

중력파로 밝힌 우주 팽창과 일반상대성이론의 최신 제약

[라이고, 비르고, 카그라](#)(LVK) 국제 연구단은 이번엔 새로 발표된 논문에서 우주의 팽창 속도를 새롭게 추정하고, 중력이 [아인슈타인의 일반상대성이론](#)이 예측한 대로 작동하는지 검증했다. LVK의 최신 자료 공개본인 GWTC-5.0(Gravitational Wave Transient Catalog 버전 5.0)에는 우주를 가장 큰 규모에서 탐구할 수 있는 236건의 [중력파\(GW\) 검출](#)이 수록되어 있다. 이는 2025년 8월 공개된 [GWTC-4.0](#)을 바탕으로 수행된 직전 우주론 분석에 사용된 것보다 94건 더 많은 검출이다. 이 자료를 이용한 분석의 주요 목표 중 하나는 현재 우주의 팽창 속도를 나타내는 [허블 상수](#)(H_0)를 측정하는 것이다. 허블 상수의 정확한 값은 여전히 확정되지 못하고 있으며, 이는 측정 방법에 따라서 때로는 아주 다른 결과를 내놓기 때문이다. 이번엔 새롭게 얻은 허블 상수 측정값 $H_0 = 71.0^{+9.0}_{-7.1} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 는 GWTC-4.0을 이용한 이전 측정보다 25.7% 더 정밀하다. 다만 이 측정의 정밀도는 [전자기 복사](#)만을 관측하는 기존 방법으로 얻은 값보다는 여전히 정밀도가 낮다. 논문의 또 다른 주요 목표는 중력파가 실제로 일반상대성이론의 예측에 따라 거동하는지 검증하는 것이었다. 지금까지는 일반상대성이론에서 벗어나는 어떤 증거도 발견되지 않았다. 앞으로 중력파 검출이 계속 축적되면 우주론과 중력 이론에 대한 검증의 정밀도도 계속 향상될 것으로 기대되며, 중력파는 우주를 이해하는 중요한 새로운 도구가 될 것으로 전망된다.

과학적 배경

지난 한 세기 동안 이루어진 눈부신 기술 발전에 힘입어 우주론은 이제 성숙한 과학 분야로 자리 잡았다. 우주론은 우주를 가장 큰 규모에서 연구하는 학문으로, 다음과 같은 근본적인 질문에 답하고자 한다. 우주는 어떻게 시작되었는가? 시간의 흐름에 따라 어떻게 진화해 왔는가? 물질과 에너지, 그리고 중력은 우주의 진화를 어떻게 이끌어 왔는가?

오늘날 우주를 설명하는 표준 우주론 모형은 [“람다-CDM 모형\(\$\Lambda\$ Cold Dark Matter model\)”](#)이다. 아인슈타인의 [일반상대성이론](#)에 바탕을 둔 이 모형은 다양한 천문 관측 결과를 하나의 일관된 틀 안에서 성공적으로 설명해 왔다. 그러나 아직 풀리지 않은 문제들이 많이 남아 있어, 람다-CDM 모형만으로는 우주를 완전하게 설명하지 못할 가능성이 제기되고 있다.

우주론에서 아직 풀리지 않은 가장 큰 수수께끼 가운데 하나는 우주의 현재 팽창률을 나타내는 [허블 상수](#) H_0 의 값이다. 1920년대부터 [우주가 팽창한다](#)는 사실은 알려져 있었다. 우주의 모든 천체는 팽창하는 공간 표면의 점들처럼 시간이 지날수록 서로 멀어진다(그림 1 참조). 지난 한 세기 동안 많은 과학자들이 우주가 정확히 얼마나 빠르게 팽창해 왔는지 측정해 왔지만, 서로 다른 관측 방법으로 얻은 결과는 오늘날까지도 일치하지 않는다. [우리 주변 우주](#)를 이용한 측정에서는 허블 상수가 하나의 값으로 나타난다.

반면, [우주 초기의 신호](#)를 바탕으로 한 독립적인 측정의 결과는 이와 다르다. 오랜기간의 연구에도 불구하고, 두 측정값의 차이는 단순한 측정 오차만으로는 설명하기 어려웠다. [허블 텐션](#)(Hubble tension)이라 불리는 이 불일치는 람다-CDM 모형이 우주를 완전하게 설명하지 못하며, 아직 알려지지 않은 새로운 물리가 존재할 가능성을 시사하는 중요한 단서다. 바로 여기서 중력파가 중요한 역할을 한다. 중력파를 이용하면 허블 상수를 비롯한 여러 우주론적 모수를 기존 방법과는 완전히 독립적으로 측정할 수 있다. 이러한 독립적인 측정은 허블 텐션을 검증하는 새로운 증거를 제공하며, 나아가 그 원인을 밝히는 데에도 중요한 역할을 할 수 있다.

