

# GW190521: 관측이래 가장 무거운 블랙홀 충돌

## 무엇을 관측했나?

2019년 5월 21일 **고등라이고**(Advanced LIGO)와 **고등비르고**(Advanced Virgo) 검출기가 매우 특별한 **블랙홀** 쌍성으로부터의 중력파를 관측했다. GW190521으로 명명된 이 중력파 신호는 그동안 관측된 다른 블랙홀 충돌에 비해 신호 길이가 짧으며 중력파 신호의 최대값도 더 낮은 **주파수**에서 관측되었다.

블랙홀 충돌에서 발생한 중력파를 고등라이고와 고등비르고에서 감지할 수 있는 시간은 쌍성계의 총 질량에 반비례한다. GW190521의 경우 이 시간은 약 0.1초로 이는 최초로 발견된 블랙홀 충돌 **GW150914**의 경우보다 훨씬 짧다. 또한, 블랙홀 쌍성계의 신호가 최대가 되는 주파수도 총 질량에 반비례한다. GW190521의 경우 이 주파수값은 약 60헤르츠로 역시 GW150914보다 훨씬 낮다. 따라서 신호가 감지되었을 때부터(그림 1) 라이고와 비르고가 매우 질량이 큰 블랙홀 쌍성을 발견했다는 것이 분명했다.

GW190521 중력파로부터 측정된 블랙홀의 질량 값은 그림 2에 나타내었다. 두 블랙홀 중에 큰 질량은 **태양질량**(기호  $M_{\odot}$  으로 표시)의 약 85배이고 작은 것은 66배 정도이다. 이 두 블랙홀의 질량은 **그동안 라이고와 비르고에서 관측된** 블랙홀 쌍성계의 질량보다 훨씬 크고, 작은 블랙홀의 질량도 그동안 관측된 블랙홀 쌍성계의 합병 후 블랙홀 질량보다 크다(그림 3).

GW190521 블랙홀 쌍성계는 합병 후 블랙홀 질량이 약  $142 M_{\odot}$ 으로 라이고-비르고에서 관측된 큰 질량의 블랙홀 보다 훨씬 무겁다. 합병 후 질량은 두 블랙홀 질량의 합보다  $8M_{\odot}$  만큼 적은 값으로 이 차이에 해당하는 에너지가 중력파 신호로 방출된 것이다.

## GW190521이 특히 주목받는 이유는?

GW190521 신호를 방출한 블랙홀 쌍성계의 질량이 너무도 크다는 사실은 이러한 신호가 관측되었다는 것 이상의 큰 의미가 있다. 즉, 이 블랙홀 쌍성계는 중력의 작용에 대한 근본 원리를 이해할 수 있는 고유한 우주 실험실로서 블랙홀 형성에 대한 이해를 재검토해야하는 이유를 제시한다.

## 큰 질량의 블랙홀 만들기

천문학자들은 블랙홀을 질량에 따라 분류한다. 블랙홀의 질량에 따라 형성 과정이 매우 다르기 때문에 질량에 따른 분류는 의미가 있다.

대부분의 거대 은하의 중심에는 질량이 태양의 수십만배에서 수십억배에 달하는 “초거대질량” 블랙홀이 자리잡고 있다.

