

GW190412: 첫 번째 비대칭-질량 블랙홀 쌍성계 관측

무엇을 보았나?

[라이고 과학 협력단](#) (LIGO Scientific Collaboration) 와 [비르고 연구단](#) (Virgo Collaboration) 은 2019년 4월 12일 (UTC 기준) 블랙홀 쌍성의 나선 궤도 접근 및 충돌 과정에서 방출된 중력파를 관측했다. GW190412로 명명된 이 중력파는 당시 가동 중인 국제 중력파 관측 네트워크 세 곳에서 모두 관측되었다: (라이고 관측소 2 곳은 미국 [워싱턴 주의 핸포드](#), [루이지애나 주의 리빙스톤](#)에 소재하며, [비르고](#) 관측소는 [이태리 카시나](#)에 있다). GW190412는 제3차 고도화 라이고 및 비르고 관측 가동(O3) 기간 초기에 관측되었다. O3은 2019년 4월 1일에 시작하여 2020년 3월 27일에 잠정 중단되었다.

두 블랙홀의 질량 자체는 이전에 관측된 블랙홀의 질량과 유사하나, GW190412는 두 블랙홀의 질량이 현저히 다르다는 것이 확인된 최초 관측이란 점에서 특별하다. 두 블랙홀간의 질량비는 3배 이상이며, 이와 같이 비대칭적 질량을 갖는 쌍성에서 방출되는 중력파 신호는 질량이 비슷한 블랙홀 쌍성의 경우와 신호 모양이 다르다. 이를 분석하면 거리, 공간 궤도면의 경사각, 둘 중 더 무거운 블랙홀의 자전 및 쌍성 궤도의 세차 정도를 더 잘 측정할 수 있다. 또한, GW190412과 같이 두 블랙홀의 질량이 서로 다른 경우, 중력파 신호를 분석하여 아인슈타인의 일반상대론이 예측한 대로 기본 주파수보다 높은 다중극자(higher multipole) 주파수의 중력파가 발생되는지 검증할 수 있다.

GW190412가 우주로부터 온 중력파 신호라는 것을 어떻게 확인하였나?

GW190412는 세 관측소에서 모두 관측된 강한 신호이다. 세 관측소는 서로 수천 킬로미터 떨어져 있으므로 거의 동시에 모든 관측소에서 신호가 관측된 것은 이것이 잡음이 아닌 천체에서 방출되었음을 뜻하는 좋은 징조이다.

GW190412에 대한 시간-주파수 분석자료를 그림 1에 나타내었다. 이러한 자료를 스펙트로그램이라고 한다. 핸포드와 리빙스톤 관측소에서 관측된 GW190412의 신호 세기가 “눈으로” 확인할 수 있을 만큼 강하지만, 연구단은 다양한 알고리즘을 관측 자료에 적용하여 중력파 신호의 검출 유의성을 구했다. 연구단이 사용한 검출 분석 방법 대부분은 일반상대론에서 예상하는 이론적인 파형과 데이터를 비교하는 정합 필터를 사용한다. 검출된 신호가 잡음에 기인할 가능성은 오탐율로 정량화된다. 4월 8-18일 동안 얻은 자료를 분석하여 오탐율이 30,000년에 1번임을 확인하였다! O3 자료가 축적될 수록 오탐율의 유의성이 개선될 것이다. 또한, 기기 및 환경 잡음도 확인하였으며 GW190412신호의 검출이나 분석에 크게 영향을 미칠 요인은 발견하지 못했다.

