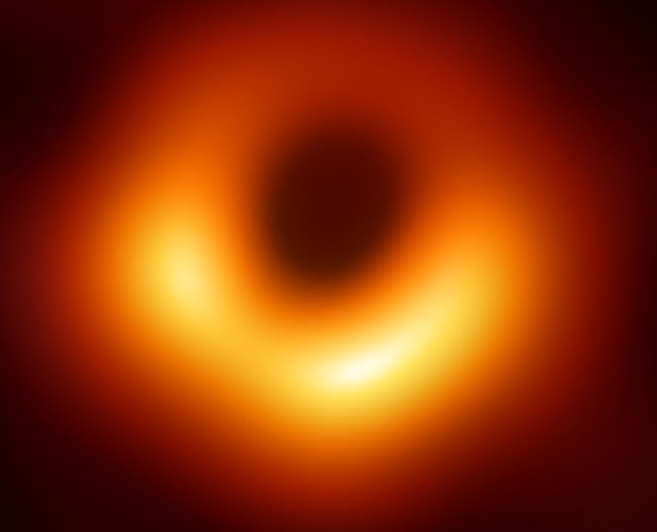


イベント ホライズン テレスコープが見た 銀河中心巨大ブラックホール



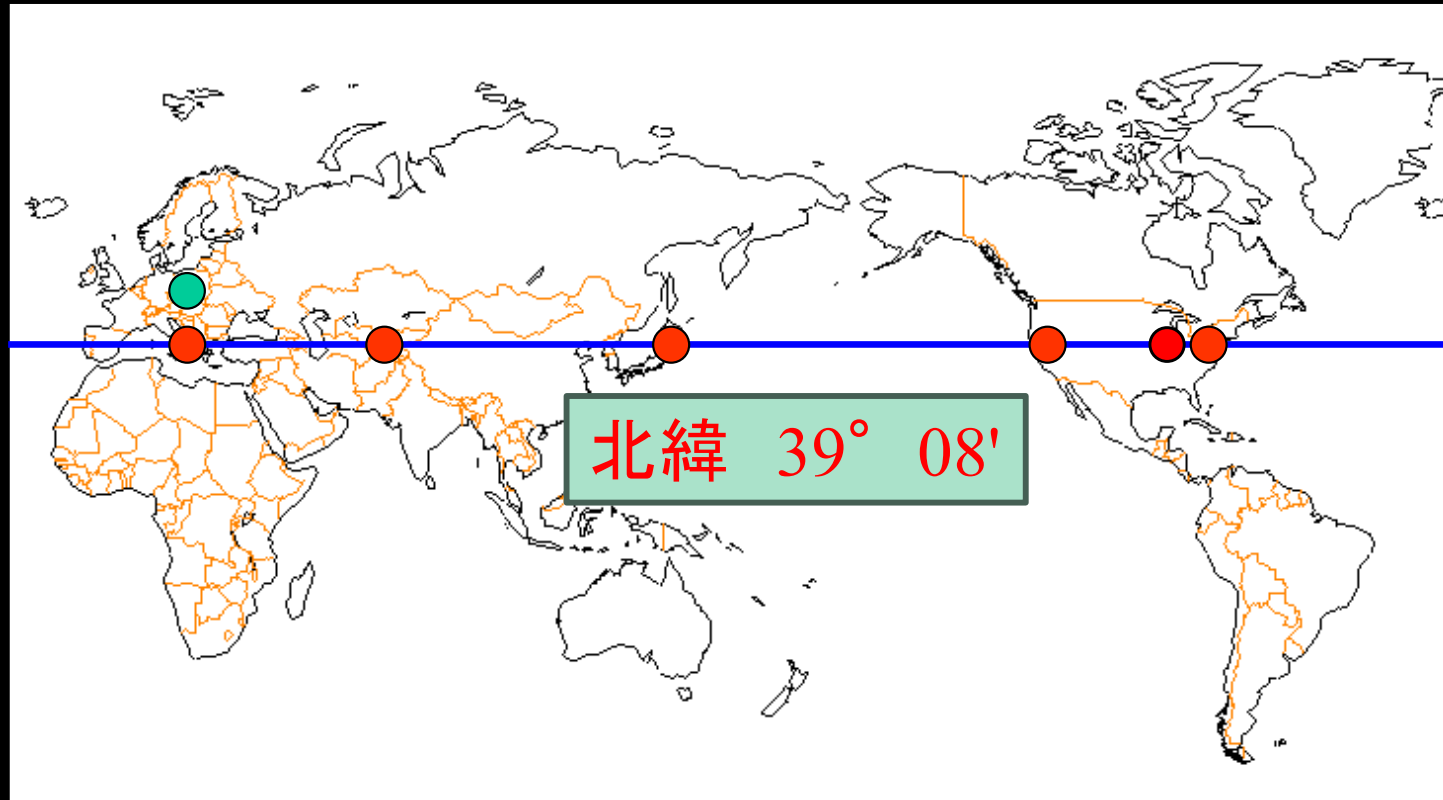
本間 希樹

国立天文台 水沢VLBI観測所



国立天文台水沢VLBI観測所全景

水沢に天文台があるのはなぜ？



国際緯度観測事業 (1899年～)

オイラーによる極運動(自由歳差)の予言 (1760年頃、**周期~300日**)

チャンドラーによる極運動の検出 (1891年、**周期~430日!!**)

木村 栄と”Z項”

初代所長： 木村 栄(ひさし) (1870－1943)
東京大学 理学部 星学科卒(1892)



地球の極運動における”Z項”を発見 (1902)

$$\varphi - \varphi_0 = Z + x \cos \lambda + y \sin \lambda$$

奥州には「Z」がいっぱい！



奥州市文化会館(Zホール)



体育館(Zアリーナ)



コミュニティバス
(Zバス)



木村 榮

理科大學星學科ヲ修メ定期ヲ
歴テ試問ヲ完ウシ正ニ其業ヲ卒
ヘタリ仍テ之ヲ證ス

星學
小ニ棘
學

理科大學教授佐佐木博士 寺尾壽

數學

理科大學教授佐佐木博士 藤澤利喜郎

數學

理科大學助教授止七位理學士 三橋植一郎

物理學

理科大學教授佐佐木博士 山川健次郎

力學
初歩

理科大學教師勲四等 小川健次郎

物理學實驗

理科大學助教授佐佐木博士 長岡小太郎

各教授ノ證明ヲ認了シ授クルニ
卒業證書ヲ以テシ本科ノ學業ニ
堪能ナルヲ證ス

明治五年七月十日

理科大學長 森島寬等 理學博士 菊池大麓

理科大學長 菊池大麓ノ證明正
當ナルヲ以テ帝國大學ノ印ヲ鈐
シ予ノ名ヲ署ス



帝國大學總長 佐々木博士 森島寬等

木村榮の卒業証書： 私の102年先輩！



學科ヲ修メ定期ヲ
シ正ニ其業ヲ卒
ヲ證ス

木村 榮

長岡小太郎

山川健次郎

士藤澤利喜郎

士島池土舞郎

士寺尾壽

木村榮の卒業証書： 私の102年先輩！

仁科芳雄と日本の電波天文学の源流

- 1942年、軍からの要請で「物理懇談会」を設置。委員長: 仁科芳雄
懇談会から軍への答申:
「**原爆開発は難しい。殺人光線(電磁波兵器)の方が実現性が高い**」
- 1943年、海軍島田実験所開設
電磁波兵器の研究開始。物理懇談会メンバーも定期的に島田へ。
- 日本初のパラボラアンテナが島田実験所で誕生。



