

Observation and Data Analysis of the Gravitational Wave GW150914

Sang Hoon OH · Edwin Jaeju SON* · Whansun KIM · John Jungkeun OH

National Institute for Mathematical Sciences, Daejeon 34047, Korea
The Korean Gravitational Wave Group

Hyung Won LEE · Jeongcho KIM

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

Young-Min KIM

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

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

The first historical direct observation of gravitational waves (GW150914) was accomplished by the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) on September 14, 2015. In this paper, we overview the observation of GW150914 and its data analysis including a validation of the detector's status around the arrival time of the event. We introduce two independent searches for transient gravitational waves and their results. We also present the contributions of the Korean Gravitational Wave Group (KGWG) to various aspects of the data analysis and the detector characterization within the LIGO Scientific Collaboration (LSC) and the Kamioka Gravitational-wave Observatory (KAGRA).

PACS numbers: 04.80.Nn, 04.25.dg, 95.75.Wx, 95.85.Sz, 97.60.Lf

Keywords: Gravitational-wave detectors, Black-hole binaries, Gravitational-wave data analysis, Gravitational waves: astronomical observations, Stellar evolution: massive black holes

중력파 GW150914의 관측과 데이터 분석

오상훈 · 손재주* · 김환선 · 오정근

국가수리과학연구소, 대전 34047, 대한민국
한국중력파연구협력단

이형원 · 김정초

인제대학교 컴퓨터시뮬레이션학과, 김해 50834, 대한민국
한국중력파연구협력단

김영민

부산대학교 물리학과, 부산 46241, 대한민국
한국중력파연구협력단

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



2015년 9월 14일에 미국의 라이고 (LIGO) 중력파 검출기가 최초로 중력파의 직접 검출에 성공했다. 중력파 신호는 그동안 인류가 발견한 천체 신호 중에 가장 미약한 것으로, 이를 검출하기 위해서는 매우 정밀한 기기(레이저 간섭계)와 정교한 데이터 분석 과정이 요구된다. 이 논문에서는 레이저 간섭계에 기반한 중력파 검출기로 얻은 데이터 분석에 대한 기본적인 내용을 짚어보고 기기 특성을 결정하기 위해 사용되는 여러 방법을 소개하고자 한다. 특히, 이번에 라이고 데이터에서 발견된 중력파 신호 (GW150914)의 발견 시점 전후의 데이터에 적용된 다양한 분석법을 정리하고, 어떤 과정을 거쳐 이 신호가 중력파 검출임을 확인할 수 있었는지 설명한다. 또한, 이 논문에서는 중력파 검출을 위한 데이터 분석에 있어서 한국중력파연구협력단이 수행한 역할과 기여(국내 연구진이 주도하여 개발한 데이터 분석법)에 대해 간략히 언급한다. 지난 몇 년간 활발히 진행중인 한국중력파연구협력단과 일본 카그라 연구협력단간의 공동 연구 현황도 보고하고자 한다.

PACS numbers: 04.80.Nn, 04.25.dg, 95.75.Wx, 95.85.Sz, 97.60.Lf

Keywords: 중력파 검출기, 블랙홀 쌍성, 중력파 데이터 분석, 중력파: 천문 관측, 항성진화: 무거운 블랙홀

I. 서론

아인슈타인이 1916년에 중력파의 존재를 예견한 이후에 [1] 많은 과학자들이 중력파를 직접 검출하기 위한 노력을 해왔지만 모두 성공적이지 못했다. 거의 100년 만의 노력 끝에 미국의 레이저 간섭계를 이용한 장치인 라이고가 마침내 블랙홀 쌍성이 병합하면서 발생하는 중력파 신호를 직접 검출하였다 [2]. 이는 강한 중력장에서 아인슈타인의 중력이론을 검증해주는 사건일 뿐 아니라 인류가 전자기파 즉 빛이 아닌 다른 도구로 우주를 볼 수 있는 눈을 뜨게된 역사적인 순간이다.

이론적으로 예측된 중력파원은 모두 천체들로 지구로부터 멀리 떨어져 있을 것으로 예상된다 [3]. 지구에서 중력파 검출이 어려운 이유는 일반적으로 예측되는 중력파 진폭의 세기가 미약할 뿐 아니라 주변잡음이 신호에 비해 매우 크기 때문이다. 중력파를 지구상에서 검출하기 위해서는 매우 민감한 장치를 개발하는 것과 동시에 장치에 유도되는 다양한 잡음의 이해와 제거 기술이 절대적으로 필요하다. 중력파 검출기는 매우 민감하므로 관측하는 동안의 외부 환경의 영향을 많이 받게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 중력파 검출기는 중력파 신호만을 관측하지 않고 주변 환경과 기기 동작 상태에 의해 발생하는 다양한 인공 신호(잡음)를 측정해야 한다. 기기 특성을 결정하고 보정하는 과정은 데이터로부터 발견된 중력파 신호의 통계적 신뢰도를 높이기 위해 반드시 선행되어야 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 이번에 관측된 중력파의 관측과 신호 검출 과정에 대해서 설명하고, 제3장에서는 중력파를 관측하기 위한 데이터 분석 기법에 대해 좀 더 자세하게 기술한다. 제4장에서는 잡음으로부터 신호를 분리하기 위해 검출기의 특성을 분석하는 방법에 대하여

기술한다. 제5장에서는 한국중력파연구단에서 연구하고 있는 중력파 데이터 분석과 다른 연구단과의 협력에 대해서 기술한다. 제6장에서 결론 및 전망에 대해서 기술한다.

II. 관측과 신호 검출

2015년 9월 14일 09:50:45 (협정세계시, 한국시간 18:50:45)에 미국 워싱턴 주 핸포드와 루이지애나 주 리빙스턴에 각각 위치한 두 대의 라이고 검출기가 거의 동시에 중력파 신호 GW150914를 검출했다 [2]. 라이고과학협력단 (LSC)은 첫번째 관측 가동 (observation run)의 초기인 9월 12일부터 10월 10일까지 39일간의 관측가동에 대한 결과를 보고했다 [2]. 이 기간 중 두 검출기가 동시에 가동되고 작동 상태와 데이터 품질이 검증된 시간 (동시 누적가동시간)인 16일의 관측 데이터만 분석에 이용되었다. Fig. 1에서 보이는 것 처럼 중력파 신호는 두 검출기 사이의 전파시간인 10 ms 이내에서 동시 발생하였고 데이터에서 일반적 형태의 짧은 중력파 신호만을 탐색하는 고속 분석 중력파 검출 파이프라인에서 처음 포착되어 데이터를 획득한 후 3분만에 보고되었다 [4]. 곧이어 밀집쌍성병합 (compact binary coalescence)에서 (밀집쌍성병합에 대해서는 참고문헌 [3] 참조) 발생하는 중력파 파형을 이용하는 정합필터 분석에서도 GW150914를 발견하였다 [5]. 이 분석에서 GW150914는 이번에 발표에 포함된 16일간의 데이터에서 각각의 검출기에서 발견된 중력파 신호 후보 중 가장 두드러진 이벤트로 두 검출기의 결합 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)가 24이다.

