상대성이론에서는 중력의 근원을 4차원 시공간의 뒤틀림으로 재해석했다. 질량에너지를 포함하여 물질이 가지고 있는 총 에너지가 주위 4차원 시공간을 뒤틀어 놓는다는 것이다. 시간, 공간 그리고 물질이 서로 얽혀져 있음을 밝힌 것이다. 예를 들면, 태양은 주위 시공간을 뒤틀어 놓았고, 지구는 태양의 존재를 알고 중력을 받아 휘는 것이 아니라 뒤틀린 시공간에서 앞으로

Fig. 2. Mechanism of gravitational lensing and the origin of Einstein's Ring. [Wikipedia Commons]

이동을 하다 보니 결과적으로 휘게 되는 것이다.

뒤틀린 시공간의 예로서 우리가 살고 있는 2차원 지구 표면을 들 수 있다. 지구는 완벽한 구이고 표면이 평평하다고 가정하자. 적도에서 북극점을 향해 평행하게 출발한 두 여행자는 반드시 북극점에서 만난다. 여행자 스스로는 지구 표면을 따라 직진을 하지만 우주선에서 바라 본 여행자는 우주 공간에서 지구 표면을 따라 휘어져 이동하는 것이다. 인간의 인식체계가 평평한 3차원 공간을 바탕으로 하고 있기 때문에 휘어진 3차원 공간을 상상하기는 쉽지는 않다. 휘어진 3차원 공간에서는 어느 방향으로 이동하든지 평행하게 출발하여 직진하는 두 우주선이 만날 수도 있고, 아니면 계속 서로의 거리가 멀어질 수도 있다. 우주선은 자신의 입장에서 직진을 하지만 공간 자체의 성질로 인해 휘어져 이동하게 되는 것이다.

일반상대성이론과 빛, 그리고 블랙홀의 탄생

일반상대성이론에 의하면 뒤틀린 시공간에서 이동하는 빛도 휘 수 밖에 없다. 계곡을 굴러 내려오는 공을 생각해보자. 공이 뒤틀린 계곡의 모습을 알고 내려오는 것은 아니다. 뒤틀린 계곡면을 따라 내려오다 보니 결과적으로 계곡의 모양에 따라 공의 경로가 휘어지는 것이다. 뒤틀린 4차원 시공간에서 빛의 경로가 휘는 것도 비슷한 원리이다.

위에서 기술한 바와 같이 아인슈타인은 일반상대성이론을 도입하여 천체의 운동을 에너지에 의한 4차원 시공간의 뒤틀림으로 재해석했고 빛이 휘어짐을 이론적으로 예측하였다. 빛이 휘어지는 현상은 1919년 개기일식 때 처음으로 관측으로 확인이 되었고, 현재는 중력렌즈 효과를 통하여 관측이 되고 있다. 그림 1과 2에서 중력렌즈 효과에 의해 먼 은하가 고리 또는

Fig. 3. Artist's drawing of pulsar (rotating magnetized neutron star). [Wikipedia]

호의 형태로 보이는 것을 확인할 수 있다.

질량으로 대표되는 에너지에 의한 빛의 휘어짐 예측은 블랙홀의 존재 예측으로 이어졌다. 1915년 일반상대성이론이 탄생된 직후 1916년 회전하지 않는 블랙홀의 이론적 해가 발견된 것이다. 회전하는 블랙홀의 이론적 해는 반세기가 지난 1963년 발견되었다. 에너지 밀도가 너무 커서 빛조차 빠져나올 수 없을 정도로 뒤틀린 시공간이 과연 존재할 수 있을까. 일반상대성이론에 의해 예측된 블랙홀의 존재 가능성은 1967년 펄사 즉 회전하는 중성자별이 발견되면서 새로운 국면을 맞이하게 된다.

