중력과 천문학의 현 주소

DOI: 10.3938/PhiT.23.025

이 형 목

Current Status of Gravitational Wave Astronomy

Hyung Mok LEE

Gravitational waves were predicted by Albert Einstein almost 100 years ago, but have not been detected directly until now. A recent report by the BICEP2 team on evidence for primordial gravitational waves that may have arisen during the inflationary phase has highlighted the importance of gravitational waves in an astrophysical context. Currently experimental facilities such as LIGO (US) and Virgo (Europe) are undergoing major upgrade for sufficient sensitivity to observe gravitational waves directly, and KAGRA (Japan) is under construction. The most likely event to be observed first is the merger of a binary composed of neutron stars and/or black holes by using advanced configurations of the above detectors that will become available in a few years. In this article, we describe the current status of gravitational-wave research and the outlook for gravitational-wave astronomy which utilizes gravitational waves as one of the messengers that carry information from astrophysical objects to us.

우주의 탄생과 중력파

지난 3월 하순 미국 하버드 대학 연구진은 마이크로파 영역의 편광 관측 기기인 BICEP2가 우주 배경복사의 편광 패턴을 관측하여 원시 중력파의 증거를 찾아냈다는 놀라운 결과를 발표하였다. 이 소식은 우주론을 연구하는 전 세계 학자들을 흥분시켰고, 가설로만 존재하던 우주 초기의 급팽창이 실제로 일어났음을 의미하는 중요한 증거로 받아들여졌다. 급팽창 이론

저자약력

이형목 교수는 서울대학교 천문학과 학사(1979)와 미국 프린스턴 대학교 천체물리학 박사 학위를 취득하였다(1986). 이후 Canadian Institute of Theoretical Astrophysics, Univ. of Toronto, Research Associate (1986-1989), 부산대학교 교수(1989-1998)를 거쳐, 1998년부터 현재 서울대학교 물리·천문학부 교수로 재직 중이며, 한국중력파 연구단 단장을 맡고 있다. (hmlee@snu.ac.kr)

에 의하면 급팽창 시기에 존재했던 양자 요동이 팽창하는 과정에서 중력파가 발생하였고 중력파에 의한 요동의 공간 분포는 우주배경 복사의 편광 패턴 가운데 나선팔 모양의 구조를 가지는 소위 B-모드를 야기시킨다는 것이 이미 1990년대 중반부터 예측되어 왔었는데 이번에 이를 직접 관측했다는 것이다. 이 발표에 대한 반응은 매우 뜨거웠다. 노벨상을 누가 받을 것인가에 대한 추측도 쏟아져 나왔고, 원시 중력파가 없을 것이라는 이론을 제창했던 사람들은 실망하였다.

그러나 BICEP2 결과의 발표에 대해서 비판을 제기하는 사람들도 많다. 대개 과학적인 발견에 대한 발표는 관련 논문이 엄정한 심사를 거쳐 학술지에 게재 확정되거나 게재된 이후에 이루어지는 것이 보통인데 이번에는 미치 논문이 제출되기도 전에 발표되었던 것이다. BICEP2 연구진의 능력이라든지 의도를 의심하는 것은 아니지만 본 논문이 채 발표되기도 전에 그 결과의 해석을 달리하는 논문이 이미 프리프린트 형태로 여러 편 나와 있는 상황이다. BICEP2 결과를 확인할 수 있는 몇 개의 관측이 현재 진행 중이기 때문에 조금 기다리면 우주 초기 중력파에 대한 보다 정확한 정보를 얻게 될 것으로 기대한다.

펄사 쌍성에서의 중력파 발생

아인슈타인은 일반상대론을 발표한 다음 해인 1916년에는 중력파를 예측하였다. 그러나 아직도 중력파의 직접적인 검출은 이루어지지 않고 있다. 위에서 말한 BICEP2 역시 중력파를 직접 검출한 것이 아니고 중력파에 의해 만들어지는 시공간의 왜곡에 의해 나타나는 우주배경복사의 편광과 그 패턴을 측정한 것이다.

