

令和 7 年 4 月 23 日

## 量子重力から示唆されるエントロピーを用いたブラックホール熱力学における新しい相転移現象の研究

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ウスマン ザファール (Usman Zafar) さん (博士後期課程 2 年、日本政府 (文部科学省) 国費留学生、パキスタン出身、筆頭著者)、馬場一晴教授等の国際共著論文が世界的に権威のある学術誌 “Physics Letters B” に掲載されました。本研究では、量子重力の効果を取り入れたエントロピーを用いてブラックホールの熱力学を詳しく考察し、新しい相転移現象の物理的解釈を示しました。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)。

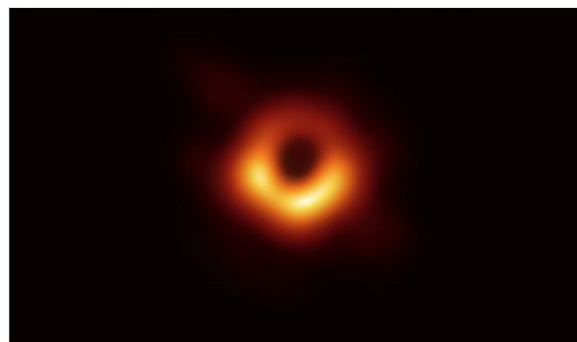


図 1 ブラックホールシャドウ [出典: Event Horizon Telescope の HP  
<https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>]

ブラックホールの性質を探る方法として、熱力学の研究があります。相転移現象は、ブラックホールの熱力学における最重要課題の一つです。従来、ブラック

ホールのエントロピー（ものの散らばり度合いを表す物理量）は、Bekenstein-Hawking エントロピーと呼ばれる、ブラックホールの表面積に比例する表式が用いられてきました。近年、量子重力（非常に高いエネルギー領域における重力）の効果を取り入れることにより、ブラックホールのエントロピーは、これまでの Bekenstein-Hawking エントロピーよりも大きくなる可能性が指摘されました。

そこで、ザファールさんと馬場教授等は、近年新しく提唱されたブラックホールエントロピーの表式を用いて、従来調べられていなかった相転移現象を解析することにより、位相幾何学に基づく物理的解釈が得られることを示しました。

この研究成果は、2025 年 4 月、素粒子物理学、原子核物理学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「Physics Letters B」（出版社：Elsevier）誌上に掲載されました。本論文は、2022 年 12 月から 2024 年 7 月まで同じく福島大学宇宙論研究室で客員研究員（日本学術振興会外国人特別研究員）を務めておられたクリシュナカンタ ブハタチャルヤ（Krishnakanta Bhattacharya）さん（現在、ビルラ工科大学ドバイ校、Assistant Professor）との国際共著論文です。本研究は、福島大学在籍時に発表した論文を発展させた内容であり、福島大学発の宇宙物理学研究の成果と考えられます。

本研究によって得られた成果を通じて、重力の普遍的性質と重力の量子化（非常にエネルギーの高い極微（ミクロ）な世界における物理学の法則）への理解にもつながる可能性があるものと強く期待されます。

#### <書誌情報>

題名：“Thermodynamic analysis of black holes with cloud of strings and quintessence via Barrow entropy”

著者名：Usman Zafar, Kazuharu Bamba, Tabinda Rasheed and  
Krishnakanta Bhattacharya

掲載学術誌名：Physics Letters B **864**, 139446 (2025) (7 ページ)

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2025.139446>

[e-print arXiv: 2504.00416 [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>

# 量子重力から示唆されるエントロピーを用いた ブラックホール熱力学における 新しい相転移現象の研究

令和7年4月23日 福島大学 第194回定例記者会見



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：ウスマン ザファール (Usman Zafar)

(博士後期課程2年、日本政府(文部科学省)国費  
留学生、パキスタン出身、筆頭著者)

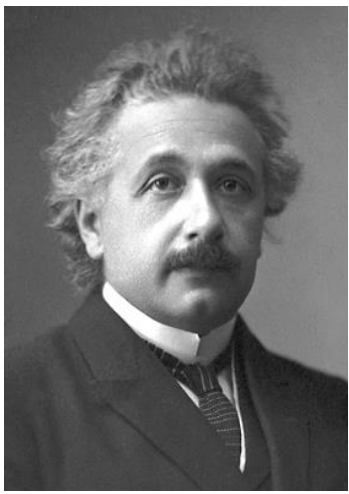
Tabinda Rasheed, Krishnakanta Bhattacharya

