중력파를 이용한 핵물리학 연구

DOI: 10.3938/PhiT.27.046

김영민·곽규진·현창호·이창환

Nuclear Physics with Gravitational Waves

Young-Min KIM, Kyujin KWAK, Chang Ho HYUN and Chang-Hwan LEE

Gravitational waves (GW170817) generated by the merger of a neutron star binary have been detected and followed by the observations of gamma-ray bursts (GRB 170817A) and electromagnetic afterglows (SSS17a/AT2017gfo). These series of observations have opened a new era of multi-messenger astrophysics. In addition, from the analysis of GW170817, the tidal deformability of neutron star has been estimated for the first time. The estimated tidal deformability has led to constraints on the equations of state of a neutron star, which strongly depend on the properties of nuclear matter, such as its symmetry energy. In this article, firstly, we review the connection between nuclear physics and the equations of state of a neutron star. Secondly, we discuss the gravitational waves arising from the mergers of neutron star binaries and the tidal deformability of neutron stars. Finally, we summarize the future prospects for nuclear physics in the new era of multi-messenger astrophysics.

다중신호 천체물리 시대의 중성자별 연구

2017년 노벨물리학상이 중력파 검출에 결정적인 기여를 한

저자약력

김영민 박사는 부산대학교 물리학과에서 이학사, 석사, 박사 학위를 받고, 서울대학교, 부산대학교를 거쳐 현재 울산과학기술원에서 박사후 연구원으로 재직 중이다.

곽규진 교수는 서울대학교 물리학과에서 이학사, 석사 학위, 뉴욕주립대학교 스토니부룩 캠퍼스에서 박사 학위를 받고, 조지아 대학교 및 한국천문연구원을 거쳐 2012년부터 울산과학기술원에 재직 중이다.

현창호 교수는 서울대학교 물리학과에서 이학사, 석사, 박사 학위를 받고 성균관대학교에서 박사 후 연구원을 거친 후 2008년부터 현재까지 대구대학교 물리교육과에 재직 중이다.

이창환 교수는 서울대학교 물리학과에서 이학사, 석사, 박사 학위를 받고, 뉴욕주립대학교 스토니부룩 캠퍼스, 고등과학원 및 서울대 BK물리사업단을 거쳐 2003년부터 부산대 물리학과에 재직 중이다.(clee@pusan.ac.kr)

라이너 바이스(Rainer Weiss, MIT), 배리 배리시(Barry Barish, Caltech), 킵 손(Kip Thorne, Caltech) 3인에게 수여되었다. 중력파 연구에 수여된 노벨물리학상은 중력파 천문학 및 다중신호 천체물리 시대의 시작과 함께 우주 연구에 새로운 활력소가 되고 있다. 그런데, 핵물리학 연구에 매우 의미있는 중력파 검출 소식은 노벨물리학상 수상자가 발표된 직후인 2017년 10월 16일에 발표되었다. 블랙홀이 아닌 중성자별 쌍성의 병합에서 발생한 중력파 GW170817 검출 소식이 바로 그것이다. 블랙홀과 달리 중성자별은 내부 구조를 가지고 있으며 중성자를 비롯한 많은 물질을 포함하고 있기 때문에, 중성자별 쌍성의 병합 과정에서 중력파뿐 아니라 다양한 파장의 전자기파를 방출할 수 있는데, 바로 GW170817에서 중력파와 전자기파 등 다양한 신호를 동시에 관측하는 데 성공하였다.^[1] 그림 1에 중력파(GW170817) 검출 이후 이루어진 전자기파 관측의 파장대 별 관측 시간이 정리되어 있다. 중력파 GW170817 검출 후 약 1.7초 뒤에 GRB170817A로 명명된 감마선 관측이 이루어졌으며, 이후 수일에 걸쳐 가시광선, 엑스선, 자외선 및 전파에 걸친 후광 관측이 이루어졌다. 중성자별 쌍성은, 병합 과정에서 많은 중성자가 외부로 방출될 수 있으므로, 중성자 밀도가 매우 높은 핵융합 환경이 조성되어 초신성에서는 형성되기 어려운 금이나 우라늄 같은 무거운 원소의 주요 생성 원인으로 지목 받고 있다. 특히 충돌 과정에서 중성자별 내부 고밀도 물질의 정보를 중력파 및 전자기파의 형태로 방출할 수 있으므로, 중성자별 쌍성의 병합은 고밀도 핵물질 특성 연구에 새로운면서도 중요한 단서를 제공할 수 있다.

