

令和 8 年 5 月 1 3 日

ブラックホール近傍での粒子の軌道のカオス的振る舞いと量子重力に基づくホログラフィーからの示唆に関する研究

福島大学大学院共生システム理工学研究科宇宙論研究室のテルカア ビクター タルゲマ (Terkaa Victor Targema) さん (博士後期課程 1 年、日本政府 (文部科学省) 国費留学生、ナイジェリア出身、筆頭著者)、ウスマン ザファール (Usman Zafar) さん (同 3 年、同国費留学生、パキスタン出身)、馬場一晴教授等の国際共著論文が世界的に権威のあるアメリカ物理学会の国際学術誌 “Physical Review D” に掲載されました。本研究では、一般相対性理論を拡張した重力理論において、ブラックホール近傍での粒子の軌道がカオス的に振る舞う可能性があることを示しました。この研究成果は、福島の地から世界最先端の宇宙物理学研究を発信する好例となっています。

<研究内容>

質量をもつ物体同士には、万有引力と呼ばれる引き合う力がはたらきます。アインシュタイン博士が 1915 年に完成した一般相対性理論では、太陽よりも十分に大きな質量をもつ重たい恒星の場合、その最期には、圧力で重力を支えきれなくなり、重力崩壊を起こして潰れてしまうことが知られています。このような時空は事象の地平面をもち、一般に「ブラックホール」と呼ばれています。ブラックホールは、その質量があまりに大きいため、自然界で最も速く走る光さえも出て来ることができません。銀河の中心には、非常に重たいブラックホールの存在が観測されており、我々の天の川銀河にも存在しています (図 1)。

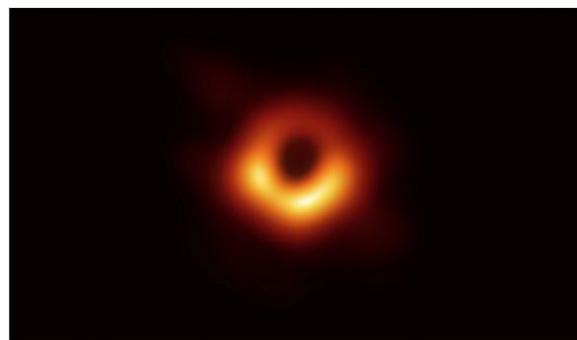


図 1 ブラックホールシャドウ [出典 : Event Horizon Telescope の HP
<https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>]

近年、ブラックホール近傍での光子や電子などの粒子の運動がカオス的振る舞いを示すかどうかの研究が盛んに行われています。カオスとは、系が何等かの非線形性をもつことにより、初期条件がわずかに異なるだけで、時間発展と共に最終的な解の値が大きく異なる現象を意味しています。

一方、「ホログラフィー」と呼ばれる、次元の違う空間上の物理原理が実は同じである、という性質が量子重力（非常に高いエネルギー領域における重力）から示唆されています。アインシュタインの一般相対性理論では、静的で球対称な真空のブラックホール近傍の粒子の軌道は、カオス的な振る舞いを起こさないことが指摘されており、この条件がホログラフィーに基づいて導かれています。

加えて、量子論的効果が重要になるエネルギーが非常に高い領域では、一般相対性理論に加えて曲率の高次量子補正項が現れる可能性が指摘されています。非常に高いエネルギー領域では重力も極めて強くなります。ブラックホールでは重力が極限的に強くなるため、曲率の高次量子補正項を考慮した場合にブラックホールを解析することは大切です。

そこで我々は、曲率の高次量子補正項を考慮して一般相対性理論を拡張した重力理論において、ブラックホール近傍での粒子の軌道を解析し、その軌道がカオス的に振る舞う可能性があることを明らかにしました。

この研究成果は、2026年4月、素粒子物理学、場の理論、重力および宇宙論で最も高い評価を得ている国際学術誌の一つであるアメリカ物理学会の国際学術誌「Physical Review D」に掲載されました。本研究は、福島大学の博士後期課程の大学院生2名（国費留学生）と教員が研究の構想、解析、考察、論文執筆に至る全ての過程を担当しました。従いまして、福島大学発の宇宙物理学研究の成果です。

