중력과 검출 100년을 기다린 시공간의 속삭임

중력과 천문학 및 천체물리학 시대를 맞이하여¹⁾

DOI: 10.3938/PhiT.25.011

김정리·조희석·이형원·이창환·이현규·강궁원

Gravitational Wave Astronomy and Astrophysics

Chunglee KIM, Hee Suk CHO, Hyung Won LEE, Chang-Hwan LEE, Hyun Kyu LEE and Gungwon KANG

On September 14, 2015, gravitational waves (GWs) were detected by the LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) in USA. The event (GW150914) is originated from the coalescence of two black holes (BHs) located 13 billion light years away from Earth. GW150914 is the first direct detection of GWs and the first observation of a BH-BH binary. We overview astrophysical sources that can be detected by

km-scale laser interferometers on Earth, summarize astrophysical implications of GW150914, and discuss how to explore a Universe with GWs.

서론

아인슈타인의 상대성이론에 따르면, 블랙홀과 같은 고중력 천체가 빠르게 부딪히는 과정에서 4차원 시공간의 변형이 발생하여 파동(wave)처럼 전파된다. 이런 '시공간의 잔물결'을 중력파(重力波, gravitational waves, GWs)라 한다. 현대 기술로 검출 가능한 중력파원은 모두 천체들이다. 지구상의 인간 활동이나 자연현상에 의해서도 중력파가 발생하지만, 세기가 작아 레이저 간섭계 등의 정밀한 기기로도 지구상에서 발생한 중력파를 검출하는 것은 거의 불가능하다.

미국을 포함한 전 세계 과학자, 공학자, 컴퓨터 엔지니어 1000여 명으로 구성된 라이고 연구협력단은 지난 20여 년간 라이고(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO) 레이저 간섭계로 중력파를 검출하기 위해 노력해왔다.^[1] 2015년 9월 14일, 지구에서 13억 광년 떨어진 곳에서 방출된 중력파가 미국에 소재한 두 곳의 라이고 관측소에서 검출되었다.^[2] 이 중력파는 GW150914로 명명되었으며, 신호를 방출한 천체는 블랙홀 쌍성으로 밝혀졌다. 중력파의 직접 검출과 동시에 그동안 이론으로만 예측되던 블랙홀 쌍성을 최초로 관측한 것이다!

이번 발견은 국제 연구협력 활동으로 얻은 큰 성과로서 현대 과학기술이 전자기파에 비해 극히 세기가 미약한 중력파를 사용하여 빛으로는 보이지 않는 우주도 탐구할 수 있을 만큼

저자약력

김정리 박사는 이화여자대학교 졸업 후 미국 노스웨스턴대학교에서 중력과 천체물리학으로 2006년 박사학위를 받았다. 2001년부터 라이고 연구협력단에 참여하여, 중력파 데이터 분석과 중성자별/블랙홀 천체물리학 관련 연구를 수행하고 있다. 미국 코넬대학교, 스웨덴 룬드대학교(마라-퀴리 펠로우), 연세대학교 등을 거쳐, 서울대학교 물리천문학부 연구연구원으로 재직 중이다.

조희석 박사는 부산대학교에서 밀집성쌍성병합에 대한 중력파형 개발과 모수 추정에 관한 연구로 국내 대학 최초로 중력파 연구 관련 박사 학위를 받았다. 현재 한국과학기술정보연구원에서 박사 후 연구원으로 재직 중이며 중력파 데이터 분석 연구를 수행하고 있다.

이형원 교수는 서강대학교에서 이론물리학으로 박사학위(1989년)를 취득한 후 이태리 로마대학교에서 박사 후 연구원(1989년-1993년)을 거쳐 현재 인제대학교 컴퓨터시물레이션학과에 재직 중이다.

이창환 교수는 서울대학교에서 고밀도 물질 상태 및 중성자별 내부구조 연구로 박사학위를 받았다. 미국 스토니브룩 뉴욕주립대학교, 고등과학원 및 서울대 BK사업단을 거쳐, 현재 부산대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 중성자별과 관련된 강입자 및 천체물리 현상론 연구를 수행하고 있다.

이현규 교수는 1979년 한국과학기술원에서 이학박사학위를 취득한 후 1979년부터 2016년까지 한양대학교 물리학과 교수로 재직하였고 현재 한양대학교 명예교수이다.

강궁원 박사는 연세대학교와 미국 메릴랜드 대학교에서 수학했다. 일반상대론을 전공했으며 다년간 블랙홀 관련 이론 연구를 해오다 2005년부터 한국과학기술 정보연구원(KISTI)에서 수치상대론 및 중력파 분야를 연구하고 있다. 한국중력파연구협력단의 언론홍보 대변인을 맡고 있다.

* 이 글의 모든 저자는 현재 한국중력파연구협력단의 일원으로 활동하고 있다.

REFERENCES

- [1] A. Abramovici, W. E. Althouse, R. W. P. Drever, Y. Gursel, S. Kawamura *et al.*, Science **256**, 325 (1992).
- [2] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy, F. Acernese and the LSC-Virgo collaboration, Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016).

1) 이 글은 다음 새물리 논문을 바탕으로 작성되었습니다: Chunglee Kim, Hee Suk Cho, Hyung Won Lee, Chang-Hwan Lee, Hyun Kyu Lee, Gungwon Kang, New Physics: Sae Mulli, Vol. 66, 293 (2016).

성숙했음을 증명하였다. 앞으로 더 많은 중력파원이 발견되면 중력파원 천체의 성질을 보다 정확히 이해할 수 있을 뿐 아니라, 이제까지 알려져 있지 않던 새로운 천체물리 현상도 연구할 수 있을 것으로 기대된다. 이 글에서는 중력파 천체물리학 및 천문학을 이해하는데 필요한 배경과 앞으로의 가능성을 전망해보고 한국중력파연구협력단의 연구 활동을 소개하고자 한다. 이 글에서 주로 사용할 거리와 질량 단위는 다음과 같다.

- 거리단위: $1 \text{ pc}(\text{parsec}) = 3 \times 10^{16} \text{ m} = 3.26 \text{ 광년}$
- 질량단위: $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ (☉은 태양을 상징하는 천문 기호이다.)

1 pc(파섹)은 일반적으로 천문학적인 거리를 나타내는데 편리하다. 은하의 크기는 3000 pc 정도이며, 우리 은하에서 가까운 안드로메다 은하까지의 거리는 780000 pc(250만 광년, 혹은 10^{19} km)이다. 별의 질량은 보통 태양을 기준으로 표기한다. 이번에 발견된 블랙홀 쌍성은 태양 질량보다 30~40배 큰 블랙홀 둘이 서로 공전하는 쌍성이었다.

중력파 신호의 종류

라이고 검출기는 4 km의 빔 길이를 갖는 거대 레이저 간섭계이다. 레이저 간섭계에 기반한 기기로 검출 가능한 중력파 신호는 보통 다음과 같이 네 종류로 구분한다. 이런 구분은 데이터 분석에 주로 유용한데, 신호 특성에 따라 적합한 분석 방법을 적용한다(간섭계의 원리와 기본 설계에 대해서는 참고문헌 [1, 3]을 참조).

