2017 노벨 물리학상과 중력과 천체물리학의 전망

DOI: 10.3938/PhiT.26.044

이형목·이창환

Nobel Prize in Physics 2017 and the Prospects of Gravitational Wave Astrophysics

Hyung Mok LEE and Chang-Hwan LEE

Three early frontiers of gravitational wave science have been awarded Nobel prize in Physics in 2017. The detection of gravitational wave events became more frequent in the second observing run between November 2016 and August 2017 compared to the first observing run between September 2015 and January 2016, thanks to the increase of sensitivity of the LIGO and joining of Virgo in August 2017. The improvement in sky localization by the Virgo also contributed to the rapid finding of optical counterpart of the neutron star merger event on August 17, 2017. Together with the detection of the gamma-ray burst just 1.7 second after the gravitational wave made many telescopes in the ground and space join the follow-up observation campaign in almost all available wavelengths. The connection between the neutron star collision and the short gamma-ray burst has been clearly demonstrated through this unique event. We will be able to learn more about our universe by adding gravitational waves as another messenger to investigate the nature of the violent phenomena associated with highly compact objects.

스웨덴 한림원은 지난 10월 3일, 2017년 노벨 물리학상 수상자로 라이너 바이스(MIT), 킵 손, 그리고 배리 배리시(Caltech) 세 명을 지명하였다. 중력과 검출기인 LIGO를 제안하고 이를 실현시킨 공로를 인정한 것이다.

저자약력

이형목 교수는 프린스턴대학교에서 박사학위를 받았고 현재 서울대학교 물리천문학부 교수로 재직 중이며, 현재 한국중력파연구협력단 단장으로 활동하고 있다.(hmlee@snu.ac.kr)

이창환 교수는 서울대학교에서 박사학위를 받았고 현재 부산대학교의 교수로 재직 중이며 중력파연구협력단에서 활동하고 있다.(clee@pusan.ac.kr)

LIGO는 2002년 가동을 시작한 이래 2010년까지 꾸준한 성능 개선을 해 오면서 6차례 ‘과학 가동’을 한 바 있다. 마지막 과학 가동에서는 초기 LIGO의 설계 감도에 이르렀고 2010년부터 약 5년간 어드밴스드 LIGO(aLIGO라고 약칭함)로의 성능 향상 작업을 거쳐 2015년 9월부터 제1차 ‘관측 가동’을 시작하자마자 첫 중력파를 검출하였다. 2016년 1월 16일까지 진행된 1차 관측가동에서는 두 번 더 블랙홀 쌍성의 충돌에 의한 중력파를 발견하였다. 또 2016년 11월부터 2017년 8월까지 진행된 2차 관측 가동에서는 블랙홀 쌍성의 충돌에 의한 중력파를 3번 더 발견하였고 2017년 8월 17일에는 중성자별의 충돌에 의한 중력파를 발견하였다. 다음 관측 가동은 2018년 하반기에 시작될 예정이며 검출기의 감도가 더 좋아질 것이므로 훨씬 자주 중력파 검출이 이루어질 것으로 기대하고 있다.

2015년 9월 14일에 이루어진 첫 번째 발견이 관심을 끌었던 데는 몇 가지 다른 이유도 있다. 우선 aLIGO가 가동되기 전에는 블랙홀에 의한 충돌보다는 중성자별의 충돌에 의한 중력파를 기대했었다. 실제로 중성자별 쌍성계는 우리 은하에서 이미 여러 개가 발견되었으며 이들은 수십억 년 이내에 충돌할 것이라는 사실도 널리 알려져 있었다. 이를 바탕으로 중성자별 쌍성의 충돌 빈도수를 추정할 수 있다.^[1] 반면 블랙홀 쌍성은 빛을 전혀 내지 않기 때문에 그 존재에 대해 직접적으로 확인된 바가 없다. 다만 블랙홀과 보통 별로 이루어진 쌍성계는 별로부터 블랙홀로 물질이 빨려 들어가면서 X-선을 내는 천체로 관측될 수 있다. 이 경우 동반성이 매우 무거운 경우 진화를 마치고 블랙홀이 될 것이므로 블랙홀 쌍성의 전 단계에 있다고 추정할 수 있다.

