

VLBI で探る超巨大ブラックホール探査の最前線

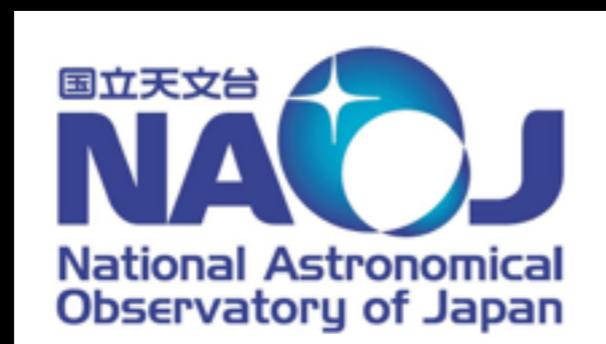
— サブミリ波VLBI編 —

秋山 和徳

大学入試で
地学受験でした

国立天文台 水沢VLBI観測所

→ マサチューセッツ工科大学 (2015年9月~)



ブラックホールに関するあれこれ

- 今年は理論的発見から**100周年**

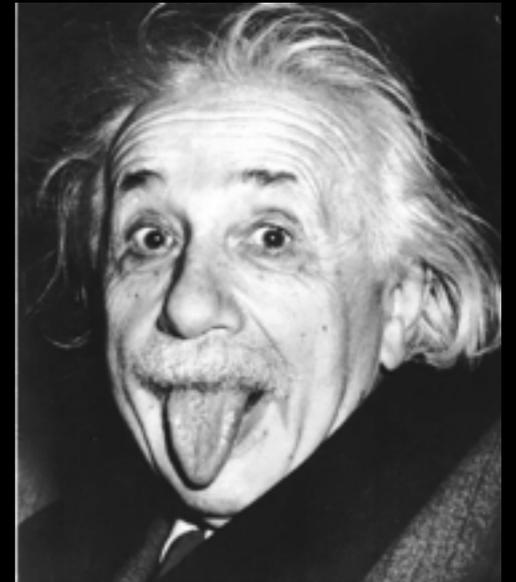
1915年11月 一般相対性理論連の最初の論文を発表 (アインシュタイン)

1915年12月 ブラックホールの理論的発見 (シュバルツシルド)