1. 연속형(continuous): 신호 길이가 대략 수십 분 이상이면 연속형 중력파 신호로 구분한다. 그림 1(a)은 연속형 중력파 신호의 예로, 비대칭적 질량분포를 가지고 빠르게 자전하는 중성자별로부터 방출되는 중력파형(GW waveform) 모델을 시간의 함수로 그린 것이다. 중성자별은 우주에서 가장 완벽한 구(球)로 알려져 있다. 중성자별의 반경은 대략 10 km 정도인데, 별 표면에 1~10 cm 정도의 산이 있다고 하면, 표면 질량 분포의 대칭성이 깨지게 된다. 이렇게 “산이 있는” 중성자별이 우리 은하 내에서 1초에 1000여 회(1 kHz 정도) 자전하면 라이고 검출기로 관측가능한 정도의 중력파가 발생할 것으로 기대된다.^[4] 우리 은하에는 2000여 개의 중성자별이 존재하며, 자전 주파수는 0.001~700 Hz 정도이다. 우리 은하 내 중성자별의 위치와 자전 주파수는 정밀한 수준으로 잘 알려져 있으므로, 어드밴스드 라이고로 수 년 이상 관측하면 신호 대 잡음 비율을 높여 중성자별 타원율(ellipticity)에 대한 최대 기대치를 얻을 수 있을 것이다.

Fig. 1. Four types of GW sources. From the top panel: (a) continuous, (b) inspiral, (c) burst, and (d) stochastic GW signals. Image credit: A. Stuver/LIGO (<http://www.ligo.org/science>)

2. 나선 궤도형(inspiral): 블랙홀이나 중성자별로 구성된 쌍성은 대표적인 중력파원 천체이다. 서로 공전하는 두 밀집성(compact objects)이 공전 궤도 운동으로 중력파를 방출하면 쌍성의 총 에너지와 각운동량이 감소한다. 따라서 두 밀집성은 닫힌 궤도(bound orbit)인 원 궤도가 아닌, 나선 궤도를 그리면서 점차 가까워지다 결국 부딪히게 될 것이다. 나선 궤도형 중력파 신호는 이론적으로 상당히 정확하게 계

REFERENCES

- [3] H. J. Paik, H. M. Lee, K. Cho and J. Kim, New Physics: Sae Mulli **66**, 272 (2016)
- [4] B. Haskell, D. I. Jones and N. Andersson, MNRAS **373**, 1423 (2006).

산할 수 있고, 이런 나선궤도 신호를 찾아내는 데이터 분석 방법도 잘 정립되어 있다. 나선궤도 운동에서 발생하는 중력파는 밀집성간 거리가 가까울수록 증가한다. 참고로, 중력과 주파수는 공전 주파수의 두 배이고 두 천체가 가까워짐에 따라 중력파의 주파수도 세기와 함께 증가하게 된다. 그림 1(b)은 나선 궤도 운동으로 방출되는 중력파를 시간에 대한 함수로 보인 것으로, 이런 형태의 신호를 처프 신호(chirp signal)라고도 한다. 이번에 발견된 GW150914의 검출 데이터는 전형적인 나선 궤도형 중력파를 보이고 있다(참고문헌 [2, 5]의 그림 1과 내용 참조).

3. 폭발형(bursts): 짧은 순간에 중력파가 방출되고 잦아드는 신호를 ‘폭발형’으로 분류한다. 나선 궤도를 그리다 합병하는 쌍성, 감마선폭발(gamma-ray bursts), 초신성 등이 대표적인 폭발형 중력파원이다. 검출기 주파수 대역에서, 신호의 지속시간이 수십 분 이상이면 연속형, 그 이하면 폭발형으로 구분한다. 지상에서 검출가능한 대부분의 중력파 신호는 지속시간이 몇 초-몇 분 정도이다. 폭발형 중력파형에 대한 모델은 잘 정립되어 있지 않다. 예를 들어, 별의 충돌이나 폭발 현상을 모델링하기 위해서는 별의 구조와 핵반응, 뉴트리노 방출, 빛 방출 과정 등에 대한 자세한 이해가 필요하다. 따라서 폭발형 중력파 탐색을 위한 데이터 분석은 그림 1(c)와 같이 단순화된 모델을 적용하여 중력파형을 계산하거나, 특별한 모델 없이 강한 신호(파워)를 찾는 방법을 사용한다. 이번에 발견된 GW150914는 라이고 검출 주파수 대역에서 0.2초간 검출되었으며, 신호 지속시간 기준으로 폭발형에 속하고, 파형 형태로는 나선 궤도형에 속하는 중력파원이다. GW150914는 라이고의 폭발형과 나선 궤도형 중력파 탐색 파이프라인에서 모두 발견되었다.

4. 스토캐스틱형(stochastic): 마이크로파 대역에서 관측된 우주 배경복사(cosmic microwave background)처럼, 이론적으로 중력파배경복사(gravitational-wave background)가 존재할 것으로 예상된다. 우주배경복사는 빅뱅 후 38만 년 후의 우주에서 방출된 빛이며, 천체에서 방출된 빛은 섞여 있지 않다. 이와 달리, 중력파 배경 복사는 다양한 천체에서 방출된 중력파 신호(astrophysical origin)와 초기 우주에서 방출된 중력파 신호(early universe origin)가 섞여 있으며, 이들을 각각 구분하여 분석하고 이해하는 것이 중력과 천문학의 큰 과제이다. 라이고 검출기로는 지구로부터 수백만 광년 떨어진 우주까지 중력파 관측이 가능하다. 따라서 수백만 광년 내에 존재하는 수많은 천체들로부터 방출된 다양한 주파수와 세기를 갖는 중력파가 그림 1(d)에 보인 바와 같이 중첩(重疊)되어 지구에 도달할 것이다. 단일 검출기로는 스토캐스틱

형 중력파를 잡음과 구별할 수 없다. 라이고는 독립적으로 가동하는 관측소를 두 곳 보유하고 있으므로, 리빙스턴과 핸포드 검출기로 얻은 데이터간의 상호상관관계(cross correlation)를 분석하여 스토캐스틱형 중력파배경복사를 찾고 있다.

네 가지 중력파 신호 중에서, 라이고와 같은 km급 레이저 간섭계가 가장 관심 두고 있는 것은 블랙홀이나 중성자별로 구성된 밀집성 쌍성(compact binaries)이다. 저자들이 속한 한국중력파연구협력단(KGWG) 역시 밀집성 쌍성에 주목하여 라이고 중력파 데이터 분석에 참여하고 있으며, 국내 연구진 주도로 수치상대론, 천체물리학 등 다양한 분야에서 연구를 수행하고 있다. 중력파, 중력파원 및 상대성이론 검증에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌 [6-8]을 추천한다.

중력과 검출과 천체물리학

1. 중력파원으로서의 밀집성 쌍성

태양보다 몇 배 이상 되는 질량을 갖는 별의 마지막 진화 단계에서 중성자별과 블랙홀이 생성된다. 이들은 태양보다 질량이 큰 반면 크기는 수십-수백 km 내외로 밀도가 매우 높기 때문에 밀집성 혹은 고중력 별이라고도 부른다. 일반적으로 밀집성은 매우 드물다. 예를 들어, 우리 은하에는 약 천억 개의 태양과 비슷한 (빛으로 관측 가능한) 별이 있다고 추정되는데, 우리 은하에 존재하는 중성자별과 블랙홀의 수는 수십만 개 정도에 불과하다.

현재 세계 각국에서 건설 중이거나 가동되고 있는 중력파 검출기들은 “밀집쌍성병합”(Compact Binary Coalescence, 통칭 CBC), 즉, 쌍성의 공전 운동을 통해 방출되는 중력파를 검출하는데 최적화되어 있다. 밀집쌍성병합은 중력과 방출 메커니즘과 천체 현상의 특성을 고려하여 다음의 세 단계로 구분한다: 두 밀집성이 공전하지만 점점 가까워지는 “나선 궤도”(Inspiral) 단계, 부딪혀 하나로 합쳐지는 “합병”(Merger) 단계, 하나의 블랙홀이 새로 형성되고 난 뒤 중력파의 세기가 점차 잦아드는 “안정화”(Ringdown) 단계가 그것이다. 그림 2는 밀집쌍성병합의 세 단계에 대한 개념도이다.

