

Gravitational-wave Astronomy and Astrophysics

Chunglee KIM*

Department of Physics and Astronomy,
Seoul National University, Seoul 08826, Korea
The Korean Gravitational Wave Group

Hee Suk CHO[†] · Gungwon KANG

Korea Institute of Science and Technology Information,
Daejeon 34141, Korea
The Korean Gravitational Wave Group

Hyung Won LEE

Department of Computer Simulation,
Inje University, Gimhae 50834, Korea
The Korean Gravitational Wave Group

Chang-Hwan LEE

Department of Physics,
Pusan National University, Busan 46241, Korea
The Korean Gravitational Wave Group

Hyun Kyu LEE

Department of Physics, Hanyang University, Seoul 04763, Korea
The Korean Gravitational Wave Group

(Received 11 March 2016 : revised 14 March 2016 : accepted 14 March 2016)

On September 14, 2015, gravitational waves (GWs) were detected by the LIGO (Laser Interferometer gravitational-wave observatory) detectors in USA. The event (GW150914) is originated from a coalescence of two black holes (BHs) located at 13 billion light years away from the Earth. This 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.

PACS numbers: 04.30.-w, 97.60.Lf, 26.60.Kp, 04.25.D-, 95.75.Pq

Keywords: Gravitational waves, Black holes, Neutron stars, Gamma-ray bursts, Supernovae, Astrophysics, Statistical analysis, Bayesian inference

중력파 천문학 및 천체물리학 시대를 맞이하여

김정리*

서울대학교 물리천문학부, 서울 08826, 대한민국
한국중력파연구협력단

조희석[†] · 강궁원



한국과학기술정보연구원, 대전 34141, 대한민국
한국중력파연구협력단

이형원

인제대학교 컴퓨터시뮬레이션학과, 김해 50834, 대한민국
한국중력파연구협력단

이창환

부산대학교 물리학과, 부산 46241, 대한민국
한국중력파연구협력단

이현규

한양대학교 물리학과, 서울 04763, 대한민국
한국중력파연구협력단

(2016년 3월 11일 받음, 2016년 3월 14일 수정본 받음, 2016년 3월 14일 게재 확정)

2015년 9월 14일, 지구로부터 13억 광년 떨어진 곳에서 벌어진 블랙홀 쌍성의 병합으로 발생한 중력파가 라이고 레이저 간섭계 중력파 검출기에 포착되었다. 이는 최초의 중력파 검출이자 최초의 블랙홀 쌍성 발견이었다. 이 논문에서는 중력파 검출의 천체물리학적 의미를 짚어보고자 한다. 현재 지구상에 건설된 거대 레이저 간섭계의 성능으로 발견가능한 중력파원을 알아보고, 중력파형 모델링과 중력파 발견이 천체물리학 모델에 유용한 이유에 대해 간략히 기술한다. 또한 블랙홀-블랙홀 쌍성 및 중성자별-중성자별 쌍성 병합을 중심으로 중력파 모수 추정 (parameter estimation)에 관해 논한다. 마지막으로 중력파 천문학, 나아가서는 다중신호 천문학 (multi-messenger astronomy) 시대를 전망해본다.

PACS numbers: 04.30.-w, 97.60.Lf, 26.60.Kp, 04.25.D-, 95.75.Pq

Keywords: 중력파, 블랙홀, 중성자별, 감마선폭발, 초신성, 천체물리학, 통계 분석, 베イズ 추론

I. 서론

아인슈타인의 상대성이론에 따르면, 블랙홀과 같은 고중력 천체가 부딪히는 경우 4차원 시공간의 변형이 발생하여 파동 (wave) 처럼 전파된다. 이런 ‘시공간의 잔물결’을 중력파 (重力波, gravitational waves)라 칭한다. 현대 기술로 검출가능한 중력파원 (源)은 모두 천체들이다. 중력파는 가속을 동반한 질량 분포의 급격한 변화로부터 발생하므로, 중력파로 천문 관측이 가능해지면, 어둡고 중력이 강한 천체 (블랙홀, 중성자별)나 초기 우주등 전자기파나 입자로 관측 불가능한 현상을 연구할 수 있다. 2015년 9월 14일, 미국 라이고 (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) [1] 레이저 간섭계 그룹이 질량이 태양보다 수십 배 무거운 블랙홀간의 병합 (併合, coalescence)으로 발생한 중력파를 검출하였다 [2]. 이 중력파는 GW150914로 명명되었으며 이번 발견을 계기삼아 이제 막 가능성을 보이고 있는 중력파 천체 물리학 (천문학)을 논하고자 한다. 이 논문에서 주로 사용할 거리와 질량 단위는 다음과 같다.

• 거리단위: $1 \text{ pc (parsec)} = 3 \times 10^{18} \text{ cm} = 3.26 \text{ light years}$

• 질량단위: $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{ g}$ (\odot 은 태양을 상징하는 천문 기호이다.)

1 pc (파섹)은 일반적으로 천문학적인 거리를 나타내는데 편리하다. 은하의 크기는 3000 pc 정도이며, 우리 은하로부터 가까운 안드로메다 은하까지의 거리는 780000 pc (250 만 광년 $= 2.4 \times 10^{19} \text{ km}$)이다. 별의 질량은 보통 태양을 기준으로 표기한다.

II. 중력파 신호의 종류

지구상에 건설된 km급 레이저 간섭계로 검출가능한 중력파 신호는 다음과 같이 네 종류로 구분할 수 있다.

- 연속형 (continuous): 관측 가능 시간이 대략 수십 분 이상이면 연속형 중력파 신호로 구분한다 (Fig. 1(a)). 비대칭적 질량분포를 가지고 빠르게 자전하는 중성자별이 연속형 중력파 신호를 방출한다.

