

Event Horizon Telescopeによる 天の川銀河中心ブラックホールの撮影

2022/7/28 DSB

新潟大学 自然科学研究科・創生学部

小山 翔子



新潟大学
NIIGATA UNIVERSITY

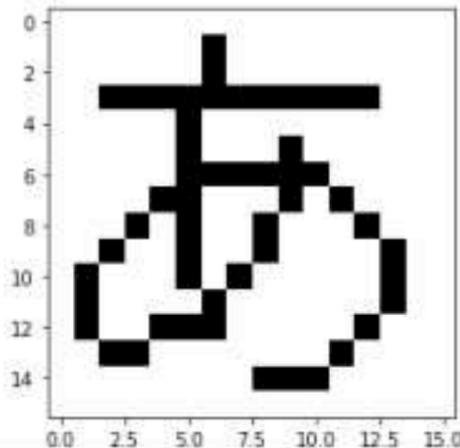
本日のねらい

```
with open('gray_img.png', "wb") as f:  
    f.write(img2)
```

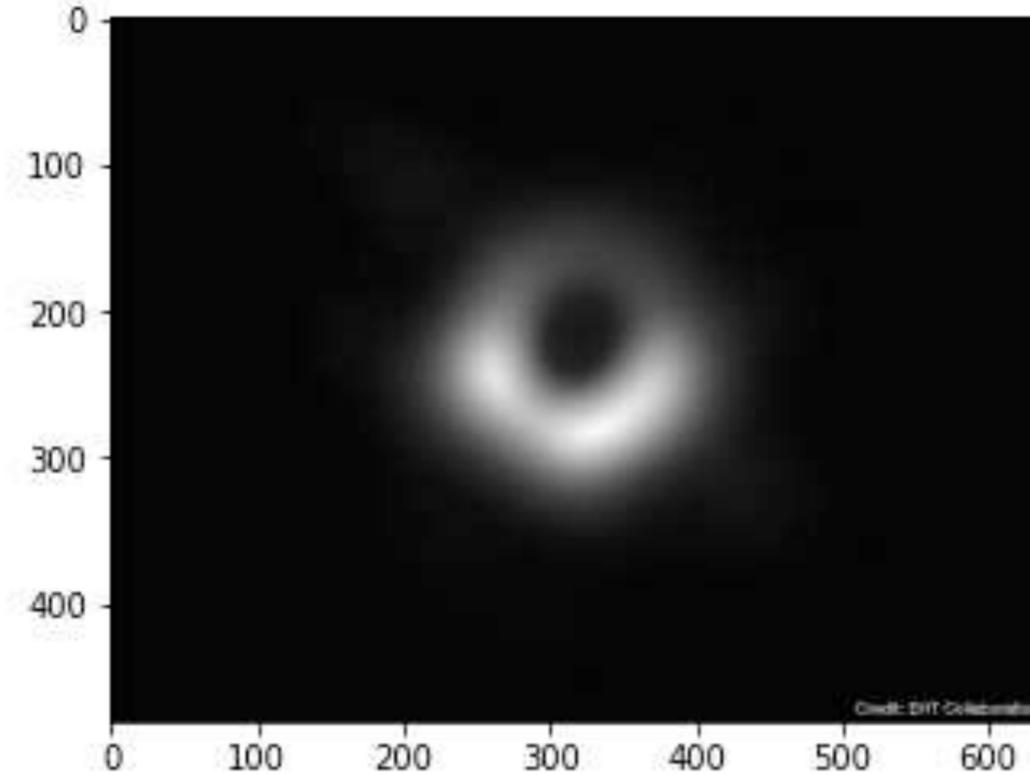
第7回

```
img = cv2.imread('gray_img.png', cv2.IMREAD_ANYDEPTH)  
plt.imshow(img, 'gray')  
print('ビット深度:', img.dtype)  
print('画像サイズ(画素数):', img.shape)  
print('画像データを数値として書き出し:\n', img);
```

```
□ ビット深度: uint16  
画像サイズ(画素数): (16, 16)  
画像データを数値として書き出し:  
[[255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255]  
 [255 255 255 255 255 255 0 255 255 255 255 255 255 255 255]  
 [255 255 255 255 255 255 0 255 255 255 255 255 255 255 255]  
 [255 255 0 0 0 0 0 0 0 0 0 255 255 255]  
 [255 255 255 255 255 0 255 255 255 255 255 255 255 255 255]  
 [255 255 255 255 255 0 255 255 255 0 255 255 255 255 255]  
 [255 255 255 255 255 0 0 0 0 0 255 255 255 255 255]  
 [255 255 255 255 0 0 255 255 255 0 255 0 255 255 255 255]  
 [255 255 255 0 255 0 255 255 0 255 255 255 0 255 255 255]  
 [255 255 0 255 255 0 255 255 0 255 255 255 255 0 255 255]  
 [255 0 255 255 255 0 255 255 255 255 255 255 0 255 255]  
 [255 0 255 255 0 0 0 255 255 255 255 255 0 255 255 255]  
 [255 255 0 0 255 255 255 255 255 255 255 0 255 255 255 255]  
 [255 255 255 255 255 255 255 255 0 0 0 255 255 255 255 255]  
 [255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255 255]]
```



EHT Collaboration



- 画像データは行列として扱われる
- ブラックホールなど天文学の画像化にも行列とスパースモデリングが使われている (クラスタリングも使われている)
- 天文学にも興味を持っていたら嬉しい



(宣伝)5月に論文出版&世界同時記者会見をしました!!

天の川銀河中心のブラックホールの撮影に初めて成功!



- 2022/5/12 13:07 UTC (22:07 JST)解禁
- 国立天文台プレスキット

<https://www.nao.ac.jp/news/sp/20220512-ehj/>

リリース本文、会見動画、画像、映像、FAQ、ファクトシートなど

- EHT-Japan解説

<https://www.miz.nao.ac.jp/ehj-j/c/pr/pr20220512>



Event Horizon Telescope

目次

1. Event Horizon Telescope (EHT)

- ブラックホールとは？
- 超長基線電波干渉計 (VLBI: Very Long Baseline Interferometry) のしくみ

2. EHTデータの画像化

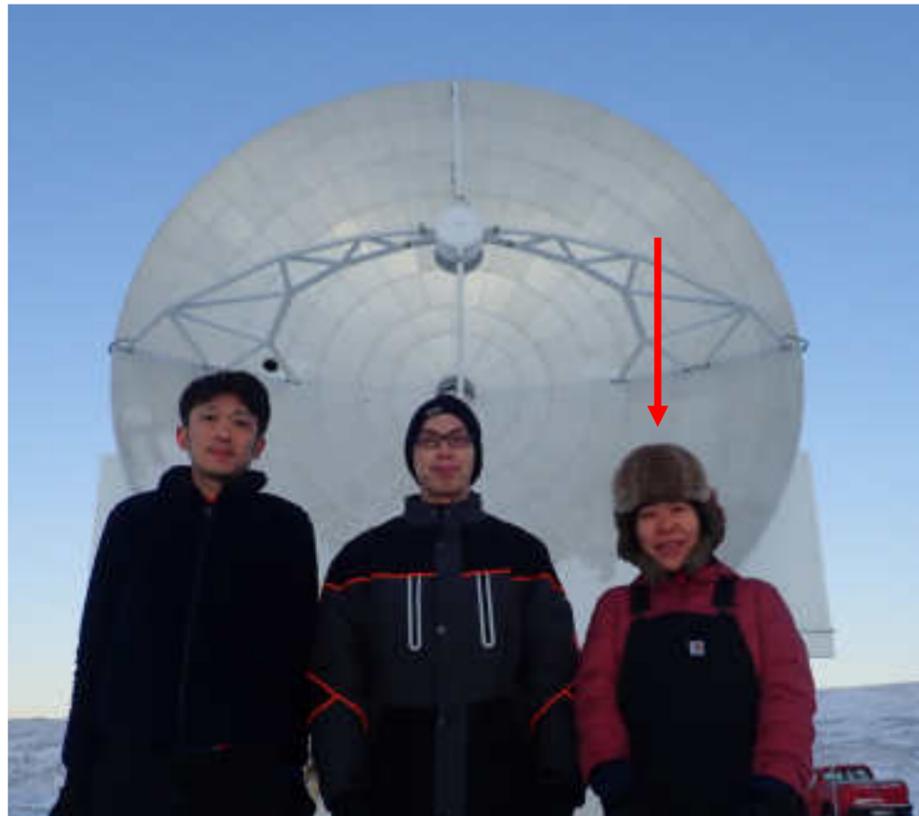
3. 天の川銀河中心ブラックホール・いて座A*の画像化

4. 今後の展望



0. 自己紹介

- 専門分野：宇宙物理学、電波天文学
- 地球上の多数の電波望遠鏡を同時に使って(超長基線電波干渉計:VLBI)、超大質量ブラックホールをはじめとする活発な天体現象を観測・研究している。



グリーンランド望遠鏡(GLT)にて、
台湾中央研究院のメンバーと



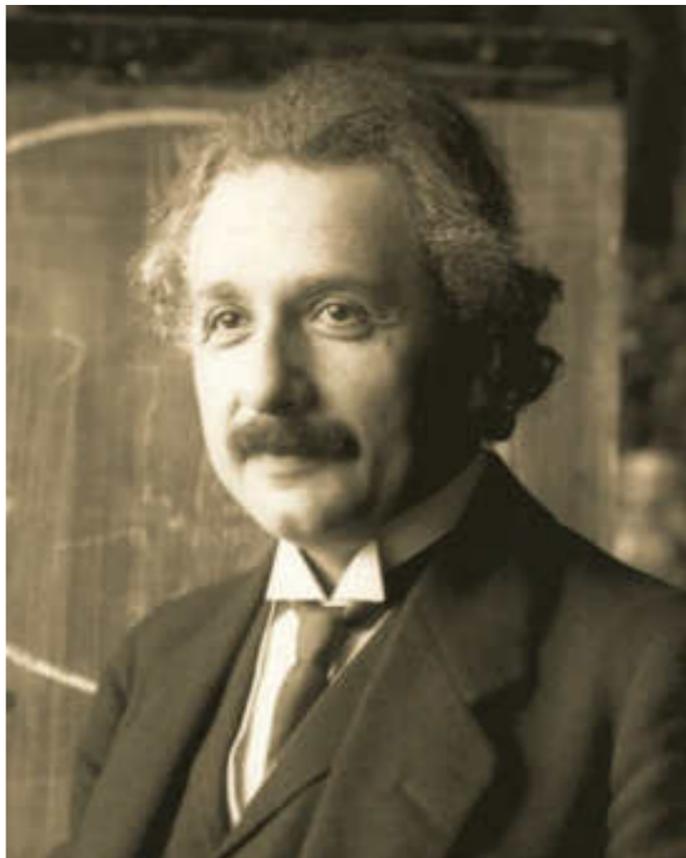
Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration:
世界13機関を中心とした200名超の研究者からなる国際共同研究プロジェクト
ブラックホールの直接撮像を主な目標とする。小山は2017年から参加。



1. Event Horizon Telescope (EHT)

ブラックホールとは？

- 強い重力によって光さえ脱出できない暗黒の天体
- アインシュタインの一般相対性理論から理論的に存在が予言された
- 恒星質量ブラックホール、中間質量ブラックホール、超大質量ブラックホール
- ほぼ全ての銀河の中心には超大質量ブラックホールがあるはず



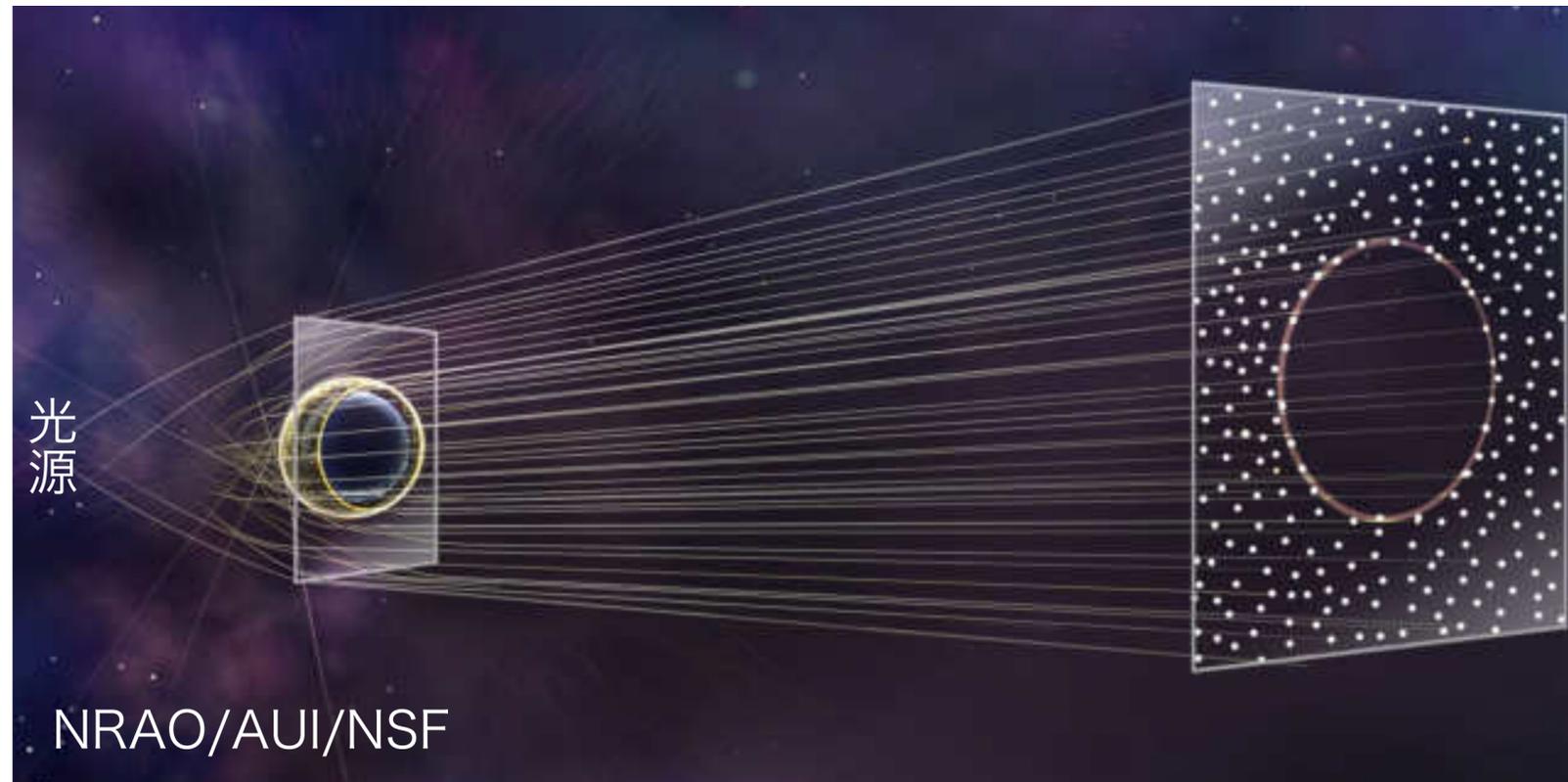
1915年
アインシュタイン
一般相対性理論の提唱



1916年
シュバルツシルト
球対称解の発見

ブラックホール直近の予想図

- 本来、光は直進する。しかし、ブラックホールのすぐ近くでは、強い重力場によって時空が歪み、光の軌道は曲げられてしまう
- 光源を背景として、光さえも出てくることができないブラックホールの影(シャドウ、影絵)を観測できると予想された
- ブラックホールシャドウはあるはずだが、小さすぎて見ることはできなかった



数値シミュレーションによる
ブラックホールシャドウの想像図

天の川銀河中心の超大質量ブラックホール・Sgr A*

The Nobel Prize in Physics 2020



© Nobel Media. Ill. Niklas Elmehed.
Roger Penrose
Prize share: 1/2



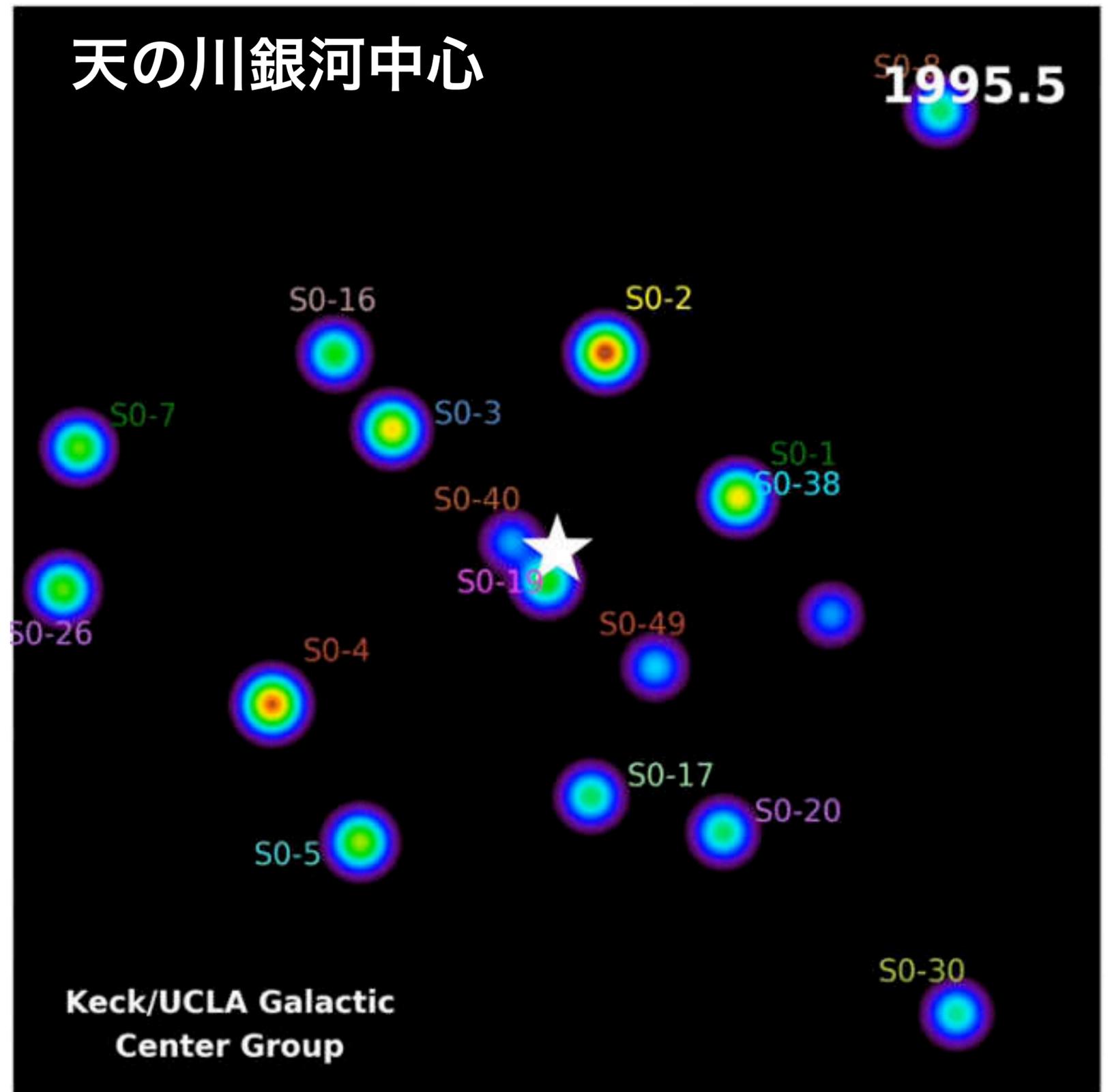
© Nobel Media. Ill. Niklas Elmehed.
Reinhard Genzel
Prize share: 1/4



