

GWTC-2: 중력파 검출 확장 목록

이 목록은 2015년 중력파 첫 관측으로 부터 제3차 관측의 전반부인 O3a 종료까지의 중력파 관측을 모두 포함하는 것(GWTC-2, “Gravitational-Wave Transient Catalog 2”)이다. O3a는 2019년 4월 1일 부터 10월 1일 까지 관측이 진행되었으며 총 39개 중력파를 추가하여 11개 였던 [GWTC-1](#) 목록에서 GWTC-2에서는 50개가 되었다. O3a에서 관측된 중력파는 보다 폭 넓은 천문학적 매개변수를 포함하고 있으며 모두 두 블랙홀 병합(BBH), 두 중성자별 병합(BNS), 그리고 중성자별 블랙홀 병합(NSBH)에서 발생한 신호와 일치한다.

놀랍게도 O3a는 이 전에 이루어졌던 두 번의 관측(O1과 O2)에 비하여 3배 더 많은 확정 관측이 이루어졌다. 더구나 비르고는 관측기간 전기간에 두 개의 라이고 관측기와 같이 동작하였고 최소한 1개의 관측기가 동작하는 기간은 97%였고 2개의 관측기가 동시에 동작하는 기간은 82%였다. O3a 기간 동안의 관측 중에는 두 번 째 중성자별 병합 신호와 첫 번 째로 질량의 차이가 명확하게 큰 신호, 그리고 태양 질량의 150배가 넘는 매우 큰 블랙홀 쌍성계의 신호와 같은 특별한 신호를 포함하고 있다. 이 요약에서는 이러한 관측이 가능하게 된 라이고와 비르고에 이루어진 개선과 이 관측들의 천체물리학 분야에 대한 의의를 살펴 볼 것이다.

중력파 관측

O3a기간 동안에 39개의 중력파를 관측할 수 있었던 것은 라이고와 비르고 관측기의 개선, 자료 질의 향상, 그리고 다양한 검출방법의 결과이다. [최근에 이루어진](#) 장비에 대한 잡음저감과 감도개선은 레이저 출력의 증가, 새 거울과 개선한 거울 사용, 산란 빛에 대한 처리에 의한 것이다. 이러한 변화는 3 관측기 모두에서 관측 가능 주파수 범위와 관측 거리 범위의 증가로 이어져 볼 수 있는 우주의 범위가 확대 되었다. 세 관측기에서 중성자별 병합을 관측할 수 있는 거리의 [중간값](#)이, [그림 1](#)에 보인 것과 같이, O2보다 O3a에서 평균적으로 약 63%증가 했다.

중력파 관측에 기여한 또 다른 중요한 변화는 관측기 자료에 대한 처리 방법 개선이다. 이러한 [자료처리과정](#) 개선은 자료 보정, 잡음 제거, 그리고 틱현상 제거에 대해서 이루어졌다.

먼저 거의 실시간으로 관측기로부터의 빛의 세기 변화를 통하여 초기 검출의 차원이 없는 [세기자료](#)를 획득한다. 이어서 중력파원의 관측 범위를 늘리기 위하여 계통오차를 줄이고 잡음을 제거하여 약한 신호가 나타나게 한다.

중력파자료의 분석에 있어서 자주 접하는 문제는 틱현상이다. 틱현상은 순간적으로 발생하는 잡음으로 그 중에는 카메라의 셔터 또는 레이저 산란빛이 원인인 경우도 있다. 그러나 블립이라고 하는 주파수범위가 넓은 순간 틱현상 같은 것은 원인이 알려져 있지 않다. 현재 라이고와 비르고 자료에 나타나는 이러한 틱현상들을 특정하고 분류하는 방법으로 택한 한 가지 방법은 중력감시라는 것을 통하여 수많은 시민 과학자들의 도움을 받는 것이다(누구나 [중력감시](#)에 참여하여 틱현상을 분류하는 데 도움을 줄 수 있다). 주요한 틱현상들을 특정한 후에 [그림 2](#)에 보인 것과 같이 이 값을 관측자료에서 제거한다. O3a기간동안 관측된 39개의 신호 중에 8개는 이러한 틱현상 제거 과정을 모수추정 하기 전에 거친 것이다.

