

LIGO-Virgo の第3期観測データをもちいた宇宙ひもへの制限

はじめに

宇宙は膨張し、それに伴って冷えていきます。この過程で、**宇宙ひも**が作成される可能性があります。宇宙ひもは、1次元の**位相欠陥**であり、線状にエネルギーが集中している構造です。水が凍ってできる氷に、亀裂が生じたような領域に似ています。宇宙では、宇宙ひもは一般に湾曲しており、時間発展して、相互作用の結果として閉じたループを形成する可能性があります。

宇宙ひもは素粒子物理学における多くの**場の理論**に登場するもので、実現しそうでいくつかの観測予測があります。このことは、宇宙ひもが、CERNの**ラージ・ハドロン・コライダー (LHC)**が到達するエネルギースケールよりもはるかに高いエネルギースケールで、**標準理論**を超えた物理を解明するツールになることを示しています。とくに、宇宙ひもによって生成される重力波信号は、**LIGO, Virgo** および **KAGRA** のような地上の検出器における最も有望な観測ターゲットの1つです。

ループ状の宇宙ひもからの重力波

ループ状の宇宙ひもは、振動し、主に重力波でエネルギーを放射して、ループは収縮し、最終的には崩壊します。振動しているループの重力波スペクトルは、**とがり (カスプ, cusps)** や **もつれ (キンク, kinks)** として知られる宇宙ひもの特徴で表されると考えられます。前者は、光速で短時間移動する、宇宙ひもに生じる「とがった点」です。後者は、宇宙ひもが交差してできる対となって生じる不連続点です。これらの重力波バーストは多く重ね合って、確率的な（つまりランダムに決定される）**背景重力波**を形成します。時折、振幅の大きくて鋭いバーストが確率的な背景の中に現れるのです。群衆のざわめきの中で誰かが突然大声で叫んだ時のように。したがって、原則として個別に検出できます。

私たちは、Advanced LIGO (アドバンスド・ライゴ) および Advanced Virgo (アドバンスド・ヴィルゴ) の検出器が**第3期観測期間 (O3)**中に収集したデータを

用いて、カスプ、キンク、およびキンク・キンクの衝突によって生成される重力波信号を調べました (図1を参照)。私たちは、コンピューター・シミュレーションの結果に基づいて作られた、宇宙ひものループがどのように分布しているかの2つの解析モデル (AとBとします) をもとにしました。また、3つめのモデル (Cとします) として、モデルAとモデルBの間を補間して、より一層モデルに依存しないようなモデルをつくり、そのうちの2つ (C-1とC-2) を検討しました。

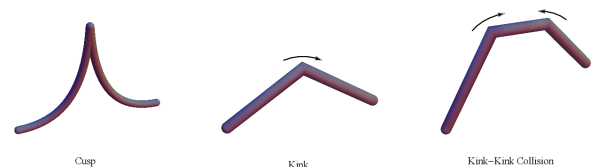


図1: とがり (カスプ), もつれ (キンク), およびキンク・キンク衝突の図。 [Image credit: Long, Hyde and Vachaspati]

解析と結果

これら4つのモデルのそれぞれについて、私たちはLIGOとVirgoの検出器データを用いて、個々の宇宙ひもからの重力波バースト信号と、宇宙ひもがつくる確率的背景信号の両方の可能性を分析しました。バースト信号を検出するときには、予測される重力波形に一致する重力波イベント候補を最初に特定したのち、それらが検出器ノイズではなく宇宙ひもからの重力波であるもっともらしさを計算する解析を行いました。背景重力波信号を検出するときには、各モデルで予測される重力波信号の**エネルギー密度**を計算しました。そして、これらの予測値と、信号がない場合の検出器の観測結果とを比較し、このエネルギー密度に上限をつけることを試みました。

宇宙ひもからの重力波信号は検出されませんでした。非検出という結果と一致するように、2つの宇宙ひもパラメータ (ひもの張力とループあたりのもつれの数) をモデルごとに制限することができました。これらの制限を図2および3に示します。とくに、確率的重力波背景の解析からは、ひもの張力について、これまででもっとも強い制限をつけることができました。

