



報道関係各位

2024 年 9 月 20 日

高エネルギー加速器研究機構

量子場計測システム国際拠点（WPI-QUP）

ミクロとマクロの世界を統合した視点から ダークマターを解き明かす

本研究成果のストーリー

● Question

宇宙の物質の主要な成分であるダークマターの性質は謎に包まれたままで、正体を探る多くの試みが続けられていますが、これまで成功していません。近年の画期的な重力波観測は、宇宙初期に形成されダークマターの一部をなすと考えられている原始ブラックホールの研究と繋がっています。ダークマターの候補として、**マクロな天体であるブラックホールやミクロな新粒子の可能性を議論するさまざまな理論がある中で、両者が混在した状況**であっても、それぞれを区別しつつ探索する手法が望まれていました。

● Findings

本研究は、2つの天体の合体で発生する重力波が、太陽系に到達するまでに通過したダークマターからの重力レンズによる回折効果によってどのように変調されるかを調べることで、ダークマターの起源を探ることができることを示しました。これは、新粒子のダークマターをまとったブラックホールかどうかを一つ一つ調べられる手法の発見です。

● Meaning

今回の研究は、ダークマターがブラックホールと新粒子というマクロとミクロの両方成分から構成される状況で、ほとんどモデルによらない探索方法を提案したものです。いまだ捉えられていないダークマターの組成を研究するうえでの新しい手段の提案であり、同時にブラックホールの起源に関する新たな情報を与える可能性も秘めています。

120文字
サマリー

遠い宇宙で起きた天体合体からの重力波の信号を詳しく調べることで、重力波が通過してきたダークマターの性質を探ることができることを示しました。

概要

ダークマター（Dark Matter: DM）は、とらえどころのない目に見えない物質であり、宇宙の物質量の約 85%を占めています。ダークマターは、天の川のような銀河がバラバラにならずに、

一つにまとめるために重要な役割を果たしています。宇宙に豊富にあるダークマターを重力以外の方法でも調べるために何十年にもわたって努力が続けられてきましたがこれまで成功しておらず、その正体は依然として科学における最大の謎のひとつです。これまでの探索提案では、ダークマターをある種の新粒子と想定し、その相互作用を仮定して観測法を考えることが普通でしたが、より一般的で広範な探索シナリオ、特にマクロな物質とミクロな物質が混在している場合のシナリオが求められています。

2015 年に国際実験 LIGO によって、2つの恒星質量程度のブラックホールの合体からの重力波が始めて発見され、2017 年のノーベル物理学賞につながって以来、これまでにこのような事象が既に何十も検出されています。2つのブラックホールの合体からくる重力波事象がこれだけ観測されたことは、ブラックホールが宇宙にたくさんあることを示し、そこから天体起源でないブラックホールがダークマターの一部であるという考えも脚光を浴びています。特に原始ブラックホール (Primordial Black Hole: PBH) は、故スティーヴン・ホーキング博士を含む理論家によって数十年前から提案されてきたもので、ビッグバンの数秒後に多数形成されたと考えられており、従来の新粒子とは全く異なるダークマターの候補となります。しかし、これらの PBH を検出・同定し、天体由来の普通のブラックホールと区別する方法を探すことは、大きな課題となっていました。

一方で天体の重さ程度の PBH だけでダークマターを説明するのは困難であり、新粒子など複数の構成要素からなる可能性が高いと考えられています。このようなシナリオでは、PBH は、生成されたあとで、次第に周囲に粒子のダークマターのハローをまとい、「服を着た」PBH になると予想されます。しかし、そのシナリオ決定的にテストする手法は、これまでありませんでした。

今回の研究で、日本と韓国の研究者からなる国際チームは、天体由来ブラックホールの合体など、遠方での合体から放出される重力波に対して、PBH からの重力レンズによる回折現象による特異な変調パターンを見ることにより、PBH の周りのダークマターのハローを探索する革新的なアプローチを確立しました (図 1 の左図参照)。

