

O3 GEO-KAGRA 観測の結果

導入

[KAGRA](#) は日本にある新しい重力波検出器で、Advanced [LIGO](#) と Advanced [Virgo](#) からなる国際ネットワークに2019年10月から参加しました。当初KAGRAは第3期観測期間 (O3) の最後の1ヶ月にあたる2020年4月に参加する予定でした。しかし、コロナ禍のため、Advanced LIGOとAdvanced Virgoは2020年3月27日に観測を終了しなければなりませんでした。幸運なことに、KAGRAは、観測運転を続けていたドイツにある [GEO 600](#) (この文書ではGEOと略します) と共同観測を行うことができました。

2020年4月に、GEOとKAGRAは2週間の共同観測を行いました。この[共同観測期間](#)をO3GKと呼び、その結果を科学論文として発表します。どちらの検出器も[感度](#)が低かったため、重力波の確かな検出は報告されませんでした。しかし、この2週間に、いくつかの[ガンマ線バースト](#)が報告されていました。LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) コラボレーションは、それらのガンマ線バーストに付随する重力波の探索を行いました。この探索は、連星中性子星合体タイプとモデルを仮定しないバーストタイプの全天探索と、観測期間中に報告されたガンマ線バーストに付随する重力波をターゲットとしたコンパクト連星合体タイプとバーストタイプのターゲット探索 ([ガンマ線バースト・ターゲット探索](#)) からなります。

検出器の感度から予想されたことでしたが、重力波信号は検出されませんでした。しかし、一連の解析を通して、KAGRAデータの解析準備のデモンストレーションができました。KAGRAの感度がデザイン感度に近づいていくにつれ、その重要性が高まっていくことでしょう。

KAGRA と GEO 600

O3GKは、KAGRAにとって初めての他の重力波検出器との共同観測でした。KAGRAは日本の岐阜県神岡にある3 kmの腕を持つレーザー干渉計型重力波観測所です。KAGRAは地下に建設され、低温に冷却された鏡を用いています。これにより地面振動雑音と熱雑音を抑えることができます。2019年4月までに、干渉計の構成要素の大部分はインストールされ、コミッションング (感度を上げるために検出器を調整する作業) が始まりました。コミッションングの後、KAGRAの感度は改善し、2020年3月末までには、[連星中性子星の観測可能距離](#)が約1 [メガパーセク](#) (326万光年) に達しました。KAGRAは新しい検出器で、改良中のため、まだデザイン感度に達していません。

GEOは最も古い干渉計型重力波検出器のひとつで、600 mの腕を持つ比較的小さな検出器ですが、新しい検出技術の試験用プラットフォームとして重要な役割を果たしています。検出器の感度は装置によって生じる雑音によって制限されます。

ノイズ・フロアは基本的に定常で、それに加えてグリッチと呼ばれる短時間の装置起源の雑音があります。グリッチをできるだけ低減させる多くの努力がされていますが、グリッチは重力波信号に似通っていることがあります。2台の検出器を同時に運転すれば、真の重力波信号と間違えてしまうようなグリッチの数を激減させることができるのです。

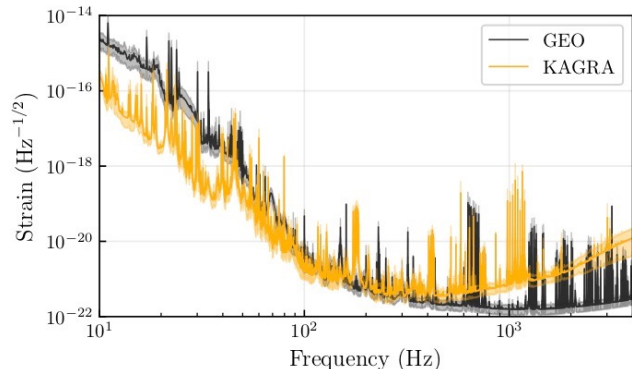


図 1: (論文の図1左列) 共同観測期間中におけるKAGRA (黄) とGEO (黒) の典型的な感度。縦軸は検出器の平均[ストレイ](#)
[ン雑音](#) (周波数 (横軸) に対する鏡の変位の指標)。実線は各周波数帯域における平均感度で、色の薄い領域は90%領域を示しています。

図1は、共同観測期間中の2台の検出器の典型的な感度を示しています。ストレインが低いほど感度が高いことを意味します。低周波数帯ではKAGRAのほうが高感度ですが、高周波数帯ではGEOのほうが高感度です。観測期間中、KAGRAは連星中性子星の観測可能距離が約0.8メガパーセク(260万光年)まで達し、一方GEOは約1.1メガパーセク(360万光年)まで達しました。

