중력과 검출 100년을 기다린 시공간의 속삭임

중력과 검출 실험의 역사¹⁾

DOI: 10.3938/PhiT.25.008

오정근·강궁원

History of Gravitational Wave Detection Experiments

John J. OH and Gungwon KANG

In this article, we introduce a brief history of gravitational wave detection experiments which goes from Joseph Weber's bar detector to the ground-based laser interferometer LIGO. In particular, we focus on how the LIGO project has been developed and why the LIGO could become the most promising candidate for detecting gravitational waves among many other types of detectors. Furthermore, various models of next generation detectors are presented. Finally, we briefly summarize how the Korean Gravitational Wave Group (KGWG) has been developed.

들어가며

2016년은 물리학의 역사뿐만 아니라 인류 과학사에 있어서 매우 기념비적인 한 해로 기억될 듯하다. 2016년 2월 12일(한국시간)에 알버트 아인슈타인(Albert Einstein)이 100여 년 전에 예언했던 중력파(Gravitational Waves)를 비로소 검출하였기 때문이다.^[1] 알버트 아인슈타인은 일반상대성이론을 완성한 이듬해인 1916년 중력파의 존재를 예견한 논문을 『프

러시안 과학 아카데미(Königlich-Preussische Akademie der Wissenschaften)』에 발표하였다.^[2] 이 논문의 제목은 “중력의 장 방정식의 근사적분(Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation)”으로서 계량 텐서(metric tensor)의 선형변화를 통한 장 방정식으로부터 유도된 파동 방정식과 그 해의 성질을 기술한 것이었고, 아인슈타인은 파동방정식의 해와 함께 전파되는 파동의 평면파 해를 “중력파(Gravitationswelle)”라 이름 붙였다. 2년 뒤인 1918년 아인슈타인은 “중력파에 관하여(Über Gravitationswellen)”란 논문을 발표하였는데, 여기에서 “사중극자 공식(quadrupole formula)”이 유도되었다.^[3]

중력파는 극단적으로 약한 세기를 가지고 있어서 실험적인 검출의 가능성이 매우 낮았기 때문에 초기에는 그 이론적인 발전과정도 매우 더뎠을 뿐만 아니라 심지어는 아인슈타인 자신에 의해 제기된 중력파의 존재에 대한 논쟁도 있었다. 1936년 아인슈타인은 네이션 로젠(Nathan Rosen)과 “중력파는 존재하는가?(Do Gravitational Waves Exist?)”란 제목의 논문을 『피지컬 리뷰(Physical Review)』에 제출하였고 그 결론은 자신의 1916년 결론을 뒤집는 “중력파는 존재하지 않는다”는 것이었다. 이 논문은 로젠과의 세 번째 공동작업에 의한 것이었는데 앞선 두 논문 중 하나는 그 유명한 아인슈타인-포돌스카-로젠(Einstein-Podolsky-Rosen, EPR) 역설을 담은 논문이었고, 다른 하나는 현대 웜홀(Wormhole)의 모태가 된 연구인 아인슈타인-로젠 다리(Einstein-Rosen bridge)에 대한 것이었다.

아인슈타인은 『피지컬 리뷰』로부터 심사위원의 질의와 함께

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 한국중력파연구협력단의 총무간사를 맡고 있다.(johnoh@nims.re.kr)

강궁원 박사는 연세대와 미국 메릴랜드 대학에서 수학했다. 일반상대론을 전공했으며 다년간 블랙홀 관련 이론적 연구를 해오다 2005년부터 한국 과학기술 정보연구원(KISTI)에서 수치상대론 및 중력파 분야 연구를 하고 있다. 한국중력파연구협력단의 언론홍보 대변인을 맡고 있다.(gwkang@kisti.re.kr)

REFERENCES

- [1] LIGO Scientific and Virgo Collaborations, Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016).
- [2] A. Einstein, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.) part I, **688** (1916).
- [3] A. Einstein, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.), part I, **15** (1918).

1) 이 글은 다음 새물리 논문을 바탕으로 작성되었습니다: J. J. Oh and G. Kang, New Physics: Sae Mulli, Vol. 66, 264 (2016).

이를 반영하여 재 투고할 것을 요구받았다. 이에 아인슈타인은 격분하여 논문 투고를 철회한 뒤 논문을 하나도 수정하지 않고 바로 『프랭클린연구소 저널(Journal of Franklin Institute)』에 투고하였다. 당시 로젠은 고국인 소비에트 연방으로 떠났고, 아인슈타인의 새로운 조수로 온 레오폴트 인펠트(Leopold Infeld)는 이 소식을 접하게 되었다. 인펠트는 프린스턴의 상대론 학자인 하워드 퍼시 로버트슨(Howard Percy Robertson)에게 이 사실을 이야기했는데, 로버트슨은 그 이야기를 듣고 믿을 수 없었다. 인펠트에게 전해 들었던 로버트슨은 아인슈타인의 논거에 문제가 있음을 알았고, 이 사실을 인펠트와의 대화에서 확인하여 주었다. 인펠트가 이 사실을 아인슈타인에게 전달했을 때 아인슈타인은 그 즉시 자신이 실수를 저질렀다는 것을 알았다. 곧바로 아인슈타인은 출간되기 직전에 논문을 수정하였고 그 결론 역시 “중력파는 존재한다”는 것이었다.^[4]