중력파 천문 관측이 실용적으로 의미를 갖기 위해서는 적어도

REFERENCES

- [5] S. H. Oh, E. J. Son, W. Kim, John J. Oh, H. W. Lee, J. Kim and Y.-M. Kim, New Physics: Sae Mulli **66**, 283 (2016).
- [6] B. F. Schutz (2011) Lecture note, Azores School on Observational Cosmology 2011, Angra do Heroísmo, Azores, Portugal, <http://www.aei.mpg.de/~schutz/download/lectures/AzoresCosmology/Schutz.AzoresLecture1.pdf> (accessed Mar., 27, 2016).
- [7] L. Blanchet, Living Rev. Relativity **17**, 2 (2014).
- [8] C. M. Will, Living Rev. Relativity **17**, 4 (2014).

Fig. 2. An artist's impression of a compact binary coalescence (CBC). From left to right, the three phases of coalescence (Inspiral-Merge-Ringdown) are depicted. CBCs consisting of black holes and neutron stars are prime targets for GW detectors on Earth. Image credit: NASA/Tod Strohmayer (GSFC)/Dana Berry (Chandra)

연당 1회 이상 중력과 검출이 가능해야 할 것이다. 위에서 기술한 바와 같이 중력파를 방출하는 천체가 존재할 수 있다는 것은 1950-60년대부터 이론적으로 예측되고 있었다. 우리 은하로부터 1-10억 광년 내외에서 중력과 방출 현상이 얼마나 자주 발생하는지, 또한 천체 현상으로부터 방출되는 중력파형의 성질(세기, 주파수 등)이 무엇인지 알아내는 데에는 천체물리학과 컴퓨터공학의 발전이 큰 역할을 했으며, 1960년 후반부터 중력파형 모델 개발 등 중력과 천체물리학 연구가 활발해졌다. 예상되는 중력파의 세기가 전자기파에 비해 매우 미약하다는 점은 중력과 천체물리학의 초기부터 알려져 있었다. 중력파를 검출할 수 있는 매우 민감한 기기를 설계하고 구현하는데도 수십 년이 걸렸다(중력과 검출의 역사에 대해서는 참고문헌 [9] 참조)

밀집성 쌍성은 단독으로 존재하는 중성자별이나 블랙홀보다 더 드물며, 밀집성으로 구성된 쌍성의 일부만이 허블 시간 내에 근접하여 부딪힌다(1-10일 이상의 공전 주기로 '영원히' 공전하는 쌍성이 더 흔하다). 우리 은하와 비슷한 환경을 가정하면 밀집쌍성병합은 은하당 수백만 년에 1회 정도 발생한다. 따라서 중력파로 밀집쌍성병합을 연당 1회 이상 검출하기 위해서는 지구로부터 적어도 수백만 광년 떨어진 우주까지 탐색할 수 있는 기기가 필요하다. GW150914가 검출된 2015년 9월 당시 어드밴스드 라이고의 감도는 두 블랙홀 질량의 합이 태양보다 70배 큰 블랙홀 쌍성을 13억 광년 떨어진 곳에서 검출할 수 있는 수준에 도달했었다. GW150914는 중력파 천문학을 위한 검출기 성능에 대한 기준을 제시한다. 일반적으로 중력파의 세기는 거리에 반비례하고, 천체의 질량이 클수록 증가한다. 즉, 밀집쌍성병합이 너무 먼 우주에서 발생하거나, 쌍성에 속한 밀집성의 질량이 너무 가벼우면 중력파 검출이 어렵다. 또한, 검출기의 감도에 비해서 기기 잡음이 너무 큰 경우에도 GW150914와 비슷한 중력파 신호의 검출이 불가능하다. 지구에서는 10 Hz 이하의 주파수 대역에 지진, 바람, 해수운동 등에 의한 다양한 잡음이 매우 강하게 존재하기 때문에, 어드밴스드 라이고의 중력파 검출 주파수 대역은 대략 10-2000 Hz 대역으로 설정되었다. 특히 중성자별 및 블랙홀 쌍성에서 방출되는 중력파의 특

성에 맞춰 100-300 Hz 대역에서 가장 민감하도록 설계되었다. 블랙홀의 질량은 태양질량의 3배 정도로부터 수백만 배까지 존재하는 것으로 알려져 있다. 반면 중성자별은 보통 태양과 질량이 비슷하다고 알려져 있다. 따라서 어드밴스드 라이고와 비슷한 감도로는 수십만 광년 떨어진 중성자별쌍성병합이나, GW150914처럼 수백만 광년 떨어진 블랙홀쌍성병합에서 방출된 중력파를 검출할 수 있다. 현재 기기 성능 향상 작업이 진행 중인 어드밴스드 비르고, 2016년 봄부터 가동을 시작할 일본 카그라 검출기 등 다른 검출기들도 어드밴스드 라이고 정도의 감도에 도달해야만 중력과 천문학이 가능하다고 할 수 있다.

2. 밀집성 쌍성의 중력파형 모델링

밀집성 쌍성에 대한 중력과 데이터 분석의 기본은 정합 필터(matched filter) 방법이다. 정합 필터는 신호에 대한 모델이 존재할 때 효율적으로 잡음 속에 묻혀있는 신호를 찾아낼 수 있는 방법이다. 중력과 검출 파이프라인은 중성자별 및 블랙홀로 이루어진 다양한 쌍성 성질을 고려하여 중력파형을 미리 계산하고 이를 정합 필터방법에 사용한다(중력과 검출 파이프라인과 GW150914 검출 과정에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [2, 5] 참조). 이렇게 준비한 파형을 템플릿 파형(template waveform)이라 부른다. 중력파를 검출하고 중력과 신호로부터 중력파원의 성질을 측정하기 위해서는 템플릿 파형을 이론적으로 가능한 정확하게 계산하는 것이 매우 중요하다.

밀집쌍성병합에서 방출되는 중력과 파형을 계산하기 위해서는 일반상대론 방정식을 풀어야 한다. 병합 과정의 물리적 조건에 따라 파형을 계산하는 방법은 몇 가지가 있다. 천체의 공전 속력이 빛 속도보다 매우 작다는 가정 하에($v/c \ll 1$) 일반상대론 방정식을 근사적으로 계산해서 해석적 함수 형태로 기술하는 포스트 뉴턴 공식(post-Newtonian formalism), 밀집성

REFERENCES

- [9] John J. Oh and Gungwon Kang, New Physics: Sae Mulli 66, 264 (2016).

쌍성과 같이 두 물체로 이루어진 계(system)를 실효적으로 하나의 물체로 이루어진 것처럼 기술하는 Effective-One-Body 방법, 그리고 아인슈타인 방정식을 근사 없이 수치적으로 계산하는 수치상대론(Numerical Relativity) 등이 중력과 파형을 계산하는 대표적인 방법이다. 수치상대론은 특히 슈퍼컴퓨터와 같은 고성능 컴퓨터의 사용이 필수적이며, 병합의 모든 과정에서 방출되는 중력파를 계산할 수 있으나 계산시간이 포스트 뉴턴 방법에 비해 매우 길다. 수치상대론은 보통 천체가 부딪히는 단계에 해당하는 1초 내외의 짧은 시간에서 방출되는 중력파를 정확하게 계산하고, 다른 근사식을 검증하거나 완성하는데 사용된다. 중력과 데이터 분석에서 가장 많이 사용되는 나선 궤도 중력파형은 포스트 뉴턴 방법으로 구한다. 일반적으로 중력과 데이터 분석을 위해서는 지금까지 기술한 중력파형 모델링 외에도 빠르고 신뢰할 수 있는 컴퓨터 알고리즘 및 소프트웨어 개발이 중요하다.