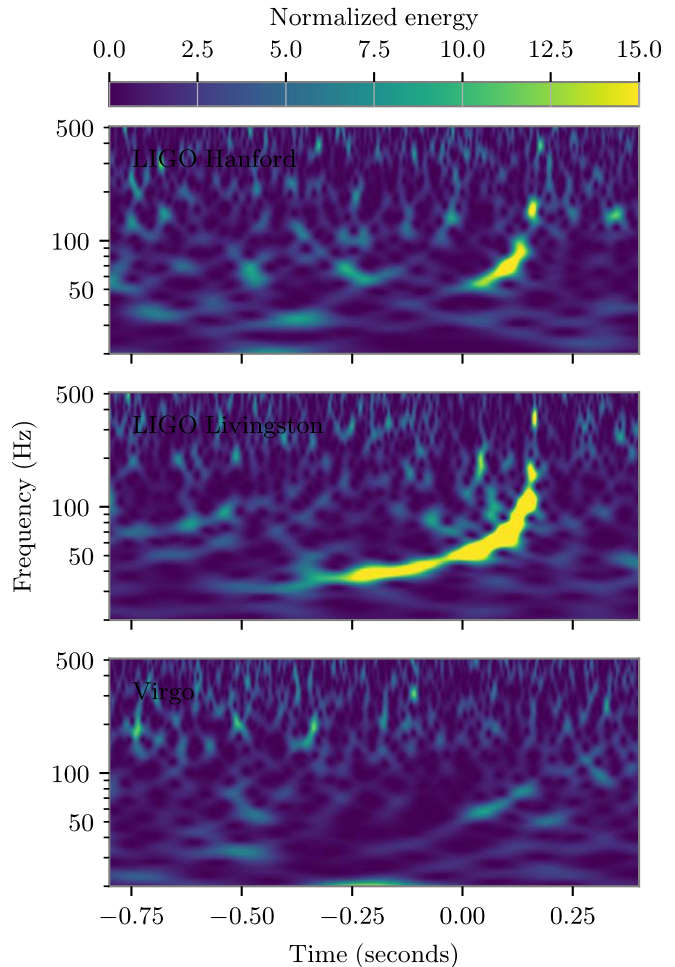


그림 1: 세 관측소에서 얻은 GW190412에 대한 시간-주파수 분석 그래프. 가로축은 시간이고 세로축은 주파수이다. 그림의 색은 주어진 시간에 주어진 주파수성분에 포함된 에너지 값을 나타낸다. 그림에서 두 블랙홀이 나선 궤도로 회전하며 서로 접근하다가 병합하는 과정에서 나타나는 시간에 따라 증가하는 중력파 에너지를 보여주는 진속한 “쳐프(chirp)” 신호를 확인할 수 있다.

관련 홈페이지:
<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>



GW190412의 특성

GW190412는 블랙홀-블랙홀 쌍성이다. 질량이 큰 블랙홀은 태양질량의 30배, 작은 것은 8배로 측정 되었으며, 이들 질량값은 이전까지의 관측 결과에서 벗어나지 않는다. 그러나 GW190412의 질량비(큰 질량에 대한 작은 질량의 비)는 그동안 관측된 쌍성계와는 매우 다르다. 이전에 관측된 10개의 블랙홀 쌍성은 두 블랙홀의 질량이 오차 내에서 거의 같지만, GW190412는 무거운 블랙홀의 질량이 가벼운 블랙홀보다 3배 이상 크다.

GW190412의 두 블랙홀 질량이 서로 다르므로 중력파 신호에 대한 질량의 영향이 비대칭적이 되며, 이는 천체에 대한 특정 물리량을 더 정확히 측정하는데 도움이 된다. 분석 결과 쌍성의 유효 자전이 양수라는 것을 알아내었는데, 이는 최소한 한 블랙홀의 스핀 방향이 쌍성의 공전 각운동량 방향과 동일하다는 뜻이다. 특히 GW190412의 두 블랙홀 질량이 비대칭적이었기 때문에, 최초로 더 무거운 블랙홀의 스핀에 대한 통계적 제약을 엄격히 정할 수 있었다. 이렇게 구한 단일 블랙홀의 스핀이 일반상대론 예측 최대치의 40%에 달한다는 것을 알아내었다. 그림2는 GW190412의 유효스핀과 질량비에 대한 확률분포이다. 확인할 수 있는 수준은 아니지만, 이 그림으로부터 공전면의 세차운동에 대한 어느 정도의 징후를 볼 수 있었다. 두 블랙홀간의 상이한 질량은 거리와 궤도 경사각 사이의 축퇴를 제거하여 이 두 값을 좀 더 정확하게 측정할 수 있게 한다. GW190412는 지구로부터 25억광년 떨어진 곳에서 발생한 신호이다!