천구상에서 파원의 위치는 중력파가 검출기에 도착하는 시간차를 이용하여 결정할 수 있는데 동일한 중력파 신호를 동시에 포착한 검출기가 많을 수록 위치의 정확도는 높아진다. 일반적으로 지구상의 검출기 두 대의 동시 관측으로는

*E-mail: eddy@nims.re.kr

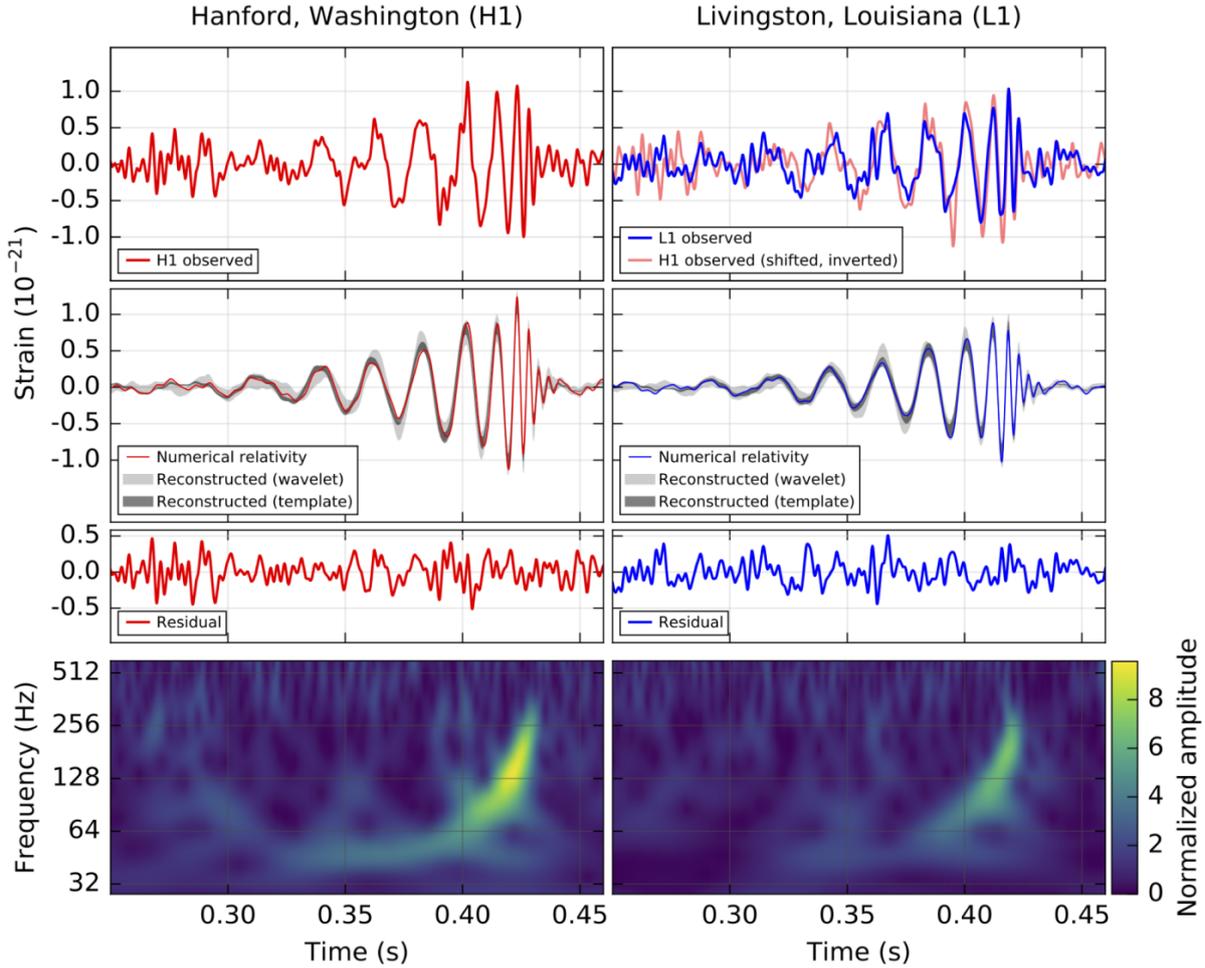


Fig. 1. (Color online) The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. Large fluctuations outside the detector’s most sensitive frequency band are suppressed from all time series with a 35-350 Hz bandpass filter in order to visualize the waveform. Strong spectral lines (Fig. 3) arising from electrical and mechanical resonances and calibration signals are also removed from the time series with band-reject filters. *Top row, left:* H1 strain. *Top row, right:* L1 strain. *Second row:* Gravitational-wave strain projected onto each detector in the 35-350 Hz band. A numerical relativity waveform is shown by solid lines. It is computed for a system with parameters consistent with those recovered from GW150914 [9,10]. The dark gray shaded area shows the reconstructed waveform using binary black hole template waveforms. For the light gray one, the strain is computed as a linear combination of sine-Gaussian wavelets without an astrophysical assumption. *Third row:* Residuals after subtracting the filtered numerical relativity waveform from the filtered detector time series. They are consistent with the background noise. *Bottom row:* A time-frequency representation of the strain data, showing the signal frequency increasing over time. Image credit: LIGO Scientific Collaboration [12]. (Caption is quoted from the link provided as a reference.)

천구(天球)를 가로지르는 넓은 띠 형태의 영역 정도로만 중력파원의 위치를 추정할 수 있다. 발견 당시 두 대의 라이고 중력파 검출기만 관측 가동 중이었기 때문에¹ 중력파원 위치를 정확히 알기는 매우 어렵지만 90% 신뢰구간(credible region)을 기준으로 파원이 위치할 것이라 추정되는 천구

¹ 발견 당시 라이고는 유일하게 관측 가동 상태의 검출기였다. 어드밴스드 비르고(Advanced Virgo)는 성능 개선 작업이 진행 중이었고 지오 600은 가동은 하고 있었지만 관측 모드가 아니었다.

상의 영역을 약 600 deg² 으로 제한할 수 있었다 [6,7].