중력파를 이용하여 고밀도 물질의 특성을 연구할 수 있는 대표적인 물리량이 중성자별의 조력 변형성(tidal deformability)인데, GW170817의 중력파 분석으로 중성자별의 조력 변형성이 최초로 측정되었다.^[2] 조력 변형성은 외부 중력장에 의해 중성자별이 반응하는 정도를 나타내는데, 중성자별 내부 고밀도 핵물질의 상태에 의존한다. GW170817의 조력 변형성 측정 결

REFERENCES

- [1] LIGO Scientific Collaboration, *et al.*, The Astrophysical Journal Letters **848**, L12 (2017).
- [2] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Physical Review Letters **119**, 161101 (2017).

Fig. 1. Timeline of multi-messenger observations of binary neutron star mergers, including gravitational waves (GW170817), gamma-ray bursts (GRB170817A), and afterglow (optical, X-ray, and radio) observations. [Courtesy of Myungshin Im / Center for the Exploration of the Origin of the Universe]

과, 매우 큰 중성자별의 최대 질량을 주는 압력이 큰 상태방정식을 제외시킬 수 있었다. 이 글에서는 먼저 중성자별의 상태방정식과 핵물리학의 상관관계를 살펴본다. 특히, 국내에서 개발된 고밀도 핵물리 상태방정식(KIDS)의 주요 특성을 정리한다. 다음으로 중성자별의 조력 변형성이 어떻게 중력파를 통해 측정될 수 있는지 살펴본다. 마지막으로 중력파를 이용한 핵물리 연구의 미래 가능성을 논의한다.

중성자별 상태방정식과 핵물리 연구

1. 원자핵의 단순함

원자핵을 형성하는 힘은 강한 핵력이고 강한 핵력의 기본 이론은 양자색소역학(quantum chromo dynamics, QCD)으로 알려져 있다. 여러 원리적, 기술적 문제로 인해 QCD를 원자핵에 직접 적용하는 것은 매우 어려운 일이어서 강한 핵력은 중간자 교환 모형, 평균장 모형, 유효장 이론과 같은 QCD 유사 이론을 통해 기술되고 있다. 강한 핵력을 제대로 기술하기 위

해서는 다양한 형태의 항, 예컨대 중심력, 스핀-궤도 결합력, 텐서력 등등이 필요하기 때문에 보통의 핵력 모형은 10개가 넘는 서로 다른 형태의 항을 포함하는 복잡한 구조를 가진다. 이렇듯이 난해한 강한 핵력에 의해 형성된 원자핵은 역설적이게도 놀랍도록 단순한 특성을 가지고 있다.

한 원자핵에 포함된 양성자와 중성자의 수의 합을 질량수 A 라 하는데 원자핵의 질량이 A 에 비례하는 것은 당연한 일이다. 놀라운 점은 많은 실험을 통해 구형 원자핵의 반지름이 $A^{\frac{1}{3}}$ 에 비례하여 질량 밀도 $\rho = \frac{M}{V}$ 에서 $M \propto A$, $V \propto r^3 \propto A$ 가 되어 밀도가 핵종에 상관없이 거의 일정하다는 것이다. 현재까지 알려진 안정 원소는 약 300여 개, 불안정 원소까지 더하면 1,000개 이상이 발견되었는데 이 많고 다양한 원자핵의 밀도가 거의 동일하다는 것은 실로 마술과도 같은 일이다. 어쩌면 원자핵이 형성되는 원리는 아주 단순할 수도 있을 것이다.