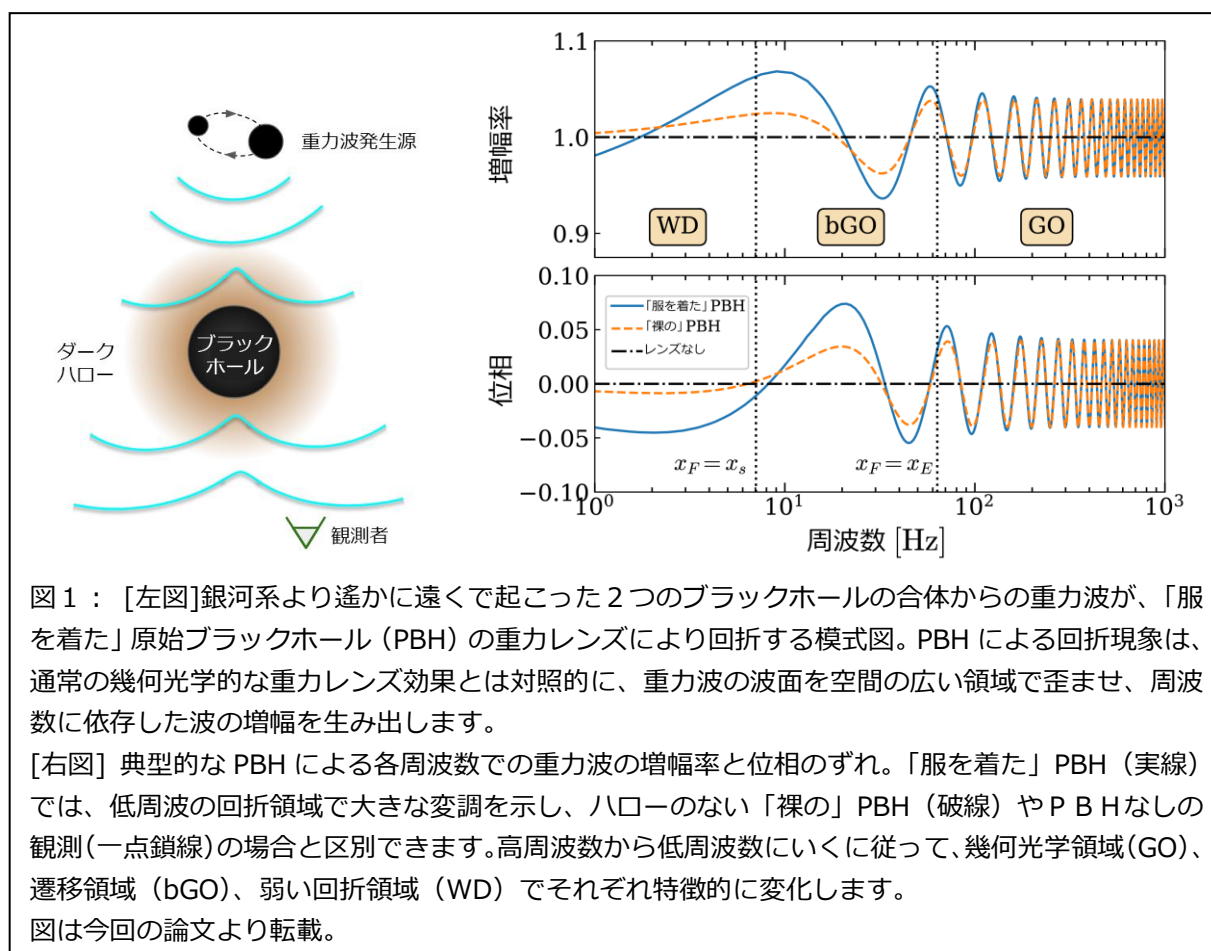
提案された手法は、天体合体時に発生する重力波がブラックホールを通過する際に、重力レンズによって振幅が周波数に依存してユニークに変化することを利用するもので、これが、ブラックホールを取り囲む拡がったダークマターのハロー存在と分布に非常に敏感であることを示しました。この研究は、PBH を検出する方法を提供するだけでなく、周囲にダークマターハローがある PBH とない PBH (それぞれ「服を着た」PBH と「裸の」PBH と呼ばれる) を明確に区別することを可能にします (図 1 の右図参照)。これまでに提案されてきた多くの検出アプローチでは、単独の PBH のハローの有無で決定的な違いが出る観測量を見つけることが難しかったため、画期的な発見です。今回の研究は、PBH が新粒子とともにダークマターとして共存する理論を、直接検証し、決定的に裏付けることができます。

「私たちの新しいアプローチは、さまざまな理論で示唆されているようにダークマターがマクロなブラックホールとミクロの粒子から構成されているのであれば、今後の観測で決定的な発見をする道を開くものです。これは非常にエキサイティングで、他の手法とは別の視点を与えます。」と、この研究の共著者である KEK 量子計測システム国際研究拠点 (WPI-QUP) の主任研究員のヴォロディミール・タキストフ特任准教授は言います。

今回の発見は、ダークマターの組成に関する新しい視点を提供し、ダークマターを探求するための新しいツールを確立するもので、宇宙に広がるダークマターが単一の存在としてではなく、

原始ブラックホールと新粒子など、マクロとミクロの構成要素の混合物として存在する状況を探求する道を開くものです。実験的に確認されれば、宇宙初期の状況や、LIGO のような重力波検出器によって検出された重力波事象から新情報も提供し、新たな発見への道を開くことになります。

この研究は 2024 年 9 月 5 日、Physical Review Letters 誌に掲載されました。



研究グループ

このプロジェクトは、韓国基礎科学研究院 (IBS) の Han-Gil Choi 研究員、韓国ソウル大学の Sungghoon Jung 准教授、Philip Lu 博士研究員、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 量子場計測システム国際拠点 (WPI-QUP) 主任研究員のヴォロディミール・タキストフ特任准教授によって実施された。タキストフ特任准教授は東京大学カブリ IPMU の客員研究員でもある。

謝辞

この研究において、タキストフ特任准教授は日本学術振興会科研費第 23K13109 号、文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) の支援を受けた。

論文情報

題目: Coexistence Test of Primordial Black Holes and Particle Dark Matter from Diffractive Lensing

著者: Han-Gil Choi, Sunghoon Jung, Philip Lu, Volodymyr Takhistov

掲載雑誌: *Physical Review Letters*

<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.133.101002>

DOI: 10.1103/PhysRevLett.133.101002

お問い合わせ先

<研究内容に関すること>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

量子場計測システム国際拠点

Tel: 029-864-5408

e-mail: qup_pr@ml.post.kek.jp

<報道担当>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 広報室

Tel: 029-879-6047

e-mail: press@kek.jp