

GWTC-5.0: 병합하는 밀집쌍성계의 개체군 특성

우리는 최신 중력파 신호 카탈로그인 GWTC-5.0에 보고된 267개의 **밀집쌍성 병합 사건**의 개체군 특성을 바탕으로 한 결과를 제시합니다. **GWTC-5.0**은 **GWTC-4.0**을 기반으로 확장되었으며, 2024년 4월 10일부터 2025년 1월 28일까지 수집된 최신 데이터를 포함합니다. 개별 병합 사건들도 중요한 정보를 제공하지만, 전체 개체군을 함께 연구하면 밀집쌍성계가 어떻게 형성되고, 진화하며, 병합하는지에 대해 더 완전한 그림을 얻을 수 있습니다.

우리 우주에는 매우 다양한 질량과 진화 단계를 가진 별들이 존재합니다. 어떤 별들은 상대적으로 작으며, 수백억 년 동안 살아갈 수 있습니다. 다른 별들은 빠르게 살아가고 젊은 나이에 생을 마치며, 불과 수백만 년 만에 핵연료를 모두 소모합니다. **태양 질량**의 수십 배에서 많게는 수백 배에 이르는 이러한 무거운 별들은 생을 마친 뒤 중성자별이나 블랙홀과 같은 밀집성 잔해를 남깁니다. 이러한 밀집성 잔해에는 **중성자별**과 **블랙홀**이 포함되며, 이들은 때때로 쌍을 이루어 결국 병합할 수 있습니다. **이러한 병합**은 **중력파** (GWs)를 발생시킵니다. 중력파는 시공간의 잔물결로, 우주의 역사 전반에 걸쳐 밀집 천체들이 어떻게 형성되고 진화해 왔는지를 이해하는 주요 도구 중 하나로 빠르게 자리 잡았습니다. 중력파는 수십억 년 동안 우주를 가로질러 이동할 수 있으며, 그 사이에 있는 물질과 은하들을 거의 방해받지 않고 통과한 뒤 마침내 지구에서 검출됩니다. 검출기가 우주를 더 깊이 탐사할수록, 밀집쌍성 개체군에 대한 연구는 블랙홀과 중성자별이 어떻게 행동하고 서로 어떻게 상호작용하는지에 대해 점점 더 자세한 관점을 제공할 것입니다.

또한 이러한 연구는 블랙홀과 중성자별의 우주적 역사를 형성하는 무거운 별들의 본질, 진화, 그리고 죽음에 대한 통찰도 제공합니다.

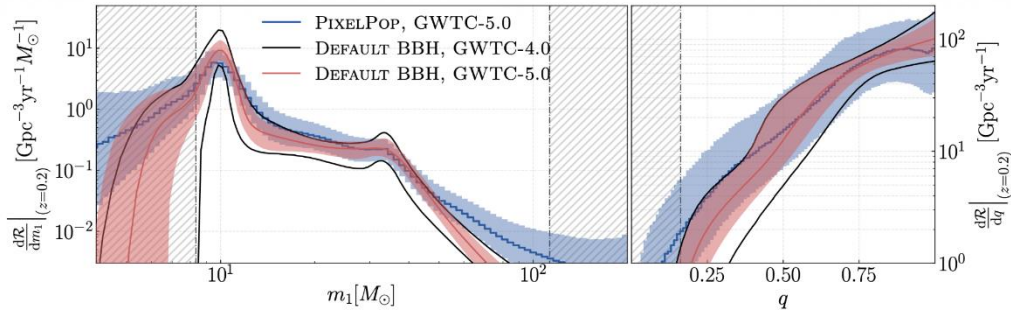


그림 1 (논문 그림 2를 사용) — 왼쪽 패널은 쌍성 블랙홀 개체군에서 주질량, 즉 두 천체 중 더 무거운 성분의 질량 분포를 보여줍니다. GWTC-5.0 결과, 파란색과 빨간색 곡선은 GWTC-4.0에서 보았던 전반적인 구조를 유지하고 있으며, 약 $10 M_{\odot}$ 와 $35 M_{\odot}$ 부근의 특징이 계속해서 나타납니다. 오른쪽 패널은 질량비 (q)의 분포를 보여주며, 이는 블랙홀들이 어떤 질량의 동반 블랙홀과 쌍을 이루는지를 보여줍니다. 질량비 ($q = 1$)은 블랙홀이 자신과 같은 질량의 동반성과 쌍을 이루고 있음을 의미합니다.

