일반상대성이론의 100년과 그 미래

중력과 천문학과 차세대 중력과 검출기

DOI: 10.3938/PhiT.24.012

오상훈·강궁원

Gravitational-wave Astronomy and Next-generation Detectors

Sang Hoon OH and Gungwon KANG

Gravitational waves are predicted by Einstein's General Theory of Relativity (1916). Direct detection of gravitational waves not only proves his theory but also opens a new era of gravitational-wave astronomy and astrophysics. The first detection of such waves, followed by the detection of a few more, may not be enough to accumulate astronomical information that would allow the study of many aspects of astronomy. We introduce next-generation gravitational-wave detectors in space and underground and the targeted sources to be observed. We also discuss the major science goals that such detectors would achieve in the future.

중력과 검출실험 개요

올해는 아인슈타인의 일반상대론 발표 100주년을 기념하는 해이다.¹⁾ 지난 백 년간 수성의 근일점 이동 등 여러 실험과 관측을 통하여 일반상대성이론은 철저한 검증을 거쳤다. 일반상대론이 예측하였지만 아직 직접적인 증거를 찾지 못하여 마지막으로 남아 있는 숙제가 중력파의 직접적인 검출이다. 중력파의 직접 검출

저자약력

오상훈 박사는 2009년 은하 충돌로 생성되는 나선팔을 연구하여 서울대학교에서 박사학위를 받았고, 국가수리과학연구소에서 박사후 연구원을 거쳐 현재 동 연구소에서 선임연구원으로 재직 중이다. 2009년부터 한국중력파연구협력단의 회원이며 2010년 밀워키 위스콘신 주립대학 방문연구를 시작으로 본격적인 중력파 데이터 분석 연구에 뛰어들어 쌍성계에서 발생하는 중력파와 보조채널 데이터 분석 연구를 수행하고 있다.

강궁원 박사는 연세대와 미국 메릴랜드 대학에서 수학했다. 일반상대론을 전공했으며 다년간 블랙홀 관련 이론적 연구를 해오다 2005년부터 한국과학기술정보연구원(KISTI)에서 수차상대론 및 중력파 분야 연구를 하고 있다. (gwkang@kisti.re.kr)

은 일반상대론이 옳음을 최종적으로 검증하는 마지막 관문이라는 사실만으로도 위대한 과학적 성과이지만 천문학과 천체물리학에서 관심을 가지고 있는 천체에 대한 새로운 관측 방법을 제공할 수 있다는 점에서 그 가치는 더욱 소중하다.

일반상대론에 따르면 물체의 존재는 주위의 시공간을 휘어지게 하여 시공간은 더 이상 편평하지 않고 곡률을 갖게 된다. 만약 물체의 분포가 시간에 따라 역동적으로 변하게 되면 주위의 시공간도 역동적으로 변할 것이며, 이러한 변화는 물체 근처에 머물지 않고 멀리까지 퍼져 나갈 것이다. 전하를 가진 물체가 가속운동을 하면 전자기파가 발생하여 퍼져나가는 것과 같다. 이 시공간 자체의 곡률파동이 중력파이며 일반상대론이 완성되기 훨씬 전부터 아인슈타인은 그 존재를 예상하고 있었다. 중력파를 실험적으로 검증하려는 노력은 1950년대 미국의 조셉 웨버에 의해 시작되었는데, 중력파가 지나가면서 유발되는 길이 2 m, 지름 1 m인 원통형 막대의 길이 변화에 의한 압전전류를 검출하고자 하였다. 웨버는 60년대 후반에 드디어 중력파를 검출하였다는 논문을 내기에 이르렀으나 그 뒤로 활발히 진행된 후속 실험에서는 그러한 결과를 얻지 못했다. 1970년대 물리학자들은 웨버의 막대형 검출기로는 우리가 예상할 수 있는 보통의 천체로부터 오는 중력파를 검출할 수 없다는 인식을 하게 되고, 빛의 간섭현상을 이용한 좀 더 정밀한 검출기를 고안하게 된다. 이것이 소위 라이고(LIGO, Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)라고 하는 중력파 검출기인데 1990년대 건설을 시작하여 2002년 첫 가동을 했고 2010년 10월 여섯 번째 가동 후 업그레이드(advanced LIGO)에 들어가 2015년 후반 재가동을 하게 된다. 라이고 외에도 지구상의 간섭형 중력파 검출기로는 유럽의 버고(Virgo), 지오(GEO)가 있으며, 일본의 카그라(KAGRA)가 2012년부터 지하 100 m에 건설 중이고, 인도의 LIGO-India가 건설 계획 중에 있다. 중력파 검출 실험에 대한 더 자세한 내용은 문헌¹⁾을 참조하기 바라며, 이 글에서는 중력파 검출과 천문학과와의 관계, 그리고 다양한 차세대 중력파 검출 프로젝트와

1) 아인슈타인은 일반상대론에 관하여 1915년 11월 25일 4쪽짜리 짧은 논문을 출판하고, 1916년 54쪽의 긴 논문을 발표했다.

