# 제3차 관측가동의 전반부 중력파에 의한 일반상대론 검증
# (영어원문)

100년 전에 제안된 아인슈타인의 일반상대론은 블랙홀 병합에서 발생한 중력파를 처음 관측하기 전 까지는 이론에 대한 강한 검증은 실험실이나 태양계에서 불가능했기 때문에 이루어지지 않았다. 블랙홀 병합은 일반상대론이 허용하는 매우 강하고 동적인 중력장을 만든다. 블랙홀 병합 관측은 이론의 두 가지 예측 – 중력파의 직접 관측과 병합하는 블랙홀의 존재 – 을 증명했지만 이 중력파와 블랙홀이 아인슈타인 이론이 예측한 것과 일치하는 지 아니면 비슷하지만 다른 것인가? 파를 생성한 급격한 변화의 흔적을 전달해준 중력파 관측으로 부터 무엇을 알게 되었는가?

라이고와 비르고는 GWTC-1 목록에 기록된 모든 신호와 GW190425, GW190412, GW190814, 그리고 GW190521개별 신호에 대하여 다양한 일반상대론 검증을 시도했다. 지금 까지는 아인슈타인이 검증에 통과되었다! 그러나 이제 새로운 일시적 중력 신호 목록2(GWTC-2)에 수록된 분석해야할 많은 블랙홀 병합 신호가 존재한다. GWTC-1 신호에 행한 것과 동일한 몇 가지 검증을 그것보다 2배 이상 더 많은 신호에 대하여 실시하였고 또 새로운 방법도 시도했다.

일반상대론과 다르다는 것을 보이기 위하여 방정식과 변수에서 일반상대론과 다른 값을 가질 수 있는 항을 가정하고 이러한 가정이 관측 자료를 더 잘 설명하는 지를 본다. 이를 위하여 통계분석을 적용한 신호처리를 사용했다. 궁극적으로는 자료에 대하여 통계적인 측정을 하고 이를 일반상대론의 예측값과 비교하였다. 두 결과의 차이를 주는 요인은 다음의 세 가지를 생각할 수 있다: (1)측정 신호는 매우 잡음이 강해서 항상 중력파 신호와 기기잡음을 동시에 측정한다. (2)대부분의 경우에, 일반상대론에서 예측하는 신호를 근사해 사용하고 이 근사가 충분하지 않은 경우도 있다. (3)일반상대론이 블랙홀 쌍성계와 같이 극단적인 물체에 대해서는 완전하지 않을 수 있다. 이 것은 실제에 있어서 잡음과 근사가 사실을 가리게 되어 일반상대론과의 차이를 쉽게 결론지을 수 없다는 것을 뜻한다. 그러나 우리가 찾은 값이 일반상대론과는 부합하는지는 검증할 수 있다. 우리가 사용한 검증도 바로 그런 방법이다.

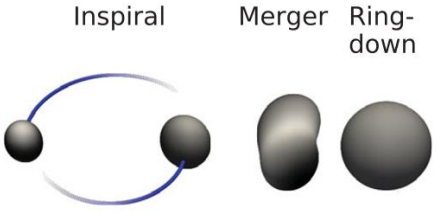


*그림 1: 블랙홀 충돌의 세 단계에 대한 도식: 나선운동, 병합, 그리고 감쇄울림을 나타낸다. GW190514 관측논문의 그림2 에서 가져옴.*

GWTC-1을 분석한 이전 논문에 기술된 바와 같이 어떤 신호는 몇 개의 검증에서 잘 맞지 않는 것으로 나타났지만 이제는 선택할 수 있는 더 많은 신호가 있다. 중력파 병합을 검출하는 가 못 하는가는 중력파의 주파수가 기기의 감도가 좋은 범위에 해당하는 가에 의해 달라진다. 무거운 블랙홀 병합은 낮은 각 주파수에서 병합하고 이는 낮은 주파수의 중력파 신호로 나타난다. 이러한 신호는 지구로 전파되는 과정에서 우주의 팽창에 의한 적색편이로 인하여 더욱 낮은 주파수가 된다. 그래서 주파수에 따라서 각 신호가 모든 검증에 적합하다고 할 수는 없다.