- ブラックホールの直接撮像例はいまだない。

=> **究極的な存在証明は未だなされていない。**

- 重さの割に**非常にコンパクト**



地球 ~ 1 cm



太陽 ~ 3 km



↑ 3 km

0.06 μ 秒角 @ 10光年

Sgr A* ~ 0.1 AU



↑ 0.1 AU

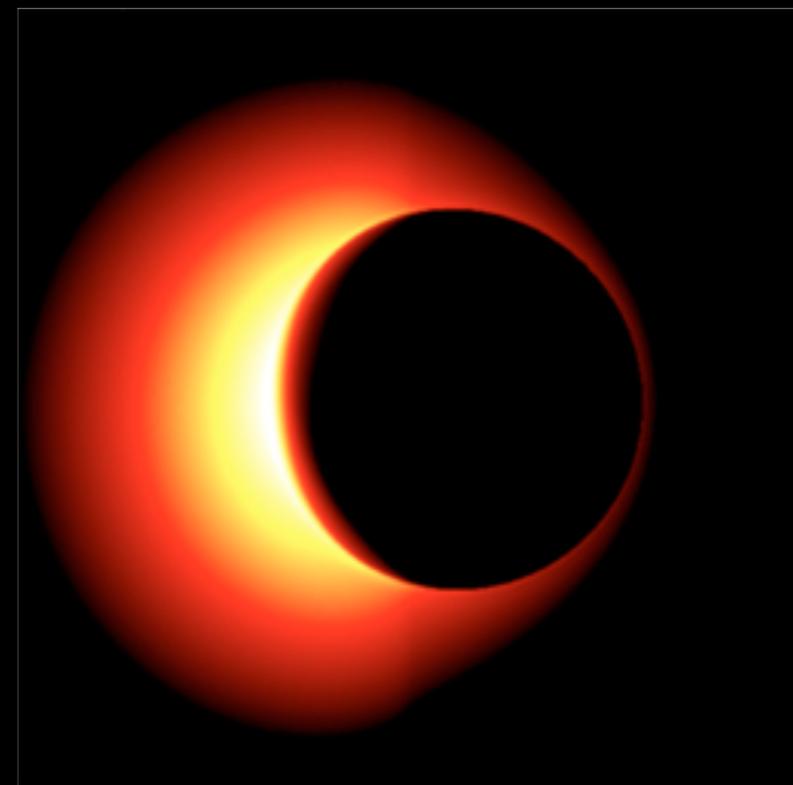
10 μ 秒角 @ 2万4千光年

ブラックホールは”見える”か？

- ブラックホール自身は暗い（はず）