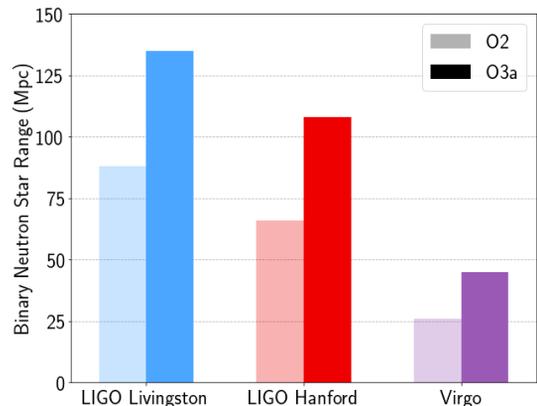


그림 1: 제2차 관측가동 O2와 제3차 관측가동 O3a에서의 중성자별 쌍성계 관측 거리의 [중간값](#) 비교.

주: 1메가파섹(Mpc)는 약 326만 광년이다. (Credit: LIGO-Virgo Collaboration / Eve Chase / Caitlin Rose / Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee.)

중력과 탐색에 있어서 대상의 결정은 두 번에 걸쳐서 이루어진다. 처음에는 수분 내에 여러 탐색 과정을 통하여 **공개 검출 알림**을 위하여 이루어진다. 이 후에 이 목록과 같이 정제된 중력파원을 위하여 개선된 자료보정, 자료 질 검토 그리고 통계유의도 계산을 위한 개선된 통계처리 방법을 적용하여 다시 분석한다. 어느 대상이 신호인지 아닌지를 결정하는 것은 오탐율이 년 2회 이하인 것으로 하였다. 이 비율은 잡음이 중력과 신호로 오인될 값이다. O3a의 39개 신호 중에 26개는 실시간 검출에서 이미 보고된 것이고 13개는 GWTC-2에서 처음 보고되는 신호이다.

GWTC-2에서는 중력파 신호에 대한 새로운 명명법을 적용했다. 관측된 날짜만 사용하는 이번 방법은 최근의 GW190412, GW190425, GW190521, GW190814를 포함한 이전에 발표된 신호에 대해서는 계속 사용한다. 그러나 새 GWTC-2신호는 날짜와 더불어 UTC 시간을 추가하여 표기한다. 예를 들면, GW190701_203306(그림 2)는 2019년 7월 1일 20:33:06 UTC 에 관측되었다. 이 방법으로 O3a에서 3번 발생한 하루에 두 개 이상의 신호에 대해서도 구분된 이름을 부여할 수 있게 되었다.

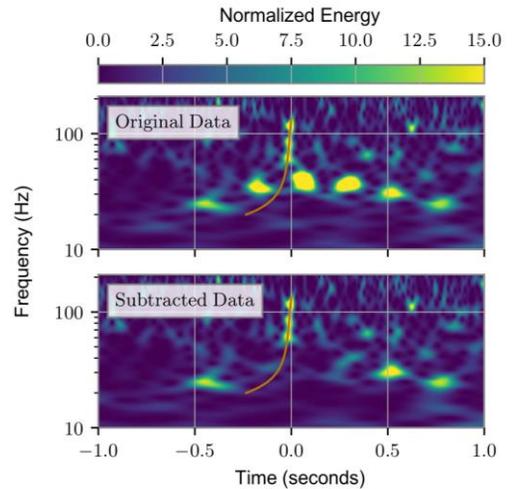


그림 2: GW190701_203306에 대한 림 현상 제거 전후의 시간-주파수 자료. 이 경우는 라이고 리빙스턴 관측기의 레이저 산란 빛이 40Hz 이하에서 림 현상을 생성했다. (목록논문의 그림 5.)