이후 중력파의 존재와 풀이에 대한 수학적 해법들에 관한 연구가 1940년대에서 60년대를 거치며 무르익었다. 1938년 아인슈타인-인펠트-호프만(Einstein-Infeld-Hoffmann)에 의해 도입된 “포스트-뉴턴” 근사를 통해 아인슈타인은 하나의 방정식을 유도했으며, 약한중력장에서 느리게 움직이는 물체를 기술하는 시스템을 다루는 근사방법이었다. 그들은 EIH 근사법을 통해 포스트-뉴턴 공식의 4차항까지 어떠한 복사(radiation)도 존재하지 않는다는 것을 보였다.^[5] 후에 바로 다음 차항에서 “사중극자 공식(quadrupole equation)”에 의한 중력파가 기술될 수 있음이 증명되었다.^[6] 이와 더불어 중력파를 방출하는 중력파 천체에 대한 모델과 파형에 대한 연구가 이루어지기 시작했다. 쌍성계(binary)에서 발생하는 중력파에 대한 수학적 모델 등이 제시되었으며, 이 중력파가 방출하는 에너지에 대한 연구들이 이어지기 시작했다.

웨버와 중력파 스캔들

중력파를 실험적으로 검출하고자 처음 시도한 이는 미국의 물리학자인 조지프 웨버(Joseph Weber)였다. 1957년 연구원가를 위해 캘리포니아 공과대학을 방문했을 때 저명한 상대론 학자인 존 아치볼드 휠러(John Archibald Wheeler)와 교류하면서 중력파 검출 실험과 관련한 논문을 발표하였다.^[7] 그는 휠러와의 공동연구를 통해 처음 아인슈타인과 로젠이 제기했던 원통대칭형(cylindrical symmetry)을 가지는 중력파의 모델과 이론적 성질에 대해 고찰했다. 더 나아가 웨버는 구체적으로 중력파를 측정할 수 있는 실험 방법론을 제기했는데, 이 방법은 물체의 결정구조에서의 변형이 중력장의 2차미분항에 의해 생겨날 수 있으며 이를 압전효과(piezoelectric effect)를 이용하여 검출할 수 있음을 이용한 것이었다.^[8] 메릴랜드로 돌아온

Fig. 1. Einstein's 1916 paper on the 1st Gravitational-wave prediction (left) and Albert Einstein in 1920 (right).

웨버는 직접 상온 공명 바 검출기(room temperature resonant bar detector)를 제작하였다. 그가 제작한 것은 1660 Hz의 공명주파수에서 약 10^{-16} 의 감도를 가진 원통모양의 알루미늄 바 검출기였다. 그는 약 2년간 이를 가동하여 10개의 신호 후보들을 얻었고, 이 결과를 『피지컬 리뷰 레터』에 제출했다.^[9] 그러나 이 10개의 후보들에 대해서 웨버는 “이 신호들이 중력파에 의한 것임을 완전히 배제할 순 없다”는 식으로 조심스럽게 결론을 내렸다. 웨버는 오히려 검출기 보정(detector calibration)의 문제로 인한 신호가 아닐까 하는 추측을 하였는데, 그 이유로 이 관측 당시에 우리하에서 중력파를 발생했을 것으로 추정되는 폭발과 같은 현상이 관측된 사실이 없었기 때문이었다.

그 이듬해 웨버는 서로 약 2 km 떨어진 지역에서 가동했던 두 대의 바 검출기에서 얻어진 신호들 중에서 시간적으로 일치하는 신호의 후보들(coincident events)을 분석한 논문을 제출하였는데,^[10] 약 3개월간의 가동 동안에 0.2초 이내에 시간적으로 일치하는 신호 후보들 4개를 얻었다. 그리고 웨버는 각 신호에 대해 우연히 일치성을 보여줄 확률과 빈도를 제시했다. 이들 중 한 신호는 8천 년에 한 번 꼴이라는 수치가 제시된 후보도 있었다. 웨버는 조금 조심스럽게 이들 각 후보들이 중력파에 의한 것일 수도 있다는 주장을 하였다. 웨버는 1969년까지 총 4대의 상온 공명 바 검출기를 보유하고 있었고, 1969년 논문에서는 5번에 걸쳐 3중으로 일치하는 이벤트(triple coincident

REFERENCES

- [4] A. Einstein and N. Rosen, J. Franklin Institute 223, 43 (1937).
- [5] A. Einstein, L. Infeld and B. Hoffmann, Annal. Math. 39, 65 (1938).
- [6] N. Hu, Proceed. the Royal Irish Academy 51A, 87 (1947).
- [7] J. Weber and J. A. Wheeler, Rev. Mod. Phys. 29, 509 (1957).
- [8] J. Weber, Phys. Rev. 117, 306 (1960).
- [9] J. Weber, Phys. Rev. Lett. 18, 498 (1967).
- [10] J. Weber, Phys. Rev. Lett. 20, 1307 (1968).

event)를 얻었고, 또한 3회에 걸쳐 4중으로 일치하는 이벤트(quadruple coincident event)를 얻었다는 결과를 발표하였다.^[11] 웨버는 이들 신호들이 잡음으로부터 우연히 얻어질 비율(period per accidental coincidence)도 제시했는데 그 중 하나의 신호에서는 약 7천만 년에 한 번이라는 수치가 제시되었다. 이로써 웨버는 더욱 강력하게 자신이 중력파를 찾았다고 믿었고 이 발표 이후 전 세계에서는 10곳이 넘는 곳에서 중력파 검출 실험그룹이 만들어졌다. 모두들 웨버가 했던 방식으로 상온 바 검출기를 제작해서 검증하기에 여념이 없었다. 그러나 수 년간에 걸친 재현 실험들은 모두 소득이 없이 끝나면서 서서히 웨버의 결과에 대한 의문이 제기되기 시작했다. 그 의문의 원인 중 하나는 웨버 자신이 주장한 중력파가 어떤 천문현상으로부터 나온 것인지를 확정하지 못했다는 것이었다. 웨버는 막연히 우리 은하 중심에서 오는 것으로 추정하고 있었는데, 사실 이는 웨버가 1930년대 칼 잔스키(Karl Jansky)의 “우주에서 오는 전파의 발견”에 영향을 받았기 때문이라고 사람들은 생각했다. 어쨌든 중력파의 신호를 발견했다는 발표 이후 모든 실험과학자들은 웨버의 주장대로 재현하기 위해 각자 독자적인 바 검출기를 제작하여 실험했고, 특별한 소득을 얻지는 못했다.