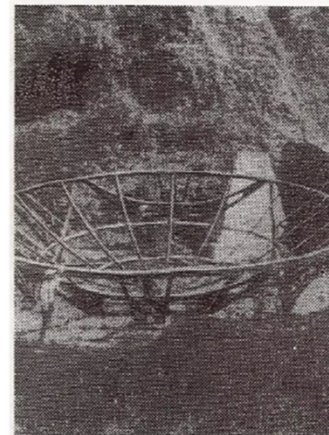
図1 前列左から: 渡瀬 譲, 宮島龍興, 永宮健夫, 伏見康治, 萩原雄祐, 湯川秀樹, 朝永振一郎, 小谷正雄, 高尾磐夫, 後列左より: 荷口康一郎大尉, 蜂谷謙一, 小田 稔, 小塩高文中尉, 水間正一郎技師, 小林省己, 牧野昌邦.
(写真には19年4月22日とある).

河村豊氏 日本物理学会誌 Vol. 71, No. 10, 2016

牛尾実験所の旧設備写真10m-U、発掘される

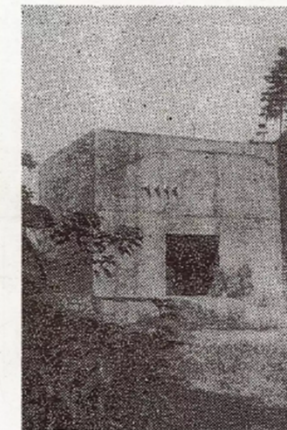


パラボラ反射鏡



中目トピック 昭和25年1月

発振室



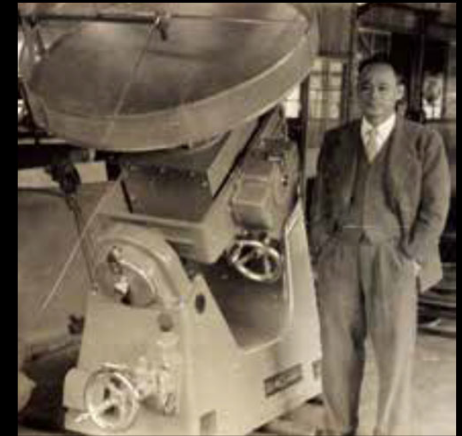
中目トピック 昭和25年1月

島田実験所から電波望遠鏡へ

海軍島田実験所は戦後
「島田理化工業」へ



島田理化工業に出入り
の業者だった法月鉄工
所(焼津市)がパラボラ
アンテナの製作を始める



法月惣次郎 (1912~1995)

日本の電波天文学黎明
期を支えた6m電波望遠
鏡は法月鉄工製



6mミリ波電波望遠鏡(1968年～)
一時期、水沢でVLBI実験にも利用

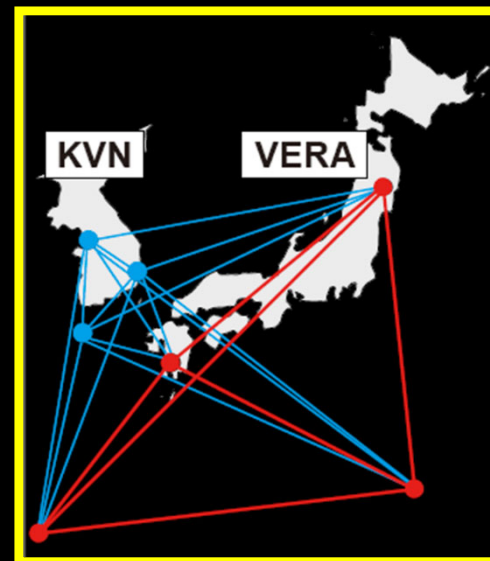
VLBI (Very Long Baseline Interferometry)

超長基線電波干涉計

VERA



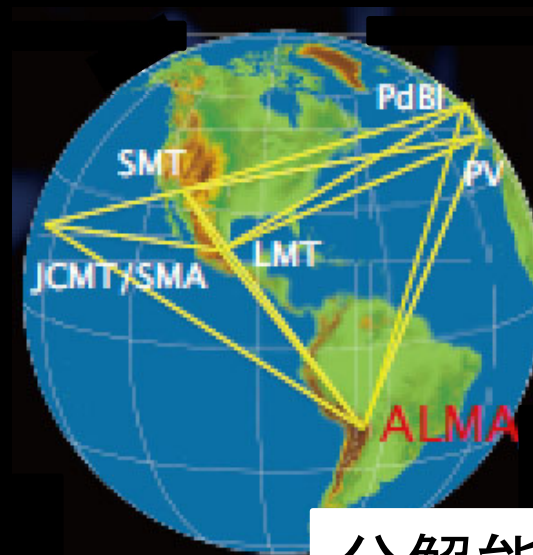
KaVA



EAVN



EHT



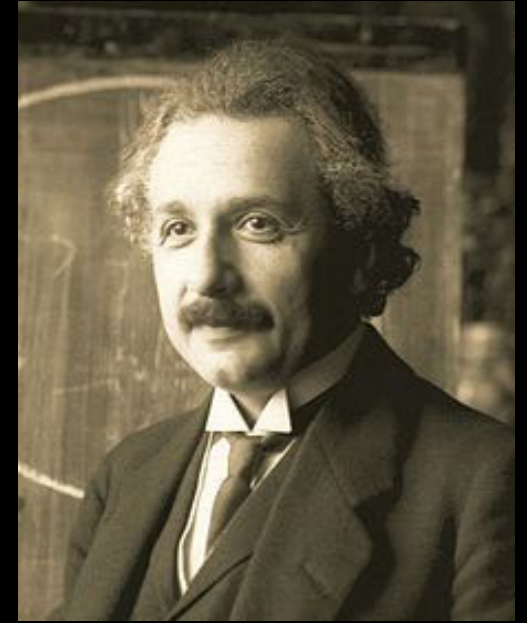
$$\text{分解能 } \Theta \sim \lambda / D$$

ブラックホールとは

- 強い重力のため、光さえ脱出できない暗黒の天体
- 入ったものをすべて飲み込む(出て来れなくなる)