질량이 태양과 비슷한 가벼운 블랙홀 혹은 중성자별로 이루어진 쌍성은 라이고 주파수 대역(10~2000 Hz)의 대부분에서 나선 궤도형 중력파만이 검출되며, 실제 별이 부딪히는 것은 2000 Hz 이상의 고주파수 대역으로 예상된다. 따라서 가벼운 밀집쌍성병합은 포스트 뉴턴 방법으로 구한 나선 궤도형 중력파형 모델만으로도 데이터 분석이 가능하다. 그러나 GW150914와 같이 태양 질량보다 수십 배 큰 블랙홀로 구성된 쌍성은 라이고 대역에서 검출이 불가능한 저주파 대역에서부터 중력파를 방출하면서 서로 근접하다가, 10~300 Hz 대역에서 두 블랙홀이 부딪혀 하나의 블랙홀을 생성하게 된다. 따라서 무거운 블랙홀쌍성병합의 경우에는 병합 전 과정에 대한 중력파형을 정확히 구해야만 중력과 검출과 분석이 가능하다. 무거운 블랙홀쌍성병합 연구에는 IMR(Inspiral-Merger-Ringdown) 템플릿을 사용한다. IMR 템플릿은 포스트 뉴턴 공식이나 Effective-One-Body 방법을 적용하여 계산한 나선 궤도 단계 중력파형에 수치상대론으로 구한 합병-안정화 단계 중력파형을 결합한 것이다.

중력파형은 그림 1(a-d)와 같이 보통 시간의 함수로 계산한다. 그런데 중력과 데이터 분석에 쓰이는 정합 필터 방법은 주파수의 함수를 사용할 때 매우 효율적이다. 따라서 정합 필터 방법으로 중력과 데이터 분석을 하기 위해서는 시간의 함수로 구한 중력파형 함수에 푸리에 변환을 적용하여 주파수의 함수로 변환하는 과정이 반드시 필요하다. 중력과 데이터 분석에 사용되는 수만 개 템플릿 각각에 푸리에 변환을 여러 번 적용하기 때문에 데이터 분석에서 푸리에 변환을 생략할 수 있다면 계산 시간을 몇 배 절약할 수 있다. 이런 이유로 중력과 탐색 파이프라인에서는 시간의 함수로 표현한 중력파형 템플릿뿐 아니라, 주파수의 함수로 근사하여 표현한 중력파형 모델(TaylorF2)도 사용한다.^[10] 중력과 데이터 분석과 템플릿에 대

한 보다 자세한 내용은 참고문헌 [11, 12]를 추천한다.

3. 중력과 검출 빈도와 중력파원 모델링

검출기의 성능과 중력과 검출 가능성을 가늠하는 지표로는 중력과 검출 빈도(detection rate)가 있다. 이 값은 1년당 발생하는 중력과 횟수(혹은 중력파원의 갯수)인 밀집쌍성 병합률(coalescence rate)에 비례한다. 다시 말해, 중성자별쌍성병합이나 블랙홀쌍성병합이 검출기로 관측 가능한 우주 공간(부피)에서 얼마나 자주 발생하는지 알면, 해당 중력과 검출기의 감도로 1년에 몇 번이나 중력파를 검출할 수 있을지 예측할 수 있다. 밀집쌍성 병합률은 밀집성의 생성과 진화에 대한 천체물리학 이론에 바탕하고 있다. 만약 실제 중력과 검출이 다수 이루어졌을 때, 중력과 검출 빈도의 예측과 측정값이 매우 다르다면, 이는 중성자별과 블랙홀에 대한 모델링에 심각한 수정이 필요함을 의미한다.

중성자별 쌍성은 약한 중력장에서의 상대론적 효과를 천문관측으로 알아볼 수 있는 우주 실험실이라고 할 수 있다. 1974년 발견된 최초의 중성자별-중성자별 쌍성은 발견자의 이름을 따서 헐스-테일러 펄서라고도 부른다(펄서는 중성자별의 한 종류이다). 헐스-테일러 쌍성은 발견 직후부터 현재까지 전파 망원경으로 꾸준히 관측되고 있다.^[13,14] 지난 25년간의 관측 데이터로부터 구한 헐스-테일러 쌍성의 궤도 감소율(측정값)과 상대성이론의 예측(중력과 방출로 인한 궤도 감소율)간의 비는 0.997 ± 0.002 로 0.3% 오차 범위 내에서 잘 일치하며, 약 3억 년 뒤에는 두 중성자별이 부딪혀 하나의 블랙홀을 생성할 것으로 예상된다.^[14] 러셀 헐스와 조제프 테일러는 “중성자별 쌍성의 발견과 중력연구의 새로운 가능성”에 대한 기여를 인정받아 1993년에 노벨상을 수상하였다.

현재 우리 은하에서는 10여 개의 중성자별-중성자별 쌍성이 발견되었으며, 이 중 절반이 허블 시간 내에 병합하여 부딪힐 것으로 예상된다. 관측된 쌍성의 물리량을 고려하여 중성자별쌍성병합률을 계산하면, 라이고와 같은 중력과 검출기에 대한 중성자별쌍성병합에 대한 검출 빈도를 구할 수 있다.^[15] 이 연구결과

REFERENCES

- [10] S. Droz, D. Knapp, E. Poisson and B. J. Owen, Phys. Rev. D **59**, 124016 (1999).
- [11] L. S. Finn, Phys. Rev. D **46**, 5236 (1992).
- [12] D. A. Brown, Kumar, N. Prayush and H. Alexander, Phys. Rev. D **87**, 082004 (2013).
- [13] R. A. Hulse and J. H. Taylor, Astrophys. J. **195**, L51 (1975).
- [14] J. M. Weisberg, D. J. Nice and J. H. Taylor, Astrophys. J. **722**, 1030 (2010).
- [15] C. Kim, V. Kalogera and D. R. Lorimer, Astrophys. J. **584**, 985 (2003).

라이고 등 레이저 간섭계의 설계와 과학 목표를 설정하는데 주요한 기준으로 사용되었다. 최신 펄서 관측 결과를 반영한 연구결과에 따르면 우리 은하에서의 중성자별쌍성병합은 수백만 년에 20여 회 발생할 것으로 예상된다. 라이고-비르고 검출기 네트워크가 설계 감도로 가동시 400 Mpc 정도의 반지름을 갖는 공간을 탐색할 수 있을 것으로 예상되는데, 이 정도 감도로는 중성자별쌍성병합을 연간 1-30회 정도 발견할 것으로 기대된다.^[16]

GW150914 발견 이전에는 관측 자료의 부재 때문에 블랙홀 쌍성 병합물에 대한 이론 예측 값의 오차가 매우 컸다. 2010년 무렵까지의 연구 결과로는 어드밴스드 라이고 검출기로 1 Gpc³의 우주 공간을 탐색할 경우 블랙홀 쌍성 병합을 연당 1-1000회 정도 발견할 수 있을 것으로 예상되고 있었다.^[17] GW150914로부터 얻은 블랙홀 쌍성의 성질을 고려하여 실제 중력과 검출 파이프라인을 사용한 시뮬레이션을 수행한 결과로부터 참고문헌 [15]의 방법론을 적용하면 블랙홀 쌍성 병합물을 탐색 공간 부피당의 밀도로 구할 수 있다. GW150914과 같은 블랙홀 쌍성병합을 한 번 발견했다는 사실로부터 라이고가 도달 가능한 우주 공간 내에서의 블랙홀 쌍성병합물 밀도는 약 2-400 Gpc⁻³yr⁻¹로 추정할 수 있다.^[18] 이는 1 Gpc³의 우주 공간을 탐색할 경우 블랙홀쌍성병합을 연당 2-400회 검출할 수 있다는 의미이다.