그것이 목표로 하고 있는 천체물리학적 이슈들에 대해 간략히 소개하고자 한다.

중력과 검출과 천문학

전통적으로 천문학에서 천체로부터 오는 정보를 획득하는 방법은 전자기파 즉 빛을 통한 관측이다. 우리는 빛을 이용하여 가까이 있는 천체의 운동과 거리를 측정하고 빛의 세기와 색을 이용하여 별의 질량과 나이를 측정하고 빛을 분광하여 별의 종류와 크기, 별의 대기를 구성하는 원소, 그리고 별 표면에서의 중력 등 다양한 정보를 얻어낼 수 있다. 또한 세페이드 변광성의 밝기 변화와 초신성의 밝기를 측정하고 아주 멀리 있는 은하의 빛을 분광하여 우주가 가속팽창하고 있다는 사실도 알아낼 수 있다.

하지만 빛은 물질과 쉽게 상호작용하기 때문에 우리가 관측하고자 하는 천체와 지구 사이에 광학적 불투명도(opacity)가 큰 기체나 티끌(우주 먼지)이 있어서 차폐가 일어날 경우 충분한 정보를 주지 못하는 경우가 종종 발생한다. 또한 빛을 이용한 관측은 단위면적당 에너지(flux)를 측정하기 때문에 망원경이나 검출기의 감도가 10배 좋아질 경우 $10^3=1000$ 배가 아닌 $10^{3/2}\approx 32$ 배 만큼만 더 넓은 우주공간을 볼 수 있다. 더구나 블랙홀 자체에는 빛을 방출할 수 있는 물질이 없고 사건지평선 안쪽에서는 빛조차 빠져나올 수 없기 때문에 빛을 이용하여 직접 볼 수 있는 방법이 전무하다. 고밀도 천체인 중성자별에서 방출되는 전파와 같은 전자기파를 이용하여 중성자별의 내부구조를 이해하는 것 역시 한계가 있다.

중력파는 질량의 사중극자 모멘트가 시간에 따라 변화할 때 시공간의 진동이 빛의 속도로 전파되는 현상이다.^[2] 검출가능성을 제쳐두면 질량이 있고 진동을 하는 물체는 모두 중력파를 방출할 수 있는 가능성이 있다.^[2] 우리가 관심을 가지고 있는 천체는 모두 질량이 있다. 따라서 중력파를 이용해서 천체를 관측한다는 것이 원칙적으로는 가능하다. 하지만 중력이라는 힘은 자연계의 전자기력과 같은 다른 힘에 비하여 매우 미약한데 중력파도 전자기파에 비해 그 세기가 매우 약하다. 현존하는 기술로 검출 가능한 중력파가 발생하려면 고밀도의 천체가 매우 빠르게 진동해야 한다. 실제로 최초로 중력파를 검출할 수 있다고 여겨지는 유력한 파원은 소위 근접쌍성계(compact binary coalescence)인데, 중성자별과 같이 고밀도의

천체가 매우 근접하여 공전하며 병합하는 과정에 있는 천체이다.

현재 건설과 업그레이드가 진행 중인 중력과 검출기로 검출 가능한 진동수 대역에서 가장 강력한 세기의 중력파를 방출할 수 있는 대표적인 근접쌍성계로는 중성자별-중성자별 쌍성계와, 중성자별-블랙홀 쌍성계 그리고 블랙홀-블랙홀 쌍성계를 들 수 있다. 이들로부터 방출되는 중력파의 파형은 크게 세 단계로 구분된다. 가장 먼저 발생하는 파형은 준원형궤도(quasi-circular orbit) 상태에서 방출되는 나선(inspiral) 파형으로 post-Newtonian 근사를 통해서 매우 정확하게 계산할 수 있다. 이 과정에서 에너지와 각운동량을 잃게 되어 결국 두 천체가 병합(merger)하게 되는데, 이때 발생하는 파형은 컴퓨터를 사용한 수치상대론 계산을 통해서만 얻을 수 있다. 그리고 병합 후보다 무거운 질량의 블랙홀을 생성시키면서 안정화되는 단계에서 발생하는 감쇠진동형태의 ringdown 파형이 있다.