방법

이 연구에서 제시하는 밀집쌍성 병합 사건들은 중성자별 쌍성 (BNS), 중성자별-블랙홀 쌍성 (NSBH), 그리고 블랙홀 쌍성 (BBH)을 포함합니다. 본 논문은 이러한 계들이 어떻게 형성되는지, 어떤 특성을 가지는지, 그리고 **우주적 시간**에 걸쳐 어떻게 병합하는지를 보여줍니다. 이 사건들은 새롭게 발표된 중력파 검출 목록인 **GWTC-5.0 카탈로그**에서 가져온 것으로, **LIGO-Virgo-KAGRA (LVK)**의 네 번째 과학 **관측 기간** 중 두 번째 구간(O4b)에서 얻어진 신뢰도 높은 검출 사건들을 포함합니다. 또한 관측 기간의 첫 번째 구간(O4a)에 대한 결과가 업데이트됨에 따라, 본 연구의 267개 후보 사건에는 **GWTC-4.0 개체군 분석**에 포함되었던 사건 두 개가 추가로 포함되었습니다.

더 알아보기:

웹사이트
방문:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



개체군 특성을 추론하기 위해서는 [선택 효과](#)를 주의 깊게 이해해야 하며, 이는 관측천문학에서 흔히 마주하는 문제입니다. 중력파 검출기는 멀리 있는 저질량 계보다 가까운 고질량 병합 사건을 더 쉽게 검출하므로, 이러한 편향은 분석에서 적절히 보정되어야 합니다. 밀집쌍성에서 방출되는 중력파 신호는 [일반상대성이론](#)으로 잘 설명되며, 본 연구에서는 궤도가 거의 완전히 원형에 가깝다는 가정하에 이러한 이론적 예측을 바탕으로 신호를 해석합니다.

전파 방출과 같은 [전자기 신호](#)와 달리, 중력파는 중간에 있는 물질의 영향을 매우 약하게 받습니다. 따라서 중력파의 선택 효과는 높은 정확도로 모델링할 수 있습니다. 이러한 효과를 정량화하기 위해, 우리는 서로 다른 질량, [스핀](#), [적색편이](#)를 가진 수백만 개의 모의 중력파 신호를 실제 검출기 데이터에 주입한 뒤, [탐색 파이프라인](#)이 이 신호들을 얼마나 잘 검출할 수 있는지를 측정합니다. 이러한 측정 결과를 바탕으로 선택 효과를 보정하고, 병합하는 밀집쌍성계의 실제 개체군 분포를 구성할 수 있습니다. 또한 개체군 모델링 오류등으로 인해 발생할 수 있는 다른 계통 오차를 고려하기 위해, 서로 다른 밀집쌍성 개체군 모델들을 사용하여 결과를 검증하고 교차 확인합니다.

주요 결과

질량 분포: GWTC-4.0 분석에서 확인되었던 구조와 특징들은 이번 연구에서도 나타납니다. 그림 1의 왼쪽 패널은 블랙홀 질량 분포를 보여주며, 이는 대체로 이중 멱법칙 분포로 설명할 수 있습니다. 이 분포에는 약 $10M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ 는 [태양 질량](#)을 의미) 부근에 블랙홀들이 상대적으로 많이 분포하는 특징이 있으며, 약 $35M_{\odot}$ 부근에서 기울기의 변화가 나타납니다. 그림 1의 오른쪽 패널은 블랙홀들이 자신과 비슷한 질량을 가진 다른 블랙홀과 쌍을 이루 가능성이 더 높다는 것을 보여줍니다. 이러한 경향은 질량이 약 $35M_{\odot}$ 인 블랙홀에서 더욱 두드러집니다. 일반적으로 별들도 비슷한 질량을 가진 다른 별들과 쌍성을 이루는 경향이 있으므로, 블랙홀에서도 이와 같은 선호가 나타나는 것은 예상 밖의 결과가 아닙니다.

