우주를 탐구하는 새로운 창: 중력과 천문학의 시대를 열다

DOI: 10.3938/PhiT.22.054

오 정 근

A New Window Towards the Universe: Opening an Age of Gravitational-wave Astronomy

John J. OH

A gravitational wave, which was predicted in Einstein's general relativity, is a wave propagating through spacetime with energy. Its existence was indirectly proven by observing pulsating binary neutron stars called "Taylor-Hulse pulsars" while the worldwide effort for its direct detection is still in progress. In this article, we introduce the current status of gravitational-wave detection projects including the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) and the Virgo projects. We also discuss the scientific impact of gravitational-wave detection and the birth of gravitational-wave astronomy.

들어가며

2016년이면 아인슈타인(A. Einstein)의 일반상대론 탄생 100주년의 해를 맞는다. 그동안 일반상대론은 천체물리, 천문학, 우주론 등에서 천체의 운동과 우주의 탄생에 대한 이해의 지평을 넓히는 데에 지대한 공헌을 하였다고 해도 과언이 아니다. 이론적인 면뿐만 아니라 실험적 검증을 통하여 일반상대론은 천체현상을 고전적인 관점에서 기술하는데 더없이 좋은 이론이라는 점에서 가치를 가진다. 일반상대론이 예측하고 있는 현상 중에서 아직 실험적 검증이 끝나지 않은 마지막 남은 관문이 바로 "중력파(Gravitational Waves)"이다. 중력파의 간접적 존재 증명은 1975년 조셉 테일러(Joseph Taylor)와 러셀 헐스(Russell Hulse)의 쌍성펄사(Binary Pulsar: PSR B1913+

저자약력

오정근 박사는 서강대학교 물리학과에서 이학박사 학위(2004)를 취득한 후 University of Waterloo(2004-2006), 연세대학교 물리학과(2006-2008)에서 박사후연구원을 거쳐 현재 국가수리과학연구소 선임연구원(2008-현재)으로 재직 중이다. 현재 한국중력파연구협력단 (KGWG: Korean Gravitational-Wave Group)의 총무간사이며, 중력파 검출 국제공동연구단인 라이고 과학협력단(LIGO Scientific Collaboration: LSC)과 일본의 카그라협력단(KAGRA Collaboration)의 회원으로 활동하고 있다. (johnoh@nims.re.kr)

Fig. 1. LIGO Gravitational Wave Detector at Livingston, LA (top) and the Virgo Detector at Cascina, Italy (bottom).

16)의 발견을 통해 이루어졌고, 이 업적으로 1995년 노벨 물리학상이 수여되었다. 그러나 중력과 신호의 직접적인 검출은 1960년대 조셉 웨버(Joseph Weber)의 선구자적 노력 이후 현재까지 성공하지 못하고 있다. 이 중력과 신호의 직접 검출이라는 검증의 관문이 2016년 아인슈타인의 상대론 100주년을 전후로 하여 새로운 전기를 맞고 있다. 바로 라이고(LIGO¹⁾)와 버고(Virgo)라 부르는 국제 거대 공동 프로젝트가 "어드밴스드 라이고(Advanced LIGO)"와 "어드밴스드 버고(Advanced Virgo)"라는 이름으로 업그레이드되어 중력파의 직접 검출을 목전에 두게 될 것이기 때문이다(그림 1). 더구나 최초 검출을 목전에 두고 전 세계적으로 차세대 중력과 망원경의 건설이 진행 중이고 새로이 계획되고 있다. 이 글에서는 지난 십여 년 간 중력파의 직접 검출을 위한 노력과 향후 전망, 그리고 그에 따른

1) Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory.

천체물리학적 파급효과에 대해 소개하고자 한다.

중력파란?