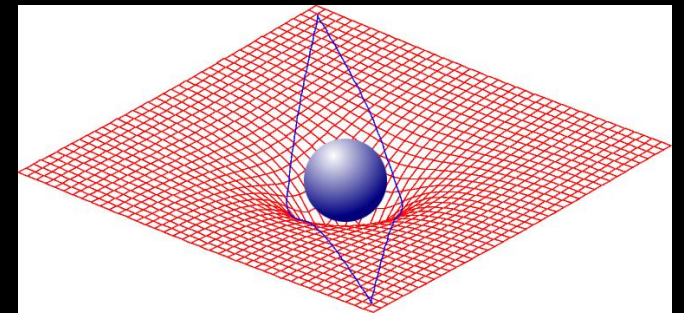
ブラックホールと一般相対性理論



アインシュタインが1915年に発表した
重力の理論 = 一般相対性理論

- 質量は時空をゆがめる

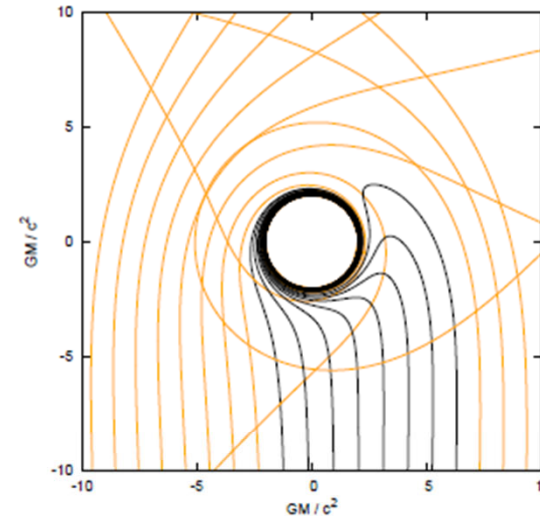
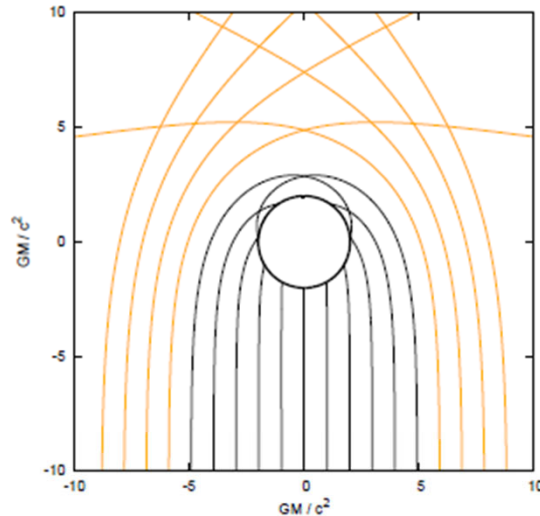
$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$



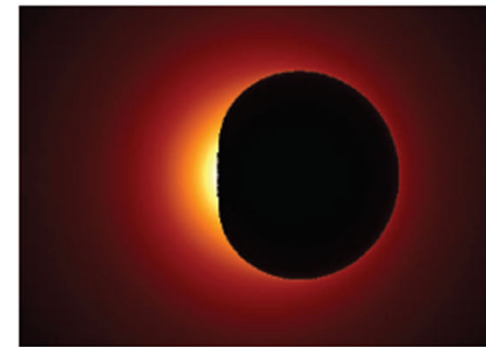
- 光は時空のゆがみにそって進む
 - > 非常に強い重力を持った天体の周囲では光が天体に巻き込まれる
- = ブラックホール

ブラックホール周辺での光の軌跡

光の
軌跡



影の
様子



シュバルツシルトBH
(回転なし)

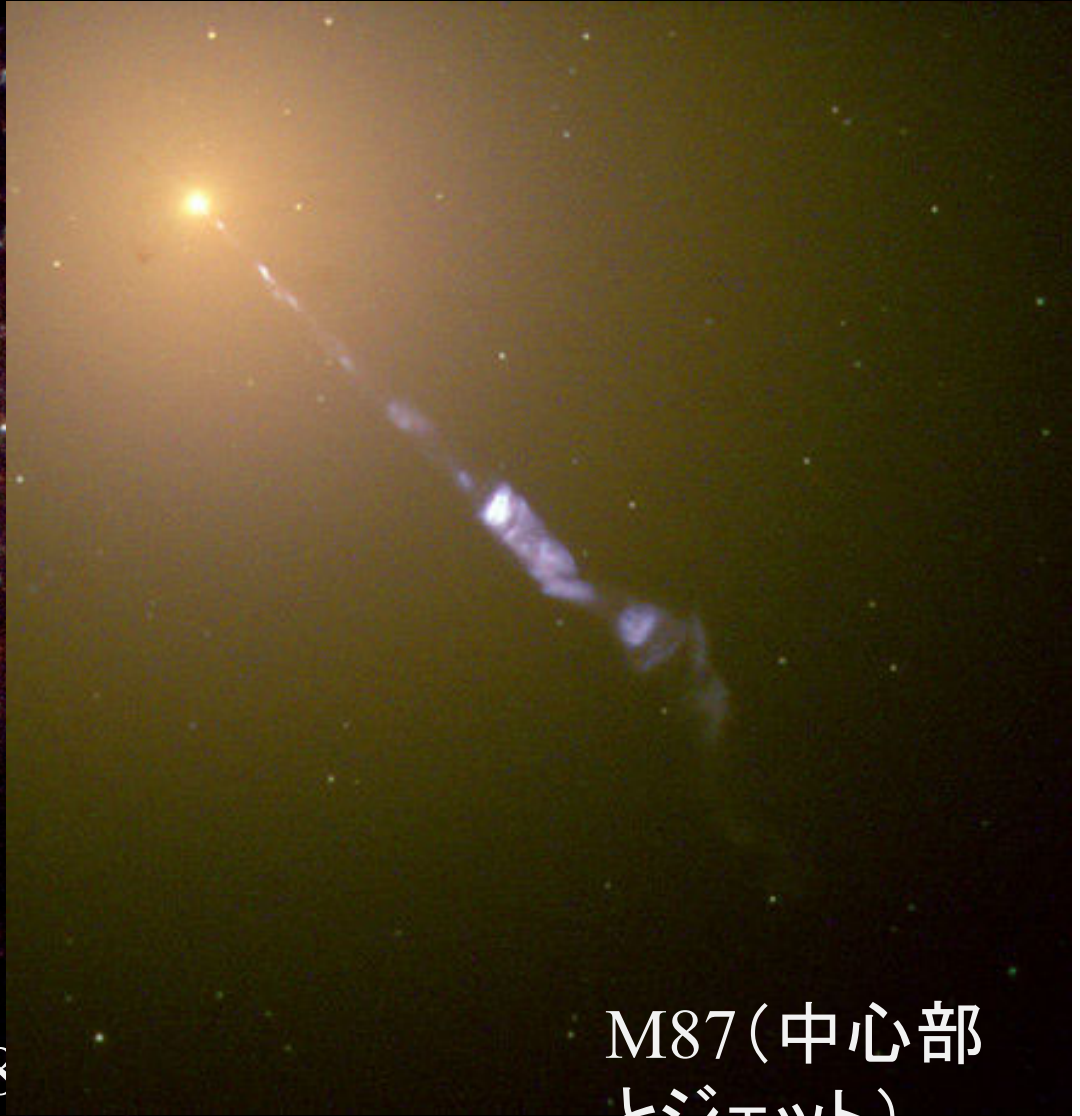
カーBH
(回転あり)