펄사와 중성자별 그리고 블랙홀의 발견

갑자기 나타났다 사라지는 초신성은 밤하늘 최대 미스터리 중의 하나였다. 1934년 독일의 발터 바데와 스위스의 프리츠 츠비키는 초신성 폭발의 원인으로 중성자별을 제안했다. 이들은 질량이 큰 별의 중심부가 붕괴하여 중성자별이 만들어질 수 있고, 이에 의해 형성된 충격파가 외곽의 물질을 우주로 날려버리는 초신성 폭발을 일으킬 수 있다는 제안을 하였다. 하지만 한 대도시의 건물 전체를 각설탕 하나만한 부피에 압축한 것에 해당하는 밀도를 가진 중성자별의 존재는 블랙홀의 존재만큼이나 믿기 어려웠다. 그런데 1967년 발견된 펄사가 빠르게 회전하는 중성자별임이 밝혀지면서 중성자별이 천체물리학의 주요 연구 주제로 대두되었다. 그림 3은 회전하는 자화된 중성자별에 의해 펄스 신호가 방출되는 모습을 그린 상상도이며 그림 4는 펄사가 발견된 계성운 사진이다. 일반상대성이론이 중성자별 구조에 미친 영향은 무엇일까.

1933년 인도의 과학자 찬드라세카르는 아인슈타인의 상대성

Fig. 4. Crab nebula where crab pulsar is discovered. [NASA]

이론과 양자역학을 결합하여 백색왜성의 질량에 한계가 있음을 이론적으로 예측하였다. 이 한계를 찬드라세카르 한계로 부른다. 찬드라세카르는 이 업적으로 1983년 노벨물리학상을 수상하였다. 미국 NASA의 엑스선 관측위성 찬드라는 그의 이름을 딴 것이다. 우리는 경험으로 물질을 쌓으면 쌓을수록 부피가 그 만큼 늘어난다는 것을 알고 있다. 그런데 백색왜성에서는 전혀 다른 결과가 나타난다. 백색왜성의 질량이 증가하면, 질량에너지에 의한 백색왜성 내부 시공간의 뒤틀림 효과가 물질의 양자역학적 압력을 이겨서, 즉 중력이 압력을 이겨서, 부피가 더 작아지는 현상이 발생하는 것이다. 백색왜성은 내부 전자가스의 양자역학적 압력에 의해 유지가 되는데, 질량이 증가할수록 부피가 작아지므로 결국에는 붕괴할 수밖에 없는 운명을 타고난 것이다. 백색왜성의 한계 질량은 태양 질량의 약 1.4배에 해당하는 것으로 알려져 있다.

백색왜성의 한계 질량 이상의 질량을 가진 고중력별은 존재할 수 있을까. 별 내부 전자들이 중력을 이기지 못하여 양성자들과 결합하면서 모두 중성자로 바뀐다면 어떠한 일이 일어날까. 별 내부 중성자 가스의 압력이 중력을 이길 수만 있다면 안정된 별의 존재가 가능하다. 바로 중성자별의 이론적 탄생이다. 중성자별은 1967년 펄스의 발견으로 처음 그 존재가 확인된 후 현재까지 천여 개가 발견되었다. 그런데 중성자별도 백색왜성과 같이, 질량에너지에 의한 내부 시공간의 뒤틀림이 너무 커서, 질량이 증가하면 증가할수록 부피가 작아지게 되며 한계 질량이 존재하게 된다. 중성자별의 한계 질량 예측에는 일반상대성이론이 필수적이다. 중성자별의 한계 질량은 고밀도 물질에 대한 강상호작용의 불확실성으로 아직까지 명확하게 규명되지는 않았지만, 최근 백색왜성-중성자별 쌍성계에서 태양 질량의 2배 질량을 가진 중성자별이 발견되었으므로, 태양 질

Fig. 5. X-ray image of X-ray black hole binary XTE J1118+480 [NASA]. Color is artificial.

량의 2배에서 2.5배 범위에 있을 것으로 추정되고 있다.

중성자별의 한계 질량 이상의 질량을 가진 고중력별은 존재할 수 있을까. 현재까지 알려진 물리학 이론에 의하면 블랙홀 밖에 없다. 아인슈타인 일반상대성이론의 수학적 해로서 제안된 블랙홀이 백색왜성 및 중성자별의 한계 질량에 대한 이론 및 펄사의 관측으로 다시 한 번 그 존재 가능성이 예측된 것이다. 1971년 백조자리에서 발견된 엑스선원이 바로 이론적으로 예측된 블랙홀임이 밝혀졌다. 백색왜성, 중성자별, 그리고 블랙홀의 특성에 대한 이론적 예측 및 관측으로 아인슈타인의 일반상대성이론이 다시 한 번 검증받게 된 것이다. 엑스선 관측을 통하여 블랙홀 발견에 공헌한 업적으로 지아코니 박사는 2002년 노벨물리학상을 수상하였다. 그림 5는 블랙홀 쌍성계 XTE J1118+480의 엑스선 사진이며 그림 6은 은하 M87의 사진으로 중심에 거대 블랙홀이 있는 것으로 추정된다. 블랙홀에서 엑스선이 직접 방출되는 것은 아니다. 블랙홀로 빨려 들어가는 물질들의 온도가 상승하여 블랙홀 주위에서 열적 엑스선이 방출되는 것이다.