중력파는 종종 전자기파와 비교된다. 맥스웰의 이론에 의하면 전하가 진동하면 전자기파가 발생되고 빛의 속도로 전달된다. 전자기파는 파장(또는 진동수)에 따라 다양한 이름으로 불려 가장 짧은 파장을 가진 것부터 나열하면 감마선, X-선, 자외선, 가시광선, 적외선 그리고 전파 등의 순서가 된다. 전자기파의 정체가 밝혀지면서 곧바로 인공적으로 특정한 파장의 전자기파를 만들어 낼 수 있고 비교적 쉽게 검출도 할 수 있게 되었다. 이런 인공적인 전자기파는 이제 통신에 광범위하게 사용되고 있음을 우리는 잘 알고 있다.

중력파는 중력장이 흔들릴 때 발생하여 전파와 마찬가지로 빛의 속도로 진행한다. 그러나 중력파를 검출하는 것은 매우 어렵다. 우선 중력이라는 힘은 다른 힘에 비해 워낙 미약하기 때문에 적은 양의 물질에 의해 만들어지는 중력파의 진폭이 너무 작아 측정이 거의 불가능하다. 결국 상당한 양의 중력파를 내려면 막대한 중력장이 필요한데 이런 중력장은 질량이 큰 물체가 아주 작은 크기로 있어야만 가능해진다. 또 단순히 중력장이 크다고 해서 중력파를 내는 것은 아니고 빠른 속도로 변화해야 한다. 이런 조건을 만족하는 대표적인 천체로는 블랙홀이나 중성자별이 이루어진 근접쌍성을 들 수 있다.

실제로 중력파의 존재를 처음으로 간접적으로 확인한 것은 펄사 쌍성계의 정밀한 관측을 통해서이다. 펄사는 강력한 자기장을 가진 중성자 별이 빠른 속도로 자전할 때 나오는 빛이 주기적으로 관측되기 때문에 붙여진 이름이다. 헐스와 테일러에 의해 1975년에 발견된 PSR1913+16이라는 펄사의 펄스 주기가 규칙적으로 변하는 것이 관측되었다. 이는 이 펄사가 쌍성계에 속해 있음을 의미하는 것이다. 더구나 이 펄사는 1초에 17번이나 회전하는 밀리초 펄사로서 그 주기의 정확도는 매우 높다. 이런 특성을 이용해 쌍성계에 속해 있는 또 다른 별의 질량을 정확히 측정할 수 있었고 두 개의 별이 모두 1.4 배 정도의 태양 질량임을 알게 되었다. 이 질량은 찬드라세카가 예측한 백색왜성의 상한 질량에 해당하는 것으로 두 별 모두 중성자별이라고 추정하고 있다. 이 쌍성계의 궤도 주기는 약 7.75시간, 그리고 이심률은 약 0.62 정도이다. 헐스와 테일러는 이러한 매우 중요한 펄사 쌍성의 발견에 대한 공로로 1993년 노벨물리학상을 수상하였다.

뉴턴의 중력 이론에 의하면 두 별을 연결하는 상대 벡터의 궤적은 두 별의 질량 중심을 한 초점으로 하는 정확한 타원이 된다. 그러나 장기적으로 펄사의 주기 변화를 관측한 결과 실제로 이 쌍성계가 만드는 타원 궤도는 서서히 변화하고 있음이 밝혀졌다. 즉 궤도 주기는 해마다 약 0.0765초씩 줄어들고 있으며 이는 장반경이 해마다 약 3.5 m씩 작아짐을 의미한다. 이러한 미세한 변화는 중력파에 의한 에너지와 각운동량의 감소에 의한 것과 정확히 일치한다. 따라서 PSR1913+16은 중력파 존재의 강력한 증거가 되는 것이다. 이러한 관측이 중력파를 직접 측정한 것은 아니지만 중력파의 존재를 거의 확정적으로 말해주는 것이다. 헐스와 테일러가 발견한 쌍성 펄사는 계속 가까워져 약 3억 년 후에는 궁극적으로 충돌하면서 막대한 양의 중력파를 내게 된다. 쌍성이 서서히 가까워지면서 오랫동안 내는 중력파의 세기는 너무나 미약해 측정이 어려운 대신 충돌이 일어날 무렵의 마지막 짧은 시간(수초 정도)에 나오는 강력한 중력파가 검출 대상이 된다.

