

# 蒸発しきらない正則ブラックホールの時空構造の完全な分類についての研究

理学研究科 数物系専攻 D3 末藤健介



今回のポスターの論文です。  
気になった方は覗いてみてください。

## 1. 研究背景, ブラックホール研究について

- Einsteinによって提案された一般相対性理論の基礎方程式であるEinstein方程式は、平易に言えば「物質が存在すると時空が曲がる」ことを表している。一般相対性理論は、従来の重力理論であるNewtonの万有引力の法則では説明できなかった多くの現象を説明できており、現在最も信頼されている重力理論である。

$$R_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ab}$$

Einstein方程式

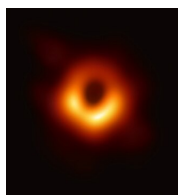
時空の曲率

万有引力定数

物質

光速

- 一般相対性理論の効果が最も顕著に現れている対象がブラックホールであり、2017年のノーベル物理学賞にもなった、重力波検出の実験を通してその存在は確かなものとなっている。
- 重力波観測のみならず、ブラックホールに関する理論的・観測的研究が2020年のノーベル物理学賞に選ばれた。またEvent Horizon TelescopeによるM87銀河中心ブラックホールの撮像に成功するなど、ブラックホール研究は現在盛り上がりを見せている。
- 更にブラックホールは熱力学的性質やホログラフィーなど多彩で興味深い特徴を示し、その解明は未踏の理論である量子重力理論に迫る鍵となる。このように、世界中の研究者がブラックホール研究に取り組んでいる。



Event Horizon Telescope  
により撮像されたM87銀河  
中心ブラックホール  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Black\\_hole](https://en.wikipedia.org/wiki/Black_hole)

## 2. 正則ブラックホールの研究動機

一般相対性理論により予言されるブラックホールは上記のように興味深い性質を数多く持っている反面、特異点の存在という問題も抱えている。

### 特異点の問題点

- 特異点では時間・空間という、物理学の根本的概念が定義できない(特異点は多様体上の点ではない)。
- 幾何学量の発散を引き起こすことがある。
- ブラックホールの蒸発を考えると、量子力学の基本原則であるユニタリティが破れる(情報損失問題) [1]。
- 自然な状況下では、Einstein方程式により予言されるブラックホールは特異点を持つ [2]。

「Einstein方程式を超える重力理論が存在し、特異点は解消される」と多くの物理学者は考えている。しかし...

- 特異点が古典的に解消されるのか、量子効果により解消されるのか不明
- 量子効果を取り入れた重力理論「量子重力理論」は未完成

**特異点のないブラックホール(正則ブラックホール)の性質を研究しよう!**

この研究が進むと

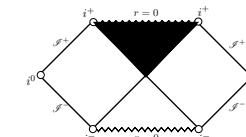
- ブラックホールの特異点の有無を実験により確かめられるようになる可能性がある。
- 現在主流の宇宙論に対して新たな可能性を与える可能性がある。
- 量子重力理論完成へのヒントになる。

## 3. 研究戦略, セットアップ

ブラックホールの性質を調べる上で最も大切なことのひとつが、時空の大域的構造を表すPenrose diagramを書くことである。

Penrose diagramとは

- 時空構造を表す地図のようなもの。
- 因果関係を一目で確認することができる。
- ブラックホール自体大域的構造を用いて定義されている。そのため、ブラックホールが存在するかを知るにはPenrose diagramを書くことが必要となる。



Schwarzschild ブラックホールのPenrose diagram.  
黒色で塗られている部分がブラックホール領域を表している。

どのような正則ブラックホールが実現されるか現時点で不明のため、モデルに依らない性質を調べたい



正則ブラックホールは一般的に、有限時間で蒸発しきらない[3]

**有限時間で蒸発しきらない正則ブラックホールのPenrose diagramの一般論を研究**

具体的には

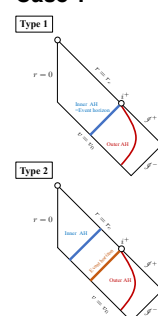
- metric:  $ds^2 = -f(r, v)A^2(r, v)dv^2 + 2A(r, v)drdv + r^2d\Omega^2$
- $A(r, v) > 0$  時空に特異点が存在しないために要請
- $f(r, v) = 0$  has two solutions  $r_{\pm}(v)$  Apparent horizonが2つのみであることを仮定
- $\lim_{v \rightarrow \infty} r_{\pm}(v) = r_c$  有限時間で蒸発しきらない(無限の時間をかけてextreme stateになる)ことを表現

の元で許されるPenrose diagramの一般論を研究する

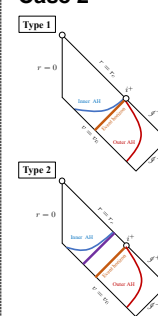
## 4. 結果と展望

1. 許されるPenrose diagramは以下の形に尽きることを示した。

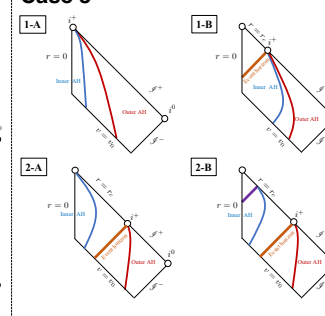
### Case 1



### Case 2



### Case 3



2. 与えられた計量から対応するPenrose diagramを判定する十分条件を導いた。

- 情報損失問題や時空の安定性といった、時空の大域的構造が重要となるテーマの議論への応用が期待できる。
- 現実のブラックホールが特異点を持つか否かという重要な課題を議論するための基礎となる。

[1] S. W. Hawking, Physical. Review. D 14, 2460 (1976).

[2] R. Penrose, Physical. Review Letters 14, 57-59 (1965).

[3] R. Carballo-Rubio et al, J. High Energ. Phys. 2018, 23 (2018).