중력파

DOI: 10.3938/PhiT.20.012

이 형 목

Gravitational Waves

Hyung Mok LEE

Gravitational wave arising from the fluctuating gravitational field has never been directly detected so far. Recent developments of laser interferometer observatories may allow us to make the first detection within next decade. Gravitational wave will then be used as a new window to study universe.

아인슈타인의 일반 상대성 이론에 의하면 전자가 진동할 때 전자기파가 발생되는 것과 비슷하게 중력장의 요동은 빛의 속도로 전파되는 중력파를 만들어낸다. 이러한 중력파의 존재는 이론적으로는 잘 알려져 있지만 측정이 매우 어려워 아직도 직접적인 검출을 하지 못하고 있다. 다만 1974년에 Joseph Taylor와 Russell Hulse에 의해 발견된 펄사 쌍성계인 PSR B1913+16(여기서 뒤의 여섯 자리 숫자는 하늘의 좌표인 적경이 19시 13분, 적위가 +16도임을 의미한다)를 오랫동안 세밀히 관측한 결과 궤도 변화가 측정되었고 그 변화 양상은 중력파에 의한 궤도 에너지 손실량이 예측하는 것과 정확히 일치한다는 사실이 알려지면서 (그림 1) 간접적인 검출은 이루어졌다고 말할 수 있다. Taylor와 Hulse는 이 펄사 쌍성계 발견에 대한 공로로 1994년에 노벨 물리학상을 받았다. PSR B1913+16은 두 개의 중성자별로 이루어진 쌍성계이며 그 중 하나는 빠른 속도로 회전하면서 주기적인 전파를 내는 펄사이다.

중력파를 직접 검출하려는 노력은 매우 긴 역사를 가지고 있다. 전자기파가 지나갈 때 전기장과 자기장이 진동하듯이 중력파가 지나가면 시공간의 진동을 의미하는 중력장의 진동이 일어난다. 중력파를 검출하기 위해서는 이러한 시공간의

Fig. 1. Indirect evidence for the gravitational waves. The observed orbital period changes of the binary pulsar system PSR B1913+16 (filled dots) agree very well with the prediction by general relativity (solid line).^[1]

진동을 측정해야 한다. 실제로 검출기의 크기가 중력파의 진동 주기 동안 빛이 진행하는 거리보다 훨씬 작은 경우에는 두 개의 고정된 점 사이의 거리의 변화 양상이 중력파의 파형이 된다.

중력파 검출이 어려운 이유는 파동의 크기가 매우 작기 때문이다. 천체물리학적 파원에 의한 중력파는 파동의 진폭이 10^{-20} 이하일 것으로 추정하고 있다. 여기서 진폭이란 길이 L 의 상대적인 변화량, 즉 $\delta L/L$ 을 의미한다. 지름이 12800 km 정도인 지구의 크기가 약 1.28×10^{-11} cm보다 더 작게 변한다는 뜻이다. 핵자 크기보다 100배 정도 크지만 수소 원자의 크기와 비교하면 1/1000 정도로 작다.

이러한 미세한 거리의 변화를 측정하기 위해 최근에 사용

저자약력

이형목 교수는 Princeton University에서 Astrophysics로 이학박사 학위(1986)를 취득한 후 Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, Univ. of Toronto, Research Associate(1986-1989), 부산대학교 교수(1989-1998)를 거쳐 1998년부터 현재 서울대학교 물리·천문학부 교수로 재직 중이다. (hmlee@snu.ac.kr)

REFERENCES

- [1] J. M. Weisberg and J. H. Taylor, ASP Conference Series 328, 25 (2005).

Fig. 2. Structure of the gravitational wave detector based on Michelson interferometer. The relative changes of the two orthogonal optical paths can be measured. More mirrors are added to increase the effective arm lengths, and to increase the effective power of the laser. Figure taken from [2].

되는 검출기는 빛의 간섭 현상을 이용한다 (그림 2). 기본적인 구조는 마이켈슨 간섭계로서 레이저 광원을 빔 분할기를 이용해 90도의 각을 이루는 다른 두 방향으로 분리시켜 끝에 있는 거울(ETMX와 ETMY, ETM은 End Test Mass를 의미하고 X와 Y는 두 개의 수직된 방향을 의미한다)에 의해 반사된 두 빔을 합성해 간섭형태를 봐서 경로차의 존재 유무를 찾는 것이다. 실제로 현재 관측에 사용되고 있는 LIGO(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)는 각 방향 팔의 길이가 4 km인 거대한 크기를 가지고 있다. 진폭이 h 인 중력파가 통과할 때 만들어내는 길이의 변화는 $\delta L \approx \frac{1}{2}hL$ 이기 때문에 팔의 길이가 길수록 측정이 쉽다. 그러나 4 km도 충분한 크기는 되지 못한다. 더 큰 검출기를 만들면 좋겠지만 그만큼 비용이 많이 들기 때문에 한없이 늘일 수도 없는 형편이다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 Fabry-Perot Cavity를 사용한다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 팔의 중간에 거울(ITMX와 ITMY)을 더 추가해 끝에 있는 거울에서 반사되어 빔 분할기를 향해 돌아오는 빛을 다시 반사시키는 것이다. 이 빛이 두 거울 사이에서 몇 차례 반복적으로 반사되면서 간섭 현상을 일으키다가 최대 공명이 이루어질 때 빛이 빠져나가게 고안된 것이 Fabry-Perot Cavity이다. 이 기법을 이용함으로써 팔의 길이를 수십 배 늘이는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.

