

背景重力波の探査が、宇宙論と高エネルギー物理学に示唆するもの

素粒子物理学と宇宙論の標準モデルは驚異的な成功を収めていますが、基礎物理学の基本的な側面に対する私たちの理解は依然として不完全です。暗黒物質（ダークマター）と暗黒エネルギー（ダークエネルギー）の性質、物質/反物質の非対称性の起源、ニュートリノ質量の説明、そして宇宙インフレーションの現実性などは、重要な未解決問題です。これらの問題を解決するために、標準モデルを超える物理を用いたシナリオが研究されており、衝突型加速器から望遠鏡までを駆使した、宇宙素粒子物理学の実験や観測による精査が続けられています。これらの「標準モデルを超える」シナリオの多くは、宇宙のごく初期段階に新しい現象が存在することを示唆しており、背景重力波の形で私たちが探ることができる痕跡を残す可能性があります。

LIGO/Virgo/KAGRA (LVK) のデータにより、初期宇宙のメカニズムによって生成された可能性のある背景重力波の兆候（一次相転移、宇宙ひも、ドメイン・ウォール、硬い状態方程式、アクシオン・インフレーション、二次スカラー摂動、原始ブラックホール、パリティ破れなど）の探索が可能になります。以下では、これらの現象についてそれぞれ簡単に説明します。

相転移、宇宙ひも、ドメイン・ウォール

宇宙は誕生以来、膨張と冷却を続けています。そして初期には、宇宙は基本状態の相転移を経験しました。これは、液体の水が氷に変わる現象に似ています。宇宙の温度が低下するにつれて、一連の相転移が起こり、対称性の少ない状態になります。すなわち、元々存在していた自然の力の統一性が破れ、断片化した特定の力へと変化しました。この過程で、宇宙ひもやドメイン・ウォールといった位相欠陥が現れることがあります。宇宙ひもは1次元の物体であり、そのエネルギーは一次元のひも状に集中します。これは、水が凍るときに氷に生じる亀裂に似ています。

図1は、宇宙ひもの「とがり（カスプ）」と「折れ曲がり（キंक）」を示しています。宇宙ひもに、とがりや折れ曲がりが生じて加速すると、重力波が放出されます。よじれ同士の衝突も重力波を生成します。ドメイン・ウォールは2次元の物体であり、2つの異なる状態を隔てる境界面です。宇宙の基本的な性質が、ある安定状態から別の安定状態へと遷移する場所となります。



図1: 宇宙ひもから生じる高周波重力波の源となる「とがり（カスプ）」「折れ曲がり（キंक）」「折れ曲がり-折れ曲がり衝突」のイメージ図。[画像提供: Long, Hyde, Vachaspati]

「硬い」状態方程式

標準的な宇宙論モデルでは、宇宙はまず相対論的粒子（光速に近い速度で運動する粒子）によって支配され、その後物質優勢の時代に入り、宇宙のエネルギー密度はより低速で運動する粒子によって支配されるようになります。一部の高エネルギー物理学モデルは、これらの2つの時代の前に、宇宙の状態方程式（圧力とエネルギー密度の関係式）が非常に特異となる時代があった可能性を示唆しています。宇宙流体の圧力がそのエネルギー密度と同程度に高くなるような可能性です。このシナリオは「硬い」状態方程式と呼ばれます。

アクシオン・インフレーション

ビッグバン標準宇宙論モデルに関連するいくつかの謎や未解明の疑問を解決するため、宇宙は、初期に非常に急速な指数関数的膨張（いわゆる宇宙インフレーション）を経験したというモデルが提唱されています。これまで検討されてきたさまざまなインフレーションモデルの中で、アクシオン・インフレーションと呼ばれるモデルでは、高エネルギー素粒子物理学の知見に基づき、アクシオンと呼ばれる仮説上の粒子によって、指数関数的な膨張が引き起こされます。アクシオンは、極めて軽く、電氣的に中性で、通常の物質とほとんど相互作用をしないことから、冷たい暗黒物質の候補ともなっています。¹

