중력과 검출의 의의와 전망¹⁾

DOI: 10.3938/PhiT.25.007

이 형 목

Gravitational Wave Detection: Its Significance and Perspectives

Hyung Mok LEE

On September 14, 2015, gravitational waves were nearly simultaneously detected directly for the first time by two Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) detectors, one located at Livingston, Louisiana, and the other at Hanford, Washington, USA. Careful analysis revealed that this signal was produced by the last moment of the inspiral and merger of two black holes that had been orbiting each other for a long time. Astronomers will be able to learn about the natures and the origins of such exotic objects by analyzing more gravitational wave emitting events as the sensitivity of the detector increases. This article provides a very brief overview of the nature of gravitational waves, the detection principles, and the outlook for gravitational wave science.

서 론

아인슈타인의 일반상대론에 의하면 물체가 가속될 때 중력파가 방출되어 빛의 속도로 전파된다. 그러나 중력이라는 힘이 또 다른 장거리 힘인 전자기력에 비해 너무 작기 때문에 측정이 매우 어렵다. 지난 수십 년간의 노력 끝에 리빙스턴과 워싱턴 주의 헨포드에 위치한 두 대의 라이고 중력과 검출기(그림 1)가

Fig. 1. Views of LIGO Livingston (upper) and LIGO Hanford (lower) [Image source: LIGO Homepage <http://www.ligo.org>]

지난해 9월 14일 오후 6시 51분경 동시에 두 개의 블랙홀이 충돌하면서 내는 중력파를 검출했다.^[1] 그러나 라이고(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO)를 이용한 과학 연구를 책임지고 있는 LSC(LIGO Scientific Collaboration)는 검출이 이루어진 지 거의 5개월 가까이 지나서야 이 사실을 공식적으로 발표하였다. 모든 잘못될 수 있는 가능성을 검토하고 검출 데이터가 의미하는 바를 완벽하게 검증한 후 학술지에 투고하여 엄격한 심사를 통과한 후에야 비로소 검출

저자약력

이형목 교수는 미국 프린스턴 대학에서 천체물리학으로 1986년 박사학위를 받은 후 토론토 대학 내에 있는 캐나다 이론천체물리 연구소에서 연구원으로 일하다가 1989년부터 1998년까지 부산대학교 지구과학 교육과 교수로 재직한 후 1998년 서울대학교 천문학과(현 물리천문학부)로 옮겨 현재에 이르고 있다. 현재 한국중력파연구협력단 단장을 맡고 있다. (hmlee@snu.ac.kr)

REFERENCES

- [1] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016).

1) 이 글은 다음 새물리 논문을 바탕으로 작성되었습니다: Hyung Mok Lee, New Physics: Sae Mulli, Vol. 66, 258 (2016).

사실을 발표할 수 있었던 것이다. 이제 중력과 검출은 기정사실이 되었고 앞으로 더 많은 검출이 이루어질 것으로 기대하고 있다. 이 논문에서는 GW150914라고 명명된 이번 검출과 관련하여 중력파에 대한 개략적인 소개와 검출기 개요, 실험 내용, 그 의의 그리고 전망에 대해 간단히 기술하고자 한다. 여기에서 자세히 언급하지 못하는 중력과 검출의 역사, 검출기의 상세한 구조 및 국내에서 새로 연구하고 있는 초전도체를 이용한 텐서 검출기, 앞으로 전개될 중력과 천체물리학이나 중력과 천문학, 라이고의 자료 분석 기법 등에 대해서는 동반 논문에서 자세히 설명하고 있다.^[2-5] 중력파에 대한 좀 더 심도 있는 소개와 중력파원, 검출기의 개요 등에 대한 해설, 최근 이루어진 중력과 검출기의 개선편 작업, 그리고 자료 처리 기법 등에 대한 소개는 다른 논문에서 다룬 바 있다.^[6]