중력파 검출기

중력파는 시공간의 미세한 변화를 가져다준다. 더 구체적으로 말하면 시간과 공간의 간격이 진동하면서 변한다는 뜻이다. 그러나 실제 검출기의 크기는 중력파의 파장에 비해 훨씬 작기 때문에 중력파의 실제 효과는 두 점 사이의 거리를 늘였다 줄였다 하는 것으로 나타난다. 따라서 중력파 검출기는 중력파가 지나갈 때 나타나는 두 점 사이의 미세한 길이 변화를 측정하도록 고안되어 있다.

중력파 검출을 위한 시도는 1950년대에 미국의 물리학자인 조셉 웨버에 의해 시작되었다. 그는 지름 1 m, 길이 2 m인 알루미늄 원통형 막대를 만들고 이 막대가 가지고 있는 고유 공명 진동수인 1660 Hz의 중력파가 지나갈 때 막대의 길이가 늘어나고 줄어들면서 나타나는 압전 효과에 의한 전류를 측정함으로써 중력파를 검출하고자 하였다. 이 장비는 그 당시로서는 매우 작은 약 10^{-16} m의 길이 변화를 측정할 수 있을 정도로 정밀한 것이었지만 실제 천체로부터 오는 중력파를 검출하기에는 역부족이었다. 참고로 실제 천체로부터 만들어져 우리에게 오는 중력파의 변형 진폭, 즉 두 점 사이의 상대적인 길이 변화는 약 10^{-22} 이하가 될 것으로 예상하고 있다. 막대 검출기보다 감도를 약 100만 배 이상 높여야 한다는 결론에 이른다.

이를 위해 더 정밀한 검출이 가능한 레이저 간섭계가 제안되었다. 이 개념은 기존의 L-자 모양의 마이켈슨 간섭계의 구조를 가지면서 파장이 매우 정확하게 정의된 레이저를 이용해서 수직인 두 방향으로 동시에 보냈던 빛을 다시 반사시켜 다시 모은 다음 이들의 간섭 형태의 변화로부터 두 방향의 길이 변화를 읽어내고자 하는 것이다. 이 방법을 이용한 중력파 검출기의 건설은 1989년 미국의 NSF로부터 승인을 받아 2001년 현재의 LIGO(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)가 완공되었다. LIGO의 한 팔의 길이는 4 km이며 검출 감도를 높이기 위해 레이저를 여러 차례 반사시킨 후 빠져 나오게 하는 패브리-페로 공동을 포함하고 있다. LIGO는 미국의 워싱턴 주에 있는 헨포드와 루이지애나 주에 있는 리빙스턴에 각각 하나씩 설치되어 있으며(그림 1 참조) 이들은 직선거리로 약 3000 km 떨어져 있다.

유럽에는 이태리, 프랑스, 그리고 네덜란드가 공동으로 건설한 Virgo가 있다. Virgo는 LIGO와 여러모로 흡사하며 팔의 길이가 3 km이다. 일본에서는 현재 도야마 현에 있는 카미오카 산에 터널을 뚫어 한 팔의 길이가 3 km인 KAGRA 검출기를 건설하고 있다. 지하에 검출기를 설치하는 이유는 저주파 부분에서 중요한 지진 잡음을 줄이려는 데 있다. 또 KAGRA는 반사 거울을 냉각시켜 열적 잡음을 줄이는 특이한 구조를 가지

Fig. 1. Aerial view of one LIGO located at Hanford, Washington. It has two arms at right angle, and length of each arm is 4 km. There is another LIGO detector at Livingston, Louisiana. These two detectors are separated by about 3000 km that corresponds to about 10 milli-light-second. Source: <http://www.ligo.caltech.edu/>.

Fig. 2. Strain sensitivities of two LIGO detectors (Livingstone, and Hanford) at different times. We can see the progress of the sensitivities with time and they eventually reached the design goal (marked as brown solid line). The advanced LIGO will have 10 times better sensitivity at all frequencies.

Source: <https://www.advancedligo.mit.edu/summary.html>

고 있어 비록 팔의 길이는 LIGO보다 짧지만 전체적인 감도는 떨어지지 않는다.