GW150914가 우리가 알고 있는 천체들의 상호작용으로 발생했다면 이 신호는 블랙홀 쌍성의 병합과정에서 발생한 것이 분명하다. 약 0.2초 동안 지속된 신호는 35 Hz에서 150 Hz까지 주파수와 함께 진폭이 증가하여 최대 주파수와 최대 진폭을 보인 후 급격히 감쇠하는 파형을 보인다. 이는 질량이 m_1, m_2 인 밀집쌍성이 나선궤도를 돌며 가까워져서 서로 충돌한 후 하나의 블랙홀로 합병되는 과정에서 발생

하는 전형적인 파형이다.

중력파 주파수 (f)와 중력파 주파수의 시간변화율 (\dot{f}), 그리고 처프 질량 (\mathcal{M}) 사이에는 아래 수식 1의 관계가 있다 [8].

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}. \quad (1)$$

관측된 중력파 신호의 초기 30 Hz 부근에서 f 와 \dot{f} 을 관계식 1에 대입하면 블랙홀 쌍성의 처프 질량은 $\approx 30 M_\odot$ 이다 (M_\odot : 태양 질량).

검출기 기준좌표계에서 처프 질량을 쌍성의 전체 질량으로 환산하면 $M = m_1 + m_2 \gtrsim 70 M_\odot$ 이다. 이 경우 두 블랙홀의 질량으로부터 정의되는 슈바르츠실트 반경 ($2GM/c^2$)의 합은 $\gtrsim 210$ km로 제한된다. 중력파 주파수는 공전 주파수의 2배이다. 즉, 150 Hz에서 중력파를 방출하는 쌍성의 공전주파수는 75 Hz이다. 이 주파수를 천체간 거리로 환산해보자. 질량이 동일한 뉴턴 질점을 가정하면, GW150914가 150 Hz에서 중력파를 방출했을 때는 각각 $35 M_\odot$ 인 블랙홀이 불과 350 km 정도로 떨어진 궤도로 공전을 하고 있었다! 이론적으로 알려져 있는 밀집성 중에서 이런 쌍성 궤도가 가능한 것은 중성자별과 블랙홀 뿐이다.

중성자별의 질량은 보통 $1-3 M_\odot$ 이므로 전체 질량 $70 M_\odot$ 을 설명할 수 없다. 중성자별-블랙홀 쌍성은 전체 질량이 $70 M_\odot$ 을 훨씬 넘어야 측정된 처프 질량 $30 M_\odot$ 을 설명 가능하며, 이 경우 두 천체가 부딪치기 직전 방출되는 중력파 주파수가 150 Hz보다 훨씬 작다. 따라서, GW150914에서 관측된 중력파 신호를 설명할 수 있는 유일한 천체는 블랙홀-블랙홀 쌍성뿐이다. GW150914의 중력파 진폭이 최대값에 도달한 뒤 감소하는 파형의 모양도 두 블랙홀 합병 (merge) 후 하나의 커 블랙홀 (Kerr black hole)이 남아 시공간이 안정화되는 과정으로 잘 일치 한다.

III. 데이터 분석: 순변 (transient) 중력파 탐색

중력파 탐색은 파원과 파형에 따라서 크게 밀집쌍성병합, 폭발형, 연속형, 스토캐스틱의 네 종류로 구분되어 수행되었다. (이들 파원에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [3] 참조) GW150914는 밀집쌍성병합과 폭발형 중력파 탐색에서 포착되었다. 이 절에서는 두 종류의 탐색에서 이루어진 분석내용과 포착된 신호의 유의성 (significance)에 대하여 살펴보려한다.

폭발형 중력파 탐색: 짧은 지속 시간의 일반적인 중력파
이른바 폭발형 중력파 (Gravitational-wave bursts)는 여

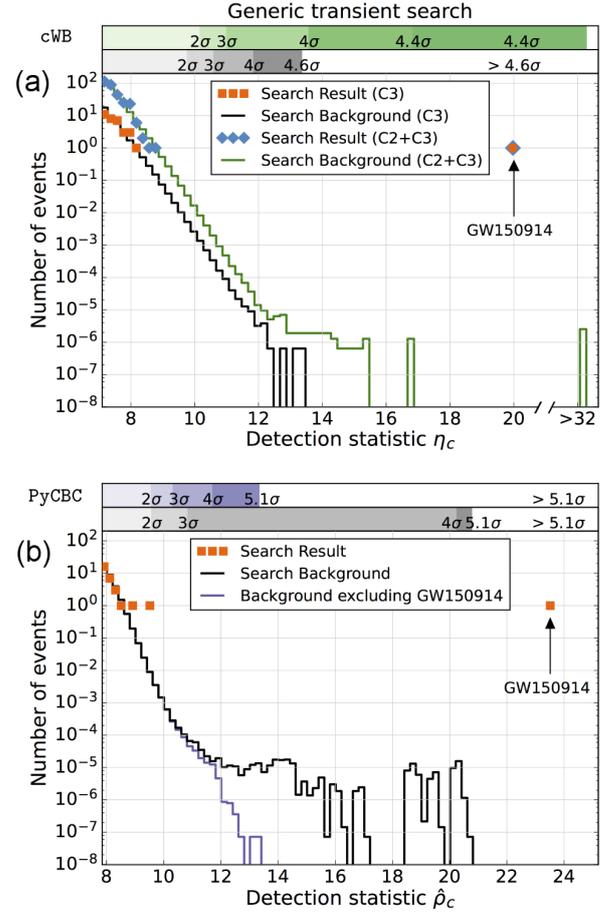


Fig. 2. (Color online) Search results from the (a) generic transient search and (b) the binary coalescence search. The histogram shows the number of candidate events (orange) and the number of background events due to noise (black) as a function of the search detection-statistic. The significance of GW150914 is greater than 5.1σ and 4.6σ for the binary coalescence and the generic transient searches, respectively. Image credit: LIGO Scientific Collaboration [12]. (Caption is quoted from the link provided as a reference.)