중력파의 개요

맥스웰의 이론에 의하면 전자가 가속될 때 전자기파가 발생되어 빛의 속도로 전파된다. 이와 마찬가지로 중력파는 질량을 가진 물체가 가속될 때 발생하는 시공간의 요동이며 이 요동이 빛의 속도로 전파되는 것이다. 전자기파의 경우 전기장과 자기장이 수직된 방향으로 진동하면서 나아가는 횡파인 반면 중력파는 중력장 자체가 진동하면서 전달되는 횡파이다. 이러한 중력파의 존재는 아인슈타인의 일반상대론에서 자연스럽게 나타나는 현상이다. 특수상대론과 마찬가지로 일반상대론도 빛의 속도는 관측자에 무관하게 일정하다는 상대성 원리를 바탕으로 둔 것이기 때문에 중력장에 섭동을 가하면 그 섭동이 빛의 속도로 전달된다는 사실을 쉽게 볼 수 있다. 전자기파의 경우 맥스웰 방정식에 작은 선형 섭동을 가하면 횡파인 전자기파가 빛의 속도로 퍼져 나가는 것을 쉽게 설명할 수 있다.

전자기파를 만들어내는 전하의 양과 음이 있으나 중력장을 만들어내는 질량은 양의 질량밖에 없다. 이런 이유 때문에 파원으로부터 멀리 떨어진 관측자는 주로 전기 쌍극모멘트의 진동에 의해 만들어지는 전기장의 진동을 보게 된다. 중력장의 경우에는 쌍극 모멘트가 존재하지 않기 때문에 가장 큰 기여를 하는 것은 사극 모멘트이다. 즉 중력파원으로부터 멀리 떨어진 관측자가 보는 중력파는 사극 모멘트의 가속에 의한 것이다. 이러한 사극 모멘트에 의해 만들어지는 중력파의 진동은 그 진폭이 매우 작기 때문에 타원 모양의 일그러짐으로 형상화할 수 있다. 사극 모멘트의 주기적인 진동은 상하 방향과 좌우 방향으로 일그러짐이 반복되는 것을 뜻한다. 이때 일그러지는 방향을 상하와 좌우로 표시한 것은 특정한 좌표계를 택했기 때문이며 임의의 방향과 그 방향에 수직된 방향으로 반복적인 일그러짐이 나타나는 것이다. 이러한 임의의 일그러진 방

Fig. 2. Plus (left) and cross (right) polarization of gravitational waves [Illustration from [7]].

향을 전자기파에서 전기장의 진동 방향을 뜻하는 편광 방향이라 부른다. 전자기파의 경우에는 두 개의 수직된 편광 벡터를 정의한 후 이 두 벡터의 적절한 합성을 통해 임의의 편광 방향을 표현할 수 있는 것처럼 중력파의 경우에는 서로 45도 기울어진 두 개의 편광을 정하고 이 두 편광의 합성으로 임의의 편광을 표현할 수 있다. 서로 45도 기울어진 두 편광 방향을 각각 +와 ×로 표현하며 +는 플러스, ×는 크로스라고 부른다(그림 2).

중력파도 파동이기 때문에 진폭과 진동수로 특징지어진다. 중력파의 진폭 h 는 두 개의 고정된 점 사이의 거리의 상대적인 변화에 비례한다. 좀 더 구체적으로 표현하자면 두 개의 고정된 점 사이의 거리가 L 일 경우 L 보다 파장이 훨씬 큰 중력파가 지나가면 순간적으로 길이의 변화 $\Delta L = \frac{1}{2} L h$ 만큼 변하게 된다. 중력과 검출기는 이러한 길이의 반복적인 변화를 읽어냄으로써 진폭과 진동수를 구하는 것이다.

그러나 중력파의 진폭은 매우 작다. 사극 모멘트의 가속과 중력과 진폭 사이에는 대략적으로 다음과 같은 관계가 있다.

$$h \sim \frac{G\ddot{Q}}{c^4 r}$$

여기서 G 와 c 는 각각 중력상수와 빛의 속도, Q 는 사극 모멘트, 그리고 r 은 파원까지의 거리이다. 질량이 M 이고 크기가

REFERENCES

- [2] J. J. Oh and G. Kang, New Phys.: Sae Mulli **66**, 264 (2016).
- [3] H. Paik, K. Cho, H. M. Lee and J. W. Kim, New Phys.: Sae Mulli **66**, 272 (2016).
- [4] S. H. Oh, E. J. Son, H. W. Lee, Y.-M. Kim, W. Kim, J. J. Oh and J. Kim, New Phys.: Sae Mulli **66**, 283 (2016).
- [5] C. Kim, H. S. Cho, H. W. Lee, C.-H. Lee, H. K. Lee and G. Kang, New Phys.: Sae Mulli **66**, 293 (2016).
- [6] H. M. Lee, C. Lee, G. W. Kang, J. Oh, C. Kim and S. H. Oh, Publ. Kor. Ast. Soc. **26**, 71 (2011).
- [7] B. S. Sathyaprakash and B. F. Schutz, Living Reviews **12**, 2 (2009), <http://www.livingreviews.org/lrr-2009-2>.