2. 중성자별

원자핵의 밀도를 핵포화밀도(ρ_0)라 부르는데 그 값이 대략 $\rho_0 \approx 2.7 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ 로서 한 변의 길이가 1 cm인 정육면체에 2천 7백억 킬로그램의 물질이 들어있는 것과 같은 상태이다. 우리의 몸을 비롯한 지구상의 물질은 이렇게 특이한 녀석들로 만들어져 있다. 원자핵은 지구상에 자연적으로 존재하는 밀도가 가장 높은 물체이며 이보다 더 높은 밀도를 갖는 물질은 지구상에 존재하지 않는다. 하지만 눈을 돌려 밤하늘을 아름답게 밝히는 별들을 보면 이야기는 달라진다. 중성자별은 1934년 바데(Baade)와 즈위키(Zwicky)가 초신성 폭발 후 남은 매우 작으면서 무거운 별로 그 존재를 예측했다.^[3] 채드윅(Chadwick)이 중성자를 발견한 것이 1932년으로 2년 전에 불과하니 바데와 즈위키의 가설은 당시로는 상당히 앞선 ‘상상’이라 할 수 있다. 1934년 이후 긴 시간 동안 ‘가설의 용’으로만 남아있던 중성자별은 1967년 벨(Jocelyn Bell)이 맥동성(pulsar)을 발견함으로써 그 실체가 입증되었다.^[4]

이후 최근에 이르기까지 중성자별은 맥동성, 쌍성, 엑스선 폭발(X-ray burst) 등 다양한 천체 현상에서 발견된다. 중력과 관측 이전까지 중성자별의 질량은 쌍성계를 통해 측정되었는데 질량은 대부분 $1.2 \sim 1.5 M_\odot$ ($M_\odot$ 는 태양 질량으로 약 $2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$)의 범위에 있으며 반경은 대략 $10 \sim 15 \text{ km}$ 정도로 예상된다. 구형의 모양, 질량 $1.5 M_\odot$, 반경 12 km 를 가정하면 평균 밀도는 $\rho_{\text{avg}} = 1.5 M_\odot / 4\pi R^3 / 3 \approx 4.1 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ 가 되어 원자핵의 평균 밀도인 $\rho_0 \approx 2.7 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ 를 훨씬 능가하는 높은 밀도이다. 지구의 자연 상태에서는 존재하지 않는 이렇게 높은 밀도에서 물질은 어떤 입자들로 구성되어 있으며 물질은 어떤 상태에 있을까? 이 질문에 대한 해답은 고밀도 핵물질 모형이 예측하는 상태방정식들 중 하나에 있을지 모른다.

3. 고밀도 핵물질의 상태방정식

학부 또는 대학원 열역학 수업 시간에 배우는 상태방정식은 물질의 압력, 부피, 온도의 상관관계를 일컫는다. 쉬운 보기로 부피가 일정한 PET 병을 뜨거운 물에 담그면(온도가 높아지면) PET 병이 팽팽해지는(압력이 커지는) 식으로 변수들이 연관되어 있다. 높은 밀도 핵물질의 상태방정식도 비슷하다. 핵포화 밀도에서는 인력과 척력이 균형을 이루어 물질이 평형 상태(압력이 0)에 있지만 밀도가 커질수록 입자 간 거리는 가까워지고 짧은 거리에서는 척력이 더 강하게 작용하여 압력이 증가하게 된다. 가까운 거리에서 강한 핵력에 의한 압력이 별을 수축시키려는 중력과 균형을 이룰 때 만들어지는 것이 중성자별이다. 즉 중성자별의 강한 중력에 대항하는 가장 중요한 힘은 강한

Fig. 2. Nuclear symmetry energy from nuclear many-body models. [Courtesy of Lie-Wen Chen/EPJ Web of Conferences 88, 00017 (2015)]

핵력의 척력이다. 앞서 핵력은 복잡한 형태를 띠고 있다고 설명했는데 입자 간 거리가 짧아지면(고밀도 핵물질의 경우 입자 간 평균 거리는 1 fm 보다 가깝다) 강한 핵력에 대한 불확실성은 보다 커지게 된다.

