

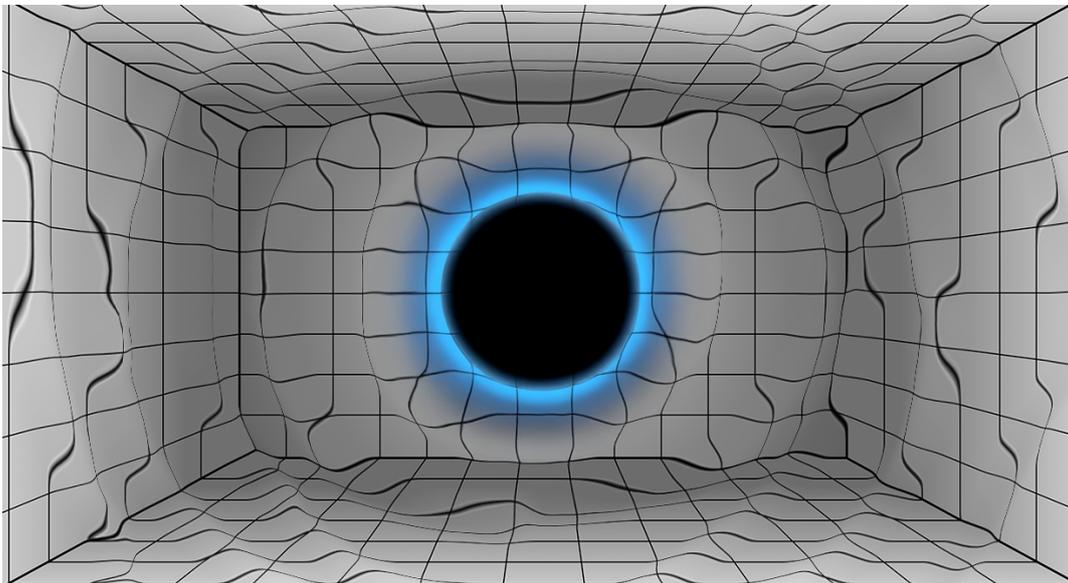
ブラックホールの乱れた「和音」の響き —時空の大域的構造を捉えた重力波波形の構築—

概要

あらゆる楽器に固有の音色があるように、ブラックホールは特徴的な周波数と減衰率（準固有振動）をもつ時空のさざなみ（重力波）を放射します。ブラックホール分光法は、このリングダウン重力波からブラックホールの性質を読み解く手法であり、音だけで楽器を識別することに似ています。しかし、実際の重力波は準固有振動だけでは記述しきれず、時空の大域的構造を反映する「テイル重力波」と呼ばれるゆっくりと減衰する成分も含まれます。また、準固有振動数の構造は、わずかな外的環境の変化に敏感で乱れやすいことも指摘されていました。これらは、ブラックホール分光法の有用さに対する問いを投げかけます。

京都大学白眉センターおよび基礎物理学研究所 大下翔誉 特定助教（兼：理化学研究所 iTHEMS 客員研究員）、Johns Hopkins 大学 Emanuel Berti 教授、Niels Bohr 研究所 Vitor Cardoso 教授（兼：Instituto Superior Técnico 教授）らは、この課題を逆手に取り、小さな外的環境で乱れた準固有振動の集合を取り扱うことで、テイル重力波を含む重力波波形を再構成できることを明らかにしました。この発見は、より高精度な重力波解析技術の発展にもつながると期待されます。

本研究は国際学術誌「*Physical Review Letters*」に7月15日に掲載されました。



ブラックホールが外的環境を伴う状況で振動・重力波を放射するイメージ図。

このような状況では、ブラックホールの振動パターンは、時空の大域的構造に関する情報を含むようになる。

1. 背景

あらゆる楽器には固有の音や音色があります。同様に、振動するブラックホールもそれに固有の特徴的な周

波数や減衰率（準固有振動）を持つ重力波を放射します。特にブラックホール振動によって発せられる減衰重力波をリングダウン重力波といいます。ブラックホール分光法とは、このリングダウン重力波を測定・準固有振動を抽出することで、その波源であるブラックホールの性質を読み解こうとする手法です。例えるならば、楽器の音のみでその楽器の種類を判別するようなものと言えます。

しかし、実際のブラックホール振動からの重力波信号は、その自由振動だけでは説明できない複雑さを持っています。たとえば、重力の長距離的な性質により、準固有モードでは記述しきれない「テイル重力波」と呼ばれるゆっくりと減衰する成分が生じます。つまり、準固有モードだけでは波形全体を精細には捉えられないのです。さらに、準固有モードのスペクトル構造は、わずかな外的環境の変化に敏感であることも問題視されていました。ブラックホールを楽器にたとえた場合、楽器を部屋の中に置いて環境を変えると、その楽器から発せられた音波は壁で反射して「こだま」のように響くことがあります。これらは、ブラックホール分光法の有用さに対する問いを投げかけます。

これらの課題の解決・理解に貢献することを目指す本プロジェクトは、2024年8月にコペンハーゲンで開催された国際研究会「Ringdown Inside and Out」開催期間中に、大下 特定助教、Berti 教授、Cardoso 教授の3人で行った議論から、本格的に始まりました。

2. 研究手法・成果

上述の課題を逆手に取り、著者らは「小さな外的環境によって乱れた準固有振動」の集合が、標準的な準固有振動の集合よりも優れた重力波信号の構成要素となり得ることを示しました。