# 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ウスマン ザファール (Usman Zafar) さん (博士後期課程2年、日本政府 (文部科学省) 国費留学生、パキスタン出身、筆頭著者)、馬場一晴教授等の国際共著論文が世界的に権威のある学術誌 “Physics Letters B” に掲載されました。
- 本研究では、量子重力の効果を取り入れたエントロピーを用いてブラックホールの熱力学を詳しく考察し、新しい相転移現象の物理的解釈を示しました。



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

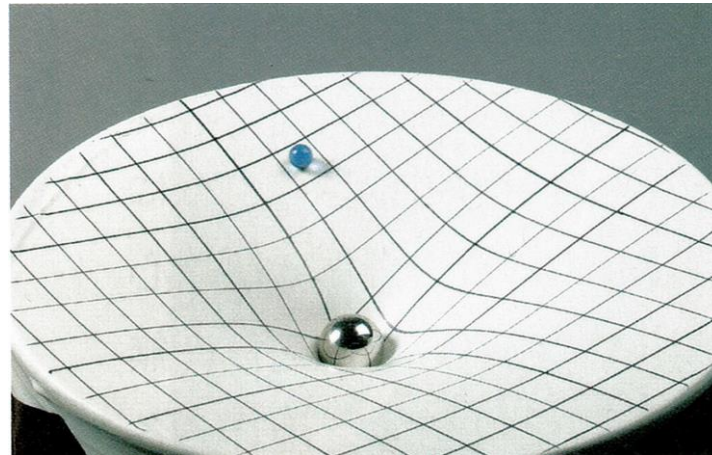
# 一般相対性理論 アインシュタイン(1915年)

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

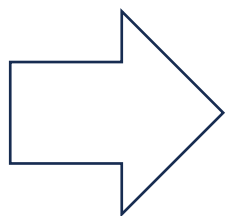
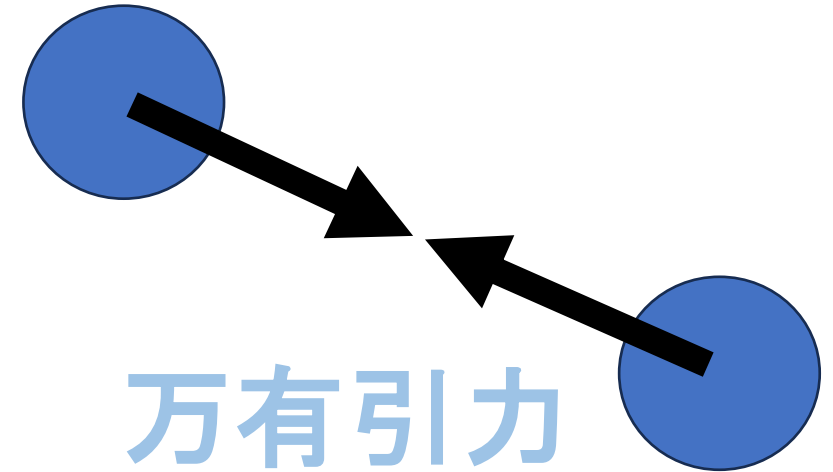