원자핵의 평균 밀도인 핵포화밀도는 매우 높은 밀도이다. 따라서 원자핵은 고밀도 핵물질 모형을 만드는 데 좋은 그리고 중요한 출발점을 제공한다. 현재 원자핵을 기술하는 모형은 수백 개에 이르는데 대부분의 모형은 안정 원소의 주요 특성을 잘 설명하고 있다. 하지만 원자핵을 이용하여 만든 모형을 무한 핵물질에 적용하면 그 양상은 완전히 달라진다. 원자핵 모형들이 예측하는 핵포화밀도에서 핵물질의 특성은 매우 다양한데 최근 들어 활발하게 발표되는 실험 결과와 비교하면 상당수의 모형이 핵포화밀도에서 핵물질의 특성을 맞추지 못한다. 밀도를 높여서 핵포화밀도의 2배 이상이 되면 모형들이 예측하는 상태방정식은 천차만별이 되어서 그야말로 ‘무정부 상태’나 다름없어 보이게 된다. 일례로 그림 2는 여러 모형으로부터 얻은 핵대칭에너지(nuclear symmetry energy)를 비교하여 보여준다. 핵포화밀도 근처에서는 모형 예측 값이 비교적 비슷하지만 밀도가 높아지면서 예측이 완전히 발산하는 양상을 보인다. 이 대목에서 핵물질 모형은 중대한 도전에 직면한다. 핵물

REFERENCES

- [3] W. Baade, F. Zwicky, Phys. Rev. **45**, 138 (1934).
- [4] A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott and R. A. Collins, Nature **217**, 709 (1968).

질 모형이 적용 가능한 범위, 달리 표현해서 예측이 믿을 만한 밀도는 어디까지인가? 또한 예측의 불확실성은 어느 정도인가? 최근 들어 이 문제들이 이론 핵물리학계에서 중요한 의제로 급부상하고 있다.

현재까지 개발된 대부분의 원자핵 또는 핵물질 모형은 실험에서 측정된 원자핵의 특정 성질을 정확하게 기술해 내는 데 초점이 맞춰져 왔으며 상기한 두 문제를 심각하게 고민한 경우는 거의 없었다. 최근 국내 연구진에서 섭동이론(perturbation theory)과 밀도범함수이론(density functional theory)을 기반으로 하여 두 질문에 해답을 제시할 수 있는 모형을 개발하였다.^[5] 모형 이름은 KIDS라 붙여졌는데 KIDS는 Korea(국가 이름)와 IBS, Daegu, Sungkyunkwan(최초 개발자 소속 기관)의 첫 글자를 모은 약칭이다. KIDS 모형이 기존의 모형들과 핵심적으로 다른 점은 일련의 규칙을 가정하고 이를 이용하여 핵물질 모형을 구축하는 것이다. KIDS 모형은 1) 에너지밀도범함수(energy density functional)를 전개하는 규칙, 2) 모형 상수를 정하는 규칙, 3) 모형을 원자핵에 적용하는 규칙을 바탕으로 구성되었는데, 마지막 규칙은 이 규칙들을 엄밀히 지키면서 체계적으로 모형을 개발하고 이용하는 것이다. 모형 예측의 불확실성을 체계적으로 추산하는 방법의 개발은 현재 고밀도 핵물질 물리학에서 가장 중요한 문제 중 하나인데, 이 방면에서 KIDS 모형은 선도적인 위치에서 연구를 수행하고 있다.