중력파는 가까운 우주의 거리를 측정할 때 사용하는 복잡한 “우주 거리 사다리(cosmic distance ladder)”에 의존하지 않고도, 천체까지의 거리를 직접 측정할 수 있는 방법을 제공한다. 중력파는 우주를 전파하면서 거리가 멀어질수록 점차 약해진다. 따라서 관측된 신호를 분석하고 일반상대성이론이 예측하는 파형과 비교하면, 방출 당시 신호의 본래 세기를 추정할 수 있다. 이를 지구에서 실제로 관측한 신호의 세기와 비교하면 중력파원까지의 거리를 직접 구할 수 있다.

이러한 이유로 중력파원은 흔히 “표준 사이렌(standard siren)”이라 불린다. 이는 천문학자들이 오랫동안 우주 거리를 측정하는 데 사용해 온 표준 촛불(standard candle), 즉 Ia형 초신성처럼 고유 밝기를 알고 있는 천체에 빔댄 표현이다. 우주가 팽창함에 따라 먼 은하들은 우리로부터 멀어지고 있으므로, 중력파로 측정된 거리와 그 은하의 후퇴 속도(적색편이)를 함께 살펴보면 우주의 팽창률을 추정할 수 있다. 중력파는 우주론뿐 아니라 일반상대성이론을 검증하는 강력한 도구이기도 하다. 특히 지금까지 관측 가능한 가장 먼 거리까지 중력이 아인슈타인의 이론이 예측한 대로 작동하는지를 시험할 수 있다. 일부 대안 중력 이론은 중력파가 우주를 전파하는 과정이 일반상대성이론과 조금 다를 수 있다고 예측하며, 이러한 차이는 지구에 도달한 신호의 세기, 나아가 중력파원까지의 거리를 추정하는 방식에도 영향을 미칠 수 있다. 연구단은 이러한 대안 중력 이론 몇 가지도 함께 검증했다.

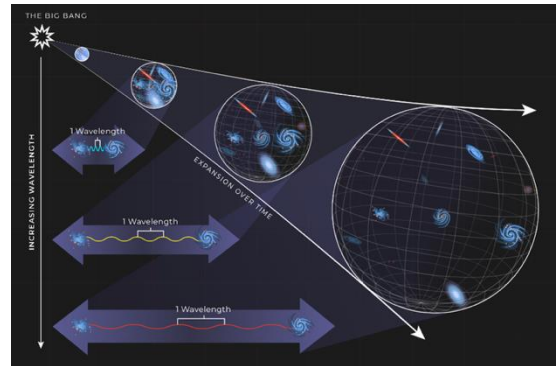


그림 1: 우주가 팽창함에 따라 빛과 중력파의 파장이 늘어나는 과정을 나타낸 그림. 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 우주는 팽창하고 은하들은 서로 멀어진다. 이와 함께 우주를 여행하는 파동(아래쪽 그림들)은 점차 파장이 길어지며, 이는 왼쪽의 ‘파장 증가’ 축으로 표시되어 있다. 이러한 현상을 [적색편이](#)(redshift)라고 하며, 먼 천체에서 방출된 빛과 중력파 모두에 나타난다. [출처: NASA Scientific Visualization Studio]

방법

중력파 신호로 그 중력파원까지의 거리는 계산할 수 있지만, 그 천체가 우리에게서 얼마나 빠르게 멀어지는지(이른바 ‘후퇴 속도’)를 알아내기는 그만큼 쉽지 않다. 천체의 후퇴 속도를 알아내는 가장 좋은 방법은 [적색편이](#)를 측정하는 것으로, 적색편이는 우주 팽창으로 빛이나 다른 복사가 도플러 편이를 겪은 결과다. 이를 위해서는 중력파원을 품은 은하의 정확한 위치를 찾아, [분광기](#)라 불리는 특수 장비를 갖춘 망원경으로 관측해야 한다.