GW150914의 발견 이전에는 밀집쌍성병합에 대한 이론 모델로부터 중력파의 검출 빈도를 예측해왔다. 앞으로 중력과 검출을 통해 더 많은 블랙홀쌍성병합이 발견되고, 또한 중성자별쌍성병합도 중력파로 찾게 된다면 이제까지와는 반대로 중력과 검출 빈도를 밀집성 모델에 제약조건으로 적용할 수 있다. 중성자별이나 블랙홀 쌍성병합을 중력파로 100회 이상 검출한다면 밀집성의 생성과 진화 과정에 대한 모델 간 정량 비교가 가능하며, 나아가서는 밀집성과 관련된 초신성이나 감마선폭발도 자세히 이해할 수 있을 것이다.

4. 다중신호 천문학(Multi-messenger Astronomy)

관측 천문학은 인간의 눈에 최적화된 가시광선의 관측으로부터 시작했다. 현대 천문학은 전자기파뿐 아니라 입자로도 천체와 우주를 탐구하는 수준에 이르렀다. 이제 GW150914의 발견과 함께 중력과 천문학이 시작되었다고 할 수 있다. 뿐만 아니라, 한 천체에 대해 전자기파, 입자, 중력과 등 다각적인 관측으로 정보를 얻는 다중신호 천문학 시대가 멀지 않았다.

다중신호 천문학의 관점에서 가장 흥미로운 천체의 예로는 초신성과 중성자별을 들 수 있다. 이론적으로, 초신성 폭발 과정에서 중력파, 뉴트리노, 전자기파가 순차적으로 방출될 것으로 예측된다. 따라서 중력파 검출 후 입자/전자기파로 초신성을 관측하게 된다면 폭발 중심부에서 고중력 천체가 형성되는 과정을

보다 자세히 이해할 수 있을 것이다. 중성자별쌍성병합 과정으로부터도 중력파뿐 아니라 전자기파(감마선폭발) 방출 가능성이 제시되고 있다. 중성자별쌍성병합을 중력파 검출기와 함께 각종 망원경으로 동시에 관측할 수 있다면, 오랫동안 미제로 남아있던 감마선 폭발의 발생 메커니즘에 대한 단서를 얻을 수 있을 것이다.^[19,20] 다중신호 천문관측은 중성자별의 내부를 이해하는데도 큰 역할을 할 것이다. 아릇한 쿼크(strange quark)가 포함된 상태방정식 등 중성자별 내부 물질 상태에 대한 많은 연구가 진행되고 있음에도 고밀도 강상호작용의 불확실성으로 인하여 완벽히 이해되지는 않고 있다. 중성자별이 부딪혀 깨지는 과정을 중력파로 관측하고 전자기파를 사용한 후속 관측과 함께 분석한다면 중성자별 내부 구조를 파악할 수 있게 될 것이다.^[21]

다중신호 천문학을 수행하기 위해서는 중력파와 전자기파(및 입자) 연구진간의 실시간 정보 교환이 필수적이다. 특히, 중력파 후보의 신호가 검출된 GPS 시각, 천구(天球)상의 위치, 거리 정보의 공유가 중요하다. 라이고-비르고 연구협력단은 천문학자들과 협력하여 중력파 검출 후 몇 분 내에 중력파 후보 신호의 위치 정보를 지구상 천문대와 우주 관측 위성에 보내어 전자기파 및 입자 후속 관측을 할 수 있는 네트워크를 운영하고 있다. 예를 들면, GW150914 발견 이틀 뒤 라이고측과 연구협력 양해각서를 맺고 있던 미국항공우주국의 페르미(Fermi) 감마선 관측 위성이 중력파가 검출된 남반구 하늘을 전격적으로 탐색하였다.^[22] 역으로, 천문학자로부터 감마선 폭발 등 전자기파 관측 결과를 받아 검출 GPS 시각과 기타 정보를 사용하여 그에 해당하는 중력파 데이터를 분석하는 연구도 수행하고 있다. 다중신호 천문학에 대한 중력과 연구진의 최신 성과와 GW150914 관련 노력은 참고문헌 [23]에서 보다 구체적으로 기술하고 있다.

REFERENCES

- [16] C. Kim, B. P. P. Perera and M. A. McLaughlin, *Mon. Royal Soc.* **448**, 928 (2015).
- [17] J. Abadie, B. P. Abbott, R. Abbott, M. Abernathy, T. Accadia and LSC-Virgo collaboration, *Classical and Quantum Gravity* **27**, 173001 (2010).
- [18] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy, F. Acernese and the LSC-Virgo collaboration, submitted to *Astrophys. J. Letters* (2016), e-print: arXiv:1602.03842.
- [19] K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, K. Kyutoku and M. Shibata, *Class. Quantum Grav.* **29**, 124003 (2012).
- [20] J. Clark, H. Evans, S. Fairhurst, I. W. Harry, E. Macdonald, et al., *Astrophys. J.* **809**, 53 (2015).
- [21] Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku and M. Shibata, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 051102 (2011).
- [22] M. Ackermann, M. Ajello, A. Albert, B. Anderson, M. Arimoto and The Fermi-LAT collaboration, submitted to *Astrophys. J.* (2016), e-print: arXiv:1602.04488.
- [23] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy, F. Acernese and the LSC-Virgo collaboration, submitted to *ApJL* (2016), e-print: arXiv:1602.08492.

GW150914 발견이 천체물리학계에서 특히 주목받은 이유 중 하나는 블랙홀 각각의 질량이 태양 질량보다 30배 이상 크다는 사실이다. 쌍성의 진화는 매우 복잡하며 진화 과정에서 벌어지는 물리 현상에 대한 관측 없이는 GW150914 정도로 무거운 블랙홀이 우주에 존재할지 이론적으로 추측하기가 쉽지 않았다. 하지만 이번 한 번의 관측만으로도 블랙홀 쌍성의 생성 조건에 대해 상당한 정보를 알아낼 수 있었다. 라이고 과학협력단은 GW150914의 발견에 대한 천체물리학적 의의를 참고문헌 [24]에서 자세히 논하고 있다. GW150914와 같이 무거운 질량을 갖는 블랙홀이 생성되려면 우선 질량이 태양보다 수십 배 큰 별이 필요하다. 또한 원래 별이 초신성 폭발을 겪기 전까지(혹은 블랙홀을 생성하기 직전까지) 항성풍(stellar wind, 태양풍과 비슷한 별의 질량손실 메커니즘이다)으로 질량을 잃은 후에도 상당한 질량이 보존되어야만 한다. 이는 별의 진화 과정과 (은하나 성단) 환경을 모두 고려해야만 설명할 수 있다. 밀집성 쌍성의 생성 장소가 은하 평면인지 성단인지에 따라 쌍성의 진화과정도 달라지는데, GW150914의 경우 중력파로 얻은 관측값만으로는 이 블랙홀 쌍성이 은하 평면과 성단 중 어느 곳에서 생성되었는지 알아내기 쉽지 않다. GW150914의 발견은 천문학 및 천체물리학계에 무거운 별의 진화와 블랙홀 형성 과정에 대한 많은 과제를 남겼다.

5. 중력과 모수 추정(母數推定, parameter estimation)

검출 파이프라인에서 중력과 신호의 검출이 확정되면 중력파원의 물리량을 측정하기 위해 모수 추정 파이프라인을 적용한다. 모수 추정은 베이저언 추론(Bayesian inference)에 기반한 통계 분석 방법으로 그 결과는 각 파라미터의 측정값에 대한 확률분포함수로 표현된다. 중력과 모수 추정은 중력파원이 무엇인지 식별하고, 성질을 파악하기 위해 반드시 필요하다.

