

O3A에 숨겨진 감마선 폭발에 의한 중력파 탐색 (영어원문)

감마선 폭발(GRBs)은 먼 우주에서 평균적으로 하루에 한번 씩 발생하는 매우 밝은 높은 에너지 감마선 섬광이다. 감마선은 좁은 원뿔 모양을 이루고 있어서 수십억 광년 떨어진 곳으로부터 온 감마선도 관측할 수 있도록 밝다.

최소한 두 가지 종류의 천체물리학적 현상이 감마선 폭발을 생성하는 것으로 알려져 있다. '긴' 시간 감마선 폭발이 더 일반적(전체 감마선 폭발의 약 70%)이고 초신성 폭발과 연관이 있고 이러한 감마선 폭발이 별의 중심 붕괴에 의한 별의 죽음과 관계가 있다는 것을 보여준다. 이러한 방법으로 생성된 감마선 폭발은 수초에서 수분까지 섬광이 지속한다.

'짧은' 기간 감마선 폭발은 수 밀리초에서 최대 수 초까지 지속하는 것을 말한다. 전체는 아니라도 대부분의 짧은 감마선 폭발은 두 중성자별의 충돌이나 블랙홀이 중성자별을 흡수하는 과정에서 중성자별이 깨지는 과정에서 발생한다고 생각한다. 감마선을 만드는 이 두 과정에서 매우 많은 양의 물질이 급격하게 가속되어 중력파를 생성할 수 있다. 한 예가 [GW170817](#) 이고, 주변 은하에서 짧은 감마선 폭발이 같이 관찰 되었다.

중력파 천문학자들은 현존하는 두개의 감마선 폭발 관측 망원경인 페르미와 스위프트의 감마선 폭발 관측을 예의 주시하는 것이 중요하다. 두 망원경이 새로운 감마선 폭발이 관측되면, [라이고](#)와 [비르고](#)자료에 같은 시간 같은 방향에 중력파가 존재하는 지를 확인할 수 있다. 이 방법을 사용하여 다른 방법으로 놓칠 수 있는 약한 중력파를 검출할 수 있다.

어떻게 중력파를 찾는가

중력파를 찾기 위하여 두 가지의 다른 방법을 사용했다. 첫 번째 방법은 중력파의 모양을 무시하고 단지 라이고와 비르고 검출기에 동시에 나타나는 것 만을 확인한다. 이 방법은 중성자별 충돌이나 붕괴하는 별로 부터의 중력파를 검출할 수 있다. 이 방법을 '일반' 탐색이라고 하고 감마선 폭발이 보고되고 그 시간에 관측기가 동작하고 있을 때 마다 적용했다. 두 번째 방법은 [치프](#)로 불리는 특별한 모양을 갖는 신호만을 찾는 방법이다. 이러한 신호는 별 처럼 밀도가 큰 물체의 쌍이 서로 공전하다가 결국에는 충돌하는 경우에 발생한다. 예를 들면, 중성자별 쌍성계 또는 블랙홀 중성자별 쌍성계 같은 것이다. 따라서 감마선 폭발이 짧은 기간인 경우에는 충돌에 의하여 신호가 생성되므로 이 모형 탐색만을 사용했다. 감마선 폭발의 섬광 기간이 4초 이하인 경우에 이 방법을 적용하여 실수로 짧은 기간 감마선 폭발을 놓치는 것을 방지했다.

중력파 탐색의 결과

라이고와 비르고는 2019년 4월과 9월 사이에 관측 가동을 했고 O3a라고 명명했다. 이 기간동안 일반 방법은 105개의 감마선 폭발에 적용했고 32개의 짧은 기간 감마선 폭발에 대하여 모형 탐색 방법을 적용했다. 모든 감마선 폭발에 연관된 중력파 신호는 측정되지 않았다(자세한 것은 그림 1과 2를 보시오). 이 결과는 다음 두 가지 이유로 예상되지 않은 것은 아니다. 첫째는 많은 감마선 폭발이 좁은 방향성을 갖고 있어서 많은 감마선 폭발이 지구에서 관찰이 되지 않는다. 둘째는 대부분의 감마선 폭발이 먼 거리에서 발생하여 중력파 검출기가 관측할 수 있는 거리 내에서 발생하는 경우가 드물다.