LIGO와 Virgo가 검출할 수 있는 과학적인 데이터를 얻기 시작한 것은 2002년이었으며 초창기 감도는 설계치에 미치지 못했으나 점차 개선되어 2009년에는 설계값에 접근하였다(그림 2). 그러나 여전히 천체로부터 오는 중력파를 자주 관측하기는 부족하였기 때문에 2010년 10월에 LIGO의 가동을 멈추고 Advanced LIGO (aLIGO로 약칭함)로 성능 향상을 시키기 위한 작업을 시작하였다. 이 작업은 현재도 진행 중이며 2015년 하반기부터는 서서히 가동을 시작해 2년 정도 지난 후에는

현재보다 약 10배 정도 향상된 성능을 보여 줄 것으로 기대하고 있다. Virgo 역시 성능 향상을 위한 작업이 현재 진행 중이며 aLIGO보다는 약간 늦은 2016년부터 역시 10배 정도 좋아진 감도에 이를 수 있는 advanced Virgo(AdV로 약칭함)의 가동이 시작될 예정이다.

중력파 검출의 전망

aLIGO나 AdV는 모두 주로 블랙홀이나 중성자별로 이루어진 쌍성의 합병 현상을 관측하는 데 최적화되어 있다. 이런 현상은 대개 짧은 시간 동안 강력한 중력파를 발생하고 발생하는 중력파의 파형도 비교적 정확히 계산할 수 있기 때문에 검출이 상대적으로 용이할 것이라고 판단하기 때문이다. 그러나 쌍성이 합병되는 일은 자주 일어나는 것이 아니다. 지금까지 약 발견된 약 10개 정도의 펄사 쌍성을 바탕으로 우리 은하에서의 중성자별 쌍성합병 확률은 약 50,000년에 하나 정도일 것으로 추정하고 있다. 이는 매우 드문 현상이지만 수많은 은하를 동시에 관측할 수 있다면 비교적 자주 합병 장면을 목격할 수 있을 것이다. 실제로 aLIGO나 AdV의 감도가 설계치에 도달할 경우 중성자별 쌍성의 합병을 측정할 수 있는 거리는 약 10억 광년 가까이 될 것으로 예상하고 있다. 이 정도 거리 안에는 우리 은하처럼 큰 은하만 따져도 백만 개 이상 있어 매년 수십 개 정도의 합병 현상을 볼 수 있을 것으로 추정한다.

중성자별 쌍성 이외에도 블랙홀 쌍성이나 중성자별과 블랙홀로 이루어진 쌍성의 합병도 물론 관측할 수 있다. 다만 이들이 얼마나 자주 관측될 수 있을지에 대해서는 더 알기 어렵다. 우리 은하에서조차 블랙홀을 직접 관측한 예가 거의 없으며 블랙홀 두 개로 이루어진 근접 쌍성은 직접적으로 그 존재 여부를 확인한 바 없기 때문이다. 이론적으로는 존재할 수 있지만 관측적인 검증이 이루어지지 않았다는 뜻이다. 따라서 블랙홀 쌍성의 빈도에 대한 예측에는 매우 큰 불확실성이 존재할 수 밖에 없다.

쌍성의 합병 무렵 나오는 중력파의 파형, 즉 시간에 따른 중력파의 모양은 주로 그 쌍성을 구성하는 천체의 질량에 의해 크게 좌우된다. 또한 우리는 천체의 종류에 따라 질량 범위가 달라진다는 사실도 알고 있다. 따라서 중력파의 관측으로부터 쌍성을 구성하고 있던 별이 중성자별인지 아니면 블랙홀인지를 구별할 수 있음을 의미한다. 중력파의 관측은 결국 블랙홀이나 중성자별이 얼마나 잘 만들어지고 어떻게 쌍성으로 존재할 수 있는지를 연구할 수 있게 해 줄 것이다.