중력파는 시공간의 진동으로 진동면에서 자유낙하 중인 두 물체 사이의 거리를 변화시키는 양상으로 나타난다. 중력과 검출기는 이러한 미세한 거리변화를 측정하도록 고안되어 있다.^[3] 중력파는 전자기파와 달리 진폭을 측정하기 때문에 검출기의 감도를 10배 증가시키면 관측 가능한 우주 공간의 부피가 1000배 증가하여 관측의 대상이 되는 천체도 그만큼 늘어나게 된다. 더구나 중력파는 퍼져나가는 과정에서 물질과의 상호작용에 의해 차폐되거나 소멸되지 않기 때문에 파원에 대한 성질을 연구하기에도 적합하다.

중성자별-중성자별 근접쌍성계 병합은 우리 은하에서 약 5만 년에 한 번 꼴의 빈도로 발생할 것으로 예상되고 있다. 지난 2010년 가동을 마친 initial LIGO의 민감도는 10^{-21} 정도로 중성자별 근접쌍성계의 관측 가능 한계거리가 약 33 Mpc 정도이다. 연간 예상되었던 검출빈도는 낮게는 5천 년에 1개 높게는 5년에 1개로 예측되었기 때문에 아직 최초 검출이 되지 않은 것은 비관적인 결과가 아니다. advanced LIGO(aLIGO)와 Advanced Virgo(AdV)가 목표로 하는 검출 민감도를 2020년경에 달성할^[3] 경우 이러한 중력파를 최대 445 Mpc 거리까지 관측할 수 있기 때문에 1년간 관측을 할 경우 최소 0.4개에서 최대 400개의 근접쌍성계 병합에 의한 중력파를 검출할 수 있을 것이다.^[4]

중력파의 최초 검출은 중력과 천문학과 중력과 천체물리의

REFERENCES

- [1] John J. Oh, Phys. High Technol. **22**(11), 42 (2013); Hyung Mok Lee, *ibid* **23**(6), 29 (2014).
- [2] H. M. Lee, C.-H. Lee, G. Kang, J. J. Oh, C. Kim and S. H. Oh, Pub. Korean Astron. Soc. **26**, 71 (2011).
- [3] Hyung Mok Lee, Phys. High Technol. **20**(3), 35 (2011).
- [4] J. Abadie *et al.*, (LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration) Class. Quant. Grav. **27**:173001,2010 (2010).

- 2) 우리 주변에서 볼 수 있는 질량의 진동으로 인한 중력파는 세기가 극도로 미약하기 때문에 검출하는 것이 불가능하다. 예를 들어, 1톤의 질량이 2 m 떨어져 있는 아령이 1 kHz에 해당하는 주기로 회전하고 있을 경우 발생하는 중력파의 세기는 겨우 $\Delta L \sim 10^{-39}$ m의 길이 변화를 줄 뿐이다.
- 3) aLIGO는 2015년 하반기에 첫 가동을 다시 시작하지만 목표로 하는 민감도는 2020년까지 달성하는 것으로 계획하고 있다.

서막을 여는 분명한 신호가 될 것이다. 사실 중력파를 연구하는 많은 연구자들은 aLIGO, AdV 그리고 일본의 KAGRA가 본격적으로 가동되면 중력파를 검출할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 중력파의 직접 검출은 처음이기 때문에 검출 자체가 가지는 의미가 매우 크지만 단 하나의 검출 또는 매우 드문 검출 빈도로는 천문학 또는 천체물리학적으로 풍부한 정보를 얻어내기 어려울 것이다. 또한 현재 건설되고 있는 중력파 검출기의 주파수 대역폭은 10 Hz - 1000 Hz로 중성자별과 블랙홀을 구성원으로 하는 밀집쌍성계 병합과정에서 발생하는 중력파 검출에 최적화되어 있어 좀 더 다양한 천체를 중력파를 통해 관측하는 것은 제한적이다.