[三浦 登他(著)、物理、東京書籍(株)、2012年]より引用。

# 太陽よりも十分重たい天体の最期

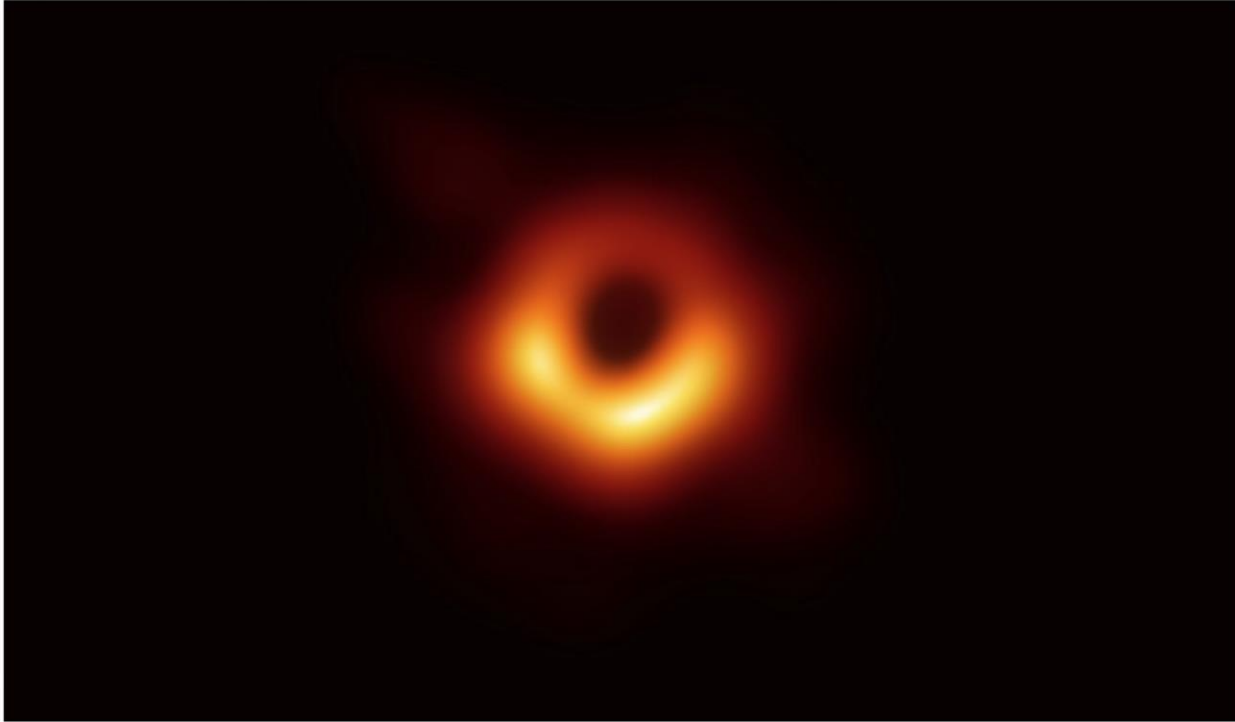
質量をもつ物体同士には、万有引力と呼ばれる引き合う力がはたらきます。

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>

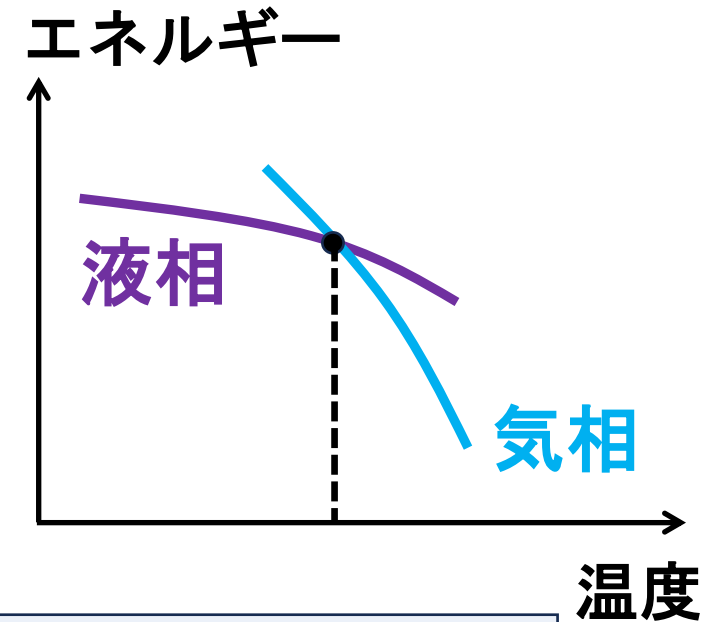
ブラックホールは、その質量があまりに大きいため、自然界で最も速く走る光さえも出て来ることができません。銀河の中心には、非常に重たいブラックホールの存在が観測されており、我々の天の川銀河にも存在しています。

# 熱力学における相転移現象

**熱力学**：熱や温度に関する物理学

**相転移**：化学的に同じ物質が存在の形態  
を変える現象

例：水が氷や水蒸気になるような変化



## 「ブラックホールの力学法則」と「熱力学の法則」との類似性

(ブラックホールの表面積増大則、S.W. Hawking博士)

従来、ブラックホールのエントロピー(ものの散らばり度合いを表す物理量)は、Bekenstein-Hawkingエントロピーと呼ばれる、ブラックホールの表面積に比例する表式が用いられてきました。



# 本研究の目的と結果

研究目的： ブラックホールの熱力学的性質の解明

近年、量子重力（非常に高いエネルギー領域における重力）の効果を取り入れることにより、ブラックホールのエントロピーは、これまでのBekenstein-Hawkingエントロピーよりも大きくなる可能性が指摘されました。

＜新たに発見した結果＞

⇒ ささまざまな条件でブラックホールの熱力学的な振る舞いを理論的に解析した結果、従来のエントロピーを用いた場合と、新しく提案された量子重力の影響を考慮したエントロピーを用いた場合とで、ブラックホールに起こる相転移現象の現れ方が異なることが分かりました。

# 研究成果および波及効果

- この研究成果は、2025年4月、素粒子物理学、原子核物理学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「Physics Letters B」(出版社: Elsevier)誌上に掲載されました。

