

## GEO600을 이용한 SGR1935+2154에서 발생한 우리 은하 고속 전파 폭발과 동시 발생한 중력파의 탐색

고속 전파 폭발(Fast radio bursts, FRBs)은 활동적인 전파 신호의 한 종류로, 일반적으로 약 천분의 일 초 정도 지속되며, 지구에서 관측된 수천 개의 FRB 중 대다수는 우리 은하 외부의 매우 먼 거리에서 발생했다. 외부은하의 FRB가 관측될 수 있는 이유는 그들의 극도로 큰 밝기와 관련이 있는데, 한 FRB는 몇 분의 일초 동안에 태양보다 약 10만 배에서 최대 10조 배 더 밝을 수도 있다! 몇몇 경우에는, 하늘의 동일한 위치에서 하나 이상의 FRB가 서로 다른 시간에 발생한다(몇 분에서 몇 년까지 고요한 기간을 두고 반복됨). 이는 FRB를 발생시키는 물리적 과정이 엄청난 에너지가 방출됨에도 불구하고 그 원천을 완전히 파괴하지 않는 것을 암시한다.

FRB의 정확한 기원은 아직 밝혀진 바가 없지만, 중성자별(neutron star)들 근처에서 일어나는 강력한 사건들로부터 발생한다고 여겨지고 있다. 이러한 중성자별들 중 일부는 우주에서 알려진 가장 강한 자기장 (지구 자기장의 약 1000 조 배= $10^{15}$ 배)을 지니고 있고, 이 때문에 편의상 이러한 천체는 “마그네타(magnetar)”라고 명명됐다. 마그네타의 자기장은 그 내부를 관통하고, 표면을 통과하여 멀리까지 뻗어나가 극도로 낮은 밀도의 대기 “자기권(magnetosphere)”을 형성한다. 이는 지구나 태양의 자기권과 유사하다. 이러한 마그네타는 물리적으로 극단적인 천체로, FRB를 발생시킬 뿐만 아니라 X선 폭발 (밝은 X선 방출)이나 글리치(glitch, 마그네타의 갑작스러운 자전 속도 변화) 같은 다른 종류의 활동도 보인다.

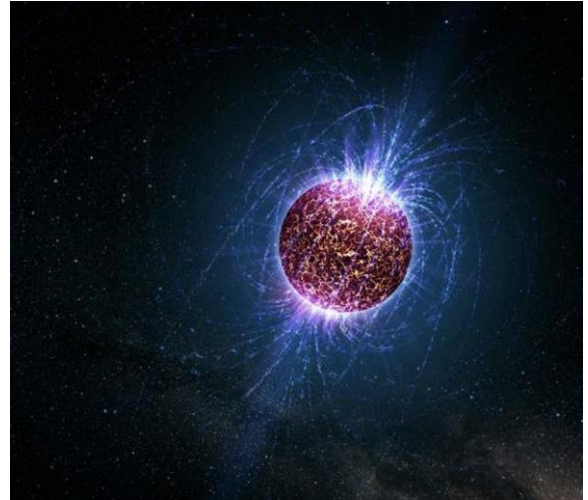


그림 1: FRB를 일으킬 수 있는 원천 후보인 마그네타의 상도. 출처: NASA.

2020년 4월 28일, 우리 은하의 마그네타 SGR 1935+2154가 방출한 FRB가 관측되었을 때 FRB의 본질에 대한 중요한 단서가 확인됐다. 그 FRB는 우리 은하에서 처음으로 발생한 사례이면서, 또한 FRB와 X선 폭발이 동시에 관측된 첫 번째 사례였다. 3년이 채 되지 않은 기간에, 이 특별한 천체는 2020년 10월 8일, 2022년 10월 14일, 그리고 2022년 12월 1일에 총 세 번 더 FRB를 발생시켰다.

FRB와 마그네타의 X선 폭발이 서로 관련이 있는 현상일 수 있지만, 같은 한 마그네타가 X선 폭발 없이 FRB를 생성하거나 그 반대의 경우 또한 존재하는데, 실제로 SGR 1935+2154에서 이러한 경우로써 관측되었다. 어떤 주요 이론에 따르면, X선 폭발은 마그네타 지각의 지진 활동의 결과로 발생한다. 충분히 강한 비틀림이 가해지면 지구의 지각이 지진에 의해 갈라지는 것처럼 마그네타의 지각에도 균열이 발생한다. 이러한 지각 균열 과정에서 방출되는 엄청난 에너지는 중성자별 내부와 주변 자기권에 전달되고, 자기권으로 전달된 에너지의 일부는 결국 마그네타 폭발을 일으키거나 FRB를 유도할 수 있다. 나머지 에너지(실제로는 대부분의 에너지)는 중성자별 내부로 흡수되며, 이로 인해 특정한 주파수에서 진동하게 되는데, 이를 준정규 진동 모드(quasi-normal oscillatory modes)라고 한다