레이저 간섭을 이용한 중력과 검출기의 검출 한계는 몇 가지 요인에 의해 결정된다. 우선 수십 Hz보다 작은 주파수대역에서는 지진과 잡음이 검출한계의 장벽으로 작용한다. 모든

거울이나 측정장치가 지구의 지진활동에 따라 진동하기 때문이다. 여기서 지진이라고 하는 것은 실제 지진을 말하는 것이 아니고 지구 표면이 어떤 이유에서건 흔들리는 현상을 말한다. 예를 들어 먼 곳에서 자동차가 지나가더라도 약간의 흔들림이 전파되면서 미세한 지진을 만들어내는 것이다. 이러한 '지진학적 잡음'은 진동수 f 가 작아질수록 커진다. LIGO에서는 수십 Hz 이상에서는 다른 잡음이 더 중요해진다. 레이저를 반사시키는 거울이나 이들을 고정시키는 구조물을 이루는 원자가 열적 진동을 하기 때문에 측정 정밀도에 영향을 준다. 열적 진동에 의한 잡음은 $1/\sqrt{f}$ 에 비례하며 이 잡음이 가장 영향을 많이 끼치는 영역은 100 Hz 부근이다. 더 진동수가 높은 영역에서는 빛이 가지는 입자성에 의해 야기되는 쏘기 잡음(shot noise)에 의해 측정한계가 결정된다. 쏘기 잡음은 진동수에 무관한 백색 잡음이다.

측정기의 정밀도를 높이기 위해서는 모든 잡음을 줄여야 한다. 지진학적 잡음을 줄이기 위해서는 반사 거울이나 검출기 등을 지구의 진동을 최대한 감쇄시킬 수 있도록 보호한다. 여기에는 마치 자동차 운행시 노면의 불균질성에 의한 진동을 줄이기 위한 장치와 비슷한 원리가 사용된다. 중력과 검출기의 거울을 매다는 현가장치는 진동을 충분히 흡수할 수 있도록 여러 단계의 용수철로 이루어져 있다. 열적 잡음은 모든 장치의 온도를 낮춤으로써 줄일 수 있다. 쏘기 잡음은 기본적으로 양자 잡음이기 때문에 광자의 숫자를 증가시키도록 레이저 파워를 높임으로서 작게 만든다. 그러나 레이저 파워를 높이는 것이 쉽지 않을 뿐 아니라 광압이 너무 높아지면 거울을 밀어내는 효과가 커져 또 다른 잡음의 요인이 된다. 실제 LIGO에서는 현재 35 W의 출력을 가지는 레이저를 사용하고 있으나 파워 재생(Power recycling) 기법을 이용해 이보다 약 50배 정도 높은 파워에 해당하는 쏘기 잡음을 얻고 있다. 그림 2의 RM은 파워 재생을 위한 거울이다.

LIGO는 2010년 10월 20일에 통산 여섯 번째 과학가동을 성공적으로 종료하고 감도를 높이기 위한 개선 작업을 진행 중이며 2015년에 Advanced LIGO(aLIGO)라는 이름으로 다시 관측을 시작할 예정이다. 관측 감도를 높이기 위해 레이저의 파워를 현재의 35 W에서 180 W로 높여 쏘기 잡음을 줄이고 거울의 크기와 질량을 크게 만들어 열잡음을 줄이며 지진학적 잡음도 더 정교한 현가 장치를 이용하여 줄인다. 결과적으로 관측 감도가 약 10배 정도 좋아질 것으로 예상하고 있다.

REFERENCES

- [2] R. Adhikari, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (2004).

