

● 大下 翔誉 特定助教

Naritaka OSHITA (Assistant Professor)

研究課題: 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 -
(Theoretical aspects of a black hole ringing: Probing extreme gravity with ringing black holes)

専門分野: 重力, 宇宙論, 天体物理学 (理論) gravity, cosmology, astrophysics (Theory)

受入先部局: 基礎物理学研究所 (Yukawa Institute for Theoretical Physics)

前職の機関名: 理化学研究所 数理創造プログラム

(RIKEN Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences Program (iTHEMS))



ブラックホールはこの宇宙で最もミステリアスな天体の一つだろう。その強い重力により、たとえ光すらブラックホール内側から外へ逃げ出すことはできない。強重力以外のブラックホールの興味深い特徴として、その「単純さ」も挙げられる。例えば、地球を完全に特徴づけるためには、大量の情報が必要となる。地球の質量、自転の速さ、温度分布、表面の凹凸などを指定する必要があるだろう。ところが、天体物理学におけるブラックホールは、質量と自転の速さの2つだけでその時空構造が完全に決まることが、一般相対性理論によって示される。このブラックホールの単純さは、重力を強重力環境下で検証する上で極めて有用となる。一般相対性理論は地球や太陽系などの弱重力環境で生じる現象を説明し、成功を収めてきた。しかし、これがブラックホール極近傍や宇宙誕生の直後といった極限重力環境でも成立するかを知るには、より厳しい検証を要する。白眉プロジェクトにおいて、私はブラックホールの揺らぎに潜む普遍性を理論的に明らかにし、その揺らぎから生じる重力波シグナルを予言することで、極限重力の物理的理解やその新たな検証法構築に挑む。

Black holes are perhaps the most mysterious objects in the Universe. They have extreme gravity as even light cannot escape from the black hole interior, which is a famous feature of black holes. Another noteworthy nature of the black holes is its “simplicity”. For example, to precisely characterize the earth, many parameters and information are needed: the mass, spin, distribution of the interior temperature, number of sand particles, how bumpy the surface is, and so on. On the other hand, a black hole is one of the simplest objects in the Universe as only the mass and spin of the black hole, i.e., two parameters only, can completely characterize the structure of the astrophysical black hole in Einstein’s general relativity, the standard theory of gravity. This simplicity and universality of black holes are useful to probe gravity in strong gravity regimes. Although we know general relativity succeeded to explain various phenomena in weak gravity regimes, it is still unknown if the theory is valid even in strong gravity regimes, e.g., in the vicinity of the black holes or at the beginning of the Universe. I aim to develop a novel way to probe extreme gravity by studying the universal nature of a black hole ringing and by predicting the gravitational wave signals sourced by the black holes under the Hakubi project.

ブラックホールと重力波

密度が過剰に大きくなり、自重を支えることができなくなった天体は、際限なく潰れ、最期にブラックホールとなる。実際、アインシュタインの一般相対性理論でブラックホールを記述する解が発見され、現在ではさまざまな観測から、その存在は肯定的に捉えられている。2015年に初めて達成された、ブラックホール起源の重力波検出は、極めて意義深い。重さをもつ物質はその周りの時間や空間(時空)を歪める。連星を成す2つのブラックホールは、互いの重心を周りながら少しずつ近づき、やがて合体し、1つの大きなブラッ

クホールになる(図1)。この極端な現象では、激しい時空の歪みが生じ、その大きな歪みは遠方へ伝搬し、地球にまで観測可能なシグナルとして到達する。この時空の歪みの伝播が「重力波」であり、ブラックホールのような強重力系を観測する上で重要なシグナルとなる。また、ブラックホールおよびそこから現れる重力波シグナルは、重力理論を検証する上で極めて有用である。重力の標準的な理論である一般相対性理論は、弱重力の環境では成功を収めている一方で、ブラックホール極近傍という強重力環境でも機能するかは定かではない。より厳しい環境で、一般相対性理論を検証

することで、その理論が宇宙誕生直後から現在までを記述する理論として適切かを間接的に検証できる。

ブラックホールの響きで探る極限重力

楽器やワイングラスだけでなく、決まった構造をもつ多くの物体は、それに固有の振動パターン「固有振動」をもつ。一般相対性理論において、ブラックホールも決まった時空構造を持つことが知られている。つまり楽器などのように、ブラックホールは準固有振動を持つことが予言されている。ここで「準」は、ブラックホールの固有振動は一般に無視できない減衰率を伴うことに由来する。このブラックホールの準固有振動は、想定する重力の理論や、ブラックホール表面の環境に敏感に依存する。従って、ブラックホールの準固有振動を精密に測定できれば、そのブラックホールの表面近傍の様子や、強重力環境での重力理論の検証も可能となる。「ブラックホールの響き」に強重力での物理を理解する手掛かりが潜んでいる。