러 종류의 중력파원 중에서도 신호의 지속시간이 짧다. 밀집쌍성병합과 무거운 별의 중심붕괴형 초신성 등이 폭발형 중력파의 대표적인 파원에 해당한다. 분석과정에서 파형 모델에 대한 가정을 최소화하면 여러 범주의 천체물리학적 중력파원에서 발생하는 폭발형 중력파를 탐색할 수 있다. 이 방식의 중력파 탐색 방법은 파형에 대한 정밀한 모델없이도 정렬되지 않은 스핀이나 궤도 이심률이 큰 블랙홀 쌍성 병합과 같은 다양한 조건에서 방출된 중력파 탐색이 가능하다. 지속시간 $10^{-3} - 10$ 초의 폭발형 중력파 탐색을 위하여 coherent Waveburst (cWB) 알고리즘과 omicron-LALInference-Burst (oLIB), 그리고 BayesWave 세 가지의 분석 방법 이용되었다. 모든 분석 방법은 라이고-비르고 중력파연구단이 공동으로 작성한 데

이터 분석 소프트웨어인 라이고 알고리즘 라이브러리 (LIGO Algorithm Library, LALSuite)에 포함되어 있다 [11]. 이 방법들 중 cWB는 온라인 분석 파이프라인에 적용되었고 GW150914 신호를 가장 먼저 포착하여 데이터 획득 후 3 분만에 경보 (alert)를 발생시켰다. 이 논문에서는 cWB의 탐색 대하여 살펴보기로 하겠다.(나머지 두 개의 분석 방법에 대한 결과는 참고문헌 [4]를 참조)

cWB는 두 라이고 검출기에 동시에 발생하는 이벤트를 식별해내고 가능도 (likelihood) 분석을 통해 신호의 파형을 재구성한다. 시계열 데이터를 시간-주파수 영역으로 변환하여 출력이 검출기의 잡음 수준을 넘는 부분을 찾아서 이벤트 트리거 (trigger)로 간주한다. 그리고 각각의 이벤트 트리거에 대하여 복수개 검출기의 최대우도법을 이용하여 두 검출기가 공통으로 관측한 중력파 신호와 일관된 파형의 신호를 재구성한다 [13]. 모든 이벤트 트리거는 검출 통계량 $\eta_c = \sqrt{2E_c/(1 + E_n/E_c)}$ 를 기준으로 순위가 매겨진다. 여기서 E_c 는 두 개의 재구성된 파형을 교차상관 시켜서 구해지는 차원이 없는 coherent signal 에너지이고, E_n 은 데이터에서 재구성된 신호를 뺀 나머지도이다.

모든 이벤트 트리거는 시간-주파수 영역에서 보이는 형태에 따라서 C1, C2, C3의 세 종류로 구분된다. C1은 블리프 글리치 (blip glitch)²라고 불리는 형태의 잡음과 전기나 기계적인 공진 등에 의한 글리치 등 알려진 잡음에 의한 이벤트 트리거들이 여기에 해당한다. C3에는 주파수가 시간에 따라 증가하는 이벤트로 구성되고 C1과 C3에 속하지 않는 이벤트는 C2에 포함된다.

Fig. 2(a)와 같이 GW150914는 검출 통계 지표 $\eta_c = 20.0$ 으로, 처프 신호처럼 주파수가 시간에 따라 증가하는 C3 카테고리 중에서 가장 두드러진 이벤트였다. 두 검출기가 동시에 가동된 누적 관측시간은 16일이지만 두 관측데이터가 기록된 시간을 인위적으로 이동시켜서 새로운 데이터 세트를 만드는 방식³을 이용하면 1.6×10^6 개의 동일한 누적 관측시간의 데이터를 만들어 낼 수 있다. 이렇게 해서 얻어진 분석 시간은 67,400년으로 이 시간에 해당하는 관측 데이터에서 GW150914는 어떠한 이벤트 트리거들보다 강한 신호였다. 이 데이터 세트에는 신호가 없기 때문에 배경잡음에 의해 GW150914와 같거나 큰 검출 통계량이 얻어질 가능성을 계산할 수 있다⁴. GW150914는 이 모든 데이터 세트에서 가장 강한 이벤트였고 여기서 계산할 수

있는 C3 탐색안에서 이 신호의 오경보율은 67,400년에 1회 보다 작다. 모두 세 종류의 탐색이 있으므로 이것을 고려하여 시행계수를 곱해주면 모든 탐색에서 이 중력파 신호의 오경보율은 22,500년에 1회 보다 작다. 이 빈도는 관측시간 동안 GW150914와 같거나 더 강한 잡음이 발생할 확률이 2×10^{-6} 보다 더 작다는 것을 의미한다. 확률은 가우스 분포를 가정할 경우 4.6σ 에 해당하는 값이다.

밀집쌍성병합 중력파 탐색: 템플릿 기반의 정합필터 분석
 밀집쌍성병합 탐색 (compact binary coalescence search)은 이론적으로 계산된 파형을 이용하여 정합필터 분석으로 중성자별 쌍성, 블랙홀 쌍성, 중성자별-블랙홀 쌍성에서 나오는 중력파를 찾는 방법이다. 분석에 사용된 PyCBC [14]와 GstLAL [15]은 각각 주파수 영역 (frequency domain)과 시간 영역 (time domain)에서 정합필터를 수행하도록 구현된 독립적인 파이프라인들이며 공통된 템플릿 파형 (template waveform) [16]을 사용하였다.

중력파 파형은 처프 질량과 대칭 질량비 (symmetric mass ratio) $\eta = (m_1 m_2)/(m_1 + m_2)^2$ 그리고 밀집성의 스핀 $\chi_{1,2} = c\mathbf{S}_{1,2}/Gm_{1,2}^2$ 에 의존한다. 여기서 $\mathbf{S}_{1,2}$ 는 밀집성의 각운동량이다. 탐색 파라미터 공간은 각 밀집성의 질량과 스핀에 따라 4차원으로 정의된다. 나머지 파라미터들은 추후 전체 모수추정 (parameter estimation)을 통해 값을 찾아낼 수 있다 [3,7]. 각 천체 질량의 최소값은 $1 M_\odot$ 로 설정하였고⁵ 전체 질량의 최대값은 태양 질량의 100 배로 제한하였다 ($M = m_1 + m_2 \leq 100 M_\odot$).

PyCBC와 GstLAL 두 파이프라인 모두에서 GW150914는 2015년 9월 14일 09:50:45 (협정세계시)에 가장 두드러진 이벤트로 나타났다. 라이고 핸포드 관측소의 정합필터 신호대잡음비는 20, 라이고 리빙스턴 관측소의 경우에는 13이며, 결합 정합필터 신호대잡음비는 24이다. 두 파이프라인은 $m_1 = 47.9 M_\odot$, $m_2 = 36.6 M_\odot$ 인 동일한 템플릿으로 GW150914를 발견하였다. 하지만 템플릿 은행의 이산성 (discrete nature)으로 인해 최적의 파라미터는 추가적인 모수추정을 통해 얻을 수 있으며 그 값은 $m_1 = 36^{+5}_{-4} M_\odot$, $m_2 = 29^{+4}_{-4} M_\odot$ 이다 [3,7]. PyCBC에서 배경 추정 (background estimation)을 위해 시차이동 분석 (time-shifted analysis)을 수행하여 얻은 오경보확률 (false alarm probability)은 $\mathcal{F} < 2 \times 10^{-7}$ 이며 가우시안 분포로 환산하면 GW150914의 유의성은 5.1σ 보다 큰 값을 가진다 (Fig. 2(b)). GstLAL에서도 오경보확률을 계산하는 방법은 다르지만 GW150914의 유의성은 같은 결과를 준다. 그러므로 GW150914는 중력파 신호라고 결론 내릴 수 있다. (파이프라인에 대한 구체적인 사항은 참고문헌 [5] 참조.)