© Nobel Media. Ill. Niklas Elmehed.
Andrea Ghez
Prize share: 1/4

[nobelprize.org](https://www.nobelprize.org)

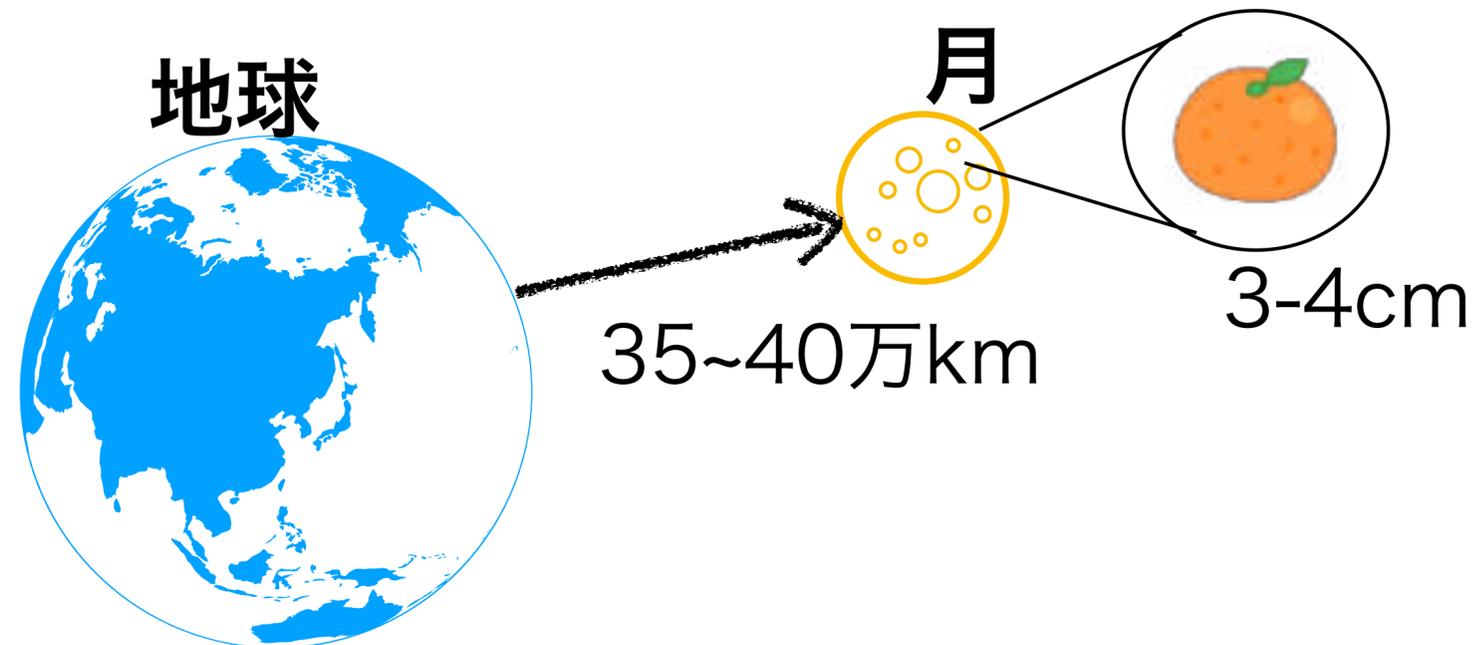
ブラックホールのさらに際を直接撮像したい!!



どんな観測装置があれば

ブラックホールシャドウを撮像することができるか？

約1千万分の1度(約40マイクロ秒角)を見分けることができる非常に高い視力(>約200万)が必要



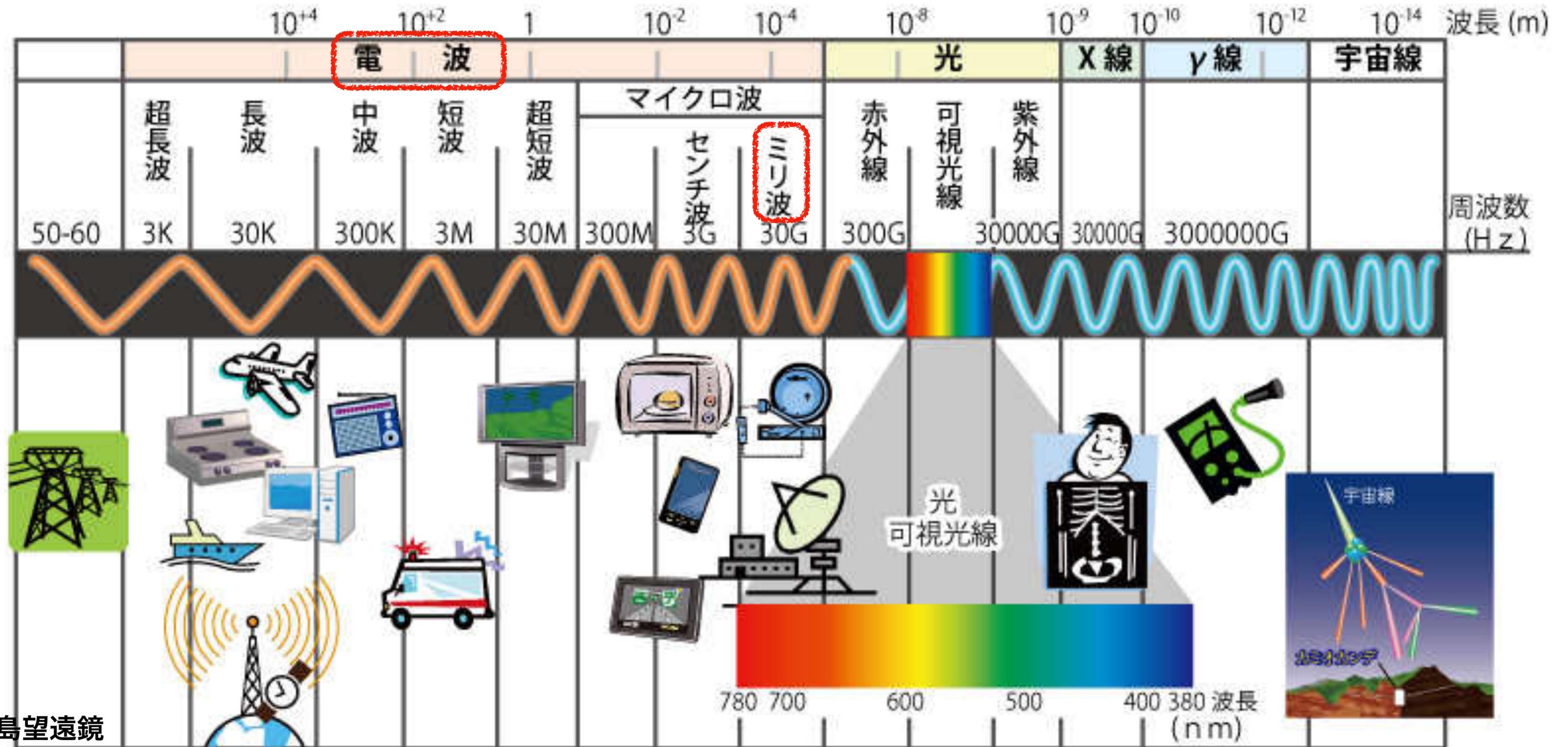
短いほど視力が良い

$$\text{望遠鏡の視力(分解能)} \sim \frac{\text{観測波長}}{\text{口径}} \longrightarrow \frac{1 \text{ ミリ}}{\text{地球サイズ (約1万km)}}$$

大きいほど視力が良い

→ 超長基線電波干渉計：VLBI

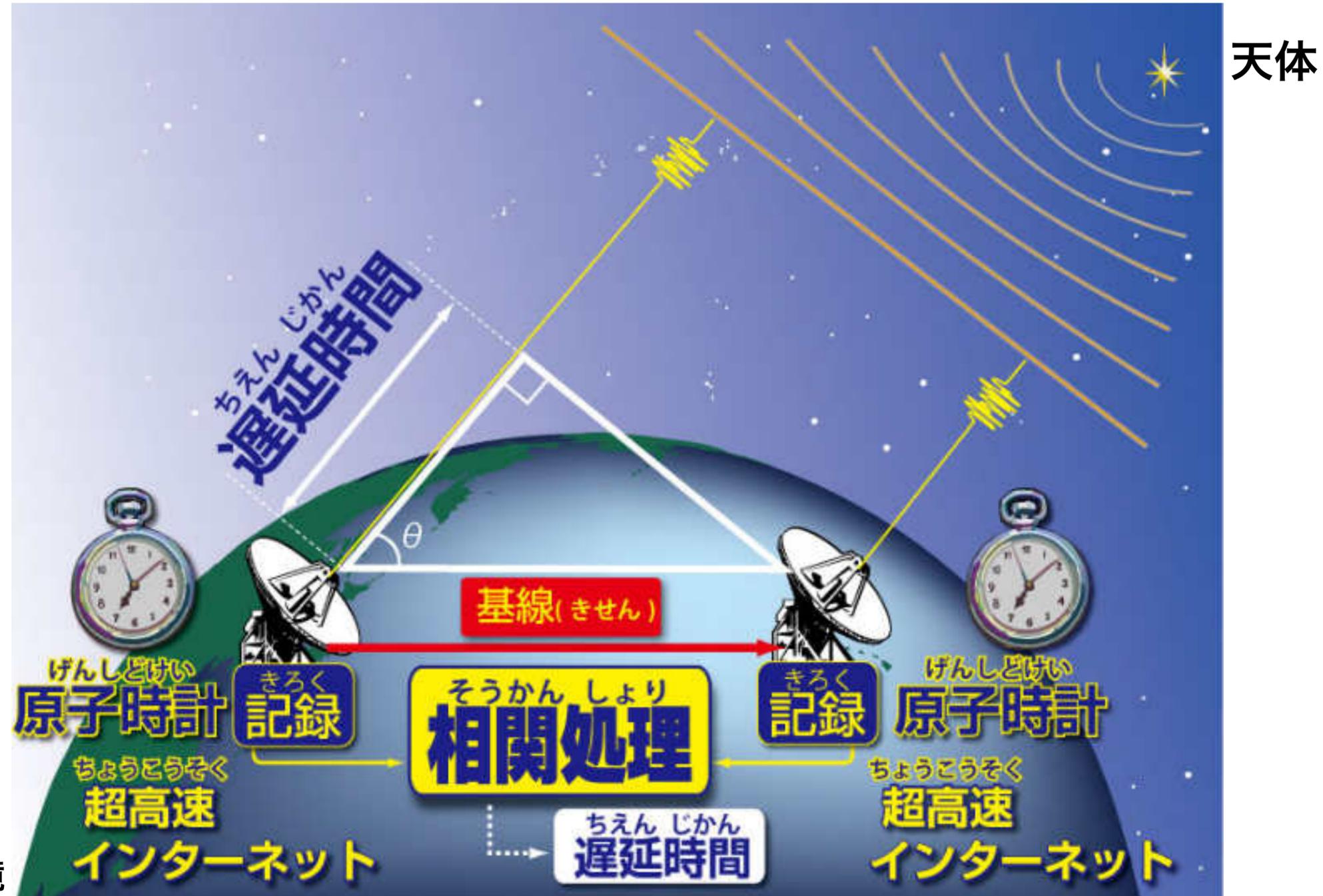
電磁波のスペクトル



NICT鹿島望遠鏡

電波（～赤外線）では、電磁波の可干渉性を使い、異なる望遠鏡間の受信電波を干渉させることで仮想的に巨大な望遠鏡を作ることができる

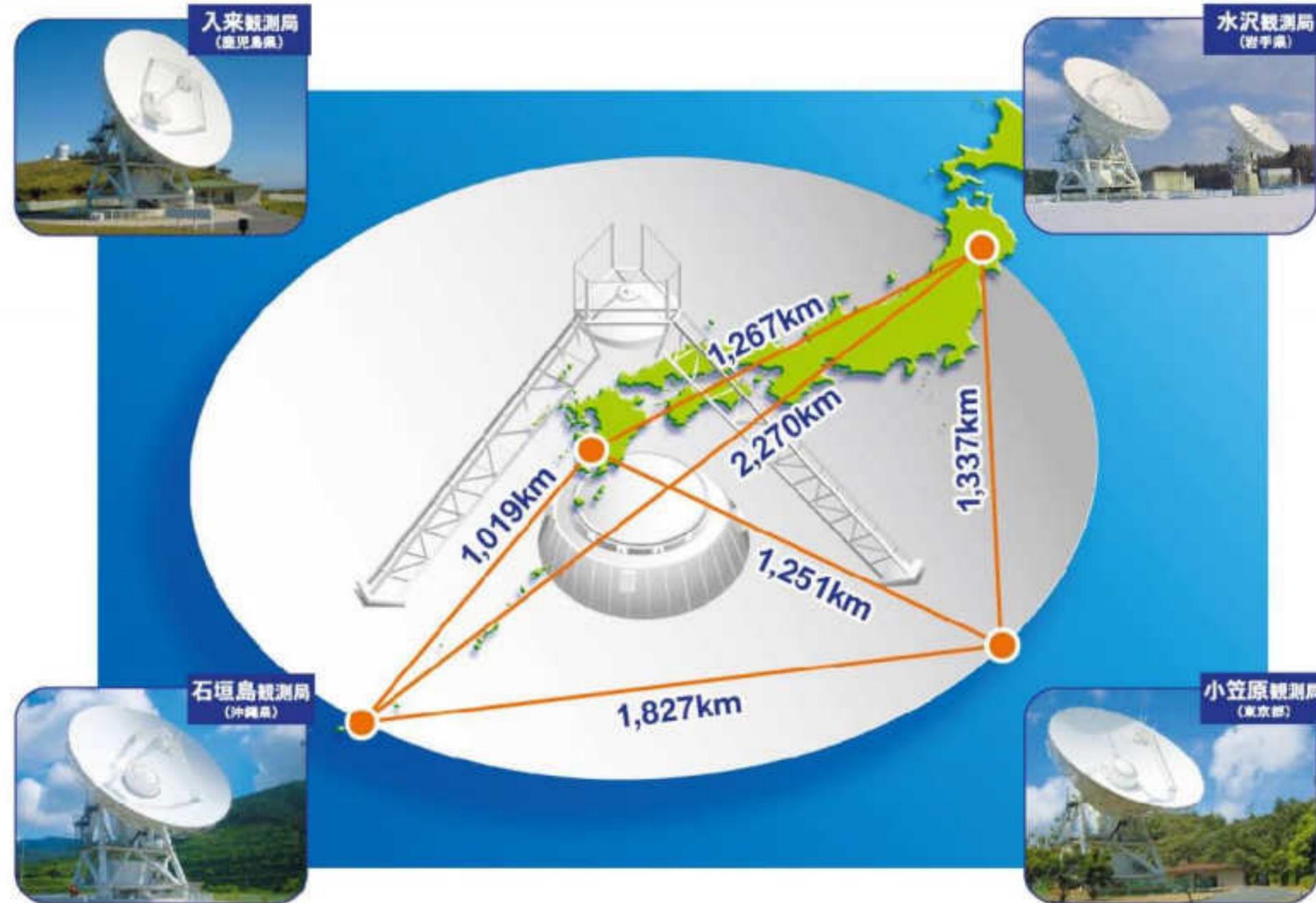
電波干渉計の原理



NICT鹿島望遠鏡

複数の電波望遠鏡で天体からの電磁波を受信し、電磁波の到達時間の差を正確に記録
電磁波を干渉させると、望遠鏡間の距離に相当する視力を持った観測装置になる

日本の超長基線電波干渉計(VLBI)



国立天文台水沢VLBI観測所
VERA

視力(分解能) ~ $\frac{\sim 1 \text{ センチ}}{2300 \text{ km}} \sim 1 \text{ ミリ秒角}$

→ シャドウを撮像するには
さらに数十倍の分解能が必要!

EHTでブラックホールシャドウを撮像しよう!