스핀: 천체물리학적 블랙홀의 특성은 질량뿐만 아니라 스핀에 의해서도 결정됩니다. 이러한 스핀은 개별적으로, 또는 질량과 함께, 블랙홀이 탄생한 환경, 형성 경로, 그리고 진화의 역사에 대한 정보를 담고 있을 수 있습니다.

우리는 블랙홀의 스핀을 무차원 스핀 매개변수 χ 로 나타내며, 이 값은 $[0, 1]$ 범위에 있습니다. $\chi = 0$ 인 블랙홀은 전혀 회전하지 않고, $\chi = 1$ 인 블랙홀은 일반상대성이론에서 허용되는 이론적 최대 스핀으로 회전하는 블랙홀을 의미합니다. 분석 결과, 대부분의 블랙홀은 작은 무차원 스핀 값을 가지지만, 그림 2에서 볼 수 있듯이 약 15%의 블랙홀은 $\chi \sim 0.7$ 에 해당하는 큰 스핀 값을 가지는 것으로 나타났습니다.

밀집쌍성의 스핀을 연구하는 또 다른 유용한 방법은 [유효 스핀](#) χ_{eff} 을 사용하는 것입니다.

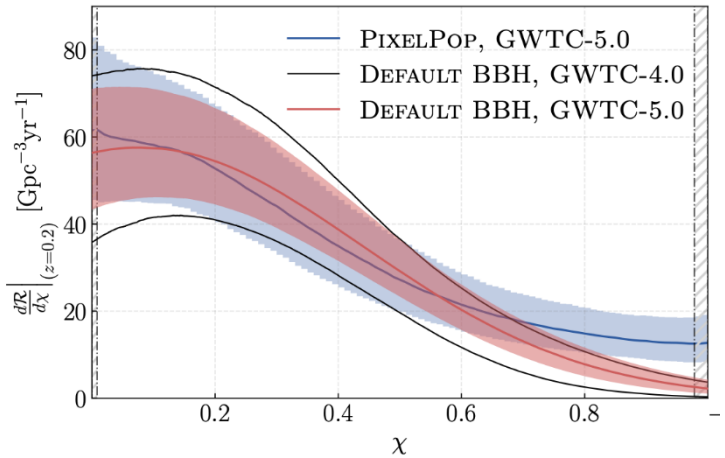


그림 2 (논문 그림 3을 수정하여 사용) — 이 그림은 개별 블랙홀이 얼마나 빠르게 회전하는지를 나타내는 값의 분포를 보여줍니다. 여기서는 일반상대성이론에서 허용되는 최대 스핀에 대한 비율을 나타내는 무차원 스핀 크기로 이를 표현합니다. GWTC-5.0 모델, 즉 파란색과 빨간색 띠는 이전 GWTC-4.0 결과인 검은색 실선과 일치하며, 전반적인 분포 구조를 유지합니다. 대부분의 블랙홀은 작은 무차원 스핀 값을 가지지만, 일부 블랙홀은 큰 스핀 값을 가집니다.