블랙홀과 중성자별의 구별

중력과 검출기가 측정한 중력파형을 이용하면 쌍성계의 질량을 측정할 수 있다. 쌍성의 거리가 점점 가까워지면서 중력과

REFERENCES

- [1] C. Kim, B. B. P. Perera and M. A. McLaughlin, MNRAS **448**, 928 (2015).

Fig. 1. Gravitational waveform due to equal mass non-spinning black hole binary merger.

의 주기는 점점 짧아지고 진폭은 점차 커진다(그림 1). 이러한 양상을 음파에 적용시키면 마치 새가 짹짹대는 것과 같다고 해서 처프(chirp) 신호라고 부른다. 쌍성의 궤도가 뉴턴 역학을 따른다고 가정하고 중력과 발생량은 사극 모멘트 공식을 이용해 회전하지 않는 블랙홀 쌍성의 진동수 진화 양상을 구해보면 처프 질량 $M_c = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$ 는 진동수 f 와 진동수의 시간에 대한 변화율 $\dot{f}$ 로부터 간단히 구할 수 있다.^[2]

관측에서 구할 수 있는 f 와 $\dot{f}$ 는 거리와 상관 없는 양이기 때문에 거리에 무관하게 질량을 구할 수 있다. 다만 거리가 너무 멀어 적색편이 값 z 가 비교적 크다면 위 방법으로 구한 처프 질량과 실제 처프 질량 사이에는 $M_c(obs) = (1+z)M_c(true)$ 라는 관계가 성립한다.

즉 관측에 의해 결정된 질량은 실제 질량에 비해 $(1+z)$ 배 만큼 크다는 것이다. 중력과 관측만으로는 z 를 구할 수는 없다. 그러나 중력파의 진폭은 거리에 반비례해서 줄어들기 때문에 관측된 중력파의 진폭을 이용해 거리를 측정할 수 있다. 충분히 가까운 천체의 경우 허블 상수를 가정하면 거리로부터 적색편이를 간단히 구할 수 있다.

처프 질량은 쌍성을 형성하는 두 천체의 질량의 조합으로 결정되기 때문에 처프 질량으로부터 각각의 질량을 구하는 것은 불가능하다. 다만 실제 중력파형은 처프 질량뿐 질량에 의해서도 결정되기 때문에 두 질량을 따로 구하는 것이 전혀 불가능한 것은 아니지만 개별 질량의 오차는 비교적 큰 편이다. 또 블랙홀의 회전을 고려하면 중력파형만으로 회전과 질량 비를 각각 구하는 것이 더욱 어려워진다.

이러한 불확실성에도 불구하고 지금까지 발견된 중력파원은 대부분 블랙홀 쌍성이고 2017년 8월 17일에 발견된 것만이 중성자별 쌍성으로부터 온 것이라는 사실이 널리 받아들여지고 있다. 이는 블랙홀과 중성자별의 질량 사이에는 상당한 간극이 있기 때문이다.

중성자별은 거성 진화 단계의 마지막에 중심부에 형성된 철 핵이 붕괴하여 형성되는데, 철 핵의 질량이 찬드라세카 질량보다는 커야 한다. 찬드라세카 질량은 축퇴된 전자의 압력으로 유지할 수 있는 최대 질량을 말한다. 찬드라세카 질량을 넘어서면 축퇴된 전자의 대부분은 상대론적인 에너지를 가지며 이러한 경우에는 안정된 상태를 유지할 수 없기 때문에 더 수축해 밀도가 매우 높은 중성자별이 될 수 있다. 단, 찬드라세카 질량은 구성 물질의 양성자와 중성자 구성비에 의존하므로 백생왜성의 상한 질량보다 작은 질량을 가진 중성자별도 가능하다. 중성자별 역시 한계 질량을 넘어 질량이 유입되면 압력이 중력을 이기지 못해 블랙홀로 변하게 된다.