한편 이론가들은 웨버가 발견한 중력파 신호의 원인이 무엇인지를 탐구하기 시작했다. 스티븐 호킹(Stephen W. Hawking)과 개리 기번스(Garry W. Gibbons)는 웨버의 주장을 근거로 바 검출기의 민감도를 고려하여 중력파원이 가질 수 있는 모델들에 대해 연구했다.^[12] 특히 호킹과 기번스는 웨버의 주장대로 중력파가 우리 은하에서 온 것을 가정하여 중력파를 방출하며 잃는 에너지를 계산했는데, 그들의 계산에 의하면 그 에너지는 너무 커서 우리 은하가 현재까지 유지될 수 없다는 결론에 도달했다. 이후 실험가들과 이론가들 모두가 웨버의 결과를 의심하기 시작했고, 집중적인 반론이 제기되었다. 웨버가 사용했던 소프트웨어에서 찾아낸 버그와 더불어 검출기 보정에 문제가 있었음이 의심되는 조사결과 등이 보고되었고, 리처드 가윈(Richard Garwin)은 1974년 논문에서 수없이 복잡한 잡음들 더미들 속에서 적절한 조합으로부터 중력파의 신호처럼 보이는 신호를 만들어 낼 수 있음을 보였다.^[13]

이후 웨버의 상온바 공명 검출기의 결과는 학계에서 사라졌고 신뢰를 잃었다. 그러나 과학자들은 웨버의 실험을 통해서 중력파가 검출될 수 있는 기술을 개발하고 발전시킴으로써 마침내 중력파를 검출할 수 있을 것이라는 믿음을 가지게 되었다. 웨버의 검출기를 더욱 향상시키기 위해서 사람들은 극저온(cryogenics) 기술을 이용해서 바 검출기의 민감도를 향상시켰고, 이는 “제 2세대 바 검출기 시대”를 열었다. 미국 루이지애나 그룹의 “알레그로(ALLEGRO)”, 이태리 프레스카티 그룹의

Fig. 2. Weber's resonance bar detectors in Maryland University (top: photo by Y. S. Kim) and a bar detector exhibited in the “Einstein Exhibition” at Seoul Science Museum 2005. (bottom: photo by H. J. Paik)

“노틸러스(NAUTILLUS)”, 역시 이태리 레그나로 그룹의 “오리가(AURIGA)”, 그리고 유럽입자물리연구소(CERN)에 설치되어 있고 로마대학에 의해 운영되었던 “익스플로러(EXPLORER)”, 서부호주대학의 “니오베(NIOBE)”가 그것이었었는데 이들은 1993년 “국제 중력이벤트 협력단(International Gravitational Event Collaboration, IGEC)”을 결성하여 네트워크 체제를 이루었다. 안타깝게도 1987년 초신성 1987A(SN 1987A)가 폭발했을 때 이 극저온 바 검출기(cryogenic bar detector)들은 모두 수리, 정비 중이어서 중력파를 검출할 기회를 갖지 못하였다.

새로운 기술의 총아: 레이저 간섭계

극저온 바 검출기는 약 700-920 Hz의 공명 주파수 대역에서 10^{-19} 의 감도를 가지고 있었다. 따라서 중력파와 공명을 일으킬 수 있는 주파수 영역이 매우 좁다는 한계를 가지고 있었

REFERENCES

- [11] J. Weber, Phys. Rev. Lett. 22, 1320 (1969).
- [12] G. W. Gibbons and S. W. Hawking, Phys. Rev. D 4, 2191 (1971).
- [13] J. L. Levine and R. L. Garwin, Phys. Rev. Lett. 33, 794 (1974).

고, 이는 바 검출기의 시대가 저물고 있다는 반증이었다. 과학자들은 이 치명적인 단점을 극복하고자 하는 아이디어들을 제안했다. 그중 하나는 구면형 검출기(spherical detector)였는데, 이 구형 모델이 중력과 검출에 매우 자연스러운 모습이라고 하여 제안되었다.^[14] 바 검출기가 1개의 중력과 사중편광모드에 반응하는 반면에 구면형 검출기는 5개의 사중편광모드에 반응하는 효과를 가지고 있었고, 중력파가 도달하는 방향과 편광의 다른 조합들에도 매우 민감하다는 것이 알려져 있었다. 이런 여러 가지 장점으로 미국 루이지애나 그룹에서는 “티가(Truncated Icosahedral Gravitational-wave Antenna, TIGA)”라 불린 구면형 검출기가 제안되었다.^[15] 티가는 20개의 육각형과 12개의 오각형으로 이루어진 32개의 평평한 조각이 구성하는 구면체였고, 약 1 kHz의 공명주파수에서 10^{-23} 의 감도를 보여주는 장치였다. 하지만 티가의 구체적인 추진과 건설은 미국이 아니고(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO)를 본격적으로 추진함으로 인해 성사되지 못했다. 이와 별도로 네덜란드에서는 “그레일(Gravitational Radiation Antenna In Leiden, GRAIL)”이라 불리는 구면형 검출기의 프로젝트가 추진되었다. 약 770 Hz의 공명주파수에서 3×10^{-22} 의 검출 감도를 목표로 하고 있었으나, 연구비 지원의 중단으로 역시 성사되지 못하고, “미니 그레일(mini-GRAIL)”이라는 이름의 저예산 프로젝트가 시작되어 오늘에 이르고 있다. 이 미니그레일은 2.9 kHz의 공명주파수를 가지고 있으며 약 230 Hz의 검출 주파수 대역에서 4×10^{-21} 의 감도를 보여준다.