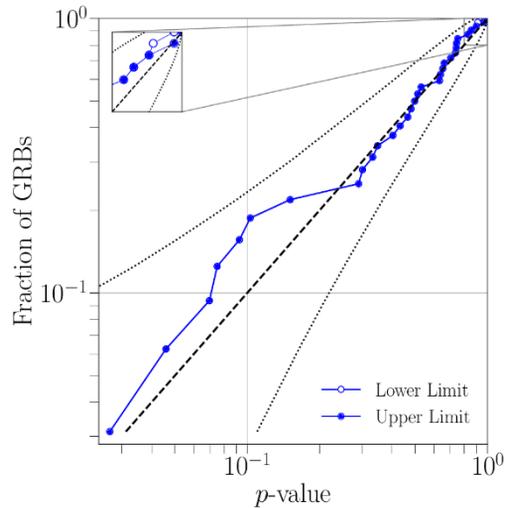


그림 1: 강도에 따른 각 짧은 기간 감마선 폭발에 대한 모형 탐색 결과. 이 값과 다른 시간대의 자료로 획득한 중력파가 아닌 잡음에 기인할 확률(유의확률, p 값)을 비교했다. 그림에서는 총 32개의 대상(연결된 점)에 대하여 가로축은 대상의 유의확률이고 세로축은 더 작은 유의확률 값을 가지는 대상의 비율이다. 채선은 단순히 기기잡음으로 무작위로 발생(중력파가 아닌)하는 경우이다. 대상의 유의확률이 클 수록(그림에서 오른쪽으로 이동할 수록), 중력파가 아니고 잡음일 가능성이 크다. 점선은 탐색에서 예상되는 잡음의 통계적 범위이다. 모든 대상 연결된 점으로 표시된 두 점선사이에 있으므로 모두 기기의 배경 잡음에 의한 것으로 볼 수 있다.

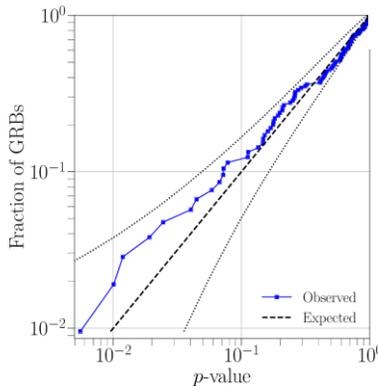


그림 2: 위 그림은 150여 개의 감마선 폭발에 대하여 일반 탐색을 적용하여 획득한 그림 1과 유사한 통계 결과이다.



웹사이트 방문:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



감마선 폭발에 해당하는 신호를 찾지 못한 경우에는 검출기 신호에 다양한 가짜 중력파 신호를 주입하여 어떤 방법이 찾아 주는 지를 살펴서 검출기가 안정적으로 검출할 수 있는 거리를 측정했다. 이를 통하여 사용한 각 감마선 폭발에 대하여 가짜 중력파가 중력파를 만들었다면 계산된 거리보다 먼 곳에서 발생했다고 말할 수 있다. 만약이 더 가까웠다면, 검출기에서 반드시 관측되었을 것이다. 탐색을 통하여 이 값을 측정했는데 이를 '제외거리'라고 이름하였다. 이 값들은 그림 3과 4에 나타내었다.

GRB 190610A의 경우

이 방법을 통하여 거리가 알려지지 않은 감마선 폭발에 대한 제한을 줄 수 있다. 감마선 폭발의 많은 경우에 거리가 알려지지 않았다. 흥미로운 경우가 GRB 190610A의 경우로 이 감마선 폭발이 두 중성자별의 충돌로 생성되었다면 거리는 63Mpc(약 2억 광년)이상일 확률이 크다. 이 감마선 폭발에 대하여 165Mpc(약 6억 광년)인 은하 방향과 매우 가까우므로 그 은하에서 중성자별 충돌이 발생했고 그로 인하여 감마선 폭발이 관측되었을 가능성을 배제할 수 없다(그림 5 참조).