Event Horizon Telescope (EHT)

A Global Network of Radio Telescopes

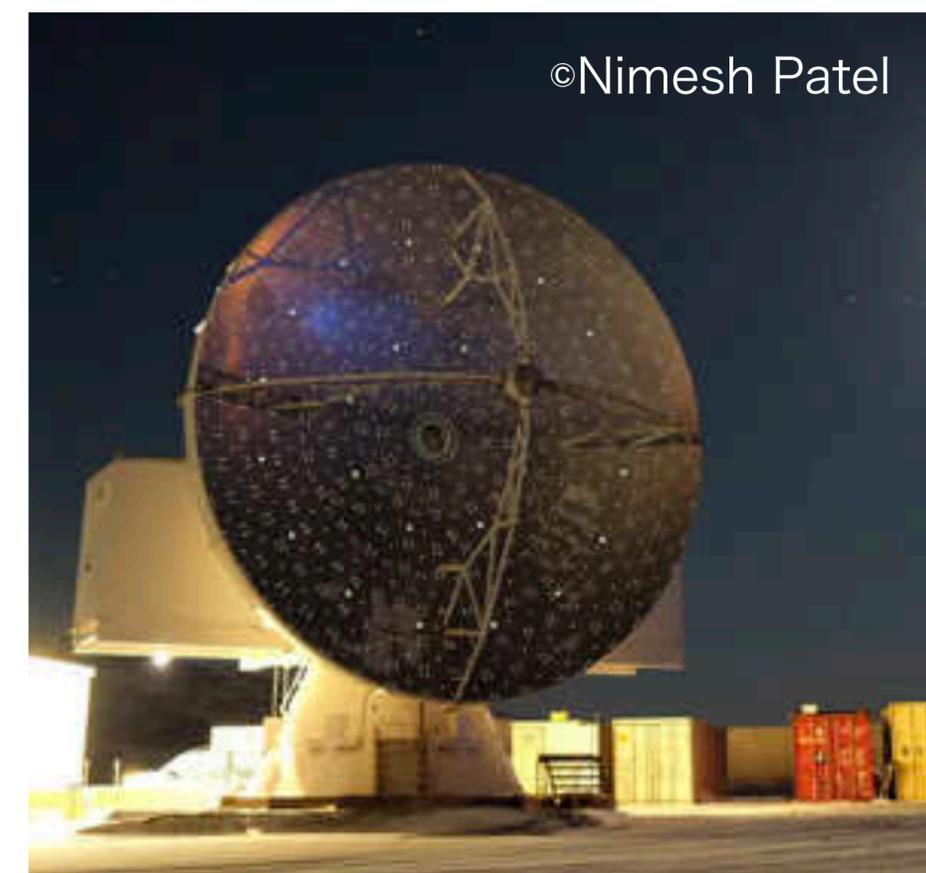
2017年4月

今回は
6箇所8局

ALMA		Atacama Large Millimeter/submillimeter Array CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
APEX		Atacama Pathfinder EXperiment CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
30-M		IRAM 30-M Telescope PICO VELETA, SPAIN
JCMT		James Clerk Maxwell Telescope MALINAKEA, HAWAII
LMT		Large Millimeter Telescope SIERRA NEGRA, MEXICO
SMA		Submillimeter Array MALINAKEA, HAWAII
SMT		Submillimeter Telescope MOUNT GRAHAM, ARIZONA
SPT		South Pole Telescope SOUTH POLE STATION
GLT		The Greenland Telescope THULE AIR BASE, GREENLAND, DENMARK
Kitt Peak		Kitt Peak 12-meter Telescope KIT PEAK, ARIZONA, USA
NOEMA		NOEMA Observatory PLATEAU DE BURE, FRANCE

2018年4月

2021年4月



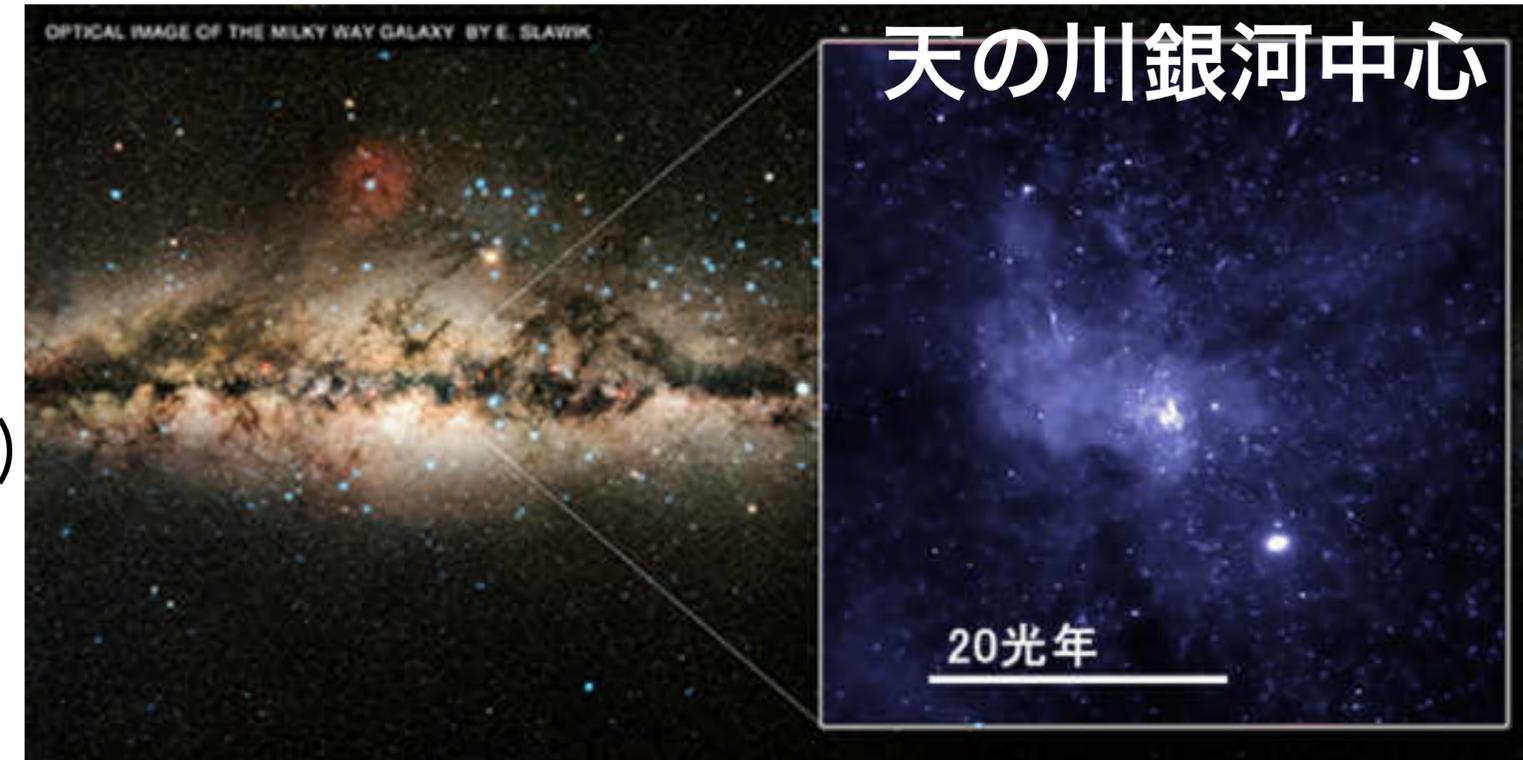
©Nimesh Patel

グリーンランド望遠鏡(GLT)
2018年~

波長1ミリで仮想的に地球サイズの望遠鏡を作ること
で、視力300万を達成!
~20マイクロ秒角

ブラックホールシャドウ撮影2大ターゲット

重たいブラックホールほど、
また地球に近いほど、
シャドウの見かけのサイズは大きい



1. 天の川銀河中心の超大質量ブラックホール(射手座A*)

- ・ 太陽の約400万倍の重さ
- ・ 地球から約2万7000光年の距離

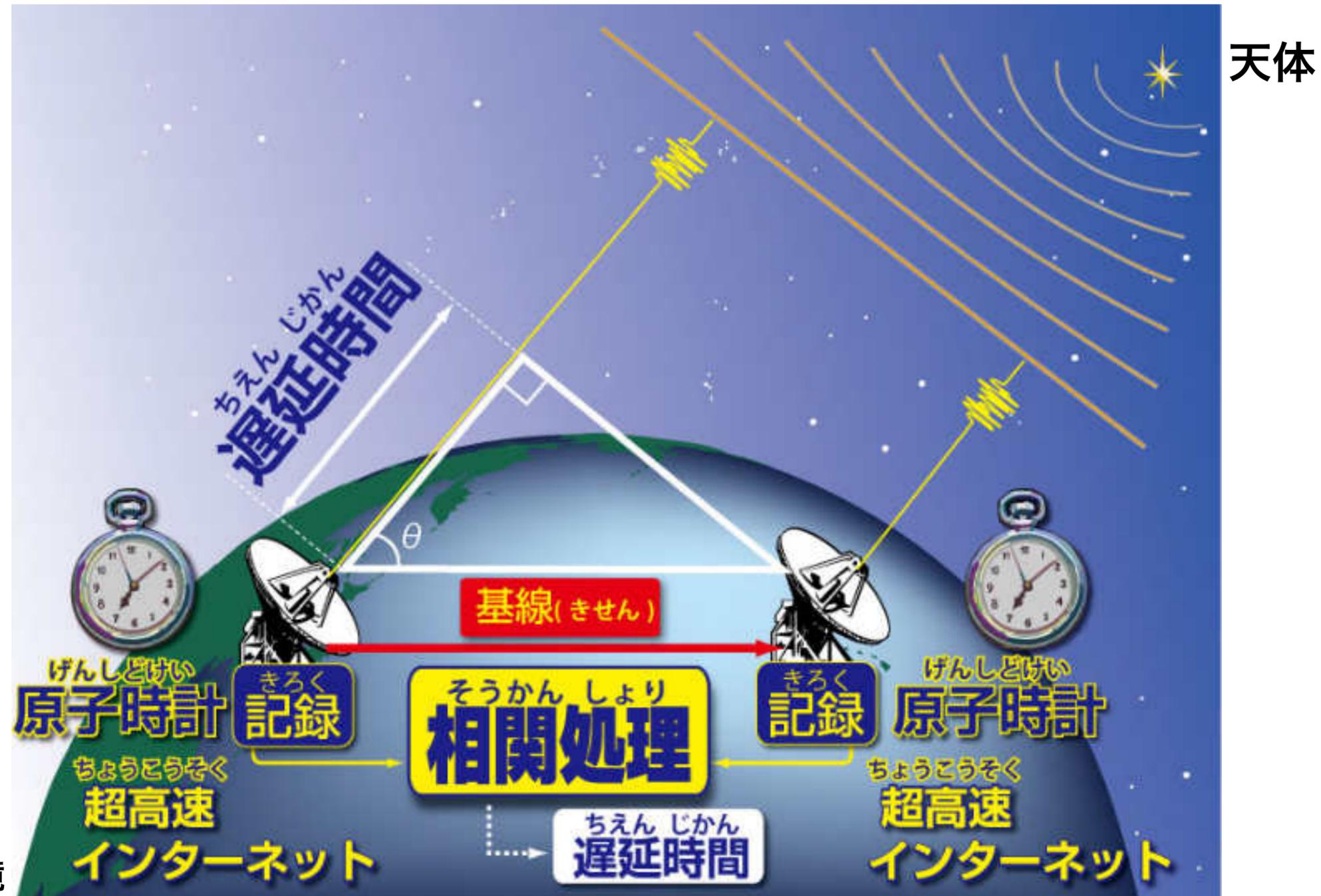
2. おとめ座銀河団中心の超大質量ブラックホール(銀河M87)

- ・ 太陽の約33-65億倍の重さ
- ・ 地球から約5500万光年の距離



2. EHTデータの画像化

電波干渉計の原理

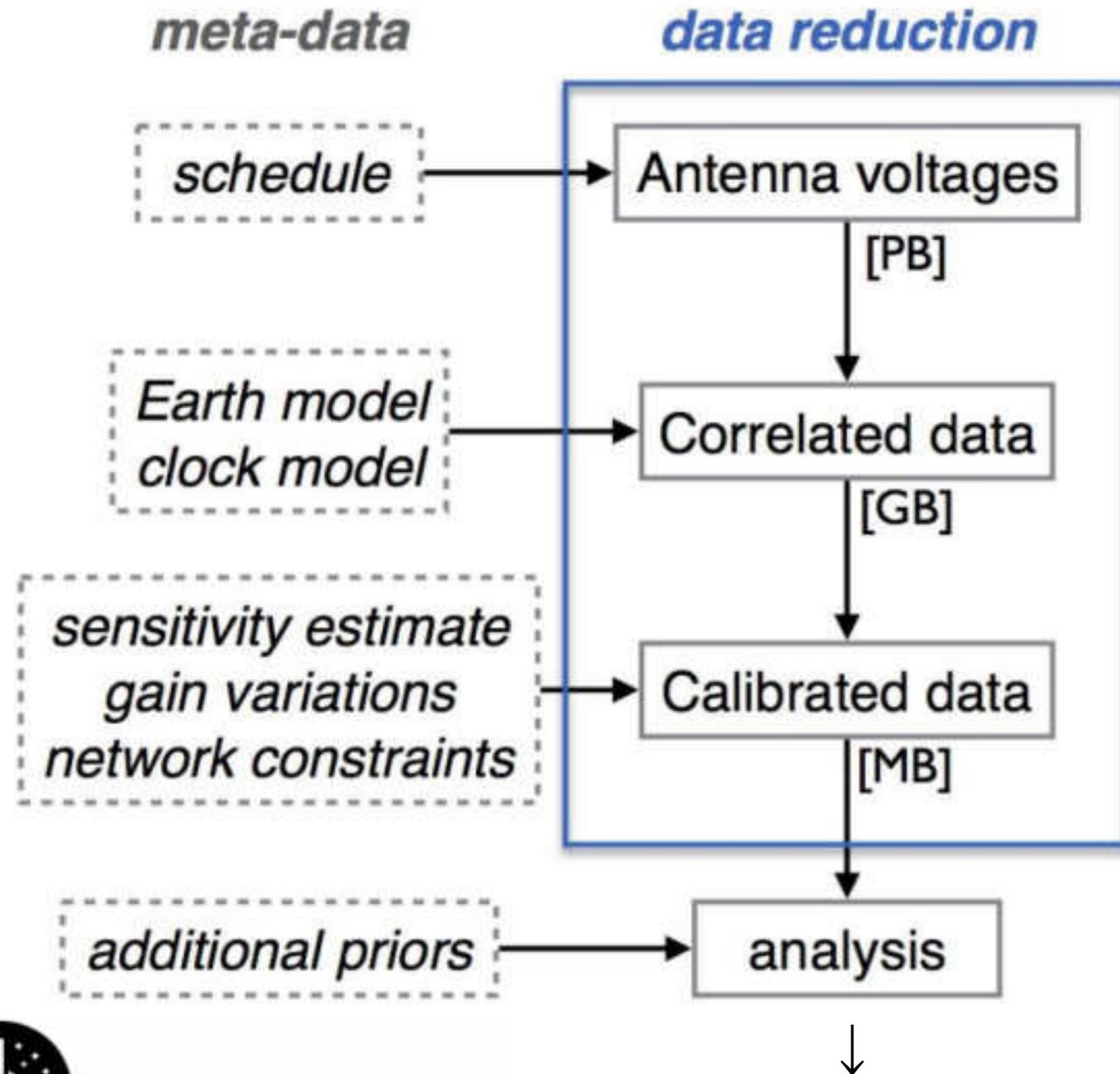


NICT鹿島望遠鏡

複数の電波望遠鏡で天体からの電磁波を受信し、電磁波の到達時間の差を正確に記録
電磁波を干渉させると、望遠鏡間の距離に相当する視力を持った観測装置になる

データ処理フロー

Recording rate: 32 Gbps



データ相関センター@ドイツ・ボン(MPIfR)