하지만 장점이 많다고 알려진 이 구면형 검출기도 바 검출기와 같은 좁은 검출 주파수 밴드로 인한 약점을 여전히 가지고 있었다. 때문에 일각에서는 마치 실로폰처럼 여러 개의 구면형 검출기를 여러 공명주파수 별로 배열을 구성하여 만드는 “구면형 검출기 배열(Spherical Detector Array)”을 제안하기도 했다.

과학자들은 1960년대부터 이 태생적 한계를 극복할 수 있는 빛의 간섭을 이용한 새로운 개념의 중력과 검출기에 대해 구상하기 시작했다. 가장 먼저 시도한 이는 러시아의 과학자인 게르첸슈타인(M. Gertsenshtein)과 푸스토보이트(V. I. Pustovoit)였다.^[16] 미국에서는 이와 독립적으로 1960-70년대에 웨버와 그의 학생이었던 포워드(Robert L. Forward)에 의해 연구가 시작되었다.^[17] 그러나 본격적으로 중력파의 검출이 가능하도록 만들어진 현대적 레이저 간섭계는 MIT의 라이너 와이스(Rainer Weiss)와 칼텍의 로널드 드레버(Ronald Drever)에 의해서였다. 와이스는 레이저 간섭계가 중력과 검출을 위해 가져야 할 조건과 그 간섭계가 가지는 잡음원(noise sources)의 분석을 최초로 수행한 사람이었다. 그리고 수 미터에서 수백 미터에 이르는 다양한 프로토타입 모델의 간섭계를 구축하고 실

Fig. 3. Basic schematic view of LIGO inteferometer. (credit: J. J. Oh)

험했던 인물이었다. 로널드 드레버는 글래스고 대학에서 간섭계를 제작하여 실험하던 인물로 실제 간섭계를 중력과 검출에 사용하기 위해서 “마이컬슨의 간섭계”보다 더 적합한 “파브리-페로(Fabry-Perot)” 타입의 간섭계 모델을 처음 시도한 인물이었다. 그리고 오늘날 “파운드-드레버-홀(Pound-Drever-Hall)” 기법으로 불리는 레이저 안정화 기법을 발명한 한 사람이었다. 킵 손(Kip Thorne)은 이론적인 측면에서 레이저 간섭계가 중력파를 검출할 수 있는 검출 주파수 대역에 가능한 천체물리학적 파원 모델을 연구하였다. 주로 중성자별 쌍성, 블랙홀 쌍성에서 방출하는 중력파원이 가지는 이론적 배경과 이의 검출을 위해 검출기가 가져야 하는 민감도를 제시했다. 아울러 그는 중력과 검출기를 향상시킬 수 있는 새로운 기술에도 관심이 많아서, 초기부터 여러 실험물리학자들과 교류하면서 이를 구체화할 수 있는 여러 가지 가능성을 타진하는 토론회와 연구를 병행했다. 특히 그는 칼텍에 중력과 실험 연구 그룹을 구축하기 위해서 로널드 드레버를 칼텍으로 영입하기도 했다.

라이너 와이스가 주도한 MIT 그룹은 1983년 『블루북(bluebook)』이란 보고서를 미국국립과학재단(NSF, National Science Foundation)에 제출하였다.^[18] 이 보고서는 그동안의

REFERENCES

- [14] R. L. Forward, *Gen. Rel. Grav.* **2**, 149 (1971).
- [15] S. M. Merkowitz and W. W. Johnson, *Phys. Rev. D* **51**, 2546 (1995).
- [16] M. E. Gertsenshtein and V. I. Pustovoit, *Sov. Phys. - JETP* **16**, 433 (1962).
- [17] G. E. Moss, L. R. Miller and R. L. Forward, *Appl. Opt.* **10**, 2495 (1971).
- [18] P. S. Linsay, P. R. Saulson and R. Weiss, *A Study of a Long Baseline Gravitational Wave Antenna System* (MIT, Cambridge, Mass., 1983), unpublished.