図2は、2台の検出器の連星中性子星の観測可能距離の時間変化を示しています。

全天探索

LVKコラボレーションは連星合体タイプとバーストタイプの**全天探索**を行いました。全天連星合体探索は、データとコンパクト連星の合体から放出される重力波の理論モデルに基づいたテンプレート**波形**とを比較する**マッチド・フィルター**探索です。

全天バースト探索は、モデルを仮定しない突発的**重力波**信号をターゲットとする探索です。2つの全天探索の結果、重力波信号は検出されませんでした。その結果を図3に示します。

ガンマ線バースト・ターゲット探索

観測期間中、おもしろい天体物理事象、ガンマ線バースト、が数イベント起こりました。ガンマ線バーストには重力波が付随している可能性があります。私たちはガンマ線バーストが起こった時刻付近のデータを注意深く探索しました。KAGRAとGEOとがどちらもデータを取得していた期間に、4つのガンマ線バーストが検出されました。それらは、2つの**長いガンマ線バースト**(継続時間が2秒以上)と2つの**短いガンマ線バースト**(継続時間が2秒以下)からなります。LVKコラボレーションは、連星合体タイプとバーストタイプの**ガンマ線バースト・ターゲット探索**を行いました。それらの探索では、ガンマ線バーストの電磁波観測によって制限された時間帯と天球上領域を解析しました。LVKコラボレーションは連星合体タイプとバーストタイプの両方のガンマ線バースト・ターゲット探索によって4つのガンマ線バーストに付随した重力波放射の証拠は得られなかったという結論を得ました。

解析されたガンマ線バーストの内GRB 200415Aは3.5メガパーセクの距離にあるちょうこくしつ座銀河(NGC253)で起こった**マグネター巨大フレア**に付随したイベントでした。連星合体タイプのガンマ線バースト・ターゲット探索の結果を図4に示します。私たちの解析によって得られた**除外距離**は数**キロパーセク**にすぎず、連星の合体が起源である可能性を棄却することやマグネター巨大フレア仮説を検証するには不十分でした。バーストタイプのガンマ線バースト・ターゲット探索の結果を図5に示します。各ガンマ線バーストに対する除外距離を示しています。

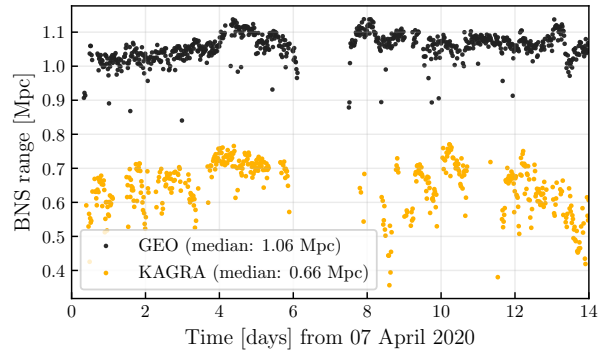


図2: (論文の図1の右図) 観測期間中におけるGEO(黒)とKAGRA(黄)の連星中性子星の観測可能距離の時間変化を示しています。6~7日目の空白は、悪天候のせいで両方の検出器が正しく動作しなかったために生じたものです。観測可能距離の中央値はKAGRAが0.6メガパーセク、GEOが1.06メガパーセクでした。

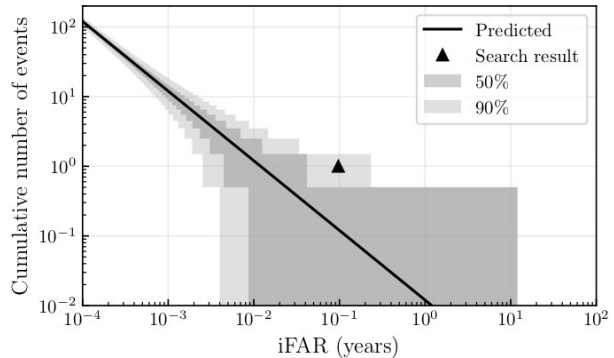


図3: (論文の図5) 全天バースト探索による結果として、**偽警報率(FAR)**の逆数(iFAR)の累積数を示しています。三角印は探索によって検出された最も大きな信号候補を表しています。このイベントは背景雑音の90%領域内にあるので、雑音起源であると考えられます。塗りつぶされた領域は50%と90%ポアソン不定性領域です。

