



LIGO
Scientific
Collaboration



LIGO-Virgo Science Summary (2020 年 10 月 28 日)

<https://www.ligo.org/science/outreach.php>

ガンマ線バーストのイベントによって生成された隠れた重力波の探索 (O3a 期観測)

ガンマ線バースト (GRB) は、深宇宙からの高エネルギーガンマ線の非常に明るい閃光であり、1日に約1回見られます。ガンマ線*(用語解説あり)は、細い円錐状のジェットとして照射されるので、数十億光年離れたところから見るができるほど明るくなります。

GRB を生成する可能性のある天体物理学的イベントは、少なくとも2種類あります。すべてのGRBの約70%は、「長時間GRB」であり、超新星爆発*が由来と考えられており、巨大な星が燃え尽きてコアが崩壊するときに発生するものと考えられています。この方法で生成されたGRBは、数秒から数分まで続く傾向があります。

「短時間GRB」は、数ミリ秒から最大で数秒の間の持続するものです。短時間GRBのすべてではないにしても、ほとんどのものは、中性子星と呼ばれる非常に密度の高い星どうしの合体、またはおそらくブラックホールが中性子星を飲み込む過程で引き裂くときに引き起こされると考えられます。どちらのGRBシナリオでも、非常に大量の物質が激しく加速されるので、重力波も私たちに向けて放出される可能性があります。このような一例として、近くの銀河からの短時間GRBを伴った重力波イベント [GW170817](#)がありました。

重力波を研究する天文学者が、2つのガンマ線宇宙望遠鏡であるフェルミ(Fermi)とスウィフト(Swift)によるGRB検出を監視することは非常に重要です。新しいGRBが検出されたとき、ライゴ(LIGO)とヴィルゴ(Virgo)のデータに、同じ方向から同時刻に来るGWが含まれているかどうかをチェックできるからです。このアプローチによって、見逃す可能性のある弱い重力波を検出できます。

1 重力波を探す方法

これらの重力波信号を探すために、2つの異なる手法を使用します。最初の手法は、重力波信号の波形を気にせず、LIGOとVirgoの検出器に矛盾なく表示されたかどうか、という点だけに注目するものです。これは、連星中性子星の合体や崩壊する星が生成する重力波の検出を意味します。この手法を「一般的探索」方法と呼び、GRBが発生し、かつ重力波検出器がデータを取得している場合に使用します。

2番目の手法は、チャープ*と呼ばれる特定の波形信号のみを探索するものです。このタイプの信号は、連星中性子星あるいはブラックホールと中性子星のペアがつくる連星などのように、高密度の天体のペアが互いにらせん状に運動し、最終的に衝突するときに生成されます。このために、このような衝突が「短時間GRB」が発生したと考えられるときにのみ、この「モデル化探索」方法を使用します。私たちは、GRBが4秒以下の場合にこの手法を使用することにしました。これにより、短時間GRBを誤って見逃すことを回避できたはずでした。

2 重力波探索の結果

2019年4月から9月の間に、LIGOとVirgoはO3a期観測と呼ばれる観測を実施し、データを取得しました。この期間、105個のGRBのイベントに対して「一般的探索」を実行し、32個の短時間GRBに対して「モデル化探索」を実行しました。どちらの方法でも、GRBのいずれかに関連付けられる重力波は見発できませんでした(詳細については、[図1](#)および[2](#)を参照してください)。これは、必ずしも予期できなかったことではありません。第一の理由は、バーストが狭い円錐状にビームされたガ

ンマ線だとすると、地球とは違う方向にビームされ、見ない可能性が高いことです。第二の理由は、ほとんどの GRB は非常に遠方で発生するため、重力波検出器が観測可能な距離内で発生する可能性は低いからです。

GRB に対応する重力波信号が見つからない場合、検出器がどの距離までさまざまなタイプの信号を確実に検出することができていたのかを調べます。データに偽の重力波信号を追加して、この手法が検出するものを確認するのです。これにより、調査した GRB について、これらの GRB が特定のタイプの重力波も生成したと仮定したときに、波源は観測限界距離よりも遠方だったと結論することができます。観測限界距離以内であれば、重力波を見逃すはずがないからです。すべての探査について観測限界距離を計算し、これを「除外距離」と呼びます。これらを図3と図4に示します。