천체물리학적 모수 추정

각 신호의 천체물리학적 특성은 모수추정과정을 통하여 각 신호에 따른 여러 천체물리학적 변수 값을 결정하여 분석한다. 쌍성계의 지구에 대한 상대적인 관계를 결정하는 쌍성계 까지의 거리, 천구상의 위치, 시선방향에 대한 회전과 같은 **외부변수**를 측정한다. 추가로 쌍성계의 물리적 특성을 나타내는 각 **밀집성**의 질량과 회전같은 **고유변수**를 측정한다. 결정된 신호의 변수로부터 시간에 대한 중력파 신호를 나타내는 **파형**을 계산한다. 이 계산된 파형과 라이고와 비르고의 관측된 자료를 잡음을 감안하여 비교한다. 이러한 모수추정 방법을 통하여 관측자료와 잘 맞는 90% **신뢰도**의 변수 범위를 결정한다.

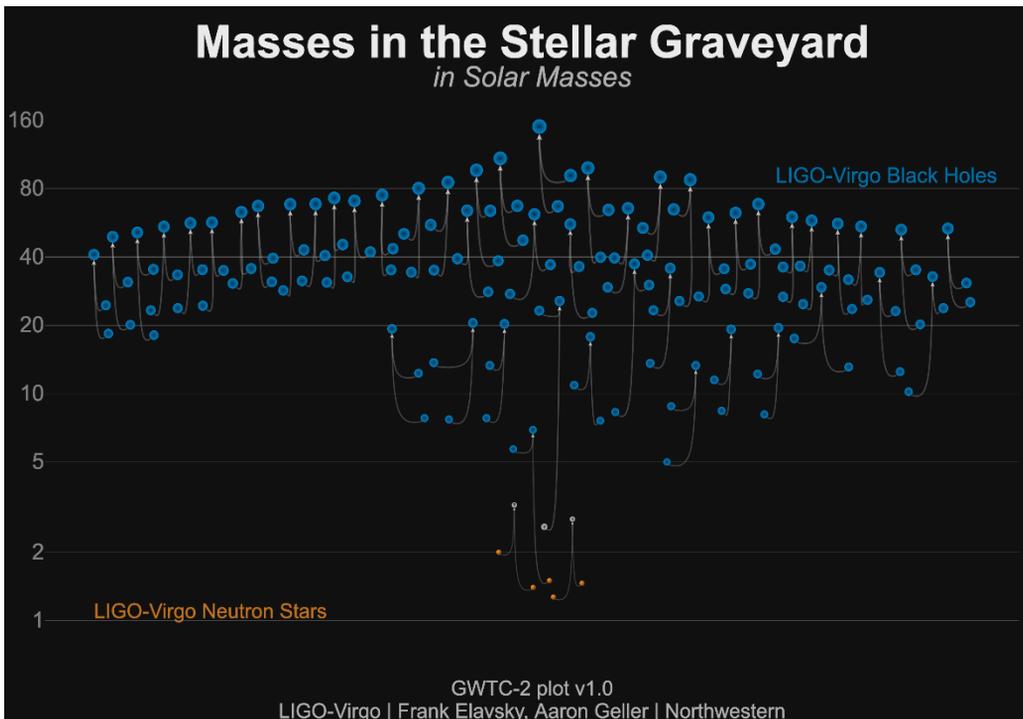


그림 3: 다양한 밀집성의 질량 분포. 그림에는 중력파 관측으로 알게된 블랙홀(파란색), 중성자별(주황색), 알 수없는 밀집성(회색)을 표시했다. 각 밀집 쌍성 병합은 세 개의 밀집성으로 표시된다: 두 개의 병합 전 밀집성과 병합 후 밀집성. (Credit: LIGO Virgo Collaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern).