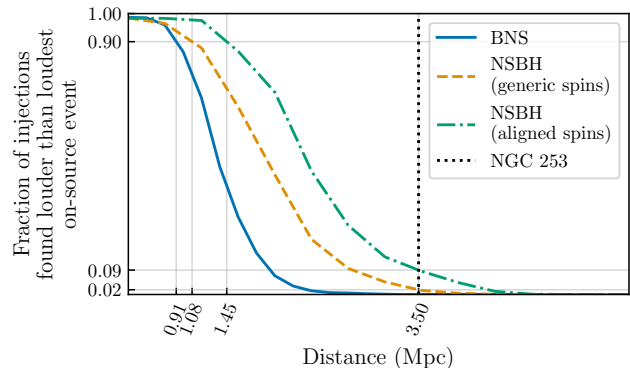


図4: (論文の図7) 連星合体タイプのガンマ線バースト・ターゲット探索によって得られたGRB 200415Aの除外距離を、連星中性子星と中性子星-ブラックホール連星の合体を仮定した場合についてそれぞれ示しています。曲線は3つの信号注入モデル: 連星中性子星(青実線)、中性子星-ブラックホール連星(スピン方向を制限しない場合)(橙破線)、中性子星-ブラックホール連星(スピン方向を軌道角運動量方向に制限した場合)(緑点破線)に対応します。それぞれの仮定の場合における除外距離の90%領域は、0.91メガパーセク、1.08メガパーセク、1.45メガパーセクでした。NGC253(3.5メガパーセク)に対応する、それぞれの仮定の場合における信頼度は、0%、2%、and 9%でした。したがって、検出器の感度は、連星の合体が起源である可能性を棄却するには不十分でした。

将来の展望

一連の解析を通して、LVKコラボレーションは、KAGRAが重力波検出器ネットワークの一員となって活躍できることをデモンストレーションしました。現在、LVK検出器は運転を停止して、第4期観測期間(O4)に向けた改良を行なっています。O4の開始は2022年12月中旬に計画されています (<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/archives/4213>)。KAGRAがデザイン機器構成での観測運転を開始すれば、Advanced LIGOやAdvanced Virgoと同等の感度が達成され、重力波信号の検出に本質的な役割を果たせると期待されています。ネットワークに参加する検出器の台数が増えることは、波源の情報を推定する上でも波源の天球位置推定の改良においても、極めて重要です。また、KAGRAの腕の向きが他の検出器ととても異なっていることは、より一層重要な貢献が期待できます。

さらに興味のある方へ

私たちのウェブサイトにてニュースを更新しています:

<https://www.ligo.org/news.php>

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

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

本発表の論文:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100286/public>

O3GKの観測データはGWOSCのサイトから:

<https://www.gw-openscience.org/>

用語集 (ABC順)

全天探索 (All-sky searches): 標準的な探索のひとつ。O3GK中、LVKコラボレーションは、連星合体タイプのマッチド・フィルター探索とバーストタイプの全天探索を行なった。

連星中性子星 (Binary Neutron Star): 2つの中性子星が互いのまわりを周回運動する天体系。([wikipedia](https://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%A1%E4%BB%9C%E4%B8%8F%E4%B9%A9%E4%B9%A0%E4%BB%9C%E4%B9%A9%E4%B9%A0))

連星中性子星の観測可能距離 (Binary neutron star observable range): 重力波検出器の感度の標準的な指標。マッチド・フィルター信号対雑音比が8で連星中性子星の合体を検出できる距離。

ブラックホール (Black hole): 重力が非常に強いために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極端に曲げられた時空の領域。

バースト探索 (Burst search): 重力波検出器ネットワークで同時に信号が超過しているかを探索する手法。特定の波形モデルを仮定せずに行う。

コンパクト天体 (Compact object): ブラックホール、中性子星、[白色矮星](#)など、極端に密度の高い天体の総称。

除外距離 (Exclusion distance): データに注入された信号の90%が、ガンマ線バーストの起こった時刻付近で検出器雑音による最大の候補イベントと少なくとも同じ程度の信頼度で検出できる距離。

偽警報率 (False Alarm Rate): 検出器のノイズによる揺れが、どのくらいの頻度で重力波候補信号と誤ってしまうかを示す値。この値が小さいほど、検出された重力波候補はより確実に天体物理起源であると言える。

ガンマ線 (Gamma Rays): 非常にエネルギーの高い光子(光)。X線よりもエネルギーが高い。

ガンマ線バースト (Gamma-ray burst (GRB)): 遠方の天体物理現象からやってくるガンマ線の閃光(短時間放射)。数秒も続くこともあるが、多くの場合は数秒以下である。