Event Horizon Telescope

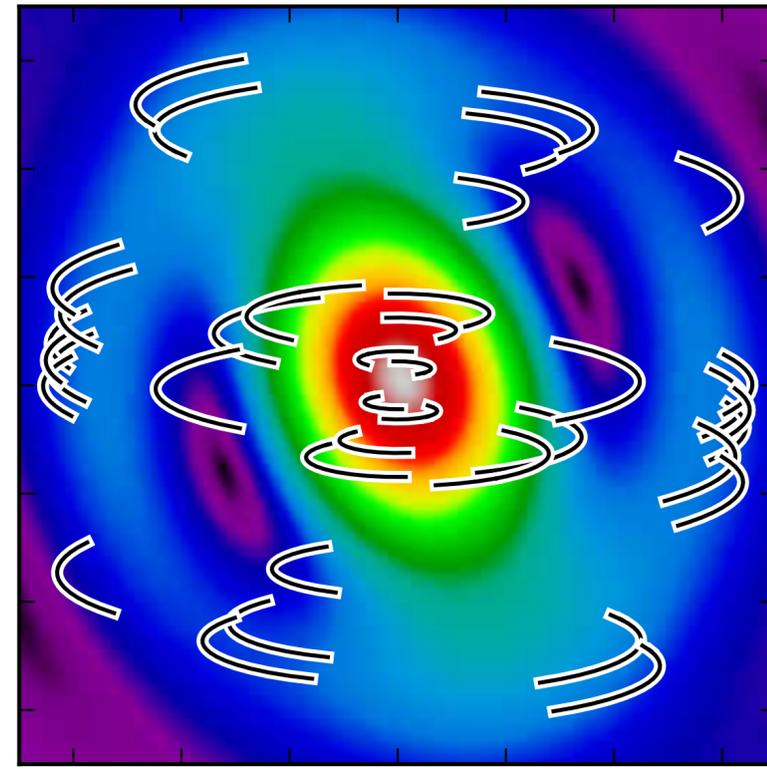
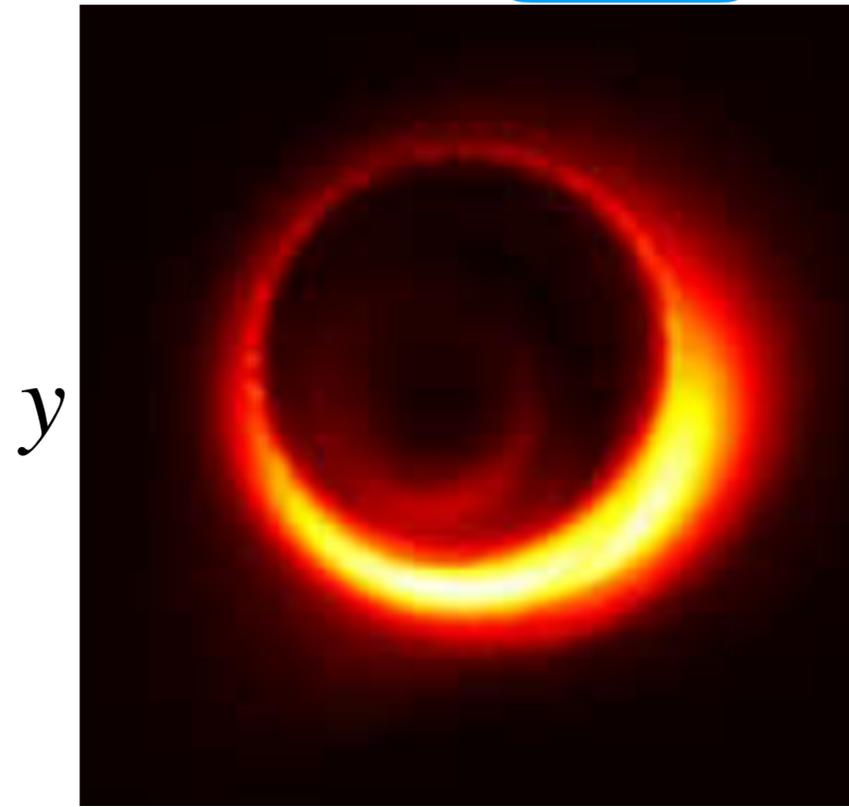
画像処理班

電波干渉計の観測量

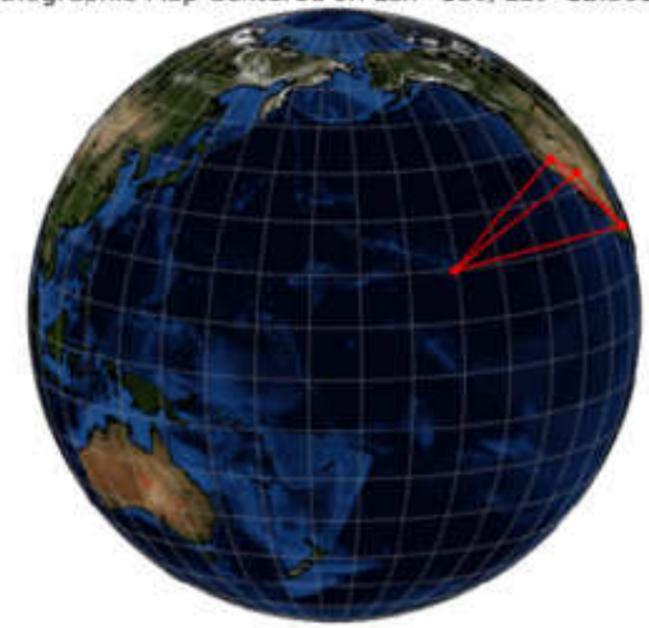
真の画像
正の実数 $I(x, y)$

観測量：ビジビリティ
複素数（振幅と位相） $V(u, v)$

サンプリング過程



Orthographic Map Centered on Lon=180, Lat=12.391123



2次元フーリエ変換

空間周波数 = 基線ベクトル

観測量：ビジビリティ $V(u, v) = \iint I(x, y) \exp(-\pi i(\underline{u}x + \underline{v}y)) \underline{dxdy}$

天体の強度分布 $I(x, y)$ の空間周波数 u, v におけるフーリエ成分が観測されるビジビリティで、
複素数（振幅と位相） 基線ベクトルで有限にサンプリングされている



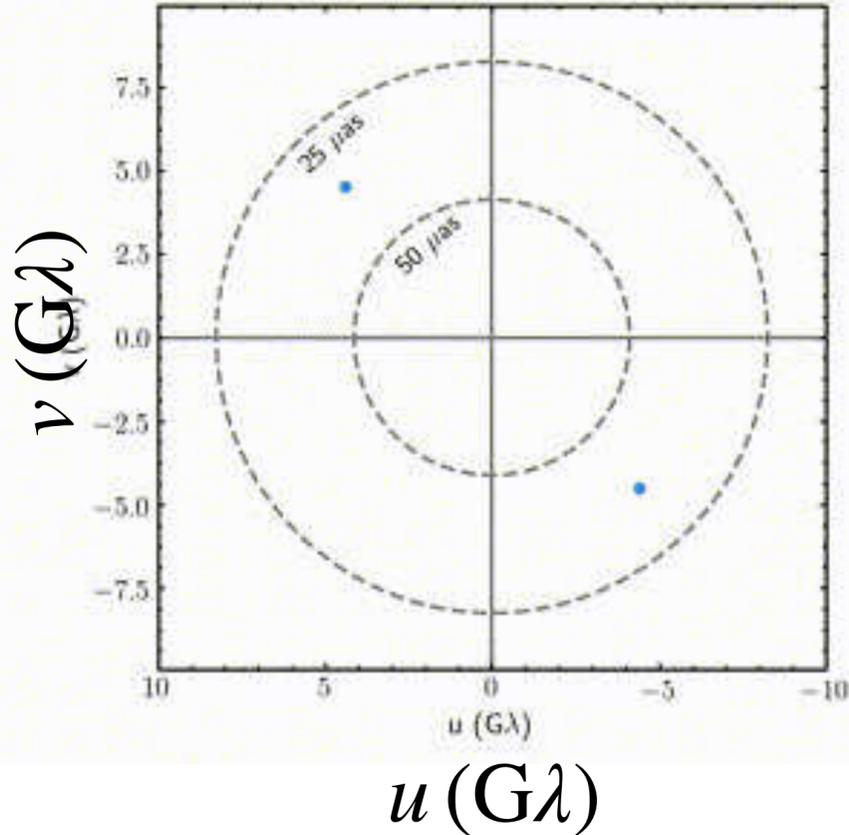
ビジビリティから天体画像へ

サンプリング過程

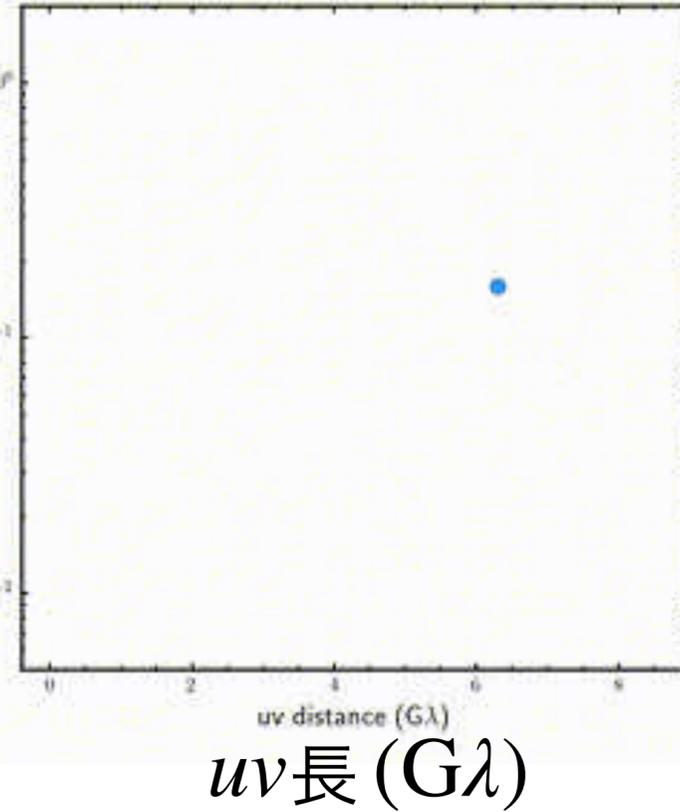


フーリエ成分
ビジビリティ

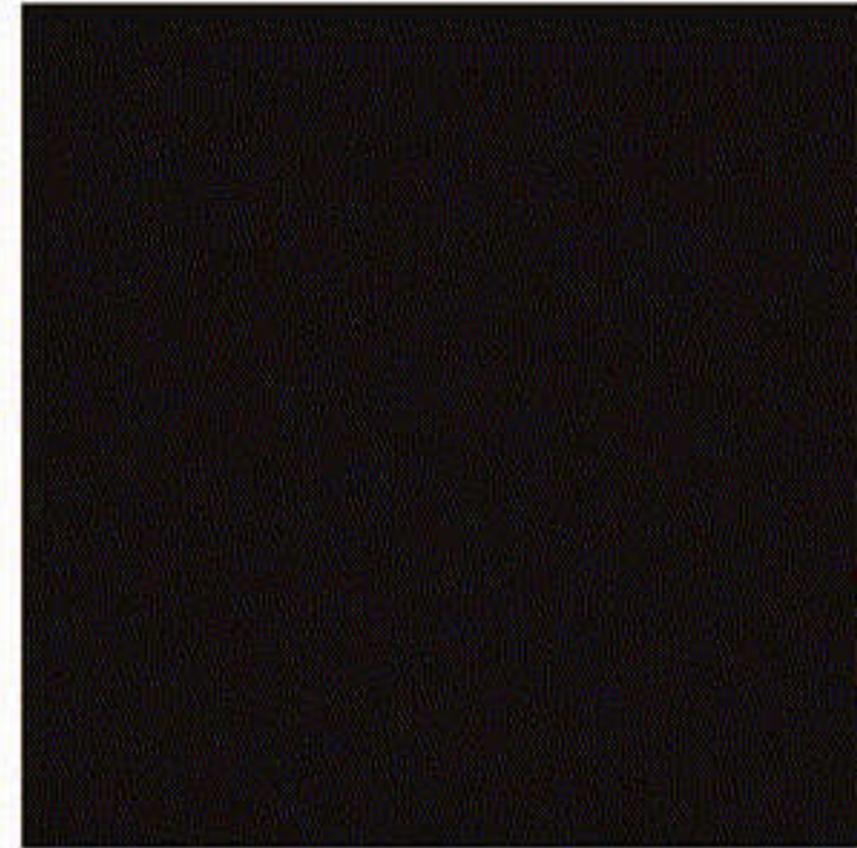
$$V'(u, v)$$



天体の放射強度 (Jy)



画像モデル $I'(x, y)$



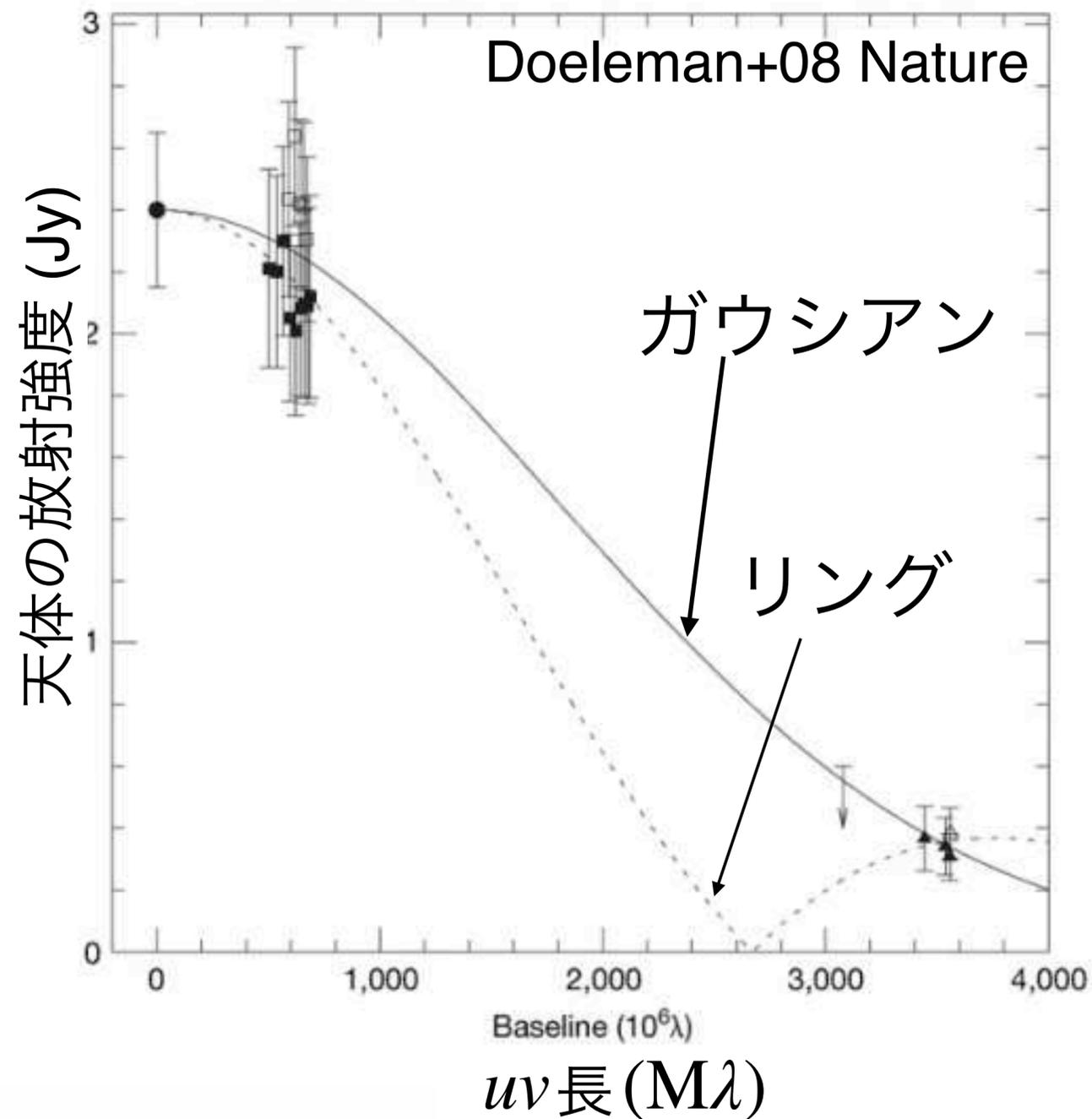
$$I'(x, y) = \iint V'(u, v) \exp(\pi i (ux + vy)) du dv$$

サンプリングされたビジビリティを逆フーリエ変換して画像モデルを得る



2017年以前のいて座A*に向けたVLBI観測

Figure 1: Fitting the size of Sgr A* with 1.3 mm wavelength VLBI.



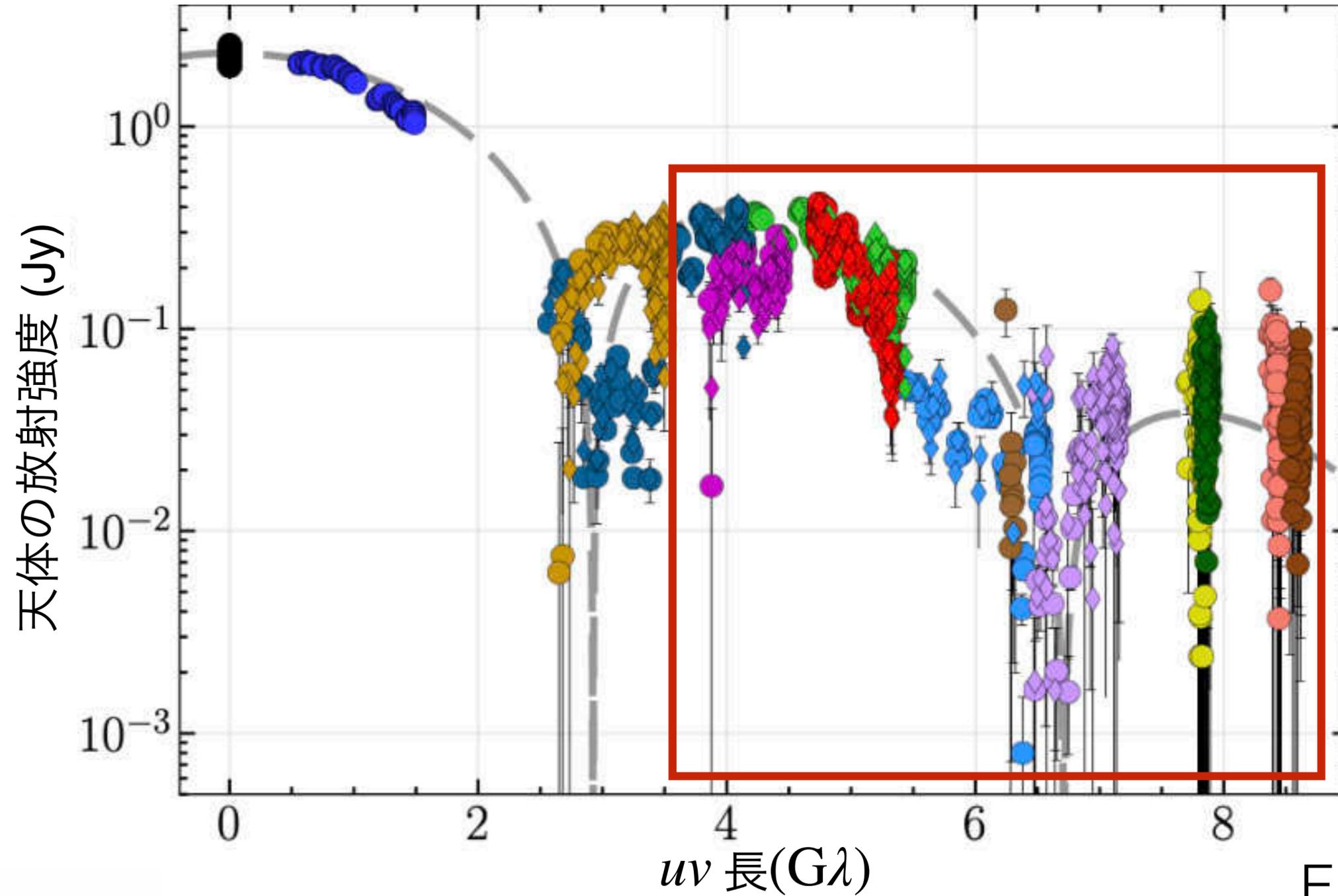
Akiyama+18

最長基線長 ~ 4000 km
解像度 \sim サイズ $\sim 30-50 \mu\text{as}$

ガウシアン ? Or リング ?