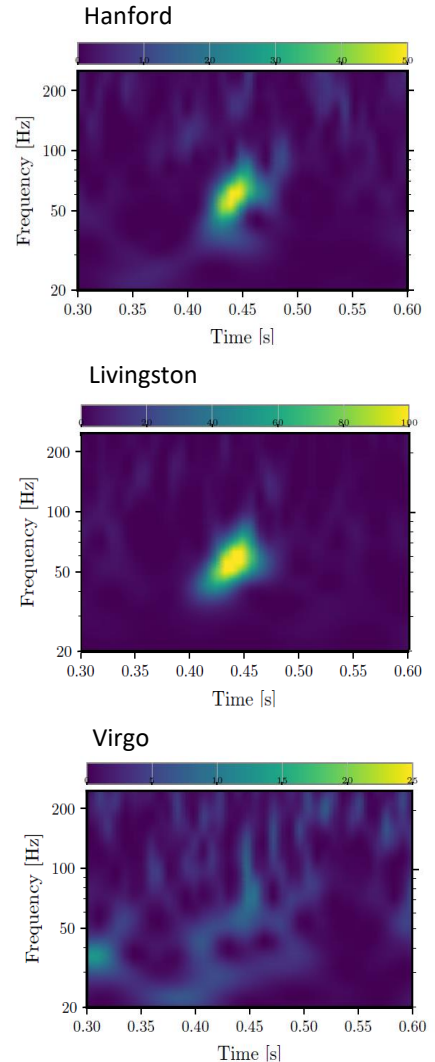


Visit our websites:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

우리 은하 **중심**에는 태양 질량의 4백만 배의 질량을 갖는 블랙홀이 있다. 어떻게 이렇게 어마어마한 블랙홀이 형성되었는가는 아직 밝혀지지 않았다. 블랙홀이 초거대질량으로 자랄 수 있는 시간이 충분히 필요했을 것이므로, 이들 거대 블랙홀은 아마 우주가 지금보다 훨씬 더 어렸을 때 형성되었을 것이다.



**그림 1.** 라이고 핸포드(위), 라이고 리빙스턴(가운데), 비르고(아래)가 관측한 GW190521 중력파 신호의 시간-주파수 분석 그래프. 시간은 2019년 5월 21일 03:02:29 UTC에 대한 상대 값이다. 각 시간-주파수에 포함된 에너지는 상단의 색 띠로 나타내었다. 신호 길이가 극히 짧고, 60헤르츠 주파수 근처에서 신호 최대값이 보인다. (GW190521 관측 논문의 그림 1에서 가져옴)

질량 스펙트럼 반대편의 “별질량” 블랙홀은 무거운 별이 초신성 폭발 과정으로 생성되었을 것이라고 생각된다. 별질량 블랙홀은 태양의 수에서 수십배에 해당하는 질량을 가지며 지금까지 라이고-비르고에 의해 관측된 블랙홀 쌍성계를 이루고 있다.

별질량 블랙홀과 초거대질량 블랙홀 사이에는 태양 질량의 100배 부터 100,000배 사이의 “중간질량” 블랙홀이라는 의문의 영역이 있다. 아직 이러한 질량을 갖는 블랙홀에 대한 명확한 관측은 없지만 이 블랙홀들의 형성에 대한 여러 이론이 있다. 망원경과 중력파 검출기의 성능이 향상되면서 중간질량 블랙홀을 실제로 관측하는 것에 대한 기대가 커지고 있다.

무거운 별 내부에서 일어나는 물리적 과정과 블랙홀 형성에 대한 이론에 따르면, 태양 질량의 65 배에서 125 배에 달하는 블랙홀은 단일 별의 폭발로 만들어질 수 없다고 알려져 있다. GW190521은 둘 중 더 무거운 블랙홀(‘주’블랙홀)이 확실하게 이 질량 범위에 해당하며, 합병 후 질량은 중간질량 블랙홀로 구분된다는 점에서 블랙홀 형성에 대한 기존 이론의 상식을 깨고 있다.

라이고-비르고의 GW190521 관측은 이제까지 알려진 이론과 달리 별이 무거운 블랙홀을 만들 수 있거나, 라이고-비르고에서 관측한 블랙홀의 일부가 다른 방법(가벼운 블랙홀의 합병으로 만들어졌고 이들이 다시 합병 과정을 거쳐 더 무거운 질량의 블랙홀이 만드는 식)으로 형성되었을 수 있음을 시사한다.

이와 같은 다중 합병 시나리오가 성립하기 위해서는 블랙홀이 충분히 많이 존재하는 특별한 환경이 필요하다. 천문학자들은 밀도가 높은 **성운**이나 **활동은하핵**의 은하원반이 그러한 환경일 것이라고 제안한 바 있다.

GW190521의 관측은 중간질량 블랙홀의 일부는 별질량 블랙홀의 병합으로 형성되었을 수 있다는 것을 보여준다. 초거대질량 블랙홀 역시 이와 비슷한 과정을 통해 만들어지는 것일지도 모른다.