*E-mail: chunglee.kim0@gmail.com

†E-mail: chohs1439@gmail.com

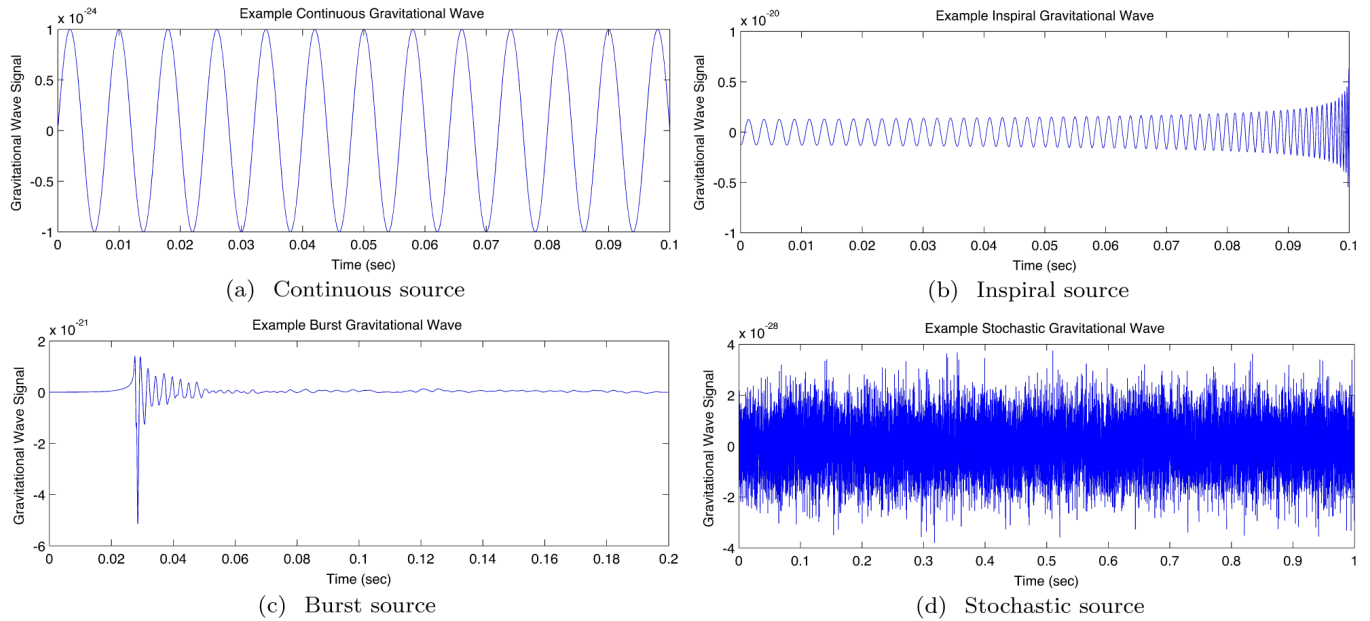


Fig. 1. (Color online) Four types of gravitational-wave sources. Image credit: A. Stuver/LIGO (<http://www.ligo.org/science>).

- 나선 궤도형 (inspiral): 쌍성의 나선 궤도 운동으로부터 방출되는 중력파 신호이다 (Fig. 1(b)). 나선궤도 단계에서 방출되는 중력파의 진폭과 주파수는 (공전 궤도가 줄어들에 따라) 점점 증가한다.
- 폭발형 (bursts): 감마선 폭발 (gamma-ray bursts) 나 초신성이 대표적인 예로, 짧은 순간에 폭발적인 중력파가 방출되고 잦아드는 신호를 폭발형으로 분류한다 (Fig. 1(c)). 이번에 발견된 GW150914는 라이고 검출 주파수 대역에서 0.2초간 검출되었다. 대략 검출기 주파수 대역에서 수십 분이상 관측이 가능하면 연속형, 그 이하면 폭발형으로 구분한다.
- 스토캐스틱형 (stochastic): 지구로부터 수 백만 광년 떨어진 우주 사이에서 방출된 다양한 주파수와 세기를 갖는 중력파가 방출된다면, 이들이 중첩되어 검출될 것이다 (Fig. 1(d)). 우주 배경 복사 (cosmic microwave background) 처럼, 이런 신호를 중력파 배경 복사 (gravitational-wave background)라 부른다. 중력파 배경은 다양한 천체에서 방출된 중력파 신호와 초기 우주에서 방출된 중력파 신호가 섞여 있으며, 이 둘을 분리하여 연구하는 것이 데이터 분석의 큰 과제이다.

라이고와 같은 km급 레이저 간섭계가 가장 관심두고 있는 중력파원은 블랙홀이나 중성자별로 구성된 밀집성쌍성 (compact binaries)으로, 이 천체는 라이고 검출 주파수

대역에서 나선 궤도형이자 폭발형 신호로 구분된다. 한국 중력파연구협력단 (KGWG) 역시 밀집성 쌍성에 주목하여 연구를 진행 중이다. 중력파, 중력파원 및 상대성이론 검증에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌 [3-5]을 추천한다.

III. 중력파 검출과 천체물리학

1. 중력파원으로서의 밀집성 쌍성

태양보다 몇 배 이상되는 질량을 갖는 별의 마지막 진화 단계에서 중성자별과 블랙홀이 생성된다. 이들은 태양보다 질량이 큰 반면 크기는 수십 - 수백 km 내외로, 밀도가 매우 높기 때문에 밀집성 (compact objects) 혹은 고중력 별이라고도 부른다. 이러한 밀집성은 매우 드물다. 우리 은하와 비슷한 은하는 약 천억 개의 (태양과 비슷한, 빛으로 관측가능한) 별로 이루어져 있다고 추정하는데, 중성자별과 블랙홀의 수는 수십 만개 정도로 매우 적다.

밀집성으로 구성된 쌍성 (binary)을 밀집성 쌍성이라 하며, 그 중 일부는 GW150914와 같이 생성 후 허블 시간보다 짧은 기간 내에 병합하여 중력파를 방출한다. 현재 세계 각국에서 건설 중이거나 가동되고 있는 중력파 검출기들은 중성자별이나 블랙홀로 이루어진 쌍성의 병합을 검출하는데 최적화 되어있으며 이는 중력파 감도 곡선을 통해 이해할 수 있다 (참고문헌 [2]의 Fig. 3 “라이고 검출기 감도 곡선” 참조). 중력파 검출에서 중요한 ‘밀집성쌍성병합 (compact

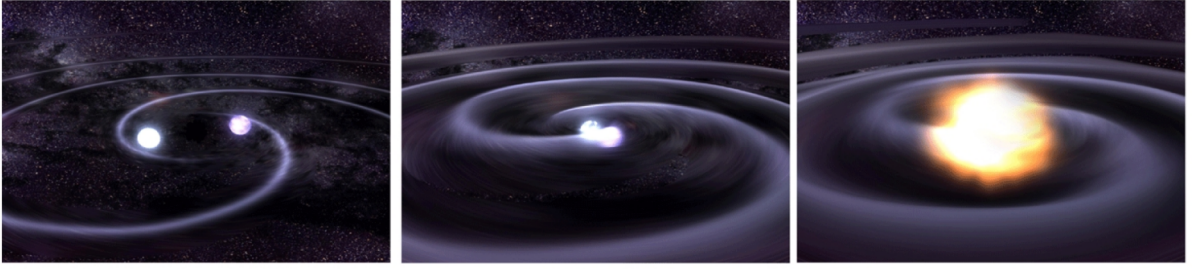


Fig. 2. (Color online) An artist's impression of a compact binary coalescence (CBC). From left to right, the three phases of coalescence (Inspiral-Merge-Ringdown) are depicted. CBCs consisting of black holes and neutron stars are prime targets for gravitational-wave detectors on Earth. Image credit: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

binary coalescence)은, 쌍성이 공전 운동을 하는 동안 중력파가 발생하면서 두 밀집성이 점점 가까워지는 “나선 궤도” (Inspiral), 부딪혀 하나로 합쳐지는 “합병” (Merger), 새로운 하나의 블랙홀이 형성되어 중력파의 세기가 점차 잦아드는 “안정화” (Ringdown)의 세 단계를 통칭한다 (Fig. 2).