중력파원

중력파는 강한 중력장의 변화에 의해 만들어지기 때문에 중력파원은 주로 블랙홀이나 중성자별과 같이 밀도가 매우 높은 천체가 될 가능성이 높다. 이미 잘 알고 있는 중성자별 쌍성계는 중요한 중력파원이 될 수 있다. 또 초신성이 폭발하면서 중성자별이나 블랙홀을 만들 때에도 강한 중력파의 발생이 예상된다. 우리 은하를 비롯한 대부분의 은하 중심부에는 거대질량 블랙홀이 존재한다고 알려져 있다. 이러한 거대질량 블랙홀이 만들어지고 성장하는 과정에서도 중력파가 나올 것이다. 거대 질량 블랙홀 주위는 아주 많은 수의 별들로 이루어진 항성계가 둘러싸고 있으며 그중에는 블랙홀에 가까이 접근할 수 있는 궤도를 따라 움직이는 고밀도 천체도 존재할 수 있고 이들의 궤도 운동에서도 중력파를 만들어낼 수 있다. 다만 거대질량 블랙홀 주변을 운동하는 천체의 궤도 주기는 아주 길기 때문에 낮은 진동수의 중력파를 내게 될 것이다. LIGO와 같은 현존하는 중력파 검출기는 1 kHz 부근에서 가장 민감하기 때문에 주로 중성자별이나 항성 정도의 질량을 가지는 블랙홀에 의한 중력파를 측정하는데 적합하다.

중력파원 가운데 가장 쉽게 이해할 수 있는 것은 고밀도 천체 두 개로 이루어진 쌍성계이다. 이들은 질량 중심에 대한 궤도를 따라 움직이면서 중력장의 진동을 일으키고 결과적으로 중력파를 발생시킨다. 특히 쌍성의 궤도는 매우 간단하게 기술할 수 있기 때문에 중력파의 모양을 나타내는 파형을 비교적 쉽게 계산할 수 있다. 중력파는 에너지와 각운동량을 가지고 있어 쌍성의 궤도는 중력파에 의해 점점 작아지고 원궤도 모양으로 변한다. 이러한 현상이 그림 1에 보인 바와 같이 PSR B1913+16에서 실제로 관측되었던 것이다.

쌍성이 내는 중력파의 강도는 궤도 반지름이 작아질수록 더 커진다. 따라서 궤도의 변화 정도 역시 궤도 반지름이 작아질수록 더 급하게 일어나고 두 별은 궁극적으로 충돌하게 된다. 만약 중성자별 두 개가 충돌하면 두 별은 합쳐져 하나가 되며 그 질량은 중성자별 질량의 상한을 넘기 때문에 블랙홀로 변한다. 쌍성이 궤도 운동을 하는 과정을 inspiral이라 하고 합쳐지는 것을 합병(merger)이라고 한다. 쌍성계의 inspiral 단계에서 나오는 중력파의 파형은 쌍성을 이루고 있는 별들의 질량만 알면 (회전을 무시했을 경우) 비교적 쉽고 정확하게 계산할 수 있는 반면 합병 과정은 구성별의 구체적인 구조와 물질의 상태 방정식에 따라 달라지고 매우 복잡하기 때문에 수치 상대론적 계산을 통해서만 파형을 구할 수 있다. 블랙홀이 만들어지는 과정 역시 일시적으로 일어나는 것은 아니며 두 별이 완전히 블랙홀로 만들어진 직후에도 중력장의 진동이 당분간 지속되지만 곧 약해지는 감쇠 단진동

Fig. 3. Schematic figure showing evolution of black hole binary due to gravitational radiation and the shapes of the waves. The evolution is divided into three phases: inspiral, merger and ringdown. Figure credit: Kip Thorne.

의 중력파를 내며 이 과정을 ringdown이라 부른다. 블랙홀로 이루어진 쌍성계도 중성자별 쌍성계와 비슷한 과정을 거친다. 그림 3에는 블랙홀 쌍성계의 진화와 위에서 설명한 세 단계에서 기대되는 중력파형을 대략적으로 보여준다.

질량이 큰 별은 여러 단계의 진화를 거쳐 초신성 폭발로 일생을 마감한다. 밀도가 매우 높은 중심부는 더 수축해 중성자별로 변하는데 위에서 계속 떨어지던 물질이 중성자별 표면 가까이를 때리면서 막대한 에너지가 발생되고 이 에너지가 별의 바깥 부분을 밀어내는 것이 초신성 폭발이다. 별의 중심부 질량이 중성자별 질량의 상한을 넘어서면 중성자별 대신 블랙홀로 변한다.