¹ (訳注) インフレーションモデルで想定されるアクシオンと、暗黒物質モデルで想定されるアクシオンは、質量の違う別のものです。

二次摂動

宇宙は、大きなスケールでは**一様で等方**であり、いわゆる**宇宙原理**に従っています。しかし、より小さなスケールでは、宇宙はそれほど規則的ではありません。**摂動**（宇宙の形状と物質分布の両方における擾乱）が存在し、それが銀河や銀河団・あるいはそれらの密度が低いポイドといった宇宙の構造形成を引き起こしたと考えられています。宇宙摂動にはいくつかの種類があります。宇宙流体の密度と圧力の変動はスカラー摂動と呼ばれ、時空自体のさざ波はテンソル摂動、つまり**重力波**と呼ばれます。アルバート・アインシュタインの**一般相対性理論**では、重力は**非線形**です。物質は重力を生み出しますが、重力はエネルギーを取り込むため、さらに大きな重力を生み出します。その結果、2つの宇宙摂動は、最も単純な数学的形式で表現されていたとしても相互作用し、より複雑な擾乱（二次摂動）を生み出す可能性があります。

原始ブラックホール

原始ブラックホールは、初期宇宙において形成された可能性のある仮説上の**ブラックホール**です。さまざま形成シナリオがあります。質量は広範囲に及び、連星系（重力によって互いに結びついた原始ブラックホールのペア）を形成する可能性もあります。これらの天体は、暗黒物質の最も有力な候補の一つであるため、大きな関心を集めています。

解析結果：非標準的な宇宙論モデルの痕跡の探索

上記のすべての宇宙論の議論は、背景重力波を生成する可能性があります。LVKの重力波データを用いた背景重力波の探索は、**粒子加速器**を用いて到達できるエネルギーを超えるエネルギー領域で、宇宙論モデルのパラメータを制限する可能性があります。

さらに、パリティの破れとは、ある過程の鏡像を見たときに、物理法則が同じではない可能性があるという考えです。一例として**CP対称性の破れ**が挙げられます。これは、CP対称性（電荷共役変換対称性）の原理²が破れる現象です。高エネルギー物理学に基づく一部の宇宙論モデルでは、パリティの破れを生じる重力波が生成されることがあります。したがって、LVKの重力波データは初期宇宙におけるパリティ破れ過程の探索にも利用できます。

今回の論文では、最初の4回のLVK観測運転期間のデータを用いて、上記で説明したすべての宇宙論的波源からの背景重力波を探索しました。同時に、宇宙全体にある**コンパクト連星合体**（例えば、連星ブラックホールや連星中性子星の合体）

など、弱く遠方の天体物理学的波源からの背景重力波の寄与も考慮しました。

重力波信号は発見されなかったものの、私たちの解析によって、検証したモデルに重要な制限をつけることができました。これらの制限の一例、例えば原始ブラックホールモデルの場合を図2に示します。

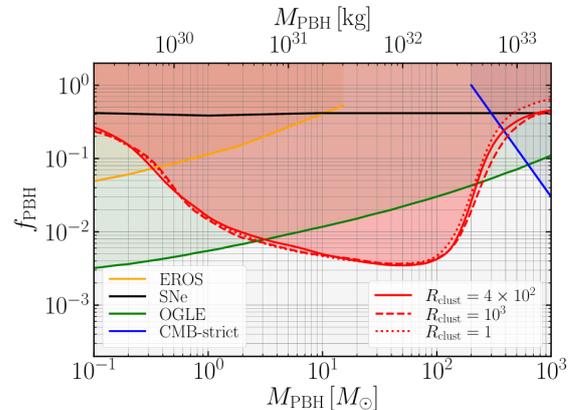


図2: (本論文の図14): 私たちの解析から得られた、現在のダークマターのうち、原始ブラックホールが占める割合 (f_{PBH}) に対する制限を、原始ブラックホール質量 (M_{PBH} , 太陽質量を単位とする) の関数として表したものである。赤い領域は、本解析によって95%の確率で除外される領域であり、これは、ダークマターに占める原始ブラックホールの割合が、赤色の実線、破線、点線の曲線で示される値よりも大きくなることは95%の確率であり得ないことを意味している。これらの曲線は、原始ブラックホール連星の合体発生率に関するさまざまなモデルに対応している。図から、私たちの重力波解析による f_{PBH} への制限は、特定の質量範囲において、これまでに報告されている**マイクロレンズ調査**(EROS, OGLE)による制限、**超新星**レンズ効果(SNe)による制限、**宇宙マイクロ波背景放射**の測定(CMB-strict)などの他の天体物理学的調査による制限よりも大幅に強いことがわかる。

さらに興味のある方へ

- 私たちのウェブサイトで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-P2500150>
あるいは<https://arxiv.org/abs/2510.26848>

(日本語訳：真貝寿明，黒柳幸子)

²粒子を**反粒子**と交換し、その空間座標を反転、つまり「鏡映」にした場合、物理法則は同じであるはずだ、という原理。