R 인 물체의 최대 사극 모멘트는 MR^2 이고 이 양을 시간에 대해 2차 미분한 값은 대략 $\ddot{Q} \sim MR^2/(\Delta t)^2 < Mc^2$ 이다. 즉 어떤 천체로부터 나오는 중력파의 최대 진폭은 $h \sim GM/c^2 r$ 이 된다. 여기서 $\ddot{Q} \sim Mc^2$ 이라고 표현하면 정지질량 에너지 전체를 중력파로 방출하는 것을 의미한다. 물론 정지질량 에너지 전체를 중력파로 방출하는 것은 불가능하다. 그러나 질량이 비슷한 블랙홀이 쌍성을 이루고 있다가 중력파를 내면서 충돌할 경우 약 5%의 정지질량 에너지를 중력파로 방출하게 된다. 만약 질량이 작은 블랙홀이 훨씬 큰 블랙홀과 병합할 때는 약 10%의 질량이 중력파로 방출된다.

이러한 전제 하에 거리 r 에 있는 질량 M 인 천체가 중력파를 낸다면 최대 진폭이 어느 정도 되는지 추정해 보면 다음과 같다.

$$h \sim 5 \times 10^{-22} \left(\frac{\epsilon}{0.1} \right) \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \left(\frac{10 \text{ Mpc}}{r} \right)$$

여기서 ϵ 은 질량이 중력파로 변환되는 비율을 뜻하고 $M_\odot$ 는 태양 질량이다. 이번에 검출된 중력파를 낸 블랙홀 쌍성계의 전체 질량은 $65M_\odot$, $\epsilon \sim 0.05$, 그리고 $r \sim 400 \text{ Mpc}$ 이었으며 최대 진폭은 약 10^{-21} 이었다.

이렇게 격렬한 블랙홀의 충돌에 의한 중력파의 진폭조차도 매우 작은 값이다. 참고로 진폭 10^{-21} 은 4 km짜리 중력파 검출기의 팔의 길이가 원자핵 크기의 약 1/1000 정도 변한 양이다.

중력과 검출기

중력파가 만들어내는 공간의 요동은 위에서 살펴본 것과 같이 아주 미세한 양이다. 중력파 검출기는 이렇게 미세한 길이의 변화를 읽어내야 한다. 더 구체적으로 말하면 시간과 공간의 간격이 진동하면서 변한다는 뜻이다. 그러나 실제 검출기의 크기는 중력파의 파장에 비해 훨씬 작기 때문에 중력파의 실제 효과는 두 점 사이의 거리를 늘였다 줄였다 하는 것으로 나타난다. 따라서 중력파 검출기는 중력파가 지나갈 때 나타나는 두 점 사이의 미세한 길이 변화를 측정하도록 고안되어 있다. 중력파 검출을 위한 시도는 1950년대에 미국의 물리학자인 조지프 웨버(Joseph Weber)에 의해 시작되었다. 그는 지름 1 m, 길이 2 m인 알루미늄 원통형 막대를 만들고 이 막대가 가지고 있는 고유 공명 진동수인 1660 Hz의 중력파가 지나갈 때 막대의 길이가 늘어나고 줄어들면서 나타나는 압전 효과에 의한 전류를 측정함으로써 중력파를 검출하고자 하였다. 이 장비는 그 당시로서는 매우 작은 약 10^{-16} m 의 길이 변화를 측정할 수 있을 정도로 정밀한 것이었지만 실제 천체로부터 오는

중력파를 검출하기에는 역부족이었다.^[6] 이를 위해 더 정밀한 검출이 가능한 레이저 간섭계가 제안되었다. 이 간섭계 개념은 기존의 L-자 모양의 마이켈슨 간섭계의 구조를 가지는데, 파장이 매우 정확하게 정의된 레이저를 빔분할기를 이용해 서로 수직인 두 방향으로 동시에 보내어 반사시켜 다시 모은 다음 이들의 간섭 형태의 변화로부터 두 방향의 길이 변화를 읽어내는 것이다. 이 방법을 이용한 중력파 검출기의 건설은 1989년 미국의 NSF로부터 승인을 받아 2001년 현재의 라이코가 완공되었다. 라이코의 한 팔의 길이는 4 km이다.