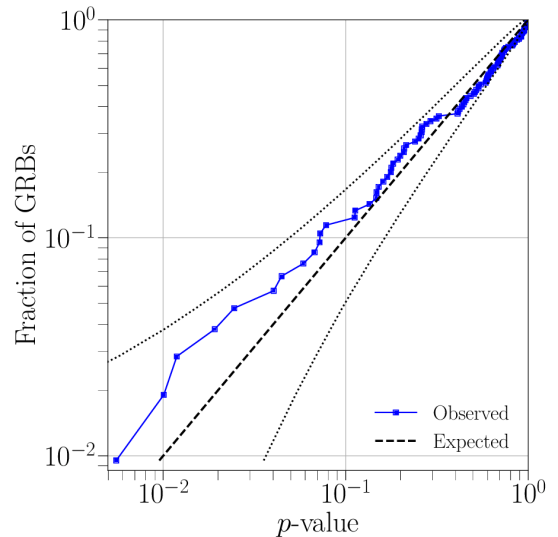


図 2: 「一般的探索」での 105 個の GRB について、図 1 と同様の統計を示す。

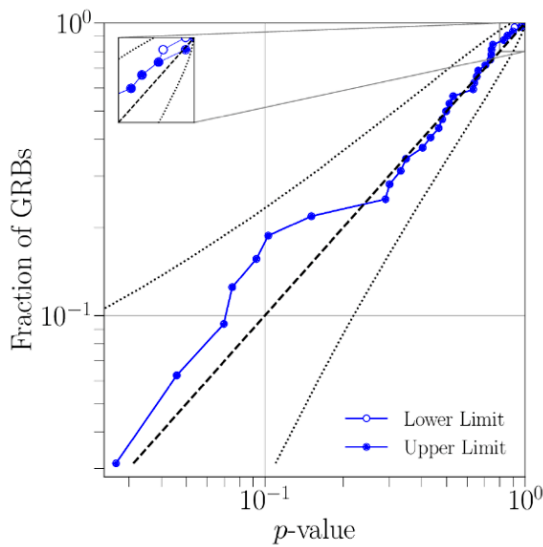


図 1: 「モデル化探索」では、短時間 GRB に対応する最良の重力波候補イベントが、その強度の測定値とともに報告される。これを他の時刻のデータと比較して、これらの候補が重力波ではなくノイズである確率 (p 値*) を推定する。ここでは、32 個の候補 (連結した点で表している) を示す。横軸は候補の p 値を示し、縦軸はその p 値より低い p 値を持つ候補の割合を示す。破線は、検出器の背景ノイズからランダムに候補とみなしてしまう場合の曲線を示す (重力波信号が皆無の場合である)。候補の p 値が大きいくほど (右側に向かうほど)、重力波ではなくノイズである可能性が高くなる。点線は、この探索で予想されるノイズの統計的ふるまいの限界を示している。この図から、すべての候補 (連結した点) が点線内にあることがわかる。つまり、すべてが検出器の背景ノイズとみなしてよいことを示している。