중성자별이나 블랙홀로 이루어진 쌍성계의 합병으로부터 나오는 중력파는 수년 내에 발견될 것이고 이를 통해 블랙홀의 존재 여부, 항성 진화의 결과물 등에 대한 규명이 이루어질 것

이다. 그러나 현존하는 중력과 검출기는 여전히 가까이 있는 천체만 관측할 수 있다. 따라서 중력파의 검출이 이루어진다면 더 감도가 높은 검출기에 대한 본격적인 논의가 이루어질 것이다. 실제로 유럽의 학자들은 이미 Einstein Telescope라고 불리는 검출기 건설을 위한 기본 연구를 수행한 바 있다. 이 연구에 의하면 지하 100 m 정도에 위치해 있고 한 변의 길이가 10 km인 정삼각형 모양의 검출기를 설치할 경우 모든 진동수에서 aLIGO나 AdV에 비해 약 10배의 감도 향상이 이루어질 수 있을 것이라 한다. 그렇다면 중력파를 검출할 수 있는 거리의 한계 역시 10배 정도 멀어지므로 중성자별 쌍성의 합병도 우리가 볼 수 있는 우주의 한계에 가까운 약 100억 광년 까지도 관측이 가능하고 따라서 우주 전체에서 일어나는 대부분의 합병 현상을 검출할 수 있게 되는 것이다. 이런 엄청난 규모의 검출기가 언제 가능해질지 모르지만 aLIGO나 AdV가 성공적으로 중력파를 관측하고 새롭게 규명해야 할 문제들을 제시한다면 그 실현 시기는 의외로 빨라질 수도 있을 것이다.

은하 중심부에 존재한다고 알려져 있는 태양 질량의 약 100만 배 이상 되는 거대 질량 블랙홀은 지상에 있는 검출기가 관측할 수 있는 것보다 훨씬 낮은 진동수의 중력파를 낸다. 따라서 저주파 중력파를 검출하기 위한 노력도 활발히 진행 중이다. 유럽의 우주국(ESA)과 미국의 항공우주국(NASA)가 1990년대부터 추진하고 있는 Laser Interferometer Space Antenna (LISA) 프로젝트는 그동안 기술적인 어려움 때문에 계속 난항을 겪고 있었으나 기술검증용 LISA Pathfinder가 2015년에 발사될 예정이어서 그 결과에 따라 탄력을 받을 수 있을 것으로 예상된다.

그 밖에도 펄사 주기의 변화를 통해 중력파를 검출하려는 노력도 대형 전파천문대를 중심으로 진행되고 있다. 소위 Pulsar

Timing Array (PTA)라 불리는 이 프로젝트는 거대 질량 블랙홀 중 매우 질량이 큰 것들(태양 질량의 10억 배 이상)이 궤도 운동을 할 경우 내는 아주 낮은 진동수의 중력파를 검출할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

한국의 현황

국내에서는 아직 중력과 검출을 위한 장비를 건설하는 계획은 없는 실정이다. 실제로 국내에서 대형 검출기를 건설하는 것은 현재의 재정적, 인적 자원을 볼 때 현실적이지 않다. 다만 일련의 학자들이 중력과 연구단을 구성하여 LIGO 과학 협력단(LIGO Scientific Collaboration, LSC로 약칭함)에 정식 회원으로 가입하여 LIGO와 Virgo로부터 오는 신호를 분석하는데 동참하고 있다. 또 한국 연구진은 최근 그 영역을 확대하여 일본의 KAGRA 프로젝트에도 참여하여 실험과 자료 분석 분야에서 긴밀하게 협력하고 있다. 아직 국내 자체 프로그램은 없지만 중력과 연구는 국제적으로도 이제 걸음마 단계를 뚫은 수준에 불과하므로 창의적인 방법으로 소형화된 검출기를 건설한다면 충분한 경쟁력을 가질 수도 있으리라 본다. 최근 국내 학자들 사이에서는 새로운 기법을 이용해 LIGO나 Virgo가 취약한 진동수인 10 Hz 이하의 중력파에 민감한 검출기의 기초 연구에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다.

REFERENCES

- [1] H. M. Lee *et al.*, Publ. Kor. Ast. Soc. **26**, 71 (2011).
- [2] Hyung Mok Lee, Phys. Hightech. **20**(3), 35 (2011).
- [3] H. M. Lee, Science & Technology **540**, 50 (2014).
- [4] LIGO Website, <http://www.ligo.org>.