간섭기에 사용하는 레이저의 파워를 P_{laser} , 파장을 λ_{laser} 라 하자. 이러한 레이저를 모을 수 있는 최대 시간은 진동수 f_{GW} 인 중력파의 주기 $\tau \sim 1/f_{\text{GW}}$ 일 것이다. 이 기간 동안 레이저

가 발생시킨 광자의 수는 $N \sim \frac{P_{\text{laser}}}{\hbar \omega_{\text{laser}}} \times \tau$ 이다. 여기서 $\hbar$

는 플랑크 상수이고, ω_{laser} 는 레이저의 진동수이다. 레이저 간섭계에서 위상 오차는 $\delta\phi \sim N^{-1/2}$ 이므로 팔의 길이 오차는 $\Delta L \sim \lambda_{\text{laser}} \delta\phi / (2\pi)$ 이다. 이를 관측 가능한 최소 진폭으로 환산하면 $h = \Delta L / L \sim N^{-1/2} \lambda_{\text{laser}} / (2\pi L)$ 이 된다. 이 식에 레이저의 파장 1 μm , 파워 1 W, 간섭계의 길이 4 km를 대입하고 진동수 $f_{\text{GW}} = 300 \text{ Hz}$ 인 중력파를 검출하려고 한다면 진폭 $h \sim 4 \times 10^{-18}$ 정도를 얻을 수 있다. 아직도 천체물리학적 중력파를 검출하기에는 역부족일 수 있다. 감도를 좀 더 높이려면 레이저 파워를 키우고 간섭계를 더 길게 만들면 된다. 실제로 이번에 중력파를 발견한 어드밴스드 라이코(Advanced LIGO)에서는 20 W의 레이저를 사용하였다. 그러나 간섭계의 팔을 물리적으로 증가시키는 것은 불가능하다. 그 대신 레이저를 여러 차례 반사시킨 후 빠져 나올 수 있도록 각 팔에 패브리 페로 공동(Fabry-Perot Cavity)을 포함시킴으로써 마치 팔의 길이가 수백 배 늘어난 것과 같은 효과를 얻을 수 있었다. 여기에 레이저 광원 방향으로 다시 들어오는 레이저를 반사시킴으로써 마치 더 높은 파워의 레이저를 사용하는 것과 같은 '파워 재생(Power Recycling)' 기법을 추가함으로써 어드밴스드 라이코는 최고 감도가 거의 $h \sim 10^{-23}$ 에 이르도록 설계되어 있다. 다만 중력파를 실제로 검출한 2015년 가동에서는 최대 감도의 약 1/3 정도에 도달했었다.

여기서 설명한 레이저 간섭계의 최대 감도는 레이저의 산탄 잡음만을 고려한 것이다. 그러나 레이저의 파워가 커지면 광자가 거울에서 반사될 때마다 가하는 복사압이 만들어내는 잡음이 중요해진다. 복사압은 레이저의 파워에 따라 증가하므로 산탄 잡음을 줄이기 위해 레이저의 파워를 한없이 높일 수는 없다. 높은 레이저 파워에서도 충분히 작은 복사압 잡음을 유지하기 위해서는 반사 거울의 질량을 높이면 되지만 역시 한계가 있을 것이다. 복사압 잡음은 레이저 광자의 숫자가 늘어날

수록 커지므로 낮은 진동수의 중력과 측정시 문제가 된다. 낮은 중력파를 측정하기 위해서는 상대적으로 더 긴 시간 동안 광자를 추적해야 하기 때문이다. 수백 Hz 이상의 진동수를 측정하는 데는 산탄 잡음만이 중요한 잡음원인 반면 그 이하의 진동수 영역에서는 복사압 잡음을 비롯한 다른 잡음을 고려해야 한다.