影の直径は、シュバルツシルト半径の約 $3\sqrt{3}$ 倍になる。

巨大ブラックホール？



M87



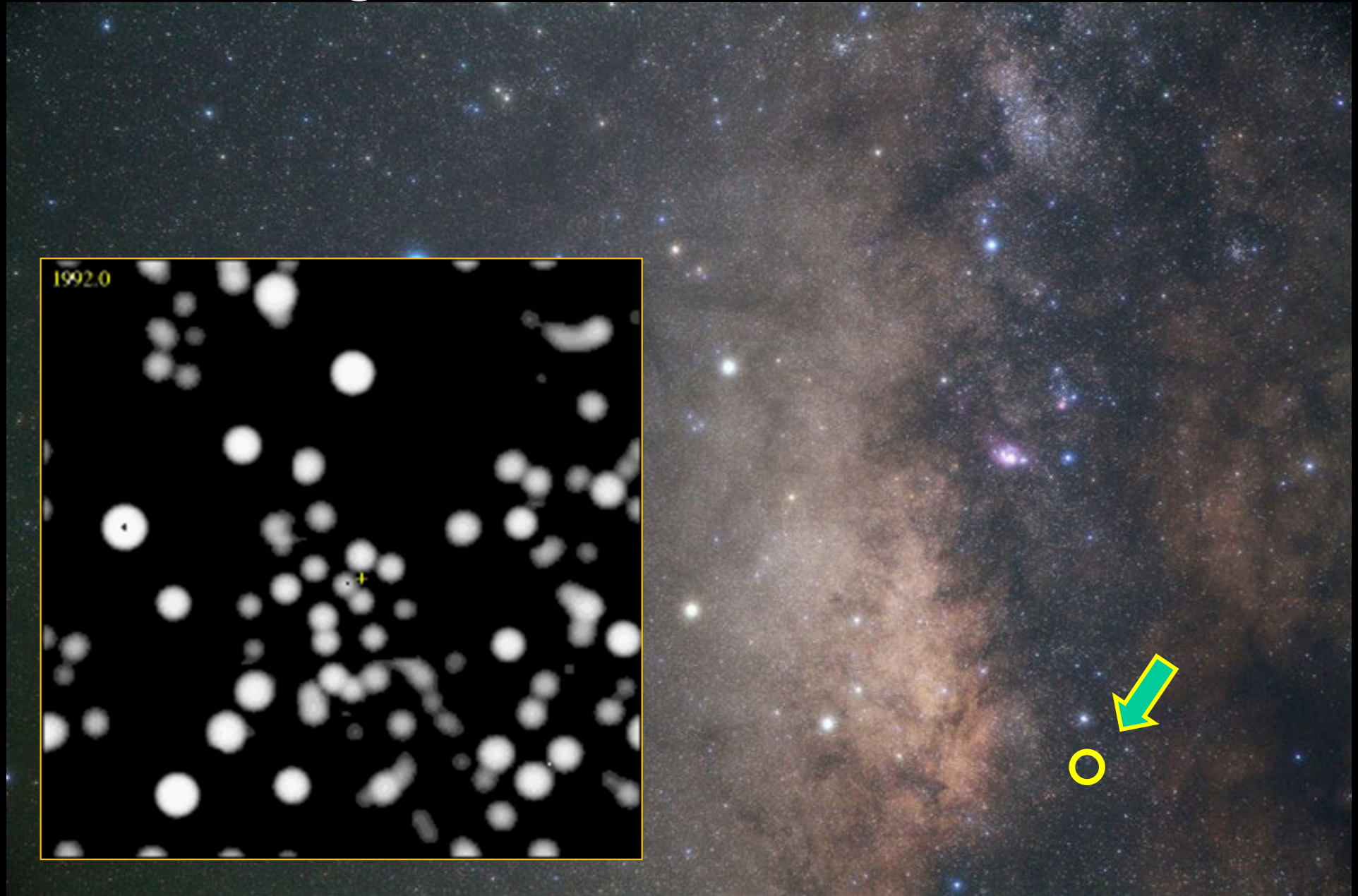
M87(中心部
とジェット)

巨大ブラックホールは明るい？

- 孤立したブラックホールは暗い(はず)
- 実際は、必ずしもそうでもない！
- 周囲の物質を飲み込むと、重力エネルギーが解放される

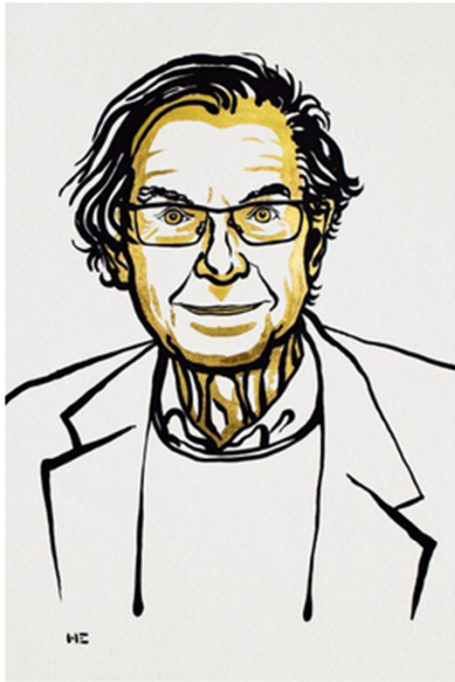


天の川を中心 Sgr A* (いて座Aスター)



祝 ブラックホールの研究が ノーベル物理学賞を受賞！

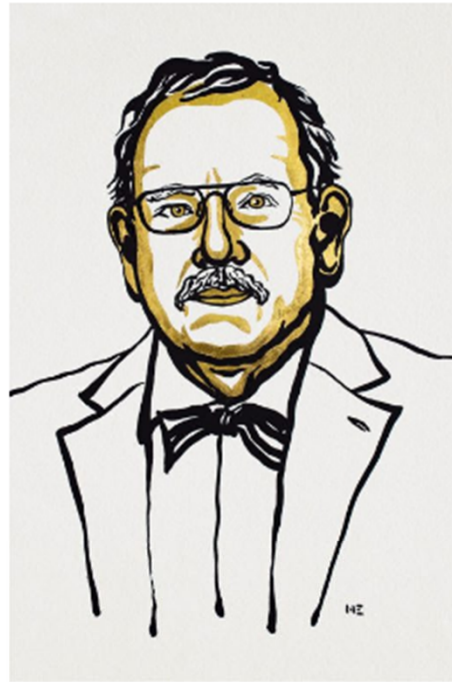
The Nobel Prize in Physics 2020



Ill. Niklas Elmehed. © Nobel Media.

Roger Penrose

Prize share: 1/2



Ill. Niklas Elmehed. © Nobel Media.

Reinhard Genzel

Prize share: 1/4



Ill. Niklas Elmehed. © Nobel Media.