本研究によって得られた成果を通じて、重力の普遍的性質、並びに非常にエネルギーの高い極微（ミクロ）な世界での物理学を記述する量子重力の理解にもつながる可能性があるかと強く期待されます。

<書誌情報>

題名 : Physical constraints on the Maldacena–Shenker–Stanford chaos-bound
in black hole spacetimes

著者名 : Terkaa Victor Targema, Kazuharu Bamba, Riasat Ali, Usman Zafar

掲載学術誌名 : Physical Review D (印刷中)

DOI: <https://doi.org/10.1103/s39h-mlcs>

[e-print arXiv: 2512.22834 [hep-th]]

(お問い合わせ先)

共生システム理工学類教授 馬場一晴

電 話 : 024-503-3263 (研究室), 024-548-5213 (理工支援室)

メール : bamba@sss.fukushima-u.ac.jp

宇宙論研究室 URL : <https://bamba.sss.fukushima-u.ac.jp/index.html>

ブラックホール近傍での粒子の軌道のカオス的振る舞いと量子重力に基づくホログラフィーからの示唆に関する研究

令和8年5月13日 福島大学 第203回定例記者会見



国立大学法人

福島大学
Fukushima University

福島大学大学院共生システム理工学研究科

発表者：馬場 一晴

共同研究者：テルカア ビクター タルゲマ (Terkaa Victor Targema)

(博士後期課程1年、日本政府(文部科学省)国費留学生、ナイジェリア出身、筆頭著者)

ウスマン ザファール (Usman Zafar)

(同3年、同国費留学生、パキスタン出身)

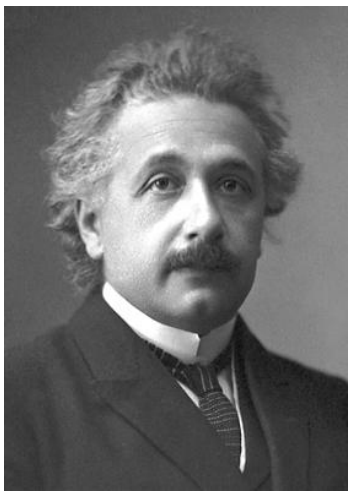
Riasat Ali

発表概要

- 福島大学大学院共生システム理工学研究科宇宙論研究室のテルカアビクター タルゲマ (Terkaa Victor Targema) さん (博士後期課程1年、日本政府 (文部科学省) 国費留学生、ナイジェリア出身、筆頭著者)、ウスマン ザファール (Usman Zafar) さん (同3年、同国費留学生、パキスタン出身)、馬場一晴教授等の国際共著論文が世界的に権威のあるアメリカ物理学会の国際学術誌“Physical Review D”に掲載されました。
- 本研究では、一般相対性理論を拡張した重力理論において、ブラックホール近傍での粒子の軌道がカオス的に振る舞う可能性があることを示しました。



この研究成果は、福島の地から世界最先端の宇宙物理学研究を発信する好例となっています。



Dr. Albert Einstein

一般相対性理論 アインシュタイン(1915年)

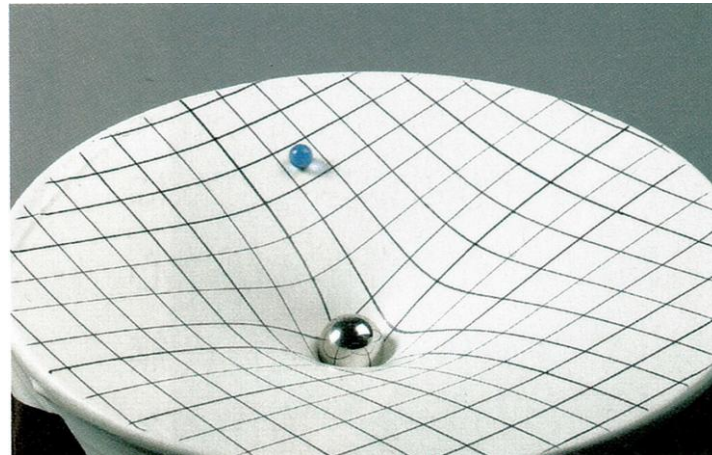
ノーベル賞のホームページ[<https://www.nobelprize.org/>]より引用。