## 중력이론의 검증

중력에 대한 이론적인 이해는 아이슈타인의 **일반상대론**(“GR”)로 잘 기술되어 있다. 물리학자들은 일반상대론을 이용하여 블랙홀 합병으로 발생한 중력파 신호를 예측한다. 이러한 예측은 라이고-비르고 자료의 분석에 사용되었다. 다른 한편으로는 중력파 신호 관측은 이론이 예측한 사실을 검증하는 데 사용될 수 있고, 일반상대론에서 벗어나는 신호 관찰을 통하여 **수정중력이론**을 제안할 수 있다.

중력파 관측을 물리 실험의 장으로 생각하는 것은 새로운 일이 아니다: 이전의 라이고-비르고 블랙홀 병합 관측도 **일반상대론검증** 검증에 사용되었다. 그러면 GW190521은 무엇이 다른 가?

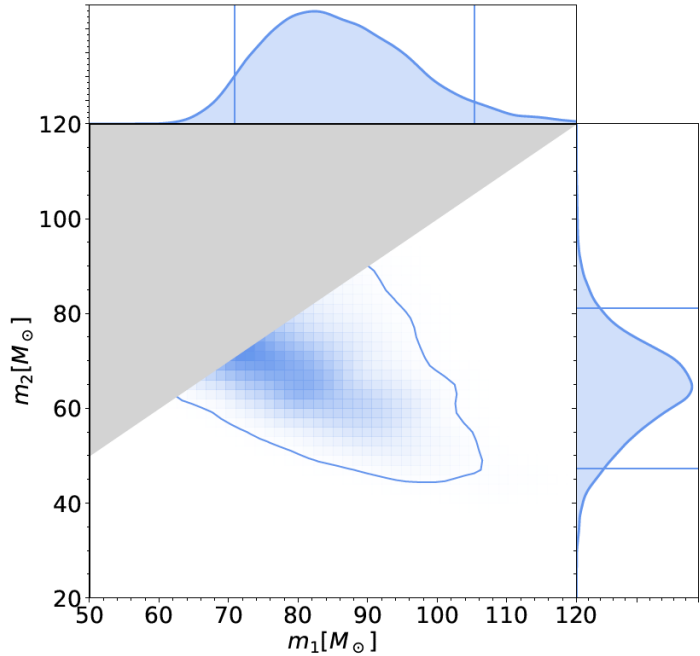


그림 2. GW190521 신호를 방출한 두 블랙홀의 관측 질량. 파란색 등고선(두 질량의 동시 분포 확률) 안쪽에 해당하는 질량값들은 라이고-비르고 분석으로 얻은 두 블랙홀 질량의 참 값 중 90% 확률을 가진 값에 해당한다. 그림의 좌측과 상단에 표시된 그림은 각 블랙홀 질량에 대한 확률분포이며, 여기 실선으로 그려진 선도 90% 확률구간을 나타낸다. 라이고-비르고 분석은 항상 두 블랙홀 질량 중  $m_1$ 이  $m_2$  보다 크다고 가정하므로, 중간 그래프에서 허용되지 않는 질량 구간을 회색으로 음영 처리하였다.

두 블랙홀의 충돌에서 발생하는 중력파는 **세 개의 다른 상태**를 거친다(그림 4.): 첫 단계는 두 블랙홀이 멀리 떨어져 있고 회전하는 “나선회전(inspiral)”이고; 이어서 두 블랙홀이 서로 합쳐지는 “병합(merger)” 과정; 마지막으로 마치 종이 울림을 마치는 단계 처럼 “안정화(ringdown)” 단계이다.

앞에서도 언급한 바와 같이 중력파는 질량에 따라서 라이고-비르고에서 관측되는 시간과 최대 값이 되는 주파수가 다르다. 그 결과로 검출기는 쌍성계의 질량에 따라서 중력파의 각기 다른 부분에 민감하다. 작은 질량의 블랙홀이 만드는 신호는 나선회전과 병합과정에서 잘 관측된다. 반면에 GW190521신호를 만든 것과 같이 큰 질량의 블랙홀이 만드는 신호는 끝 부분의 병합과 안정화 부분을 잘 관찰할 수 있는 기회를 제공한다.

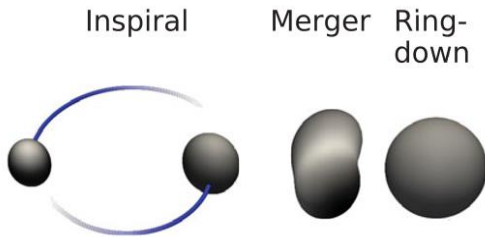


그림 4. 두 블랙홀이 병합하는 과정에서 발생하는 중력파신호의 각 단계에서 쌍성계 상태를 도식화하여 보여준다.