### 중력파 신호의 일부와 일반상대론 예측과 비교

일반상대론은 블랙홀에 대한 법칙을 정한다 – 즉, 천체물리학적 블랙홀은 질량과 자전값 만을 갖는다. 그 외의 블랙홀에 대한 어떠한 물리량도 질량과 자전값으로 나타낼 수 있다. 서로 공전하는 두 블랙홀은 각각 질량과 자전값을 갖고 있다. 이에 더하여 자전 축의 방향과 둘 사이의 거리를 정할 수 있다. 이 값들을 정하면 이 후의 운동은 자동으로 정해진다. 초기 상태는 중력파 에너지를 잃으면서 변하고 더 빨리 회전하면서 연속적으로 궤도가 줄어든다. 이 것을 나선운동이다. 그리고 시간이 지나면 두 블랙홀은 병합하여 새로운 질량과 자전값을 갖는 블랙홀이 된다. 그러나 이 블랙홀은 모양이 왜곡되어 있다. 일반 상대론에서는 이러한 왜곡된 블랙홀은 중력파를 방출하면서 질량과 자전값만 갖게 된다고 예측한다. 초기 나선 블랙홀이 최종 블랙홀에 대한 정보를 갖고 있기 때문에 이에 대한 검증을 할 수 있다. 더구나 왜곡이 사라지는 자세한 과정(감쇄울림이라고 한다)도 일반 상대론에 의해 결정된다.

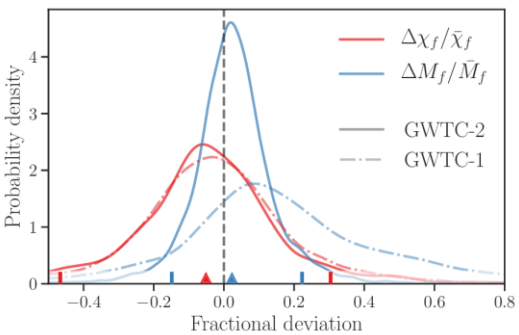


*그림 2: 최종 블랙홀의 질량 $M_f$(파란색)과 자전값 $\chi_f$(붉은색)의 병합 전 추정 값과 병합 후 추정 값의 차이. 실선은 GWTC-2 신호에 의한 비교 값이고 일점쇄선은 GWTC-1 신호에 대한 비교 값이다. 수직 점선은 일반상대론의 예측 값이다. 질량에 대해서는 크게 개선되었지만 자전값에 대해서는 그렇지 않다는 것을 알 수 있다. (논문의 그린 4.)*

만약 중력파의 나선운동과 감쇄울림부분의 세기가 비슷하다면 이 두 신호를 독립적으로 분석할 수 있고 한 신호가 다른 신호를 예측해 주는 지를 분석할 수 있다. 일반상대론에 따르면, 나선운동에 대하여 자세하게 알면 감쇄울림을 예측할 수 있다고 한다. 그 둘이 일치하는가? 비록 잡음과 근사에서 오는 한계 때문에 비교가 정확하지는 않지만, 일반상대론과 부합하는 결론을 얻었다. 결과는 그림 2에 나타내었다. 왜곡된 블랙홀은 마치 타종된 종과 같이 행동한다. 종을 울리면 종의 공명 주파수인 배음들의 조합으로 된 소리를 듣게 된다. 그러나 종의 특성에 따라 결정되는 특성시간이 지나면 배음들은 잦아지게 된다 – 소리가 감쇄한다. 비슷하게 일반상대론에도 감쇄울림이 발생하고 그에

해당하는 감쇄시간과 특성 주파수를 나타낸다. 따라서 왜곡된 블랙홀의 감쇄울림의 특성과 나선운동에서 예측된 값과 비교할 수 있다. 아직 정확도가 그리 좋지는 않지만(향후 관측을 통하여 개선될 것을 기대한다), 결과는 일반상대론 예측값과 부합한다.