「重力」: 時間と空間(4次元時空)の曲がり具合



重力(4次元時空間の曲率) = 物質の存在

宇宙および天体の進化を支配する力

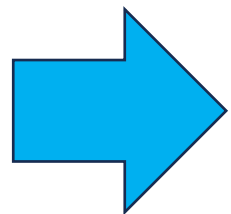
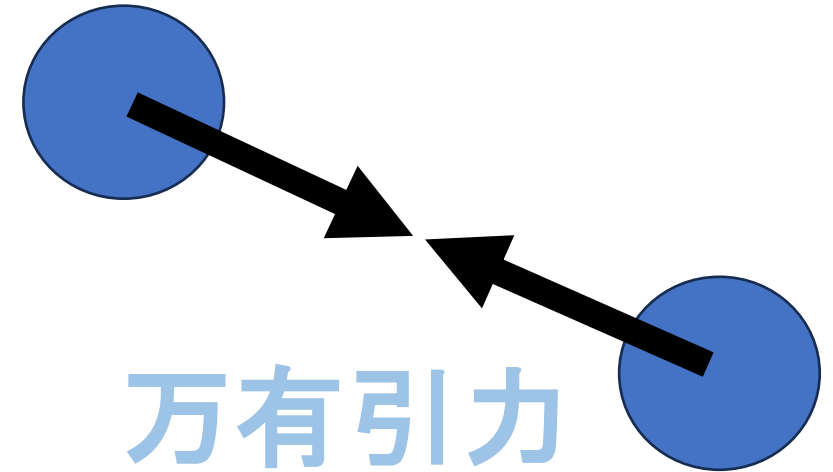