第一原理的に各々の乱れた準固有振動の振幅を理論計算し、乱れた準固有振動をその振幅で重ね合わせていくと、標準的な準固有振動では捉えられないはずの波形成分（テイル重力波など）も含めて、元々の波形がより高い精度で再構成されることを発見したのです。この仕組みは、楽器の音が室内で奏でられた際に生じる反響音は、楽器内部（ブラックホール近傍の時空構造）だけでなく、室内の大域的な構造（重力の長距離的な効果）に関する情報も含み得ることに例えられます。

従来は標準的な準固有振動に基づいた波形解析が主流でした。また、乱れた準固有振動は、ブラックホール分光法の意義に疑問符を突きつける課題として認識されていました。しかし、この発見により、実は乱れた準固有振動が、ブラックホール周りの大域的な時空構造など豊かな情報を有することが明らかとなり、重力波波形モデルへの応用にも有用であることが示唆されたのです。これにより、ブラックホール分光法の堅牢さを示しただけでなく、さらに高精度なリングダウン波形モデルの構築や重力波データ解析の精度向上に向けた新たな道が切り開かれることが期待されます。

3. 波及効果、今後の予定

今後は、この新たな手法による波形モデルを重力波波形データに適用し、その有用性をさまざまなブラックホール合体などで慎重に吟味していくことが求められるでしょう。リングダウン重力波は、ブラックホールの極近傍から発せられる重要で貴重なシグナルです。これを精細に調べる手法がさらに発展していくことで、極限重力環境でもアインシュタインの一般相対性理論が正しいのか、そこでは新たな物理が必要となるのか、などを探る大きな手がかりが得られる可能性が広がります。そのため、本プロジェクトで得られた成果は、極限重力の検証において大きく貢献すると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は以下の予算、関連機関、研究費によって援助を受けています。

- JSPS 科研費 JP23K13111 ブラックホールの準固有振動およびリングダウン重力波の基礎研究（代表者：大下翔誉）
- 京都大学白眉プロジェクト「ブラックホールの揺らぎに関する理論研究 -ブラックホール振動による重力理論の高精度検証を目指して-」（代表者：大下翔誉）
- The Center of Gravity is a Center of Excellence funded by the Danish National Research Foundation under Grant No. 184
- NSF Grants No. AST-2307146, No. PHY-2207502, No. PHY-090003, and No. PHY-20043
- NASA Grant No. 21-ATP21-0010
- The John Templeton Foundation Grant No. 62840
- The Simons Foundation
- The Italian Ministry of Foreign Affairs and International Cooperation Grant No. PGR01167
- VILLUM Foundation (Grant No. VIL37766)
- DNRF Chair program (Grant No. DNRF162)
- Danish National Research Foundation
- The European Union's H2020 ERC Advanced Grant "Black holes: Gravitational engines of discovery" Grant Agreement No. Gravitas-101052587
- The European Union's Horizon 2020 research
- Innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie Grant Agreements No. 101007855 and No. 101131233.

<用語解説>

- ブラックホール

極端に高密度な物体は、その分強い重力をもちます。そして、内圧で支えきれなくなるほどの重力を持つと、際限なく潰れます。この際に形成されるのがブラックホールです。物質は点になるまで潰れるので、ブラックホール自体は極めて単純な構造を持つと考えられており、その重さと回転（と帯電量）だけで特徴づけられるとされています。この単純な構造のおかげで、重力の検証が行いやすくなります。

- 重力波

ブラックホールなど高密度で重たい物体が加速度運動すると、その周りの時空が動的に歪み、その歪みは波として遠方へ伝搬します。この時空の歪みの伝搬を重力波といいます。

- リングダウン重力波

鐘を突くと鈍い音が減衰しながら響くように、ブラックホールに物が落ち込むなどして衝撃が与えられると、減衰振動を伴う重力波が放射されます。これがリングダウン重力波です。この波形は、複数の準固有振動の重ね合わせで精度良く記述できることが知られています。ただ、標準的な準固有振動では、後に説明するテイル重力波までは記述できません。

- テイル重力波

準固有振動は、ブラックホール近傍の時空構造の振動を反映している一方で、テイル重力波は、ブラックホー

ルから遠く離れた大域的な時空構造に起因します。準固有振動による信号とテイル重力波は、違う場所を起源とするシグナルですが、重なり合うようにして波形に現れます。したがって、準固有振動だけでは、完全な重力波波形モデルを構成できないと考えられています。

- 外的環境

ブラックホールの揺らぎを理論的に記述する際は、多くの場合、ブラックホールが単体で振動し、その周りは真空であると考えます。しかし実際のブラックホールには、その周りに物質が分布している場合があります（物質が円盤状に分布する降着円盤など）、ここではそれを「外的環境」と総称しています。

<研究者のコメント>

2015 年以降、多くのブラックホール合体が重力波観測で見つかった素晴らしい時代です。ブラックホールなどに代表される強重力の物理学や重力波天文学は、理論と観測のすり合わせにより、精密科学の1つとして今後も発展していくことでしょう。しかしながら、観測された重力波データから「極限重力に関する最大限の情報」を引き出し、理論予言と照合していくには、まだ課題も残っているのが実情です。世界中では、課題解決に向けた建設的な競争・論争が繰り広げられています。本研究が、当該分野の発展に貢献することを期待しています。(大下翔誉)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Unstable Chords and Destructive Resonant Excitation of Black Hole Quasinormal Modes (ブラックホールの準固有振動の不安定な和音と相殺的な励起について)

著者：Naritaka Oshita, Emanuele Berti, and Vitor Cardoso

掲載誌：*Physical Review Letters* DOI：<https://doi.org/10.1103/ht2n-vvvh>