전자기파를 이용한 천체에 대한 연구의 발전과정을 돌이켜 보면 다양한 파장에서 수많은 천체에 대한 관측데이터와 물리학의 지식이 결합하여 별과 은하 그리고 우주 거대 구조의 진화과정을 밝혀낼 수 있었다. 천문학에서 망원경을 이용한 관측은 주로 가시광선 영역에 국한되어 있었다. 전파 관측기술과 적외선, 자외선 검출기 그리고 X선과 감마선 등 고에너지 관측기술의 발달로 전자기파의 모든 파장 영역으로 관측 범위가 넓어졌다. 여기에 우주선(cosmic-ray)과 중성미자의 검출은 빛이 아닌 다른 수단을 통하여 천체를 볼 수 있도록 우리의 지평을 넓혀주었다.

다행스럽게도 위의 중력파 검출기 외에도 보다 민감하고 다양한 주파수 대역을 관측하는 차세대 중력파 검출기 계획이 세워지고 있고 일부는 진행되고 있다. 이러한 검출기를 활용하여 관측하는 시기가 도래하면 중력파는 천문학과 천체물리학에 매우 중요한 도구로 자리 잡을 수 있을 것이다.

차세대 중력파 검출기/망원경 프로젝트

1. eLISA

LIGO, Virgo, 그리고 KAGRA와 같이 지상기반의 레이저 간섭계 중력파 검출기는 주파수가 약 10 Hz에서 1000 Hz 사이의 중력파를 검출할 수 있다. 특히 1 Hz 이하의 저주파 대역은 지진파잡음(seismic noise) 장벽을 기술적으로 극복하기 어렵다. 그래서 KAGRA는 최대한 이 잡음의 영향을 줄이려 지하에 터널을 뚫고 중력파 검출기를 설치하고 있다. 이 잡음을 근본적으로 극복하는 방법은 우주로 나가 인공위성에 레이저 간섭계를 이용한 검출기를 탑재하여 관측하는 방법이다.

유럽우주국(European Space Agency, ESA)은 2028년 발사를 목표로 eLISA(evolved Laser Interferometer Space Antenna) 우주 중력파 안테나 프로젝트를 추진하고 있다. 당초 미국 항공우주국(NASA)과 ESA가 공동으로 함께 LISA(Laser Interferometer Space Antenna)를 추진하였으나 미국의 중단으로 유럽에서 단독으로 수행하게 되었고 규모가 조금 축소되었다. eLISA는 지

Fig. 1. Orbit of eLISA. The three eLISA-NGO spacecraft follow the Earth as an almost stiff triangle, purely due to celestial mechanics. Figure taken from eLISA white paper [5]

구와 태양 사이에 중력포텐셜이 안장모양(saddle point)으로 되어있는 L2 위치에 세 개의 인공위성으로 구성된 마이켈슨 레이저 간섭계이다.^[5] 이등변삼각형 형태로 나열되는 세 개의 인공위성 중 가운데 꼭지점에 있는 하나는 모선(Mother Spacecraft)으로 양쪽 1백만 km 떨어져 있는 두 개의 인공위성과 함께 aLIGO, AdV처럼 두 팔을 가진 마이켈슨 간섭계를 만든다(그림 1). 지상에서는 관측이 어려운 0.001-0.1 Hz의 중력파에 가장 민감하도록 디자인된 eLISA는 태양보다 백만 배 이상 무거운 거대질량블랙홀(Super Massive Blackhole, SMBH)의 병합, 거대질량블랙홀이 주변의 중성자별, 또는 수 수백 태양질량의 항성질량 블랙홀(stellar mass black holes) 등을 집어삼키며 발생시키는 소위 극한질량비(Extremre Mass Ratio Inspiral, EMRI) 중력파를 관측할 수 있다. 그리고 관측적으로 잘 알려져 있는 고밀도천체의 쌍성계이지만 라이고, 버고, 카그라로는 검출할 수 없는 매우 미약한 저주파 영역의 중력파 역시 eLISA의 관측대상에 들어온다.

여러 가지 천문학적인 관측사실을 통해 우리는 은하의 중심부에는 대부분 거대질량블랙홀이 존재한다는 사실을 알고 있다. 모은하(host galaxy)와 공생관계에 있는 거대질량블랙홀은 모은하의 질량이 클수록 더 무겁다. 은하들은 충돌과 병합을 거치며 더 무거운 은하로 진화해 나간다. 이 과정에서 중심부에 있는 거대질량블랙홀 역시 병합하게 되는데 이때 발생하는 중력파를 관측하여 블랙홀의 질량과 병합단계를 분석해냄으로써 은하의

REFERENCES

- [5] K. Danzmann *et al.*, The Gravitational Universe, eLISA white paper, <http://elisascience.org/whitepaper>.