[三浦 登 他(著)、物理、東京書籍(株)、2012年]より引用。

太陽よりも十分重たい天体の最期

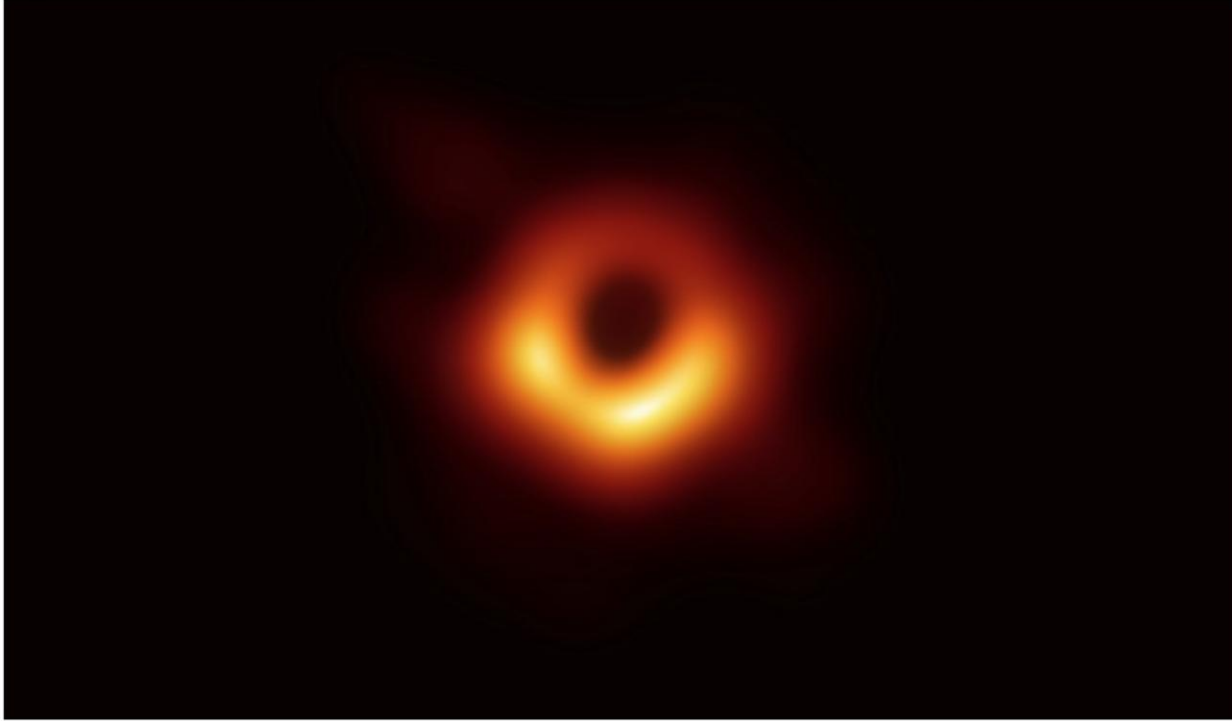
- 質量をもつ物体同士には、万有引力と呼ばれる引き合う力がはたらきます。

一般相対性理論では、太陽よりも十分に大きな質量をもつ重たい恒星の場合、その最期には、圧力で重力を支えきれなくなり、重力崩壊を起こして潰れてしまうことが知られています。



このような時空は事象の地平面をもち、一般に「ブラックホール」と呼ばれています。

ブラックホール



ブラックホールシャドウ

[出典 : Event Horizon TelescopeのHP]

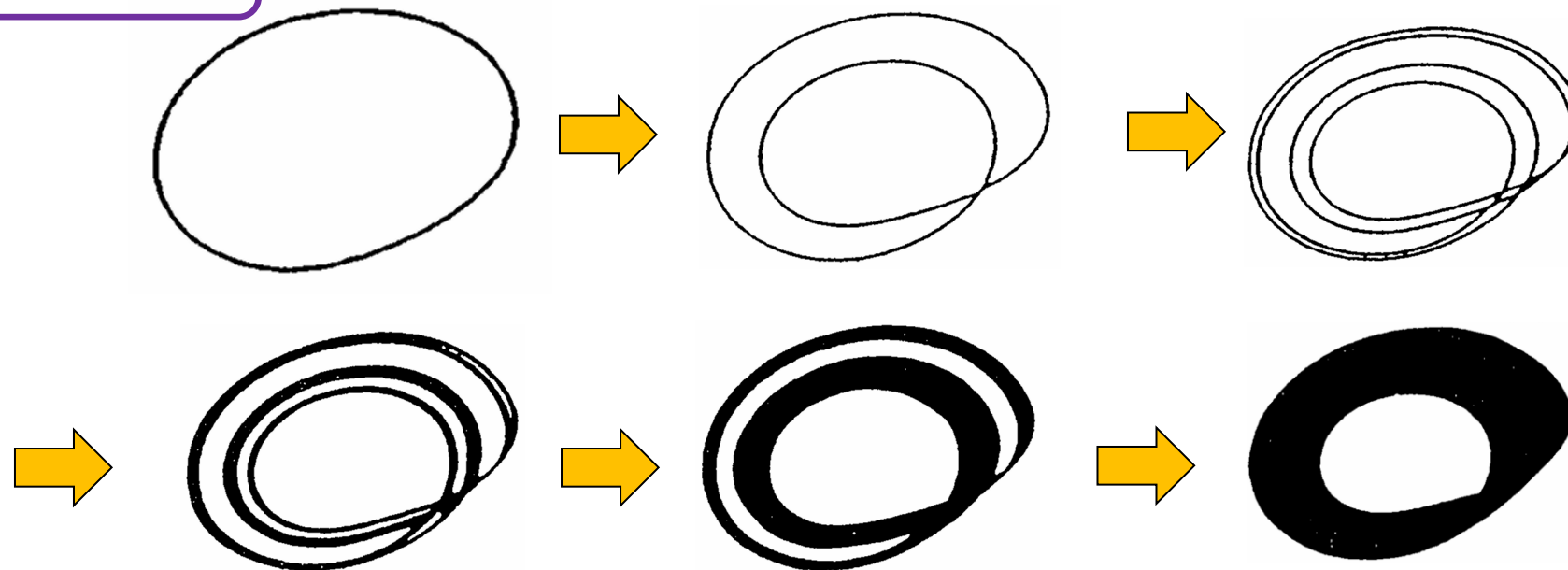
<https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>]