중력파는 질량을 가진 물질이 가속운동을 할 때에 발생하는 시공간의 일렁임이 파동으로 전파되는 것을 일컫는다. 이는 전하를 가진 물질이 가속할 때 발생하는 전자기파와 비견된다. 전자기파와 중력파는 빛의 속도로 전파되는 횡파라는 점에서 비슷하나, 전자기파가 서로 수직인 이중편광(dipole polarization)을 가지는 성질에 비해 중력파는 45° 기울어진 사중편광(quadrupole polarization)을 가진다는 점에서 다르다. 아인슈타인의 일반상대성 이론에 의하면 중력파의 해는 선형 섭동 이론(linear perturbation theory)에 의해 유도될 수 있다. 아인슈타인의 장 방정식(field equation)을 선형화하여 전개하면 섭동을 기술하는 섭동장(perturbed field)의 평면파 해(plane-wave solution)가 존재하며 이는 다음과 같다.

$$h_{ab}(t, \vec{x}) = \text{Re} \int d^3k A_{ab}(\vec{k}) e^{-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})}$$

여기에서 h_{ab} 는 중력파의 세기를 나타내는 섭동 스트레인 텐서이고, k^μ 는 파동전파벡터(wave propagation vector)를 의미하며, 편광벡터(polarization vector) A_{ab} 는 다음과 같이 두 개의 편광 모드로 기술될 수 있다.

$$A_{ab} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

여기에서 h_+ 와 $h_\times$ 는 중력파를 기술하는 두 개의 독립 편광 모드이다.

중력파는 앞서 전술한 대로 질량을 가진 물질이 가속운동을 할 때 발생한다. 그러나 질량이 매우 작은 물질이라면 그 중력파의 세기가 매우 작아 검출이 어렵다. 만일 발생원이 충분히 멀리 떨어져 있고 상대적으로 느리게 움직이고 있다고 가정한다면, 중력파의 세기를 나타내는 스트레인 텐서(strain tensor)는

$$h_{ab}(t, \vec{x}) = \frac{2G}{r} \frac{d^2}{dt^2} I_{ab}(t_r)$$

로 기술할 수 있으며, 사중극자 모멘트 텐서(quadrupole moment tensor) $I_{ab}(t)$ 는

$$I_{ab}(t) = \int d^3y y_a y_b T^{00}(t, \vec{y})$$

와 같다. 이 사중극자 모멘트 텐서는 에너지-모멘텀 텐서

(energy-momentum tensor)에 의존하므로 중력파를 발생하는 물질과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 따라서 직관적으로 중력파의 세기는 큰 질량-에너지 값을 가질수록 커진다고 생각할 수 있다. 이 때문에 밀집쌍성병합(compact binary coalescence), 감마선 폭발(gamma-ray bursts), 초신성 폭발(supernovae), 인플레이션(inflation) 등과 같은 천체물리학적 사건들이 관측 가능한 중력파원으로 가장 유망한 이유이다.

중력파의 세기(strain)는 검출기의 길이(L)와 검출기가 중력파에 의해 변화된 길이(ΔL)의 비율로 주어진다. 만약 질량이 태양질량의 1.4배 정도이고 반경이 약 1 km인 중성자별 쌍성이 대략 버고(Virgo) 클러스터 부근에서 병합하여 (17 Mpc²) 중력파를 발생한다면 검출기가 측정하는 중력파의 세기는 $h \sim 10^{-21}$ 정도가 된다. 이는 태양 크기의 별이 수소원자 정도의 거리를 움직이는 정도의 세기에 해당하기 때문에 중력파의 검출이 실험적으로 쉽지 않은 도전임을 알 수 있다.

중력파는 어디에서 오는가?

중력파는 앞서 전술한대로 질량을 가진 물질이 가속운동을 할 때 발생하여 시공간의 일렁임으로 퍼져나가는 파동이다. 우리 주변의 물질들은 질량이 너무 작기 때문에 이 물질들이 발생하는 중력파는 거의 0에 가깝고 이를 직접적으로 검출하는 것은 불가능하다. 그러나 중력파의 세기는 거리에 반비례하여 감소하는 반면 그 질량에 비례하여 증가하므로 질량이 매우 큰 천체현상들에 의해 발생한 중력파는 검출할 가능성이 크다. 때문에 상대적으로 작은 질량의 천체가 내는 중력파라 하더라도 거리가 가깝다면 충분히 검출가능하다. 중력파원에 대한 분류는 파원이 내는 파형(waveform)의 특징에 따라 크게 두 가지로 분류한다. 하나는 연속파원(continuous wave sources)과 다른 하나는 순변파원(transient wave sources)이다. 이 두 가지 분류 내에 중력파를 내는 천체(astrophysical objects)의 성격에 따라 모두 각각 두 가지로 분류한다.

