GW190425: 관측이래 가장 무거운 중성자별 쌍성?

무엇을 보았나?

라이고과학협력단과 비르고협력단은 두 밀집성의 병합 과정에서 발생한 중력파를 2019년 4월 25일에 검출했다고 발표하였다. 이 신호는 GW190425라고 명명되었다. 라이고는 미국 워싱톤 주 핸포드와 루이지애나 주 리빙스톤에 위치한 두 개의 중력파 검출기를 말한다. GW190425가 발견된 시간에 라이고-핸포드는 일시적으로 정지한 상태였으나, 라이고-리빙스톤에서 강한 신호가 검출되었다. 당시 이태리 카시나에 있는 비르고 검출기도 정상적으로 동작하고 있었다. 그러나 비르고 감도가 라이고보다 상대적으로 낮았고, GW190425의 천구상의 위치가 비르고가 관측하기 어려운 지점이었기 때문에 라이고-리빙스톤에서만 GW190425 신호가 검출되었다. 중력파 신호를 검출하지는 못했으나, 비르고의 관측 자료는 GW190425를 방출한 천체의 물리량을 결정하는데 도움이 되었다. 중력파 신호 분석을 통해 중력파원의 총 질량이 태양 질량의 3.3배에서 3.7배인 것으로 측정되었다. 추정된 질량 범위를 고려하여 GW190425가 5억2천만 광년 거리에서 두 중성자별이 충돌하여 방출된 중력파 신호임을 알 수 있다. GW190425 신호를 방출한 중성자별 쌍성의 총 질량은 기존에 알려진 다른 중성자별 쌍성에 비해 매우 크다

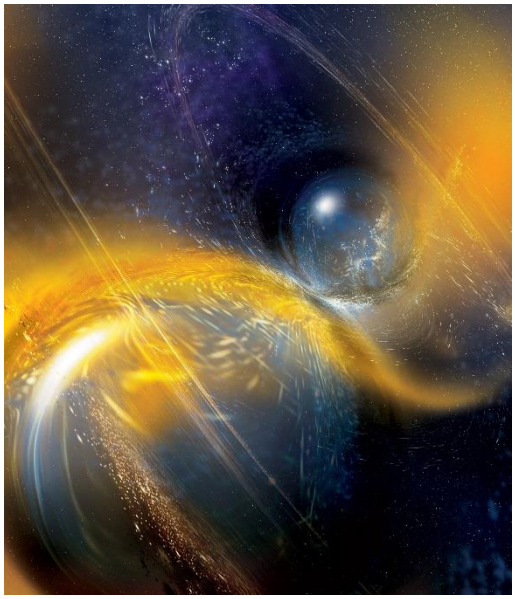

그림 1: *중성자별 쌍성에서 방출된 GW190425 중력파 신호에 대한 예술적 표현. 저작권: 미국 국립과학재단/라이고/소노마 주립대학교/A. Simonnet.*

간단한 배경 지식

GW190425는 2019년 4월 1일 부터 2020년 4월30일 사이에 실시된 (실제는 3월 27일에 종료함) 고도화 라이고, 비르고의 3번 째 과학 관측(O3) 기간 중에 검출되었다. O3이전에 O1(2015년 9월 – 2016년 1월)과 O2(2016년 11월 – 2017년 8월) 두 번의 과학 관측이 있었다. O1-O2 과학 관측 성과에 대한 자세한 정보는 이곳에서 확인할 수 있다. 각 과학 관측 기간 사이에는 새로운 기술을 적용하여 감도를 개선하였다.

라이고와 비르고 연구단은 O2기간 중에 두 중성자별의 나선 공전 운동에서 방출된 신호인 GW170817을 검출했다. 두 중성자별의 충돌로부터 다양한 파장의 전자기파도 방출되었다. GW190425는 중력파 관측으로 발견한 두 번째 중성자별 병합 현상으로 추정된다. GW190425와 관련된 전자기파 또는 중성미자 신호는 검출되지 않았다. GW190425 중력파원까지의 거리가 GW170817보다 더 멀어 전자기파 세기가 약할 것이므로 이는 놀랄 일은 아니다. 그러나 전자기파 후속 관측이 없는 가장 큰 요인은 GW190425의 위치를 GW170817처럼 잘 알 수 없기 때문일 것이다. 중력파 관측으로 추정한 GW190425의 위치는 전체 하늘 면적의 16%에 달한다. 이는 망원경으로 탐색하기에는 너무 넓다!