- しかし、ブラックホールに降着するガスがあれば、降着円盤が明るく輝くのでそれを背景に「黒い穴」が見えると期待される。



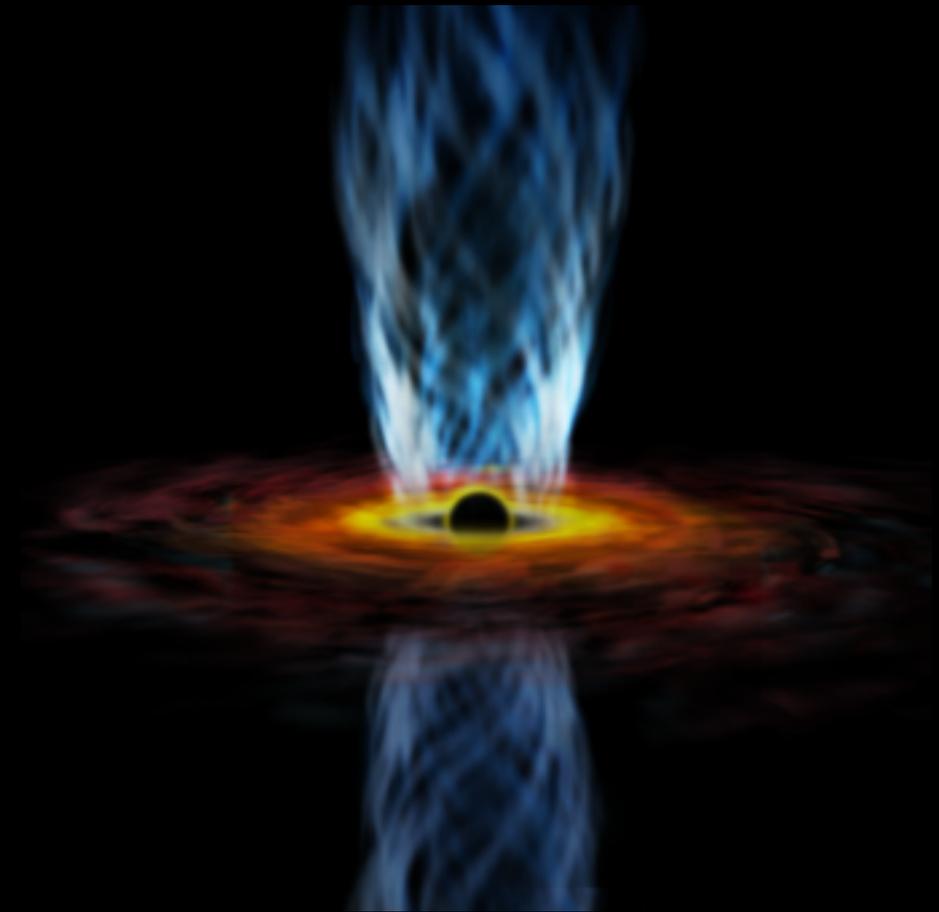
Fukue 1988



Takahashi 2006

ブラックホールシャドウ観測の意義

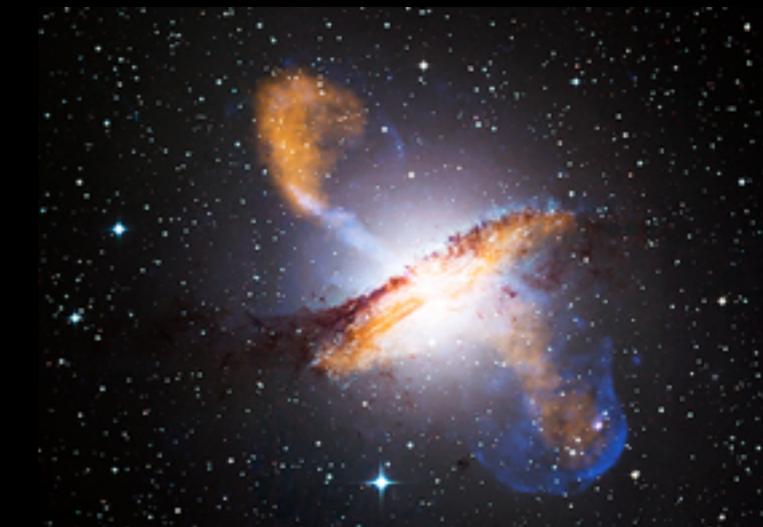
- ブラックホールの存在の究極の証明
(現在のブラックホール天体はすべて「候補」)
- ブラックホール周辺構造の研究
(降着円盤構造、ジェット生成機構の解明)
- 強い重力場中での一般相対論効果の検証