Andrea Ghez

Prize share: 1/4

理論

観測

ブラックホールの写真を撮る

世界の望遠鏡と使い地球規模の電波望遠鏡を合成する(VLBI)



M87として座Aスターが2大ターゲット

EHT: 国際協力の組織

- 世界の13機関を中心に、200名超の研究者が参加



EHT collaboration



2018年11月のプロジェクト会議での全体写真(オランダ・ラドバウド大学)

2019年4月の初期成果論文

- 6 papers released in **Astrophysical Journal Letters** (875, L1—L6)
- In total, they contains 204 pages, more than 300 authors

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 875:L1 (17pp), 2019 April 10

© 2019. The American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>



First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole

The Event Horizon Telescope Collaboration

(See the end matter for the full list of authors.)

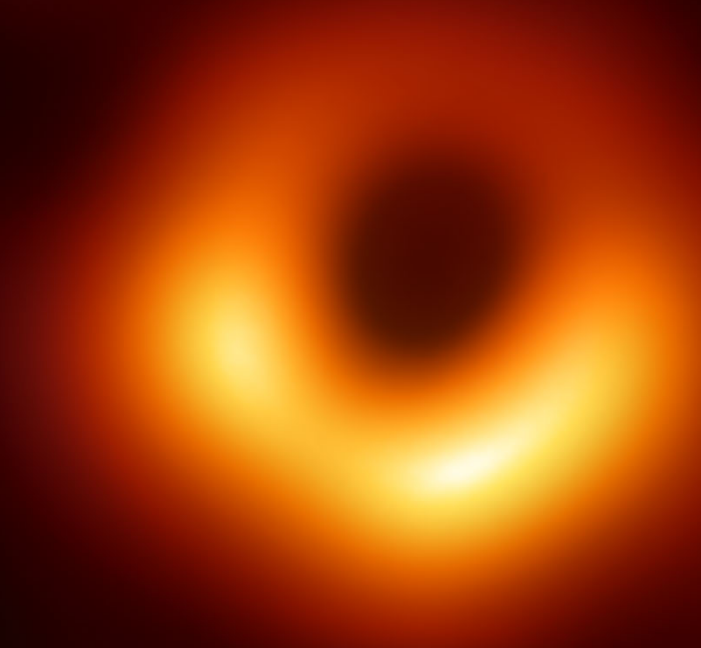
Received 2019 March 1; revised 2019 March 12; accepted 2019 March 12; published 2019 April 10

Abstract

When surrounded by a transparent emission region, black holes are expected to reveal a dark shadow caused by gravitational light bending and photon capture at the event horizon. To image and study this phenomenon, we have assembled the Event Horizon Telescope, a global very long baseline interferometry array observing at a wavelength of 1.3 mm. This allows us to reconstruct event-horizon-scale images of the supermassive black hole candidate in the center of the giant elliptical galaxy M87. We have resolved the central compact radio source as an asymmetric bright emission ring with a diameter of $42 \pm 3 \mu\text{as}$, which is circular and encompasses a central depression in brightness with a flux ratio $\gtrsim 10:1$. The emission ring is recovered using different calibration and imaging schemes, with its diameter and width remaining stable over four different observations carried out in different days. Overall, the observed image is consistent with expectations for the shadow of a Kerr black hole as predicted by general relativity. The asymmetry in



