

GW250114: 宇宙で響いたカオスの「鐘」

重力波の直接観測に成功してから10年目の節目に[LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) 共同研究グループは新たな連星ブラックホール合体の信号、GW250114を観測したことを発表しました。合体した2つのブラックホールの質量や地球からの距離は、2015年にLIGOが史上初めて重力波を観測した[GW150914](#)の質量や距離と非常に似通っています。一方、10年に渡って行われてきた世界中の重力波検出器やデータ解析手法の改良により、LVKの研究者たちは最初の観測に比べ、GW250114を3倍も鮮明に「聞く」ことができるようになったのです。先例のないこの観測によって、私たちはブラックホールが常に大きくなり続け、また、揺らされるとアインシュタインが予言した「音」で鐘のように鳴ることを確証づけたのです。

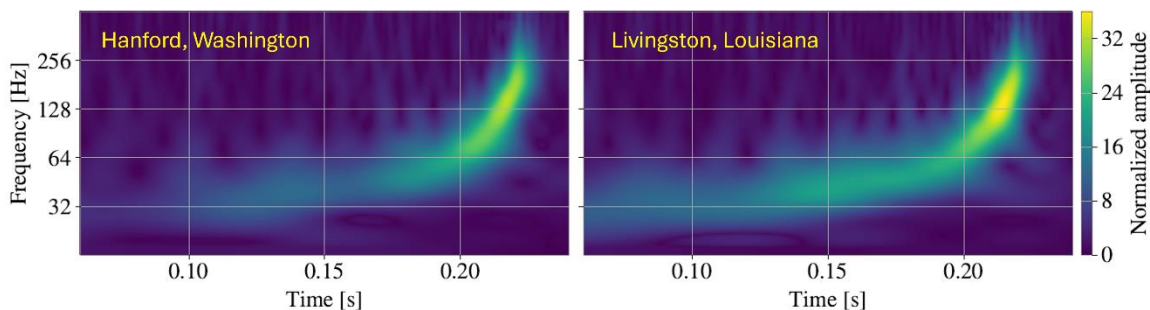


図1: (論文の図1から抜粋。) 重力波イベントGW250114はLIGOハンフォード(左図)とLIGOリヴィングストン(右図)の検出器で観測された。図は検出器で観測された重力波の歪み振幅を時間(横軸、単位は秒)と周波数(縦軸、単位はHz、1秒にいくつ波の周期があるか)で表す。2つの図はGW250114の周期が0.2秒の間に30Hzから250Hzに急激に増加し、チャープ信号であることを示す。

50年以上前にスティーヴン・ホーキングとヤコブ・ベッケンシュタインは[ブラックホールの事象の地平面の面積がエントロピー](#)と対応している、と推論しました。エントロピーは系の乱雑さ、またはカオス¹を表す尺度であり、時間と共に常に増加する物理量です。この推論が正しければ、ブラックホールの表面積は増加することしかできません。このことは物理学者たちを魅了しました。なぜなら、アインシュタインの[一般相対性理論](#)によれば、ブラックホールはその質量と[自転角運動量](#)によってのみ特徴づけられる²非常に単純な天体だからです。一方、ホーキングとベッケンシュタインの発見はブラックホールが単純なものでありながら膨大な量のカオスを包含していることを示唆しています。この二重性は時空と[量子力学](#)の深い繋がりを示す、と考えられています。

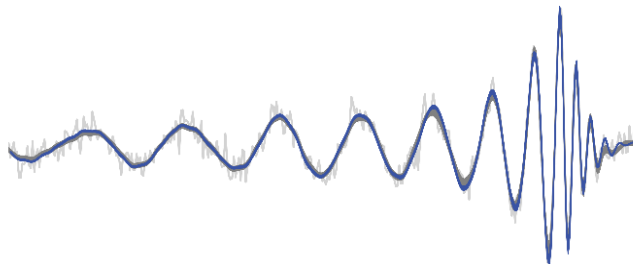


図2: LIGOリヴィングストン検出器でGW250114観測時に得られたデータ(薄い灰色)とこれを最も良く説明する連星ブラックホール合体で生じる重力波モデル(紺色)を重ねた図。これらがよく合致することがわかる。濃い灰色の帯は観測された信号が連星ブラックホールによるものとは仮定せずに波形を再構築したもの。濃い灰色の帯と紺色の帯が矛盾しないことは私たちのモデルが信号を正確に描写していることを表す。

もっと知るには:

ウェブサイト: www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/

1. 厳密に言うとう、数学上はカオスは乱雑さとは異なる概念を意味しますが、簡潔な説明ではよく同義なものとして使用されています。(例: [こちら](#))
2. 正確には、ブラックホールは0でない総電荷を持つことができますが、恒星から生まれたブラックホールがもつ総電荷は無視できるほど小さいと考えられています。



GW250114を使い、ブラックホールの独特な2つの側面（ブラックホールが単純なものであること、そのエントロピーが常に増大すること）を検証することができます。GW250114 の信号の明瞭さと強さはこれまでにないほど精密にブラックホールの「鐘の音」を測定することを可能にしました。