Fig. 2. Conceptual design of DECIGO. DECIGO consists of three drag-free spacecraft, 1,000 km apart from each other. It is similar to eLISA configuration. Figure from http://tamago.mtk.nao.ac.jp/spacetime/decigo_e.html.

형성과 진화에 대한 천문학 연구에 큰 공헌을 할 수 있다. 은하들의 중심에 있는 거대질량 블랙홀 근처에는 질량 분리(mass segregation) 현상에 의해 중성자별, 블랙홀 그리고 백색왜성과 같은 고밀도천체들이 많이 존재한다. 이 천체들은 중심에 있는 거대질량블랙홀 주변을 공전하며 중력파를 발생시키며 에너지와 각운동량을 잃어 결국 거대질량블랙홀과 병합하게 된다. 이러한 과정을 EMRI라고 부르는데 특히 질량이 태양의 수백 배 이하인 블랙홀 천체들과 거대질량 블랙홀이 발생시키는 EMRI 중력파는 적색이동 $z \sim 0.5-0.7$ 에 이르는 먼 거리까지 검출가능하고 거대질량 블랙홀의 자전과 질량을 매우 정밀하게 측정하는 데 사용할 수 있다. 따라서 태양 질량의 1만 배에서 1백만 배에 이르는 거대질량블랙홀의 분포를 자세하게 파악할 수 있게 된다.

2. DECIGO

일본에서도 DECIGO(DECihertz Interferometer Gravitational wave Observatory)라는 명칭의 우주 중력파 검출 프로젝트를 추진하기 위한 연구를 수행하고 있다.^[6] eLISA와 유사한 형태의 인공위성 탑재형 중력파 검출기로 아직 설계연구를 하고 있는 단계이다(그림 2). 팔의 길이가 1000 km로 eLISA보다는 짧은 팔의 마이켈슨 레이저 간섭계로 eLISA와 라이고가 관측할 수 없는 0.1-10 Hz의 중력파를 관측하는 것을 목표로 하고 있다(그림 2).

빅뱅 직후 우주의 급팽창시기(inflation, 인플레이션) 발생한 중력파가 바로 이 주파수 대역에 있다. 지난해 BICEP2 관측팀이 인플레이션 시기에 중력파에 의해 우주배경복사에 남겨진 B모드 편광을 검출했다고 발표하여 과학계가 들쭉였다. 안타깝게도 이어진 Planck 우주망원경의 관측 결과와 공동으로 분석을 한 결과 foreground의 우주먼지에 의한 복사가 완전히 제

거되지 않았다는 사실이 밝혀졌다.^[7] BICEP2와 Planck의 관측은 전자기파에 남겨져 있는 중력파의 흔적을 찾는 방식이다. 이 시기의 우주에서는 전자기파가 빠져나올 수 없다. 빛을 직접 볼 수 없기 때문에 중력파가 남긴 흔적만을 보는 것인데, 이와는 달리 중력파는 빅뱅 직후의 우주를 직접 관측하여 인플레이션을 검증하고 그 특성을 연구할 수 있는 유일한 수단이다.

라이고의 중력파 대역에 들어오기에는 너무 먼 공전반경의 중성자별 쌍성계가 발생시키는 중력파 역시 DECIGO의 관측 대상이다. 연간 10만 개 정도의 중성자별 쌍성계를 관측할 수 있을 것으로 기대하기 때문에 중성자별의 질량분포를 얻어내고 한계질량과 내부구조를 결정짓는 상태방정식의 제한 조건을 제공할 것이다. 중력파를 이용하면 전자기파를 이용한 천체의 거리측정과는 독립적인 방법으로 거리를 측정할 수 있게 된다. 중성자별 쌍성계가 있는 모은하의 적색이동과 함께 우주의 가속팽창을 야기하는 암흑에너지에 대한 연구에도 새로운 정보를 얻게 될 것이다.

중간질량블랙홀(Intermediate Mass Black Hole, IMBH)의 존재여부는 천문학적으로 뜨거운 논쟁의 중심에 있다. 대부분의 은하 중심에 존재하는 거대질량블랙홀의 성장과 진화과정에서 필요하다고 여겨지기 때문에 그 존재가 자연스러울 수 있다. 하지만 태양질량의 약 1000배에서 10만 배 사이의 IMBH는 아직 관측적인 증거가 발견되지 않았다. 만약 DECIGO가 일본의 차세대 우주 중력파 검출 프로젝트로 선정되어 0.1 Hz - 10 Hz 사이의 대역에서 목표로 하는 민감도를 달성한다면 IMBH 쌍성계가 방출하는 중력파를 거의 우주의 전역에 걸쳐서 관측이 가능할 것이다.