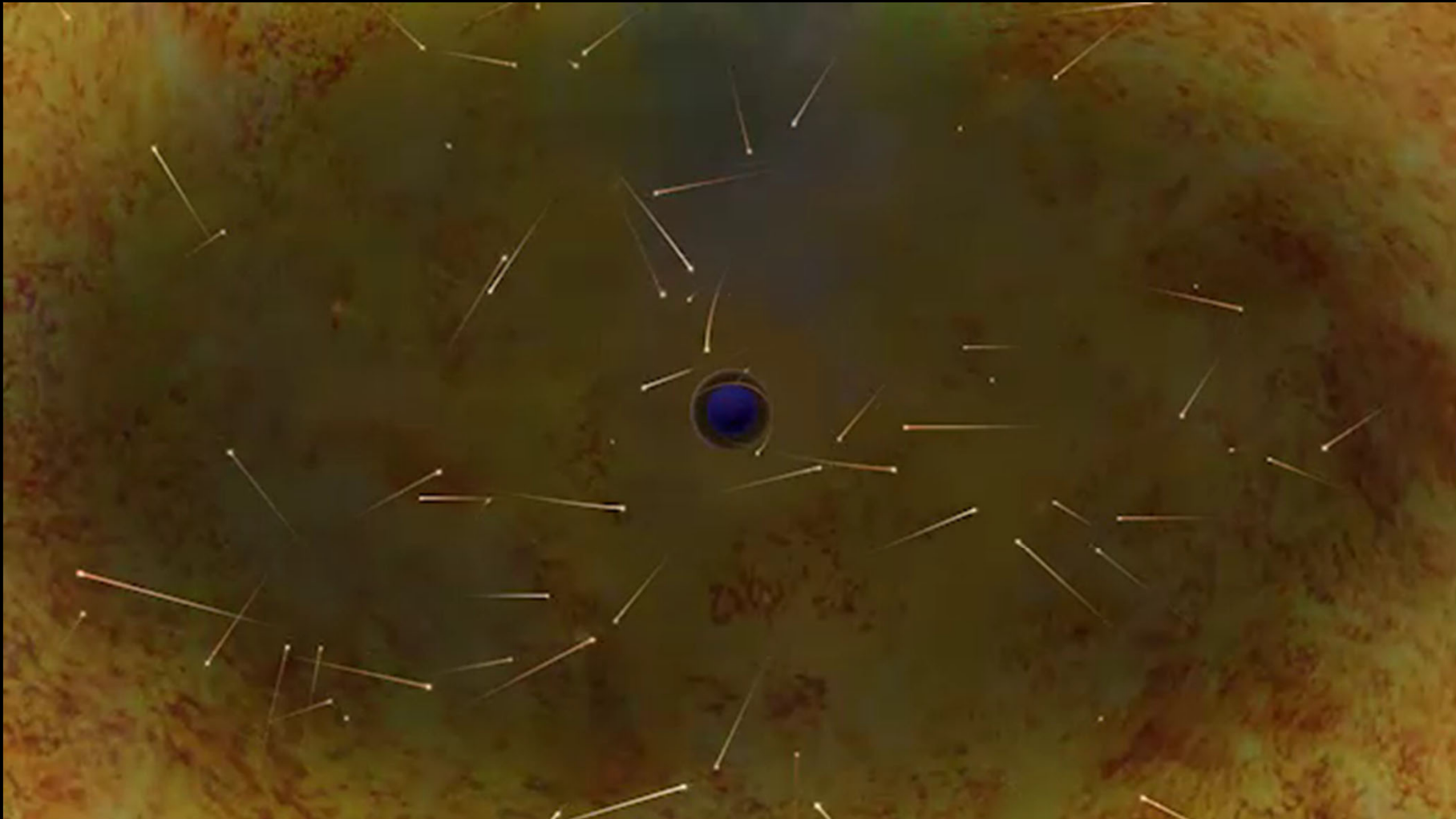
M87の中心の巨大ブラックホール（距離5500万光年）



EHT Collaboration

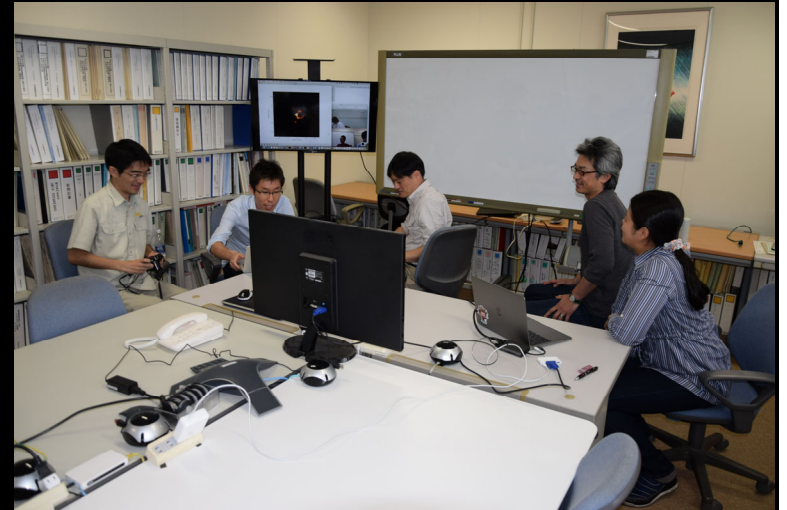
リングの大きさ: 0.01 光年
中心天体質量: 太陽の65億倍

解説:なぜブラックホールの影ができるか

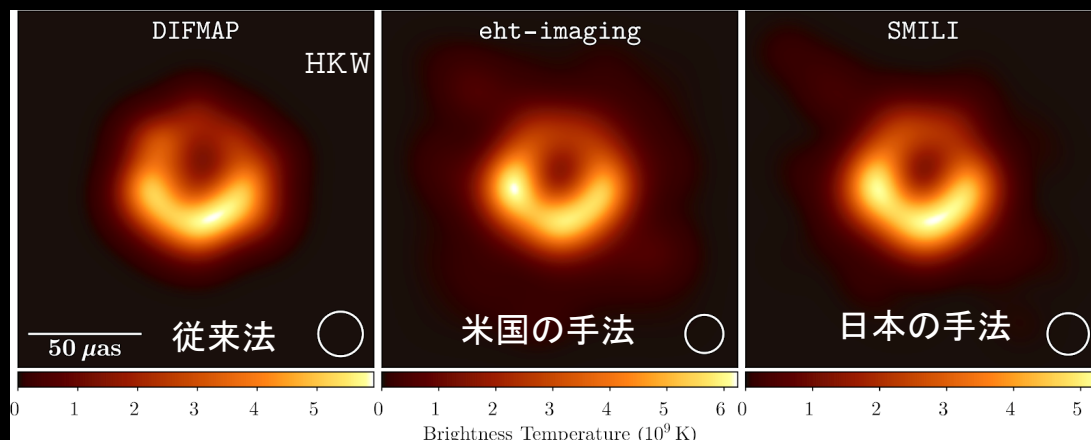


ブラックホールの画像解析

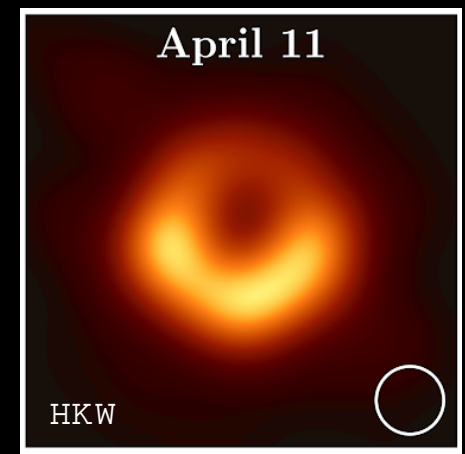
- スパースモデリングを用いた画像解析手法を開発
- 今回の画像処理に用いた3つの解析手法のうちの一つ(従来法、米国提案手法、日本提案手法)
- さらに、従来法の解析にも貢献
- 異なる手法が高い精度で一致することを確認
- 今回の画像は3手法の平均で得られたもの



2018年6月6日 水沢にて初めて「輪」を検出した時の一コマ



平均



最終画像

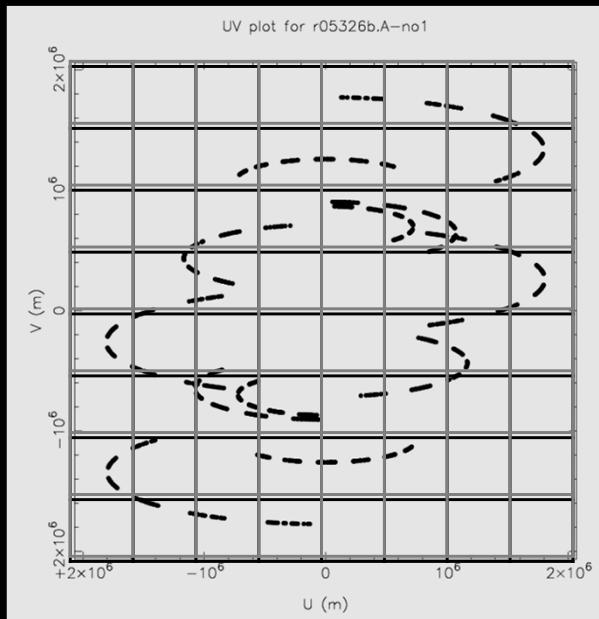
干渉計によるイメージング

- 観測方程式は2次元フーリエ変換

$$I_\nu(x, y) = \iint S_\nu(u, v) e^{-2\pi i(ux + vy)} du dv$$

- サンプリングできる(u, v)は有限個なので足りないデータは0でうめる(0 padding)。本当はもちろん0とは限らない
- その結果、有限のビームサイズとサイドローブが発生
- ビームサイズ $\Theta \sim \lambda / B$ (λ : 波長、 B : 最大基線)