EHT 2017年4月の観測@Sgr A*



$D \sim 54 \mu\text{as}$

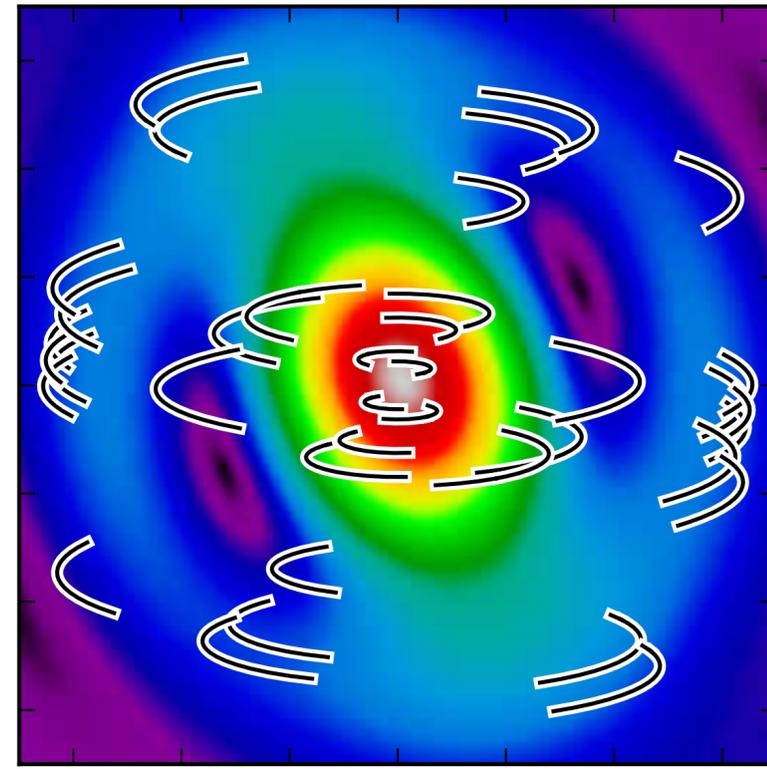
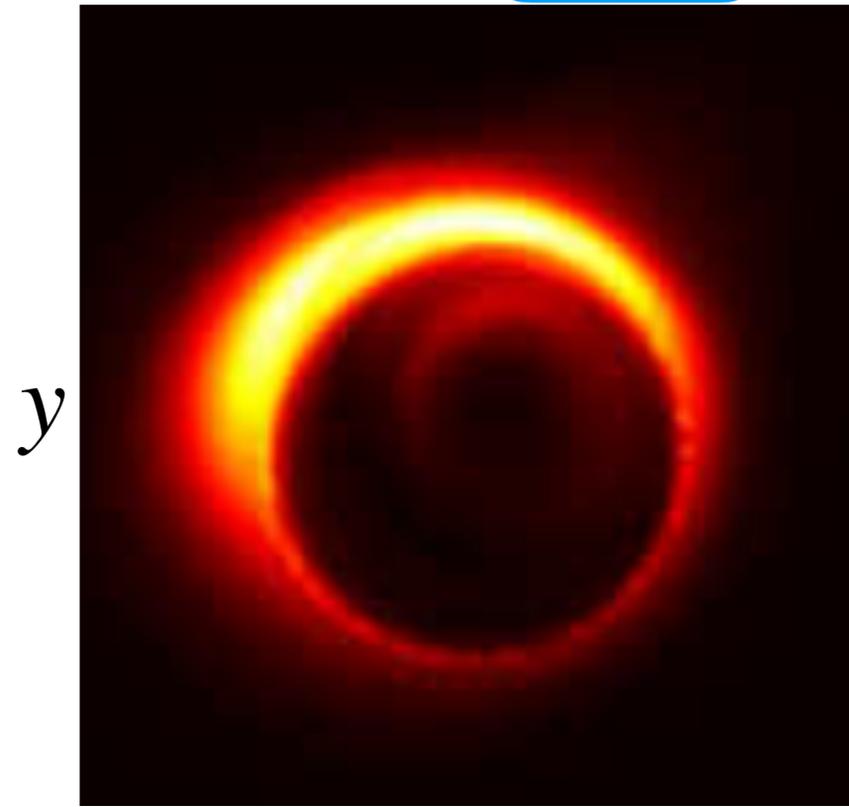
新たに観測できた
ビジビリティ→
リング状構造かも

電波干渉計の観測量

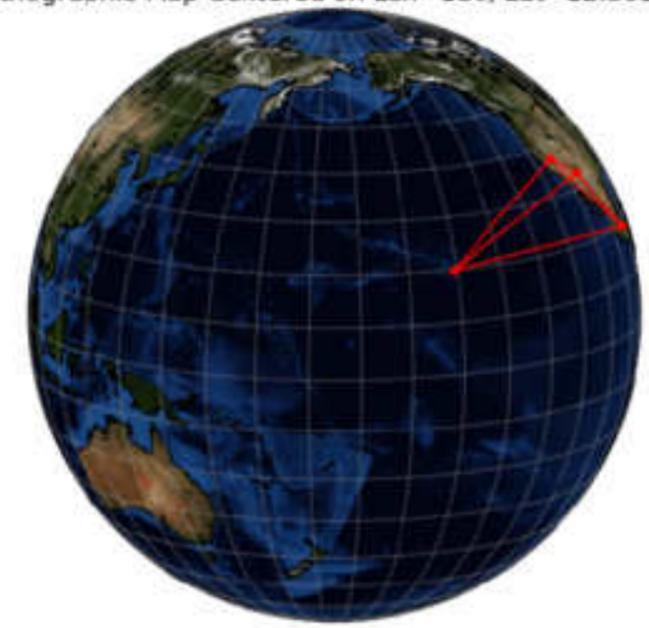
真の画像
正の実数 $I(x, y)$

観測量：ビジビリティ
複素数（振幅と位相） $V(u, v)$

サンプリング過程



Orthographic Map Centered on Lon=180, Lat=12.391123



x

2次元フーリエ変換

u

空間周波数 = 基線ベクトル

観測量：ビジビリティ $V(u, v) = \iint I(x, y) \exp(-\pi i(\underline{ux} + \underline{vy})) \underline{dxdy}$

データ V から効率的に 目的の情報 I を取り出したい → データサイエンス



Event Horizon Telescope

電波干渉計の観測方程式の行列表現

観測量：ビジビリティ
複素数（振幅と位相）

フーリエ変換

真の画像
正の実数

$$V(u, v) = \iint I(x, y) \exp(-\pi i(ux + vy)) dx dy$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} \cdots F_{1N} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix}$$

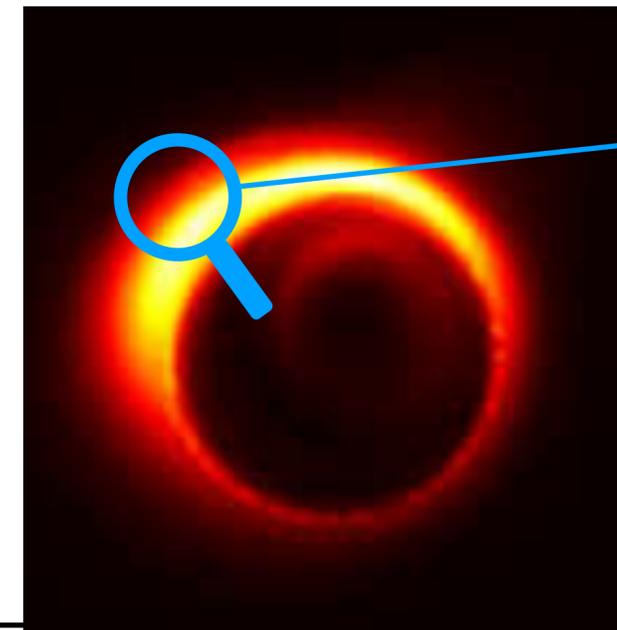
ビジビリティ
ベクトル

フーリエ行列
(M行xN列)

画像
ベクトル
未知数

$$\mathbf{V} = \mathbf{F}\mathbf{I}$$

- フーリエ変換は線形変換, 連立一次方程式
- $M \leq N$: 不良設定問題
観測点の数Mが未知数の数Nより少ない
→ 画像解は多数ある



0	0	0	1
0	0	1	2
0	1	2	3
1	2	4	5
2	3	5	10

全ピクセル数N



電波干渉計の基本観測方程式の解法

観測量：ビジビリティ
複素数（振幅と位相）

フーリエ変換

真の画像
正の実数

$$V(u, v) = \iint I(x, y) \exp(-\pi i (ux + vy)) dx dy$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} \cdots F_{1N} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix}$$

ビジビリティ
ベクトル

フーリエ行列
(M行xN列)

画像
ベクトル
未知数

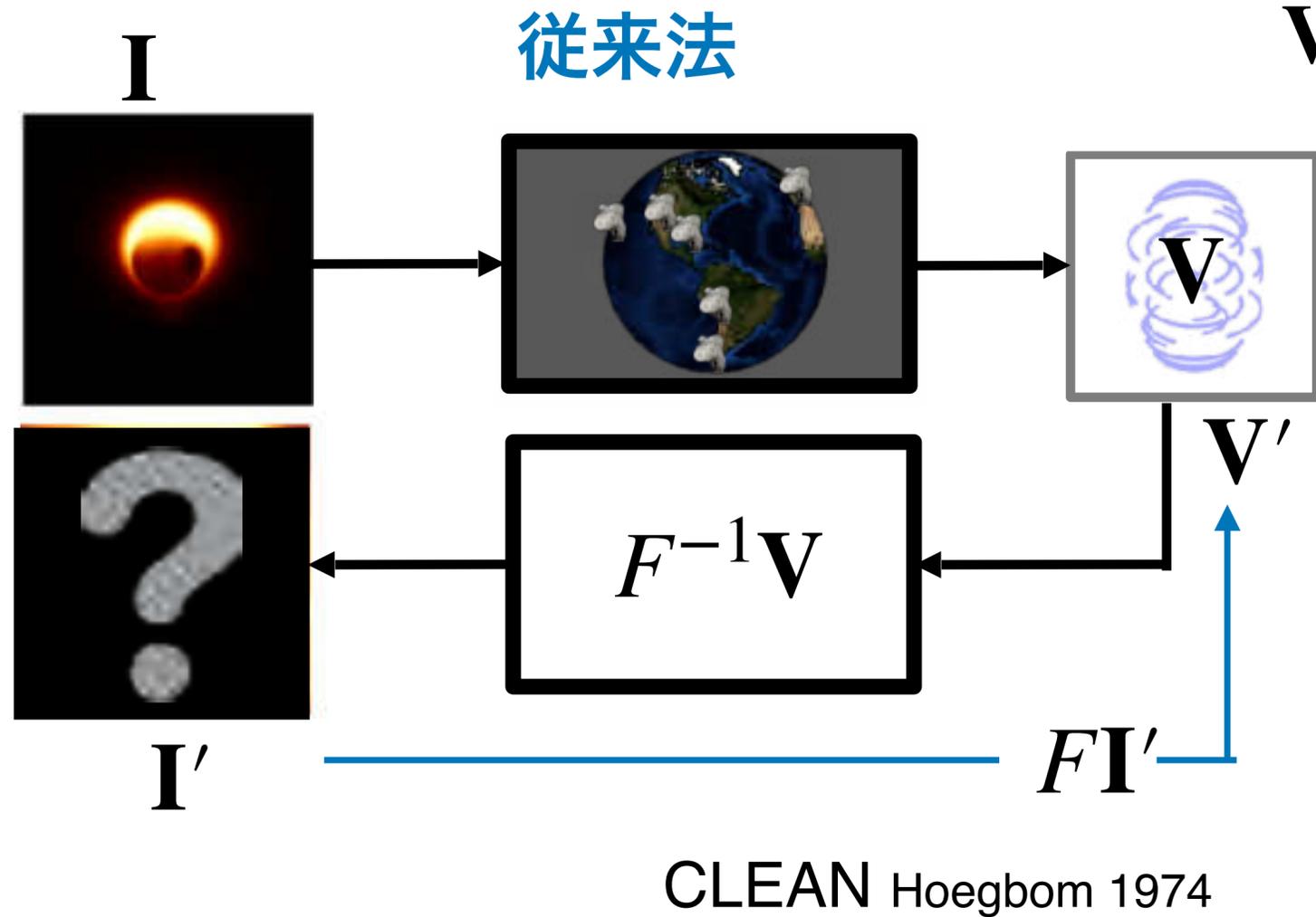
$$\mathbf{V} = \mathbf{F}\mathbf{I}$$

$$\rightarrow \arg \min \frac{1}{2} \|\mathbf{V} - \mathbf{F}\mathbf{I}'\|_2^2$$

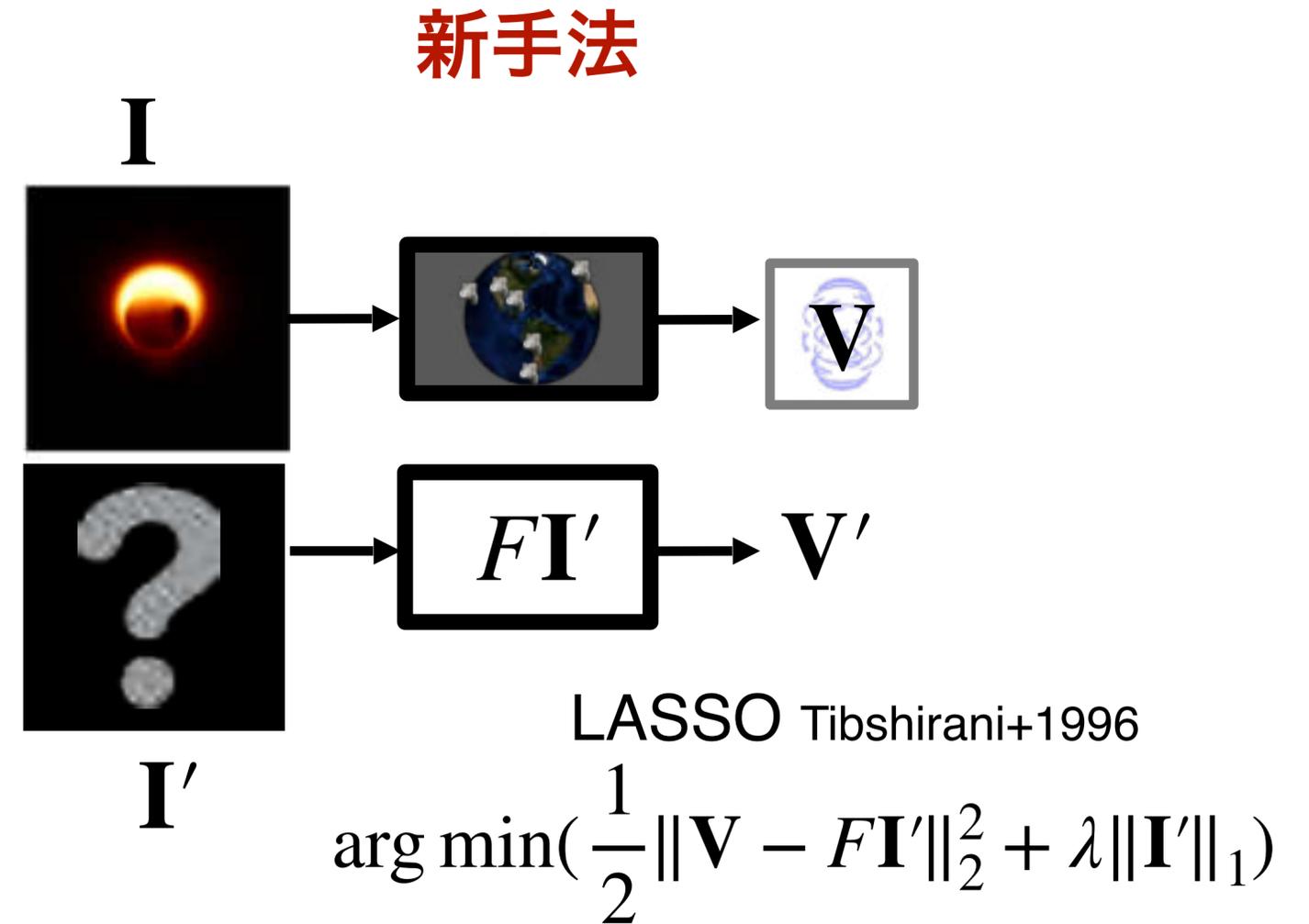
- フーリエ変換は線形変換, 連立一次方程式
- $M \leq N$: 不良設定問題
観測点の数Mが未知数の数Nより少ない
→ 画像解は多数あり、一意に決まらない
- 新手法: 画像ベクトルの成分に条件を課し、未知数を減らす。「できるだけ0の多い」
=スパース(sparse)な解を探す。
→ sparse modeling... 医療MRI等で使用されてきた