지구로부터 거리 d Mpc만큼 떨어진 곳에서 f_{gw} Hz의 주파수로 중력파를 방출하고 있는 쌍성이 있다고 가정하자. 쌍성의 나선 궤도 운동으로부터 방출되는 중력파의 세기 (strain)는 중력파의 주파수 (f_{gw}), 쌍성까지의 거리 (d), 쌍성의 질량에 의해서 다음과 같이 결정된다.

$$h = 1 \times 10^{-21} \left(\frac{f_{\text{gw}}}{30 \text{ Hz}} \right)^{2/3} \left(\frac{400 \text{ Mpc}}{d} \right) \left(\frac{\mathcal{M}}{30 M_{\odot}} \right)^{5/3} \quad (1)$$

위 식에서 \mathcal{M} 은 처프 질량 (chirp mass, 별칭 ‘새소리 질량’)으로 다음과 같이 정의된다. $\mathcal{M} = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$. 처프 질량은 케플러 궤도 역학에서 흔히 쓰이는 환산 질량 (reduced mass)처럼 중력파 세기를 가늠하는데 사용되는 쌍성의 특징적인 질량값이며 나선궤도 단계에서 방출되는 중력파형을 처프신호 (chirp signal)라고 부른다. 어드밴스드 라이고의 감도가 천문학적으로 의미를 갖기 시작하는 주파수 30 Hz와 이번에 발견된 GW150914로부터 얻은 거리와 질량을 식 (1)에 대입하면, $h \simeq 1 \times 10^{-21}$ 이다. 위 식에서 볼 수 있듯이 h 는 단위가 없는 양으로써 검출기 간섭계의 길이 변형을 ($\delta L/L$)에 비례한다.

GW150914는 중력파 발견과 검출기의 성능 조건에 대한 기준을 제시한다. 즉, 너무 먼 거리, 너무 가벼운 처프 질량, 혹은 방출되는 중력파 주파수가 지나치게 낮은 대역인 파원들은 라이고 감도로 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, 해수 운동 등에 의한 다양한 잡음이 매우 강하게 존재하기 때문에, 어드밴스드 라이고는 대략 10 – 2000 Hz 대역에서 중력파 검출이

가능하도록 설계되었고, 특히 중성자별 및 블랙홀 쌍성에서 방출되는 중력파의 특성에 맞춰 100 – 300 Hz 대역에서 가장 민감하다.

중력파 검출기의 설계 감도로 1 년간 지속적으로 가동할 수 있다는 전제하에, 연당 1 회 이상 중력파 검출이 이루어져야 중력파 천문관측이 실용적인 의미를 갖는다. 중력파로 밀집쌍성병합을 발견할 수 있으려면 아주 먼 우주까지 탐색할 수 있어야 한다. GW150914가 검출된 2015년 9월 당시 어드밴스드 라이고의 감도는 총 질량이 태양보다 70 배 큰 블랙홀 쌍성을 13억 광년 떨어진 곳에서 검출할 수 있는 수준에 도달했었다. 현재 기기 성능 향상 작업이 진행 중인 어드밴스드 비르고, 2016년 봄부터 가동을 시작할 일본 카그라 검출기 등 다른 검출기들도 어드밴스드 라이고 정도의 감도에 도달해야만 중력파 천문관측이 가능하다고 할 수 있다.

2. 밀집성 쌍성의 중력파형 모델링

밀집성 쌍성에 대한 중력파 데이터 분석의 기본은 실제 중력파 신호가 잡음에 묻혀 있는 시계열 (time series) 데이터에 정합 필터 (matched filter) 방법을 적용하여 중력파 신호를 찾는 것이다. 정합 필터는 신호의 파형에 대한 모델링이 잘 되어 있을 경우 가장 효율적으로 신호를 찾아낼 수 있는 방법이다. 중력파 검출 파이프라인은 다양한 파원에 대해서 중력파형을 미리 계산해놓은 템플릿 파형 (template waveform)들을 정합 필터에 사용한다 (중력파 검출 파이프라인과 GW150914 검출에 대해서는 참고문헌 [6]참조). 따라서 효율적인 중력파 검출을 위해서는 템플릿 파형을 정확하게 생성하는 것이 매우 중요하며 이에 대해 밀집성 쌍성계를 중심으로 간략히 살펴본다.

중력파형을 모델링하는 방법은 물체의 운동이 빛속도보다 매우 작다는 가정하에 ($v/c \ll 1$) 일반상대론을 근

사적으로 계산해서 해석적 함수 형태로 표현하는 포스트 뉴턴 공식(post-Newtonian formalism), 쌍성계와 같이 두 물체로 이루어진 계를 하나의 물체처럼 실효적으로 기술하는 Effective-One-Body 방법, 그리고 컴퓨터를 이용해 아인슈타인 방정식을 있는 그대로 수치적으로 계산하는 수치상대론(Numerical Relativity, NR)등이 있다.

질량이 가벼운 블랙홀이나 중성자별로 이루어진 쌍성계의 경우 합병-안정화(merger-ringdown) 단계에서는 중력파의 주파수가 매우 높아서 검출기의 감도를 벗어나기 때문에 이러한 단계의 파형을 정확히 계산할 필요가 없다. 따라서 포스트 뉴턴 공식이나 Effective-One-Body 방법으로 계산한 나선 궤도 파형만으로도 데이터 분석에 필요한 중력파형을 충분히 얻을 수 있다. 하지만 GW151409와 같이 태양 질량보다 수십 배 큰 블랙홀을 포함하는 쌍성의 경우 검출기 감도 내에서 합병과 안정화가 일어나므로 병합 전 과정에 대한 중력파형을 정확히 알아야 중력파 검출과 분석이 가능하다. 한편, 수치상대론 방법을 통하면 병합 전 과정에 대한 정확한 파형을 계산할 수 있으나 수치상대론은 계산 시간이 매우 길다는 것이 단점이다. 따라서 중력파 데이터 분석에 사용할 템플릿 파형은 포스트 뉴턴 공식이나 Effective-One-Body 방법을 적용하여 계산한 나선 궤도 단계의 중력파형에 수치상대론으로 구한 합병-안정화 단계 파형을 결합하여 만든다.

중력파형은 보통 시간의 함수로 계산되지만 데이터 분석에 사용되는 정합 필터는 주파수의 함수를 사용할 때 매우 효율적이다. 따라서 빠른 계산 시간이 중요한 검출 파이프라인과 실시간 모수 추정 파이프라인 등에서는 시간 영역의 중력파형에 푸리에 변환을 적용하여 주파수 영역의 함수로 표현한 중력파형 모델을 주로 사용한다. 모수 추정의 경우에는 위에서 기술한 병합 중력파형과 나선 궤도 단계만 포함된 포스트 뉴턴 중력파형 모델들을 파원의 성질에 따라 적절히 적용한다. 중력파 데이터 분석에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌 [7]을 추천한다.

3. 중력파 검출 빈도와 중력파원 모델링

밀집쌍성의 병합율(coalescence rate)¹을 이용한 중력파 검출 빈도 예측은 검출기의 성능과 중력파 검출 가능성을 가능하는 지표로 사용되고 있다. 밀집성의 생성과 진화에 대한 천체물리학적 모델링으로부터 밀집쌍성의 병합율을 계산할 수 있다. 밀집쌍성병합율은 결국 중력파원의 발생

빈도이다. 여기에 검출기 감도와 우주내 은하 분포(별의 분포)까지 고려해서 중력파 검출 빈도(detection rate)를 예측할 수 있다. 라이고와 같은 레이저 간섭계 기반 중력파 검출기들은 모두 천문 관측으로 확인된 중성자별 쌍성과 이론적으로 예측되는 블랙홀 쌍성의 특성을 고려하여 1년 가동시 적어도 1회 이상 이들 밀집쌍성병합에서 방출된 중력파를 검출할 수 있도록 설계된 것이다.