첫 번째 순변파원 중 하나는 앞서 예를 든 밀집쌍성계이다. 대략 라이고 검출기의 검출 진동수 범위 내의 중력파원으로는 밀집 쌍성계는 중성자별의 쌍성(BNS, Binary Neutron Stars), 블랙홀 쌍성(BBH, Binary Black Holes), 중성자별-블랙홀(NS-BH) 쌍성계를 포함한다. 이 밀집 쌍성계는 두 개의 밀집성이 서로 공전하면서 중력파를 방출하고 에너지를 잃고 점차 궤도 반경이 가까워지면서 결국은 병합(coalescence)하게 된다. 그 과정을 회전(inspiral)-병합(merge)-안정화(ringdown)로 분류하며, 각 단계에서 방출하는 중력파의 파형과 세기가 다르다.

2) 1 pc(parsec)는 약 3.26 광년이고 약 3.08×10^{16} m이다.

Fig. 2. Three phases of Compact Binary Coalescence and their waveforms.

회전에서 병합에 이르기 직전까지의 단계는 뉴턴역학(Newtonian mechanics)의 이체문제(two-body problem)로 기술이 가능하여 파형의 계산과 시뮬레이션이 고전적 영역의 접근법으로 가능하다. 물론 파형의 정확한 계산과 적용을 위하여 이 단계에서 포스트 뉴턴 접근법(post-Newtonian approach)을 사용하여 파형을 보정한다.

그러나 병합-안정화 과정에서는 일반상대론의 전역 시뮬레이션(full GR simulation)을 통해 파형을 계산하여야 하며 이 병합과정에서 가장 강한 중력파가 발생할 것으로 예상된다. 따라서 이 부분의 중력파 검출은 수치상대론(numerical relativity) 분야의 파형계산의 도움을 받아 수행되어야 하는 협력 분야이다(그림 2).^[1]

중력파의 간접적 존재증명을 이룬 테일러-헐스 펄사는 이 회전 과정에서 에너지가 줄어 공전 궤도가 감소하는 것을 30년간 관측하여 아인슈타인의 상대성이론이 예측한 이론값과 거의 정확하게 일치함을 보여주었다(그림 3).

두 번째 순변파원에 해당하는 중력파원은 중력파를 내는 폭발체(gravitational wave bursts)이다. 비교적 짧은 시간 내에 막대한 에너지를 뿜어내며 폭발하는 천체로서 감마선 폭발체(gamma ray bursts), 초신성(supernovae) 등이 이에 해당한다. 감마선 폭발은 보통 통상적으로 수 분 이내에 초신성 폭발에 수반되는 전체 에너지에 해당하는 막대한 에너지 분출을 내는 천체를 말한다. 폭발의 지속 시간에 따라 2초 내에 폭발이 일어나는 short-hard burst(SHB)와 2초 이상 지속되는 long-soft burst(LSB)로 구분한다. LSB는 초신성의 폭발과 관

Fig. 3. Comparison between theoretical estimation by General Relativity and observational result of PSR B1913+16 for 30 years at Arecibo Observatory. The error between both is less than 0.2%.^[2]

련이 있을 것으로 생각되나, SHB는 초신성 폭발과 무관하고 오히려 중성자별 쌍성이나 중성자별-블랙홀의 쌍성병합에서 발생할 것으로 생각한다. 이러한 폭발체들은 중력파뿐만 아니라 전자기파, 뉴트리노, 감마선, X-선 등이 동반되어 방출되므로 중력파 검출기뿐 아니라 각종 광학, 감마선, X-선 망원경과 뉴트리노 검출기 등까지 동반 협력 체계를 통해 후속 관측(follow-up observation)을 할 필요가 있다. 이러한 중력파와 다른 종류의 발생원을 동시에 관측하고자 하는 것을 멀티메신저 천문학(multi-messenger astronomy)이라 부르며 향후 유망한 관측 분야가 될 것으로 기대된다.