画像化手法の比較



Inverse Modeling:
Difmap Shepherd 97

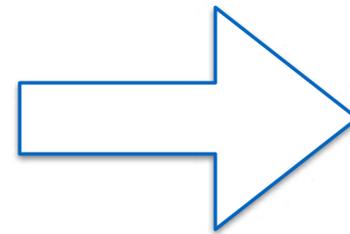


Forward Modeling:
SMILI Honma+14, Akiyama+17a,b
eht-imaging Chael+16,18

3. 天の川銀河中心ブラックホール・ いて座A*の画像化

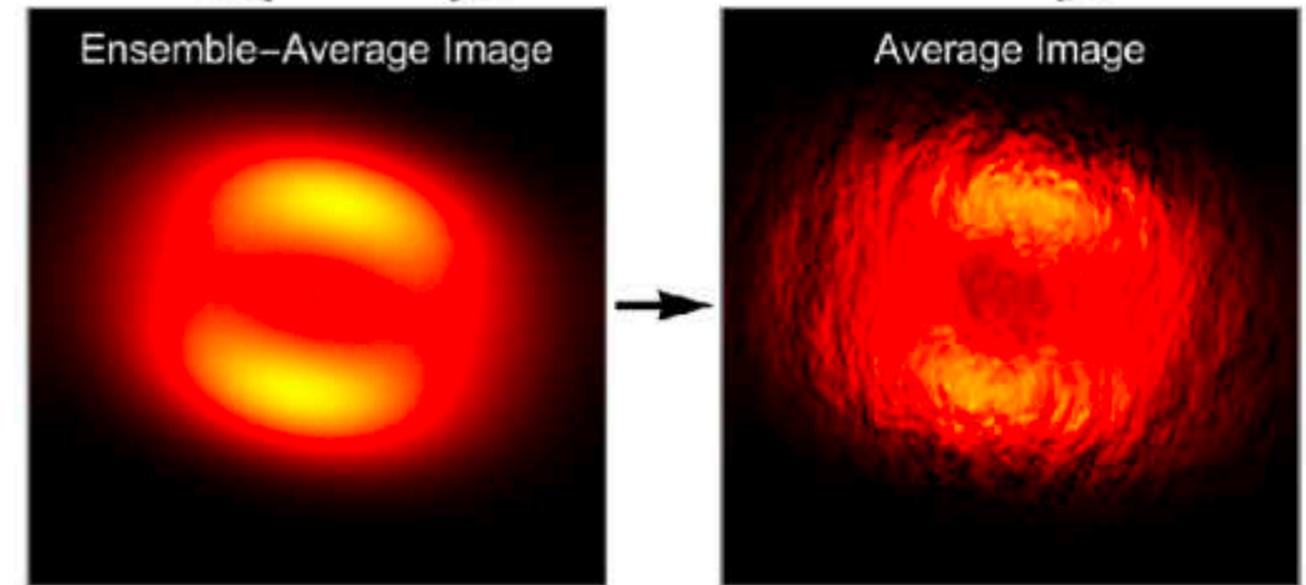
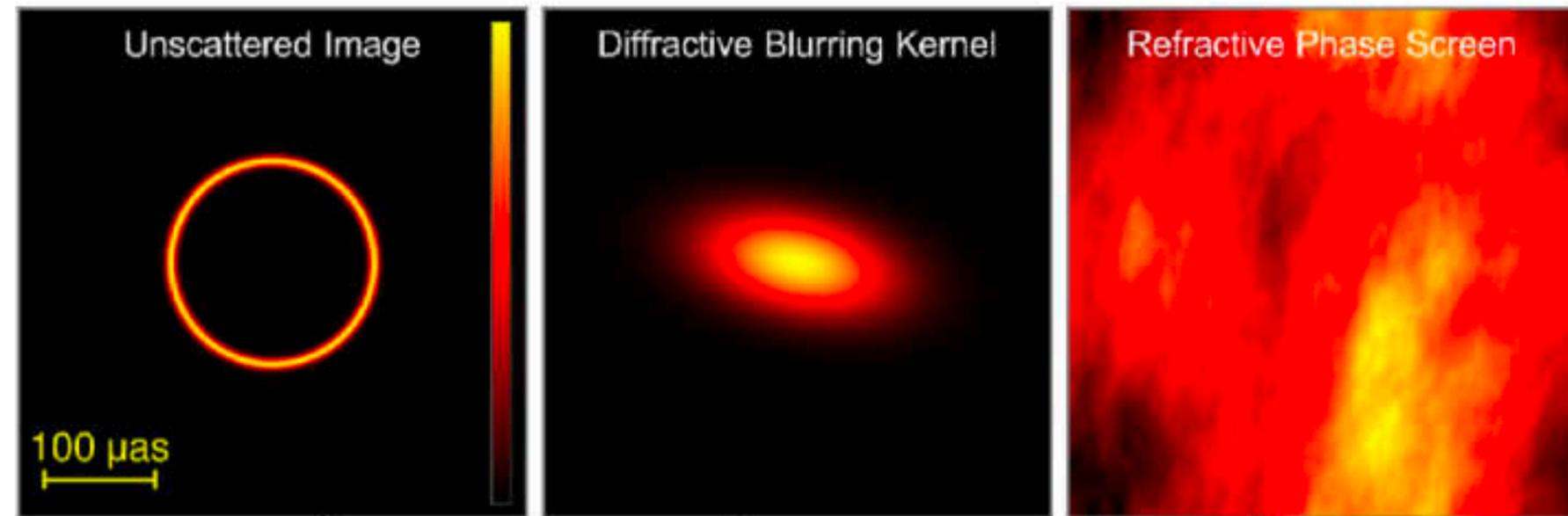
いて座A*画像化の課題1: 時間変化

- Light crossing time $\sim \frac{GM}{c^3} \sim > 20 \text{ sec}$, EHT1回の観測 ~ 10 時間静止と仮定
- 時間平均された画像を推定



いて座A*画像化の課題2: 星間散乱

- いて座A*の手前にある星間ガスによって画像がぼやけてしまう
- 複数の長波長観測から散乱効果を見積り除去することで本来の姿を得る(Cho+22)