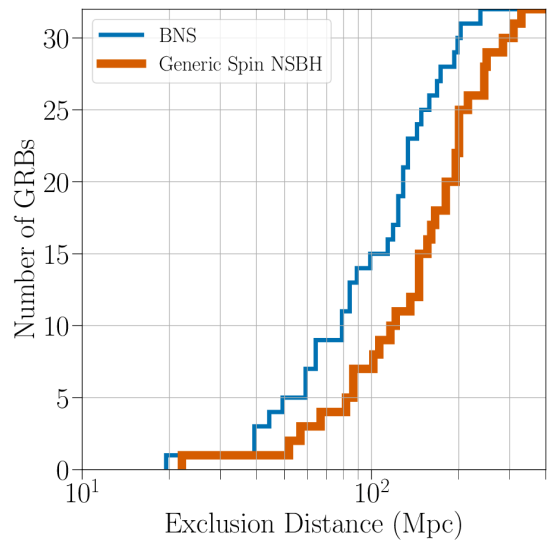


図 3: 横軸を除外距離として、「モデル化探索」によって計算された、その除外距離以下となる GRB の数を示す。除外距離は、重力波が検出されなかった場合 (特定のモデルを想定しているが) の GRB までの距離として、最も近いと想定される値を示す。この距離は、個々の GRB の発生周辺のデータに、さまざまな強度の偽の重力波信号を追加して計算することで得られている。偽の信号が検出される確率が 90% 未満となる距離が除外距離であるが、重力波源として、連星中性子星 (BNS-細い線) を想定したとき、中性子星とブラックホールの連星 (NSBH-太い線) を想定したときをそれぞれ示す。GRB はこの距離より遠方で発生したと考えられる。距離軸の単位はメガパーセク (Mpc) *。

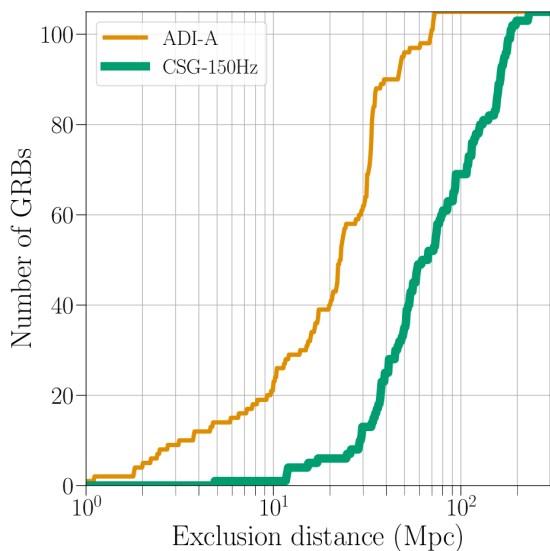


図 4: チャープのような信号を想定しない、より一般的探索による場合の図を図3と同様に示す。ここで使用した偽の重力波信号は、GRB から想定される2つの放射モデルに基づいている。最初のモデルは ADI-A と呼ばれ、ブラックホールの周りの物質がディスクをつくり、そこでの大きな物質の塊からの発生する重力波をモデルとしている。2番目のモデルは CSG と呼ばれ、重力波のバースト的な波形を正弦ガウス信号として単純に仮定をしたものである。距離軸の単位はメガパーセク (Mpc)。

3 GRB190610A の場合

私たちの見積もりでは、距離がわからない GRB に制約を課すこともできます。GRB の大部分は、距離が不明です。興味深いケースの1つは、GRB 190610A です。このモデル化された方法では、GRB 190610A が連星中性子星の合体によって生成された場合、63 Mpc (約2億光年) 以上離れた場所で発生した可能性が高いことがわかります。この GRB は、165 Mpc (約6億光年) 離れた銀河に非常に近い方向から来たので、連星中性子星がその銀河で

用語集

- **ブラックホール (black hole):** 重力が非常に強いため光を含むあらゆるものが脱出することができない、非常にコンパクトな質量によって引き起こされる時空の領域。
- **チャープ (chirp):** ブラックホールや中性子星などの超高密度天体が連星合体する直前のインスパイラル期に観測される重力波信号または波形の名称。チャープ信号は、周波数と振幅は時間とともに増加してゆく。
- **巨大な星のコア崩壊 (core collapse of a massive star):** 巨大な星は核融合によって鉄を生成する。生成された鉄は星の中心に沈み、コアを形成する。十分に重くなると、この鉄のコアは自重と外圧で崩壊し、星全体が崩壊する。