### 중력파 탐색

중력파(Gravitational Waves, GWs)는 시공간의 구조에서 발생하는 진동으로, 그 발생원으로부터 전 우주에 걸쳐 에너지를 전달할 수 있다. 지각 균열에 의한 마그네타 내부의 진동은 중력파를 생성할 수 있는 하나의 원인이며, FRB의 방출 방식과 관련이 있을 수 있다. 이러한 중력파의 특성은 중성자별 본질과 그 자기장에 따라 달라지기 때문에, 마그네타 폭발과 거의 동시에 이 중력파를 관측하는 것은 오랫동안 진행되어왔다. 그러나 아직 실제 발견을 하지

### 더 알아보기:

웹사이트: [www.ligo.org](http://www.ligo.org)  
[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)  
[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



못한 상황이다. 일부 발전된 이론 모델에 따르면, 고립된 마그네타의 내부 진동으로 방출되는 중력파 에너지는 이미 관측된 중력파 원천(예를 들면, 블랙홀 쌍성 병합)에 비해 상대적으로 미미할 것이라고 예측된다. 따라서 현재의 중력파 검출기는 이를 관측하기에 충분한 민감도를 갖추지 못했을 수 있다. 마그네타 활동과 연관된 중력파의 발견은 매우 가치 있는 성과가 되겠지만, 그 중력파가 발견되지 않음으로써 우리는 중력파로 방출되는 에너지의 상한선을 추정할 수 있고, 이를 통해 마그네타의 본질을 이해하기 위해 사용되는 모델들을 추려나갈 수 있게 해준다. 본 논문에서는 우리 은하 마그네타 SGR 1935+2154에서 관측된 FRB와 연관된 중력파의 비검출에 대해 보고하고 있다.

중력파 원천이 멀리 있을수록 길이 변형(strain)은 더 작아진다. 강력한 천체물리학적 원천에서 방출되는 거대한 양의 에너지조차도 지구에서는 미세한 길이변형으로 나타나는데, 너무나 작은 나머지 극도로 정교하게 고안된 검출기를 사용해야만 이를 측정할 수 있다. 이러한 중력파를 관측하기 위해 [LIGO](#), [Virgo](#), [KAGRA](#) (LVK), 그리고 [GEO600](#)과 같은 관측소에서, 레이저를 이용해 걸려 있는 거울의 움직임을 모니터링한다. 여러 개의 중력파 검출기로 동시에 관측하는 것은 가짜 중력파 신호를 배제하는 데 큰 장점이 된다. 실제 중력파가 한 검출기를 통과하면, 지구 다른 곳에 위치한 검출기들에서도 비슷한 흔적을 보게 되며, 이들은 약간의 시간 차이를 두고 나타난다.

이미 알려진 마그네타에서 한 FRB가 발생했을 때, 사람들은 해당 시간에 그 관측된 전자기 신호와 대응되는 중력파 신호를 찾기 위해 중력파 데이터를 검사한다. 우리 은하의 마그네타 SGR 1935+2154에 의한 FRB들은 하필 LIGO와 Virgo 관측소가 작동 중이지 않을 때 발생했다. 다행히도 LIGO와 Virgo만큼 민감하지는 않더라도 GEO600은 SGR 1935+2154에서 발생한 네 번의 FRB 중 세 번에 이 일어날 때 작동 중이었으며, 유용한 중력파 데이터를 수집했다.

이렇게 단일 검출기만 작동하는 경우 몇 가지 어려움을 동반한다. 첫째, 위에서 설명한 바와 같이, 실제 신호와 잡음을 구별하는 것이 더 복잡해진다. 둘째, 여러 중력파 관측소의 데이터를 결합할 수 없어서 FRB가 하늘의 어떤 영역에서 발생했는지 특정짓기가 더 어려워진다. 셋째, GEO600의 민감도가 LIGO와 Virgo 검출기보다 낮아, 약 1 kHz 이하의 주파수 범위에 대해서는 중력파를 감지하지 못할 수도 있다. 다행히도, 이론적 모델들은 마그네타 내부의 빠른 진동에 의해 발생하는 중력파가 고주파(1-3 kHz) 대역에 있을 가능성이 높다고 예측하는데, 이 범위는 GEO600이 가장 높은 민감도를 가지는 주파수 대역이다.