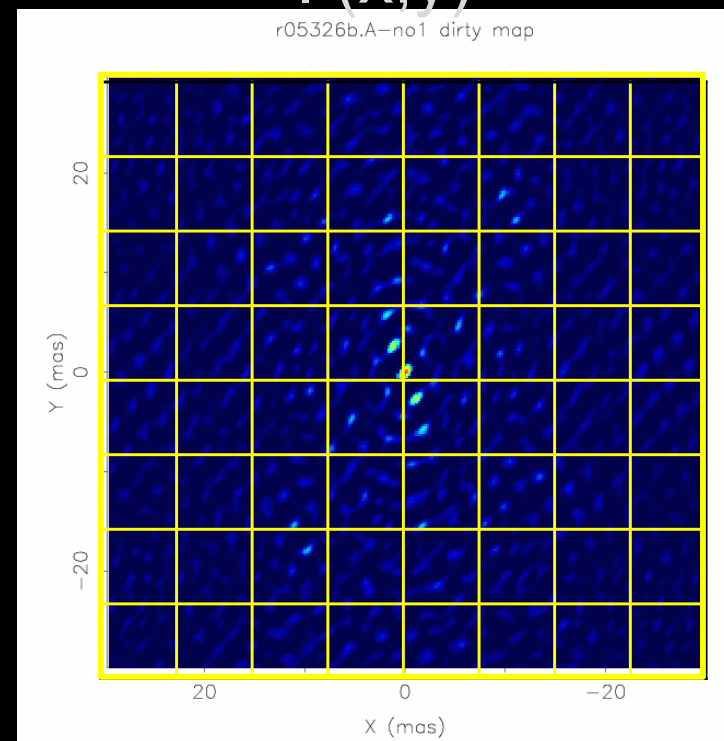
$S(u, v)$



2次元
フーリエ変換



$I(x, y)$



スパースモデリング: 解けない劣決定問題を直接解く

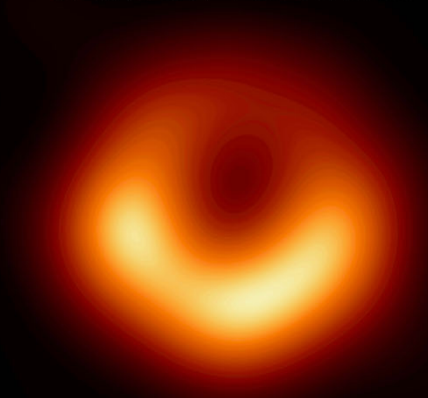
$$\begin{array}{c} \text{Observed data} \end{array} \left\{ \begin{array}{c} \text{visibility} \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_M \end{array} \right\} = \begin{array}{c} \text{Fourier} \\ \text{matrix} \\ \mathbf{F} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{image} \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ I_N \end{array} \begin{array}{c} \text{Solution (Image)} \end{array}$$

- 無数の解が存在する方程式
- ここから適切な制約のもとで
ともらしい解を選択する

理論の予想との比較

- ・ 最先端の理論シミュレーションとの比較から、リングの明暗や電波の強さも含めて、ブラックホール近傍のガスが電波を放射しているという描像と合致
- ・ リングの大きさからブラックホールの質量は太陽質量の 65億倍と求まった
(過去の2つの説:太陽の35億倍／62億倍のうち大きい方と一致)