GRB を生成した可能性を除外することはできません (図5)。

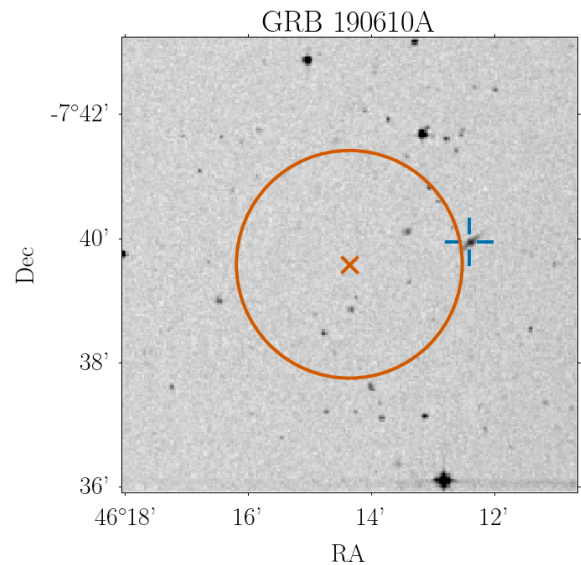


図 5: 大きな円は GRB190610A の発生源のエラーボックスを示しています。このイベントは、165 Mpc (約6億光年離れた場所) 先の銀河 (十字線で示す) で発生した可能性がある。この銀河は、この GRB の除外距離よりも遠方にあるため、この可能性を排除することはできない。

4 今後の展望

O3a 期観測の解析では、(2017年8月に GW170817 を観測したときに発生したような) 重力波と GRB の結びつきは得られませんでした。現在は、検出器を改善するための計画と作業が進行中です。重力波検出器の感度を向上させるにつれて、GRB と結びつく重力波を検出する可能性が高くなります。独立に報告される重力波と GRB の観測情報を組み合わせることによって、ガンマ線を放出させる高エネルギー現象のメカニズムや特徴を次第に明らかにできることになるでしょう。

- 電磁波・電磁放射 (**electromagnetic radiation, EM**): 一般に光として知られている放射。人間の目で見ることができるのはごく一部。エネルギーが増加する順に、電磁波は、電波, IR (赤外線), 可視光 (光学), UV (紫外線), X線, ガンマ線と名前が付けられている。
- ガンマ線 (**gamma rays**): 電磁スペクトルで最も高いエネルギーの電磁放射。
- ガンマ線バースト (**gamma-ray burst, GRB**): 非常にエネルギーの高い光子が短時間で放射される現象。最大数十秒続く。
- ライゴ (**LIGO**): 長さ 4km の腕をもつ米国のレーザー干渉計重力波観測所 (**Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory**)。約 3000 km 離れた、ルイジアナ州リビングストンとワシントン州ハンフォードの 2 箇所につくられている。
- 光年 (**light-year**): 光が 1 年間に移動する距離で天文学的距離の単位の一つ。約 9.46 兆 km に相当。
- メガパーセク (**Megaparsec, Mpc**): 天文学的距離の単位の一つ。約 326 万光年に相当する。
- 中性子星 (**neutron star**): 大きな質量の星が崩壊した後に残る非常に密度の高い天体。典型的な中性子星の質量は地球の 50 万倍で、直径は約 30km にすぎない。
- p 値 (**p-value**): 測定値の統計的有意性の尺度。大まかに言って、p 値は「この結果が単に背景ノイズである可能性はどのくらいか?」という質問に答える。p 値の低いイベントは、実際の重力波信号である可能性が高くなる。
- 超新星 (**supernova**): 激しい爆発によって、明るい天体として急速に出現し、その後消えていく。超新星は、銀河全体の明るさよりも明るく輝く可能性がある。巨大な星の崩壊に由来するものや、2 つの白色矮星の合体に由来するものなど、さまざまな種類の超新星がある。
- ヴィルゴ (**Virgo**): 長さ 3km の腕をもつ欧州天文学連合が設置した重力波観測のためのレーザー干渉計。イタリアのピサ近郊のカシーナにつくられている。

さらに詳しく調べるために

- ライゴとヴィルゴのウェブサイト: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu
- 本発表の元となる [論文](#)。



Visit our websites:
<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>



<https://dcc.ligo.org/P2000436-v3>