중력과 검출기에서 직접적으로 관측되는 중력파의 물리량은 파형의 진폭(strain amplitude)과 위상(phase)이며 이 두 가지를 결정짓는데 필요한 천체의 물리량은 여러 개이다. 밀집성 쌍성의 경우라면 두 별의 질량, 거리, 궤도 경사각(inclination angle), 적경(赤經 right ascension)과 적위(赤緯, declination)로 정의되는 쌍성의 천구상의 위치, 두 별의 궤도 위상(orbital phase), 중력과 편광각(polarization), 중력과 검출 시각(GPS 시각)의 9개 파라미터가 필요하다. 만약, 별의 자전(스핀)이나 별의 구조, 궤도 이심률 등을 고려하려면 파라미터의 수는 더 많아진다. 중력파원의 특성에 따라 모수 추정에 필요한 최소 파라미터의 내용과 개수가 달라지며 데이터 분석은 각각 적합한 알고리즘을 적용하여 수행하게 된다. 라이고 과학협력단과 비르고 협력단은 라이고 알고리즘 라이브러리(LIGO/LSC Algorithm Library, 통칭 LALSuite) 중력과 데이터 분석 파이프라인을 공

동으로 개발하여 오픈소스로서 공개하고 있다(<https://versions.ligo.org/cgit/lalsuite>). LALSuite은 중력과 탐색, 모수 추정, 기기 특성 분석, 중력이론 검증 등 다양한 모듈(module)로 구성된 데이터 분석 라이브러리이다.

중력과 모수 추정 결과의 신뢰성을 위해서는 템플릿 중력파형을 가능한 정확하게 모델링하는 것이 매우 중요하다. 라이고 검출 파이프라인 분석은 가능한 다양한 중력파형을 적용하며, 다중신호 천문학을 염두에 두고 계산 시간이 빠른 고속분석 파이프라인도 실행하였다. GW150914의 경우 고속분석 파이프라인에서 잡음보다 큰 신호(이벤트)가 기록된 지 3분만에 중력과 후보임을 판별할 수 있었다.^[2] GW150914의 총 질량으로부터 블랙홀 쌍성 후보임이 판명된 뒤에는 모수 추정 파이프라인을 적용하여 중력파원의 물리량을 보다 정확히 측정하였다. 이 단계에서는 파원에 가장 적합한 중력 파형을 선택적으로 사용한다. GW150914는 30-300 Hz 대역에서 병합의 세 단계(나선궤도-합병-안정화)가 모두 검출되었으므로(참고문헌 [2, 5]의 그림 1 참조), 나선 궤도 단계 중력파형이 아닌 병합 중력파형을 사용하여 모수 추정을 수행하였다. GW150914 모수 추정에는 EOBNR(Effective-One-Body Numerical Relativity) 모델^[25,26]과 IMRPhenom 모델^[27] 두 가지 병합 중력파형 모델이 사용되었다. IMRPhenom은 쌍성 병합시 궤도면의 세차운동 효과를 고려한 모델인 반면, EOBNR은 쌍성의 스핀 각운동량의 방향이 궤도축에 나란하여서 세차운동을 하지 않는다고 가정한 모델이다. GW150914는 블랙홀 스핀을 포함하여 측정 가능한 모든 파라미터에 대해 모수 추정을 수행했으며 이에 대한 결과는 참고문헌 [28]의 표 1에 요약되어 있다. 여기에서는 참고문헌 [28]의 핵심 결과를 간략히 요약한다. 개별 물리량의 오차 범위와 측정값에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [28]에서 확인할 수 있다.

가. 질량: 밀집쌍성병합으로부터 방출된 중력파로부터 측정할 수 있는 물리량 중에 가장 정확히 구할 수 있는 것은 쌍성의 질량이며 그 이유는 중력파형 함수의 질량에 대한 의존도가 가장 크기 때문이다. GW150914를 구성하는 두 블랙홀의 질량

REFERENCES

- [24] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy, F. Acernese and the LSC-Virgo collaboration, *Astrophys. J. Letters* **818**, 2 (2016).
- [25] A. Taracchini, A. Buonanno, Y. Pan, T. Hinderer, M. Boyle, *et al.*, *Phys. Rev. D* **89**, 061502 (2014).
- [26] A. H. Mroue *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 241104 (2013).
- [27] M. Hannam, P. Schmidt, A. Bohe, L. L. Haegel, S. Husa, F. Ohme, G. Pratten and M. Purrer, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 151101 (2014).
- [28] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy, F. Acernese and LSC-Virgo collaboration, submitted to *Astrophys. J. Letters* (2016), e-print: [arXiv:1602.03840](https://arxiv.org/abs/1602.03840) (2016).

은 각각 $35.7 M_{\odot}$ 과 $29.1 M_{\odot}$ 로 측정되었다. 한편, GW150914는 지구로부터 약 13억 광년 떨어진 곳에서 발생한 것으로 추정되는데 이 정도로 먼 거리에 위치한 천체에서 방출된 신호를 분석할 때에는 우주 팽창에 의한 우주론적 적색편이(z)를 고려해야 한다. 즉, 먼 우주에서 방출된 중력파를 지구에 있는 관찰자(검출기) 기준계에서 관찰하여 구한 질량은 천체의 실제 질량(파원 기준계에서의 질량)보다 $(1+z)$ 만큼 크게 측정된다. 위에서 언급한 두 블랙홀의 질량은 천체의 실제 질량으로 GW150914의 적색편이($z=0.09$)를 보정해준 값이다.

나. 거리: 지구로부터 중력파원까지의 거리는 중력파 신호의 세기로부터 구한다. 밀집쌍성병합에서 방출된 중력파 신호의 세기는 검출기와 파원의 거리가 멀수록 작아진다. 그런데, 쌍성 궤도축이 지구로부터의 시선 방향에 대해 이루는 각도인 궤도 경사각에 따라서도 중력파 세기가 다르게 관측된다. 예를 들면, 동일한 천구상에 위치한 파원에 대해서 궤도 경사각이 0도인 쌍성에서 관측되는 중력파 세기와 거리는 더 가깝지만 궤도 경사각이 0도에서 90도 사이인 쌍성에서 관측되는 중력파 세기가 비슷할 수 있는 것이다. 따라서 중력파 세기 관측만으로는 거리와 궤도 경사각을 동시에 정확히 측정할 수 없으며, 이로 인해 중력파 관측으로 구한 거리 측정값은 질량에 비해 통계 신뢰 구간이 비교적 넓게 나타난다. GW150914까지의 거리를 파섹 단위로 쓰면 410 Mpc이다. 다중신호 천문 관측이 가능한 중력파원에 대해서는 중력파와 전자기파로 구한 측정값을 서로 비교함으로써 보다 정확히 중력파원까지의 거리를 알아낼 수 있을 것이다.