Observation



Model



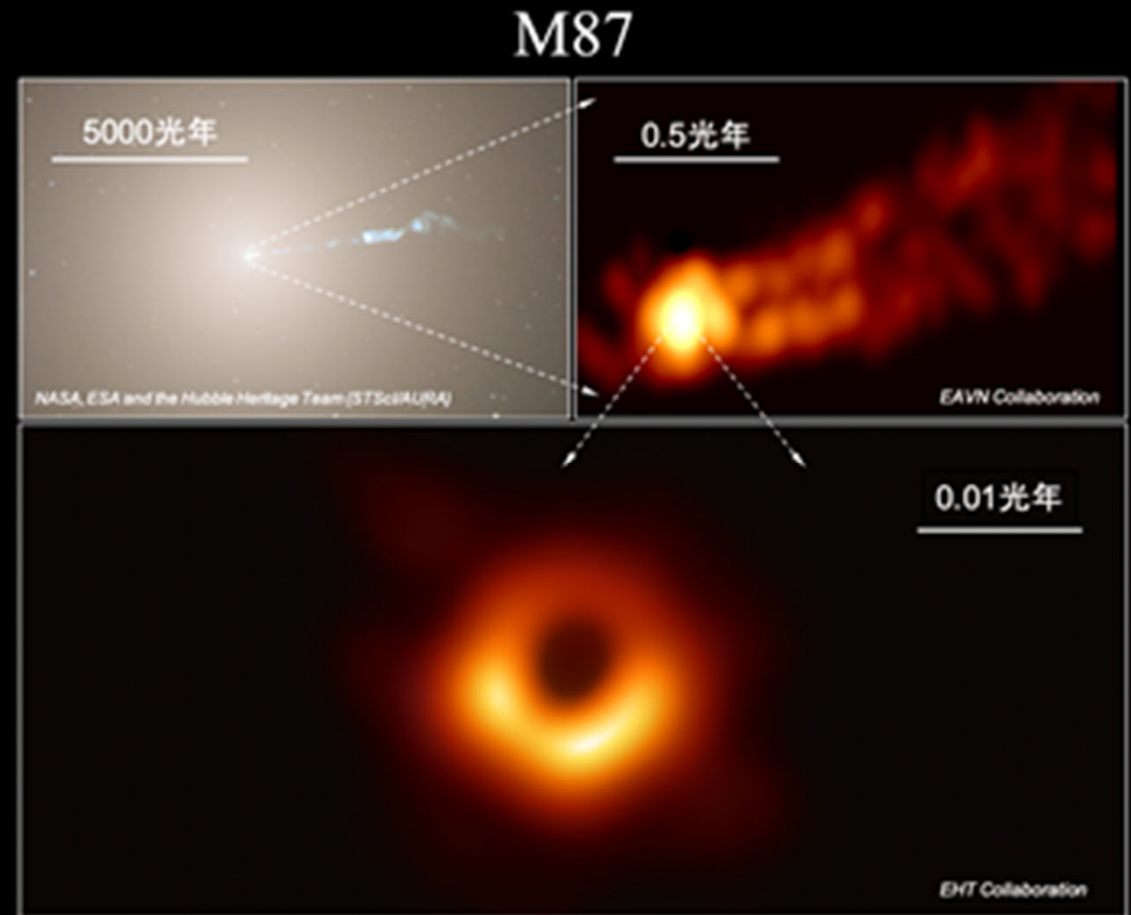
EHT collaboration

以上のような検討を重ねた結果、我々はこの画像が
ブラックホールシャドウを初めて撮影したものと結論づけた。

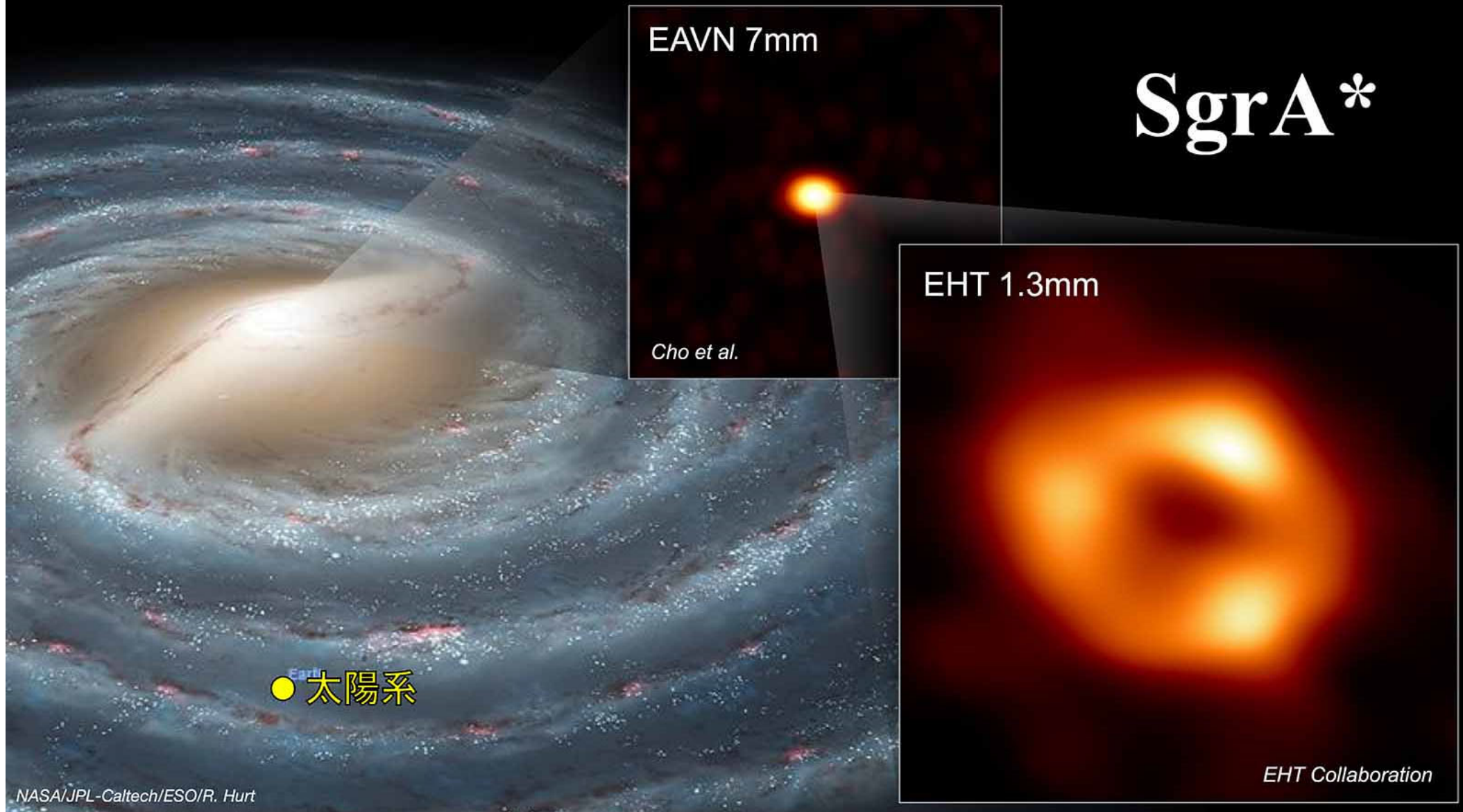
ブラックホール撮影の意義

- 物理学的: 一般相対性理論誕生(1915)以来、ブラックホール存在の初の視覚的証拠
(百聞は一見にしかず)
- 天文学的: 20世紀初頭に発見された活動銀河中心核の正体が、巨大ブラックホールであることを確定

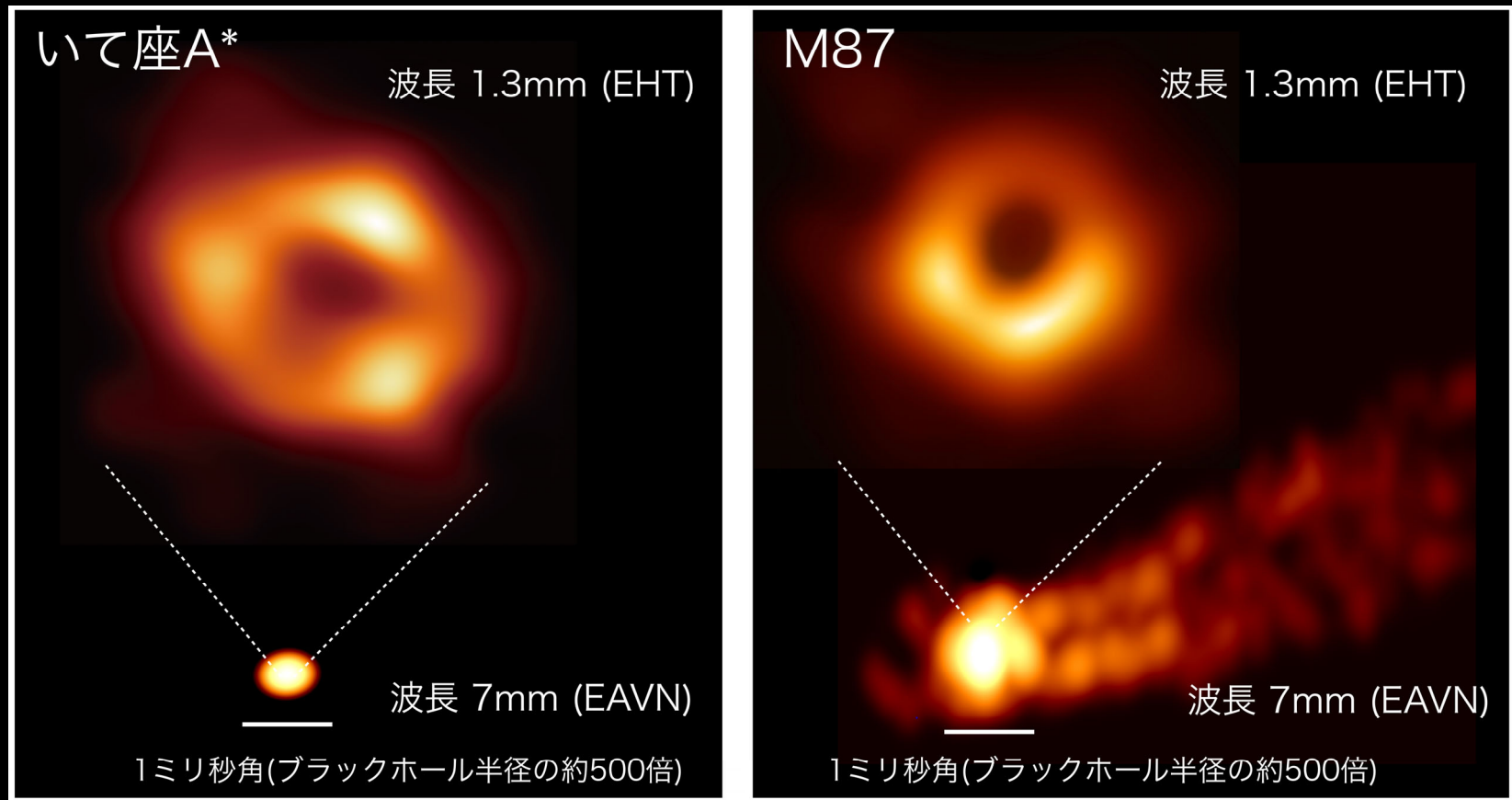
100年にもわたる2つの疑問に終止符を打つ成果!!



天の川中心のブラックホール いて座A*



今後の展開



観測面： 静止画から動画へ！

科学面： ジェットはなぜ出る？
アインシュタインは正しいか？

ご清聴ありがとうございました！