중성자별 쌍성은 약한 중력장에서의 상대론적 효과를 관측적으로 알아볼 수 있는 우주 실험실이라고 할 수 있으며 레이저 간섭계가 건설되기 전부터 중력파원으로 잘 알려져 있었다. 1974년 발견된 최초의 중성자별-펄서 쌍성(헐스-테일러 펄서)은 현재까지 수십 년간 전파망원경으로 관측되고 있다. 이 쌍성의 공전 궤도는 중력파 복사에 의한 각운동량 손실로 인해 미세하게 감소하고 있으며 지금으로부터 약 3억년 뒤에는 부딪혀 하나의 블랙홀을 생성할 것으로 예상된다. 지난 25년간의 관측 데이터로부터 구한 헐스-테일러 쌍성의 궤도 감소율(측정값)과 상대성이론의 예측(중력파 방출로 인한 궤도 감소율)간의 비는 0.997 ± 0.002 로 0.3% 오차 범위 내에서 잘 일치하며, 약 3억년 뒤에는 두 중성자별이 부딪혀 하나의 블랙홀을 생성할 것으로 예상된다 [8]. 러셀 헐스와 조제프 테일러는 “중성자별 쌍성의 발견과 중력연구의 새로운 가능성”에 대한 기여를 인정받아 1993년에 노벨상을 수상하였다.

현재 우리 은하에서 발견된 중성자별-중성자별 쌍성은 10여 개인데, 이 중 4-5개가 병합 과정에 있다. 참고문헌 [9]은 우리 은하내 중성자별 쌍성의 관측된 물리량을 적용하여 쌍성병합율을 계산하고, 이로부터 라이고-비르고 검출기의 중력파 검출 빈도를 구하는 통계적 방법론을 제시했다. 이 방법으로 구한 중성자별 쌍성병합율은 천문 관측 데이터를 감안한 만큼 이론 오차에 덜 민감하다. 최신 연구 결과에 따르면 우리 은하에서의 중성자별 쌍성 병합은 수백만 년에 20여 회 발생할 것으로 예상된다. 라이고-비르고 검출기 네트워크가 설계 감도로 가동시 400 Mpc 정도의 반지름을 갖는 공간²을 탐색할 수 있을 것으로 예상된다. 최신 연구 결과에 따르면 중성자별 쌍성 병합을 연간 1 - 30 회 정도 발견할 것으로 기대된다 [10].

GW150914 발견 이전까지는 관측 자료의 부재로 인해 블랙홀 쌍성병합율에 대해서 무거운 별의 진화 이론에 근거한 예측값만 알려져 있었으며 중성자별 쌍성에 비해서 그 오차범위가 매우 컸다. 2010년 무렵까지의 이론 예측값에 따르면 어드밴스드 라이고 검출기로 1년간 1 Gpc³

¹ 병합의 어떤 단계에 초점을 두느냐에 따라 나선궤도 발생률(inspiral rate) 또는 합병율(merger rate)이라고도 부른다.

² 블랙홀은 넓은 질량 분포를 가질 것으로 예상되지만 중성자별은 대부분 질량이 태양과 비슷한 정도일 것이다. 중력파의 세기는 $M^{5/3}$ 에 비례하므로 블랙홀에 비해 중성자별의 검출 가능 부피가 매우 작다.

의 우주 공간을 탐색하면 블랙홀 쌍성 병합을 1 – 1000 회 정도 발견할 수 있을 것으로 예상하고 있었다 [11]. 하지만 GW150914 발견을 고려해서 블랙홀 쌍성병합을 간단히 계산하면 다음과 같다. 라이고 검출기가 0.04 년 (16 일) 간 지구로부터 $\sim 0.3 \text{ Gpc}^3$ 에 달하는 우주 공간을 탐색하여 블랙홀-블랙홀 병합을 한 번 발견했으므로, 병합율은 $1/(0.3 \times 0.04) \sim 80 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 이 된다. 이 값은 라이고의 탐색 가능 우주 공간에서 일어나는 GW150914와 비슷한 블랙홀 쌍성의 병합을 밀도 (단위: $\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$)에 해당한다. 라이고-비르고 연구협력단은 실제 중력파 검출 파이프라인을 사용한 시뮬레이션 결과에 참고문헌 [9]의 방법을 적용하여 블랙홀 쌍성병합을 탐색 공간 부피당의 밀도로 구하였다. GW150914과 같은 블랙홀 쌍성병합을 한 번 발견했다는 사실로부터 라이고가 도달 가능한 우주 공간내에서의 블랙홀 쌍성병합율을 약 $2 - 400 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 로 얻었다 [12].

관측으로부터 중력파의 검출 빈도를 얻게 되면 이제까지와는 반대로 밀집성의 이론 모델에 제약조건을 적용할 수 있게 된다. 앞으로 중력파 검출을 통해 더 많은 블랙홀 관측이 이루어지고, 또한 중성자별 병합 관측도 이루어진다면 여기서 얻은 밀집쌍성병합율로부터 블랙홀과 중성자별이라는 드문 천체의 생성과 진화를 보다 잘 이해할 수 있을 것이다.

4. 다중신호 천문학 (Multi-messenger Astronomy)

관측 천문학은 인간의 눈에 최적화된 가시광선의 관측으로부터 시작했으며 현대 과학은 전자기파가 아닌 입자 검출로도 천체와 우주를 연구할 수 있게 되었다. 한편, GW150914의 발견과 함께 중력파 천문학이 시작되었다고 할 수 있으며 한 천체에 대해 전자기파, 입자, 중력파 등 다각적인 관측으로 정보를 얻는 다중신호 천문학 시대가 멀지 않았다.

다중신호 천문학의 관점에서 가장 흥미로운 천체의 예로는 초신성을 들 수 있다. 초신성을 전자기파, 뉴트리노, 중력파로 관측할 수 있게 된다면 폭발 중심부에서 고중력 천체가 형성되는 과정을 보다 자세히 이해할 수 있을 것이다. 또다른 예로써 중성자별 쌍성의 병합 과정에서는 중력파뿐 아니라 전자기파 (감마선 폭발)도 방출될 것으로 예상된다. 이 가설을 확인하려면 중성자별 쌍성 병합을 중력파 검출기와 각종 망원경으로 동시에 관측할 필요가 있다. 중력파와 감마선 폭발을 모두 관측하게 된다면 오랫동안 미제로 남아있는 감마선 폭발의 발생 메커니즘에 대한 단서를 얻을 수 있을 것이다 [13,14]. 뿐만 아니라 야릇한 퀴

크 (strange quark)가 포함된 상태방정식 등 중성자별 내부 물질 상태에 대한 많은 연구가 진행되고 있음에도 아직 고밀도 강상호작용의 불확실성으로 인하여 완벽히 이해되지는 않고 있는데 중성자별 합병 단계를 중력파로 관측함으로써 중성자별 내부 구조를 파악할 수 있게 될 것이다 [15]. 더 나아가 중력파로 얻은 정보를 전자기파로 관측 데이터와 접목시키면 중성자별 물리량의 분포와 진화과정을 보다 잘 이해할 수 있을 것이다.