ブラックホールは、その質量があまりに大きいため、自然界で最も速く走る光さえも出て来ることができません。銀河の中心には、非常に重たいブラックホールの存在が観測されており、我々の天の川銀河にも存在しています。

カオス運動

- カオスとは、系が何等かの非線形性をもつことにより、初期条件がわずかに異なるだけで、時間発展と共に最終的な解の値が大きく異なる現象を意味しています。

軌道の振る舞い



出典:[J. Crutchfield *et al.*,
Phys. Lett. 76A (1980) 1]

系のパラメーターの
値を変化させた場合

本研究の目的

ブラックホール近傍の光子や電子などの粒子の運動の解明

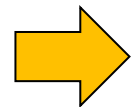
近年、ブラックホール近傍での粒子の運動がカオス的振る舞いを示すかどうかの研究が盛んに行われています。

「ホログラフィー」と呼ばれる、次元の違う空間上の物理原理が実は同じである、という性質が量子重力（非常に高いエネルギー領域における重力）から示唆されています。一般相対性理論では、静的で球対称な真空のブラックホール近傍の粒子の軌道は、カオス的な振る舞いを起こさないことが指摘されており、この条件がホログラフィーに基づいて導かれています。

本研究の結果

量子論的効果が重要になるエネルギーが非常に高い領域では、一般相対性理論に加えて曲率の高次量子補正項が現れる可能性が指摘されています。非常に高いエネルギー領域では重力も極めて強くなります。ブラックホールでは重力が極限的に強くなるため、曲率の高次量子補正項を考慮した場合にブラックホールを解析することは大切です。

＜新たに発見した結果＞



曲率の高次量子補正項を考慮して一般相対性理論を拡張した重力理論において、ブラックホール近傍での粒子の軌道を解析し、その軌道がカオス的に振る舞う可能性があることを明らかにしました。

本研究の成果

- この研究成果は、2026年4月、素粒子物理学、場の理論、重力および宇宙論で最も高い評価を得ている国際学術誌の一つであるアメリカ物理学会の国際学術誌「Physical Review D」に掲載されました。


題名 : Physical constraints on the Maldacena-Shenker-Stanford chaos-bound in black hole spacetimes

著者名 : Terkaa Victor Targema, Kazuharu Bamba, Riasat Ali, Usman Zafar

掲載学術誌名 : Physical Review D (印刷中)

DOI: <https://doi.org/10.1103/s39h-mlcs>

[e-print arXiv: 2512.22834 [hep-th]]



The screenshot shows the APS Journals website for Physical Review D. The article title is "Physical constraints on the Maldacena-Shenker-Stanford chaos bound in black hole spacetimes" by Terkaa Victor Targema and Kazuharu Bamba and Riasat Ali and Usman Zafar. It is an accepted paper from April 8, 2026. The abstract discusses chaotic motion near black holes and the Maldacena-Shenker-Stanford (MSS) chaos-bound, noting that reported violations remain contradictory and that the authors develop a constrained framework to distinguish between parameter-induced and curvature-induced violations.

[出典 : <https://doi.org/10.1103/s39h-mlcs>]

本研究の波及効果

- 本研究によって得られた成果を通じて、重力の普遍的性質、並びに非常にエネルギーの高い極微(ミクロ)な世界での物理学を記述する量子重力の理解にもつながる可能性があると強く期待されます。

➡ 本研究は、福島大学の博士後期課程の大学院生2名(国費留学生)と教員が研究の構想、解析、考察、論文執筆に至る全ての過程を担当しました。



福島大学発の宇宙物理学研究の成果と考えられます。