실제 현재 수백 Hz 이하의 진동수 영역에서 복사압 잡음 이외에도 거울을 매다는 현가 케이블(suspension cable)의 열적 잡음, 거울 표면에서 오는 열적 잡음, 지구 표면의 진동에서 오는 지진 잡음, 그리고 검출기 주변 물질의 밀도 요동에 의해 만들어지는 지구 자체 중력의 미세한 변동이 주는 뉴튼 잡음 등이 매우 복잡하게 섞여 있다. 궁극적으로 약 10 Hz 이하가 되면 검출 감도가 급격히 악화되어 저주파 중력파를 관측하기에는 부적합하다. 중력과 검출기와 관련된 잡음에 대해서는 동반논문 [3]에서 상세히 설명한다.

중력과 검출의 의의와 전망

이번에 발견된 것은 이미 잘 알려진 바와 같이 두 개의 블랙홀로 이루어진 쌍성이 중력파의 지속적 발생으로 인해 점차 궤도가 줄어들다가 최후의 순간에 막대한 양의 중력파를 낸 것이다. 라이고는 위에서 설명한 것처럼 수십 Hz에서 수 kHz 사이에서 가장 좋은 감도를 가지고 있다. 이런 진동수는 주로 중성자별이나 블랙홀로 구성된 쌍성의 최후 충돌 직전에 나타난다.

라이고가 태동하던 무렵인 1974년에 헐스(Russell Hulse)와 테일러(Joseph Taylor)는 PSR B1913+16이라 불리는 펄사가 약 8시간의 주기로 펄스 도착 시간이 변한다는 사실을 발견하였고 이러한 데이터를 분석하여 또 다른 중성자별과 궤도 운동을 하는 쌍성계에 속해 있음을 밝혀냈다. 지속적인 관측을 통해 이 쌍성계의 궤도는 서서히 줄어들고 있으며 아인슈타인의 이론에 의해 계산된 중력과 발생에 따른 예측과 정확히 일치하였다.^[8] 이 쌍성계는 앞으로 약 3억 년 후에는 충돌하게 될 것이다. 펄사는 빠르게 회전하는 중성자별이 전파를 주기적으로 내는 천체를 말한다. 모든 펄사는 중성자별이라 말할 수 있지만 중성자별이 모두 펄사로 관측되는 것은 아니다. 빨리 회전하면서 강한 자기장을 가지고 있어야 하기 때문이다.

그 이후에도 쌍성계에 속한 펄사가 더 발견되어 현재까지 10개가 알려져 있다. 이들의 궤도 분포를 분석하면 우리 은하에서 대략 어떤 비율로 중성자별 쌍성계가 중력파를 내는지 추정할 수 있다. 이 내용은 동반 논문 [5]에서 자세히 볼 수 있다. 펄사 쌍성계의 존재는 라이고를 건설할 수 있게 해 준 중요한 동기를 제공해 주었다. 검출할 수 있는 중력파를 내는

천체가 우주에 존재하며 충분한 감도에 도달한다면 이런 천체를 자주 관측할 수 있다는 확신이 있었기 때문이다.

당초 예상과 달리 이번엔 관측된 현상은 중성자별이 아닌 블랙홀의 충돌에 의한 것이었다. 중성자별 쌍성이 존재한다는 것은 블랙홀 쌍성이 존재할 수 있다는 간접적인 증거이기는 하지만 블랙홀 자체가 빛을 내지 않기 때문에 실제로 블랙홀 쌍성을 관측적으로 검증할 수는 없었다. 다만 무거운 별이 진화를 마치고 나면 그 질량에 따라 백색왜성, 중성자별 또는 블랙홀을 남긴다는 것은 항성 진화 이론이 오래 전부터 예측하고 있었고 많은 별들, 특히 무거운 별들은 쌍성계로 태어나기 때문에 두 별 모두 블랙홀을 남기며 최후를 마치면 자연스럽게 블랙홀 쌍성계가 만들어질 수 있다는 것은 자연스러운 현상이다.