연속중력파원의 첫 번째 중력파원은 주로 비강착 펄사(non-accreting pulsar), 맥동하지 않는 비강착 중성자별(non-pulsing non-accreting neutron star), 고립된 중성자별의 전천 탐색(all sky search of isolated neutron star), 강착하는 미지의 중성자별 쌍성계(accreting and unknown binary neutron star) 등이 해당한다.^[3] 펄사는 회전하는 중성자 별로 강력한 자기장을 가진 천체로서 중성자별이 강한 회전에 의해

REFERENCES

- [1] J. Centrella, J. G. Baker, B. J. Kelly and J. R. van Meter, Rev. Mod. Phys. **82**, 3069 (2010).
- [2] J. M. Weisberg, D. J. Nice and J. H. Taylor, Astrophys. J. **722**, 1030 (2010).
- [3] LIGO Scientific and Virgo Collaborations, LVC Whitepaper on Gravitational Wave Data Analysis, 2011-2012.

Table 1. Observational results of compact binary neutron stars. P_{spin} is a pulsar's rotating period, P_{orb} is a pulsar's orbit period, e is an eccentricity of the orbit, τ_{age} is a current age of pulsar, and τ_{mrg} is a coalescence time.^[6]

PSR name	P_{spin} (ms)	P_{orb} (hr)	$M_{\text{PSR}} (M_{\odot})$	e	τ_{age} (Myr)	τ_{mrg} (Myr)
B1913+16	59.03	7.75	1.44 (1.39)	0.617	65	301
B1534+12	37.90	10.10	1.33 (1.35)	0.274	200	2730
J0737-3039A	22.70	2.45	1.34 (1.25)	0.088	142	86
J0737-3039B	2770	2.45	1.25 (1.34)	0.088	0.5	86
J1756-2251	28.46	7.67	1.40 (1.18)	0.181	382	1650

회전타원체가 아닌 불균일성을 가지게 되면 중력파를 발생하게 된다.^[4] 표 1에서는 우주의 나이 범위 내에서 밀집 쌍성 합병을 통해 가장 강한 중력파를 발생할 것으로 예상되는 중성자별 쌍성계를 요약하였다.^[5] 2015년 가동예정인 Advanced LIGO의 과학관측이 시작되면 이 펄사가 방출하는 중력파의 예상 검출 빈도는 연간 최소 1회 이상(99% 신뢰수준), 최대 수백 회까지 가능할 것으로 예측된다.^[6]

연속 중력파원의 또 다른 후보는 스토캐스틱 배경 중력파원(stochastic background gravitational wave sources)이다. 스토캐스틱 배경 중력파원은 광범위 연속적인 중력파의 배경복사로서 정형화되지 않은 파원들이 광범위하게 뒤섞여 발생하는 것으로 여겨진다. 특히 이 중력파원들은 인플레이션 모델, 우주끈(cosmic string) 모델과 같은 우주론적인 현상에 기인하는 것과 회전하는 중성자별, 작은 질량의 X선 쌍성계(LMXBs: low-mass X-ray Binaries)와 같은 천체물리학적 현상에 기인하는 것들로 나뉜다. 스토캐스틱 배경 중력파원은 등방적 배경복사(isotropic background)와 비등방적 배경복사(non-isotropic background)로 구분한다. 등방적 배경복사는 단위 로그 진동수 당 중력과 에너지 밀도, $\Omega_{\text{GW}}(f)$ 에 의해 기술되며 이는 많은 다양한 모델에 의해 예측된다. 중력파 검출기의 민감도가 향상될수록 이 다양한 모델들이 주장하는 등방적 배경복사의 원인을 검증할 수 있게 된다. 실제로 5번째의 과학실험의 데이터(Science Run 5: S5)는 우주끈(cosmic strings)과 빅뱅이전 모델(pre-big bang model)을 검증하기 시작했으며, 특히 상대적으로 작은 장력을 가지는 우주끈 모델과 상대적으로 큰 상태 방정식 계수를 가지는 초기우주 진화의 모델들을 배제하는데 기여했다.^[7]