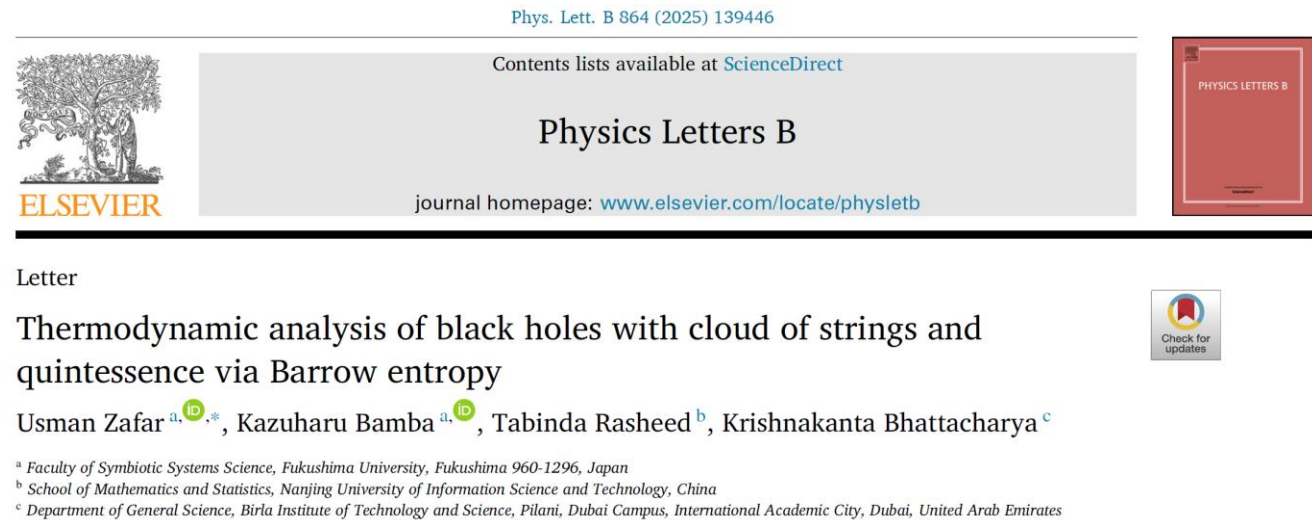
題名: “Thermodynamic analysis of black holes with cloud of strings and quintessence via Barrow entropy”

著者名: Usman Zafar, Kazuharu Bamba, Tabinda Rasheed and Krishnakanta Bhattacharya

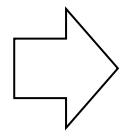
掲載学術誌名: Physics Letters B 864, 139446 (2025) (7ページ)

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2025.139446>

[e-print arXiv: 2504.00416 [hep-th]]



[出典: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2025.139446>]



本研究によって得られた成果を通じて、重力の普遍的性質と重力の量子化(非常にエネルギーの高い極微(ミクロ)な世界における物理学の法則)への理解にもつながる可能性があるものと強く期待されます。

- 本論文は、2022年12月から2024年7月まで同じく福島大学宇宙論研究室で客員研究員（日本学術振興会外国人特別研究員）を務めておられたクリシュナカンタ ブハタチャルヤ（Krishnakanta Bhattacharya）さん（現在、ビルラ工科大学ドバイ校、Assistant Professor）との国際共著論文です。

The screenshot shows the website for Dr. Krishnakanta Bhattacharya at BITS Pilani Dubai Campus. The header includes the university logo and name, a search bar, and navigation links for Home, Academics, Admission, Research & Innovation, Department, Faculty, and Students. The main content area displays the name 'Dr. Krishnakanta Bhattacharya' with tabs for 'DUBAI' and 'GENERAL SCIENCES'. Below this, it identifies him as an Assistant Professor in the Department of General Sciences (Physics). His research interests are listed as 'Cosmology, General Relativity'. Contact information includes the address: BITS Pilani, Dubai Campus Dubai International Academic City, P. O. Box No. - 345055 Dubai, UAE, Office no: 250. Phone numbers are +91 8250732861 and +97142753700 Extn-225. Email addresses are [krishnakanta@dubai.bits-pilani.ac.in](mailto:krishnakanta@dubai.bits-pilani.ac.in) and [krish.phys@gmail.com](mailto:krish.phys@gmail.com). A LinkedIn profile link is also provided: <https://www.linkedin.com/in/krishnakanta-bhattacharya-770a4310b>.

[ビルラ工科大学ドバイ校ホームページより引用。]

本研究は、福島大学在籍時に発表した論文 [K. Bhattacharya, K. Bamba and D. Singleton, Physics Letters B 854, 138722 (2024)] を発展させた内容であり、福島大学発の宇宙物理学研究の成果と考えられます。