² 블리프 글리치는 시간에 따른 명확한 주파수 변화 없이 시간 대칭적인 특징을 가진다.

³ 이 분석법을 시차이동분석법 (time-shifted analysis)라고 하고, 얻어진 데이터는 시차이동 데이터 (time-shifted data)라고 부른다.

⁴ 두 검출기 관측데이터의 시간을 라이고 핸포드 관측소와 라이고 리빙스턴 관측소 사이를 중력파가 이동하는데 걸리는 시간보다 더 길게 이동시키므로써 동시 중력파 신호가 없는 데이터 세트를 만들 수 있다.

⁵ 중성자별의 최소 질량이 태양 질량 ($1 M_\odot$)으로 예측된다.

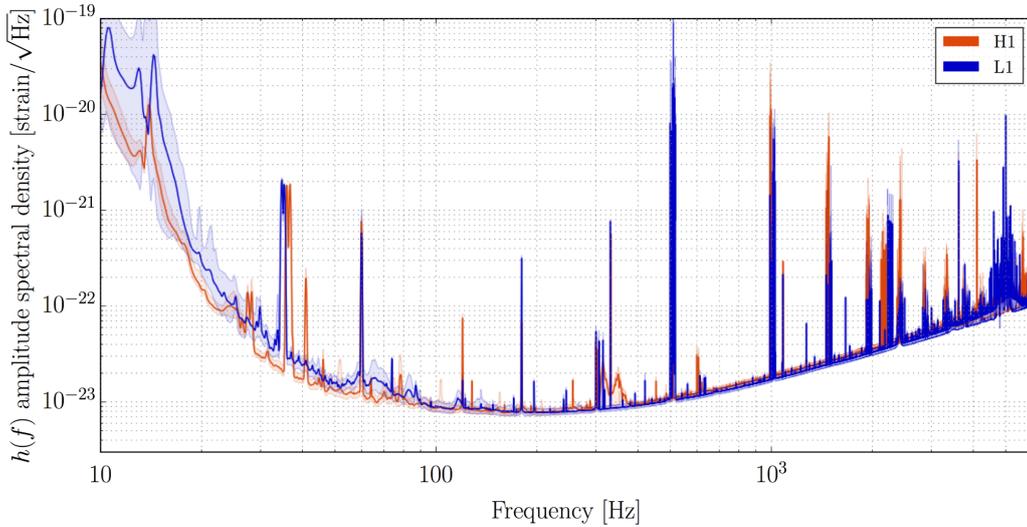


Fig. 3. (Color online) The average measured sensitivity of the Advanced LIGO detectors during the time analyzed to determine the significance of GW150914 (Sept 12–Oct 20, 2015). LIGO-Hanford is shown in red, LIGO-Livingston in blue. The solid traces represent the median sensitivity and the shaded regions indicate the 5th and 95th percentile over the analysis period. Image credit: LIGO Scientific Collaboration [12]. (Caption is quoted from the link provided as a reference.)

IV. 검출기 특성 연구: 잡음원 분석

중력파 신호 (GW150914)가 검출된 시간대에 어드밴스드 라이고 (Advanced LIGO) 검출기는 만족스러운 상태로 동작하고 있었다. Fig. 3의 검출기 감도 곡선에서 보이는 것처럼 대략 50 Hz에서 300 Hz 사이의 대역에서 두 대의 검출기 모두 가장 좋은 감도인 $\sim 10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$ 에 도달하였다.

감도 곡선의 피크들은 거의 다 기계적인 공진 (mechanical resonance)과 본관의 전력 고조파 (mains power harmonics) 그리고 보정 (calibration)을 위해 주입한 신호 (injected signal)에서 기인한다. 또한, 검출기에는 시간에 따라 변하는 잡음이 있기 때문에 감도 곡선 역시 시간에 따라 모양이 조금씩 달라진다. GW150914 신호 주변 배경 잡음의 특성을 연구하고 중력파 데이터와 장치/환경 신호의 상관관계를 분석하여 검출기 성능 및 감도를 높이기 위한 연구가 있었다 [17].

GW150914 근방의 데이터는 매우 깨끗하고 정적이었으며 일상적인 데이터 품질 (data quality) 검사에서도 아무런 문제가 나타나지 않았다. 하지만 혹시 모를 잡음원 (noise source)을 확인하기 위하여 추가적인 검사가 수행되었다. 잡음원은 검출기 내부에 있을 수도 있고 각 검출기가 위치한 지역의 환경 또는 두 대의 검출기 모두 영향을 받는 전지구적 원인이 될 수도 있다. 우선, 검출기 내부의 잡음원을 확인하기 위해 세 가지 알고리즘을 사용하여 각 검출기의 중력파 채널과 보조 채널 사이의 상관관계를 확인하였다. 세

가지 알고리즘이란 단계적 기각 (hierarchical veto), 사용 비율 기각 (used percentage veto), 기계학습법을 이용한 기각을 말한다 [18–21]. 라이고 리빙스턴 관측소의 경우 GW150914 신호로부터 180초 이내, 라이고 핸포드 관측소의 경우 11초 이내엔 중력파 채널과 상관관계가 있는 보조 채널 잡음이 없다는 결론을 얻었다. GW150914 신호 시간 근처에서 통계적으로 의미 있는 상관관계를 보이는 보조 채널은 없었을 뿐 아니라 동시간대에 보조 채널에 나타난 몇 개의 순변 신호 (transients) 역시 중력파 채널에는 영향이 거의 없는 것으로 밝혀졌다.