중력파 신호의 정확한 발생원을 정확히 확인한 사례는 지금까지 단 한 번뿐으로, 2017년 8월 17일에 관측된 [GW170817](#)뿐이다. 이 사건은 두 [중성자별](#)의 충돌로 일어났으며, 중력파 신호와 함께 폭발(킬로노바라 불린다)이 동시에 지구에서 관측되었다. 모은하([NGC 4993](#))를 특정해 그 적색편이를 측정함으로써, 이 사건은 [중력파만을 이용해 허블 상수를 처음 측정](#)한 사례가 되었다. 이러한 접근법을 ‘밝은 사이렌(bright siren)’ 방법이라 부른다.

그러나 대부분의 경우에는 어느 은하가 중력파 발생원을 품고 있는지 알 수 없고, 중력파 신호가 하늘의 대략적인 영역에서 왔다는 정보만 얻을 수 있다. 이러한 경우에는 그 영역에 있는 모든 후보 은하를 대규모 은하 목록에서 찾고, 각 은하가 실제 모은하일 확률을 계산하는 접근을 취한다. 이 확률과 각 은하의 적색편이 정보를 통계적으로 결합하면 허블 상수를 측정할 수 있다. 이러한 방법을 “은하 목록(galaxy catalog)” 어두운 사이렌(dark siren) 방법이라 부른다.

은하 목록과 더불어, 중력파원의 질량이 어떻게 분포하는지를 모형화하는 것도 중요하다. 우리가 관측하는 중력파원의 특성 분포는 우주에 실제로 존재하는 분포와 다르기 때문이다. 이는 검출기가 더 무겁거나 가까운 중력파원은 더 쉽게, 더 가볍거나 먼 중력파원은 더 어렵게 검출하기 때문이다. 또한 우주의 팽창 역사나 중력 법칙이 달랐다면(예컨대 [암흑에너지](#)가 예상 밖의 성질을 지녔다면), 실제 집단과 관측 집단의 특성 분포 사이의 관계도 달라질 것이다. 따라서 예상되는 중력파원 집단의 분포를 실제 관측된 분포와 비교하고, 검출 확률의 차이, 또는 “[선택 편향](#)(selection bias)”를 정확히 반영하면, 은하 목록을 사용하지 않고도 허블 상수와 같은 우주론적 매개변수를 측정할 수 있다. 이러한 접근법을 “스펙트럼 사이렌(spectral siren)” 방법이라 부른다.

스펙트럼 사이렌 방법과 은하 목록을 결합하면, 은하와 중력파 양쪽의 분포 정보를 함께 활용해 더 나은 통합 어두운 사이렌 측정값을 얻을 수 있다. 어두운 사이렌 하나만으로는 밝은 사이렌 방법보다 정밀도가 훨씬 낮지만, 어두운 사이렌의 수가 밝은 사이렌보다 훨씬 많기 때문에, 이들을 결합한 결과는 밝은 사이렌에 견줄 만한 정밀도에 이른다. 최종 허블 상수 결과는 이 모든 방법을 아울러, 이용 가능한 모든 중력파 정보로부터 하나의 완전한 표준 사이렌 측정으로 종합한 것이다.

결과

그림 2는 GWTC-5.0 자료의 여러 조합으로 구한 H_0 값의 [사후확률분포](#)를 보여 준다. 검은 곡선은 어두운 사이렌과 밝은 사이렌 GW170817을 결합한 가장 정밀한 결과다. 이 곡선 봉우리의 위치와 폭에서 $H_0 = 71.0^{+9.0}_{-7.1} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 를 얻는다. 여기서 위, 아래 첨자로 붙은 숫자는 68% [신뢰수준](#)에서의 측정 오차를 나타낸다.

이번 결과는 [직전 LVK 자료 공개본](#) 때보다 정밀도가 25.7% 높아졌는데, 주로 분석에 포함한 사건 수가 늘어난 덕분이다. 사건이 늘면서 중력파원의 질량 분포를 훨씬 잘 제약할 수 있게 되었다.

은하 목록까지 포함하면 스펙트럼 사이렌만 썼을 때보다 정밀도가 7.4% 더 향상되며, 이는 GWTC-4.0에서 나타난 비슷한 은하 목록 향상과 일치한다.