## 겉보기 블랙홀은 진짜 유사 블랙홀인가?

블랙홀 병합은 어마한 양의 중력파 방출을 한다. 많은 경우에 순간적으로 나머지 우주의 방출 보다 더 크다. 만약에 이러한 거대한 방출이 일반상대론 블랙홀 처럼 보이지만 사실은 다른 것 – 유사 블랙홀 – 이라면 어떻게 되는가. 여러 개의 유사 블랙홀이 제안되었다. 유사 블랙홀은 진짜 블랙홀의 영역에 큰 질량을 갖지만 그 내용은 다르다. 유사 블랙홀은 일반상대론에서 예측하는 모든 것은 질량과 자전값으로 표현된다는 사실을 보여주지 못한다. 예를 들면, 블랙홀의 사건 지평선이 일방향이라는 잘 알려진 사실이 유사 블랙홀에서는 다를 것이다. 어떤 유사 블랙홀 모델에서는 사건 지평선을 거울과 같은 면으로 대체한다. 중력파는 일반적으로 블랙홀로 전파하다가 결국 반사되어 메아리 신호를 만들 수 있다(신호가 어떻게 나타날 지를 그림 3에 보였다). 이러한 메아리 신호는 아직 발견하지 못했다.

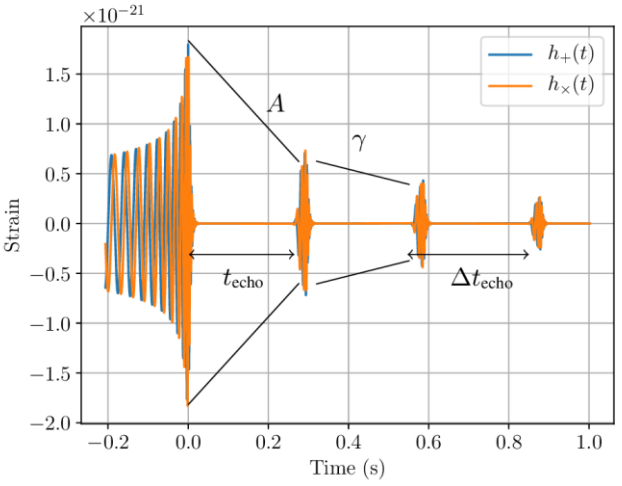


***그림 3**: 유사 블랙홀에 의한 중력파 메아리의 가능한 전파. 시간이 그림에서 우측으로 흐름에 따라 원 중력파 신호에 이어서 원 중력파의 왜곡된 복사 중력파가 유사 블랙홀의 거울 같은 면에서 반사되어 연속으로 도착하는 것을 볼 수 있다.*
*(Courtesy R.K.L. Lo.)*

그러나 다른 종류의 유사 블랙홀에서는 일반상대론이 맞지 않을 수도 있다. 이런 경우에는 사건 지평선은 있으나 블랙홀 같은 물체의 모양은 틀리다. 자전하는 물체는 타원 모양이 된다는 사실은 잘 알려져 있다. 이 사실은 지구에도 적용이 되고 작은 망원경으로도 확인 할 수 있는 목성도 그렇다. 이러한 평탄화는 일방상대론이 중요하지 않은 중력의 경우에도 가능하다. 자전하는 물체가 블랙홀인 경우에 평탄화된 모양은 정확하게 질량과 자전값으로 결정 된다. 이 사실은 유사 블랙홀의 경우에는 적용이 안될 수 있고 다른 모양을 가질 수 있다. 많은 블랙홀 병합에 대하여 이 차이를 살펴 보았다. 유의미한 차이를 발견하지 못했다.