각 검출기 주변 환경의 영향을 확인하기 위하여 물리환경 감시 (physical environmental monitor) 감지 장치 (sensor)를 통해 GW150914 주변 1초의 해당 주파수 대역 신호를 확인한 결과 라이고 리빙스턴 관측소에 설치된 자기계 (magnetometer) 두 개에서 의심되는 신호를 발견하였으나 GW150914 신호를 만들기에는 적어도 40 배 더 약한 것으로 판명되었다. 또한, GW150914와 같은 시간대에 라이고 리빙스턴 관측소에서 약 9,200 km 떨어진 부르키나파소 (Burkina Faso)에서 최대 전류가 약 500 kA에 달하는 매우 강한 번개가 관측되었으나 지자기 감지장치 (fluxgate magnetometer)를 확인해보니 GW150914 정도의 진폭을 발생시키기 위해서는 적어도 약 천 배 더 큰 번개가 필요한 것으로 밝혀졌다. 그 외에 자연 또는 사람이 발생시키는 전자기 신호도 고려하였으나 그 영향은 GW150914 신호 대비 약 1억 분의 1 정도로 미미하였다.

더 많은 분석이 있었지만 면밀한 조사를 수행한 결과 GW150914 신호를 발생시킬 수 있는 잡음원에 대한 어떠한

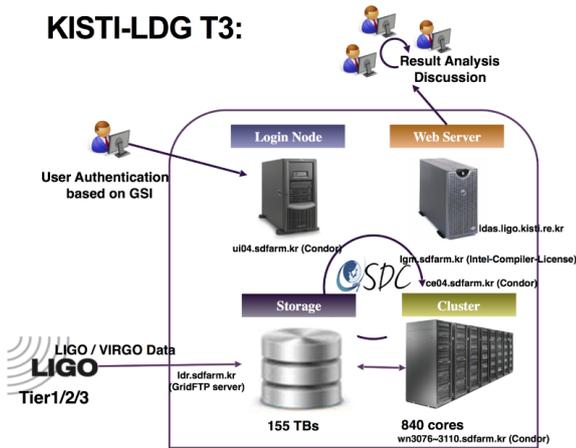


Fig. 4. (Color online) KISTI-GSDC LDG for gravitational wave data analyses. Image credit: KISTI-GSDC.

증거도 찾을 수 없다는 결론에 도달하였다. (더 구체적인 분석 방법과 결과는 참고문헌 [17] 참조).

V. 한국 그룹의 중력파 데이터 분석 연구

1. 대용량 계산 자원

위에서 살펴본 바와 같이 중력파 검출에는 검출 기기뿐만 아니라 다양한 요소를 고려한 검출데이터의 분석이 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 국내연구진의 이러한 데이터 분석 연구를 위한 컴퓨팅 자원과 환경은 한국과학기술정보연구원의 대용량실험데이터허브센터 (KISTI-GSDC)에서 제공하고 있다. 2010년부터 데이터 분석 컴퓨팅 환경을 구축하기 시작해서 2016년 현재 840 코어의 전용 계산자원과 155 TB의 전용 저장 장치를 갖춘 LDG (LIGO Data Grid) Tier 3를 운영하고 있다. 데이터 분석에 필요한 소프트웨어 설치뿐만 아니라 기술지원도 함께 이루어지고 있다. 현재 저장하고 있는 라이고와 비르고의 데이터는 123 TB에 이른다. 국내 연구진은 이러한 컴퓨팅 환경을 활용하여 주로 모수추정 연구, 중력파 검출기 특성 연구, 중력파 파형 연구 등을 활발히 수행하고 있다. 국내 연구진과 공동연구를 수행하는 해외의 라이고 멤버와 일본의 카그라 멤버도 일부 사용하고 있다. Fig. 4는 KISTI-GSDC LDG의 구성을 보여주고 있다.

2. 기계학습을 활용한 신호·잡음 분류 연구

중력파 검출기로부터 관측되는 신호들은 대부분 주변 환경요인 또는 검출기 자체 이상에 따른 비가우시성 잡음

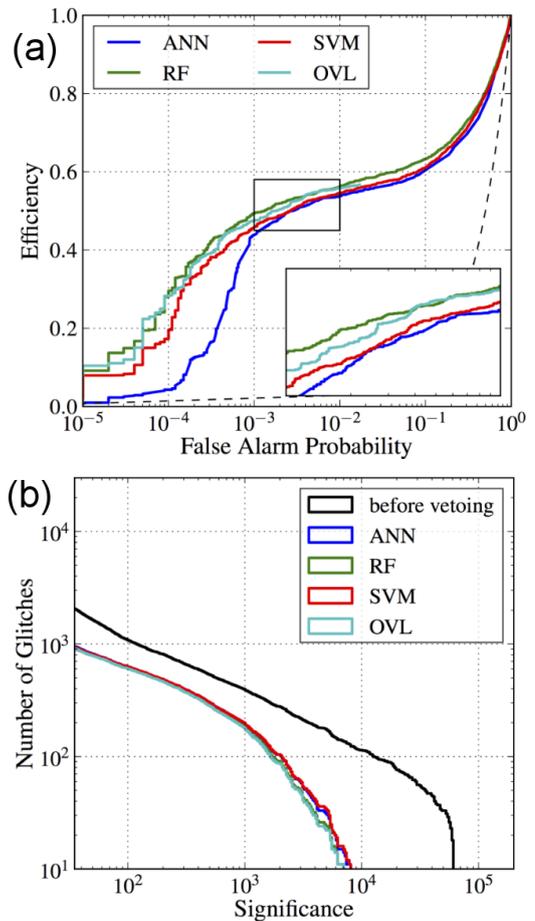


Fig. 5. (Color online) The performance of various machine learning algorithms in identification of non-Gaussian noise transients (glitches) from initial LIGO data. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves (a) and the cumulative number of remaining glitches (b) after removal by each algorithm are shown, *i.e.*, Artificial Neural Network (ANN) in blue, Random Forest (RF) in green, Support Vector Machine (SVM) in red and Ordered Veto List (OVL) in light blue. Image credit: Biswas *et al.* [21].