**ブラックホールの直接撮像は
「ブラックホール物理学」への道を開く**

ブラックホールの角半径

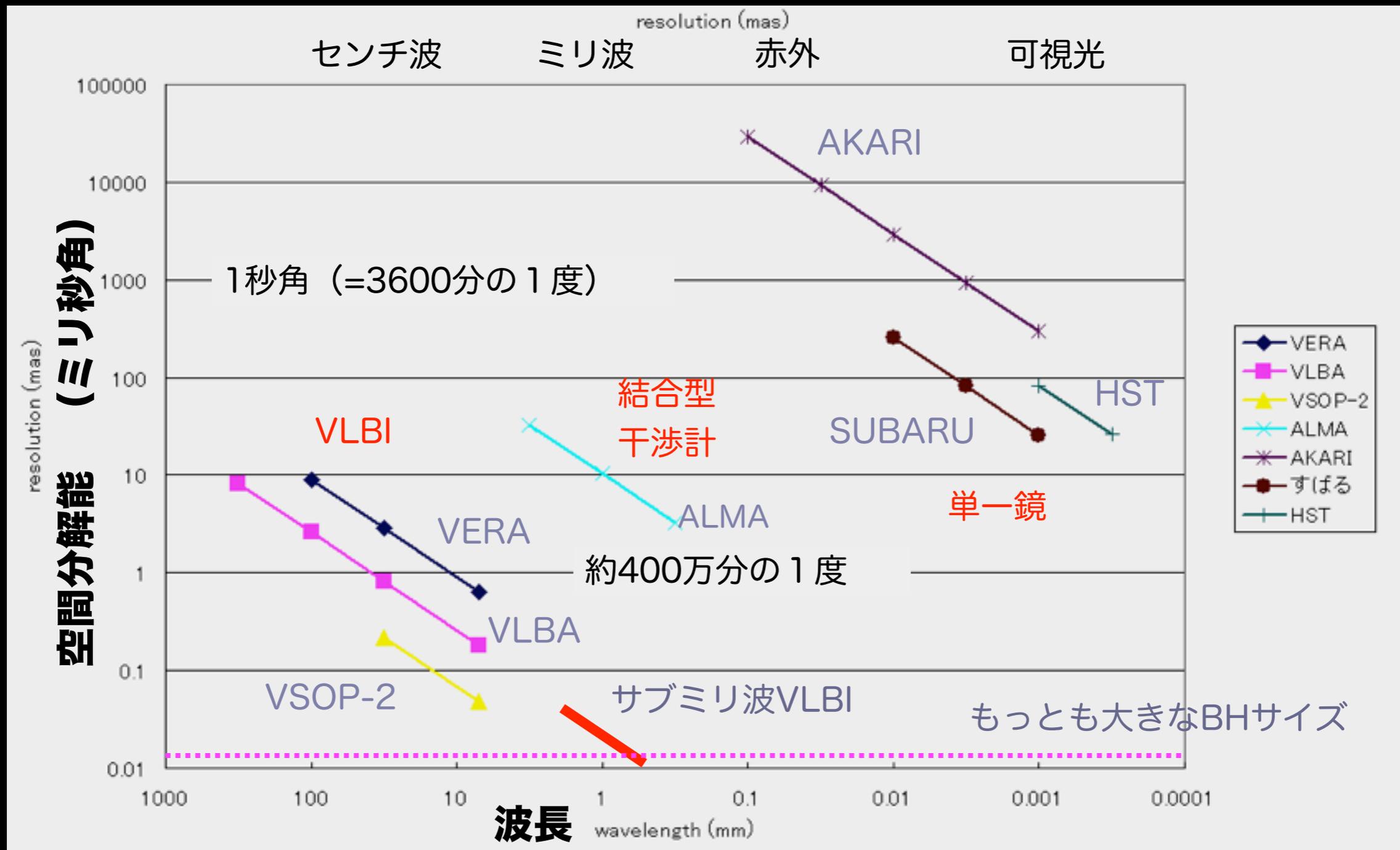
天体	BH質量 (太陽質量)	距離 (Mpc)	R_s (μ 秒角)
Sgr A* (銀河系中心)	4×10^6	0.008	10
M87 (乙女座A)	$3 - 6 \times 10^9$	18	3 - 7
M104 (ソングレロ銀河)	1×10^9	10	2
Cen A (ケンタウルス座A)	5×10^7	4	0.25