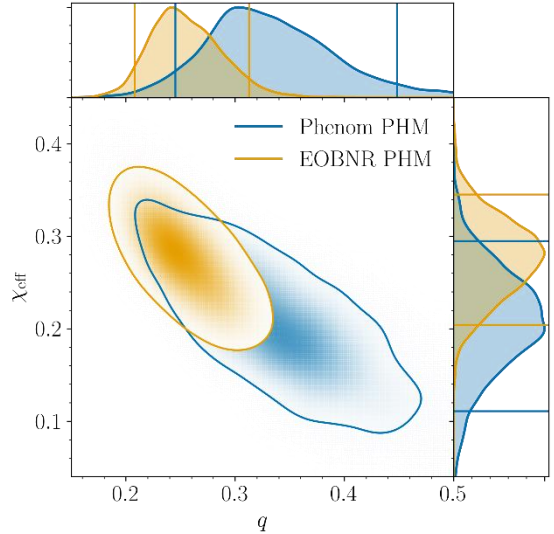


그림 2: GW190412 신호로부터 측정된 질량비 (q)와 유효스핀 (χ_{eff}). 주황색과 파란색 등고선은 각각 두 개의 다른 파형 모델을 통하여 얻어진 매개변수의 분포이고, 이 두 파형은 정확한 일반상대론 신호를 다르게 근사한 것이다.

배음이 포함된 중력파 신호 듣기

GW190412의 고유한 특성(비대칭적 질량) 덕분에 중력파의 기본 성질을 관측할 수 있다. 아인슈타인 이후에 뉴만(Newman), 펜로즈(Penrose), 쏜(Thorne) 등 많은 연구자들의 노력으로 밀집쌍성에서 방출되는 중력파 성분이 주로 **사중극자**라는 것이 알려져 있다. 사중극자 방사는 기타줄을 튕겼을 때 들리는 기본 주파수에 해당한다고 할 수 있다. 그러나, 약기와 동일하게 중력파도 기본 주파수보다 높은 주파수의 배음을 포함하고 있다. 동일질량 쌍성에서는 이러한 **배음** 또는 **고주파수 다중극자** 신호가 약해 관측이 어렵다. GW190412와 같이 비대칭 질량을 갖는 경우에는 중력파에 포함된 약한 배음 신호를 더 잘 “들을 수 있다.” 실제로 GW190412 관측 자료에 배음 신호가 1000:1 정도의 크기로 존재한다는 것을 알아냈다. 향후 배음 신호의 상대적인 세기를 측정할 수 있게 된다면, 병합하는 두 블랙홀의 특성을 더 잘 알아내는데 도움이 될 수 있을 것이다. 또한, GW190412 신호가 일반상대론과 일치하는지를 검증하기 위해 다양한 검사를 수행하였다. 관측 자료에 일반상대론과의 불일치성이 없음을 발견하였고, 따라서 GW190412 관측은 아인슈타인의 이론에 대한 근거를 더해준다.

비대칭 질량 블랙홀 쌍성계 형성

고도화 라이고와 비르고의 관측이 있을 때 마다 밀집 쌍성에 대한 새로운 지평을 열었다. 첫 번째 비대칭 질량 블랙홀 쌍성이라는 점은 GW190412는 블랙홀 쌍성계의 분포를 이해하기 위한 중요한 자료를 제공한다. 이 관측으로 부터 비대칭 질량 블랙홀 쌍성계가 상대적으로 일반적이고, 향후에 더 많은 관측이 이루어질 것으로 예측 된다.