관측된 39개의 신호는 우주를 통하여 블랙홀과 중성자별의 생성과 진화에 대한 풍부한 정보를 갖고 있는 넓은 범위의 질량 값을 포함한다. 중력파 신호는 병합이 발생하기 훨씬 이전부터 존재하며 신호는 두 질량의 특별한 조합인 **쳐프** 질량에 의해 주로 결정된다. 다른 중요한 질량 변수는 두 질량의 합인 **총질량**과 작은 질량의 값을 큰 질량의 값으로 나눈 **질량비**가 있다.

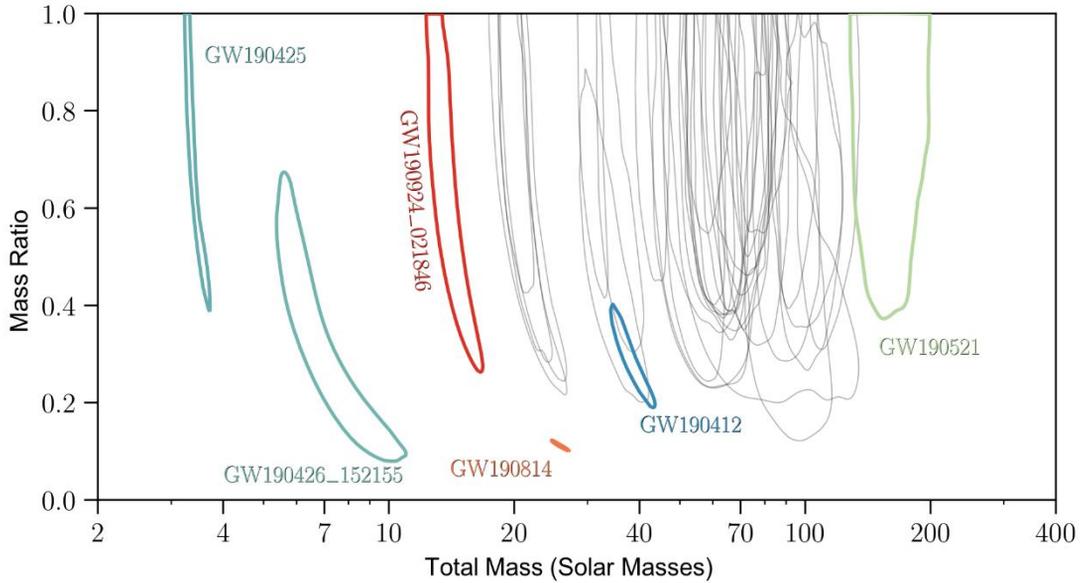


그림 4: 모든 O3a신호에 대한 질량비와 총질량. 등고선은 90%신뢰도 곡선이다. 6개의 대표적인 신호를 짙게 표시했다. (목록논문의 그림 6.)

O3A에서의 예외적인 발견

그림 3 은 GWTC-2 신호의 질량이 태양질량의 1.4배 근처의 중성자별에서 부터 태양질량의 150배에 달하는 블랙홀에 이르기 까지 다양함을 보여준다. 그림 4와 5 에서는 다음의 8개 신호를 짙게 표시했고 그 중에 4 개는 논문을 따로 출판하였다:

- [GW190412](#): 질량 비대칭이 확인한 첫 번째 블랙홀 쌍성(BBH)이며, [고조파](#)에 대한 기여도 보여준다.
- [GW190425](#): [GW170817](#) 이후의 두 번째 중성자별 쌍성(BNS)신호
- GW190426_152155: 중성자별 블랙홀(NSBH) 또는 블랙홀 쌍성(BBH)일 수 있는 작은 질량 신호
- GW190514_065416: O3a신호 중에 가장 작은 정렬된 유효자전 값을 보이는 블랙홀 쌍성(BBH)신호
- GW190517_055101: O3a신호 중에 가장 큰 정렬된 유효자전 값을 보이는 블랙홀 쌍성(BBH)신호
- [GW190521](#): 총 질량이 태양 질량의 150배가 넘는 블랙홀 쌍성(BBH)신호
- [GW190814](#): 매우 비대칭 질량이며 특성이 명확하지 않은 신호로 태양질량의 23배인 블랙홀과 발견된 쌍성계 중에 가장 작은 질량의 블랙홀 일 수도 있고 가장 큰 질량을 가진 중성자별일 수도 있는 태양질량의 2.6배인 밀집성으로 되어 있다.
- GW190924_021846: 두 블랙홀의 질량이 태양질량의 3배를 넘는 것 중에 가장 작은 질량의 블랙홀 쌍성(BBH)계일 가능성이 있다.

추가적으로 GWTC-2는 소위 “낮은 질량간극”이라 불리는 태양 질량의 2.5배에서 5배 사이의 신호도 포함한다. 여러 해동안 천체물리학자들은 관측이 되지 않는 이 간극구간의 존재를 설명하는 이론을 제안해 왔다. 그러나 O3a신호는 이 “질량간극” 물체를 GW190814와 GW190924_021846 쌍성계의 작은 질량 밀집성으로 관측했다.

그림 4에서 보는 바와 같이, GW190521은 [GWTC-1](#)에서 질량이 가장 큰 GW170729보다 거의 두 배의 질량을 갖고 있고 O3a에서 가장 큰 총질량을 갖고 있다. 나아가 GW190521은 지금까지 관측된 중력파 신호 중에 가장 질량이 큰 태양질량의 90배가 넘는 개별 밀집성을 갖고 있다. GW190519_153544, GW190602_175927, 그리고 GW190706_222641 와 같은 몇 개의 신호는 총 질량이 태양질량의 100배에 달한다.

GWTC-2에는 무거운 블랙홀과 가벼운 밀집성으로 이루어진 GW190412와 GW190814와 같이 GWTC-1에 있는 어느 신호보다도 질량이 비대칭인 신호가 존재한다. 비대칭 질량을 갖는 계는 [GW190412](#) 검출에서 보여준 것과 같이 고조파 성분의 크기를 증폭시킨다. 이 확장 목록에서는 중력과 천문학의 새로운 면을 보여준다. O3a에는 그동안 관측된 것 중에 가장 멀리 있는 계와 9개의 신호는 그 위치를 천구의 1%이내로 특정 지을 수 있었다.

자전 값은 밀집쌍성계의 시간에 따른 변화를 좀 더 자세히 알려줄 수 있다. 자전 값은 해당하는 밀집성의 [각운동량](#)과 관계가 있으며 자전하지 않는 것 부터 최대 자전까지 값이 변한다. 우리가 사용하는 자전 측정은 “정렬된 유효자전”이라고 불리는 병합하기 전의 각 밀집성 자전의 특별한 조합을 사용한다. [그림 5](#)는 각 신호의 정렬된 유효자전값과 처프질량의 값을 보여주고 있다. 정렬된 유효자전 값이 음수 인 경우는 각 밀집성의 자전이 각운동량과 반대라는 것을 나타내고 이는 이 계가 [구상성단](#)과 같은 별이 밀집한 환경에서 만들어 졌을 것이라는 것을 보여준다. [그림 5](#)에 강조하여 나타낸 GW190517_055101은 가장 큰 정렬된 유효자전 값을 보여준다.