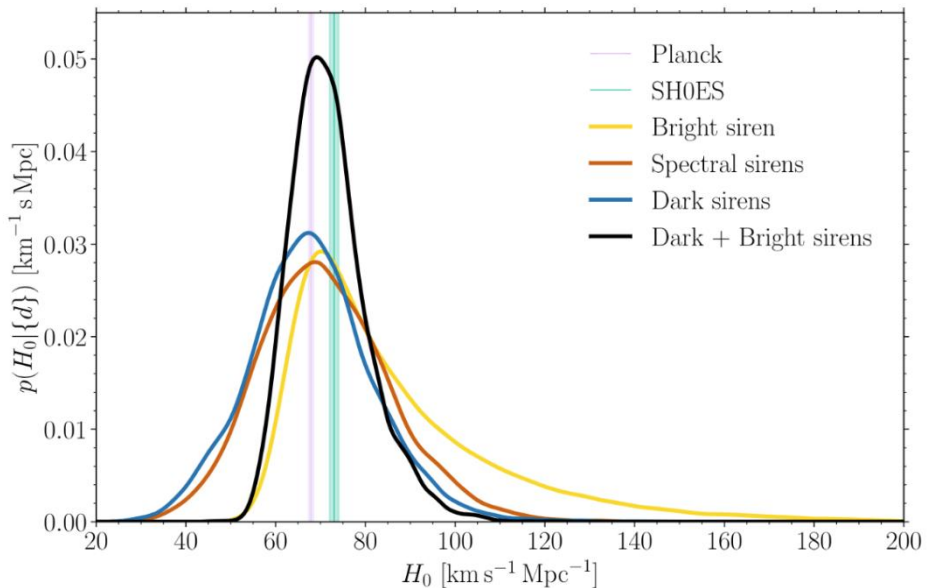


그림 2. (논문의 그림 4) 허블 상수(H_0) 측정 결과. 최적 추정값은 어두운 사이렌 분석과 GW170817의 밝은 사이렌 결과를 결합해 얻는다(검은색). 비교를 위해 어두운 사이렌만(파란색), 스펙트럼 사이렌(주황색), 밝은 사이렌 하나만(노란색)으로 얻은 결과도 함께 표시하였다.

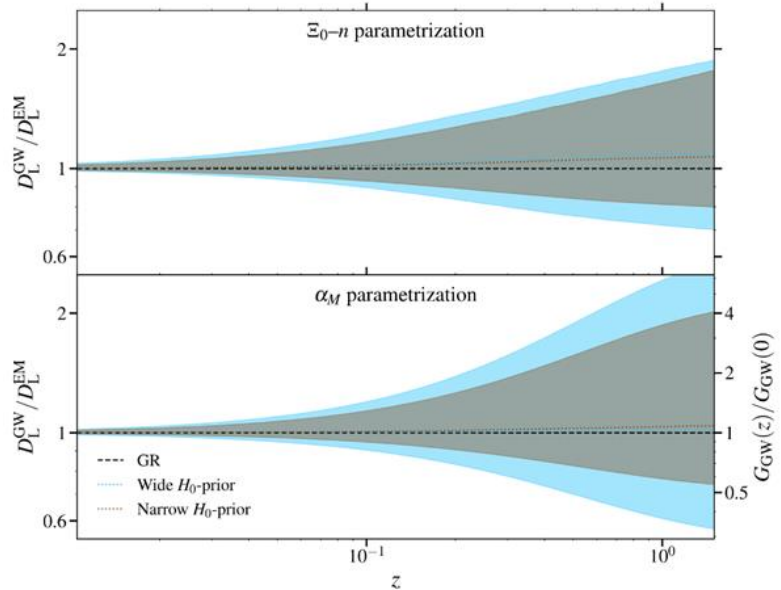
더 알아보기:

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



그림 3은 중력파가 팽창하는 우주를 가로질러 나아가는 방식이 일반상대성이론에서 얼마나 벗어날 수 있는지에 대한 제약을 제시한다. 구체적으로는 중력파로 잰 거리(D_L^{GW})와 그에 짝지어진 빛 검출로 잰 수 있는 거리(D_L^{EM})의 비를 살펴본다. 일반상대성이론이 옳다면 이 두 거리는 정확히 일치해야 하므로, 그 비는 모든 적색편이에서 1이어야 한다. 이 비를 서로 다른 두 모형으로 검증하는데, 두 모형은 중력과 암흑에너지가 상호작용할 수 있는 서로 다른 두 방식을 나타내며, 각 모형에 대응하는 보수 값에 제한을 둔다. 그림 3의 위, 아래 패널은 각 모형의 결과를 보여 주며, 두 결과는 서로 잘 일치한다.