향후 계획

비록 O3a동안 (2017년 8월에 GW170817를 관측한 것과는 다르게) 어떤 감마선 폭발로부터의 중력파도 찾지 못했지만 검출기에 대한 개선이 있을 예정이다. 중력파 관측소의 감도가 좋아지면 질수록 더 많은 감마선 폭발과 연관된 중력파를 관측할 기회를 갖게 될 것이다. 각 중력파 및 감마선 폭발에 의한 정보를 조합하면 이 알 수 없는 신호에 대한 새로운 얻을 것이다.

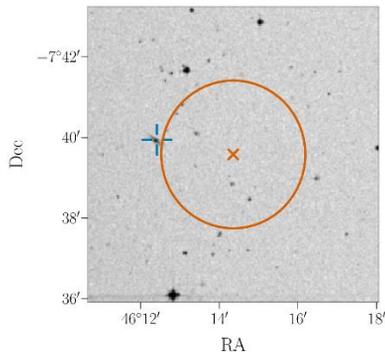


그림 5: 그림에서 큰 원은 GRB190610A의 오차를 나타내고 165Mpc(약 6억 광년) 떨어진 은하에서 발생했을 수 있는 순간적 신호의 위치는 십자로 표시했다. 이 거리는 제외거리보다 멀기 때문에 이 가능성을 배제할 수 없다.

용어해설

- 블랙홀(Black hole):** 매우 밀집된 질량에 의해 만들어진 시-공간의 영역으로 빛을 포함한 어떤 것도 빠져 나가지 못할 정도의 중력이 있는 곳.
- 치프(Chirp):** 천체는 일반적으로 매우 밀도가 높은 두 물체의 쌍, 블랙홀 또는 중성자별이 이루어진, 이 병합하기 전까지 서로 접근하는 나선운동을 하면서 방출하는 중력파 신호 또는 파형을 일컫는다. 치프신호는 시간에 따라 주파수와 세기가 증가한다.
- 무거운 별의 중심붕괴(Core collapse of a massive star):** 무거운 별은 핵융합을 통하여 철을 만든다. 만들어진 철은 별의 중앙으로 모여서 중심을 형성한다. 충분히 무거우면, 이 철 중심은 자체 무게와 외부 압력으로 붕괴하여 결국에는 별 자체가 붕괴한다.
- 전자기 방사(Electromagnetic radiation, EM):** 일반적으로 빛으로 알려진 방사이고, 극히 일부만 사람의 눈으로 볼 수 있다. 이러한 종류의 전자기 빛은 갖고 있는 에너지의 크기 순으로, 라디오파, 적외선(IR), 가시광선(광학), 자외선(UV), 엑스선, 감마선으로 불린다.

- 감마선(Gamma rays):** 전자기 스펙트럼에서 가장 에너지가 큰 전자기 방사.
- 감마선 폭발(Gamma-ray bursts):** 감마선의 짧은 순간 신호. 감마선 폭발(GRB)은 일반적으로 신호가 최대 수십초까지 지속한다.
- 라이고(LIGO):** 레이저 간섭계 중력파 관측소(The Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)로 서로 약 3,000km(1,900mi) 떨어져 있는 두 개의 길이 4-km인 레이저 간섭계를 이루어져 있으며 각각 루이지애나주의 리빙스톤과 워싱턴주의 핸포드에 위치한다.
- 광년(Light-year):** 빛이 1년 동안 진행한 거리에 해당하는 거리의 단위. 광년은 약 9조 4천 6백억 km(5조 8천 8백억 mi)에 해당한다.
- 메가파섹(Megaparsec, Mpc):** 천문학적 거리의 단위로 약 326만 광년에 해당한다.
- 중성자별(Neutron star):** 무거운 별이 붕괴한 후 남게 되는 극도로 밀도가 높은 물체. 보통의 중성자별은 지구의 5천만배에 해당하지만 경이 겨우 30km 정도이다.
- 유의확률(p-value):** 주어진 측정의 통계적 유의도를 나타내는 값. 간단히 유의 확률은 "이 결과가 단순히 배경 잡음일 가능성이 얼마인가?"에 대한 답을 준다. 낮은 유의확률 값을 갖는 신호는 실제 중력파신호에 의한 것일 가능성이 높다.