シャドウの大きさはBH半径の数倍～5倍程度
これを分解するには数10 μ 秒角レベルの分解能が必要

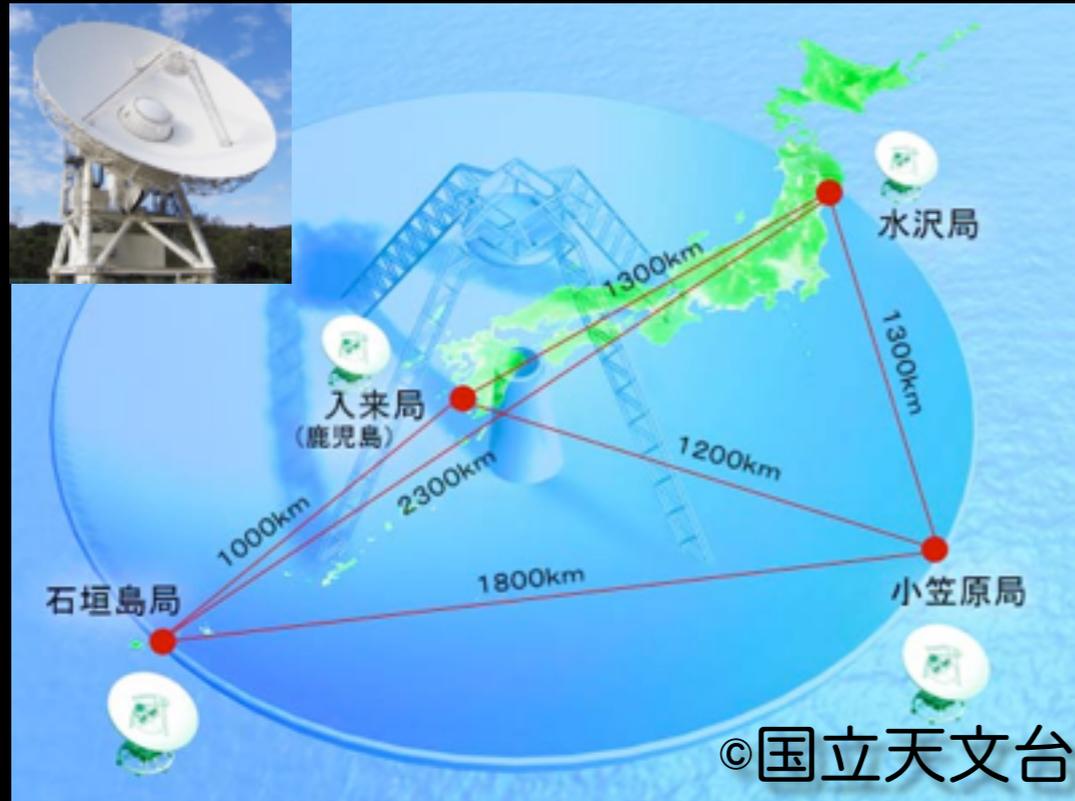
望遠鏡の空間分解能

望遠鏡の分解能： $\theta \sim \lambda / D$



超長基線電波干渉計 (VLBI)が最も高い分解能を達成している

VLBIとは?



例: 日本のVLBI観測装置 (VERA)

超長基線電波干渉計

(Very Long Baseline Interferometry)

各地の電波望遠鏡を繋ぎ、地球サイズの実効口径を持つ巨大電波望遠鏡を実現する技術

あらゆる天文観測装置の中で
圧倒的な解像度を実現

望遠鏡	口径 D	波長 λ	解像度 λ/D
ハッブル宇宙望遠鏡	約 2.4 m	約 550 nm	約 50 m秒角
すばる望遠鏡	約 8 m	約 2.4 μ m	約 60 m秒角
センチ波VLBI	約 9,000 km	約 1 cm	約 300 μ 秒角
ミリ波・サブミリ波VLBI (現在)	約 4,000 km	約 1 mm	約 50 μ 秒角
ミリ波・サブミリ波VLBI (将来)	約 9,000 km	約 1 mm	約 20 μ 秒角

