



‘별들의 운동’이 우주를 지배한다

4

글_ 이철훈 한양대학교 물리학과 교수 chulhoon@hanyang.ac.kr

2005년은 상대성이론 탄생 100주년이 되는 해이다. 1905년에 아인슈타인은 특수상대론뿐만 아니라 광전효과 이론, 브라운 운동 이론 등 현대물리학의 초석이 되는 중요한 이론들을 발표하였다. 이를 기념하기 위하여 IUPAP(International Union of Pure and Applied Physics)에서는 2005년을 ‘세계 물리학의 해(World Year of Physics)’로 선포하였고 전세계적으로 일반대중에게 물리학의 의미와 중요성을 일깨워 주기 위한 행사들이 마련되고 있다.

특수상대론의 내용을 한마디로 기술한다면, 서로 등속도 상대운동으로 연관되는 모든 관성계는 다 물리적으로 동등해서 올바른 물리법칙이라면 어느 관성계에서나 동일한 꼴로 나타나야 하는데 서로 다른 관성계간의 좌표변환은 고전적인 갈릴레이 변환이 아니라 로렌츠 변환이 되어야 한다는 것이다. 그 당시에 이미 확립되어 있던 물리이론들 중에서 맥스웰 방정식으로 기술되는 전자기 법칙은 이러한 상대성 원리에 부합되게 구성되어 있다. 반면에 뉴턴의 운동법칙은 그렇지 못하기 때문에 아인슈타인은 이를 수정하여 상대론적 운동법칙으로 개조하였으며 이 새 이론의 타당성은 곧 실험적으로 입증되었다.

상대성이론으로 우주중력 해석

그 당시에 확립되어 있던 또 하나의 물리이론으로서 중력 상호작용에 대한 뉴턴의 만유인력법칙이 있다. 1687년에 발행된 뉴턴의 저서 「프린키피아」(Principia Mathematica)에 수록된 이 이론은 우리 주변의 일상적인 중력현상들 뿐만 아니라 태양계 행성의 운동 등을 아주 잘 설명한다. 하지만 이 역시 상대성 원리에는 부합되지 않는다.

중력파

우주를 지배한다

한 예로, 특수상대론에 의하면 아무 것도 빛의 속도보다 빠르게 전달될 수 없는데 반하여, 뉴턴의 중력이론에서는 한 위치에서의 물질분포의 변화가 다른 위치의 중력장에 즉각적으로 영향을 미친다. 그래서 아인슈타인은 상대성원리에 부합되는 중력이론을 만들어내는 작업에 착수하게 된다. 그것은 예상 밖으로 어려운 작업이었고 10년여에 걸친 노력의 결과는 애초의 의도와는 다르게 중력현상에 대한 전혀 새로운 해석으로 나타났다.

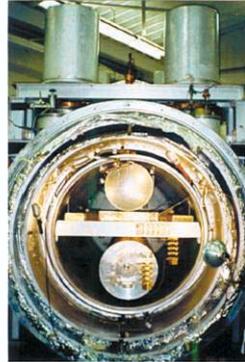
아인슈타인은 일반상대론이라고 명명한 새로운 중력이론에서 중력 작용은 시공간의 기하에 의해서 표출된다는 이론을 제시하였다. 물질의 분포와 그 운동 상태에 의해서 시공간의 기하가 결정되며, 물질의 운동은 시공간의 기하로부터 영향을 받는다는 이론이다.

시공간 메트릭(metric)이 물질의 분포와 운동 상태에 따라 어떻게 결정되는가를 지배하는 방정식이 아인슈타인 장방정식이다. 평평한 시공간 기하는 중력장이 없는 경우에 해당하는데 그러한 시공간은 Minkowski 메트릭으로 기술된다. 시공간 메트릭과 Minkowski 메트릭과의 차를 중력포텐셜이라 하면, 중력장이 아주 세지 않은 경우 즉 중력포텐셜이 충분히 작은 경우, 중력포텐셜에 대해서 선형화된 아인슈타인 장방정식은 파동해(波動解)를 수용한다. 이 파의 전파 속도는 빛의 속도와 같다. 이러한 중력파에 의해서 중력복사에너지가 전파되는데 그 에너지의 양자(量子)가 중력자(graviton)이다. 중력자는 정지질량이 영(0), 스핀 2인 보존(boson)이다.