지금까지 관측된 다른 블랙홀 신호와 마찬가지로 GW190521에서도 일반상대론은 검증되었다. 검증 방법 중의 하나는 나선회전과 병합과정을 분리한 안정화 신호만 분석하여 다른 경우와 일치하는 지를 보는 것이다. 검증은 또한 수정중력 이론에서 나타나는 추가적인 특성에 대해서도 행해졌고, 신호 자체에 대한 새로운 가설(두 블랙홀의 병합이 아닌)에 대해서도 행해졌다. 행해진 어떤 검증도 GW190521신호가 일반상대론을 따르는 두 블랙홀의 병합으로 부터 생성되었다는 것과 모순 되는 것을 보여주지 못했다.

## 정리

GW190521은 기록적인 중력파 관측으로 블랙홀이 어떻게 형성되는가에 대한 새로운 지식의 지평을 열었으며, 극한의 중력을 연구하는 새로운 방법을 제공하였다. 뿐만 아니라, GW190521은 **라이고-비르고의 향후 관측**에서 무거운 질량을 갖는 블랙홀간의 병합이 추가 관측될 수 있음을 보여준다.

별질량 블랙홀의 큰 질량 부분을 자세히 살펴보면 블랙홀 형성과정과 존재 환경에 대한 좀 더 명확한 이해를 도모할 수 있다. GW190521 신호는 지금까지는 가장 큰 질량의 블랙홀 신호이지만 이 기록은 곧 깨질 것이다. 라이고와 비르고는 더 개선된 감도로 중력파 관측을 지속할 것이고, 개선된 검출기는 특히 큰 질량의 블랙홀이 많을 것으로 예상되는 저주파 영역에서 특히 개선된 감도를 갖게 될 것이다. 이미 새로운 검출기인 지상의 **아인슈타인 망원경**(Einstein Telescope), **우주 탐색**(Cosmic Explorer)과 우주의 **리사**(LISA)가 계획 되었다. 기록은 깨지기 위해 있는 것이다!

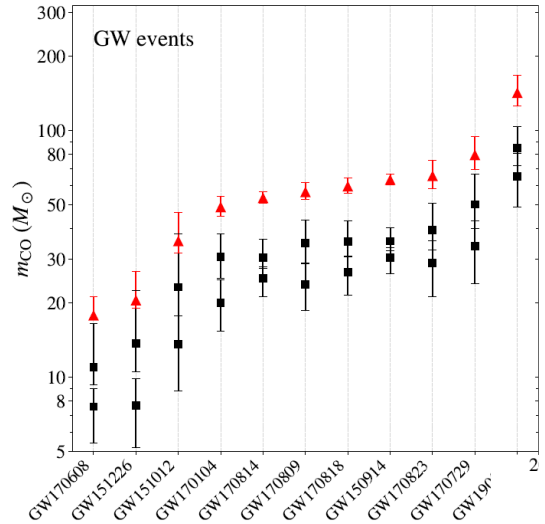


그림 3. GW190521 블랙홀의 질량과 라이고와 비르고에서 제1차, 2차 관측에서 획득한 다른 블랙홀 병합에서의 각 블랙홀의 질량(검은 색 사각형)을 비교하여 보여준다. 그림에서 붉은 색 삼각형은 각 관측의 병합 후 블랙홀의 질량이다. 그림의 수직선은 질량의 범위를 나타낸다. 그림으로 부터 GW190521의 질량이 다른 것 보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. (라이고-비르고 논문의 그림 10에서 가져옴)

## 더 찾아보기:

라이고-비르고 웹사이트: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

GW190521발견에 대한 라이고와 비르고의 언론 발표:

[www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf](http://www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf)

<http://www.virgo-gw.eu/GW190521>

GW190521 발견에 대한 학술논문 :

<https://dcc.ligo.org/P2000020/public>

GW190521의 천체물리학적 영향에 대한 딸린 논문:

<https://dcc.ligo.org/P2000021/public>

열린 중력파 자료 센터용 GW190521의 관측자료 : [이곳](#)에서 다운로드 가능.