다중신호 천문학이 가능하기 위해서는 중력파와 전자기파 (및 입자) 연구진간의 실시간 정보 교환이 필수적이며 중력파 후보의 신호가 검출된 GPS 시각, 천구상의 위치, 거리 정보의 공유가 중요하다. 라이고 협력단과 비르고 협력단은 천문학자들과 협력하여 중력파 검출 후 최단 시간 (몇 분) 내에 신호의 위치 정보를 지구상 천문대와 관측 위성, 보내어 전자기파 및 입자 후속 관측을 할 수 있는 네트워크를 운영하고 있다. GW150914의 경우 신호의 관측 이틀 뒤 라이고측과 연구협력 양해각서를 맺고 있던 미국항공우주국의 페르미 (Fermi) 감마선 관측 위성이 중력파가 검출된 남반구 하늘을 전격적으로 탐색하였다 [16]. 또한 감마선 폭발 등 전자기파 관측 결과를 받아 검출 GPS 시각과 기타 정보를 사용하여 그에 해당하는 검출기 데이터를 분석하는 연구도 수행하고 있다. 다중신호 천문학에 대한 중력파 연구진의 최신 성과와 GW150914 관련 노력은 참고문헌 [17]에서 보다 구체적으로 기술하고 있다.

GW150914는 블랙홀 쌍성이 존재하며 서로 병합할 수도 있다는 최초의 관측 증거이다. 더욱이 이번 발견이 천체물리학계에서 특히 주목받은 이유는 블랙홀 각각의 질량이 태양 질량보다 30배 이상 크다는 점 때문이다. 쌍성의 진화는 매우 복잡하며 진화 과정 각각에 필요한 물리현상에 대한 관측이 없이는 GW150914 정도로 무거운 블랙홀의 생성을 가능하기가 쉽지 않았다. 하지만 이 한 번의 관측만으로도 블랙홀 쌍성의 생성 조건에 대해 상당한 정보를 알아낼 수 있었다. 라이고 과학협력단은 GW150914의 발견에 대한 천체물리학적 의의를 참고문헌 [18]에서 자세히 논하였다. 이 정도 질량을 갖는 블랙홀이 생성되려면 우선 질량이 태양보다 수십 배 큰 별이 필요하다. 또한 원래 별이 초신성 폭발을 겪기 전까지 항성풍 (stellar wind, 태양풍과 비슷한 별의 질량손실 메커니즘이다)으로 질량을 잃은 후에도 상당한 질량이 보존되어야만 한다. 이는 별의 진화와 은하 환경의 영향을 모두 고려해야만 설명할 수 있다. GW150914의 경우 그 성질을 고려해봐도 파인인 블랙홀 쌍성의 생성 장소는 불분명해서 은하 평면과 성단이 모두 가능할 것으로 보고있다. 현재 천문학 및 천체물리학계에서는 GW150914 발견을 계기로 무거운 별의 생성과 진화에 관한 모델의 주요 파라미터인 별의 구성원소와 질량손실 메커니즘에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

IV. 중력파 모수 추정 (母數推定, parameter estimation)

검출 파이프라인에서 중력파 신호의 검출이 확정되고나면 검출된 중력파로부터 파원 천체에 대한 여러 물리량을 측정하기 위해서 베이지언 추론 (Bayesian inference)에 기반한 통계 분석 과정을 적용한다. 모수 추정의 결과는 참값에 대한 절대값과 오차가 아닌, 참값의 확률분포함수이다. 중력파 데이터에 대한 모수 추정 과정은 중력파 검출과 천체물리학 (천문학)을 잇는 연결고리로서 파원 천체가 무엇인지 식별하고, 그 성질을 파악하기 위해 반드시 필요하다.

이론적으로 우리가 알고 있는 천체에서 방출된 중력파에서 직접적으로 관측 가능한 물리량은 중력파 진폭의 크기 (strain amplitude)와 위상 (phase)뿐이다. 그런데 중력파의 세기와 위상을 결정짓는데 필요한 파라미터는 여러 개이다. 밀집성 쌍성의 경우라면 두 별의 질량, 거리, 궤도 경사각 (inclination angle), 쌍성의 위치 (적경 (赤經), 적위 (赤緯)), 두 별의 궤도 위상 (orbital phase), 중력파 편광각 (polarization), 중력파 검출 시각 (GPS 시각)의 9개 파라미터가 필요하다. 만약 별의 자전 (스핀)을 고려해야한다면 파라미터의 수는 더 많아진다. 중력파원의 특성에 따라 모수 추정에 필요한 최소 파라미터의 내용과 갯수가 달라지며 데이터 분석은 각각 적합한 알고리즘을 적용하여 수행하게 된다. 라이고과학협력단과 비르고 협력단은 공동으로 라이고 알고리즘 라이브러리 (LIGO/LSC Algorithm Library, 통칭 LALSuite) 중력파 데이터 분석 파이프라인을 개발하여 공개하고 있다. LALSuite은 검출, 모수 추정, 기기 특성 분석, 중력 이론 검증 등 다양한 모듈 (module)로 구성된 데이터 분석 라이브러리이다.

중력파 모수 추정 결과의 신뢰성을 위해서는 템플릿 중력파형을 가능한 정확하게 모델링하는 것이 매우 중요하다. GW150914의 경우 라이고 검출 파이프라인 분석은 (가능한 계산시간이 빠른) 다양한 중력파형으로 수행했다. 검출 파이프라인의 분석결과 GW150914가 블랙홀 쌍성임이 판명되고나서 모수 추정 단계에서는 파원에 보다 적합한 중력파형을 선택해야했다. GW150914는 30–300 Hz 대역에서 병합의 세 단계 (나선궤도-합병-안정화)가 모두 검출되었다 (참고문헌 [2,6]의 Fig. 1 참조). 따라서 GW150914 블랙홀 쌍성 모수 추정에는 병합 과정 전단계를 기술할 수 있는 중력파형 모델이 필요하다.

20여년 전부터 이론적으로 다양한 밀집쌍성병합 중력파형 모델이 개발되어 왔으며 [4] 라이고과학협력단은 10여년 전부터 중성자별 쌍성, 블랙홀 쌍성 등 주요 파원 후보에 알맞는 중력파형 모델을 데이터 분석 파이프라인에 적용

하고 있다. GW150914 모수 추정에는 EOBNR (Effective-One-Body Numerical Relativity) 중력파형 [19,20]과 IMRPhenom (phenomenological inspiral-merger-ringdown) 중력파형 모델 [21]이 사용되었다. 둘 다 밀집성 병합과정을 모두 포함하는 중력파형 모델로써, EOBNR은 병합 과정에서 쌍성의 총 각운동량의 방향이 일정하다는 가정을 포함한 모델이며 IMRPhenom은 쌍성 궤도면의 세차운동 효과를 고려한 모델이다. GW150914는 스핀을 포함하여 측정 가능한 모든 파라미터에 대한 모수 추정을 수행했다. 이에 대한 결과는 참고문헌 [22]의 Table 1에 요약되어 있으며 여기에서는 핵심 결과를 간략히 요약하였다.