백색왜성의 반경은 중성자별과 블랙홀에 비하여 매우 크다. 이로 인해 백색왜성-백색왜성 쌍성계는 병합과정에서 발생하는 중력파가 1 Hz를 넘을 수 없어서 라이고, 버고, 카그라 검출기로는 관측이 불가능하다. 대부분의 질량이 작은 별들은 백색왜성이 되어 생을 마감한다. 그 만큼 백색왜성은 중성자별과 블랙홀에 비해 풍부하게 존재한다. 백색왜성-백색왜성의 병합 전단계의 중력파를 관측하면 병합으로 인한 강력한 폭발을 예측할 수 있게 된다. 이를 통해서 작은 질량의 별들로 이루어진 쌍성계 진화에 대한 매우 중요한 정보를 얻을 수 있다.

3. Einstein Telescope(ET)

우주로 발사를 계획하는 검출기 외에 약 1 km 깊이의 지하

REFERENCES

- [6] S. Kawamura *et al.*, Class. Quantum Grav. **28**, 094011 (2011).
- [7] R. A. R. Ade *et al.*, PRL 23 Feb 2015 (Accepted), arxiv 1502.00612.

Fig. 3. Artistic impression of Einstein Telescope. It is planned to be constructed under ground. Cryogenic technology will also be employed to reduce thermal noise as in KAGRA.

에 길이 10 km에 달하는 거대한 중력과 검출기를 건설하는 계획에 대하여 설계연구가 진행되고 있다(그림 3). 아인슈타인 중력과 망원경(Einstein gravitational-wave Telescope, ET)⁴⁾이라는 이름의 이 계획은 유럽연합의 5개국 8개 기관이 공동으로 설계 연구를 진행하고 있다. Fabry-Perot cavity를 적용한 마이켈슨 레이저 간섭계를 이용하기 때문에 중심 주파수 대역은 aLIGO 등과 유사한 $\sim 10 - 1000$ Hz이다. 마치 전자기파를 이용하여 일상적인 천문학 관측을 하듯이 중력파를 문자 그대로 “관측”할 수 있게 된다. 제 3세대 중력과 망원경으로 추진되고 있는 이 계획이 이루어진다면 현재 건설 중인 aLIGO, AdV, KAGRA보다 10배 더 민감도가 높아져서 기존 LIGO, Virgo 검출기보다 100배 높은 민감도를 가지게 된다.

현존하는 중력과 검출기에 비해 100배 민감해지는 ET는 중력파의 성질이 과연 아인슈타인의 상대론에서 예측되는 것과 동일한가에 대한 물음에 답을 줄 수 있는 실험을 가능하게 해준다. 질량의 사중극자를 넘어서 일반상대론이 예측하듯 두 개의 편광인지 아니면 스칼라-텐서 이론에서 예측하는 여섯 개의 편광인지를 판별할 수 있게 되고 적색이동 $z \sim 2$ 인 극히 멀리서 발생하는 감마선폭발과 같은 현상을 전자기파와 동시 관측하여 중력파가 정말 빛의 속도로 진행하는지를 판별할 수 있을 것이다.^[8] 또한 중성자별 쌍성계의 병합의 마지막 과정에서 발생하는 중력과 파형을 자세하게 관측할 수 있기 때문에 이 단계에 큰 영향을 주는 중성자별의 상태방정식과 한계질량에 대한 중요한 정보를 얻을 수 있다.

ET의 민감도를 가지면 쌍성계를 이루고 있는 수백만 개의 중성자별과 블랙홀의 스핀과 질량을 얻어 질량합수를 구하고 적색이동에 따른 분포를 구해낼 수 있다. 고밀도 천체의 적색이동에 따른 진화를 연구할 수 있는 매우 중요한 자료가 될 것이다. 또한 감마선폭발이 어디에서 발생하는 것인지를 알아 낼 수 있

다. 전자기파와 aLIGO 등의 중력과 동시 관측을 통하여 감마선폭발의 기원을 밝힐 수 있는 중요한 단서를 얻을 수 있지만 ET는 이에 대한 많은 통계적 자료를 구축할 수 있기 때문에 보다 명확하게 감마선폭발의 기원을 밝혀 줄 것으로 기대된다.