고중력별과 천체폭발현상

태양과 같은 별은 핵융합반응을 통해 진화를 하여 마지막에 백색왜성을 남기고 수명을 다한다. 태양의 핵융합반응에 의한 에너지 발생 과정은 특수상대성이론 및 양자역학으로 예측되었으며 관측으로 확인이 되었다. 한스 베테 박사는 태양과 같은 별의 CNO 순환과정을 밝혀냄으로서 현대 천체물리학을 개척하였으며 1967년 노벨물리학상을 수상하였다. 관측으로 확인된 백색왜성, 중성자별 및 블랙홀은 별의 진화과정에서 어떻게 만들어졌으며 초신성 폭발과 어떤 연관이 있을까.

Fig. 6. Images of M87 in three different photon frequencies [NASA]. The jet extends upto 100,000 light years.

1. 백색왜성과 초신성폭발

별의 초기 질량이 진화의 마지막 단계에 형성되는 고중력별의 형태를 결정짓는 가장 중요한 요인으로 알려져 있다. 일반적으로 별의 초기 질량이 클수록 수명이 짧다. 질량이 클수록 중심부 온도가 높아서 핵융합 반응이 더 잘 일어나기 때문이다. 초기 질량이 태양 질량의 8배 이하인 별은 내부 온도가 헬륨핵융합 반응을 일으킬 수 있는 정도까지만 올라간다. 헬륨핵융합 반응은 탄소와 산소를 생성하므로 별이 수명을 다한 뒤에는 헬륨, 탄소, 산소 등으로 구성된 백색왜성을 남긴다. 한계 질량에 다다른 백색왜성이 외부에서 물질을 유입한다면 어떻게 될까. 질량유입으로 한계 질량을 넘은 백색왜성은 수축하면서 중심부 온도가 상승하여 탄소 핵융합반응이 시작된다. 이때 발생한 열이 별 전체 온도를 높여서 연쇄적인 탄소핵융합 반응을 유도하고, 결국 Ia형 초신성 폭발을 일으키게 된다. Ia형 초신성폭발은 한계 질량에 다다른 백색왜성에 의해 일어나므로 초신성 스펙트럼에 수소 성분이 없고, 수반된 에너지가 거의 일정하여 우주론을 연구하는 표준촉볼로 사용되고 있다. 2011년 노벨물리학상이 수여된 가속팽창우주 연구도 Ia형 초신성 관측을 바탕으로 하고 있다.

2. 중성자별과 초신성폭발

초기 질량이 태양 질량의 8배에서 20배 범위에 속하는 별은 진화과정에서 중심부 온도가 탄소연소반응을 일으킬 수 있을 정도로 높이 올라간다. 그 결과 무거운 원소의 생성이 가능하고, 중심부에 철이 형성될 때까지 핵융합반응이 계속된다. 탄소연소반응 이후 네온연소반응 및 실리콘연소반응을 거쳐 철이 형성되기까지 걸리는 시간은 별 전체 수명의 약 0.1%에 불과하다. 일단 철이 형성되면 더 무거운 원소로의 핵융합반응은

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

Fig. 7. Distribution of gamma-ray bursts in the sky [NASA BATSE].