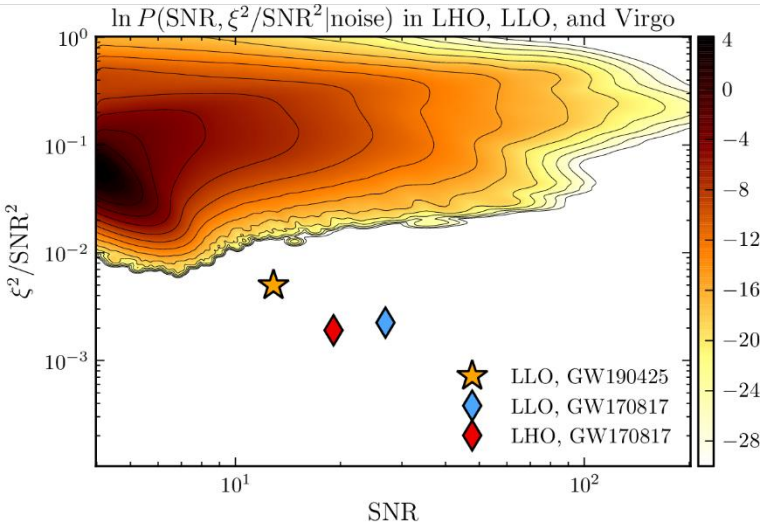

그림 2: *이 그림은 라이고-핸포드(LHO), 라이고-리빙스톤(LLO), 그리고 비르고 세 관측소의 통합된 SNR-ξ^2 잡음 확률함수를 보여준다. 신호대 잡음비(SNR, signal to noise ratio)는 신호가 얼마나 강한지를 ξ^2은 신호대 잡음비의 시간 변화가 얼마나 실제 밀집쌍성계 신호를 잘 표현하는 가를 나타낸다. 그림의 영역은 중성자별 쌍성 배경 잡음 값을 나타낸다. 배경 잡음은 O1, O2(169.5 일) 및 O3 기간(50 일) 동안 얻은 자료를 사용하여 구축한 것이다. GW190425(금색별) 신호에 해당하는 위치에는 배경 잡음이 없는데, 이는 배경 잡음에 비해 신호가 더 크다는 의미이다. 라이고-핸포드와 라이고-리빙스톤 관측소에서 검출된 GW170817도 각각 푸른색 마름모와 붉은색 마름모로 같이 표시했다.*

GW190425가 천체에서 방출된 우주 중력파 신호인 이유

라이고-비르고 연구단은 밀집 쌍성 병합에서 방출된 중력파를 탐색하는 몇 가지 방법을 보유하고 있다. 이 방법들은 일반상대론에 기반한 이론적인 신호와 관측자료를 비교하는 정합필터를 이용한다. 라이고-리빙스톤 관측소에서 얻은 자료에 검출 파이프라인을 적용하여 GW190425를 발견하였다. 신호를 발견한 다음 단계로 신호의 정확도, 즉 관측된 신호가 잡음으로부터 발생할 확률을 계산한다.

이 양을 오탐율(False Alarm Rate) 이라고 한다. 이 값을 알아내기 위해서는 GW190425의 세기와 배경 잡음 분포의 세기를 비교해야 한다. 배경은 각각 라이고-리빙스톤, 라이고-핸포드와 비르고에서 관측한 O1과 O2의 169.5일, O3의 50일의 자료에 대한 탐색으로 구성했다. 이 과정을 통하여 GW199425의 오탐율은 69,000년에 한번으로 계산되었다. 그림 2에 총 219.5일간 얻은 자료로부터 취합된 배경 잡음을 보였다. GW190425는 배경 잡음으로부터 분명히 벗어나 있다. 비교를 위하여 검증된 검출신호인 GW170817도 같이 표시했다.