중성자별은 매우 어둡기 때문에 펄사(Pulsar) 형태의 중성자별을 제외하면 현재의 관측 전자기파 기술로는 직접 관측되어 발견된 수가 제한적이다. 중력파를 이용하면 쌍성계를 이루고 있는 중성자별을 직접 관측하고 질량과 회전속도를 구할 수 있게 된다. 항성질량 블랙홀의 경우는 더욱 그러하다. 대부분 쌍성계를 이루고 있는 동반성으로부터 유입된 물질로 강착원반이 형성되고 거기에서 X-ray와 같은 고에너지 복사가 관측되어 그 존재가 알려지게 된다. 수백만 개의 중성자별과 항성질량 블랙홀에 대한 질량과 회전속도에 대한 자료를 구축하게 되면 무거운 별들이 주계열에서 진화하여 중성자별과 블랙홀로 진화해가는 과정에 대한 풍부한 정보를 제공해줄 것이다. 초신성 폭발로 인한 중력과, 전자기파, 중성미자 동시관측이라는 Multi-messenger Astronomy 관측을 수행하면 수치상대론적인 자기유체역학 계산과 일반상대론, 핵물리, 입자물리의 지식을 함께 필요로 하는 매우 복잡한 초신성 폭발 과정에 대한 모델을 검증할 수 있고 중성자별과 블랙홀이 생성되는 과정에 대한 이해를 높일 수 있다. 이외에도 low-mass X-ray 쌍성계를 이루는 중성자별의 회전속도와 중성자별의 표면 그리고 고적색이동(high redshift) 영역에서 중력과 배경복사를 만들어내는 중력파원의 종족(population)에 대한 연구를 할 수 있는 정보를 제공해 줄 것으로 기대된다.

4. Pulsar Timing Array(PTA)

기존의 전파천문학적 방법을 통해서 중력파를 측정하려는 노력도 진행되고 있다. Pulsar Timing Array(PTA)는 여러 개의 밀리초펄사(millisecond pulsar)의 펄스 도달 시간을 정밀하게 측정하여 $10^{-9} - 10^{-4}$ Hz에 이르는 극저주파의 중력파가 이들 펄사와 지구 사이를 지나갈 때 발생하는 시공간의 요동을 검출한다.^[9] 은하와 은하의 충돌로 발생하는 중력파와 대폭발 직후의 stochastic 중력과 배경복사가 주요 관측 대상이다. 현재 십여 개의 펄사를 이용하여 $10^{-5} - 10^{-6}$ 의 정밀도를 얻는 관측이 진행되고 있다. 중력파배경복사의 검출을 위해서는 정밀도를 10^{-7} 으로 높여야 한다. 이를 위해 30개의 펄사를 지속적으로 관측하기 위한 IPTA(International Pulsar Timing

REFERENCES

- [8] M. Abernathy *et al.*, (ET Science Team) Einstein gravitational wave Telescope conceptual design study, ET-0106C-10 (2011).
- [9] S. Detweiler, *Astrophysical Journal* **234**, 1100 (1979).

4) <http://www.et-gw.eu/>.

Array) 콘소시움이 구성되었다.⁵⁾

5. Square Kilometer Array(SKA)

Square Kilometer Array(SKA) 프로젝트는 지상 최대 규모의 전파망원경 배열로 호주와 남아프리카 공화국의 1제곱킬로미터에 달하는 부지에 건설될 예정이다.⁶⁾ 약 2조 1천억 원의 예산이 소요되는 SKA는 2024년 완전 가동을 목표로 하고 있고 내년부터 Phase1 건설을 시작한다. SKA의 과학적 목표는 매우 다양하다. 그 중 일부가 PTA에 참여하여 중력과 배경복사를 관측하는 것이다.¹⁰⁾ SKA의 관측 정밀도를 활용하면 거대 질량블랙홀이 만들어내는 배경복사를 충분히 관측할 수 있고 인플레이션과 끈 우주론에서 예측하는, 우주 끈, 상전이 등을 예측하는 중력과 배경복사를 검증할 수 있다.¹⁰⁾