중성자별 합쳐질 때 중력파 발생 확인

중력파의 존재는 아인슈타인의 중력이론인 일반상대론이

International Network of Bar Detectors
Now in Operation [~1000 Hz]



Louisiana State U. - Allegro



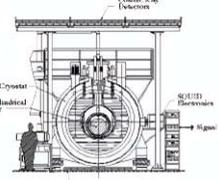
U. West Australia - Niobe



U. Padova - Auriga



CERN - Explorer



U. Rome - Nautilus

뉴턴의 중력이론과 다르게 제시하는 두드러진 결과 중의 하나이다. 따라서 중력파의 검출은 일반상대론의 타당성을 확인하는 또 하나의 중요한 요소가 될 것이다. 일반상대론의 실험, 관측적인 검증이 여러 현상, 예를 들면, 별빛이 태양 주위를 지나갈 때 휘어 오는 현상, 별빛의 적색편이 현상, 수성궤도의 세차운동 등을 통하여 성공적으로 이루어져 왔다는 점을 고려하면 중력파의 존재도 결국은 확인될 것이라는 기대를 할 수 있지만 아직 직접적인 검출은 이루어지지 않고 있다.

하지만 그 존재의 간접적인 증거는 이미 확인되었다. 1974년에 홀스(R. Hulse)와 테일러(J. Taylor)가 푸에르토리코에 있는 아레치보 전파망원경을 이용하여 중성자별 두 개가 이중성을 이루고 있는 계를 최초로 발견하였다.

그들은 이 이중성계가 그 질량중심 주위를 회전하는 궤도운동을 계속 관찰하였고 이 궤도의 크기가 약간씩 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 그 계가 에너지를 계속 잃고 있다는 것을 의미하는데, 잃는 에너지의 양이 일반상대론에서 중력파의 형태로 방출될 것으로 예상되는 양과 일치한다는 것이 확인되었다. 홀스와 테일러는 그 공로로 1993년에 노벨 물리학상을 수상하였다.

중력파장 미세. 전기력의 10³⁹분의 1

중력파에 대한 고찰에서 전자기파와 대비를 통하여 살펴보는 것이 유용할 수 있다. 1860년대에 맥스웰은 그 때까지의 전자기이론을 수학적으로 정리함과 동시에, 시간적으로 변화하는 전기장이 주변에 자기장을 형성한다는 새로운 이론을 추

가로 제시하였다. 이로써 전자기 이론은 완성되어 맥스웰 방정식으로 정리되었다.

이 방정식은 파동해를 수용하는데, 그 파의 진공 중에서의 진행속도는 빛의 속도와 같으며 전기장과 자기장은 파의 진행방향과 수직한 방향으로 진동한다.

결국 빛은 전자기파의 일종임이 밝혀졌다. 이 이론의 실험적인 검증은 1887년에 헤르츠(Hertz)가 실험실에서 전자기파를 발생시키고 또 직접 검출하는데 성공함으로써 이루어졌다.

전자기파에 의해서 전자기복사에너지가 전파되는데 그 에너지의 양자(量子)가 광양자(photon)로서 정지질량이 영이고 스핀이 1인 보손이다. 전자기파의 이론적인 근거가 제시된 지 20여년 만에 그 실험적인 검증이 이루어진데 비해서 중력파의 존재는 1916년에 일반상대론에 의해서 그 이론적인 근거가 제시된 후 80여 년이 지난 지금까지도 직접적인 검출이 이루어지지 않고 있다.

그 동안의 검출기술의 엄청난 발달까지 감안하면 이는 예상롭지 않게도 보이지만 그러나 중력상호작용의 세기가 전자기상호작용의 세기에 비해서 얼마나 미미한지를 고려하면 중력파 검출의 어려움을 이해하게 된다.