실사 블랙홀이 쌍성계가 아니고 독자적으로 생성된다고 하더라도 쌍성계를 만들 가능성은 존재한다. 구상 성단이나 은하 중심부 같이 좁은 공간에 별들이 밀집되어 있는 경우에는 근접 상호 작용을 통해 쌍성이 만들어지기도 한다. 특히 구상 성단의 중심부에서는 이러한 현상이 효율적으로 일어날 수 있을 것이며 이렇게 만들어진 블랙홀 쌍성이 매우 자주 관측될 것이라는 예측이 많은 연구자들에 의해 제기되었다.^[9-11] 이번에 블랙홀 쌍성이 중성자별 쌍성보다 먼저 발견되었기 때문에 어느 정도 이런 예측이 맞아 들어간 것은 사실이지만 블랙홀 쌍성의 기원이 주로 성단에서 역학적인 원인에 의한 것이라는 이론을 검증해준 것은 아니다. 앞으로 더 많은 쌍성의 관측이 이루어지고 이들의 물리량에 대한 통계적인 데이터가 축적된 이후에나 블랙홀 쌍성의 기원이 자세히 규명될 수 있을 것이다.

GW150914의 분석으로부터 알 수 있었던 가장 놀라운 것은 블랙홀의 질량이었다. 항성 진화 이론으로부터 예측되는 블랙홀의 질량에는 상당한 불확실성이 존재해 왔다. 다만 블랙홀과 보통의 별이 쌍성을 이루면서 보통 별로부터 나온 물질이 블랙홀로 빨려 들어가면서 빛을 내는 것이라고 추정되는 X-선 쌍성계가 15개 정도 알려져 있고 이들의 궤도 분석을 통해 계산된 블랙홀의 질량은 대개 5에서 25 $M_{\odot}$ 사이에 놓여 있으며 10 $M_{\odot}$ 에 주로 집중되어 있기 때문에^[2] 많은 사람들이 별의 진

REFERENCES

- [8] H. M. Lee, Phys. High Technol. **20**(3), 35 (2011).
- [9] S. Banerjee, H. Baumgardt and P. Kroupa, Mon. Not. Roy. Ast. Soc. **402**, 371 (2011).
- [10] J. M. Downing *et al.*, Mon. Not. Roy. Ast. Soc. **416**, 133 (2011).
- [11] Y. B. Bae, C. Kim and H. M. Lee, Mon. Not. Roy. Ast. Soc. **440**, 2714 (2014).

2) W. R. Johnston, List of black hole candidates, <http://www.johnstonsarchive.net/relativity/bhctable.html>.

화로부터 만들어지는 블랙홀의 질량은 $10 M_{\odot}$ 라고 가정하고 있었다. 그러나 이번에 발견된 블랙홀 쌍성은 질량이 각각 $36 M_{\odot}$ 과 $29 M_{\odot}$ 였고 이들은 일반적인 예상치를 훨씬 뛰어 넘는 큰 값들이다. 물론 중력과 데이터를 이용해 추정한 질량에는 위 아래로 약 10% 내외의 오차가 있을 것으로 추정하고 있기는 하다. 그렇다 하더라도 지금까지 알려진 블랙홀 후보의 질량을 상회하는 것이다.

이제 처음으로 발견된 중력파원의 물리량으로부터 일반적인 결과를 추출할 수는 없다. 일반 별과 마찬가지로 블랙홀 역시 상당한 질량 범위를 가지고 있을 것이며 특히 질량이 클수록 강한 중력파를 내기 때문에 처음 발견은 질량이 큰 블랙홀이 아니면 상대적으로 지구에 가까운 쌍성계일 가능성이 있기도 하다. 그럼에도 기존 예상치를 벗어나는 질량의 블랙홀이 발견되었다는 사실은 비상한 관심의 대상이다. 이미 최근 들어 항성 진화를 연구하는 사람들 가운데는 블랙홀의 질량은 모항성의 중원소 함량비에 매우 민감할 수 있음을 지적하고 있다. 천문학에서 중원소는 헬륨보다 무거운 원소를 통칭하는 말이며 이들은 모두 항성 내부에서 핵융합을 통해 만들어진 것들이다. 따라서 제 1세대 항성은 거의 중원소가 포함하고 있지 않았던 반면 최근에 만들어진 별일수록 중원소 함량은 커진다. 중원소는 별 바깥 부분의 물질이 탈출하는 현상인 항성풍을 통해 별이 질량을 쉽게 잃어버릴 수 있게 만들기 때문에 중원소 함량이 클수록 탄생시 별의 질량과 최후를 맞을 무렵의 질량 사이에 큰 차이를 만들어 내게 된다. 똑같은 초기 질량을 가지고 있었다더라도 중원소 함량이 작은 별은 더 무거운 블랙홀을 남기게 될 수 있다는 것이다.