6. 한국의 중력과 연구와 검출기 개발

국내의 중력과 연구는 다른 나라에 비해서 다소 뒤늦게 시작했다. 2003년 10여 명의 연구진이 서울대학교 천문학과를 중심으로 한국중력과연구회를 결성하면서 한국에서의 중력과 연구활동이 태동되었다. 2005년 한국과학기술정보연구원(KISTI)을 중심으로 한국수치상대론연구회가 결성되고 2008년 발족한 한국중력과연구협력단(Korean Gravitational-Wave Group, KGWG, 단장 서울대학교 이형목⁷⁾)이 2009년 LIGO 과학협력단(LIGO Scientific Collaboration, LSC)과의 양해각서를 통해 LSC에 가입하면서 한국의 중력과 연구는 한층 도약하게 되었다. 2011년부터는 한국과학기술정보연구원(KISTI)에 중력과 검출 데이터 분석을 위한 컴퓨팅 환경구축과 활용을 시작하여 2015년 현재 420 CPU 코어와 152TB의 스토리지를 갖춘 LDG(LIGO Data Grid)를 구축하여 국내외 연구자들이 활발히 사용하고 있다.

2011년까지 한국에서의 중력과 연구는 라이고 중력과 데이터 분석과 수치상대론을 이용한 파형 계산 그리고 중력과원의 발생빈도를 계산하는 이론적 연구가 주요 내용이었다. 하지만 2011년 일본을 중심으로 하는 KAGRA 중력과검출기 국제협력단과 공식적인 양해각서를 체결하면서 데이터 분석, 이론 연구와 함께 중력과 검출기 개발로 발돋움할 수 있는 기틀을 마련하였다. 현재도 국내 연구자들이 KAGRA에 방문하여 기기 개발에 참여하고 있다.

또한 2013년부터 국내에 중력과 검출기 건설을 추진하기 위한 연구와 조사를 진행해 오고 있다. 아직 라이고와 같은 대형

5) IPTA는 EPTA (European Pulsar Timing Array), NANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves), and PPTA(Parkes Pulsar Timing Array)로 구성된 컨소시엄들의 컨소시엄이다.

6) <http://www.skatelescope.org/>.

7) <http://www.kgwg.org/>.

Fig. 4. Sensitivity curves of various gravitational wave detectors. Color-shaded regions represent the strain amplitude of gravitational waves from different sources as annotated by the same color. Figure obtained from <http://rhcole.com/apps/GWplotter/>.

중력과 검출기를 건설할 수 있는 기술력이 쌓여있지는 않다. 하지만 기존의 중력과 검출기들과는 다른 새로운 기술로 지상에서 저주파 영역 지진과 잡음을 극복할 수 있는 아이디어와 실현 가능한 기술력을 확보하여 잡음분석 등 검출기 구축에 대한 연구를 수행하고 있다. 이를 실현할 경우 우주공간으로 인공위성을 발사하는 엄청난 비용을 들이지 않고 상대적으로 경제적인 비용으로 0.1-10 Hz 주파수 대역의 중력파를 검출할 수 있다. 이 주파수 대역에서는 위에서 살펴본 바와 같이 라이고 등 레이저 간섭계를 사용한 지상 기반의 중력과 검출기로는 관측이 불가능한 중간질량블랙홀 쌍성계와 백색왜성 쌍성계 병합과정에서 발생하는 중력파를 관측할 수 있다.

위와 같은 검출기와 망원경이 건설되어서 관측을 수행하게 되면 10^{-9} Hz의 극저주파 영역에서 1000 Hz에 이르는 고주파 영역(그림 4)까지 현재로서 생각해낼 수 있는 대부분의 중력과 원에 대한 연구를 수행할 수 있을 것이다. 또한 다른 학문분야에서도 그렇지만 천문학에서 미처 생각지 못한 우연한 발견 (Serendipitous discovery)이 학문의 발전에 중요한 요소가 되어왔던 점을 상기하면 중력파가 우리에게 가져올 놀라운 선물이 무엇인지를 기대해보는 것도 좋을 것이다.

중력과 천문학이라는 용어는 아직 천문학자들조차 생소한 면이 있다. 하지만 전파와 적외선 등 천문학에서 새로운 주파수의 관측기술이 도입되어 천문학의 지식체계를 확립해온 과정을 돌이켜보면 최초 검출 이후 그 중요성에 대한 이해와 수용은 매우 적극적이었다고 생각된다. 그리고 새로운 파장의 관측을 통한 연구의 발전은 항상 관측기기의 발전을 빼놓고 설명할 수 없다. 곧 시작될 advanced LIGO와 Advanced Virgo의 관측이 매우 기대되는 시점이다.

REFERENCES

[10] M. Cramer *et al.*, New Astron. Rev. **48**, 993 (2004).