ブラックホール振動の普遍性

では、この準固有振動は、どのようにして調べられるか？ブラックホール合体の後に形成される単一のブラックホールは、形成直後に合体衝撃の余韻で減衰振動をする（図1のリングダウン）。このリングダウン期において放射されるリングダウン重力波は、ブラックホールが無数にもつ準固有振動の重ね合わせで表されることが知られている。つまり、ブラックホール合体直後に放射された重力波波形に注目すれば、ブラックホールの準固有振動を検出することが原理的には可能となる。では、無数に存在するブラックホールの準固有振動のうち、主にどの振動パターンが波形振幅に寄与するのだろうか？これまで、数値シミュレーションおよびデータ解析によって、減衰率が5番目と6番目に低い準固有振動が特に大きく励起される傾向にあることが報告されていた。私はこれに理論的裏付けを与えるか検証するべく、各々の振動パターンの「潜在的な励起のしやすさ」を定量化する励起因子を、ブラックホール摂動論に基づいて精密に計算した [1]。その結果、減衰率が5番目と6番目に低い準固有振動の励起因子が他の振動モードより大きいことがわかった（図2）。シミュレーションによる経験則が、ブラックホール振動の普遍的性質と相関を持つことを、理論・解析

計算のみを駆使して明らかにした。この他の興味深い例として、ブラックホール時空は、低周波の重力波を部分反射する性質を持っており、その「反射率」が重力理論の検証に応用できることを提案した [2]。実際に、そのブラックホール時空の反射率はリングダウン期に放射される重力波のスペクトルに刻まれ得ることが、私の数値シミュレーションによって確認された。このように、ブラックホールの単純さに起因する普遍性を見抜くことは、ブラックホール自身の理解に繋がるだけでなく、重力波シグナルからどのようにその普遍性を抽出・検証するかを見出すことで、重力の新たな検証法構築にも有用となる。白眉プロジェクトでは、ブラックホール揺らぎの普遍性を理論的な立場で研究し、強重力の物理の理解と重力理論の検証法への応用に挑む。

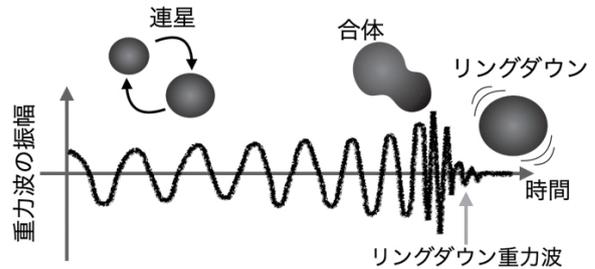


図1：ブラックホール連星合体の様子と、その際に放射される重力波波形。

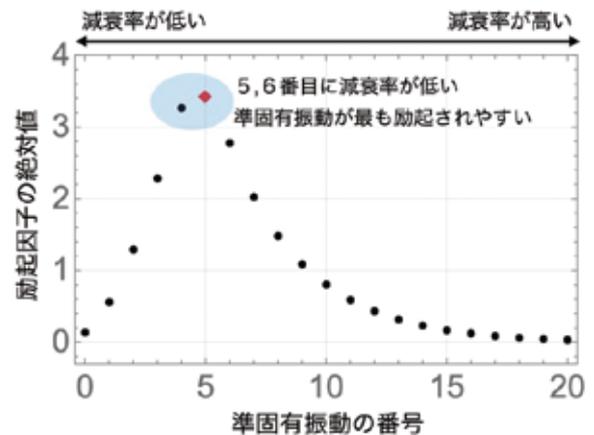


図2：準固有振動各々の励起性を定量化する励起因子の計算結果 [1]。赤点が励起因子の大きさのピーク値を示す。

参考文献

- [1]Naritaka Oshita, “Ease of excitation of black hole ringing: Quantifying the importance of overtones by the excitation factors”, Phys. Rev. D 104, 12, 124032, 2021.
- [2]Naritaka Oshita, “Thermal ringdown of a Kerr black hole: overtone excitation, Fermi-Dirac statistics and greybody factor”, JCAP 04, 013, 2023.