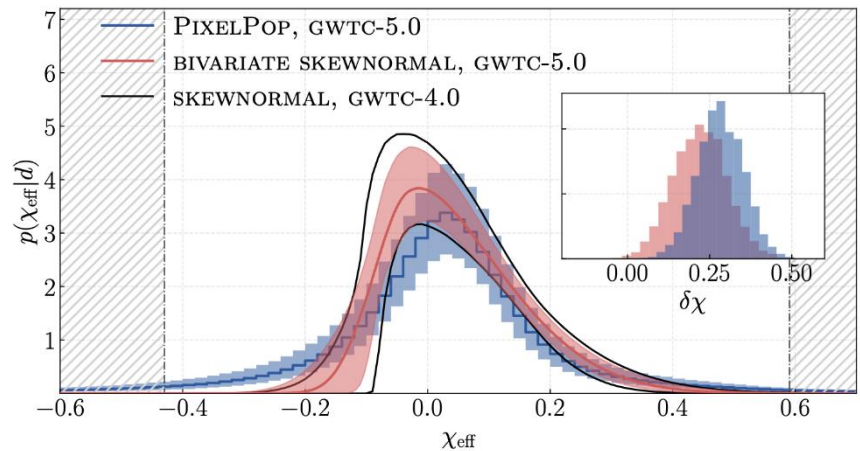


그림 3 (논문 그림 4를 수정하여 사용) — 쌍성계의 유효 스핀 매개변수 χ_{eff} 분포. 삽입된 그림은 이 분포의 비대칭성을 나타내며, 이는 특히 쌍성 블랙홀이 어떻게 형성되는지에 민감한 정보를 제공할 수 있습니다. 그림에는 GWTC-5.0에서 사용한 두 가지 모델에 대한 결과가 함께 제시되어 있습니다.

이는 각 블랙홀의 스핀이 **궤도 각운동량**과 얼마나 정렬되어 있는지를 나타내며, 일반적으로 중력파 관측을 통해 가장 잘 측정되는 스핀 매개변수입니다. 모든 추정값처럼, 이는 하나의 숫자가 아니라 확률분포로 표현됩니다. 이 확률분포는 주어진 데이터에 대해 어떤 물리량이 서로 다른 값을 가질 가능성을 보여줍니다. 그림 3은 유효 스핀의 분포를 보여주며, 이는 블랙홀 형성 메커니즘을 파악하는 데 유용한 지표가 될 수 있습니다. 분석 결과, 이 분포는 0을 기준으로 비대칭적이며, 음의 유효 스핀, 즉 궤도 각운동량과 반정렬된 스핀을 가진 쌍성보다 양의 유효 스핀, 즉 궤도 각운동량과 정렬된 스핀을 가진 쌍성이 더 많은 것으로 나타났습니다. 이러한 비대칭성을 바탕으로, 우리는 쌍성 블랙홀의 최소 9%가 스핀이 정렬된 쌍성을 주로 만들어내는 형성 경로에서 기원한다고 결론 내릴 수 있습니다. 이는 조석 효과나 블랙홀과 별 사이의 상호작용과 같은 과정 때문일 가능성이 있습니다.

빠르게 회전하는 블랙홀들이 어떤 블랙홀들인지 더 자세히 살펴보면, 그림 4에 나타난 것처럼 이들은 두 개의 뚜렷한 질량 규모에서 나타난다는 것을 알 수 있습니다. 이들의 질량은 대략 $10 - 20M_{\odot}$ 범위에 있거나, $45M_{\odot}$ 이상입니다. 이러한 질량 규모에서 이처럼 큰 스핀은 일반적으로 표준적인 별 형성 모형 안에서는 설명하기 어렵습니다. 이는 이전 세대 블랙홀들의 병합으로 만들어진 블랙홀이 다시 병합하는 계층적 병합과 같은 대안적인 형성 메커니즘이 관련되어 있을 수 있음을 시사합니다. 이 가능성은 최근 LVK가 검출한 [GW241110](#)과 [GW241011](#)과도 일치할 수 있습니다. 두 계 모두 계층적 병합과 부합하는 스핀 특징을 보였기 때문입니다. 이러한 연관성은 매우 흥미롭지만, 우리는 아직 높은 스핀을 가진 블랙홀들이 만들어질 수 있는 다른 가능한 메커니즘들을 확실하게 배제할 수는 없습니다.