GEO 600: 長さ600メートルの腕をもつドイツのハノーファーにある重力波を観測するためのレーザー干渉計。

重力波波形 (Gravitational waveform): 重力波が時間によって変化するさま。

ガンマ線バースト・ターゲット探索 (GRB-targeted searches): 観測期間中に電磁波観測によって報告されたガンマ線バーストに付随した重力波信号をターゲットにした探索。ガンマ線バーストの時刻と天球位置に制限することによって、全天探索よりも微弱な重力波信号でも検出できる可能性がある。O3GKのデータに対して、LVKコラボレーションは連星中性子星と中性子星-ブラックホール連星に対するマッチド・フィルターと、バーストタイプの探索を行った。

KAGRA: 日本の岐阜県にある神岡鉱山の地下に建設された重力波を観測するためのレーザー干渉計。長さ3キロメートルの腕を持ち、極低温冷却鏡を備える。**キロパーセク (Kiloparsec (kpc)):** パーセクの千倍の距離。約3260光年。

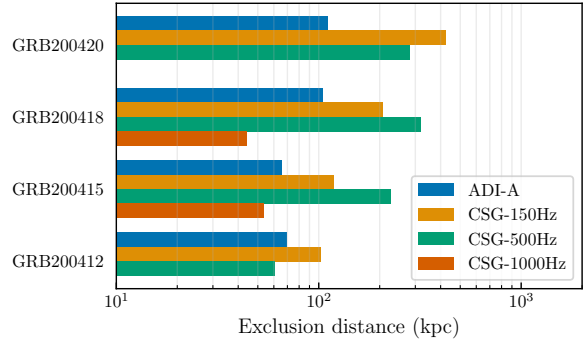


図5: (論文の図8) バーストタイプのガンマ線バースト・ターゲット探索によって得られた4つのガンマ線バーストの除外距離。降着円盤不安定性モデルA (ADI-A), 円形サイン-ガウス信号 (CSG) で中心周波数が150 Hz, 500 Hz, and 1000 Hzの場合について見積もられています。

私たちのウェブサイト:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/



光年 (Light-year): 光が一年間に移動する距離で天文学的距離の単位の一つ。約9.46兆キロメートルに相当する。

LIGO: 長さ4キロメートルの腕をもつ米国のレーザー干渉計型重力波観測所 (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)。約3キロメートル離れた、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箇所に位置している。

長いガンマ線バースト (Long GRB): 継続時間が2秒以上のガンマ線バースト。質量の大きな星のコアの崩壊時に起こると考えられている。

マグネター (Magnetar): 強い磁場を持つ中性子星。この磁場によって短時間バーストなどの異常な振る舞いを示すことがある。

マグネター巨大フレア (Magnetar Giant Flare): マグネターから放出される非常に大きな短時間バースト。太陽が10万年間に放出するエネルギーに相当する量がたった1秒以下で放出される。

マッチド・フィルター (Matched filter): 雑音にまみれたデータに埋もれた重力波信号を抽出するテクニックの一つ。一般相対性理論に基づいて計算された重力波波形のテンプレート群がデータと合致するかどうかを照合していくことによって、重力波信号を検出する。

メガパーセク (Megaparsec (Mpc)): パーセクの100万倍の距離。約326万光年。

中性子星 (Neutron star): 大質量星の崩壊後に残る非常に密度の高い天体。あまりに密度が高いため、原子は個々の形を保つことができず、星全体が一つの巨大な原子核のようになる。典型的な中性子星の質量は地球の50万倍で、直径は約3キロメートルにすぎない。

中性子星-ブラックホール連星 (Neutron Star-Black Hole binary): 中性子星とブラックホールがお互いのまわりを周回運動する天体系 ([参看](#))。

雑音 (Noise): ささまざまな機器や環境の影響による重力波測定信号の変動。重力波検出器の感度は、雑音によって制限される。

観測期間 (Observing run): 重力波検出器がデータを取得している期間。

パーセク (Parsec (pc)): 天文学的距離の単位の一つ。約3.26光年に相当する。

感度 (Sensitivity): 信号を検出する検出器の能力を示す指標。ノイズレベルの低い検出器は、弱い信号を検出できるため、感度が高い(優れている)と言われる。

短いガンマ線バースト (Short GRB): 継続時間が2秒以下のガンマ線バースト。コンパクト天体の合体(連星中性子星か中性子星-ブラックホール連星)から放出されると考えられている。

信号対雑音比 (Signal-to-noise ratio): 信号強度と雑音強度の比。信号レベルと雑音レベルを比較するのに使われる。信号を汚染する可能性がある雑音と比較した信号の強さを測る。

ひずみ (Strain): 重力波の通過によって時空がゆがみ、検出器の腕の長さが変化する。その腕の長さの変化を、全体の長さで割った値。

Virgo: イタリアのピサ近郊のカシーナに建設された、長さ3キロメートルの腕をもつ重力波観測のためのレーザー干渉計。