레이저 간섭계형 중력과 검출기에 대한 연구와 기술적 성취, 새로운 모델로서의 대형레이저간섭계 프로젝트, 이를 위한 부지후보와 건설계획 등을 담은 라이고 프로젝트의 제안서와 같은 것이었다. 이 보고서는 향후 칼텍과 MIT가 공동 추진하는 것을 골자로 하여 채택되었고, 향후 와이스, 드레버, 킵 손이 프로젝트의 책임자가 되었다. 이렇게 라이고 프로젝트는 새로운 검출기 모델로서 의미있는 도전을 시작하게 되었다. 이 보고서를 골자로 하여 1987년에 정식 라이고 제안서가 작성되었다. 3년간의 연구개발과 공학기술의 연구를 위한 연구비를 제안하고 이 결과를 보고 1989년에 4 km 팔길이를 가진 레이저 간섭계를 본격적으로 건설한다는 내용이었다. 이때 이름도 정식으로 “라이고”라 제안되었고 로커스 보트(Rochus E. Vogt)를 영입하여 초대 책임자를 맡겼다. 1989년 정식 라이고 보고서가 작성되어 제출되었는데, 여기에는 라이고의 건설을 위한 기술적으로 자세한 사항들이 포함되어 있었고, 라이고의 건설 승인은 1991년에 이루어졌다. 부지는 루이지애나 주 리빙스턴과 워싱턴 주의 핸퍼드로서 미국 전역에 약 19곳의 제안서를 받아 최종 낙점한 두 곳이었다. 1991년 건설 승인 이후 1999년 공식 개소식이 있었고 드디어 2002년 8월 23일부터 첫 번째 과학가동이 시작되었다. 첫 단계의 목표는 설계감도(design sensitivity)에 도달하는 것이어서 주로 검출기의 보정과 유지, 보수, 설비를 통해 민감도를 향상시키는 작업이 이루어졌다. 본격적으로 설계감도에 도달한 것은 다섯 번째 과학가동이었고(2005년부터 2007년까지 약 700일간), 이후 여섯 번째 과학가동인 2010년 10월까지 과학적으로 의미있는 관측모드로 가동이 지속되었다. 특히 2007년부터는 프랑스-이탈리 합작으로 유럽에 건설된 비르고(Virgo) 검출기가 함께 가동하여 본격적인 삼중일치관측(triple coincident observation)을 시작하였다.

총 여섯 번의 과학가동을 통해 이 라이고의 관측기간 동안의 검출감도로서 관측된 우주의 범위 내에 중력파를 일으키는 천문현상은 발견하지 못했다는 결론을 내리고 라이고는 업그레이드를 위해서 5년간의 휴식에 들어갔다.

어드밴스드 라이고: 중력과 관측소 네트워크

2010년 10월 21일을 마지막으로 라이고는 업그레이드를 위한 분해, 해체작업에 들어갔다. 핸퍼드 관측소에 있었던 2 km 짜리 두 번째 간섭계도 해체되었고, 오로지 다음 세대의 새 모델은 4 km짜리 팔길이를 가지는 두 대의 간섭계 모델이었다. “어드밴스드 라이고”라 불리는 업그레이드 모델은 크게 세 가지 주요 기술 향상을 목표로 하였는데, 결국 최종적으로 초기 라이고의 모델보다 10배의 감도 향상을 가져오는 것이 목표였다. 하나는 기존의 지진진동 고립장치(seismic isolation sys-

tem)를 대폭 향상하는 것으로 기존의 용수철 시스템을 사용하던 것에서 비르고의 기술을 적용하여 3단계의 진자를 이용한 모델을 적용한 것이었다. 이로써 초기 라이고에서 30 Hz의 진동 장벽에 막혀있던 범위가 10 Hz 대역으로 낮아졌다. 두 번째는 고출력의 레이저를 사용하게 됨으로써 안정화된 양자산란 잡음 대역을 유지하는 것이었다. 초기 라이고의 8 W대에서 어드밴스드 라이고에서는 약 200 W까지의 레이저 출력이 향상되었다. 더구나 파브리-페로 공진기에서의 반복경로 역시 초기 25회에서 280회까지 연장되어 기술적으로 1120 km의 팔길이를 가지는 효과를 가져왔다. 마지막으로 거울에서 반사되는 열잡음을 감소시키기 위해서 새로운 열 보상 장치(Thermal Compensation System, TCS)가 도입되어 레이저가 발생시키는 거울의 브라운 운동(Brownian motion)을 최소화해준다. 이로써 어드밴스드 라이고의 최대 민감도는 30-200 Hz 대역에서 약 10^{-23} 에 도달한다. 어드밴스드 라이고는 2014년 10월에 부품의 제작, 조립, 업그레이드가 모두 완료되었다. 이를 위해서 주로 미국국립과학재단이 약 2억 500만 달러, 영국과 독일이 각 1,200만 달러, 그리고 호주가 200만 달러 상당의 현물 지원으로 기여했다. 이후 2012년 1월 첫 엔지니어링 가동(Engineering Run)이 시작되었고 이후 총 여덟 차례의 엔지니어링 가동을 마친 뒤 첫 관측가동(Observation Run)을 2015년 9월 18일에 시작하였다.

어드밴스드 라이고와 더불어 업그레이드를 마치고 2016년 7월부터 관측에 참여하게 될 어드밴스드 비르고(Advanced Virgo)는 세대의 네트워크 체제를 구축하는 면에서 매우 중요하다. 실제 중력파를 발생하는 천체의 천구상의 위치를 정하기 위해서는 최소한 세대의 검출기가 필요하기 때문이다. 이런 이유로 레이저 간섭계형 중력과 검출기의 네트워크 체제를 확대하여 운영하고자 하는 필요성이 제기되어 현재 라이고-인도(LIGO-India) 프로젝트가 승인되어 추진되고 있으며, 일본의 독자적인 지하 극저온 레이저 간섭계인 카그라(KAGRA)가 합류할 예정으로 있다. 이렇게 최소 세대 이상의 중력과 검출기 네트워크의 구축은 여러 가지 장점을 가지는데 하나는 여러 대의 검출기를 통해 중력파가 어느 곳에서 오든지 그 위치를 매우 정밀하고 정확하게 지정하여 줌으로써 광학 후속관측을 하는데 매우 유용한 정보를 제공하여 줄 수 있다. 또 하나는 여러 대의 중력과 검출기의 데이터를 통해 잡음 수준을 더 낮추어주고, 더욱 민감한 검출기를 운용할 수 있게 되며, 마지막으로 검출기의 장비들이 수리나 정비가 되는 기간에도 최소 세대의 검출기가 가동되어 연중 상시관측이 가능하도록 만들 수 있기 때문이다. 앞으로 2020년 이후 라이고-인도와 카그라가 중력과 관측 네트워크에 합류하게 되는 시점에서는 더욱 풍부한 중력파원에 대한 연구가 이루어질 것으로 기대된다.