중력파와 중성자별 조력 변형성

1. 중력파 검출

라이고 검출기는 마이켈슨(Michelson) 간섭계와 파브리-페로 공진기(Fabry-Pérot cavity)를 이용한 거대 실험시설이다. 지표면에 건설되었기 때문에 영향을 피할 수 없는 지질학적 잡음과 이것의 영향을 받는 레이저 시스템의 한계로 인해 천체 관측이 가능한 주파수 영역은 약 20 Hz ~ 2000 Hz가 된다. 지금까지 관측된 중력파 신호들 모두 이 주파수 영역 안에서 측정된 신호들이다. 일반적으로 두 개의 별이 쌍성을 이루어 궤도 운동을 함으로써 중력파가 발생하게 되고, 이로부터 궤도 운동에너지를 잃음으로써 서로 점점 다가가게 되며 결국 최종적으로 충돌하여 하나의 고밀도 천체를 이루게 된다. 그러므로 관측된 중력파 신호들은 모두 중성자별 또는 블랙홀들이 오랜 시간 동안 점차 다가가는 궤도 운동을 한 후, 라이고 검출기가 관측 가능한 중력파의 세기와 주파수를 가질 만큼 두 별이 가까워졌을 때부터 발생된 신호를 관측한 것이다. 관측한 블랙홀 쌍성들의 경우 총 질량이 태양 질량의 수십 배에 달할 정도로 매우 무겁기 때문에 관측 가능한 주파수 영역에 들어선 이후

수에서 수십 밀리 초의 시간만 관측이 가능하지만, GW170817과 같은 중성자별 쌍성의 경우 수십 초간의 관측이 가능하게 된다.

중력과 신호는 이론적인 중력파형을 이용하여 정합필터(matched filtering) 방법을 통해 관측한 중력과 데이터로부터 확인될 수 있다. 이를 위해서는 검출기의 뛰어난 성능과 함께 중력파형을 이론적으로 정확히 알아내는 것이 필요하다. 두 별의 궤도운동으로 발생하는 중력파는 두 별이 충돌하기 직전까지는 포스트 뉴토니안 근사법을 이용하여 비교적 정확히 알 수 있으며, 관측한 신호의 길이가 길수록 더욱 정확한 중력파 신호를 분석해 낼 수 있다. 두 별이 충돌하는 과정과 충돌 후의 중력파형은 수치상대론을 이용한 시뮬레이션을 통해서 얻어진 결과로부터 구해진다. 중성자별 쌍성 병합 신호 GW170817은 충돌 과정과 그 후의 신호가 관측되지 않았지만, 충돌 직전까지 수십 초의 파형을 관측함으로써 중성자별 쌍성 병합 신호임을 확인할 수 있었다.

2. 중성자별 조력 변형성

GW170817의 관측은 중성자별의 병합과정에서 관측된 중력파 신호와 더불어 후속 전자기파 관측이 이루어져 다중신호 천문학 역사에서 중요한 사건일 뿐만 아니라, 중성자별의 내부 고밀도 물질상태를 연구하는 핵물리 연구 분야에도 중요한 사건이다. GW170817의 신호 분석으로부터 중성자별의 조력 변형성(tidal deformability)이 관측되었으며, 이는 중성자별 내부 상태방정식에 대한 새로운 제약 조건이 되기 때문이다. 중성자별의 조력 변형성은 안정적인 구대칭 구조를 가진 중성자별이 정적인 외부 4중극자 중력장의 영향으로 4중극자 모멘트가 유도될 때, 외부 4중극자 중력장과 유도된 중성자별 4중극자 모멘트의 관계를 나타내는 변수이며, 중성자별의 내부를 이루는 구성 물질과 물질 간의 상호작용에 의존적이게 된다. 조력 변형성은 차원이 있는 변수 λ 또는 차원이 없는 변수 Λ 로 표현되는데, 별의 표면에서 정의되는 조력 러브수(tidal Love number) k_2 계산을 통해 이론적으로 얻을 수 있으며, $\Lambda =$

$G\lambda(c^2/GM)^5 = \frac{2}{3}(Rc^2/GM)^5 k_2$ 와 같은 관계를 가지고 있다.^[6] 그림 3은 알려진 5개의 중성자별 방정식과 2절에서 소개된 KIDS 모형을 이용하여 중성자별 질량에 따른 조력 변형

REFERENCES

- [5] P. Papakonstantinou, T.-S. Park, Y. Lim and C. H. Hyun, Phys. Rev. C **97**, 014312 (2018).
- [6] Y.-M. Kim, K. Kwak, Y. Lim, C. H. Hyun and C.-H. Lee, New Physics: Sae Mulli **68**, 707 (2018).