중성자별 내부의 상태 방정식은 축퇴된 전자의 상태 방정식에 비해 훨씬 불확실하다. 이러한 상태방정식의 불확실성은 중성자별의 최대 질량의 불확실성으로 연결된다. 중성자별의 최대 질량을 오펜하이머-볼코프의 질량^[3]이라 부르며 이론적으로는 태양 질량의 2~3배 사이에 있다고만 알려져 있다. 지금까지 관측적으로 알려진 중성자별의 최대 질량은 약 2배의 태양 질량이다.^[4]

무거운 별이 진화를 마치고 중심핵의 질량이 충분히 커서 초신성 폭발 후 중성자별을 만들 수 없다면 블랙홀이 생성될 것이다. 이러한 블랙홀의 존재는 간접적이기는 하지만 X-선 쌍성의 관측으로부터 알려져 있었다. 우리 은하에 다수 존재하는 X-선 천의 대부분은 쌍성계에 속하고 있으며 블랙홀이나 중성자별과 같은 밀집성과 주계열이나 거성과 같은 일반 별로 이루어져 있다고 믿어진다. 이러한 쌍성계에서는 별로부터 나온 물질이 밀집성으로 끌려 들어가면서 매우 높은 온도로 가열되어 X-선을 내는 것이다.

X-선 쌍성계에 대한 분광 관측으로부터 별의 시선 속도를 측정해 보면 규칙적인 변화를 보이는 것들이 있다. 이는 쌍성계 내에서의 궤도 운동에 의한 것이므로 주기와 속도를 이용해 밀집성의 질량을 측정할 수 있다. 물론 이렇게 측정하는 밀집성의 질량에는 상당한 오차가 수반된다. 그럼에도 불구하고 많은 수의 X-선 천체에 속한 밀집성의 질량은 태양 질량의 3배를 훨씬 넘고 이들은 모두 블랙홀이라고 추정한다.

지금까지 관측된 중력파원 가운데 블랙홀로 분류된 계의 물리량들은 표 1에 정리되어 있다. 질량 범위는 태양 질량의 7.5

REFERENCES

- [2] J. D. E. Creighton and W. G. Anderson, *Gravitational-Wave Physics and Astronomy* (Wiley-VCH, 2011).
- [3] J. R. Oppenheimer and G. M. Volkoff, *Phys. Rev.* **55**, 374 (1955).
- [4] P. B. Demorest, T. Pennucci, S. M. Ransom, M. S. E. Roberts and J. W. T. Hessels, *Nature* **46**, 1081 (2010).

Table 1. Physical parameters of black hole binaries that were observed by the LIGO during the first and the second observing runs. The masses are those in source frame.

이름	$m_1(M_{\text{sun}})$	$m_2(M_{\text{sun}})$	$M_c(M_{\text{pc}})$	거리 (Mpc)	출처
GW150914	36.2(+5.2-3.8)	29.1(+3.7-4.4)	28.1(+1.8-1.5)	420(+150-180)	[5]
LVT151012	23(+18-6)	13(+4-5)	15.1(+1.4-1.1)	1000(+500-500)	[6]
GW151226	14.2(+8.3-3.7)	7.5(+2.3-2.3)	8.9(+0.3-0.3)	440(+180-190)	[6]
GW170104	31.2(+8.4-6.0)	19.4(+5.3-5.9)	21.1(+2.4-2.7)	880(+450-390)	[7]
GW170608	12(+7-2)	7(+2-2)	7.9(+0.2-0.2)	340(+140-140)	[8]
GW170814	30.5(+5.7-3.0)	25.3(+2.8-4.2)	24.1(+1.4-1.1)	540(+130-210)	[9]

Fig. 2. Histogram of black hole masses that are in the X-ray binaries (red) and black hole binaries detected by LIGO/Virgo (blue and green). Note that masses of the X-ray sources are systematically lower than those gravitational wave sources.

배에서 36배 사이에 놓여 있는 것을 볼 수 있다. 이들은 모두 블랙홀로 간주하는 것이 가장 합당한 해석일 것이다.

그림 2에는 중력파에 의해 발견된 블랙홀의 질량과 우리 은하의 X-선 쌍성계에 속한 블랙홀의 질량 분포를 보여주고 있다. 중력파를 통해 측정된 블랙홀의 질량이 대체로 큰 값을 보이는 것을 볼 수 있다. 이는 과연 무엇을 의미하는 것일까?

우선 중력파에 의해 측정된 블랙홀의 질량이 큰 것은 일종의 선택 효과로 해석할 수 있다. 쌍성계가 내는 중력파의 세기는 질량에 대체로 비례한다. 따라서 질량이 큰 블랙홀 쌍성계는 상대적으로 먼 곳까지 관측이 가능하며 관측할 수 있는 확률을 높인다. 마치 광도가 높은 별과 낮은 별이 공간적으로 똑같이 분포한다면 광도가 높은 별을 더 많이 관측할 수 있게 되는 것과 같은 원리이다.