Fig. 4. e-LISA Space Gravitational-Wave Antenna Project (left: ESA) and Einstein Telescope by ESA (right: Jo van den Brand(NIKHEF)).

차세대 중력과 검출기

어드밴스드 라이고와 같은 지상 기반 레이저 간섭계는 그 관측 주파수 대역이 10 - 2000 Hz 대역에서 발생하는 중력과 원을 목표로 하고 있다. 그러나 우주에는 거의 모든 파장대의 중력파들이 퍼져있다. 어드밴스드 라이고가 감지하지 못하는 저주파 대역의 중력파들을 탐지하기 위해서는 다른 형태의 중력과 검출기를 필요로 하며 이를 위해서 세계 각국은 독자적인 계획을 수립하고 있다.

이들 중 지난 2015년 12월 3일 성공적으로 발사된 리사 길잡이위성(LISA pathfinder)을 들 수 있다. 유럽우주국(European Space Agency, ESA)이 독자적으로 추진하고 있는 e-리사(evolved Laser Interferometer Space Antenna, e-LISA) 프로젝트는 우주공간에 위성 세 대를 띄우고 서로 약 백만 km 거리를 유지하는 레이저 간섭계를 구축하는 것이다. 대략 1 mHz - 0.1 Hz 대역에서 중간질량블랙홀(Intermediate Mass Black Holes, IMBHs) 쌍성이나, 극한 천체질량비 회전체(Extreme Mass Ratio Inspirals, EMRIs)와 같은 천체에서 오는 중력파의 탐사가 목표이다.

또 다른 유망한 차세대 중력과 검출방식은 펄서타이밍(pulsar timing)을 이용한 방법이다. 이는 지상이나 우주에 중력과 검출기를 별도로 건설하는 방식이 아니라 이미 우주에 존재하는 맥동하는 항성전파원인 펄서를 이용하는 것이다. 펄서는 주기적으로 전파를 발생시키며 빠르게 회전하는 중성자별(neutron star)로서 이미 이 방식은 1978년 제안된 방법이였다. 현재까지 알려진 펄서들을 이용하여 지구상에서 전파망

중력과 이론에서 발견까지 100년

1916	아인슈타인 중력파 존재 예측		
1931	칼 쟁스키 우주에서는 전파의 발견		
1969	웨이버 중력파 발견 발표	레이저 간섭계 모델 제안	게르첸슈타인-푸스토보이트 웨이버-포워드
	기번스-호칭 웨이버의 결과 반박		
1974	가윈 웨이버의 결과 반박	헬스-테일러 펄서발견	와이스 RLE보고서 작성
1983		MIT <블루북>작성 NSF에 제출	
1987	초신성 1987A	라이고 제안서 작성 및 제안	
1989		라이고 건설제안서 제출	
1991	헬스-테일러 노벨상수상	라이고프로젝트 의회 예산 승인	GEO600 승인 TAMA 300
1999		라이고 공식 개소식	Virgo 건설
2002		라이고 제1과학가동 시작	LSC-Virgo공식 협력체결
2010		라이고 제6과학가동 종료/ 해체시작	
		어드밴스드 라이고 조립완료	
2015		어드밴스드 라이고 가동개시/ GW150914발견	
2016		중력파 발견 확정 및 공식발표	라이고-인디아 내각승인 iKAGRA관측가동

Fig. 5. A brief history of Gravitational Wave Detection Experiment.

원경을 통해 펄서의 정보를 추적하여 여러 곳의 펄서에서 오는 전파의 미묘한 변화가 중력파에 의해 발생한 것인지를 파악하는 것이다. 현재 지구상에는 북미대륙의 나노그라브(NANOGrav), 유럽의 유럽펄서타이밍배열(European Pulsar Timing Array, EPTA), 그리고 호주의 파크스 펄서타이밍배열(Parkes Pulsar Timing Array, PPTA)이 관측자료를 모으고 있고, 이 세 곳은 국제펄서타이밍배열(IPTA, International Pulsar Timing Array)이라는 컨소시움을 구성하여 관측자료들을 공유하고 있다. 이들은 약 30개의 펄서들을 관측하여 수십-수백

μHz 대역의 중력과 검출을 목표로 한다. 펄서타이밍 배열이 목표로 하는 중력파원은 우주초기 인플레이션에 의한 스토캐스틱 중력파배경복사(stochastic gravitational-wave background radiation, SGWBR)에 해당한다.

일본에서는 e-리사와 지상기반 레이저 간섭계 중력과 검출기의 중간영역에 해당하는 $0.1 - 10 \text{ Hz}$ 사이에서 발생하는 중력과 검출을 목표로 하는 데시고(DECIGO)라는 프로젝트를 추진하고 있다. 이는 위성을 쏘아 올리는 우주기반 중력과 레이저 간섭계이나 아직 개념설계 단계로서 2030년 이후 구체화될 것으로 기대하고 있다.