그림 3. (논문의 그림 7) 중력파원으로 잰 거리와, 같은 발생원에서 나온 전자기 방출로 잰 거리의 비를 발생원의 적색편이의 함수로 나타낸 것이다. 중력과 암흑에너지가 상호작용할 수 있는 서로 다른 두 방식을 나타내는 두 모형에 대한 결과다. 위, 아래 패널은 각각 이 효과를 기술하기 위해 채택한 서로 다른 두 보수화 방식 가리킨다. 일반상대성이론이 성립한다면 두 거리는 같을 것으로 기대되므로, 그 비는 모든 적색편이에서 정확히 1이 된다(검은 파선). 색 띠는 GWTC-5.0에서 90% **신뢰수준**으로 얻은 제약을 나타낸다. 파란 띠는 허블 상수에 대한 어떤 사전(prior) 정보도 가정하지 않은 경우이고, 갈색 띠는 H_0 가 이전에 측정된 값에 가깝다고 가정한 경우다. 두 패널 모두에서 결과가 일관되며, 일반상대성이론에서 벗어나는 증거는 발견되지 않는다.



요약과 향후 전망

GWTC-5.0 자료를 이용해 허블 상수의 새롭고 독립적인 측정값을 얻었으며, 일반상대성이론에서 벗어날 가능성에 대한 제약도 개선되었다.

허블 상수의 최적 추정값은 $H_0 = 71.0_{-7.1}^{+9.0} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 로, GWTC-4.0보다 25.7% 더 정밀하다. 이 값은 가까운 우주와 초기 우주에서 얻은 기존 측정값 모두와 잘 부합하지만, 아직 두 측정값 사이의 텐션을 해소할 만큼 정밀하지는 않다.

스펙트럼 사이렌 방법(중력파원 질량의 분포를 이용)은 현재 허블 상수 측정 정밀도를 결정하는 가장 중요한 요소다. 은하 목록에서 얻는 추가 정보는 측정 정밀도를 7.4% 높이며, 이는 GWTC-4.0과 비슷한 수준이다. 스펙트럼 사이렌의 측정 오차는 사건 수의 제공에 반비례해 줄어들기 때문에, 사건이 하나씩 추가될수록 정밀도 향상 폭은 점차 작아진다. 이는 다가오는 GWTC-6.0을 위해 더 나은 은하 목록과 더 많은 중력파 자료를 확보하는 것이 중요한 이유이기도 하다.

이번 연구에서는 우주의 가장 큰 규모에서 일반상대성이론을 벗어나는 증거는 발견되지 않았으며, 모형에 따라 제약은 이전보다 약 20~50% 더 엄격해졌다.

이번 결과는 더 많은 중력파 자료와 더욱 견고한 통계 기법을 바탕으로, 중력파 우주론이 현대 물리학의 가장 큰 미해결 문제들을 해결하는 데 점점 더 중요한 역할을 하게 될 것임을 보여 준다.

더 알아보기:

연구단 홈페이지

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)

전체 논문 무료 보기:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600018/public/>

arxiv: <https://arxiv.org/abs/2605.27227>

GWTC-5.0 자료 공개 (Gravitational-Wave Open Science Centre): <https://gwosc.org/GWTC-5.0/>.

용어 설명

- 메가파섹(Mpc):** 우주론에서 흔히 사용하는 거리 단위. 1메가파섹은 100만 파섹에 해당하며, 1파섹은 약 3.26광년(약 $3.086 \times 10^{16} \text{ m}$)이다.
- 허블 상수:** 우주가 현재 얼마나 빠르게 팽창하는지를 나타내는 물리량으로, 기호 H_0 로 표기한다(아래첨자 0은 현재 시점을 뜻한다). 현재 값은 약 $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 이며, 이는 거리가 1메가파섹(약 326만 광년) 더 멀어질수록 은하가 우리에게서 멀어지는 속도가 약 70 km s^{-1} 씩 더 커지는 것으로 해석할 수 있다.
- 적색편이:** 빛이나 중력파처럼 파동을 내는 발생원이 관측자로부터 멀어질 때 파장이 길어지는 현상. **우주의 우주론적 팽창**으로 은하와 같은 천체들이 우리에게서 멀어지면서, 그 천체들에서 오는 빛과 다른 복사의 파장도 더 길어진다.
- 사후확률분포:** 관측 자료와 기존에 알고 있던 정보를 함께 이용해, 어떤 물리량이 가질 수 있는 값들의 가능성을 확률로 나타낸 분포 그림. 일반적으로 **베이즈 추론**(Bayesian inference)을 이용해 계산한다.