탐색 단계에 더해 검출 신빙성을 검증하기 위해 이전 관측에서 했던 것과 같은 일련의 비슷한 과정을 거쳤다. 이는 GW190425이 라이고-리빙스톤 관측소의 기기잡음일 가능성을 확인하는 과정이다. 이러한 과정을 통하여 GW190425로 오인될 환경 잡음 또는 기기 배경 잡음이 없음을 확인했다.

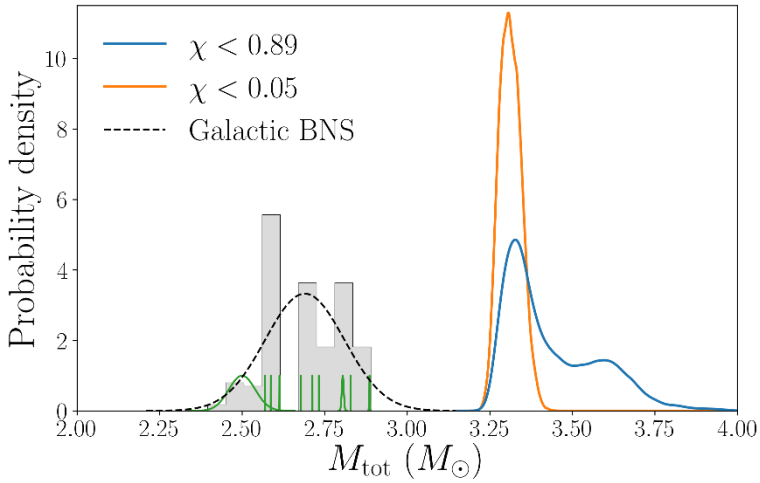

그림 3: *이 그림은 각 중성자별의 자전에 다른 값을(파란색 및 주황색 선) 가정하여 얻은 총 질량 분포이다. 우주 나이와 같은 기간 동안 병합할 가능성이 있는 우리 은하내 10개 중성자별 쌍성의 질량 분포도 같이 보였다. 우리 은하에 속한 중성자별 쌍성의 질량 분포는 표준 분포로 근사하여 검은 점선으로 나타내었다. 녹색 곡선은 우리 은하내 중성자별 쌍성 각각의 총질량의 확률밀도를 1로 규격화 한 것이다.*

GW190425가 왜 중요한가?

모수 추정을 통하여 더 무거운 밀집성의 질량은 태양질량의 1.61배에서 2.52배 사이로 작은 것은 1.12배에서 1.68배인 것을 알아내었다. 이 질량 값들은 초신성 폭발 모사에서 확인된 것과 같이 다른 중성자별의 질량과 유사하다. 전자기파 관측(펄사 PSR J0740+6620)을 통하여 확인한 가장 큰 중성자별 질량은 태양 질량의 2.05-2.24배 이 것으로 알려져 있다. GW190425의 경우에 둘 중에 하나 또는 둘 다 블랙홀일 가능성을 배제할 수 없다. 그러나 가장 간단한 것은 둘을 중성자 별로 해석하는 것이다. 만약 그렇다면 GW190425에 대해서 무엇을 말할 수 있는가?

어떤 면에서는 GW190425는 우리 은하에 속한 중성자별쌍성과는 다르다고 할 수 있다. 각각의 질량은 기존 것과 차이가 없으나, 총 질량은 매우 다르다. 그림 3은 조만간 병합할 가능성이 있는 우리 은하 내의 10개 중성자별 쌍성의 총질량을 보여준다. 정규분포는 10개의 쌍성의 총 질량 분포를 근사한 것이다. 우리 은하에 속한 중성자별 쌍성의 총 질량은 평균적으로 태양질량의 2.69배이지만 GW90425는 3.4배이다. 이는 우리 은하 평균 값으로부터 표준편차 5배 이상 벗어난 값으로, GW190425가 우리 은하 내 중성자별 쌍성과는 다른 방법으로 생성되었음을 암시한다.