블랙홀 쌍성 병합 경우와는 달리, 예상되는 중력파 신호의 정확한 형태가 알려져 있지 않다. 따라서 그 신호가 어떻게 생 어떻게 생겼을지에 대한 최선의 추측을 나타내는 일반적인 “파형”을 사용한다. 해당 탐색은 “최소 모델링” 상태를 유지하여, 신호가 이론적 파형과 정확히 일치하지 않더라도 어느정도 신호를 감지할 수 있는 여지를 남겼다. 이 중력파 신호를 분석하는데 있어 두 가지 다른 소프트웨어 분석 패키지들이 사용됐는데, 하나는 1초 미만의 짧은 중력파 신호 그리고 다른 하나는 1초에서 10초 사이의 더 긴 신호를 위해 고안된 것들이다. 연구단은 그 두 패키지를 이용해서 SGR 1935+2154에서 발생한 FRB와 그 주변의 X선 사건 동안의 중력파 신호 탐색을 진행했다.

## 본 연구의 주요 도표

아래 도표에 대한 자세한 정보는 [여기](#)에서 찾아보실 수 있습니다

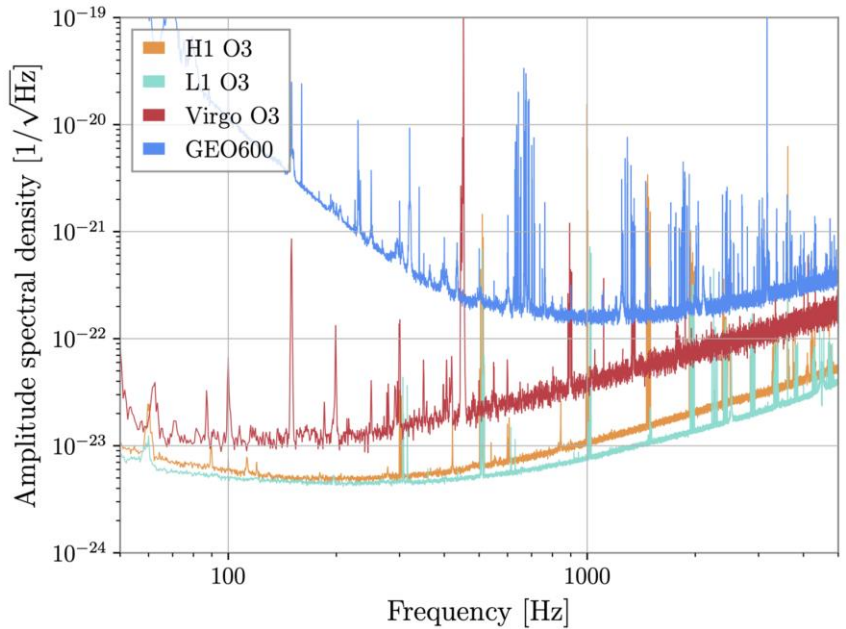


그림 2: 중력파 주파수에 따른 LIGO(주황색, 청록색)와 Virgo(빨간색)의 감도 곡선을 GEO600(파란색)과 비교한 그래프. 곡선이 낮은 곳에 위치할 수록 해당 주파수에서 검출기의 감도가 더 높다.