그렇다면 우리 은하에서 발견되는 블랙홀의 질량이 대체로 작은 이유는 무엇일까? 별의 진화를 마치고 만들어지는 블랙홀의 질량은 블랙홀로 진화하는 항성의 초기 질량과 무거운

원소의 함량비에 의해 결정된다. 무거운 원소가 많이 포함된 별은 진화를 겪으면서 많은 양의 질량을 항성풍으로 잃어버린다. 또 블랙홀이 만들어지는 마지막 수축 단계에서 많은 에너지가 나올 수 있어 항성이 가지고 있던 질량의 상당량을 밀어낼 수 있다. 이 과정에서 무거운 원소들이 빛 에너지를 상대적으로 잘 흡수하기 때문에 질량 손실과 무거운 원소 함량 사이에는 밀접한 관계가 있다. 결국 무거운 원소 함량이 큰 별은 상대적으로 작은 질량의 블랙홀을 남기게 된다.

우주가 탄생하던 시절의 물질은 거의 대부분 수소와 헬륨만으로 구성되어 있었고 무거운 원소는 거의 존재하지 않았다. 탄소, 산소, 질소를 비롯한 무거운 원소는 모두 별 내부에서 만들어져 초신성이나 항성풍을 통해 공간으로 배출된 것이므로 제1세대 별은 거의 무거운 원소를 가지고 있지 않았으나 시간이 지나면서 점차 무거운 원소가 많이 포함된 가스로부터 별이 만들어지게 된다. 현재 태양의 대기에는 헬륨보다 무거운 원소의 질량 함량이 약 1.3% 정도 된다. 은하에 존재하는 성간물질에 포함된 무거운 원소의 함량은 시간이 지날수록 많아진다.

우리 은하에 있는 X-선 쌍성계는 모두 최근에 만들어진 것이다. 블랙홀을 남기는 항성의 초기 질량은 태양 질량보다 적어도 25배 이상이 되어야 하며 이들의 수명은 천만 년을 넘지 않는다. 현재 동반성이 아직 블랙홀이나 중성자별로 진화하지 않고 존재한다는 사실은 이들이 만들어진 지 수천만 년 이상 경과하지 않았고 원소가 많이 포함된 환경에서 만들어졌음을 말해준다. 최근에 우리 은하에서 만들어진 블랙홀은 질량이 비교적 작을 수밖에 없다.

REFERENCES

- [5] B. P. Abbott, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 221101 (2017).
- [6] B. P. Abbott, *et al.*, Phys. Rev. X **6**, 041015 (2016).
- [7] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 201101 (2017).
- [8] B. P. Abbott, *et al.*, arXiv:1711.05578 (2017).
- [9] Y.-B. Bae, C. Kim and H. M. Lee, MNRAS **440**, 2714 (2014).

쌍성계 궤도가 완전히 수축해 쌍성계가 충돌할 때까지 걸리는 시간은 장반경의 네 제곱에 비례한다. 쌍성계가 진화해 만들어지는 블랙홀 쌍성계의 장반경의 분포는 잘 알려져 있지 않다. 다만 애초부터 궤도 장반경이 컸던 쌍성계가 만드는 블랙홀 쌍성은 장반경이 너무 커서 충돌할 때까지 걸리는 시간은 우주의 나이보다 훨씬 크다. 반면 두 별이 처음부터 아주 가까이 있어 먼저 만들어진 블랙홀이 나중에 진화해 거성 단계에 접어든 동반성의 바깥 부분에 포함되는 공통 외피(common envelope) 과정을 거친다면 외피 부분이 팽창하고 가운데 남은 핵으로부터 만들어지는 블랙홀과 먼저 만들어진 블랙홀 사이의 거리가 너무 가까워 아주 짧은 시간에 블랙홀이 충돌할 가능성이 높다.

중력파로 관측된 블랙홀은 우리 은하에 있는 것이 아니며 중원소 함량이 작았던 우주 초기에 만들어져 오랜 시간 동안 궤도 진화를 거쳐 오늘날에 합병을 했을 수도 있고 중원소 함량이 작은 환경에서 최근에 아주 작은 궤도 반지름을 가지고 만들어져 짧은 진화를 거쳐 충돌한 것일 수 있다. 실제로 많은 왜소 은하들에는 중원소 함량이 우리 은하보다 훨씬 적다는 사실이 잘 알려져 있다. 우리 은하의 위성 은하인 대마젤란 성운이나 소마젤란 성운이 그 좋은 예이다. 다만 왜소 은하의 숫자는 많지만 우주에서 차지하는 질량은 매우 적기 때문에 이들이 충분한 숫자의 블랙홀 쌍성을 만들어 내기는 어렵지 않을까 생각한다.