20 マイクロ秒角ってどんな大きさ？

20 マイクロ秒角 = 2億分の1度

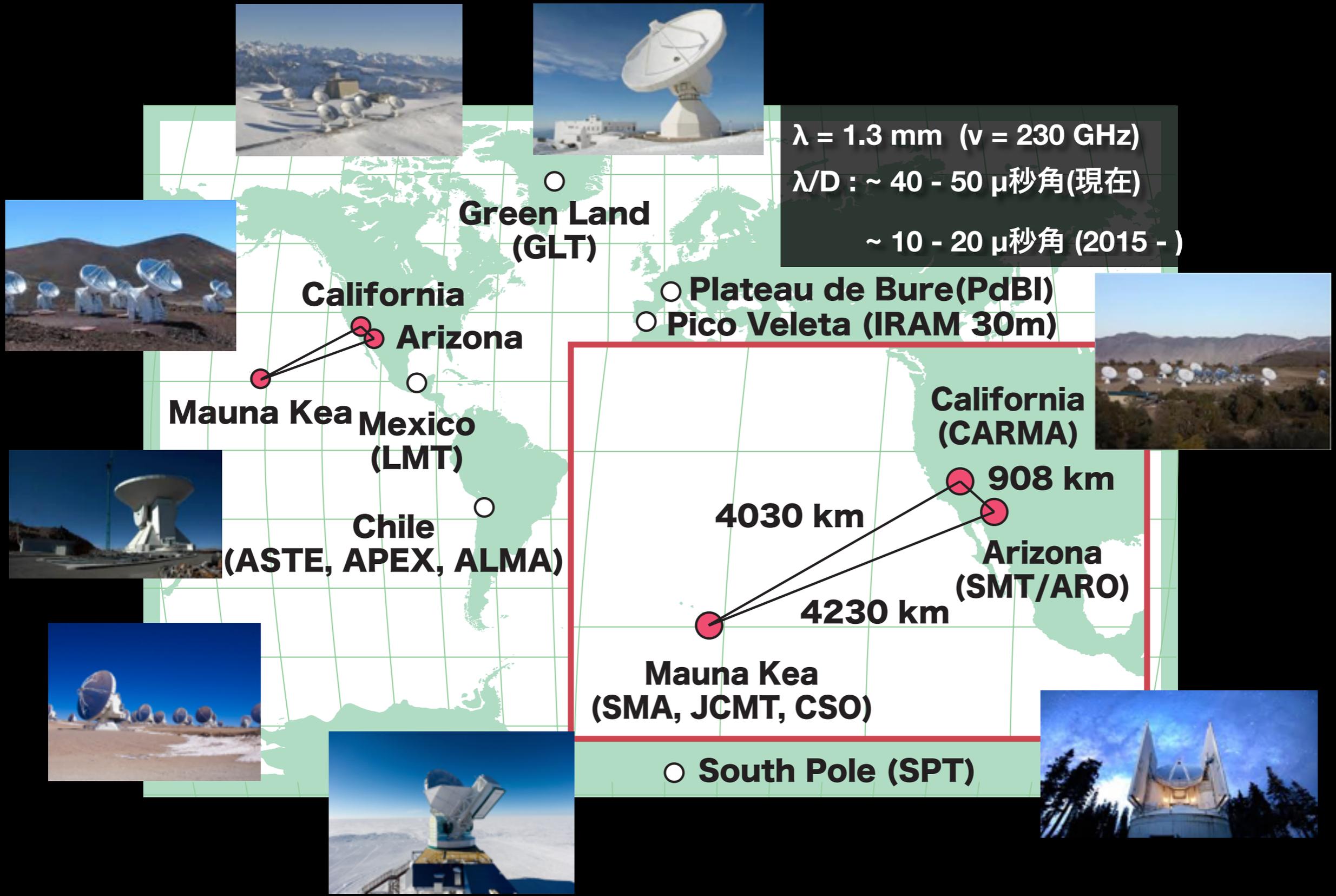
解像度 20 マイクロ秒角 = 人間の視力で300万

地上から月を見上げたときの
月面上にある約4 cmの物の
みかけの大きさ

4 cm

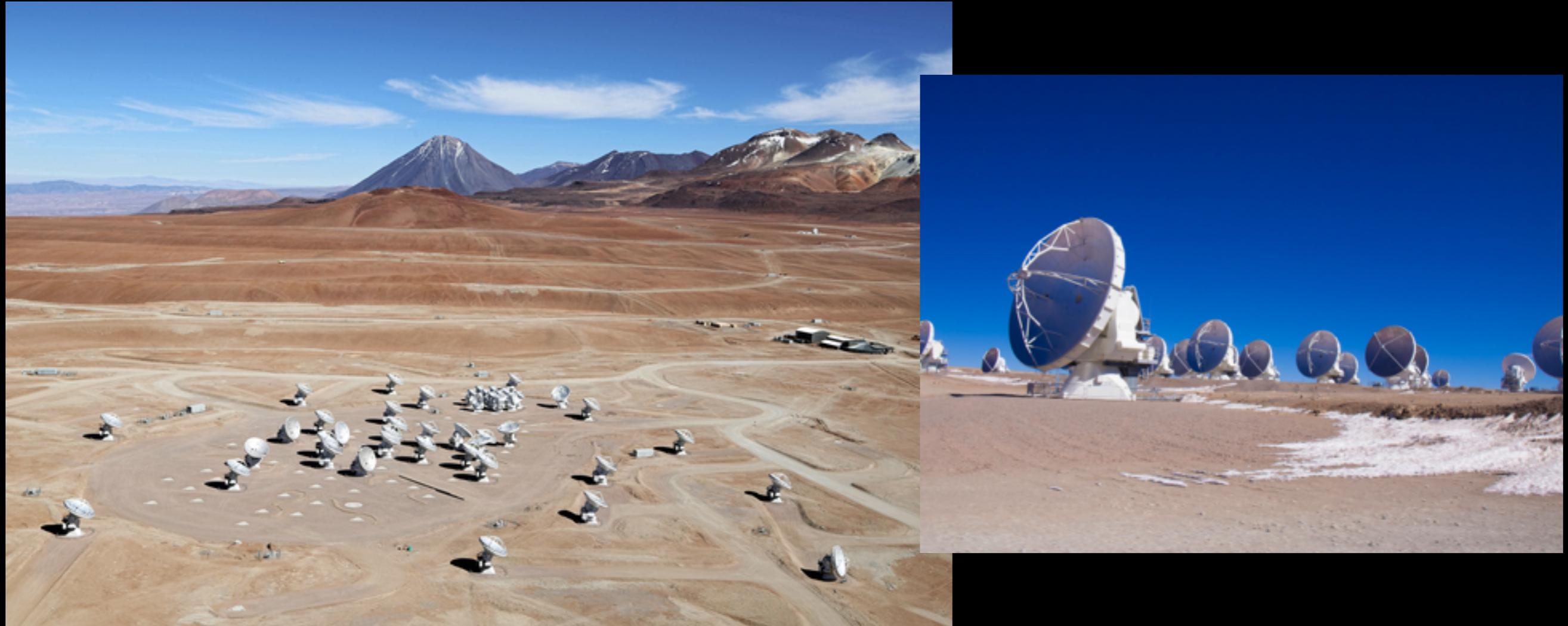


国際サブミリ波VLBI観測網 Event Horizon Telescope (EHT)



ALMA

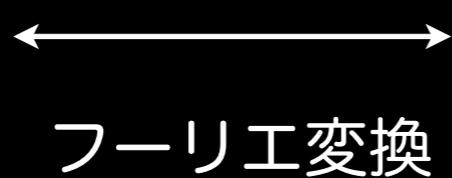
- Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array
(スペイン語で「魂」という意味)
- 日米欧の国際協力で66台以上のミリ波サブミリ波干渉計を建設



ALMAでのVLBIのテスト観測もすでに始まっている

EHTのこれまでの歩みと私

天体画像 $I(x,y)$



複素ビジビリティ $V(u,v)$

$$V(u,v) = A(u,v) \exp(-i\phi(u,v))$$

ビジビリティ振幅

ビジビリティ位相

ビジビリティ振幅の測定

2007年の観測

Sgr A*

(Doeleman et al. 2008, Nature)