한국의 중력파 연구

한국의 중력파 연구의 시작은 2003년 11월 21일 서울대 이형목 교수의 주관으로 개최된 한 워크숍으로 거슬러 올라간다. Gravitational Wave Working Group(GWWG)이란 이름의 연구 단체의 출범이 있었던 이날 워크숍에서 상대론 분야 연구의 원로인 한양대 이철훈 교수께서 축사를 해주셨으며 University of British Columbia의 Matt Choptuik 교수와 MIT LIGO Lab의 Morris van Putten 박사(현 세종대 교수)가 외국에서 참석해 중력파 연구의 중요성에 대해 강조해 주었다. 이날 논의에 사용했던 발표 파일이 아직 남아 있는데 다음 회의는 2004년 1월에 가질 예정이며 중력파의 발생과 천체물리학적 중력파원에 대한 강연을 예고하였다. 아마도 이 워크숍과 동시에 아시아-태평양 이론물리센터(APCTP)의 Topical Research Program의 지원 신청을 했던 것 같다. 지금 남아 있는 문건 중 하나는 2004년 3월 - 2005년 2월까지 이 프로그램의 지원을 받아 진행했던 월례 세미나 자료이다. 이 자료에는 2004년 3월 27일 한양대학교에서 개최한 첫 워크숍을 시작으로 2004년 9월까지 6차례 열렸던 워크숍 프로그램이 연사 이름과 세미나 내용까지 고스란히 들어 있다. 이 문건은 2004년 9월에 작성된 것으로 그 후 3번 더 워크숍이 진행될 것임을 예고하고 있다.

이 무렵 서울대에서 수치모의실험으로 박사학위를 받은 이상민 박사가 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 슈퍼컴퓨팅센터 활용에 수치 상대론이 중요하다는 점을 인식하여 중력파 그룹과 활발히 교류하기 시작하였다. 그의 제안에 따라 2004년 9월에 작성된 수치상대론 연구 계획서에 의하면 KISTI가 계산 자원과 인력 지원을 해 줄 것을 요청하고 있다. 또 이 무렵 KISTI에서는 중력파 그룹을 이끌고 있던 이형목 교수를 초청하여 세미나도 개최하면서 수치상대론의 중요성에 대해 공감하고 있었다. 이러한 활동을 바탕으로 KISTI의 이상민 박사는 중력파와 수치상대론 연구를 결합한 과제를 KISTI 내에서 제안

Fig. 6. Visiting UWM group (Chang-Whan Lee, Hyung-Mok Lee, Patrick Brady, John Oh and Gungwon Kang from left pictured on Feb. 2, 2009)

했고, 국내 소수 연구자들의 협의를 거쳐 고등과학원에 있던 일반상대론 전문가 강궁원 박사가 KISTI에 합류하게 된다. <제1차 수치상대론 연구회>가 2005년 6월 28일 개최되었고, 이 연구모임은 수치상대론뿐만 아니라 중력파, 중력, 우주론 등의 주제를 포함하고 매년 수치상대론과 중력파를 주제로 여름학교를 개최해 왔다. 최근 2015년 11월 13일 개최된 것이 제54차이다. 그 당시 라이고과학협력단에 가입해야만 중력파 데이터를 사용할 수 있었다.

연구를 위해 중력파 데이터 사용이 절실했던 국내연구진에게 큰 계기가 된 것은 2008년 7월 중력파 여름학교에 루이지애나 주립대학의 곤잘레스(Gabriela Gonzalez) 교수를 초청하면서 서부터이다. 곤잘레스와 라이고 가입에 필요한 여러 가지를 상의할 수 있었고, 한국의 참여에 매우 긍정적인 답변을 들을 수 있었다. 이후 국내 5개 대학 및 2개 출연연 약 20여 명의 연구진이 서울대 이형목 교수를 단장으로 <한국중력파연구협력단>을 결성했고, 이듬해 1월 말 국내 연구자 4인이 리빙스턴의 라이고와 데이터 분석 연구를 주도하는 위스콘신-밀워키 대학의 브래디(Patrick Brady) 교수 그룹을 방문한다. 그리고 약 반년의 준비 기간을 거쳐 2009년 9월 헝가리 부다페스트에서 개최된 라이고-비르고 협력회의에 가입신청 발표를 하게 된다. 국내에 중력파 검출기 시설이 없기 때문에 주로 데이터분석과 분석에 소요되는 컴퓨팅 자원, 그리고 중력파 천문학과 천체물리학적 연구에 기여한다는 발표를 했고, 다양한 질의 응답과 라이고과학협력단의 평의회 투표를 거쳐 드디어 가입승인을 받게 되었다.

라이고 가입 이후 매우 적극적이고 활발하게 학습과 연구를 수행하게 된다. 이 과정에서 오정근 박사를 통한 국가수리과학연구소(NIMS)의 지원이 중요한 역할을 했다. 오상훈, 손재주

박사가 연이어 합류했고 한양대의 김경민, 부산대의 조희석, 김영민 등 수명의 학생들이 NIMS와 한국연구재단 글로벌 리서치 네트워크 과제(연구책임자 이형목, 2011년-2013년)의 지원을 받아 수개월 해외에 체류하며 중력과 검출 데이터 분석에 대해 배웠고 연구역량을 키웠다. 또한 아시아태평양이론물리센터의 지속적인 지원으로 매년 개최한 여름학교를 활용하여 국내연구진이 부족한 분야의 전문가를 초청해 배웠고, 그 초청강사와 향후 공동연구와 연구교류 네트워크를 키워 나갔다.