마지막으로 블랙홀이 밀도가 매우 높은 항성계에서 따로 만들어진 후 역학적 상호 작용을 통해 근접 쌍성이 되었을 가능성도 있다.^[9,10] 우리 은하를 비롯해 대부분 은하에 존재하고 있는 구상 성단은 중원소 함량이 아주 적은 초기 우주에 생성된 것들이다. 구상 성단의 항성 밀도는 은하의 다른 영역에 비해 수만 배에서 수백만 배 더 높다. 이러한 고밀도 항성계 안에도 항성 진화를 통해 만들어진 블랙홀들이 있었을 것이며 이들이 역학적 상호 작용을 하면서 쌍성을 만들 수 있다는 것이다. 중력파를 통해 관측된 블랙홀 쌍성이 무거운 별로 이루어진 쌍성계의 진화를 통해 만들어진 것인지 아니면 독립적으로 존재하던 블랙홀들이 구상성단과 같은 밀집된 쌍성계에서 역학적 상호 작용을 통해 만들어진 것인지 구별하는 것은 쉽지 않은 일이다. 전자의 경우 블랙홀의 회전축은 공전축과 나란히 있을 것이며 후자의 경우에는 공전축과 자전축 사이에는 아무런 관계가 없을 것으로 기대한다. 그러나 지금까지 중력파로 관측한 중력파 쌍성계에 속한 블랙홀의 회전 각운동량이 너무 작기 때문에 자전축을 정확히 측정하는 것이 매우 어려운 실정이다.

블랙홀의 충돌에 의한 중력파 현상은 매우 흥미로운 것임에 틀림없지만 중력파 이외의 다른 신호를 내지 않는다. 반면 중

성자별의 충돌은 중력파 이외에도 다양한 과정에서 빛을 내기 때문에 보다 흥미로운 연구가 가능하다. 이러한 기대에 부응하는 천체가 2차 관측가동 종료 2주를 남겨 놓고 발견되었다.

중성자별 충돌에 의한 중력파 관측과 의의: GW170817

2017년 8월 17일 두 중성자별 충돌에서 발생한 중력파 GW170817이 검출되었으며, 2017년 노벨 물리학상 수상자 발표 직후인 2017년 10월 16일 GW170817의 검출 소식이 공식으로 발표되었다.^[11] 중력파 분석을 통해 쌍성을 구성하는 천체의 질량이 중성자별의 질량에 해당한다는 사실과 그 이후에 관측된 다양한 전자기파 현상은 우리의 기대와 잘 부합한다. 그림 3에 정리된 바와 같이 중력파 검출에 이어 약 1.7 초 뒤 감마선 GRB 170817A 검출을 시작으로, 다양한 파장의 전자기파 후속 관측에 성공함으로써 중력파를 포함한 다중신호 천문학이 가능하게 되었다.^[12]

먼저 두 중성자별 발생하는 중력파 검출의 과학적 의미를 살펴보자. 블랙홀과 달리 중성자별은 내부 구조를 가지고 있으므로 외부에서 조석력(tidal force)이 가해지면 구 대칭 모양에서 변형이 일어날 수 있다. 즉, 두 중성자별의 공전 과정에서 형성된 외부 사중극자 조석장(external quadrupole tidal field)에 의해 중성자별의 사중극자 모멘트(quadrupole moment)가 변할 수 있다. 외부 사중극자 조석장에 의해 야기되는 중성자별 사중극자 모멘트 사이에는 비례관계가 성립하며 그 비례 상수를 조석변형률이라 부른다. 조석변형률은 중성자별의 내부 구조에 의존하며 중성자별의 상태방정식이 주어지면 수치 계산으로 얻을 수 있다. 그런데 중력파 검출은 레이저 간섭계의 두 진공관을 통과하는 중력파의 위상 차이를 이용하므로, 변형된 중성자별의 회전에 의한 중력파의 위상 차이를 이용하여 중성자별의 조석변형률을 구할 수 있고, 이를 통해 중성자별 상태방정식을 검증할 수 있다.