단 하나의 중력과 검출만으로도 이렇게 우리의 천문학적 지식에 미치는 영향이 크다. 이번 관측을 바탕으로 한 예측에 의하면 블랙홀 쌍성계의 충돌은 매년 수십 개 이상 관측될 가능성이 높다. 관측되는 빈도수도 중요하지만 블랙홀의 질량이나 회전과 같은 물리량들의 분포는 무거운 별의 진화, 쌍성계의 기원 등에 대해 더 많은 것을 알려줄 것이다. 측정된 중력파의 진폭은 파원까지의 거리를 측정할 수 있게 해 준다. 지금까지 천문학에서는 천체까지의 거리를 측정하기 위해 다양한 방법을 사용해 왔다. 이들은 대부분 경험적으로 추정한 광원의 절대 밝기에 바탕을 두고 있다. 반면 중력파의 진폭은 경험적으로 알려진 것이 아니라 정교한 이론을 통해 계산한 것으로 기존 방법과 완전히 독립된 새로운 방법이다. 다만 이러한 거리 측정 기법을 기존 방법으로 측정된 거리와 비교하기 위해서는 블랙홀 쌍성이 일어난 은하를 추정해야 하는데 중력파를 통해 하늘에서의 위치를 측정하는데는 상당한 오차가 있어 당장 활용하기는 어려울 것이다. 중력파원의 방향은 많은 검출기를 통해 동시에 관측할수록 정확해진다. 그러나 유럽의 Virgo와

함께 세 개의 검출기에 의해 동시에 관측되는 경우에도 추정되는 중력파원의 방향에 대한 오차 각도는 10도 가깝을 것이 다.

중성자별 쌍성의 충돌은 아직 관측하지 못했으나 조만간 발견될 것으로 기대하고 있다. 중성자별의 충돌은 아직까지 수수께끼로 남아있는 감마선 폭발체의 기원을 규명하는데도 큰 역할을 할 것이다. 감마선 폭발체 가운데 비교적 지속 시간이 짧은 것들은 중성자별의 충돌에 의해 만들어진다고 하는 것이 널리 받아들여지고 있는 이론이다. 만약 중성자별의 충돌에 의한 중력파가 감마선 폭발체와 동시에 발견된다면 이런 이론에 힘을 실어주는 것이 될 것이다. 그러나 중력파는 사방으로 골고루 퍼져 나가는 반면 감마선은 좁은 방향으로만 빔 형태로 나간다고 생각되기 때문에 중력파와 감마선 폭발이 동시에 나타나지 않는 천체가 더 많을 것이며 실제 중력파와 동시에 나타나는 감마선 폭발은 매우 드물 것이다. 감마선 폭발은 좁은 방향으로만 나타나지만 그 이후에 나타나는 잔광(afterglow)은 등방하게 나오기 때문에 이를 관측할 수 있으면 역시 중성자별 충돌 이후에 나타나는 물리 현상을 좀 더 상세히 연구할 수 있는 길이 열리게 된다. 또한 잔광의 관측은 중성자별이 어느 은하에서 일어났는지를 알려주게 되므로 블랙홀 충돌보다 더 많은 천체물리학적 정보를 제공해 줄 것이다.

그 밖에도 이번 중력파의 발견을 통해 나타날 새로운 연구 분야는 상상보다 훨씬 넓고 다양할 것으로 예상된다. 이들 가운데는 우리가 예측할 수 있는 것도 있지만 현재의 상상을 뛰어넘는 것도 많이 있을 것이다. 한 가지 분명한 것은 이제 우리는 우주를 볼 수 있는 새로운 수단을 가지게 되었다는 것이 다.