Fig. 3. Dimensionless tidal deformability (Λ) of a single neutron star. Horizontal grey line indicates the upper limit of Λ . Cross points of various curves with a vertical dashed line correspond to Λ at $M = 1.4 M_{\odot}$.^[6]

성 Λ 를 나타내고 있다. 회색 수평선은 GW170817으로부터 추산한 Λ 의 상한값을 나타내는데, 상태방정식 이론모형 MS1, MS1b는 상한값을 넘기고 있으며 베이지안 추론을 이용한 데이터분석에서도 MS1, MS1b 모형은 90% 신뢰구간을 벗어나므로 중성자별 쌍성계에서 중성자별을 위한 상태방정식 모형에서 제외되어야 한다.^[7]

이러한 중성자별 조력 변형성은 포스트 뉴토니안 근사법으로 표현되는 중력파형 모델에서 5차 항 이후에 나타나게 되지만, 중력과 검출기의 검출 가능 주파수 영역 안에서 분석 가능한 충분한 길이의 시간에 걸쳐 파형을 관측하게 되면, 관측 시간 동안 누적된 파형의 위상으로부터 중성자별의 조력 변형성 효과를 확인해 볼 수 있다. 그림 4에는 고정 위상 근사(stationary phase approximation)를 이용한 중력파형 모형에서 조력 변형성 효과가 나타나는 위상항을 10 Hz부터 주파수에 따라 누적한 위상변화 $\Delta\psi_{6PN}^{tidal}$ 를 2π 로 나눈 파형의 개수 ΔN_{cycle} 를 보여주고 있다. 비교를 위해 점입자 근사로 얻어진 포스트 뉴토니안 근사의 3.5차항(3.5PN) $\Delta\psi_{3.5PN}^{pp}$ 을 같이 표시하였으며, 주파수에 따라 누적될수록 3.5PN 점입자 근사항에 가까워짐을 보이고 있다. 또한, 약 600 Hz 부근에서 조력 변형성 항 ΔN_{cycle} 이 0.5에 도달하게 되는데, $\Delta N_{cycle} = 0.5$ 이면 보강과 상쇄 간섭이 서로 바뀌어 관측이 용이하게 된다.

이처럼 중력파를 이용한 중성자별 관측은 천문학뿐만 아니라 핵물리학 연구를 위한 도구로써 가능성이 열리고 있으며, 계속적으로 이어지는 중력과 관측으로부터 더 많은 중성자별 관측이 이루어질 경우 중성자별 상태방정식과 이와 관련된 많은 분야들에 대해 정밀 연구가 가능하게 될 것이다.

Fig. 4. The number of wave cycles accumulated from 10 Hz to the final frequency of gravitational wave (f_{GW}). Horizontal dashed line indicates $\Delta N_{cycle} = 0.5$ above which the contributions become significant for the measurements from gravitational waves.^[6]

전 망

블랙홀 및 중성자별 쌍성계에서 방출되는 중력과 관측을 통해 다중신호 천체물리학의 시대가 활짝 열렸다.^[8] 다양한 파장의 전자기파를 하늘의 같은 지점에서 동시에 관측할 수 있었기 때문에 이전 전통적인 천문학에서도 좁은 의미의 다중신호 천체물리학이 이미 존재했다고 할 수 있다. 하지만, 중력파의 관측과 함께 전자기파가 아닌 전혀 새로운 신호를 포함한 진정한 의미의 다중신호 천체물리학이 시작된 것이다. 또 다른 비전자기파 신호인 중성미자 관측 또한 이미 가능하다는 점을 고려하면 천문학의 탐구 영역은 기존 전자기파를 넘어 계속 확장될 전망이다.^[9]