가. 질량: GW150914는 질량이 각각 $m_{\text{BH1}} = 35.7^{+5.4}_{-3.8} M_{\odot}$ 과 $m_{\text{BH2}} = 29.1^{+3.8}_{-4.4} M_{\odot}$ 인 두 블랙홀의 병합에서 방출되었다는 것이 밝혀졌다. 개별 블랙홀에 대한 질량 추정치는 90% 신뢰 구간에 해당하며, 파원 기준계 (source-frame)에서 구한 것을 기준값으로 제시한다. 즉, 관찰자 (검출기) 기준계 (detector-frame)에서는 천문학적 거리만큼 떨어져 있는 중력파원의 질량이 우주 적색편이 ($z + 1$) 만큼 더 크게 관측된다. 만약 천문학적 거리만큼 떨어진 곳에 있는 다수의 중력파원에 대해 거리 (d)를 중력파로 정확히 측정할 수 있다면 밀집쌍성병합을 초신성과 비슷하게 우주 거리 사다다리 (cosmic distance ladder)로 삼아서 수백만 Mpc까지의 질량 분포에 민감한 우주 곡률을 측정할 수 있을 것이다.

나. 거리: 지구로부터 중력파원까지의 거리에 대한 모수 추정은 중력파 신호의 세기를 통해서 이루어진다. 천구상의 한 지점에 위치한 밀집쌍성의 병합에서 방출된 중력파를 검출기에서 관측할 때 그 신호의 세기는 검출기와 파원의 거리에 반비례하는 동시에 쌍성 궤도축이 시선 방향에 대해서 이루는 각도인 궤도 경사각에 따라서도 달라지게 되며³ 중력파 분석만으로는 이 두 가지 파라미터를 동시에 정확히 측정할 수 없다. 따라서 중력파 검출로 구한 거리 추정값은 일반적으로 통계적 신뢰 구간이 비교적 크게 나타나며 GW150914의 경우 $d = 410^{+160}_{-180}$ Mpc로 추정되었다. 중력파로 발견한 쌍성까지의 거리를 전자기파 관측으로 별도로 측정할 수 있다면 쌍성 궤도 경사각의 오차 또한 줄일 수 있을 것이다.

다. 스핀: 블랙홀 스핀 ($a = |\vec{S}|c/Gm^2$)은 블랙홀의 생성, 성질과 밀접한 연관이 있는 흥미로운 물리량이지만 GW150914와 비슷한 신호로부터 블랙홀의 스핀을 측정하는 것은 쉽지 않다. 일반적으로 밀집성 쌍성에서 방출되는

³ 병합하는 쌍성계가 방출하는 중력파 진폭의 세기는 궤도축 방향이 가장 강하며 궤도면 방향이 가장 약하다. 따라서 동일한 거리에 위치한 파원에 대해 궤도 경사각이 0도일 때 신호의 세기가 가장 강하게 관측되고 90도일 때 가장 약하게 관측된다.

중력파의 위상은 쌍성을 이루는 두 별의 질량 구성에 가장 민감하게 변화한다. 블랙홀 스핀은 질량에 비해 중력파 위상에 끼치는 영향이 매우 적다. GW150914의 합병 직전 35 – 150 Hz에서 8회의 주기적 신호 (cycle)가 검출되었는데 이 정도 데이터로는 블랙홀 스핀과 궤도 각운동량간의 각도나 크기를 거의 알아낼 수 없다. 더욱이 어드밴스드 라이고의 감도는 질량이 큰 블랙홀 쌍성에서 방출되는 중력파 신호를 정밀하게 분석하기에 다소 불리하며 블랙홀 쌍성의 모든 각운동량 성분에 대한 3차원 정보를 알아내기 위해서는 어드밴스드 라이고보다 몇 배 더 감도가 좋은 기기가 필요하다. 하지만 이번의 GW150914의 모수 추정을 통해 블랙홀 스핀에 대한 제약 조건 (constraint)을 확인할 수 있는 관측값을 얻을 수 있었다. 두 블랙홀의 스핀 크기의 상한값은 모수 추정에 사용한 두 종류의 중력파형 모델이 비슷한 결과를 주었는데 90% 신뢰 구간에 대해 각각 $a_1 < 0.7$ 와 $a_2 < 0.9$ 으로 추정된다.

병합 후에 생성된 블랙홀의 스핀은 각운동량 보존 법칙으로부터 구할 수 있다. 즉, 병합 전 쌍성의 총 각운동량에서 중력파 복사로 손실된 양을 뺀 나머지 운동량이 블랙홀 스핀으로 전환되었다고 가정하여 계산할 수 있다. GW150914와 같이 서로 비슷한 질량을 갖는 두 별로 구성된 쌍성의 경우, 별 자체의 각운동량보다 궤도 각운동량이 훨씬 크기 때문에 병합 전 블랙홀의 개별 스핀에 대한 추정치가 부정확하더라도 병합 후 남은 단일 블랙홀의 스핀은 비교적 정확히 추정가능하다. GW150914 병합 후 생성된 블랙홀의 스핀은 90% 신뢰 구간에서 $0.67^{+0.05}_{-0.07}$ 으로 추정된다.

라. 중력파 에너지 손실과 질량 보존: GW150914 병합 후에 생성된 단일 블랙홀의 질량은 $m_{\text{BH}3} = 61.8^{+4.2}_{-3.5} M_{\odot}$ (오차는 90% 신뢰 구간)으로 추정된다. 합병 직전과 직후 총 질량의 차이는 $m_{\text{BH}1} + m_{\text{BH}2} - m_{\text{BH}3} = 35.7 + 29.1 - 61.8 = 3 M_{\odot}$ 이며 블랙홀 병합 과정에서 태양 질량의 3배 만큼에 해당하는 질량 에너지가 중력파 복사로 방출되었다고 해석할 수 있다. 또한 블랙홀 합병 직전에 방출된 에너지 다발 (flux)의 최대값은 약 $3.6 \times 10^{56} \text{ ergs}^{-1} = 200 M_{\odot}/\text{s}$ 으로, 이는 우주에서 발견된 가장 강력한 폭발 현상으로 여겨지는 감마선 폭발에서 관측되는 에너지 다발보다도 훨씬 크다. 참고로 감마선 폭발 중에서도 강력했던 예 (GRB110918A)의 경우, 감마선 관측으로 얻은 에너지 다발의 최대값은 약 $4.7 \times 10^{54} \text{ ergs}^{-1}$ 이었다 [23].