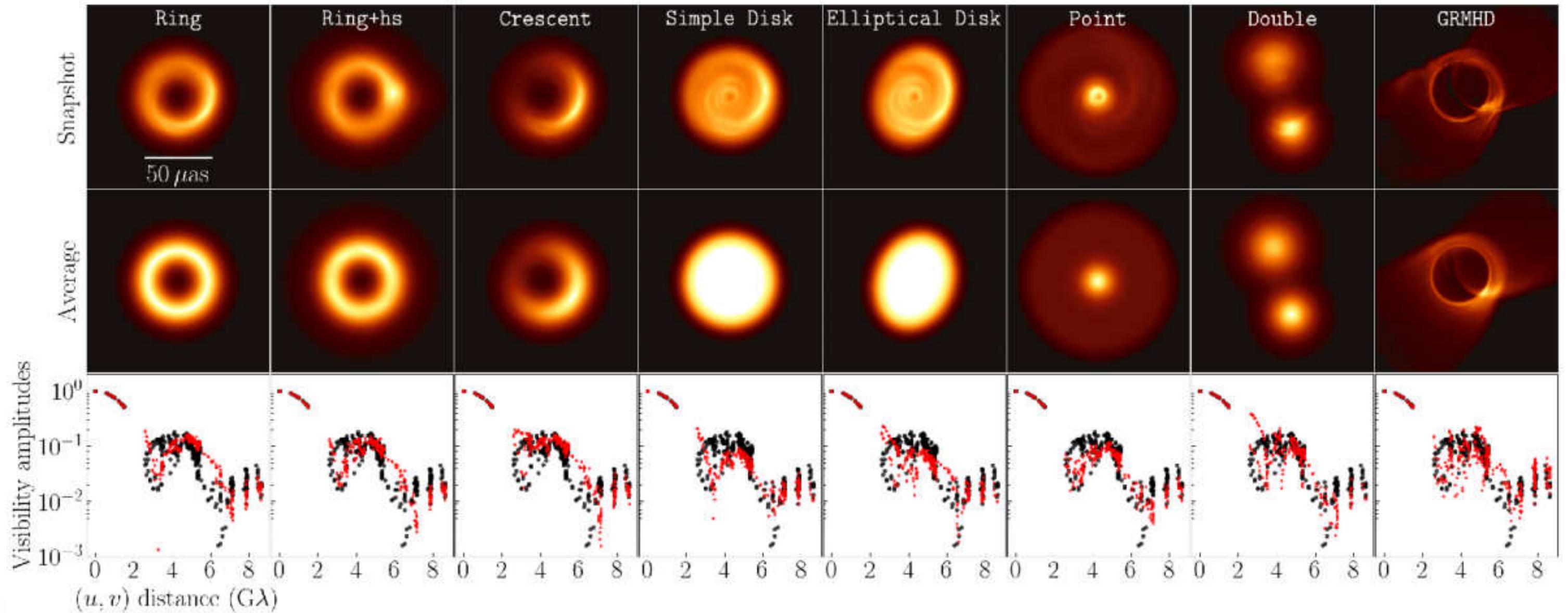


Johnson+16

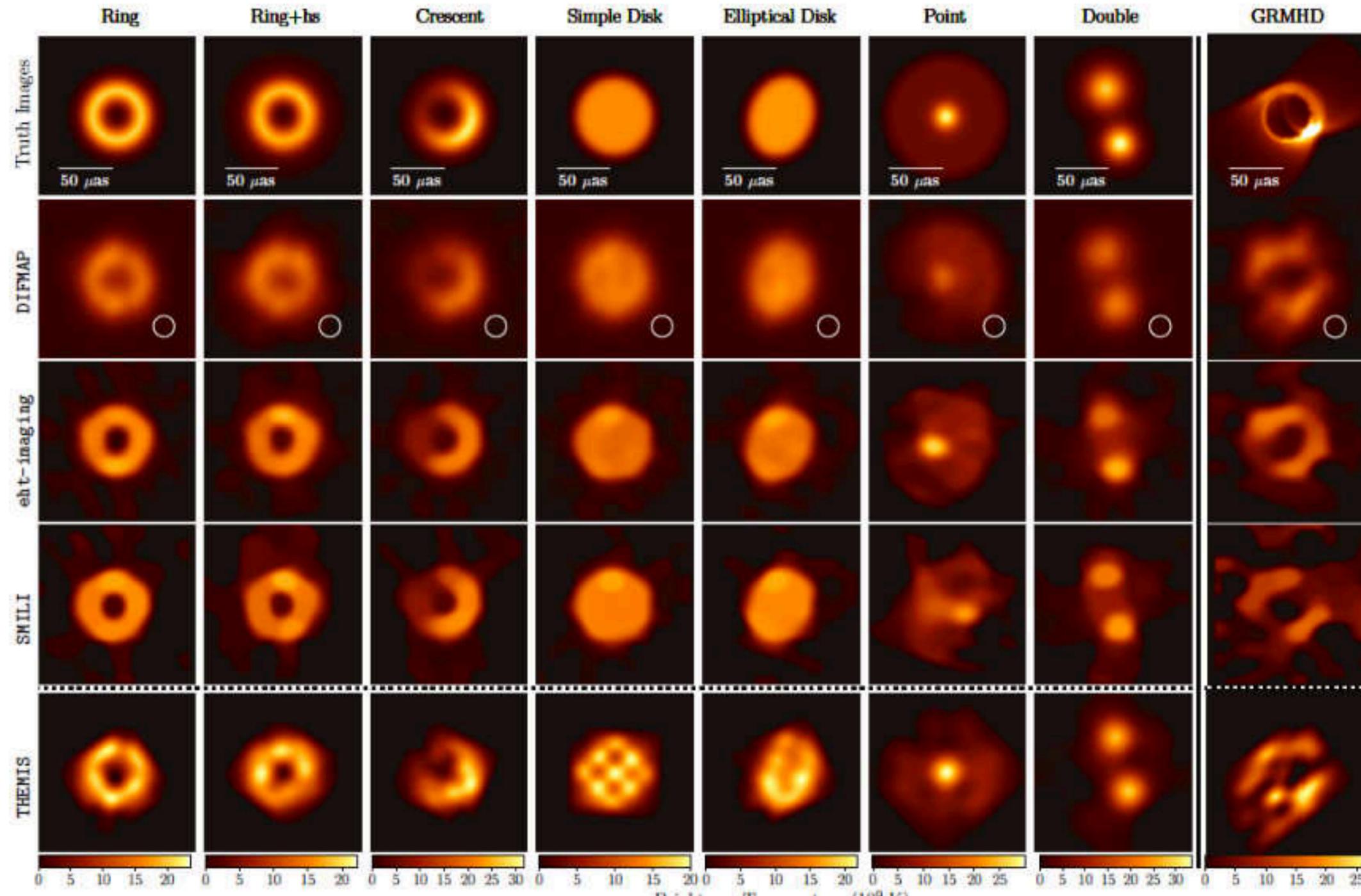


模擬観測データ

- Sgr A*データと似た特徴を持つ異なる幾何学モデルを複数作成



模擬観測データの画像化



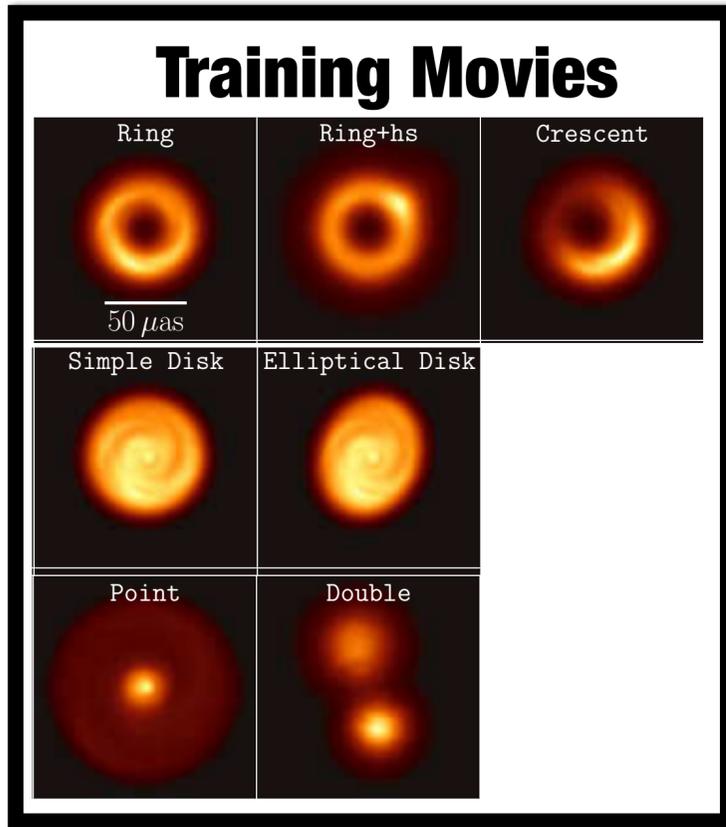
Sgr A* Paper III



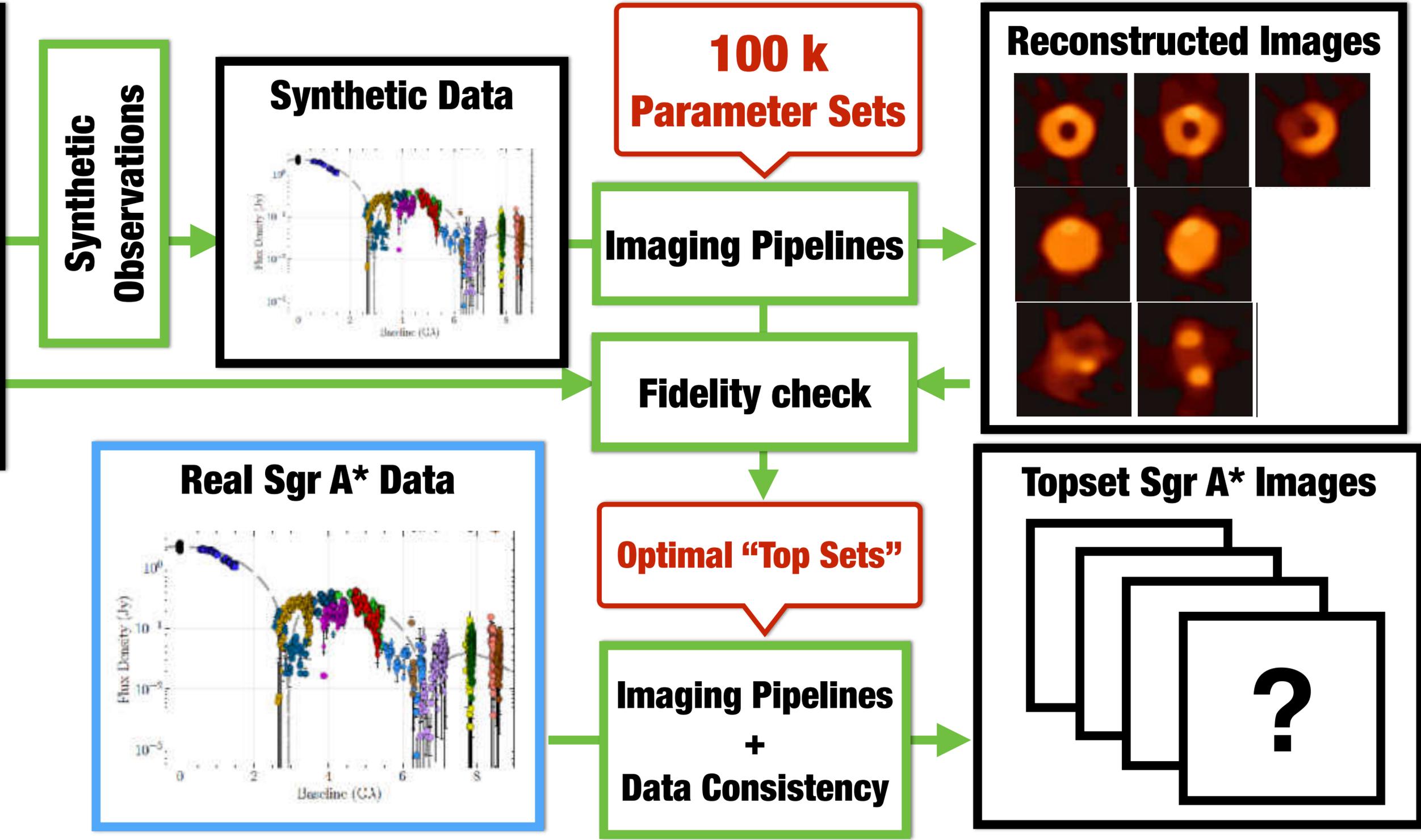
Event Horizon Telescope

モデル画像を最もよく再現する画像化パラメータを絞り込む→実データに適用

Sgr A*画像化の流れ



教師あり学習



いて座A*: 4タイプの画像

2017/4/7

クラスタリング後の各平均画像

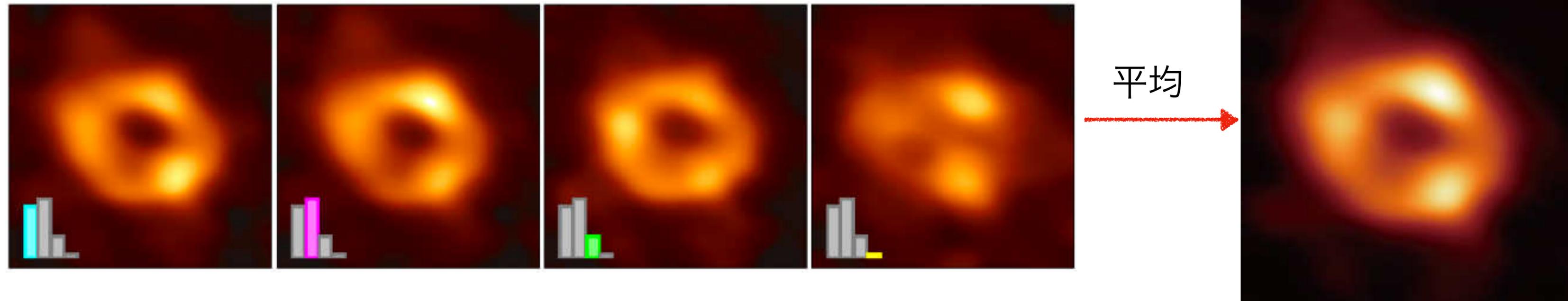
リング1型

リング2型

リング3型

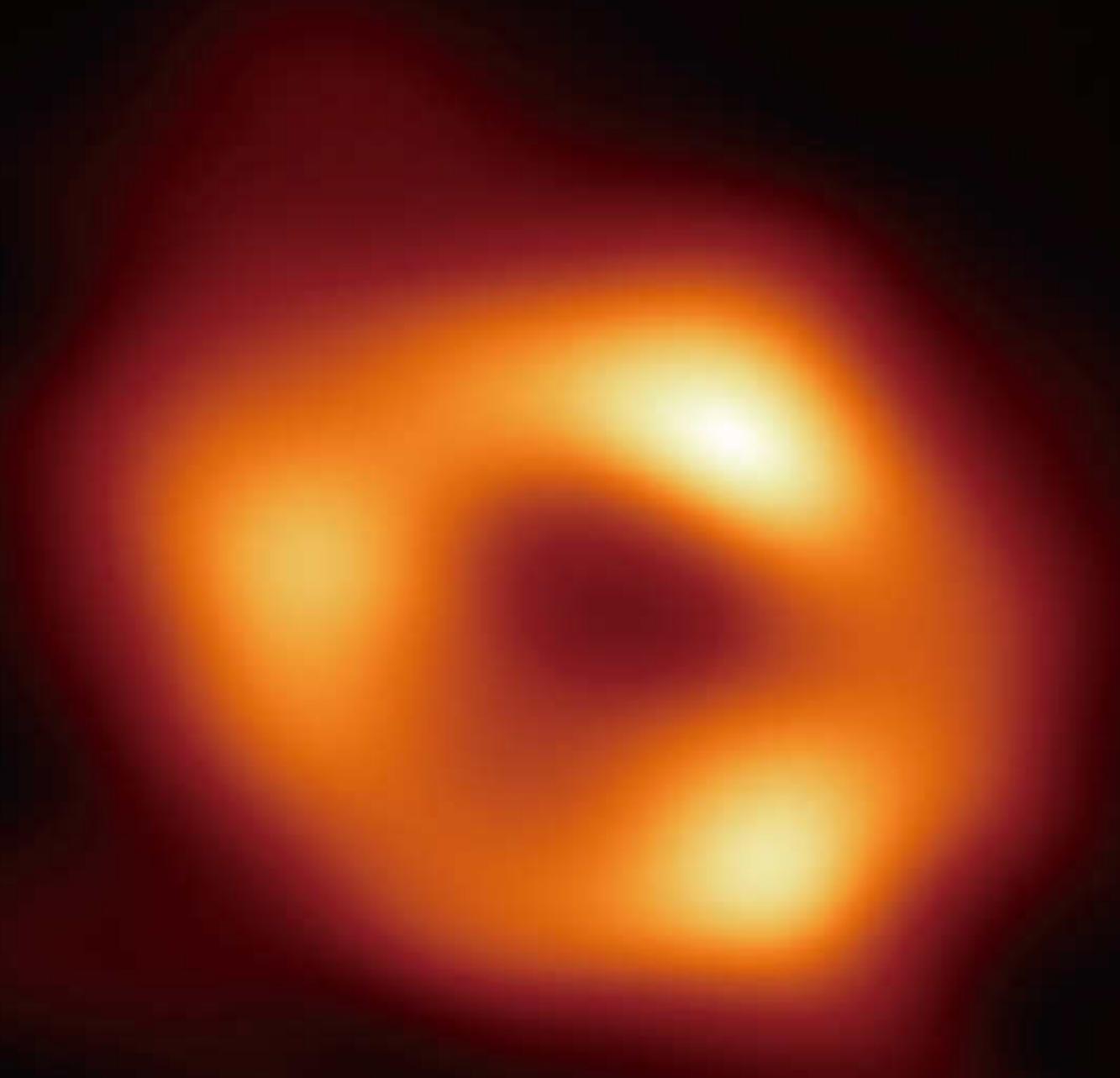
非リング型

最終画像

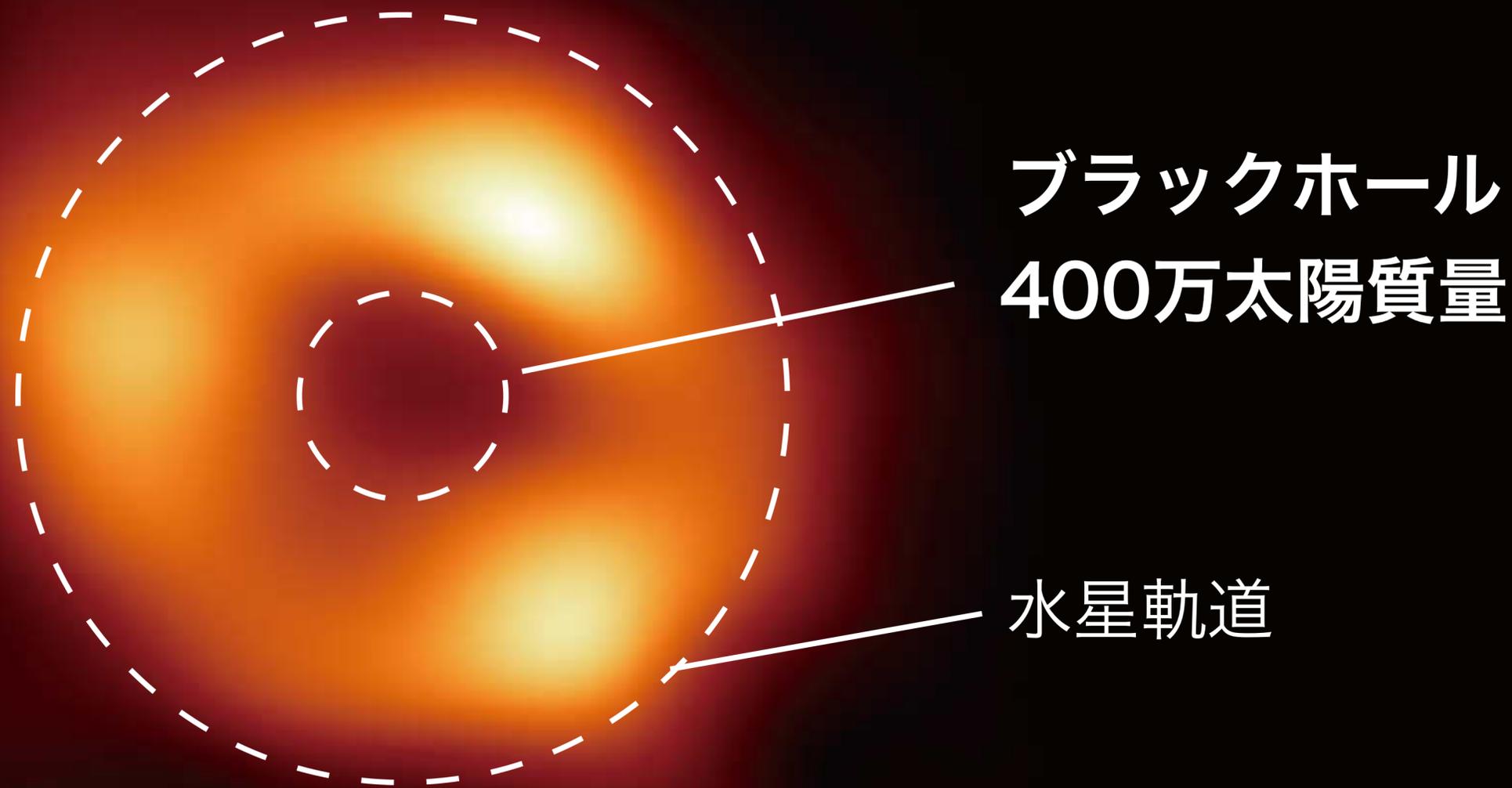


全体（約1万枚）のうち95%以上はリング
（明るい場所の方位角は異なる）

5%以下



天の川銀河中心の巨大ブラックホール・Sgr A*

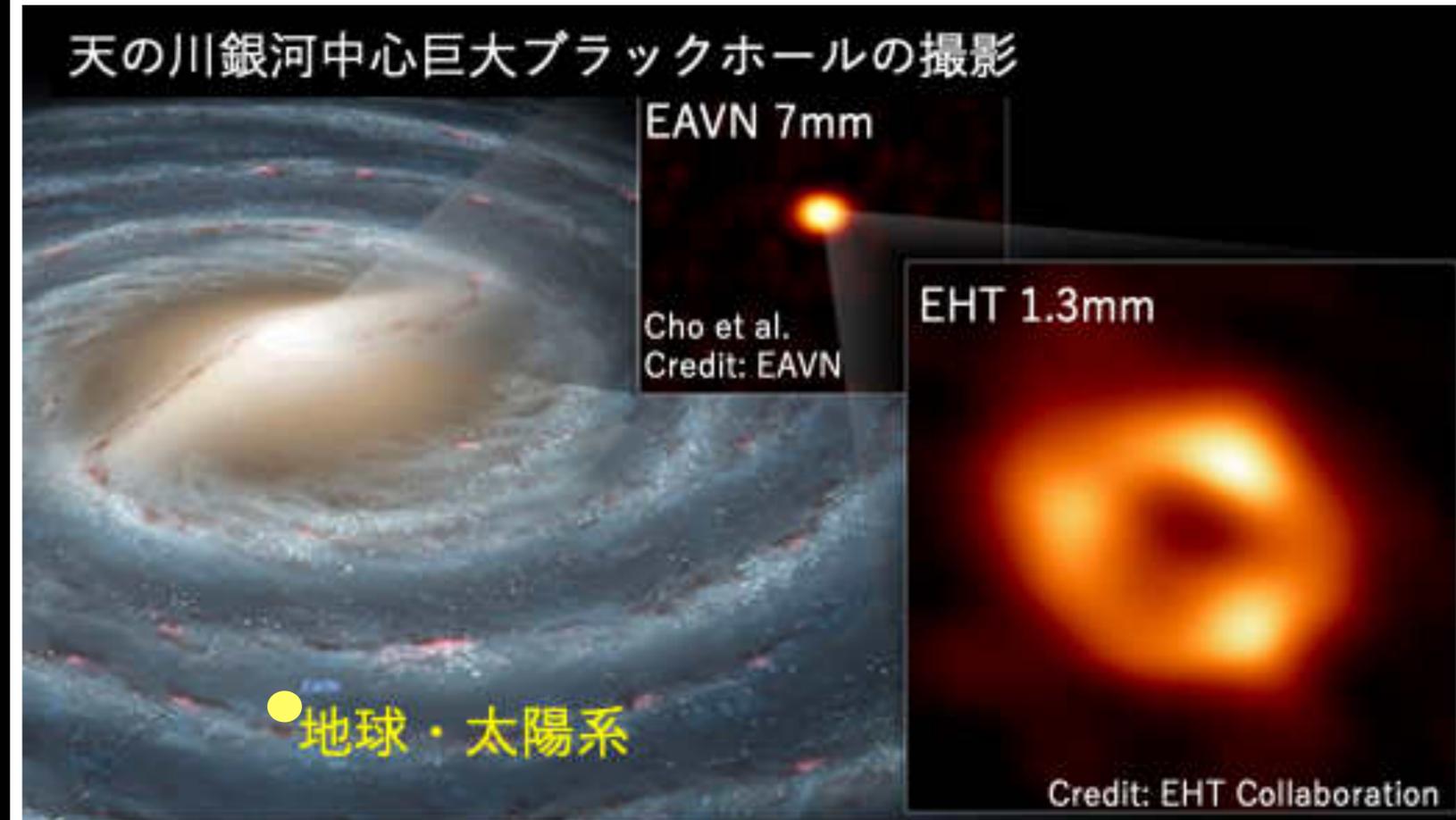
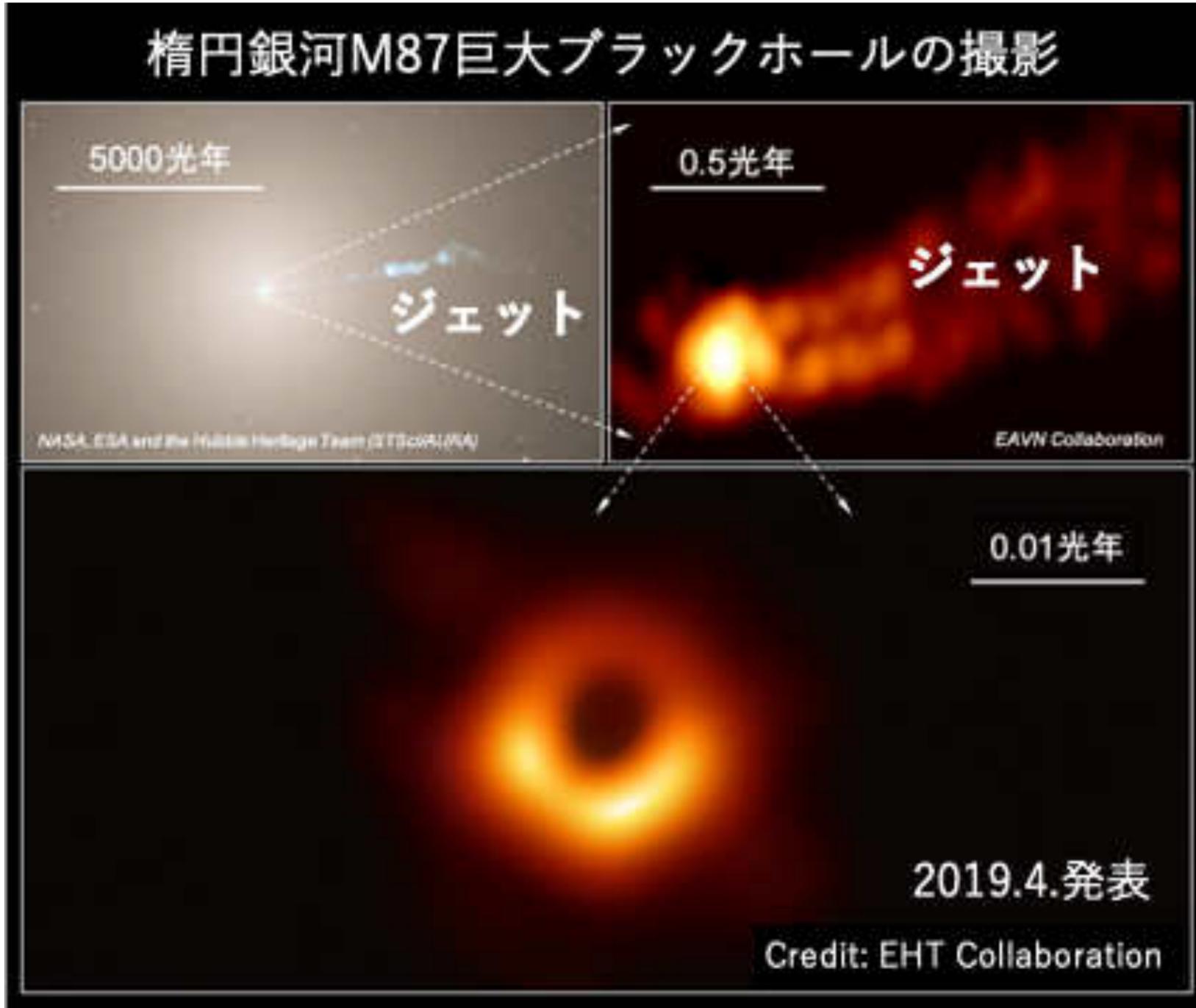


ブラックホール
400万太陽質量

水星軌道

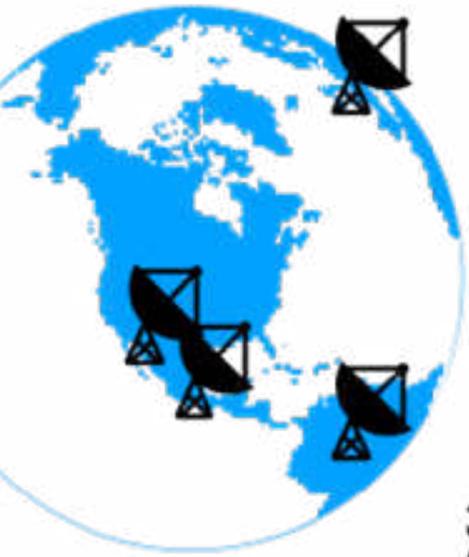
50マイクロ秒角~6000万km~5 Rs (光子リング)

EHTの2大目標を遂に達成!!