한편 비등방적 배경복사에 유력한 파원으로는 작은 질량의

X선 쌍성계, 회전하는 중성자별을 들 수 있는데 이들은 우리 은하 주변에서 국소적 물질 분포를 따른다. 또한 길게 지속되는 순변천체원(transient astrophysical objects) 역시 이 중력파원의 후보로 탐색되고 있다. 이 파원으로는 강착디스크(accretion disk)에서의 불안정성, 신생 중성자별의 불안정성, 고립중성자 별에서 발생하는 글리치, 그리고 블랙홀 쌍성계의 형성 등이 이에 해당한다. 이 파원이 발생하는 신호는 장/단 감마선폭발, 초신성, 펄사글리치,^[3] 이상 X선 펄사 등이 해당한다.^[8]

중력파 검출을 위한 실험적 노력

중력파의 직접적 검출을 위한 노력은 이미 1960년대 이후 조셉 웨버(Joseph Weber)에 의한 선구자적인 실험으로 시작되었다. 그가 고안한 검출기는 막대모양의 바 검출기(bar detector)였으며 실제 검출을 위한 검출기의 민감도는 검출의 성공을 보장하기에는 턱없이 부족하였다. 그러나 최근 공학 및 응용물리학의 기술의 발전과 특히 극저온 기술, 레이저, 광학기술들의 발달로 실제 직접적 검출을 위한 새로운 형태의 레이저 간섭계 검출기 모델이 킵 소온(Kip Thorne), 라이너 와이즈(Rainer Weiss), 로널드 드레버(Ronald Drever)에 의해 1990 년대에 제안되었고, 라이고(LIGO)라 불리는 중력파 검출 프로젝트가 2002년에 시작되어 오늘에 이르고 있다.

라이고 검출기는 기본적으로 마이컬슨(Michelson) 타입의 레이저 간섭계를 이용한 검출기로, 레이저 빔을 빔 분할기(beam splitter)를 통해 X 방향 팔(X-Arm)과 Y 방향 팔(Y-Arm)로 분리하여 보내고 반대편에 매달려 있는 거울을 통해 반사되어 오는 빛을 광 검출기로 받아들이게 된다. 두 팔의 길이는 4 km의 동일한 팔로서 반사되어 오는 빛은 두 팔에서 오는 빛의 간섭을 통해 변화가 없으나, 만일 검출기에 도달한 중력파에 의해 두 팔의 길이의 변화가 있게 되면 광 검출기에 들어온 빛에는 위상차가 생기게 된다. 미세하게 두 팔의 길이변화에 따른 경로 차 때문에 레이저 빛의 위상차가 생기게 되고 중력파 검출 채널에서는 중력파로 인한 신호를 감지하게 된다(그림 4).

REFERENCES

- [4] H. M. Lee, C.-H. Lee, G. Kang, J. J. Oh, C. Kim and S. H. Oh, Pub. Korean Astron. Soc. **26**, 71 (2011).
- [5] C. Kim, V. Kalogera and D. R. Lorimer, New Astron. Rev. **54**, 148 (2010).
- [6] R. O'Shaughnessy and C. Kim, Astrophys. J. **715**, 230 (2010).
- [7] LIGO Scientific and Virgo Collaborations, Nature **460**, 990 (2009).
- [8] E. Thrane *et al.*, Phys. Rev. D **83**, 083004 (2011).

3) 규칙적으로 펄스를 발생하는 펄사가 간헐적으로 진동수가 갑자기 바뀌는 현상을 보이는데 이를 펄사 글리치(pulsar glitch)라 부름.

Fig. 4. Schematic cartoon of Michelson-type Laser Interferometer for Gravitational Wave Detector.