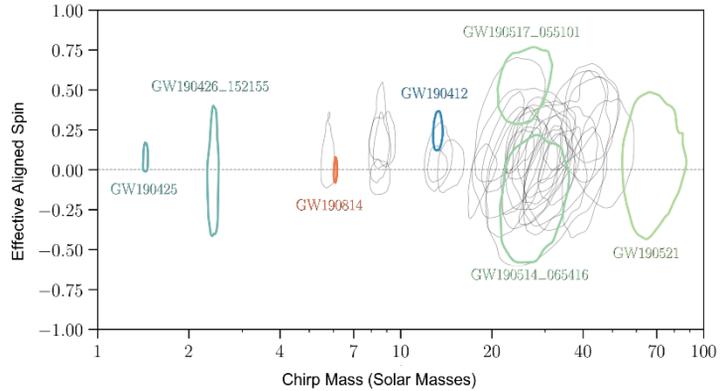


그림 5: O3a 신호에 대한 정렬된 유효자전과 처프질량 값. 등고선은 90% 신뢰구간이다. ([목록논문](#)의 [그림 7](#).)

비록 GW190514_065416은 가장 작은 정렬된 유효자전 값을 보여 주지만 확정적으로 음수를 보이는 신호는 GWTC-2에는 없다. 더구나 자전은 쌍성계의 세차운동을 유발한다; GWTC-2에는 GW190412와 GW190521과 같이 세차운동의 가능성을 보여주는 신호도 있다.

중력과 천문학의 밝은 미래

초현실적으로 여겨졌지만, 2015년 9월의 [첫 중력파 검출](#) 이후 단 5년 만에 중력파 검출은 일상이 되었다. 이제 이 50개의 중력파 신호를 통하여 좀 더 명확하게 우주에서 블랙홀과 중성자별의 진화에 대하여 탐구할 수 있다([이 논문](#) 참조). 많은 중력파 신호 관측은 일반상대론에 대한 이해도 증진시킨다([이 논문](#) 참조).

제3차 관측가동(O3)의 전반부 6개월 관측에서 39개의 새로운 추가하여 중력파 천문학의 미래는 더욱 전망이 좋게 되었다. O3의 후반부 6개월의 관측자료(O3b라고 한다)는 현재 분석이 진행 중이며 중력파 신호 목록을 더 확대하게 될 것이다. 제3차 관측가동 이후에 관측기는 추가적인 기술적 개선을 통하여 제4차 관측가동에서 더 멀리 볼 수 있게 될 것이다. 장치의 개선과 새 관측기의 건설이 이루어지는 동안 중력파 연구 계는 우주에서의 블랙홀과 중성자별의 특성에 대한 탐색을 계속 할 것이다.

용어해설

처프질량(Chirp mass): 쌍성계 각 밀집성 질량의 특별한 조합 수식. 처프질량은 낮은 질량 쌍성계에서 신호가 주파수에 따라 증가하는 것을 잘 보여준다.

밀집성(Compact object): 블랙홀, 백색왜성, 중성자별과 같은 매우 밀도가 높은 물체.

중력파형(Gravitational waveform): 중력파 신호의 시간에 따른 변화를 표현한 것.

질량비(Mass ratio): 가벼운 밀집성의 질량을 무거운 밀집성 질량으로 나눈 값.

중간값(Median): 분포에서 중간값, 즉 이 값보다 작은 자료와 큰 자료의 수가 동일하다.

모수추정(Parameter estimation): 중력파 신호에 해당하는 천체물리학적 변수의 값을 추정하는 통계적인 방법.

태양질량(Solar mass): 태양의 질량. 태양질량은 천문학에서 사용하는 질량의 단위이다.

세기(Strain): 중력파가 검출기를 지나감에 따라 시-공간의 변화에 의하여 발생하는 팔 길이 변화의 차를 전체 팔 길이로 나눈 값.

더 찾아 보기:

웹 사이트 방문:

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

전체 논문의 결론:

<https://dcc.ligo.org/P2000061/public>

O3a에서 관측된 39개의 신호에 대한 자료는 자료공개 사이트인 GWOSC에서 확인할 수 있다:

<https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2/>

GWOSC는 자료외에도 중력파에 대한 배경문서와 예제코드 그리고 공개된 자료 활용을 도와줄 교육자료도 같이 제공하고 있다.



웹사이트 방문:

<http://www.ligo.org>

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