마. 파원의 위치: 중력파원의 천구상의 위치는 여러 대의 검출기에 중력파 신호가 도달한 시간차로부터 구할 수 있다. GW150914는 미국의 서북해안 (워싱턴 주 헨포드 시)과 남동해안 (루이지애나 주 리빙스턴 시) 외곽에 위치하고 있는 LIGO 관측소에서 모두 검출되었다. 두 관측소간의 거리는 3000 km이다. 두 LIGO 관측소에서 GW150914를

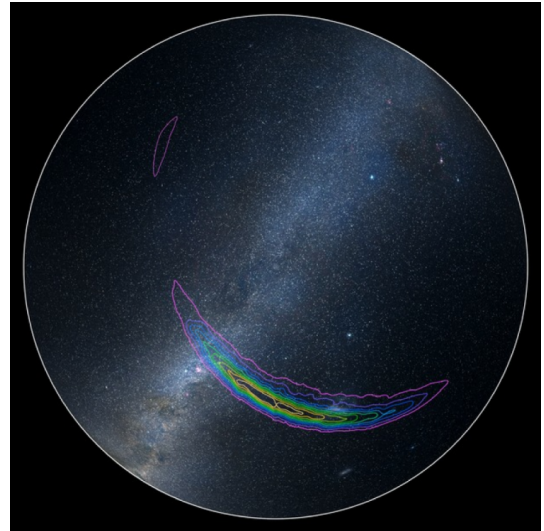


Fig. 3. (Color online) Localizing a gravitational-wave signal GW150914: The signal is originated from somewhere in the Southern hemisphere. The purple (yellow) line represents a region containing the true location of GW150914 at a 90% (10%) probability. Source localization is one of the most important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

검출한 시간차는 약 $6.9^{+0.5}_{-0.4} \text{ ms}$ 이었다. 두 개 관측소간의 시간차만으로는 중력파원의 위치를 천구상에 고리띠 형태로 추정하는 정도가 가능하다. 여기에 GW150914로부터 두 검출기에 각기 도달한 중력파형의 위상과 세기가 검출 시간차 만큼 일정하게 연관되어 있다고 가정하면 위치에 대한 추가적인 정보를 얻을 수 있다. 이렇게 측정된 GW150914의 위치는 Fig. 3와 같으며 공간각 범위는 50%(90%)의 신뢰 구간에서 140 deg^2 (590 deg^2)이다. 라이고, 비르고, 카그라 검출기는 지구상 위도가 비슷한 편인데 앞으로 라이고-인디아가 가동되면 남북 방향에 대한 위치 오차가 상당히 줄어들 것으로 기대된다 [24].

라이고와 같은 km급 레이저 간섭계의 감도와 주파수 대역은 대부분의 밀집쌍성병합을 몇 초 - 몇 분간 검출할 수 있다. KGWG가 주도하여 연구 중인 SOGRO (Superconducting Omni-directional Gravitational Radiation Observatory) 중력파 검출기는 1 – 10 Hz 대역에서 태양 질량보다 수백 배 무거운 블랙홀 쌍성의 나선 궤도 운동을 지속적으로 (며칠 - 몇 달) 관측할 수 있다 [25]. 태양보다 수백 배 무거운 블랙홀 쌍성은 이론적으로만 그 존재가 예측되고 있다. SOGRO로 가능한 중력파 천문학/천체물리학의 실현성을 따져보기 위해서는 블랙홀의 진화와 성질 연구와 기기 개발이 모두 중요하다. 실제 SOGRO로 중력파 검출을 하게된다면 GW150914에 대해 수행한 것과 같이 모수 추정을 통해 이제까지 알려지지 않던 종류의 블랙홀에 대해 알아낼 수 있을 것이다.

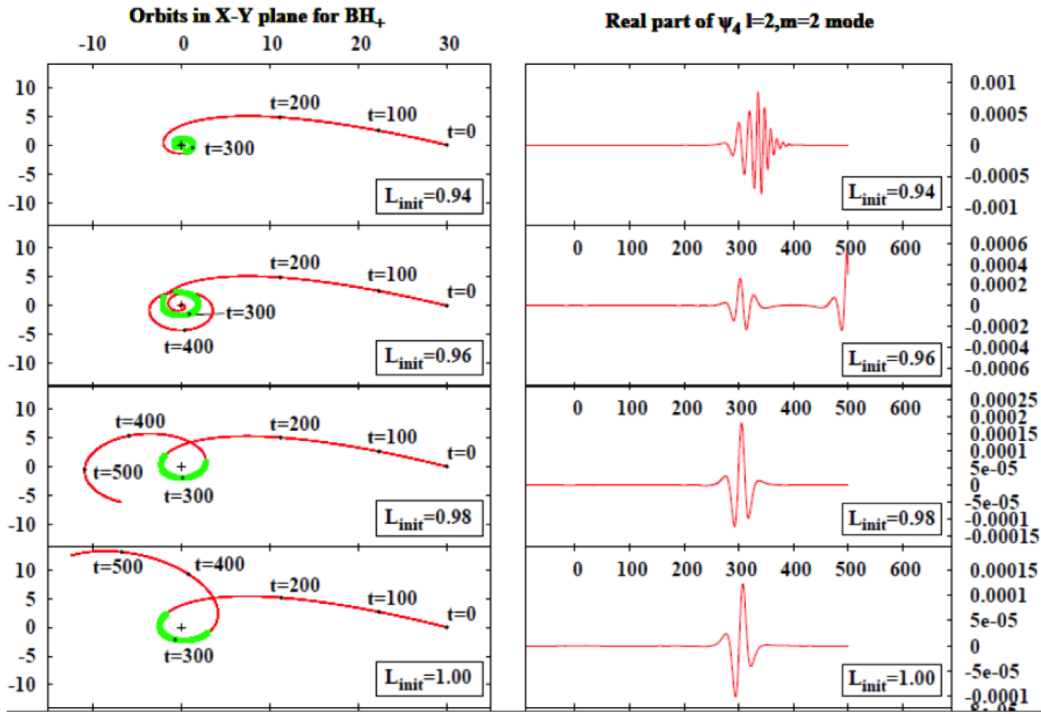


Fig. 4. (Color online) Features of orbits and waveforms for equal masses without spins. Image credit: Jakob Hansen.

V. KGWG의 연구활동

KGWG는 밀집쌍성병합에 주목하여 다양한 중력파형 모델의 특성과 적합성에 대한 연구와 [26,27] 피서행렬 방법을 활용한 모수 추정 연구를 수행하고 있다 [28–30]. 특히, 2013-2014년간 LALSuite의 마코브 체인 몬테칼로 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 샘플링 알고리즘을 사용하여 블랙홀-중성자별 쌍성에 대한 모수 추정 연구를 수행하였다 [31–33]. 이 연구는 모두 라이고 데이터 그리드 (LIGO Data Grid⁴) Tier 3인 KISTI GSDC의 컴퓨터를 사용하였다. 앞으로는 국내외의 공동 연구자들과 함께 중성자별과 블랙홀 쌍성의 성질, 중력파형 모델 개발, 모수 추정 파이프라인의 최적화 등을 연구하고자 한다.

KGWG의 또 다른 연구주제는 수치상대론으로써 아인슈타인 방정식을 있는 그대로 아무 근사없이 컴퓨터를 사용하여 수치적으로 풀어 밀집쌍성계의 성질을 규명하는 것이다. 위에서도 기술한 바와 같이 밀집쌍성계를 파원으로서 하는 중력파 자료 분석은 템플릿 사용이 필수적이고, 수십만 개의 템플릿은 해석적 함수 혹은 실험식을 사용한 다. 이러한 해석적 함수의 검증과 구성은 수치상대론의 계산에 많이 의존한다. 국내 연구진은 주로 아인슈타인 툴킷 (<http://einstein toolkit.org/>)을 활용해 블랙홀과

중성자별의 수치연구를 수행해왔다. 블랙홀에 대한 최근 연구는 서로 자유롭게 돌아다니던 두 블랙홀이 중력파 방출로 인해 포획되어 구속계를 구성하는 과정, 포획단면적 산출, 이 과정에서 방출되는 중력파의 파형과 성질, 에너지와 각운동량의 손실, 다양한 질량비와 스핀의 영향, 병합으로 인한 거대블랙홀 형성, 라이고 검출빈도에의 영향 등이다.