들이다. GW150914와 같이 천체물리학적 발생원에 따른 중력파 신호는 수많은 잡음 속에서 드물게 검출된다. 검출기가 가동되는 동안 저장된 신호 중에서 앞서 언급한 잡음을 천체물리학적 중력파 신호로부터 분리해 내는 정도에 따라 관측된 중력파 신호의 검출신뢰도를 높일 수 있게 된다. 비가우시성 잡음의 원인을 파악하는 데는 중력파 검출기의 상태 정보를 저장하는 보조채널 정보를 이용하게 된다. 보조채널 정보는 어드밴스드 라이고 기준 20만개 이상에 달하며, 이 중 1,000여 개 정도를 실제 잡음분석을 위해 사용하고 있다. 다량의 보조채널 정보를 일시에 적용하여 잡음 신호에 대한 통계적 분류기준값을 계산하기 위한 방법으로 기계학습법이 사용 가능하며, 이미 이에 관한 연구가 진행되었다 [21]. 이 연구에 참여한 한국중력파연구협력단

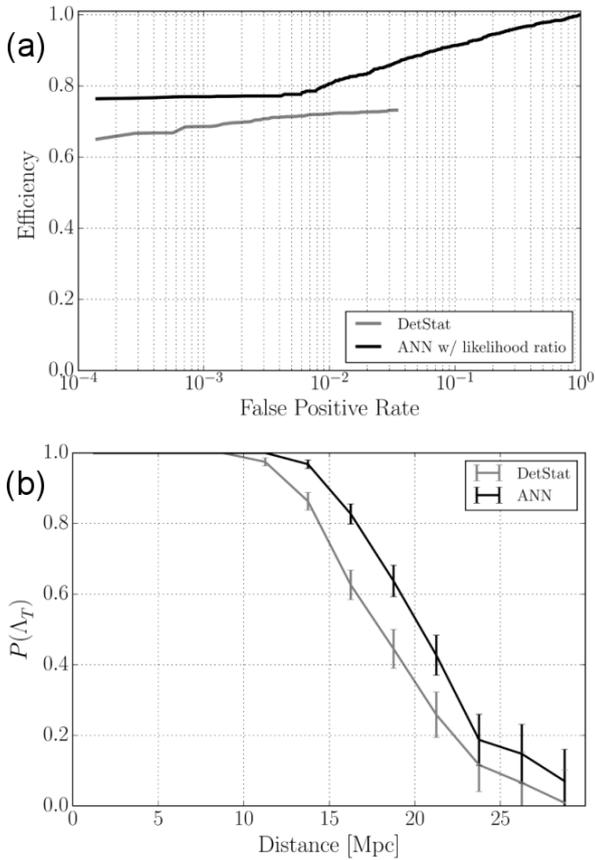


Fig. 6. The outperformance of ANN in discriminating gravitation-wave signal triggers from noise triggers. Panel (a) shows ROC curves of ANN and a conventional detection statistic based on SNR. Panel (b) shows the efficiency of detecting the signals as a function of the distance of the short Gamma Ray Burst’s progenitor. Image credit: Kim *et al.* [22].

은 기계학습법 중 인공신경망 알고리즘 (artificial neural network, ANN)을 사용하여 연구를 진행하였다. Fig. 5는 초기 라이고 (initial LIGO)의 6번째 과학가동 (Science run 6, S6) 기간 중 일부 데이터 (1주일)에 인공신경망 알고리즘을 적용하여 잡음 분류 정도를 알아본 그래프이다. 오경보확률 0.1~1% 범위에서 대략 50%의 검출효율을 보이며, 이는 다른 기계학습법인 Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) 그리고 라이고의 잡음 분석 알고리즘의 하나인 OVL (Ordered Veto List)의 검출효율과 비교 가능하다.

보조 채널 데이터가 아닌 중력파 채널 데이터를 사용하면 중력파 신호 검출에도 인공신경망 알고리즘을 적용할 수 있다. 중성자별 쌍성이나 중성자별-블랙홀 쌍성이 방출하는 중력파에 대해서는 아인슈타인의 상대성 이론에 근거해서 중력파 파형을 만들 수 있다. 이렇게 만들어진 중력파 파형을 정합필터 기법으로 중력파 채널 데이터에 적용하여

이벤트를 추출한다. 추출된 이벤트들 중에는 실제 중력파 신호도 있고 신호와 유사해 보이는 잡음도 존재하게 된다. 라이고 다섯 번째 과학가동 (Science run 5, S5) 데이터에 관한 사전연구에서 두 개의 감마선 폭발 (Gamma-ray burst)이 관측된 시간을 기준으로 가상 중력파 신호를 검출해 내는 정도를 알아보기 위해 인공신경망 알고리즘을 적용하는 연구를 수행하였다 [22]. Fig. 6는 인공신경망 알고리즘을 이용하여 검출한 가상 중력파 신호를 기반으로 감마선폭발체의 검출 가능 거리를 재구성한 것이다. 인공신경망 알고리즘을 이용한 감마선 폭발체의 거리 추산이 신호대잡음비를 기반으로 하는 통계값 (Fig. 6의 DetStat)으로부터 재구성한 거리 추산보다 소폭 향상되었음을 보이고 있다.

위 두 가지 목적에 사용된 인공신경망 알고리즘은 주어진 데이터로부터 찾고자 하는 신호에 대한 통계적 분류기준값을 추산해 낸다는 것이 공통적이다. 두 경우 모두 라이고의 과학가동 기간 중 검출한 데이터를 기준으로 진행된 연구이지만, 두 연구로부터 인공신경망 알고리즘이 어드밴스드 라이고의 관측 데이터에 적용 가능함을 보였다. 현재 한국 참여 연구진은 어드밴스드 라이고에서 검출되는 데이터에 인공신경망 알고리즘을 최적화시키는 연구를 진행 중이며, 향후 진행될 관측가동에서 검출될 데이터에 적용할 계획이다.

3. 카그라 데이터 분석 라이브러리 개발

한국중력파연구협력단은 2011년 부터 카그라 (KAGRA, Kamioka Gravitational wave Observatory)의 약자, 원 명칭: LCGT, Large Cryogenic Gravitational wave Telescope) 연구협력단의 일원으로, 기기개발 [23] 뿐 아니라 데이터 분석 라이브러리 개발에도 주도적으로 참여하고 있다. 카그라는 라이고와 비르고와는 다르게 저음을 활용한다는 것이 다른 중력파 검출기와는 다른 점이고 따라서 검출되는 신호의 특성도 라이고 및 비르고와는 다른 특성을 가질 가능성이 있다. 카그라의 전략은 거의 모든 라이브러리를 라이고의 LALSuite을 참고로 하여 재개발하는 것이다. 한국중력파연구협력단은 그동안의 라이고과학협력단과의 경험을 바탕으로 카그라 데이터 분석 라이브러리인 카갈리 (KAGALI, KAGRA Algorithmic Library)의 약자) 중에서 모수추정 라이브러리를 전담하여 개발하고 있다. 현재 라이브러리 개발은 우선적으로 가장 잘 알려진 쌍성계 중력파형인 TaylorF2 모델에 대하여 마코브 체인 몬테칼로 (Markov-Chain Monte Cralo, MCMC) 방법으로 모수의 확률분포 함수를 계산하는 프로그램을 개발하는 중이다. 소프트웨어 개발소스는 동경대학의 RESCEU 연구소의 서

버에 저장되어 있으며 소프트웨어 버전 관리 시스템인 git 을 사용하여 오사카 시립 대학 (Osaka City University) 의 연구단과 협력하여 개발하고 있다.