예를 들면, 전자와 양성자 간의 중력의 세기는 그들간의 전기력의 세기의 10³⁹분의 1 정도이다. 따라서 우리가 직접 검출할 수 있을 정도의 강한 중력파를 발생시킬 수 있는 원천은 지



2011년 우주 공간에 삼각형 형태로 설치될 LISA의 상상도

구상이나 태양계내에서는 기대할 수 없고 우주공간에서 발생하는 아주 강력한 중력현상일 것이라고 예상된다.

세계 물리학계, 중력파 검출 각축전

중력파를 실험실에서 직접 검출하고자 하는 시도는 1960년에 웨버(J. Weber)가 처음 제안하고 그 자신이 실험을 수행하여 1969년에 1차로 중력파를 검출하였다는 결과를 발표한 적이 있으나 이 결과는 학계에서 인정받지 못했다. 그 때 사용된

검출기의 감도는 중력파 검출을 위해서 예상되는 최저 한계감도에 훨씬 못 미친다는 것이 지금은 거의 확실해졌다.

현재 시도되고 있는 검출기에는 질량공명 안테나(resonant mass antenna)의 형태와 레이저 간섭계(laser interferometer) 형태가 있다. 질량공명 안테나 형태는 막대 검출기(bar detector)라고도 불리며 웨버가 처음 사용한 것과 같은 형태인데, 이는 원통형 알루미늄(또는 니오비움) 막대에 중력파가 지나갈 때 막대가 진동함으로써 발생하는 압력을 전기적으로 증폭해서 측정하는 방법이다. 잡음을 줄이기 위해서 막대를 포함한 실험 장치를 극저온 상태로 유지하기도 한다. 레이저 간섭계의 원리는 두 개의 레이저 빔을 서로 90도 각도로 쏘아주고 다시 반사시켜 한 곳에 모으면 간섭무늬가 생기는데, 이 장치에 중력파가 지나가면 그 때 생기는 섭동에 의해서 간섭무늬의 이동이 일어날 것이므로 이 간섭무늬 이동현상을 검출하고자 하는 것이다.

현재 운영되고 있는 막대 검출기로는 Allegro(미국, 루이지애나 대학), Niobe(호주, 웨스트 버지니아 대학), Auriga(이탈리아, 파도바 대학), Exploror(CERN), Nautica(이탈리아, 로마 대학) 등이 있다.

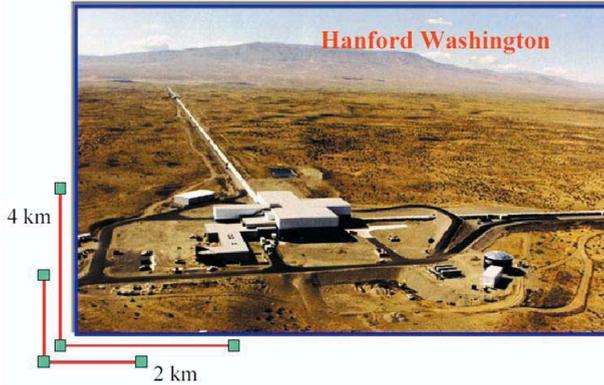
이들은 대략 1천Hz 정도의 비교적 높은 진동수의 중력파 검출에 유효하며 검출 가능한 진동수 폭이 10~20Hz 정도로 좁다는 한계를 가지고 있다.

레이저 간섭계로는 LIGO(Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, 미국 루이지애나주 리빙스턴과 워싱턴주 헨포드 두 곳에 설치, 간섭계 한 팔의 길이는 4km), VIRGO(이탈리아 피사에 프랑스와 이탈리아가 공동으로 설치, 팔의 길이 3km), TAMA(일본 도쿄, 팔의 길이 300m), GEO(독일 하노버에 독일과 영국이 공동으로 설치, 팔의 길이 600m), AIGO(호주) 등이 운영되고 있다. 이들은 막대 검출기에 비해서는 낮은 10~1천Hz의 폭넓은 진동수 영역에서 유효하다.