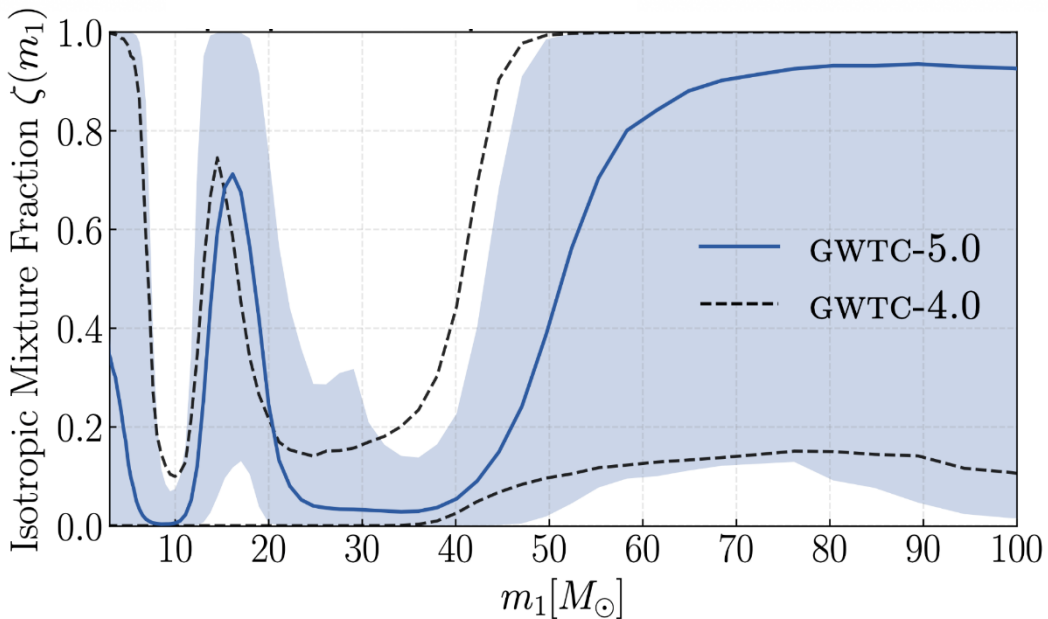


그림 4 (논문 그림 10을 수정하여 사용) — 질량에 따른 빠르게 회전하는 블랙홀을 포함한 계의 비율을 보여줍니다. 빠르게 회전하는 블랙홀은 대략 $10 - 20M_{\odot}$ 범위 또는 $45M_{\odot}$ 이상의 질량을 가지는 것으로 보입니다. 파란색 실선은 GWTC-5.0으로부터 추론된 비율의 **중앙값**을 나타내며, 파란색 음영 영역은 이 비율에 대한 90% **신뢰구간**을 나타냅니다.

결론

GWTC-5.0의 새로운 중력파 검출 사건들은 병합하는 블랙홀과 중성자별의 개체군 분포를 지금까지 가장 깊이 있게 살펴볼 수 있게 해줍니다. 이번 분석에서는 높은 스핀을 가진 블랙홀의 존재를 포함하여, 이러한 분포 안에 있는 여러 흥미로운 특징들이 더욱 명확하게 드러났습니다. 종합하면, 이 데이터셋은 쌍성 블랙홀이 여러 가지 서로 다른 방식으로 형성될 수 있다는 지금까지 가장 명확한 증거를 제공합니다. 몇 달 안에 발표될 것으로 예상되는 o4 데이터를 기반으로 한 최종 업데이트인 GWTC-6.0은 이러한 흥미로운 새로운 발견들에 대해 더 많은 단서를 제공할 것입니다.

더 알아보기:

웹사이트 방문: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Read a free preprint of the full scientific article here: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600045/public/>
or on arxiv: <https://arxiv.org/abs/2605.27226>

Additional papers presenting GWTC-5.0:

- Introductory paper: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500701/public/>
- Methods paper: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600166/public/>
- Results paper: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600152/public/>

Gravitational-Wave Open Science Centre data release for GWTC-5.0: <https://gwosc.org/GWTC-5.0/>.