한국에서의 중력과 연구가 정착할 수 있었던 또 하나의 큰 요인은 KISTI 대용량실험데이터센터(GSDC)의 컴퓨팅 환경 제공이라고 할 수 있다. 위에서 언급한 것처럼 국내연구진의 주요 연구분야 중의 하나는 중력과 데이터분석인데, 이는 대용량의 데이터를 저장할 수 있는 저장 장치, 분석 계산을 위한 계산자원, 그리고 이를 구축·운영하는 기술지원 없이는 불가능하다. GSDC는 국내연구진이 라이고 가입을 논의하는 초기기획단계부터 참여해 2010년부터 라이고 데이터 그리드(LDG)를 본격적으로 구축하기 시작했고, 현재는 840코어의 계산자원과 155테라바이트의 저장장치를 국내연구진에게 전용으로 제공하고 있다. 참고로 GSDC는 KISTI 기관기본사업과 미래창조과학부 기초연구기반구축사업의 지원을 받고 있다.

한편 2010년 11월 일본 중력과 검출 실험의 책임자인 가지타 다카아키(Kajita Takaaki) 교수로부터 카그라 실험에 한국연구진의 참여 요청이 있었고, 2011년 1월 21일 서울대에서 첫 한일 카그라 워크숍을 개최했다. 이 워크숍에 참가한 국내 실험분야의 연구자들이 카그라 기기분야에 참여하게 되었고, 그 뒤 데이터 분석분야도 협력이 진행되었다. 현재 카그라의 기기분야에는 고려대 윤태현, 서강대 조규만, 명지대 김재완 교수 등이 활발히 협력하고 있으며, 데이터 분석 파이프라인 구축에는 인제대 이형원 교수가 중심이 되어 라이고 협력에서 쌓은 경험과 연구역량을 바탕으로 활발히 협력을 진행하고 있다.

마지막으로 2013년경부터는 차세대 중력과 검출기의 독자적인 모델을 고안하기 위한 자체연구가 시작되었고, “소그로(Superconducting Omni-directional Gravitational Radiation Observatory, SOGRO)”라는 새로운 개념의 중력과 검출기를 제안하였다.^[19] 소그로는 초전도 양자간섭계(SQUID)를 이용한 중력구배측정계(gravimeter)로서 대략 0.1 - 10 Hz 대역의 e-리사와 지상기반 레이저 간섭계의 중간영역에서 방출하는 중력과 탐사를 목표로 한다. 이 영역에서는 일본의 데시고가 계획하고 있으나, 우주기반 위성 중력과 검출기보다 비용면에서도 이득이 큰 지상기반 전방향 중력과 검출기이다. 주로 이 주파수대역의 중력파를 방출하는 천체인 백색왜성 쌍성계(White Dwarf Binary, WDB)와 중간질량블랙홀쌍성(IMBH Binary)를

관측 목표로 하고 있다. 소그로에 관한 원리와 자세한 탐사목표 등은 본 시리즈 논문을 참조한다.^[20]

둘iker 보건대 한국중력과연구협력단은 매우 독특한 면을 갖고 있다. 보통의 경우라면 예산을 먼저 확보한 다음에 사람을 뽑아 연구단을 구성한다. 하지만 이 협력단은 중력과 연구가 굉장히 중요하다고 생각하는 사람들이 자발적으로 모인 연구자 집단이며, 안정된 연구비 지원 없이도 장기간 유기적이고 효율적인 협력을 이루어 성공적으로 국내 과학계에 중력파라는 새로운 분야를 개척해 낸 것이다. 하지만 이제 연구 내용이 풍부해지고 깊이가 더해가며 국제공동연구가 활발해짐에 따라 더 이상 개인과제에 의존하는 데는 한계가 있다. 특히 SOGRO 같은 한국의 독창적인 검출기 실험이 진행되어야 하는 상황에서는 안정적인 연구비 확보가 필수적이라 하겠다. 어쨌든 지금까지 쌓아온 국내연구진의 중력과 물리 연구역량은 향후 본격적으로 중력과 천문학이나 중력과 물리학이 전개될 때 훌륭한 초석과 기반이 되리라 본다.

결론 및 전망

1916년 아인슈타인에 의해 이론적으로 예견된 중력파는 100년이 지난 2016년 2월 12일 검출의 성공이 발표되었다. 그 고단하고 지루한 도전과 성패의 역사에는 수많은 과학자들의 눈물과 땀이 얼룩진 불굴의 역사라 해도 과언이 아니다. 1960년대에 최초로 선구자의 길을 걸은 웨버의 도전이 없었더라면 이 중력파의 발견은 수십 년간이나 뒤쳐졌을지 모른다. 비록 그의 도전과 결과가 학계에서 배척받고 신뢰를 잃었다 하더라도 그가 남겨준 “중력파의 실험적 발견이 가능하다”는 후대의 유산은 정당하게 평가받아 마땅한 것이었다. 실제 그가 걸었던 족적을 따라 수많은 실험과 기술의 발전이 이루어졌고, 최근 중력파 발견에 성공한 레이저 간섭계의 연구도 같은 맥락에서 이어져 온 것이었다.

중력파의 발견은 단순히 아인슈타인의 이론을 입증한 것을 넘어서 “중력파 천문학(Gravitational Wave Astronomy)”이라 불리는 이제 막 태동하는 새로운 학문의 서막을 알리는 중요한 역사적 사건이다. 인류는 이제 중력파라는 새로운 눈을 통해서 우주를 바라보고, 우주의 신비를 하나 둘씩 벗겨가게 될 것이며, 중력을 이해하는 첫 발을 떼게 된 것이라 할 수 있다.

REFERENCES

- [19] H. J. Paik, C. E. Griggs, M. V. Moody, K. Venkateswara, H. M. Lee, A. B. Nielsen, E. Majorana and J. Harms, *Class. Quantum Grav.* **33**, 075003 (2016).
- [20] H. J. Paik, H. M. Lee, K. Cho and J. Kim, *New Phys.: Sae. Muli.* **66**, 272 (2016).