2010년 10월까지 라이고 검출기는 6번의 과학실험을 수행했고, 현재에는 어드밴스드 라이고(Advanced LIGO)라 불리는 업그레이드 된 프로젝트의 시작을 위해 검출기 업그레이드를 진행하고 있는 중이다. 라이고는 6번의 과학실험 도중 5번째 실험에서 이미 설계 목표 민감도(designed goal sensitivity)를 성공적으로 도달하였고(그림 5), 이후 본격적 검출을 위한 검출기 검증과 분석 소프트웨어 테스트를 수행하였다.

중력파의 직접적 검출을 위한 노력은 이외에 유럽과 일본을 비롯한 전 세계적인 노력으로 이어졌다. 이태리와 프랑스의 합작으로 건설된 버고 검출기는 2011년 9월까지 4번의 과학실험을 수행했고, 역시 어드밴스드 버고(Advanced Virgo)의 가동을 위해 현재 업그레이드 과정을 수행하고 있다. 일본은 2000년대 독자적으로 타마300(TAMA300)이라 불리는 소형 중력파 간섭계를 실험하였고, 극저온(cryogenic) 기술을 포함한 클리오(CLIO⁴⁾) 검출기의 실험을 마쳤으며, 현재 카미오카 광산 지하에 카그라(KAGRA)라 불리는 차세대 중력파 검출기를 건설하고 있는 중이다. 한편 인도는 미국의 라이고 검출기와 동일한 스펙의 검출기를 유치하여 라이고-인도(LIGO-India)라 불리는 검출기의 건설을 위한 프로젝트가 진행 중이다.

이와 같은 전 지구적 지상기반 중력파 검출기를 건설하는 이점은 과학적 측면에서 매우 큰 중요성을 가진다. 중력파 검출기의 네트워크의 구성을 통해 1) 검출기 가동의 가동률(duty cycle)을 100%로 상시 유지할 수 있고 2) 검출기의 민감도를 더 높일 수 있으며 3) 잡음신호의 수준을 낮추어 제거하는 것이 가능해진다. 그러나 이보다 가장 중요한 이점은 4) 중력파원의 위치를 정확하게 측정하여 전자기파 후속관측을 더 용이하도록 하는 점이다.

그림 6에서 보듯이 각 검출기 네트워크에서 시뮬레이션한

Fig. 5. Noise sensitivity of LIGO Hanford detector during 5th Science Run and LIGO designed sensitivity goal.

중력파원의 위치 측정 결과는 현재의 라이고(2개의 핸포드, 리빙스턴) 검출기와 버고 검출기(HHLV)는 중력파원의 위치를 정확히 측정하는데 한계가 있을 뿐 아니라 전혀 감지하지 못하는 영역 또한 존재한다. 향후 존재할 라이고-인도 검출기가 추가된 상황에서 역시 그 정확도는 향상되지 못한다. 그러나 라이고(리빙스턴, 핸포드, 인도) 검출기와 버고 검출기는 정확도를 향상시켜주며, 여기에 일본의 카그라 검출기가 함께 가동될 때에는 이 성능이 더욱 더 향상됨을 알 수 있다. 여기에서 파란 원의 크기는 검출기 위치 측정의 정확도를 나타낸다.^[9]

중력파 검출과 물리학

중력파를 직접적으로 검출한다는 것은 아인슈타인의 일반상대론이 예측하는 중력파의 존재를 증명하는 과학적 발견을 이루는 일이다. 그러나 중력파의 검출은 일반상대론의 검증이라는 사실 외에 다양한 과학적 파급효과를 지닌다. 그 파급효과는 천체물리학적 문제들, 천문학적 문제들, 그리고 우주론적인 문제들에 대한 해결의 실마리를 제공할 것으로 기대된다.

천체물리학적으로는 중력파원들인 천체물리학적 대상들에 대한 물리학적 연구와 새로운 발견이 가능해진다. 그 하나는 밀집쌍성원인 중성자별과 블랙홀에 대한 물리적 성질에 대한 연구가 가능해진다. 밀집성(compact stars)이란 별의 진화단계 중 마지막 단계에서 중력 수축을 통해 생성되는 별들로 백색왜성, 중성자별, 블랙홀을 통칭한다. 이러한 밀집쌍성은 어드밴스드 라이고 가동 시에 대략 수 회에서 많게는 수백 회 정도

REFERENCES

- [9] S. Fairhurst, "Improved source localization with LIGO India", Proceedings of ICGC2011 conference, arXiv:1205.6611 [gr-qc] (2012).