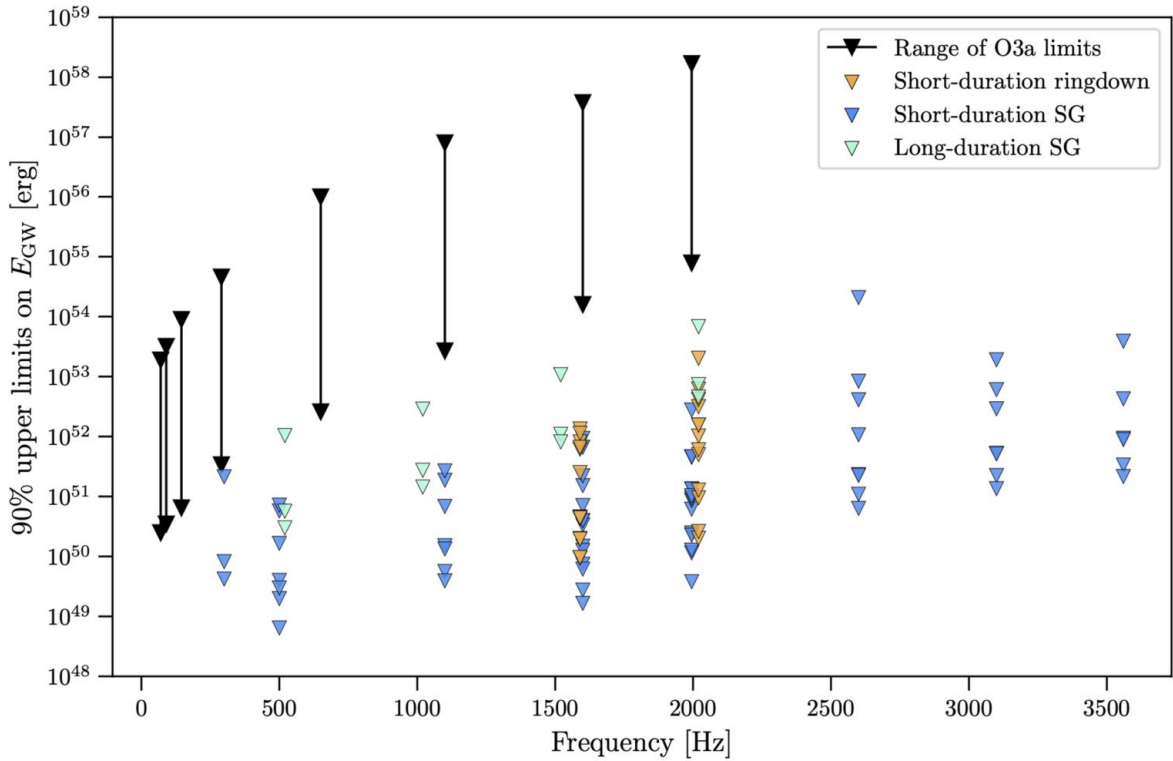


그림 3: FRB 발생 동안 방출된 중력파 에너지의 상한선. 다양한 주파수와 모델에 대한 본 연구에서 설정한 새로운 상한선은 다색 삼각형으로 표시되어 있고, 이전 한계의 범위는 검은색 화살표로 보여지고 있다. 본 연구의 새로운 상한선은 중력파 에너지량에 강한 제약을 준다.

## 결과 및 향후 전망

SGR 1935+2154가 지금까지 알려진 가장 가까운 FRB 원천임을 고려하더라도, FRB와 연관된 어떠한 중력파도 검출되지 못했다. 본 연구에서 분석에 사용된 중력파 탐지기의 민감도를 평가하기 위해, 연구단은 가능한 특성을 가진 중력파(GW)를 나타내는 인공 데이터가 시뮬레이션하고, 이 시뮬레이션된 중력파가 탐지기에 의해 검출될 수 있는 진폭('소리 크기')을 기록했다. 그런 다음 해당 진폭을 사용하여 중력파 방출 에너지에 대한 상한선을 결정할 수 있었는데, 어떤 신호라도 설정한 상한선보다 에너지가 적었으면 탐지되지 않았을 것이다. 이러한 상한선은 LVK가 2019년 FRB 분석에서 설정한 기존의 상한선을 최대 4의 크기 자릿수(orders of magnitude)만큼 개선하기도 하였으며, 또한 본 연구에서 FRB 동안 전파로 방출된 에너지 대비 중력파로 방출된 에너지의 비율을 약간 더 잘 산출할 수 있게 되었다.

모든 기존 예측에 따르면, FRB를 동반하는 중력파의 에너지는 본 연구가 설정한 상한선보다 낮다. 따라서, 본 연구의 최신 임계값은 마그네타로부터 발생하는 FRB와 중력파 사이의 연관성에 대한 다양한 이론적 모델들 중 특정 모델을 선별하기 위한 충분한 제한을 주지는 않는다. 그럼에도 불구하고, 이러한 상한선은 중력파 방출이 FRB와 연결될 수 있는 가능한 방식들을 제한하여, 이론가들의 FRB 모델 개선에 도움을 줄 것이다.

마지막으로, LVK의 중력파 검출기들이 2025년 중반까지 관측을 지속할 예정이므로, 만약 SGR 1935+2154(또는 또 다른 우리 은하 마그네타)가 다시 FRB를 생성한다면, 더 민감한 검출기를 동원해 동시 발생하는 중력파가 검출될 수 있을 것이며, 이를 통해 이러한 극한의 천체물리학적 현상을 더 깊이 이해할 수 있는 또 다른 기회를 제공할 것이다.

## 더 알아보기:

자세한 내용은 아래 웹사이트에서 확인하세요:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

전체 학술 논문을 무료로 읽어보세요. [여기](#) 또는 [arXiv.org](http://arXiv.org)에서 확인할 수 있습니다.