Fig. 4는 동일질량 블랙홀이 포획될 때의 궤도 및 포획 과정에서 방출되는 중력파의 파형을 보여준다 (대칭적인 상대 블랙홀의 궤도는 생략). 이외에도 수치상대론의 미개척분야인 우주론 주제와 관련해서, 회전하는 블랙홀로 이루어진 우주모델의 수치연구를 진행하고 있다 [34]. 이러한 수치연구는 고성능 컴퓨터의 사용이 필수적인데 KISTI의 Tachyon 슈퍼컴퓨터와 서울대 천문학과와 지묘뉴 클러스터를 주로 사용해 수행하고 있다.

VI. 결론과 전망

현재 라이고의 감도를 고려할때, 향후 십여 년간의 중력파 검출은 중력파원 천체의 검증 (블랙홀 쌍성 등), 주요 물리량 측정 (질량, 거리, 스핀 등), 그리고 현상의 발생 빈도를 보다 정확하게 알아내는데 가장 유용할 것이다. 천문학적 관점에서는 다중신호 천문학이 무엇보다 큰 화두이다. 빛이 아닌 중력파로만 관측할 수 있는 블랙홀과 같은 천체가

⁴ <https://www.lsc-group.phys.uwm.edu/lscdatagrid/>

실재한다는 것이 밝혀졌듯이, 이제껏 알지 못했던 새로운 천체가 발견될 가능성도 있는 것이다. 앞으로 어드밴스드 라이고보다 10배 더 감도가 향상된 검출기가 구현된다면 중성자별의 내부 구조에 따라 달라지는 중력파의 미세한 변화까지도 데이터의 보다 정밀한 분석을 통해 구분하는 것이 가능할 것이다. 뿐만 아니라 강한 중력장에서 보다 더 엄밀하게 일반상대론을 검증하고 수정 중력이론과의 비교도 가능할 것으로 기대된다.

중력파 탐색은 백년 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. 첫 과학위성이 지구밖에서 우주를 관측하기 시작한 이후 지난 70여 년 동안 자외선, 엑스선, 감마선 등 가시광선으로는 볼 수 없었던 우주의 비밀을 알아낸 것처럼 앞으로 70년 후에는 중력파 천문학으로 인류가 우주에 대해 무엇을 배우게 될지 기대된다.

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] A. Abramovici, W. E. Althouse, R. W. P. Drever, Y. Gursel and S. Kawamura *et al.*, [Science](#) **256**, 325 (1992).
- [2] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese and the LSC-Virgo collaboration, [Phys. Rev. Lett.](#) **116**, 061102 (2016).
- [3] 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).
- [4] L. Blanchet, [Living Rev. Relativ.](#) **17**, 2 (2014).
- [5] C. M. Will, [Living Rev. Relativ.](#) **17**, 4 (2014).
- [6] S. H. Oh, E. J. Son, H. W. Lee, J. Kim and Y.-M. Kim *et al.*, [New Phys.: Sae Mulli](#) **66**, 283 (2016).
- [7] L. S. Finn, [Phys. Rev. D](#) **46**, 5236 (1992).
- [8] J. M. Weisberg, D. J. Nice, and J. H. Taylor, [Astrophys. J.](#) **722**, 1030 (2010).
- [9] C. Kim, V. Kalogera and D. R. Lorimer, [Astrophys. J.](#) **584**, 985 (2003).
- [10] C. Kim, B. P. P. Perera and M. A. McLaughlin, [Mon. Not. Royal Soc.](#) **448**, 928 (2015).
- [11] J. Abadie, B. P. Abbott, R. Abbott, M. Abernathy and T. Accadia and LSC-Virgo collaboration, [Classical Quantum Gravity](#) **27**, 173001 (2010).
- [12] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese and the LSC-Virgo collaboration, submitted to [Astrophys. J. Lett.](#) (2016), e-print: [arXiv:1602.03842](#).
- [13] K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, K. Kyutoku and M. Shibata, [Classical Quantum Gravity](#) **29**, 124003 (2012).
- [14] J. Clark, H. Evans, S. Fairhurst, I. W. Harry and E. Macdonald *et al.*, [Astrophys. J.](#) **809**, 53 (2015).
- [15] Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku and M. Shibata, [Phys. Rev. Lett.](#) **107**, 051102 (2011).
- [16] M. Ackermann, M. Ajello, A. Albert, B. Anderson and M. Arimoto and The Fermi-LAT collaboration, submitted to [Astrophys. J.](#) (2016), e-print: [arXiv:1602.04488](#).
- [17] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese and the LSC-Virgo collaboration, submitted to [ApJL](#) (2016), e-print: [arXiv:1602.08492](#).
- [18] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese and the LSC-Virgo collaboration, [Astrophys. J. Lett.](#) **818**, 2 (2016).
- [19] A. Taracchini, A. Buonanno, Y. Pan, T. Hinderer and M. Boyle *et al.*, [Phys. Rev. D](#) **89**, 061502 (2014).
- [20] A. H. Mroué, M. A. Scheel, B. Szilágyi, H. P. Pfeiffer and M. Boyle *et al.*, [Phys. Rev. Lett.](#) **111**, 241104 (2013).
- [21] M. Hannam, P. Schmidt, A. Bohé, L. Haegel and S. Husa *et al.*, [Phys. Rev. Lett.](#) **113**, 151101 (2014).
- [22] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese and LSC-Virgo collaboration, submitted to [Astrophys. J. Lett.](#) (2016), e-print: [arXiv:1602.03840](#) (2016).

- [23] D. D. Frederiks, K. Hurley, D. S. Svinkin, V. D. Pal'shin and V. Mangano *et al.*, [Astrophys. J. **779**, 151 \(2013\).](#)
- [24] S. Fairhurst, [Classical Quantum Gravity **28**, 105021 \(2011\).](#)
- [25] H. J. Paik, H. M. Lee, K. Cho and J. Kim [New Phys.: Sae Mulli **66**, 272 \(2016\).](#)
- [26] H. S. Cho, [Classical Quantum Gravity **32**, 215023 \(2015\).](#)
- [27] H. S. Cho, [Classical Quantum Gravity **32**, 235007 \(2015\).](#)
- [28] H. S. Cho and C. H. Lee, [Classical Quantum Gravity **31**, 235009 \(2015\).](#)
- [29] H. S. Cho, [J. Korean. Phys. Soc. **66**, 1637 \(2015\).](#)
- [30] H. S. Cho, [J. Korean. Phys. Soc. **67**, 960 \(2015\).](#)
- [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 and C. Kim *et al.*, [Phys. Rev. D **89**, 064048 \(2014\).](#)
- [33] R. O' Shaughnessy, B. Farr, E. Ochsner, H. S. Cho and V. Raymond *et al.*, [Phys. Rev. D **89**, 102005 \(2014\).](#)
- [34] C. Park, Ph.D Thesis, KAIST, 2015.