4) Cryogenic Laser Interferometer Observatory.

Fig. 6. Source localization of various detector networks: H-Hanford, L-Livingston, V-Virgo, I-India, K-KAGRA. HHLV and HIL's localization accuracy is quite poor since there are uncovered spots denoted by red cross (upper two figures). HILV and HIKLV improve the localization accuracy comparing to upper two cases of HHLV and HIL.⁶⁾

의 확률로 연중 검출되리라 기대된다.⁵⁾ 밀집성 외에도 천체물리학적 중력파원으로 감마선 폭발체, 초신성 등이 연구의 대상이 된다. 이 중력과 관측을 통해서 무거운 별의 마지막 진화과정, 밀집성의 생성과 진화, 초신성 폭발 과정, 천체에서 발생하는 X-선이나 감마선과 같은 고에너지 광자 및 뉴트리노의 발생 기작, 은하와 성단 역학, 우리 은하 중심부, 태양계 부근의 중력장 등에 대한 이해를 크게 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 천체물리학적 중력파원 외에 우주초기 인플레이션 등의 우주론적 사건으로 발생한 스토크스틱 중력과 배경 복사는 우리가 우주의 기원을 탐구할 수 있는 영역을 넓혀주게 된다. 현재 우주를 관측할 수 있는 수단인 전자기파를 이용하면 빅뱅 핵 합성기(Big-bang nucleosynthesis) 이후에만 관측이 가능하게 된다. 그러나 중력파는 그 이전에 발생하여 도달하는 복사이기에 전자기파가 도달할 수 있는 한계 너머의 우주 생성에 관한 정보를 제공하여 준다. 원시 중력과 배경(primordial gravitational wave background)을 관측하고자 하는 실험적 도전은 SKA망원경(The Square Kilometre Array)이나 우주마이크로파 배경복사(cosmic microwave background radiation)의 B-모드 편광을 측정하고자 하는 노력과도 연관되어 있다.^[11]

5) 2022년 라이고-인도가 포함되어 연중 100%의 가동률로 가동될 시에 중성자별 쌍성계는 대략 0.4~400회 정도 검출 빈도를 가짐.^[10]

6) 초기 라이고 설계에는 핸드포드 관측소에 2 km, 4 km 짜리 두 대의 간섭계가 설치되어 있었다. 그러나 어드밴스드 라이고 단계에서 2 km 팔은 해체되어 폐기되고 4 km 팔 한 대만 존재하게 된다.

7) 중성자 별 쌍성의 경우.

중력과 검출기의 미래: 중력과 천문학의 서막

중력파의 검출은 천문학적으로도 의미가 있다. 현재 중력과 검출과 관련된 프로젝트는 물리학의 영역이지만 향후 이 검출기는 중력과 망원경의 역할을 하게 될 것이다. 마치 전자기파의 발견과 이를 이용한 전파망원경이 천문학적 관측의 지평을 넓혀준 것처럼, 중력과 검출기는 그대로 중력과 망원경의 역할을 하여 전자기파의 관측영역을 넘어서는 우주를 관측하는 새로운 창(窓)의 역할을 하게 될 것이다. 또한 중력파와 함께 다른 전자기파의 관측과 협력하여 관측하는 멀티메신저 천문학(multi-messenger

astronomy)이라는 새로운 영역이 탄생하게 될 것이다. 예를 들어 초신성 폭발 시 발생하는 중력파 이후 뉴트리노와 우주선(cosmic rays) 등이 함께 관측되어 초신성 폭발의 내부 기작이 규명되거나, 전자기파 관측을 통해 알려진 펄서 글리치의 중력파 관측을 통한 발생 기작이 규명되는 것이다.