천문학자들은 별의 진화와 관련된 물리를 바탕으로 하여 블랙홀 쌍성의 형성 과정, 질량 등을 이해하고 예측할 수 있는 모형을 만들었다. 대부분의 블랙홀 형성 모형은 두 블랙홀의 질량이 거의 비슷한 유사 질량 쌍성이 더 흔할 것으로 예측한다. 그러나, 여러 모형에서 GW190412와 같은 비대칭 질량 쌍성도 어느 정도 형성 가능하다고 예측되고 있다. 일반적으로 비대칭 질량 쌍성계는 유사 질량 쌍성에 비해 10배 이상 적게 생성될 것으로 예측된다. 그러나, 현재까지 십여개 남짓 관측된 블랙홀 쌍성 중 하나가 비대칭 질량을 갖는 GW190412일 수 있다는 점을 전혀 예측하지 못한 것은 아니다. 중력파 우주를 관측할 수 있는 기기 감도를 지속적으로 개선하고 병합 밀집 쌍성 목록이 빠르게 늘어나간다면, 별의 진화, 밀집 쌍성 형성과 기본 물리 법칙에 대한 이해를 더 증진시킬 수 있는 많은 천체를 관측할 수 있을 것이 기대 된다.

용어풀이

블랙홀: 매우 밀도가 높아 만유인력(중력)에 의해 끌어당겨져, 빛조차도 빠져나가지 못하는 물체.

밀집쌍성: 중성자별이나 블랙홀과 같은 고밀도 밀집성 2개가 공전하는 계.

유효스핀: 중력파 신호로부터 블랙홀의 스핀 정보를 가장 잘 추출하여 측정 가능한 물리량 두 블랙홀 스핀 각운동량 방향 성분에 블랙홀 질량을 가중치로 각각 곱하고 쌍성의 공전 각운동량 방향으로 투사하여 합친 값으로 정의한다.

일반상대론: 1915년에 알버트 아인슈타인이 제안한 중력에 관한 이론. 이 이론에 따르면, 공간은 물질과 에너지의 존재에 따라 휘어지고 물체는 이 휘어진 공간 위의 궤적을 따라 움직인다.

높은 다중극자: 중력파는 수학적으로 “구면 조화함수” 전개로 기술될 수 있다. 높은 다중극자는 이전개에서 주 성분인 사중극자 이상을 말한다.

경사각: 지구에 대해 블랙홀 쌍성의 공전 궤도면이 기울어짐(경사각) 각

정합필터: 잡음에 묻혀있는 신호를 검출하는 기술. 일반 상대론으로 계산한 중력파 파형의 주형을 사용하여 중력파 관측 자료 안에 주형과 잘 맞는 신호가 포함되어 있는지 탐색하는데 사용한다.

세차: 각운동량 보존으로 인하여, 두 블랙홀이 계의 공전축과 다른 방향으로 스핀하는 경우에 블랙홀 쌍성의 공전궤도면이 총 각운동량 방향을 중심으로 회전(세차)한다.

사중극자: 밀집쌍성계에서 방사된 중력파를 기술하는 다중극자의 여러 항 중에 가장 강한 성분. 중력파를 “시공간의 소리”라고 한다면, 사중극자 항은 중력파의 기본 주파수에 해당한다. 사중극자란 이름은 신호의 방출 형태가 방향에 따라 다른 것을 반영한다. 비교예시로, 가장 간단한 전파 안테나에서 방출되는 전파 신호는 이중극자의 형태가 가장 강하다.

스펙트로그램: 시계열 자료에 대한 시간-주파수-에너지를 나타낸 것. 각 주파수에 대한 신호 세기를 색으로 구분하여 나타내었다.

파형: 아인슈타인의 일반 상대론에 대한 근사를 통하여 계산된 이론적인 중력파 신호.