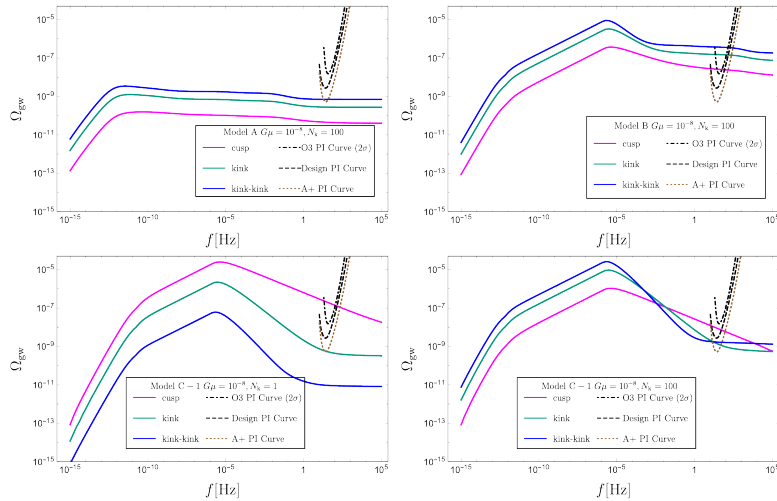


図2: 重力波のエネルギー密度スペクトルの予測図。宇宙ひものループの分布について3つのモデル (A, B, C-1 と呼ばれる) について、ループの1回の振動あたりのもつれ (キンク) の数 N_k を変化させて表示したもの。宇宙ひもの張力 $G\mu$ は 10^{-8} に固定している。ここで、 G はニュートンの重力定数、 μ は宇宙ひもの質量線密度である。左上: モデル A, $N_k = 100$ 。右上: モデル B, $N_k = 100$ 。左下: モデル C-1, $N_k = 1$ 。右下: モデル C-1, $N_k = 100$ 。また、図には、3つのエネルギー密度スペクトルを記入している。O3期での等方的確率的重力波探査に対する 2σ べき乗則にしたがった積分曲線 (黒鎖線), LIGO ハンプフォード, LIGO リビングストン, Virgo のネットワークの設計感度 (黒破線), **AdvancedLIGO+** (A+) 検出器 (茶点線) の3種である。

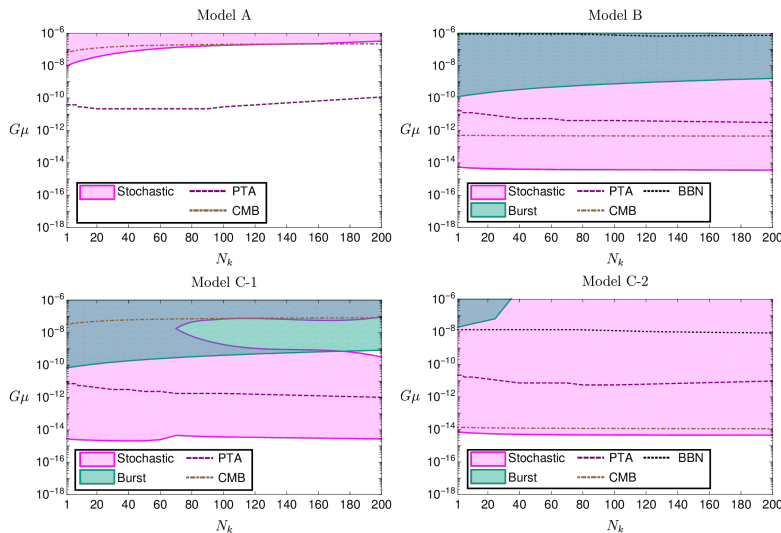


図3: アドバンスド LIGO-Virgo が得た宇宙ひもパラメータ ($N_k; G\mu$) に対する除外領域。95%の信頼度で真の値はここにはないと言えるパラメータ空間を示している。色はそれぞれ、確率的重力波探査で得られたもの (ピンク), バースト重力波探査で得られたもの (薄緑), および両方の探査から導出されたもの (濃い緑色) に相当する。モデル A (左上), モデル B (右上), モデル C-1 (左下), モデル C-2 (右下) の4つの図に分けてある。確率的重力波探査の結果は、O1, O2, および O3 の観測期の全データを用いたものだが、バースト重力波探査には O3 データのみを用いた。

また、得られた結果を**パルサー・タイミングアレイ**による測定から得られた制限値、**ビッグバン元素合成**から間接的に得られている制限値、および**宇宙マイクロ波背景放射**の観測と比較しました。次の観測期間である O4 は、さらに感度が高くなる LIGO や Virgo, そしてグローバルネットワークに参加する KAGRA とともに、宇宙ひもからの重力波信号を検出する新しい機会になるでしょう。

さらに詳しく知るために

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu
- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/
- 論文 (プレプリント) は [ここ](#)。
- 重力波について一般的な概念は、[ここ](#)により詳しく述べています。