카갈리의 개발은 LALSuite을 참고하여 몇 가지를 개선 하면서 개발하고 있다. 예를 들면, 아래와 같은 원칙을 적용하여 코드를 개발하고 있다.

- 카갈리는 LALSuite와는 다르게 C99의 기본 자료형을 사용하는 것을 원칙으로 하고 있다.
- 함수 호출 함수 원형에 대한 헤더파일을 자동으로 생성하도록 하여 잠재적인 소스 오류를 줄인다.
- 중력파 관련한 구조체 정의와 관련 함수 정의는 모듈화하여 소스 관리를 수월하게 하고자 한다.

LALSuite을 그대로 사용하지 않고 카갈리를 다시 개발하는 이유는 코드 개발 과정에서 중력파 데이터 분석에 대한 좀 더 깊은 이해를 할 수 있으며, 이를 통하여 중력파 발생과 관련한 물리적인 이해와 데이터 분석 기법에 대한 원천 기술을 확보할 수 있기 때문이다. 한국중력파연구협력단의 주도적인 카갈리개발을 통하여 차세대 고유한 중력파 검출기에 필요한 데이터 분석 라이브러리 원천 기술을 확보 할 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 결론 및 전망

중력파가 처음으로 관측이 되었으므로 그 존재와 관측 방법에 대해서는 검증이 되었다. 이제 시간이 지남에 따라 중력파 관측이 일상적인 것이 될 것이고 그 동안 관측되지 않았던 천체물리학적 현상에 대한 연구가 이루어질 수 있을 경지까지 많은 자료가 축적될 것으로 기대된다.

다양한 중력파의 실제 관측을 통하여 좀 더 효율적인 데이터 분석 방법이 개발될 것으로 기대된다. 이러한 관점에서 앞으로 중력파 연구에 더 많은 연구가 필요하며 중력파 관측을 통하여 얻어지는 막대한 빅데이터 (Big Data)를 효과적으로 처리하여 의미있는 자료를 추출하는 기술개발이 요구된다. 국내 연구진은 지난 수 년간 라이고연구협력단과 공동으로, 또한 독자적으로 검출기 특성 결정에 대한 전문성을 키워왔다. 이는 앞으로 한국 연구단이 주도적으로 중력파 검출기를 개발하는데 매우 중요한 축을 담당할 것이다. 한국 연구진이 개발한 독자적인 자료처리 기술은 중력파 연구뿐 아니라 사회전반의 여러 문제에서 빅데이터를 처리하는데 유용할 것으로 기대된다.

수많은 중력파 검출 자료로 부터 쌍성의 진화 과정, 중성자별의 물리적 성질에 대한 자세한 이해뿐 아니라 초기 우주, 블랙홀등 그동안 인류가 잘 이해하지 못하고 있던 현상에 대한 연구가 가능해질 것이다 [3].

감사의 글

본 연구는 국가수리과학연구소, 아태이론물리센터, KISTI GSDC의 지원으로 수행되었습니다. 이형원, 김정초의 연구는 연구재단의 연구비 지원으로 이루어졌습니다 (No. NRF-2013R1A1A2060677). 김영민의 연구는 연구재단의 연구비 지원으로 이루어졌습니다 (No. NRF-2015R1A2A2A01004238).

REFERENCES

- [1] A. Einstein, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.) **1916**, 688 (1916).
- [2] B. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [3] C. Kim, H. S. Cho, H. W. Lee, C. H. Lee and H. K. Lee *et al.*, *New Phys.: Sae Mulli* **66**, 293 (2016).
- [4] B. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese *et al.* [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], arXiv:1602.03843 [gr-qc].
- [5] B. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese *et al.* [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], arXiv:1602.03839 [gr-qc].
- [6] B. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese *et al.*, arXiv:1602.08492 [astro-ph.HE].
- [7] B. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese *et al.* [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], arXiv:1602.03840 [gr-qc].
- [8] P. C. Peters, *Phys. Rev.* **136**, B1224 (1964).
- [9] SXS Gravitational Waveform Database SXS:BBH:0305, <http://www.black-holes.org/waveforms> (accessed Feb., 11, 2016).
- [10] A. H. Mroue, M. A. Scheel, B. Szilagyi, H. P. Pfeiffer and M. Boyle *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 241104 (2013).
- [11] LIGO Algorithm Library, LALSuite, <https://github.com/lscsoft/lalsuite> (accessed Feb. 11, 2016).
- [12] LIGO Scientific Collaboration, *LIGO Open Science Center release of GW150914*, 2016. <https://losc.ligo.org/events/GW150914/> (accessed Feb., 11, 2016)

- [13] S. Klimentko, S. Mohanty, M. Rakhmanov and G. Mitselmakher, [Phys. Rev. D **72**, 122002 \(2005\)](#).
- [14] T. D. Canton, A. H. Nitz, A. P. Lundgren, A. B. Nielsen and D. A. Brown *et al.*, [Phys. Rev. D **90**, 082004 \(2014\)](#).
- [15] K. Cannon, R. Cariou, A. Chapman, M. Crispin-Ortuzar and N. Fotopoulos *et al.*, [Astrophys. J. **748**, 136 \(2012\)](#).
- [16] A. Taracchini, A. Buonanno, Y. Pan, T. Hinderer and M. Boyle *et al.*, [Phys. Rev. D **89**, 061502 \(2014\)](#).
- [17] B. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy and F. Acernese *et al.* [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], arXiv:1602.03844 [gr-qc].
- [18] J. R. Smith, T. Abbott, E. Hirose, N. Leroy and D. Macleod *et al.*, [Classical Quantum Gravity **28**, 235005 \(2011\)](#).
- [19] T. Isogai [LIGO and VIRGO Scientific Collaborations], [J. Phys. Conf. Ser. **243**, 012005 \(2010\)](#).
- [20] R. Essick, L. Blackburn and E. Katsavounidis, [Classical Quantum Gravity **30**, 155010 \(2013\)](#).
- [21] R. Biswas, L. Blackburn, J. Cao, R. Essick and K. A. Hodge *et al.*, [Phys. Rev. D **88**, 062003 \(2013\)](#).
- [22] K. Kim, I. W. Harry, K. A. Hodge, Y.-M. Kim and C.-H. Lee *et al.*, [Classical Quantum Gravity **32**, 245002 \(2015\)](#).
- [23] H. J. Paik, H. M. Lee, K. Cho and J. Kim, [New Phys.: Sae Mulli **66**, 272 \(2016\)](#).