최근 10여 년 간의 중력과 검출 프로젝트는 설계된 목표 민감도를 달성하고, 분석 파이프라인을 개발하여 검증하고, 후속 관측을 위한 다양한 광학 천문대, X-선 망원경 프로젝트 등과 협력관계를 쌓는 일들에 집중되었다. 라이고 검출기가 현재의 검출 민감도로 관측 가능한 한계(effective range)는 약 30 Mpc 이내이다.⁷⁾ 이 관측 한계 내에서 발생한 중력파의 검출 빈도(event rate)는 중성자별 쌍성의 경우 1000년에 대략 8개 정도가 된다. 따라서 현재 수준의 라이고 검출기의 민감도로는 중력파의 검출이 성공하지 못한 것은 어쩌면 당연한 일이라 할 수 있다. 이 민감도가 어드밴스드 라이고에서는 대략 10배 정도 향상되게 되며, 공간상으로는 1000배의 관측 범위가 넓어지게 된다(그림 7). 그때의 유효 관측거리는 약 200 Mpc로 이때의 검출빈도는 1년에 0.4~400 정도가 되므로 수년 내에 중력과 검출의 성공소식을 듣게 되리라 기대된다.

라이고의 민감도의 향상에도 불구하고 중력파원의 특성에 따라 검출하지 못하는 진동수 영역이 존재한다. 그 이유는 라이고 검출기는 대략 수 Hz~1 kHz의 띠너비(bandwidth)에 가

REFERENCES

- [10] CBC Face-to-face meeting in LVC meeting at Hannover, Germany, Sept. 23-27 (2013).
- [11] L. Krauss, S. Dodelson and S. Meyer, Science **328**, 989 (2010).

Fig. 7. Effective observation range of Initial LIGO, Enhanced LIGO, and Advanced LIGO.

장 민감하도록 설계되었기 때문이다. 이 영역에서 검출되는 중력과원은 앞선 설명대로 병합과정에 있는 밀집쌍성계 중 중성자별 쌍성계와 중성자별-블랙홀 쌍성계이다. 그러나 낮은 진동수대의 피너비로 갈수록 질량이 매우 큰 블랙홀 쌍성이나, 백색왜성 쌍성계 등의 중력과원들이 발생하는 중력과를 관측할 수 있게 된다. 이러한 중력과들은 지상기반 검출기로는 진동잡음(seismic noise)의 장벽에 막혀 관측이 어렵다. 때문에 이들을 검출하기 위한 우주기반 중력과 검출 프로젝트들이 준비되고 있다. 그 예가 NGO⁸⁾와 DECIGO⁹⁾이다. NGO는 NASA가 추진하던 LISA프로젝트가 유럽우주국(European Space Agency, ESA)으로 이관되어 축소 추진되고 있는 우주 위성 레이저 간섭계 검출기로 대략 0.001~1 Hz 대역에 해당하는 중력과 검출을 목표로 한다. DECIGO는 일본이 독자적으로 추진하는 우주기반 중력과 검출 안테나로 대략 0.01~100 Hz 대역의 중력과 검출을 목표로 한다. 두 우주 망원경은 모두 대략 2020년 이후 가동을 목표로 진행되고 있다(그림 8).

8) New Gravitational-wave Observatory, ∇ LISA.

9) DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory.

Fig. 8. Schematic view of DECIGO (top) and NGO (eLISA) (bottom).

마치며

앞서 살펴본 대로 중력과 검출은 일반상대론에 남아있는 마지막 검증 관문이자, 향후 우주를 바라보게 될 새로운 지평을 여는 가능성을 가진 프로젝트이다. 라이고는 미국과학재단(National Science Foundation, NSF)이 단일 프로젝트로는 가장 큰 규모로 지원하는 프로젝트이며, 그 성공이 아인슈타인의 상대론 100주년이 되는 2016년 경 즈음에 기대되는 금세기 가장 유망한 프로젝트 중에 하나이다. 이 검출을 통해 프로젝트가 완성이 되어 종료되는 것이 아닌 우주의 미개척 영역에 대한 탐구가 새롭게 시작되는 출발점이 되는 것이다. 이 중력파의 검출을 통해 중력과 천문학의 서막이 열리는 역사적인 시점이 다가오는 것을 기다리는 것은 매우 흥분되는 일이 아닐 수 없다.