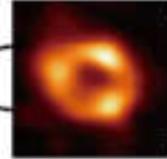


↑ 2022.5.12. 発表

いて座A* vs M87: 距離と見かけのサイズ



いて座A*

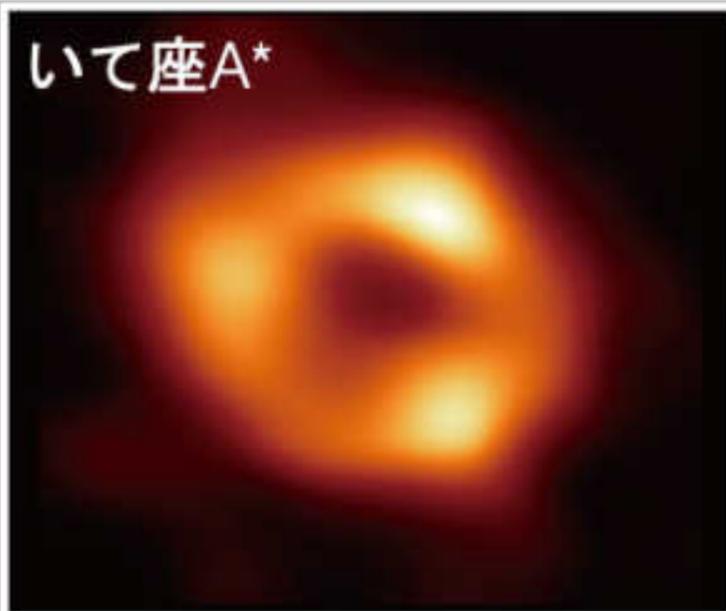


約1600分の1小さい
約2100倍地球に近い

M87巨大ブラックホール



いて座A*



M87巨大ブラックホール



見かけのサイズは同じくらい



4. 今後の展望

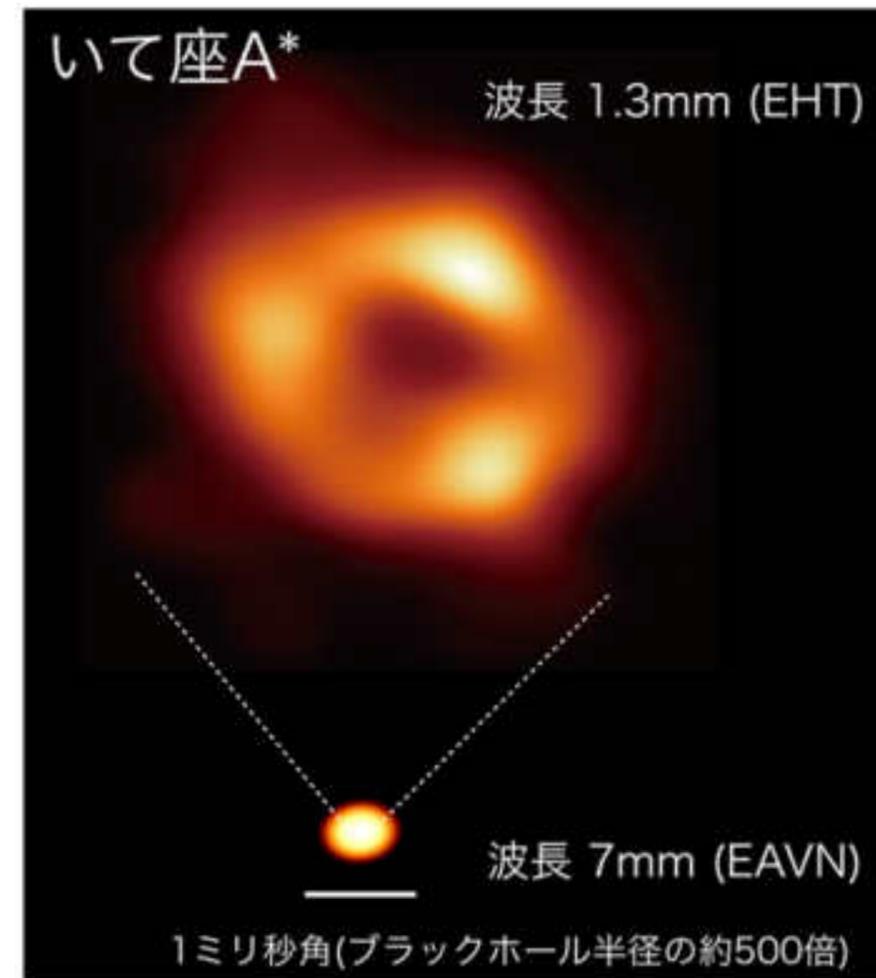
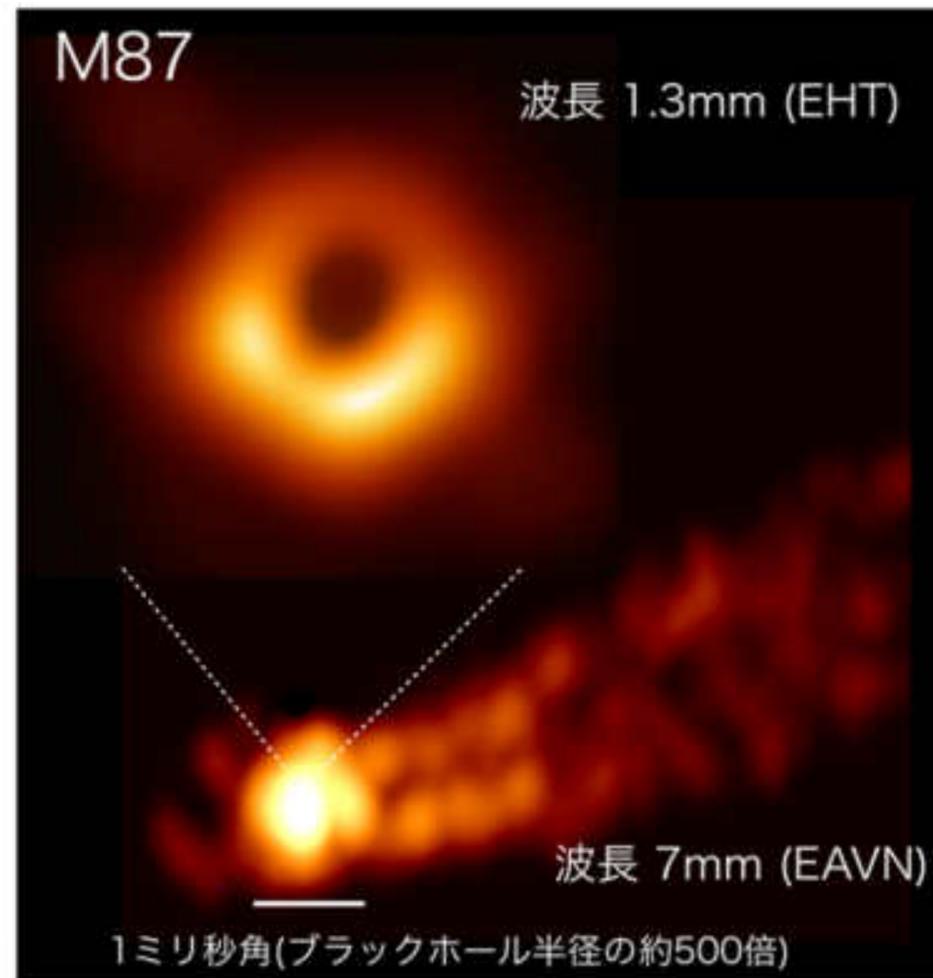
EHT: 次のステップ

- より高感度・高解像度な撮影へ
 - ネットワークの拡張
 - 2018~グリーンランド
 - 2021~フランス、アメリカ
 - 広帯域化（帯域幅2倍）
 - さらに短い波長(0.87 mm)
 - 視力1.5倍
- 静止画から動画へ

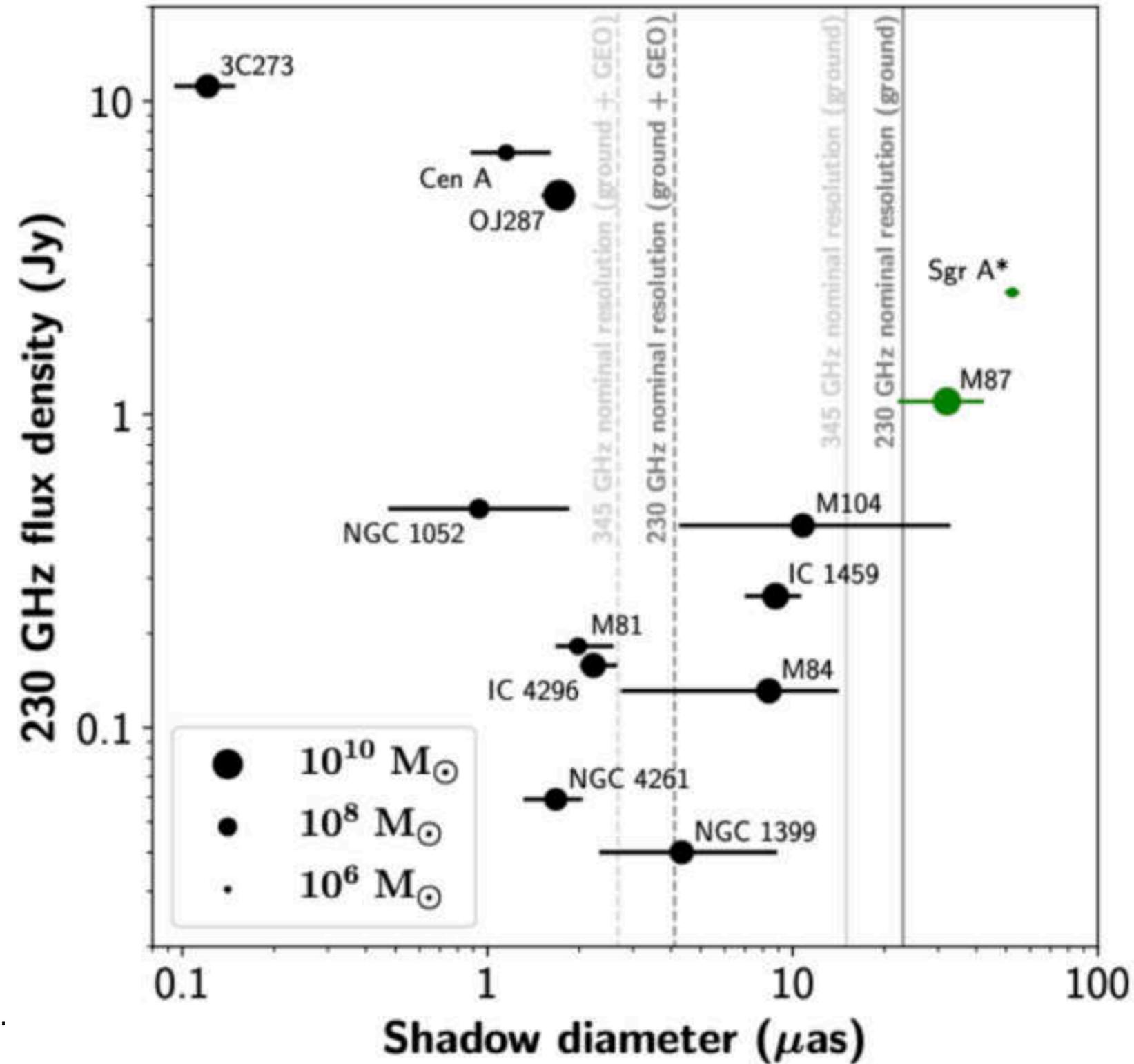


ブラックホール研究 新時代の幕開け

- 高解像度→一般相対性理論の検証
- 高感度→ジェットの存在有無の調査
- 動画→時間変動を捉える（年ごと、日ごと、時間ごと）



ブラックホール撮影候補天体

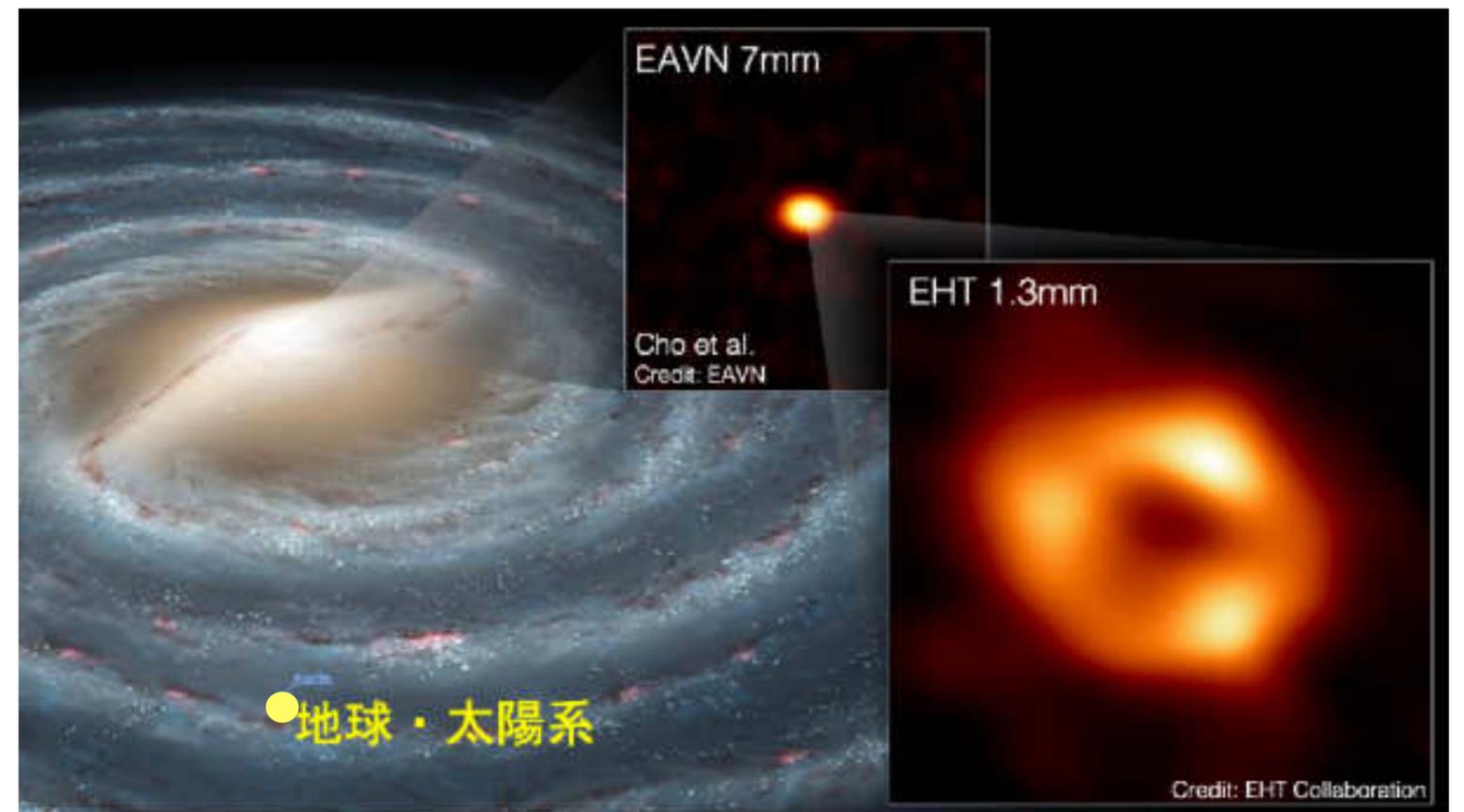


Doeleman+20

まとめ

- EHT2017年の観測から、天の川銀河の中心にも巨大ブラックホールがある視覚的かつ直接的な証拠を得た
- 質量が3桁異なる2つの巨大ブラックホールで撮影に成功した
- 一般相対性理論の検証
- 銀河の成り立ちや恒星・人類・生命の起源にも巨大ブラックホールが絡んでいるかも？

ブラックホールの画像化にもデータサイエンス
(スパースモデリング・クラスタリング等)
が使われている



Follow updates online:



<https://eventhorizontelescope.org>



<https://twitter.com/ehtelelescope>



<https://www.facebook.com/ehtelelescope>



<https://www.instagram.com/ehtelelescope/>



国立天文台水沢VLBI観測所
EHT-Japanウェブサイト

<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/>

- For Astronomers → EHT data productsからいて座A*, M87の画像化用データにアクセス可能
- 画像化パイプラインはM87は公開済み、いて座A*も公開されます
- EHTは独立な検証を歓迎しています