## 중력파가 지구에 도착하려면 많은 시간이 필요하다

태양 빛에 숨겨져 있는 무지개 색은 물 방울이 빛을 분산 시켰을 때 드러낸다. 시-공간이 중력파 신호에 "색"(즉 주파수)을 나타낼 수 있는가? 일반상대론에 따르면 불가능하다. 그러나 다른 이론에서는 중력자가 질량을 가질 수 있고 때문에 중력파에 분산이 발생한다. 관측하는 중력파는 지구에 도착하기 위하여 10억년 동안 여행을 했다. 만약에 중력자가 질량을 갖는 다면 긴 시간 전파되는 동안 분산효과를 축적할 충분한 기회를 갖게 된다. 이는 아주 작은 질량의 효과도 측정할 수 있다는 것을 의미한다. 또 한 모든 신호의 정보를 종합하여 자료에 미세하게 숨어있는 중력자 질량의 효과를 강화 시킬 수 있다. 최근의 자료로부터 질량이 $1.76 \times 10^{-23}$ eV/$c^2$ 보다 크다면 검출 되었을 것이라는 결론을 얻었다. 검출을 못 했으므로 중력자의 질량은 위 값 만큼 작다는 결론을 얻는다. 이 값은 이전의 한계를 2.7배 개선한 값이다. 비교를 위하여 우리가 알고 있는 0이 아닌 가장 작은 질량은 중성미자의 질량으로 0.009 eV/$c^2$ 이다. 위 질량 한계는 중력자의 질량을 주는 중력이론에 대한 제한을 줄 수 있다.

### 용어해설

블랙홀(Black hole): 매우 밀집된 질량에 의해 만들어진 시-공간의 영역으로 빛을 포함한 어떤 것도 빠져 나가지 못할 정도의 중력이 있는 곳.

유사 블랙홀(Black hole mimicker): 시-공간의 블랙홀 같은 영역으로 병합 과정을 통하여 중력파로 검출이 가능하지만 자세한 분석으로는 일반상대론에서 요구하는 특성을 갖추지 못했다.

잡음(Noise): 중력파 검출 과정에서 나타나는 기기 또는 환경에 의한 섭동. 중력파 검출기의 감도는 잡음에 의하여 제한을 받는다.

자전(Spin): 한 물체가 얼마나 빨리 축을 중심으로 회전하고 있는 가를 측정하는 값.

감쇄울림(Ringdown): 블랙홀 병합과정의 한 단계로 병합에서 만들어진 왜곡된 블랙홀이 중력파를 방출하면서 왜곡이 사라진다.

메아리(Echo): 소리가 반사되어 다시 들리는 것과 같이 유사 블랙홀 표면에서 반사되는 중력파를 말한다.

중력자(Graviton): 광자가 빛을 이루고 있는 것과 같이 중력파를 이루고 있다고 여겨지는 입자. 일반상대론에서는 광자와 같이 중력자도 질량이 없다.

eV/$c^2$: 질량의 단위: 전자볼트 (eV)는 일반적으로 사용되는 에너지의 단위로 전자를 원자에서 떼어내는 데 필요한 에너지를 표시하는 데 사용한다. 아인슈타인의 에너지 질량 등가식, $E = m c^2$ (E는 에너지, m은 질량, c는 빛의 속력이다)에 의해서 전자볼트로 표시된 에너지(eV)를 $c^2$의 제곱으로 나누면 질량을 얻을 수 있다.

## SUMMARY

그래서 답이 무엇인가? 아인슈타인이 맞았나? 일반상대론이 올바를 중력이론인가? 기존 블랙홀 병합과 더불어 새롭게 관측된 블랙홀 병합에 대하여 기존의 방법과 새로운 방법으로 이론을 검증했다. 대부분의 경우에 다양한 신호의 결과를 조합하면 결론에 대한 확신을 강화할 수 있었다. 강조하고자 하는 것은, 잡음과 파형근사의 부정확도를 감안하면 모든 측정 결과는 일반 상대론과 부합한다는 것이다. 여러 그림에서 보여준 바와 같이 몇몇 결과는 결정을 확실하게 내릴 수는 없다. 미래에 보다 많은 블랙홀병합 관측을 통하여 보다 명확한 결론을 내릴 수 있을 것이라 기대한다.

## 더 찾아보기:

웹사이트: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu
여기서 전체 논문 읽기.
여기에서 중력파에 대한 논문 읽기.
여기에서 O1, O2, 그리고 O3관측에서 추론되는 블랙홀 병합의 종족 특성에 관한 동반 논문을 읽을 수 있다.
목록의 자료는 중력파 열린과학센터의 이곳에서 찾을 수 있다.

Visit our websites:
http://www.ligo.org
http://www.virgo-gw.eu