두 중성자별이 쌍성을 이루는 진화 과정은 두 가지가 알려져 있다. 첫 번째 과정은 "공통 외층을 포함한 고립계로서의 쌍성 진화 채널"로 두 중성자별이 고립계로서 다른 밀집성과 상호작용 하지 않고 각각 초신성 폭발을 통해 생성된다. 두 번째 진화 과정은 "동역학적 생성 채널"이다. 이 과정은 두 중성자 별 또는 한 개의 중성자별과 한 개의 주계열별로 이루어진 쌍성이 형성되어 있는 상황으로부터 시작한다. 이러한 쌍성이 제 3의 중성자별과 상호작용하게 되면 질량이 더 작은 천체가 튕겨나가 중성자별 쌍성이 형성된다. 이 과정으로 생성된 쌍성은 병합율이 매우 낮기 때문에 GW190425가 동역학 과정으로 형성 되었을 가능성은 매우 작다. 만약 GW190425가 고립계로서 진화하여 생성되었다면, 이는 중성자 별이 낮은 금속 함량을 갖는 별로부터 만들어졌음을 의미한다고 할 수 있다. 또는 쌍성 내에서 초신성 폭발로 첫번 째 중성자별이 만들어지고 (아직 초신성 폭발을 하지 않은) 두 번째 별의 질량이 중성자별로 전달되어 중성자별의 질량이 증가할 수 있다. 어느 경우이든 GW190425의 발견은 전자기파로는 관측할 수 없는 한 시간 이내의 공전 주기를 갖는 중성자별 쌍성이 있다는 것을 보여준다.

GW190425를 분석하여 중성자별이 얼마나 빨리 자전하는 가를 특정할 수 있는 지도 확인하고자 하였다. 중성자별의 스핀값을 알 수 없었으나, 분석 결과는 우리 은하 내에 속한 병합 중인 중성자별 쌍성 중에서 가장 빠르게 자전하는 중성자별 PSR J0737-3039A/B 및 PSR J1946+2052의 스핀과 어느 정도 일치한다. PSR J1946+2052 펄서는 17ms에 한번씩 자전한다.

GW190425가 중성자별 쌍성이라고 가정하고 GW170817 자료와 함께 분석하면 중성자별 쌍성의 병합율을 예측할 수 있다. 분석 결과, 매년 매 세제곱 기가파세크 부피 당 중성자별 쌍성 병합 빈도가 250회에서 2810회 사이임을 알아내었다.

GW190425는 중성자별 쌍성의 두 번째 중력파 관측일 가능성이 있으며, 이로부터 중성자별이라는 특이한 천체에 대한 매우 중요한 정보를 알아낼 수 있다.

더 찾아 보기:

웹 사이트 방문: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu
이 관측에 대한 라이고 기사: ligo.caltech.edu/news/ligo20200106
정식 투고된 논문: https://www.ligo.org/science/Publication-GW190425/

용어해설

밀집성: 중성자 별 또는 블랙홀과 같이 밀도가 매우 높고, 크기는 작은 천체를 통칭. 여기서 작다는 것은 천문학적으로 작다는 의미이다! 밀집성 천체는 모두 최소한 태양 질량 정도이거나 더 무겁고, 직경이 수에서 수십킬로 미터이다.

쌍성: 두 천체가 서로 공전하는 계 .

중성자 별: 무거운 별의 붕괴 후에 생성되는 밀도가 극도로 높은 천체.

블랙 홀: 극도로 밀집된 질량에 의한 강한 중력으로인해 빛을 포함한 어느 것도 빠져 나가지 못하는 의한 시-공간 영역

자전: 물체가 얼마나 빨리 회전하는 가를 측정하는 양. 예를 들면 지구는 24시간에 한바퀴 자전한다.

펄서: (주로 라디오파 주파수 영역에서) 전자기파 펄스 신호로 관측되는 중성자별. 대부분의 중성자별은 전자기파 세기가 충분히 강하지 않거나, 펄스빔의 방향이 지구 방향이 아닐 것으로 예상되어 관측이 불가능하다.

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