다중신호 천체물리학 관점에서 보면 중성자별을 포함한 쌍성계가 블랙홀만을 포함한 쌍성계보다 훨씬 매력적이다. 블랙홀 쌍성계가 중성자별 쌍성계보다 더 무겁고 중력과 신호의 세기가 쌍성계의 질량에 비례하기 때문에 현재 관측된 중력과 신호는 대부분 블랙홀 쌍성계에서 방출된다. 하지만, 블랙홀 쌍성계에는 전자기파나 중성미자를 방출할 수 있는 물질이 존재하지 않기 때문에 블랙홀 쌍성계는 단지 중력파만을 방출한다. 이와 달리, 중성자별 쌍성계는 중력파와 중성미자, 전자기파를

REFERENCES

- [7] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 161101 (2018).
- [8] 현재까지 관측된 중력파 신호 목록: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_gravitational_wave_observations.
- [9] 중성미자 망원경을 포함한 중성미자 검출 실험 목록: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_neutrino_experiments.

모두 방출할 수 있다. 2017년 8월 처음으로 관측된 중성자별 쌍성계(GW170817)가 다중신호 천체물리학의 의미 있는 사건인 이유이다. 중성미자 또한 중성자별 병합 과정에서 방출될 것으로 예상되지만 현재 작동 중인 중성미자 망원경으로는 관측이 불가능하다.

현재까지 관측된 중성자별 쌍성계는 GW170817로 하나뿐이다. 하지만, 2019년에 시작될 라이고-비르고(LIGO-VIRGO) 세 번째 관측(O3)을 통해 더 많은 중성자별 쌍성계를 관측할 수 있을 것이다. 더 많은 중성자별 쌍성계가 다중신호를 통해 관측되면 개별 중성자별의 특징뿐 아니라 두 중성자별이 병합되는 과정을 보다 더 정확히 이해할 수 있다. 중성자별은 지구 상에서 도저히 구현할 수 없는 거대한 원자핵 덩어리이지만 천체가 보내주는 다양한 신호를 통해 그 구조와 특징을 보다 더 정확히 이해할 수 있는 길이 열린 것이다. 일본에서 현재 건설 중인 또 다른 중력과 검출기인 카그라(KAGRA) 또한 2019년 말 O3 관측에 참여할 것으로 기대된다. 4기의 중력과 검출기(라이고 2기, 비르고 1기, 카그라 1기)가 동시에 관측할 경우 중력과 신호의 위치를 지금보다 더 정확히 알 수 있어 다중신호 관측의 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있다.

이론적인 측면에서, “중성자별 쌍성계가 어떤 과정을 통해 관측되는 다중신호를 방출하는가?”하는 질문은 여전히 대답하기 어렵다. 앞서 언급한 대로, 중성자별을 구성하는 고밀도 핵물질의 상태를 정확히 알아야 하고 대용량 컴퓨터(supercomputer)를 사용한 전산 모사(numerical simulation)를 통해 병합 과정을 구현하는 연구도 필요하다. 아울러, “우주에 존재하는 별들이 어떤 진화 과정을 거쳐 중성자별 쌍성계를 형성하는가?”하는 질문에도 답해야 한다.

다양한 천체현상 중 가장 대표적인 다중신호 현상은 초신성 폭발이다. 우리 은하와 비슷한 은하에서 초신성이 폭발할 확률은 1세기 당 2개 정도이지만 전자기파 관측을 통해 최후로 관측된 우리 은하 내 초신성 폭발은 케플러 초신성으로 1604년에 일어났다. 많은 과학자들이 우리 시대에 우리 은하 내 초신성 폭발을 예상하고 있고 이러한 우주적인 사건은 중력파, 중성미자, 및 다양한 파장의 전자기파를 방출함으로써 그 흔적을 우리에게 남길 것이다. 중성자별은 초신성 폭발의 잔해로 남은 별이다. 초신성 폭발을 다중신호로 관측함으로써 중성자별 형성 과정을 실시간으로 지켜 볼 수 있을 것이다.