2 つのブラックホールの合体によって自転するブラックホールが生まれると鐘や太鼓のように振動し、独特な重力による「音」を放出しますが、その音はすぐに消えていきます。その様子は、[自転するブラックホール](#)のまわりの振動という数学的にはとても簡単な系で考えられるという仮説があります。自転するブラックホールはカー・ブラックホールと呼ばれ、ロイ・カーによって最初に推論されました。この仮説を検証するため、LVK の研究者たちはGW250114の信号から合体による重力波の放出で生じたブラックホールの「音」を丁寧に抜き出し、予想されるカー・ブラックホールの「音」と一致することを確かめることに成功しました。

ブラックホールの振動を理解するには楽器を想像すると良いかもしれません。鐘がギターや太鼓とは異なる音を出すように、それぞれの楽器はその形や材質によって決まる独特な音を出します。しかし、楽器の音はその楽器がどのように鳴らされるかによっても変わります。例えば、太鼓をバチで叩くのと筆で叩くのとでは異なるように。カー・ブラックホールの音はブラックホールの質量と回転速度によって決まる特定の周波数と継続時間を持ちます。また、音の一部は摂動によって生じることもあります。複数の音が測定できた場合、それらを比較し、同じカー・ブラックホールによるものかどうか調べることができます。LVK の研究者たちは史上初めて、高い信頼度をもって、少なくとも2つの音が合体後のブラックホールから放出され、その周波数と減衰時間がカー・ブラックホールの予想と一致することを示しました。GW250114の残骸ブラックホールは実に単純でその質量と自転角運動量によって特徴づけられるものだったのです。

同時に、LVKの研究者たちは図3に示されるように、合体で生じたブラックホールの表面積が合体前のブラックホールの表面積の和より大きいことを確かめました。表面積を測定するために必要な情報は、すべて合体後のブラックホールの鐘の音から得られました。合体前のブラックホールたちは鐘の音を出さないものの、それぞれ重力波信号を放出します。ブラックホールが互いの周りを周回しながら重力波としてエネルギーを放出し、その距離は縮まっていきます。LVK の研究者たちはGW250114の信号のうち、合体前の部分を使って合体前の2つのブラックホールのそれぞれの表面積を測定しました。これらの完全に独立した測定はGW250114の合体が宇宙のエントロピーを増大させたことを示したのです！

GW250114の観測は数千人の研究者が数十年に及んで行ってきた重力波検出器の改良、ブラックホールの響き方の研究、そしてデータから鐘の音を聞き取るための独創的な手法の考案によって成し遂げられました。その10回目の誕生日を迎え、重力波天文学は進展し、宇宙を見つめる新たな方法を提供し続けています。重力波天文学はこれからも多くの驚くべき発見をもたらしてくれることでしょう。

もっと知るには：

ウェブサイト：

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/

論文の無料プリプリント：[こちら](#)または[arXiv](#)

GW250114のデータは Gravitational-Wave Open Science Center から：[こちら](#)

本要約の英語版は[こちら](#)

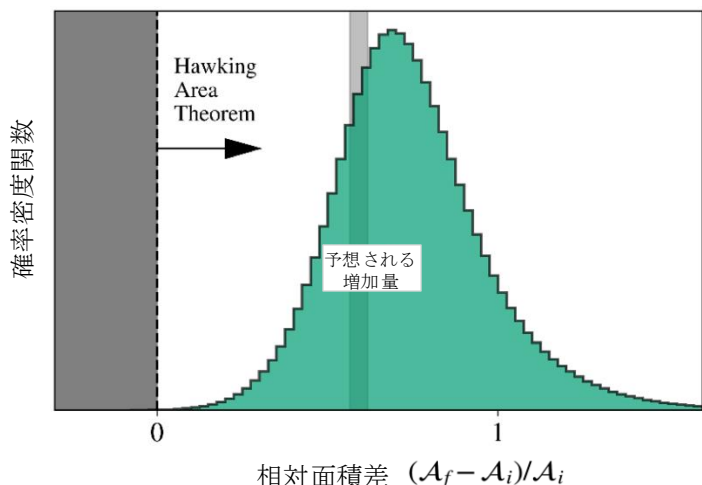


図3：（論文の図5より抜粋。）GW250114の相対面積差（合体で生まれたブラックホールの表面積 A_f から合体前の2つのブラックホールの表面積の和 A_i を引き、 A_i で割って正規化したもの）を横軸、確率密度関数を縦軸に表す。ホーキングの面積定理によれば相対面積差は濃い灰色の領域（縦の破線は相対面積差が0、すなわち $A_f = A_i$ ）の右側に位置するはずである。図から、確率密度関数は相対面積差が0以下であることはほとんどあり得ないことが読み取れる。このことはホーキングの面積定理と矛盾がないことを示す。確率密度関数の頂点は図中の「予想される増加」を表す薄い灰色の縦帯とよく合致する。この薄い灰色の縦帯は一般相対性理論で予想される相対面積差の増加量（およそ65%ほど）を表す。