다. 스핀: 자전하는 블랙홀의 각운동량은 보통 단위가 없이 0과 1 사이의 값을 갖는 스핀 파라미터로 나타낸다. 스핀은 상대론이나 천체물리학적으로 블랙홀을 이해하는데 중요한 물리량이다. 일반적으로 밀집쌍성병합에서 방출되는 중력파형함수는 두 별의 질량에 대한 의존도가 가장 크지만, 블랙홀 스핀에 대한 의존도 역시 약하게 존재하므로 중력파 분석을 통해 스핀을 추정할 수 있다. 하지만, GW150914처럼 무거운 블랙홀 쌍성의 경우 라이고 주파수 대역에서 검출 가능한 중력파 신호의 지속시간이 너무 짧아서 블랙홀의 스핀을 측정하는 것이 쉽지 않다. GW150914의 중력파 신호 지속기간은 0.2초 정도로, 합병 직전 35–150 Hz 대역에서 8회의 주기적 신호(cycle)가 검출되었다. 불과 몇 번의 주기적 신호만으로도 질량은 상당히 정확히 측정할 수 있으나 블랙홀 스핀의 크기나 방향은 거의 알아내기 힘들며 GW150914의 경우 두 블랙홀 스핀이 90%의 신뢰 구간에서 각각 0.7과 0.9보다 작다는 정도만 알 수 있었다. 블랙홀 스핀에 대한 보다 정확한 3차원 정보를 알아내기 위해서는 어드밴스드 라이고보다 몇 배 더 감도가 좋은 기기가 필요하다. 한편,

GW150914와 같이 블랙홀 질량이 거의 같은 경우에는, 스핀 각운동량보다 궤도 각운동량이 훨씬 크기 때문에 병합 전 블랙홀의 개별 스핀에 대한 추정치가 부정확하더라도 병합 후 남은 단일 블랙홀의 스핀은 비교적 정확히 알 수 있다. 각운동량 보존 법칙을 적용하여 병합 전 쌍성의 총 각운동량에서 중력파 복사로 손실된 양을 뺀 나머지 운동량이 블랙홀 스핀으로 전환되었다고 가정하면 쌍성 병합 후 생성된 블랙홀의 스핀을 구할 수 있다. GW150914 병합 후 생성된 블랙홀의 스핀은 0.67 정도로 상당히 크다.

라. 중력파로 방출된 에너지: 두 블랙홀의 합병 후에 생성된 단일 블랙홀의 질량은 $61.8 M_{\odot}$ 으로 추정되며, 합병 직전과 직후 총 질량의 차이는 $35.7 + 29.1 - 61.8 = 3.0 M_{\odot}$ 이다. 즉, 블랙홀 쌍성의 병합 과정에서 $3 M_{\odot}$ 에 해당하는 질량 에너지가 중력파 복사로 방출되었다고 해석할 수 있다. 중력파의 진폭 h 는 두 블랙홀의 합병 직전에 최대값에 도달했으며, 중력파 주파수 250 Hz에서 $h \sim 10^{-21}$ 으로 측정되었다.^[2,5] 중력파의 순간 최대 진폭으로부터 구한 중력파 다발(flux)의 순간 최대값은 $10^5 \text{ erg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 이다(질량-에너지 등가원리를 적용하면 $200 M_{\odot} c^2 \text{ s}^{-1}$ 에 해당한다.) 여기에 측정된 거리(410 Mpc, 약 10^{28} cm)를 고려하면 GW150914에서 방출된 중력파 에너지의 시간에 대한 변화량(혹은 중력파 광도 “luminosity”)의 순간 최대값은 $10^{56} \text{ erg s}^{-1}$ 정도가 된다. 이는 빛으로 관측 가능한 우주에서 일어나는 가장 강력한 폭발 현상으로 일컬어지는 감마선 폭발에서 관측된 값보다 100배 이상 크다. 현재까지 알려진 가장 강력한 감마선 폭발은 GRB110918A이다. 감마선이 전 방향으로 방출되었다는 가정하에 GRB110918A의 관측값으로부터 얻은 감마선 광도는 약 $10^{54} \text{ erg s}^{-1}$ 였다.^[29]

마. 파원의 위치: 중력파원의 천구 상의 위치는 여러 대의 검출기에 중력파 신호가 도달한 시간차로부터 구할 수 있다. GW150914는 미국의 서북해안(워싱턴 주 핸포드 시)과 남동해안(루이지애나 주 리빙스턴시) 외곽에 위치하고 있는 LIGO 관측소에서 모두 검출되었다. 두 관측소 간의 거리는 3000 km이며, 각 관측소에서 GW150914를 검출한 시간차는 약 6.9 ms였다. 관측소 두 곳 사이의 검출 시간 차이로는 중력파원의 위치를 천구 상에 고리띠의 형태로 추정하는 정도가 가능하다. GW150914의 경우 두 검출기에 도달한 중력파형의 위상과 세기가 검출 시간 차이 만큼 일정하게 연관되어 있다고 가정하여, 위치에 대한 추가적인 정

REFERENCES

- [29] D. D. Frederiks, K. Hurley, D. S. Svinin, V. D. Pal'shin, V. Mangano, *et al.*, *Astrophys. J.* **779**, 151 (2013).

Fig. 3. Source localization is one of the most important goals of CBC parameter estimation in the context of GW astrophysics and multi-messenger astronomy. The signal from GW150914 is originated from somewhere in the Southern hemisphere. The purple (yellow) line represents a region containing the true location of GW150914 at a 90% (10%) probability. Image credit: LIGO/Axel Mellinger.

보를 얻을 수 있었다. 이렇게 측정된 GW150914의 위치가 그림 3에 표시되어 있다. GW150914 위치에 대한 공간각 범위는 50%(90% 그림 3의 보라색 실선)의 신뢰 구간에서 140 deg^2 (590 deg^2)로 매우 넓어서 망원경을 사용한 후속 관측이 쉽지는 않았다. 라이고와 비르고, 카그라 검출기는 모두 중위도에 위치하고 있다. 앞으로 라이고-인디아가 건설, 가동되면 관측소 간의 위도 차이로부터 남북 방향에 대한 위치 오차를 상당히 줄일 수 있을 것으로 기대된다.^[30]

라이고와 같은 km급 레이저 간섭계의 감도와 주파수 대역으로는 밀집쌍성병합을 몇 초에서 몇 분간 검출할 수 있다. KGWG가 주도하여 연구 중인 SOGRO(Superconducting Omnidirectional Gravitational Radiation Observatory) 중력과 검출기는 1-10 Hz 대역에서 태양 질량보다 수백 배 무거운 블랙홀 쌍성의 나선 궤도 운동을 며칠에서 몇 달 정도 지속적으로 관측할 수 있을 것이다.^[3] 총 질량이 태양보다 질량이 수십 배 큰 블랙홀 쌍성은 GW150914의 발견으로 처음 검증되었다. 태양보다 질량이 수백 배 큰 블랙홀 쌍성은 이론적으로만 그 존재가 예측되고 있다. SOGRO로 가능한 중력과 천문학/천체물리학의 실현성을 따져보기 위해서는 블랙홀의 진화와 성질 및 기기 특성에 대한 연구, 하드웨어 개발이 모두 중요하다. SOGRO로 중력과 검출을 하게 된다면 GW150914와 비슷하게 모수 추정을 통해 이제까지 알려지지 않던 종류의 블랙홀의 성질에 대해 알아볼 수 있을 것이다.