- 초신성(Supernova):** 자주 하늘에서 갑자기 나타나는 점으로 보였다가 곧 사라지는 급격한 폭발. 초신성은 은하전체의 밝기보다 밝을 수 있다. 다양한 종류의 초신성이 존재한다. 일부는 무거운 별의 붕괴로 다른 일부는 두 개의 백색왜성의 충돌로 만들어 질 수 있다.
- 비르고(Virgo):** 비르고 검출기는 이탈리아 피사 근처의 카시나에 있는 지상에 있는 간섭계이다.

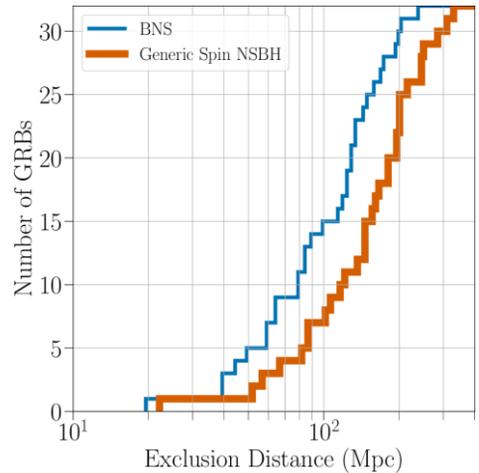


그림 3: 위 그림은 모형 탐색으로 계산한 제외거리가 특정한 값보다 작은 감마선폭발의 수를 나타낸다. 제외거리는 중력파(특정한 모형을 가정한) 검출 없이 감마선 폭발이 존재한 최소 거리를 말한다. 이 거리는 다양한 크기의 가짜 중력파 신호를 감마선 폭발이 발생한 시간 근처의 자료에 주입하여 계산한다. 가짜 신호중에 90%이하를 검출하는 가장 가까운 거리가 제외거리가 되고 특별한 파형, 즉 중성자별 쌍성(BNS - 가는 선), 중성자별 블랙홀 병합(NSBH - 두꺼운 선), 을 가정하면 감마선 폭발은 이 거리보다 먼곳에서 발생했어야 한다는 것을 나타낸다. 거리는 메가파섹(Mpc) 단위로 표시했다.

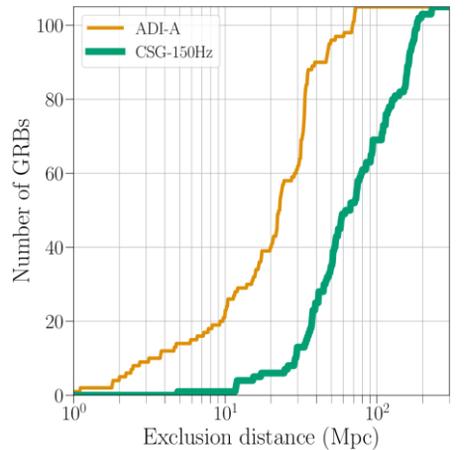


그림 4: 그림 3과 같은 분석이지만 처프형 파형을 가정하지 않은 좀 더 일반적인 방법을 적용한 결과. 주입에 사용한 가짜 중력파 신호는 두 가지 가능한 감마선 폭발을 사용했다. 첫 번째 모형은 ADI-A라 불리는 것으로 블랙홀 주변의 원반에 있는 큰 물질 덩어리로부터 발생하는 중력파를 기술한다. 두 번째인 CSG 모형은 순간적 중력파를 간단하게 근사한 사인-가우시안 파형을 사용한다. 거리 축의 단위는 메가파섹(Mpc)이다.

FIND OUT MORE:

Visit our websites:
<http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
 이곳에서 전체 논문을 읽을 수 있다.