한국 중력과 연구 협력단의 역할

이번 중력과 검출에서 한국 중력과 연구 협력단(Korean Gravitational Wave Group, KGWG)의 역할에 대해 언론의 관심이 모아졌다. 그러나 1000명 가까운 사람들이 관련되어 있는 연구에서 어떤 개인이나 그룹의 기여를 일일이 열거하고 이를 정량화하는 일은 쉽지 않을 뿐 아니라 바람직하지도 않다. 저자 명단 가운데는 기여한 시점이 조금씩 다른 일들이 포함되어 있을 수도 있고 이번 발견에 직접 관여하지 않은 사람들도 많다. 그럼에도 논문에 모든 이들의 이름이 들어간 것은 지난 40년 가까운 시간 동안 많은 사람들이 노력한 결과 중력파 검출이라는 결실을 맺게 해 준 것이라 판단하기 때문이다. 더구나 기여도의 경중이 없지 않을 수는 없지만 저자의 순서를 알파벳순으로 하는 것은 기여도를 정량화하는 것이 불가능하기 때문이다.

KGWG는 2003년 말경에 수치상대론과 중력파에 대한 국내 연구 역량을 키우기 위해 결성된 자발적인 모임이 근간이 되어 2008년 LSC에 가입하기 위한 이름으로 개칭된 것이다. KGWG는 LSC에 직접 참여하는 인력과 2011년부터 역시 협력 관계를 유지하고 있는 일본의 검출기 KAGRA에 참여하는 인력을 모두 합친 조직이다. KGWG는 시작부터 자발적으로 참여하는 인력으로 구성된 일종의 개방된 단체로서 특정한 연구비의 지원을 받으며 공동 연구를 진행하는 조직은 아니다.

LSC 내에서 KGWG의 역할은 8월 15일부터 이듬해 8월 14일까지 1년 단위로 LSC, 라이고 실험실, 그리고 KGWG 사이에 맺은 MOU와 그 부속 문서에 의해 명확히 정의된다. 또 전년도에 수행했던 연구 및 LSC 내에서의 다른 행정적인 기여 내용은 새로운 MOU를 맺기 전에 LSC의 평가 위원회가 검토하여 미비점이나 개선점을 제시한다. 연구에 소요되는 시간을 모두 계산해 기여도를 전일제 직원 숫자로 환산하며 현재 2015년 8월에 갱신한 MOU에서는 KGWG에서 참여 인력은 13명이고 전일제 직원 숫자로는 4명에 해당한다.

KGWG가 주로 기여하는 바는 자료 처리 분야이다. 좀 더 구체적으로 기술하면 데이터에 나타나는 신호처럼 보이는 트리거들의 확률 분포를 좀 빨리 계산하여 고속 파이프라인에서

발견되는 트리거들이 신호일 확률을 높은 신뢰도로 더 빨리 검증하는 알고리즘을 테스트해 사용 여부를 결정하는 작업, 사용하는 중력파형에 따라 어떻게 중력파원의 물리량이 결정되는가에 대한 연구, 지금까지 고려하지 않고 있던 회전하는 중성자별에 의한 중력파형이나 이심률을 가진 쌍성계로부터 나오는 중력파원을 자료 분석 소프트웨어에 포함시키는 작업 등이 포함되어 있다. KISTI의 Global Science experimental Data hub Center(GSDC)에서는 자료 처리와 보관을 위한 전용 클러스터(현재 840개의 코어와 155 테라바이트의 저장 용량)를 운영하여 라이고 멤버 누구나 사용할 수 있게 해주고 있다. 이 밖에도 KGWG 멤버들은 LSC의 각종 위원회에 참여하여 원활한 운영에 기여하고 있다.

KGWG에서는 라이고 이외에도 카그라(KAGRA) 프로젝트에 참여하고 있으며 안정된 레이저 광원 제작, 거울들을 정확히 정렬시키기 위한 경사 감지기와 뉴턴 잡음을 정확히 측정하기 위한 고성능 중력계의 공급 등을 제안하고 있다. 또 자체적인 중력파 검출기 제작 가능성에 대한 사전 연구를 수행하여 앞으로는 국내에서도 중력파 검출이나 검출과 관련된 실험 역량을 키워가고 있다.