이번 관측에서 GW170817의 중력파 신호를 분석하여, 오차가 크기는 하지만, 최초로 중성자별의 조석변형률을 구하였다.^[13] 조석변형률은 중성자별의 내부 구조뿐 아니라 중성자별의 질량에 의존하는데, 중력파를 통하여 중성자별 질량과 조석변형률을 동시에 관측함으로써, 중력파를 통한 중성자별 내부 구조 연구 가능성을 확인시켜 주었다. 기존의 전자기파 관측으

REFERENCES

- [10] D. Park, C. Kim, H. M. Lee, Y.-B. Bae and K. Belczynski, *MNRAS* **469**, 4665 (2016).
- [11] B. P. Abbott, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 141101 (2017).
- [12] B. P. Abbott, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017).
- [13] B. P. Abbott, *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **848**, L12 (2017).

Fig. 3. Sequence of the gravitational waves emission due to the merging of neutron stars (GW170817), gamma-ray burst (GRB 170817A), visible light, X-ray and radio waves. [Figure credit: Myungshin Im, Seoul National University]

로는 중성자별의 질량과 반경과 같은 거시적인 특성 외에는 확인이 어려운데, 중성자별 내부 추가 정보를 중력파를 통해 얻을 수 있게 된 것이다. 두 중성자별의 충돌에서 발생하는 중력파 검출이 중요한 이유이다. 수 년 내에 aLIGO의 중력파 검출 감도가 목표치에 도달하게 되면 훨씬 많은 중성자별 충돌에 의한 중력파 검출이 예상되므로, 중력파를 통하여 중성자별 내부 상태방정식을 검증할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 가능성은 핵천체물리학 및 고밀도 물질 상태 연구에도 새로운 활력소가 되고 있다.

다음으로 다중신호천문학적 의미를 살펴보자. 중성자가 발견된 이후 중성자만으로 구성된 별의 존재가 예측되어 중성자별이란 이름이 붙여졌지만, 실제로는 중성자뿐 아니라 양성자와 전자도 존재하며 중심부에는 쿼크로 구성된 상태까지 존재할 수 있는 것으로 예측되고 있다. 페르미온 입자의 특성상 밀도가 높아질수록 중성자의 에너지가 증가하여, 중성자가 양성자와 전자로 변하는 것이 전체 에너지를 낮추어 중성자별의 안정화에 기여하기 때문이다. 또한 중성자별은 일반적으로 $10^8 \sim 10^{12}$ 가우스의 자기장을 가지고 있으며 자전하고 있다. 이와 같이 중성자별은 자기장뿐 아니라 전하를 띤 많은 입자를 가지

고 있으므로 충돌과정에서 다양한 파장의 전자기파를 방출할 수 있다. 중성자별 충돌에서 예상되는 대표적인 전자기파 방출 현상이 감마선폭발(gamma-ray burst)과 킬로노바(kilonova) 및 후광(afterglow)이다.

감마선폭발은 수 분 이내에 매우 강한 감마선을 방출하는 천체 현상으로 감마선 지속 시간이 2초보다 긴 경우와 짧은 경우로 크게 구분된다. 지속 시간이 2초보다 긴 감마선폭발은 거성의 진화 마지막 단계에서 중심부에 블랙홀이 형성되면서 일어나는 것으로 추정되고 있다. 지속 시간이 2초보다 짧은 감마선 폭발의 원인으로는 두 중성자별 또는 중성자별과 블랙홀의 충돌이 지목을 받고 있다. 자기장을 가진 두 중성자별이 충돌하는 과정에서 공전축 방향으로 강한 감마선이 방출될 수 있는데, 중력파 GW170817 검출 후 약 1.7초 뒤에 천구의 같은 방향에서 GRB 170817A로 명명된 감마선폭발이 관측되었다. 기존의 감마선폭발 관측에서는 폭발의 원인이 되는 천체의 규명이 불가능했는데, 중력파를 통한 질량 확인이 동시에 이루어짐으로서 감마선폭발의 원인이 된 천체를 최초로 규명할 수 있게 되었다. 이런 의미에서 GW170817과 GRB 170817A의 동시 관측은 다중신호천문학의 새로운 가능성을 확인시켜 준

역사적인 사건이다.