KGWG의 연구활동

지난 십여 년간 한국중력과연구협력단은 중력과 천문학과 천체물리학 분야에서 독자적으로 혹은 국제 연구협력단과의 공동연구를 통해 다양한 연구를 수행해왔다. 2009년 라이고 과학협력단에 가입한 이후에는 밀집쌍성병합에 주목하여 중력과 모수 추정, 중성자별/블랙홀에 대한 천체물리학적 모델링, 수치상대론 및 우주론 연구를 수행하고 있다. 중력과 모수 추정에 대한 국제 공동연구의 첫 성과로 LALSuite의 마코브 체인 몬테 카를로(Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 샘플링 알고리즘을 사용하여 수행한 블랙홀-중성자별 쌍성병합 관련 연구가 있다.^[31-33] 이 연구에 필요한 모든 수치 계산은 라이고 데이터 그리드(LIGO Data Grid) Tier 3 센터인 KISTI GSDC의 컴퓨터로 수행하였다. 보다 최근에는 다양한 중력파형 모델의 특성과 적합성에 대한 연구,^[34,35] 피셔행렬(Fisher information matrix) 방법을 활용한 모수 추정 연구,^[36,37] 중성자별 및 블랙홀의 생성 환경과 성질에 대한 연구를 수행하였다.^[38] 현재까지 한국중력과연구협력단은 중력과 모수 추정 및 중력파형 모델링 분야에서 박사 1명과 석사 1명을 배출하였다. 그림 4는 한국중력과연구협력단에서 현재 진행하고 있는 중성자별-중성자별 쌍성에 대한 모수추정 결과의 예이다. 중성자별 각각의 질량이 태양보다 1.4배 정도 큰 중성자별-중성자별 쌍성의 나선궤도운동에서 방출되는 중력파를 구현하기 위해 포스트 뉴턴 공식을 사용하여 중력과 신호를 시뮬레이션하고, LALSuite에 포함된 모수추정 라이브러리를 사용하여 중성자별 쌍성의 주요 물리량에 대한 개별 확률분포함수와 상관 관계를 구했다. 어드밴스드 라이고 핸포드, 어드밴스드 라이고 리빙스턴, 어드밴스드 버고로 구성된 검출기 네트워크가 모두 가동하는 경우를 고려하여, 3개 검출기의 설계 감도를 시뮬레이션에 적용하였다. 그림 4에서는 독자들이 무거운 블랙홀 쌍성에서 방출된 GW150914로부터 얻은 물리량과 비교해볼 수 있도록, 처프 질량과 거리, 천구상의 위치에 대한 상관 그림을 제시하였다. 중력과 데이터 분석 외에, 국내 연구진이 주도하여 아인슈타인 방정식을

REFERENCES

- [30] S. Fairhurst, *Classical and Quantum Gravity* **28**, 105021 (2011).
- [31] H. S. Cho, E. Ochsner, R. O'Shaughnessy, C. Kim and C. H. Lee, *Phys. Rev. D* **87**, 024004 (2013).
- [32] R. O'Shaughnessy, B. Farr, E. Ochsner, H. S. Cho, C. Kim and C. H. Lee, *Phys. Rev. D* **89**, 064048 (2014).
- [33] R. O'Shaughnessy, B. Farr, E. Ochsner, H. S. Cho, V. Raymond, C. Kim and C. H. Lee, *Phys. Rev. D* **89**, 102005 (2014).
- [34] H. S. Cho, *Class. Quantum Grav.* **32**, 235007 (2015).
- [35] H. S. Cho and C. H. Lee, *Class. Quantum Grav.* **31**, 235009 (2015).
- [36] H. S. Cho, *J. Korean Phys. Soc.* **66**, 1637 (2015).
- [37] H. S. Cho, *J. Korean Phys. Soc.* **67**, 960 (2015).
- [38] Y. B. Bae, C. Kim and H. M. Lee, *MNRAS* **440**, 2714 (2014).

Fig. 4. An example of parameter estimation for a neutron star - neutron star binary with 3 LIGO-Virgo detector network, using artificial GW signal generated by LALsuite. (a) correlation between the chirp mass and distance to the source. Chirp mass is a characteristic binary mass that is proportional to GW strain amplitude (see Eq. (3) in Ref. [28] for a definition). Notice the distance estimate ranges between 120 - 240 Mpc, due to the small chirp mass of $1.2 M_{\odot}$. For comparison, GW150914 has a chirp mass of $30 M_{\odot}$ and is 410 Mpc from the Earth. (b) sky location of the source. If all 3 detectors detect GWs, it is possible to constrain the sky location of the source better than GW150914, as shown in here. Image Credit: Jeongcho Kim (Inje U.)

컴퓨터를 사용하여 아무 근사 없이 수치적으로 풀어 밀집쌍성계의 성질을 규명하는 연구를 수행하고 있다. 위에서 기술한 바와 같이 밀집쌍성병합에 대한 중력과 자료 분석은 템플릿 중력파형 모델링이 중요하다. 중력과 데이터 분석에는 보통 해석적 함수 혹은 실험식으로 계산한 수십만 개의 템플릿이 사용된다. 이러한 해석적 함수의 검증과 구성은 수치상대론의 계산에 많이 의존한다. 국내 연구진은 블랙홀/중성자별 쌍성에 대해 포스트 뉴턴 공식을 적용한 중력파형의 개발과 모수 추정 연구에 병행하여, 아인슈타인 툴킷(<http://einstein Toolkit.org/>)을 활용한 수치 연구도 수행하고 있다. 블랙홀에 대한 최근 연구는 서로 자유롭게 돌아다니던 두 블랙홀이 중력과 방출로 인해 포획되어 구속계(bound system)를 구성하는 과정에서의 포획단면적 산출, 이 과정에서 방출되는 중력파의 파형과 성질, 에너지와 각운동량의 손실, 다양한 질량비와 스핀의 영향, 병합으로 인한 거대 블랙홀 형성, 라이고 검출 빈도에의 영향 등이 있다. 그림 5는 동일 질량을 갖는 두 블랙홀이 포획될 때의 궤도 및 포획 과정에서 방출되는 중력파의 파형을 보여준다(그림에서 대칭적인 상대 블랙홀의 궤도는 생략하였다).^[39] 이외에 수치상대론의 미개척분야인 우주론 주제와 관련해서, 회전하는 블랙홀로 이루어진 우주모델의 수치 연구도 진행 중이다.^[40] 이러한 수치 연구는 고성능 컴퓨터의 사용이 필수적인데 KISTI의 Tachyon 슈퍼컴퓨터와 서울대학교 물리천문학부(천문전공)의 지류뉴 클러스터를 주로 사용하고 있다.

결론과 전망

현재 라이고의 감도를 고려할 때, 향후 십 여년간의 중력과

Fig. 5. Features of orbits and waveforms for equal-mass BH-BH binaries without spin. Image credit: Jakob Hansen, *et al.*^[39]

검출은 중력파원 천체의 검증(블랙홀 쌍성 등), 주요 물리량 측정(질량, 거리, 스핀 등), 그리고 중력파 발생 현상의 빈도를 보다 정확하게 알아내는데 가장 유용할 것이다. GW150914의 발견으로 빛이 아닌 중력파로만 관측할 수 있는 블랙홀과 같은 천체가 실재한다는 것이 밝혀졌듯이, 이제껏 알지 못했던 새로운 천체가 발견될 가능성도 있을 것이다. 천문학적 관점에서는 다중신호 천문학이 무엇보다 큰 화두이다.

앞으로 어드밴스드 라이고보다 10배 더 감도가 향상된 검출기가 구현된다면 중성자별의 내부 구조에 따라 달라지는 중력파의 미세한 변화까지도 데이터 분석으로 파악할 수 있게 될 것이다. 뿐만아니라 강한 중력장에서 보다 더 엄밀하게 일반상대론을 검증하고, 수정 중력이론과 일반상대론에 대한 정량 비교도 가능할 것으로 기대된다.

중력파 탐색은 백 년 전 아인슈타인이 제시한 방정식으로부터 시작했다. 현대 공학과 과학의 결정체로 이루어진 레이저 간섭계에 의한 중력파 관측 성공으로 중력파 천문학이라는 우주를 탐구할 수 있는 새로운 창을 여는 결실이 맺어지게 되었다. 전자기와 천문학으로 지난 수백여 년간 우주를 탐구해왔듯이, 앞으로 중력파 천문학으로 인류가 우주에 대해 무엇을 배우게 될지 기대된다.

감사의 글

이 연구는 한국천문연구원과 연세대학교의 학연연구협력사업, 아시아태평양이론물리센터, KISTI GSDC 및 연구재단(과제번호: NRF-2013R1A1A2060677, NRF-2015R1D1A1A01060210, NRF-2015R1A2A2A01004238)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [39] J. Hansen, G. Kang, H. Kim, P. Diener and F. Loeffler, in prep.
- [40] C. Park, PhD Thesis, KAIST (2015).