일어나지 않는다. 철이 우주에서 가장 안정된 원소이기 때문이다. 별의 중심부에 형성된 철핵은 에너지를 방출하며 온도가 내려가 수축을 하게 된다. 이 철핵의 질량이 찬드라세카르 한계를 넘으면 철핵 전체가 붕괴하여 중성자별이 형성된다. 이 과정에서는 핵융합반응과 반대 방향으로 철원소가 양성자와 중성자로 분리되면서 에너지를 흡수하고 압력을 줄여주게 된다. 또한 양성자와 전자가 결합하여 중성자와 중성미자가 생성되는 반응이 동시에 진행된다. 중성미자는 다른 입자와 상호작용을 거의 하지 않으므로 별 중심부의 압력과 에너지를 줄여 중성자별의 형성을 가능케 한다. 철핵이 붕괴하여 중성자별이 형성되는데 걸리는 시간은 수 분 이내로 수억 년에 달하는 별의 수명을 고려할 때 지극히 짧은 시간이다. 이러한 급격한 변화는 중심부에 중성자별을 남기는 초신성 폭발을 일으킨다. 이 초신성 폭발은 일반적으로 수소를 포함한 별 외곽 층을 포함하고 있으므로 초신성 스펙트럼에서 수소 성분이 발견된다.

3. 블랙홀과 감마선폭발 및 극초신성폭발

초기 별의 질량이 태양 질량의 20배에서 100배에 달하는 별은 진화의 마지막 단계에서 중성자별 또는 블랙홀을 남긴다. 별의 최종 운명은 주위 환경에 의존한다. 질량이 이 범위에 속하는 별은 중심부 철핵의 질량이 찬드라세카르 한계보다 훨씬 클 수 있고 중성자별을 거치지 않고 블랙홀로 바로 붕괴할 수 있다. 형성된 블랙홀이 빠르게 회전할 경우에는 블랙홀 회전에너지에 의한 폭발도 가능하며, 최근 발견된 감마선폭발 및 극초신성 폭발이 빠르게 회전하는 블랙홀에 의해 일어나는 것으로 추정되고 있다. 감마선폭발은 태양이 평생 방출하는 에너지보다 많은 에너지를 수 초에서 수 분 이내에 감마선으로 방출하는 폭발현상으로 그림 7에 관측된 감마선폭발의 천구 분포가 나타나 있다. 감마선폭발의 천구 분포는 감마선폭발의 원인이 우리 은하 내부가 아니라 외부 은하임을 보여준다. 현재까

GRB FIREBALL MODEL

Fig. 8. Gamma-ray burst (GRB) fireball model. Strong gamma-ray emission due to internal shocks in the relativistic blast-wave is caused by a rapidly rotating black hole at the center [NASA Swift].

지의 이론 연구 결과 강한 자기장을 가진 블랙홀이 빠르게 회전할 경우 회전에너지의 일부를 폭발에너지로 바꿀 수 있다는 것은 알려져 있지만, 정확한 폭발 메커니즘은 아직도 해결해야 할 과제로 남아있다. 그림 8은 감마선폭발의 표준 모델에서 빠르게 회전하는 블랙홀에 의해 감마선폭발이 일어나는 과정을 보여주고 있다. 극초신성폭발은 폭발에너지가 보통 초신성의 10여 배 이상인데, 폭발에 수반된 에너지를 고려할 때, 폭발의 원인으로 블랙홀이 가장 유력한 후보이다. 빛조차 빨아들이는 블랙홀이지만 강력한 천체폭발의 원인으로 새롭게 각광을 받게 된 것이다.

새로운 발견을 기대하며

현대 인류로 하여금 우주에 대한 이해의 폭을 넓히는데 기여한 중요한 과학기술은 수도 없이 많다. 지상의 전파망원경에서 인공위성 탑재 엑스선망원경에 이르는 다양한 관측 장비의 발달과 인공위성 기술의 발전은 중성자별, 블랙홀, 감마선폭발, 초기 우주의 초신성 등과 같은 천체의 새로운 발견을 가능하게 하였다. 이러한 발견은 일반상대성이론의 도움 없이는 불가능한 것이었다. 하지만 새로운 발견은 언제나 새로운 의문으로 이어졌다. 아직도 초신성폭발이나 감마선폭발의 정확한 폭발 과정은 규명되지 않고 있으며 중성자별의 최대 질량조차 확인이 되지 않고 있다. 자연의 실체에 한 걸음 다가섰다고 믿는 순간, 자연은 우리에게 또 다른 의문을 남겨두고 한 걸음 멀어져 간 것이다. 아인슈타인 탄생 100주년에 즈음한 지금 새로운 천체 관측 및 이론의 발전을 통해 또 하나의 의문이 풀려지기를 기대해 본다.