중성자별 충돌에서 예상되는 감마선 폭발과 가시광선, 엑스선, 자외선 및 전파에 걸친 후광이 이번에 모두 관측되었다.^[13] 인류 최초로 중력파와 다양한 파장의 전자기파 동시 관측에 성공한 것이다. 그림 3에 중력파(GW170817) 검출 이후 이루어진 전자기파 관측의 파장대 별 관측 시간이 정리되어 있다. 그림 속에 설명된 바와 같이 국내연구진도 가시광선 영역의 후속 관측에 성공하였다.^[14,15] 관측되는 폭발의 전체 에너지는 두 중성자별의 공전축과 관측 시선 방향에 크게 의존하는데, 시선 방향이 공전축과 같으면 매우 강한 감마선이 관측되지만, 시선 방향과 공전축이 일치하지 않은 경우 관측되는 감마선 에너지가 감소하게 된다.^[16] 또한 회전면을 중심으로 충돌과정에서 방출된 많은 물질들이 원반 형태로 존재할 수 있으므로, 시선 방향이 공전축에서 벗어날수록 다양한 파장의 후광이 관측될 것으로 예상된다. 만약 시선 방향과 공전축이 일치하지 않아, 관측되는 에너지의 양이 일반적인 감마선폭발 에너지보다는 작지만 신성(nova)의 약 1000배 정도인 폭발 현상을 킬로노바(kilonova)로 부르는데, 이번 관측이 킬로노바에 해당하는 것으로 추정된다. 중성자별 충돌 과정에서 많은 중성자가 외부로 방출될 수 있으므로, 빠른 천체핵반응(r-process)을 유도하여, 초신성으로는 형성이 어려운 금이나 우라늄 같은 무거운 원소가 생성되는 것으로 믿어지고 있다.

다중신호천문학은 우주론 분야에서도 새로운 가능성을 제시하였다. 전자기파를 이용하여 먼 은하까지의 거리를 직접 재는 것은 매우 어려워 다양한 간접적인 방법이 사용되고 있다. 앞서 설명한 것처럼 중력파 관측을 이용하면 중력파의 원인이 되는 블랙홀과 중성자별의 질량을 직접 구할 수 있으므로, 두 별의 충돌에서 예상되는 중력파 진폭과 검출된 중력파 진폭을 비교하여 거리를 직접 추정할 수 있다. 이번 다중신호 관측에

서 GW170817의 중력파 신호로부터 직접 추정된 외부 은하까지의 거리와 전자기파 후속 관측으로 얻은 적색편이 값을 이용하여 허블상수를 구할 수 있었다.^[17] 비록 기존의 허블상수 값에 비해 오차 범위는 넓지만 중력파와 전자기파의 동시 관측이 우주론에도 직접 기여할 수 있음을 보여준 것이다. 앞으로 더 많은 중성자별 쌍성에 의한 중력파가 관측되고 이들이 속한 모은하가 특정된다면 허블 상수 값의 통계 오차는 점차 줄어들 것이다.

맺는말

중력파를 처음 관측하는 과정은 매우 험난하고 긴 여정이었지만 2015년 9월 첫 중력파의 관측에 성공 이래 매우 빠른 발전이 이루어지고 있다. 여섯 차례 관측된 블랙홀 쌍성의 충돌 현상으로부터 우리는 다양한 질량의 블랙홀이 우주에 존재하고 있음을 알 수 있었다. 2017년 8월 17일에 발견된 중성자별 쌍성의 충돌은 그동안 수수께끼로 남아있던 짧은 감마선 폭발 현상이 실제로 중성자별의 충돌로부터 나온다는 사실을 확인시켜 주었다. 우리에게는 우주를 볼 수 있는 새로운 창문이 열린 것이다. 중력파 관측을 통해 우리는 그동안 전자기파만으로 알기 어려웠던 여러 가지 현상을 더 잘 이해할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [14] E. Troja, L. Piro, H. van Eerten, R. T. Wollaeger, M. Im, *et al.*, *Nature* **551**, 71 (2017).
- [15] M. Im, Y. Yoon, S.-G. Kim, H. M. Lee, *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **849**, L16 (2017).
- [16] B. D. Metzger and E. Berger, *ApJ* **746**, 48 (2012).
- [17] B. P. Abbott *et al.*, *Nature* **551**, 85 (2017).