중성자별이나 블랙홀이 만들어질 때에도 막대한 에너지를 가지는 중력파가 나올 수 있을 것이다. 다만 현재 계산 능력으로는 초신성 폭발 과정을 완벽하게 수치 적분할 수 없기 때문에 구체적인 파형은 잘 알 수 없고 아주 짧은 시간에 폭발적인 중력파가 나올 것이라는 사실만 추측할 수 있다. 특히 감마선 파열체(Gamma-Ray Burst, GRB)는 질량이 아주 큰 별 진화의 마지막 단계에서 초신성보다 더 큰 에너지를 가지고 폭발하면서 블랙홀을 생성하는 극신성(hypernova)이라고 믿어지기 때문에 감마선 파열 현상과 중력파를 동시에 측정할 수 있을 것으로 예상하고 있다. 이렇게 빛과 중력파가 동시에 관측된다면 이들 천체의 생성 기작을 보다 정확히 알 수 있을 것이다.

지금까지 설명한 종류의 중력파원은 매우 드물어 우리 은하 내에서 중성자별이나 블랙홀의 충돌, 초신성 또는 극신성이 나타날 확률은 아주 적다. 반면 이들이 내는 중력파는 비교적

물리학과 첨단기술의 세계

먼 거리에서도 측정할 수 있어 실제 기대되는 중력과 발생률은 검출기의 감도에 따라 달라진다. 특히 중력과 검출기는 파동의 진폭을 그대로 측정하는 것이기 때문에 감도가 높아지는 것과 비례해 최대 검출 거리가 커진다. 예컨대 관측 감도를 10배 높이면 10배 더 먼 천체에서 오는 중력파를 측정할 수 있고 관측 가능한 우주의 부피는 1000배로 늘어나게 된다. 반면 망원경을 이용한 빛의 관측에서는 관측 감도가 10배 높아질 때 관측 가능 거리는 $\sqrt{10}$ 배가 커지기 때문에 부피는 $\sqrt{1000} \approx 32$ 배 정도만 커진다. 현재 가장 감도가 좋은 미국의 LIGO가 관측할 수 있는 중성자별 쌍성의 최대 관측 거리는 약 20 Mpc (1 Mpc은 대략 300만 광년) 정도이고 이 거리 내에 들어 있는 은하의 수는 대략 수천 개 정도이다. 만약 은하 하나당 10000년에 하나 정도의 중성자별 쌍성 충돌이 일어난다면 몇 년에 하나 정도의 중력과 사건이 검출되어야 할 것이다. 실제 은하당 중력과 발생 빈도는 매우 불확실하지만 현재의 중력과 검출기 감도로는 수십-수천 년에 한 번 정도 중력파가 검출될 것으로 추정한다. 그러나 aLIGO의 검출 빈도는 현재보다 약 1000배 정도 크기 때문에 가동되기 시작하면 중성자별 쌍성의 충돌에 의한 중력파를 자주 검출할 수 있을 것으로 예상된다.

중력파 검출의 의의와 중력파 천문학

중력파 검출은 일반 상대론의 검증이라는 당연한 목적의

달성 이외에도 천체 관측을 위한 새로운 창문을 연다는 점에서 중요하다. 전통적으로 천문학자들은 천체로부터 오는 빛을 관측함으로써 천체의 성질을 연구해 왔다. 또 중성미자나 우주선(cosmic ray)은 빛으로 얻을 수 없는 정보를 제공해 주었다. 이제 중력파를 관측할 수 있게 되면 강한 중력장과 관련된 많은 현상을 직접적으로 이해할 수 있게 될 것이다. 특히 중력파는 약간의 관측 감도만 높여도 훨씬 많은 천체를 볼 수 있기 때문에 빠른 속도로 그 활용도가 높아질 것으로 예상하고 있다. 또 중력과 방출 현상이 빛의 방출과 같이 일어날 수 있는 경우가 많아 광학 천문학과 함께 협력함으로써 과거에 전혀 알 수 없었던 현상들을 이해하는데 활용될 것이다. 국내에서도 이러한 사실을 인식하여 한국중력파그룹(Korean Gravitational Wave Group: KGWG, <http://kgwg.nims.re.kr/>)이 결성되어 2009년에는 LIGO를 사용한 중력파 검출 및 중력 천문학 연구를 목표로 하고 있는 국제 협력단인 LIGO Scientific Collaboration(LSC)의 일원으로 가입하였다. KGWG는 현재 LSC의 쌍성계 연구 그룹에 소속되어 자료처리작업에 적극적으로 참여하고 있다. 그밖에도 중력파 현상과 관련된 기초 연구, 중력파 분석을 위한 수학적 알고리즘 연구, 중력파 방출시 나타날 수 있는 광원에 대한 후속 관측 연구 등을 수행하고 있으며 인류 최초의 중력파 검출과 중력파 천문학이라는 새로운 분야의 개척에 기여하고 있다.

이 원고를 작성하는 과정에서 도움을 많이 준 KGWG 회원 여러분께 감사 드립니다.