그밖에 레이저 간섭계를 우주 공간에 설치하는 거대 사업을

LIGO

Collaboration of ~350 scientists at ~30 institutions



미국 워싱턴주 핸포드에 설치된 레이저 간섭계 LIGO

NASA와 ESA가 공동으로 추진하고 있다. LISA(Laser Interferometer Space Antenna)라고 명명된 이 검출기는 우주 공간에 삼각형 형태로 설치될 계획인데 그 한 변의 길이는 500만km에 달한다. 설치 목표 연도는 2011년이다. 이 검출기는 $10^{-4} \sim 10^3 \text{ Hz}$ 정도의 낮은 진동수 영역에서 유효할 것이다. LIGO와 TAMA 등 지상에 설치된 레이저 검출기들은 현재 실제 데이터 수집을 진행하고 있으며 데이터 분석도 부분적으로 이루어지고 있는데, 아직은 중력파 검출의 흔적이 보고되지 않았지만 멀지 않아 긍정적인 검출결과가 나올 것이 기대되고 있다. 특히 LIGO에는 2007년에 성능을 향상시키는 작업이 계획되어 있으므로 검출성공의 가능성은 더욱 높아질 것이다.

중력파원천은 블랙홀 · 회전하는 중성자별

검출기에서 검출될 가능성이 있는 중력파의 원천에 대해서 살펴보자. 먼저, 우리 은하의 중심부에 있는 초거대 블랙홀에 백색왜성, 중성자별 또는 작은 블랙홀이 빨려 들어가는 상황을 생각할 수 있다. 이러한 현상은 연간 수 개 이상 일어날 것이며 발생하는 중력파의 진동수는 아주 낮아서 LISA를 통해서나 검출될 것으로 예상된다.

보통의 별 정도의 질량을 갖는 두 개의 블랙홀이 서로를 향하여 빨려 들어가서 합쳐지는 형상의 경우에 예상되는 중력파의 진동수는 비교적 높아서 LIGO 등의 지상 레이저 간섭계에서 검출 가능할 것이다. 그밖에 중성자별과 블랙홀 또는 중성

자별과 중성자별이 서로 합쳐지는 현상을 생각할 수 있는데 모두 LIGO 등의 지상 레이저 간섭계에서 검출 가능할 것으로 예상된다.

회전하는 중성자별 즉 펄사는 연속중력파의 원천이 될 수 있으며, 초신성 폭발을 통한 중성자별의 탄생과정에서 발생하는 중력파도 생각할 수 있는데, 이들의 경우 진동수는 비교적 높아서 LIGO 등의 지상 레이저 간섭계와 막대 검출기가 모두 가능한 검출 창구이다.

끝으로 초기우주를 생각할 수 있다. 빅뱅 직후 플랑크 시간(초) 동안에 진공요동에 의해서 또는 초기우주의 여러 상전이 동안에 중력복사가 생성될 수 있으며, 이들은 결국 물질로부터 분리되고 우주공간의 팽창에 따라 희석되어서 현재 배경중력복사의 형태로 남아 있을 수 있다. 이 경우 아주 폭 넓은 진동수 영역이 예상되므로 위에서 거론된 모든 형태의 검출기가 검출창구 역할을 할 수 있으리라고 예상된다.

현재 우리가 관측하고 있는 전자기 배경복사는 빅뱅 후 1백만 년 정도의 시점에 물질로부터 분리된 것이기 때문에 그 시점에서의 우주공간에 대한 많은 직접적인 정보를 우리에게 제공하고 있다. 배경중력복사의 검출에 성공한다면 우리는 그보다 훨씬 더 이전의 우주공간에 대한 직접적인 정보를 얻을 수 있을 것이다.

일반적으로, 지금까지 우리는 천체 및 우주에 대한 거의 모든 정보를 천체 및 우주공간으로부터 우리에게 오는 전자기파를 받아서 분석함으로써 얻어왔다. 중력파 검출에 성공한다면 그것은 일반상대론의 타당성을 다시 한 번 검증하는 의미를 가질 뿐만 아니라 우리가 우주를 바라보는 또 하나의 강력한 창구를 확보하는 것이 될 것이다. ㉔



글쓴이는 서울대학교에서 물리학과 이학박사를 받은 후 영국 링카스 터대학교, 스위스 로잔대학교 연구원을 지냈다.