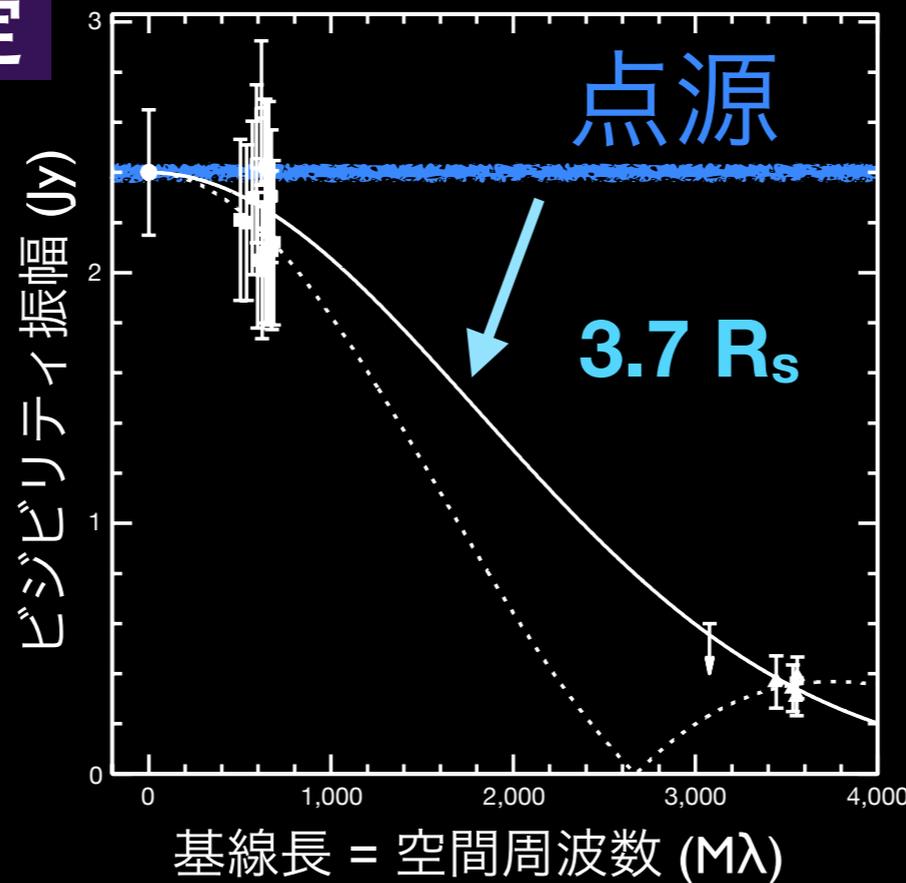
2009年の観測

Sgr A*

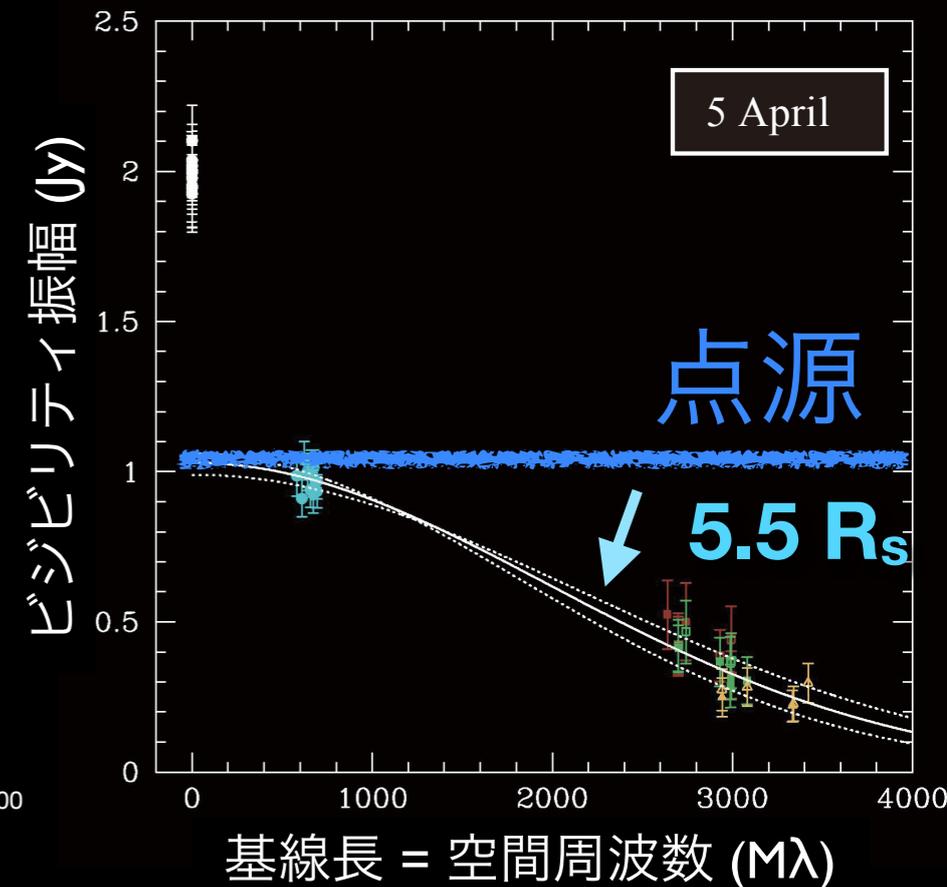
(Fish et al. 2011, ApJL)

M87

(Doeleman et al. 2012, Science)



(Doeleman et al. 2008, Nature)



(Doeleman et al. 2012, Science)

EHTのこれまでの歩みと私

天体画像 $I(x,y)$

←→
フーリエ変換

複素ビジビリティ $V(u,v)$

$$V(u,v) = A(u,v) \exp(-i\phi(u,v))$$

ビジビリティ振幅

ビジビリティ位相

ビジビリティ振幅の測定

2007年の観測

Sgr A*

(Doeleman et al. 2008, Nature)

2009年の観測

Sgr A*

(Fish et al. 2011, ApJL)

M87

(Doeleman et al. 2012, Science)

ビジビリティ振幅+クロージャ位相の測定

2009年の観測

1921-293

(Lu et al. 2012, ApJL)

2011年の観測 (ここで秋山修士1年)

3C 279

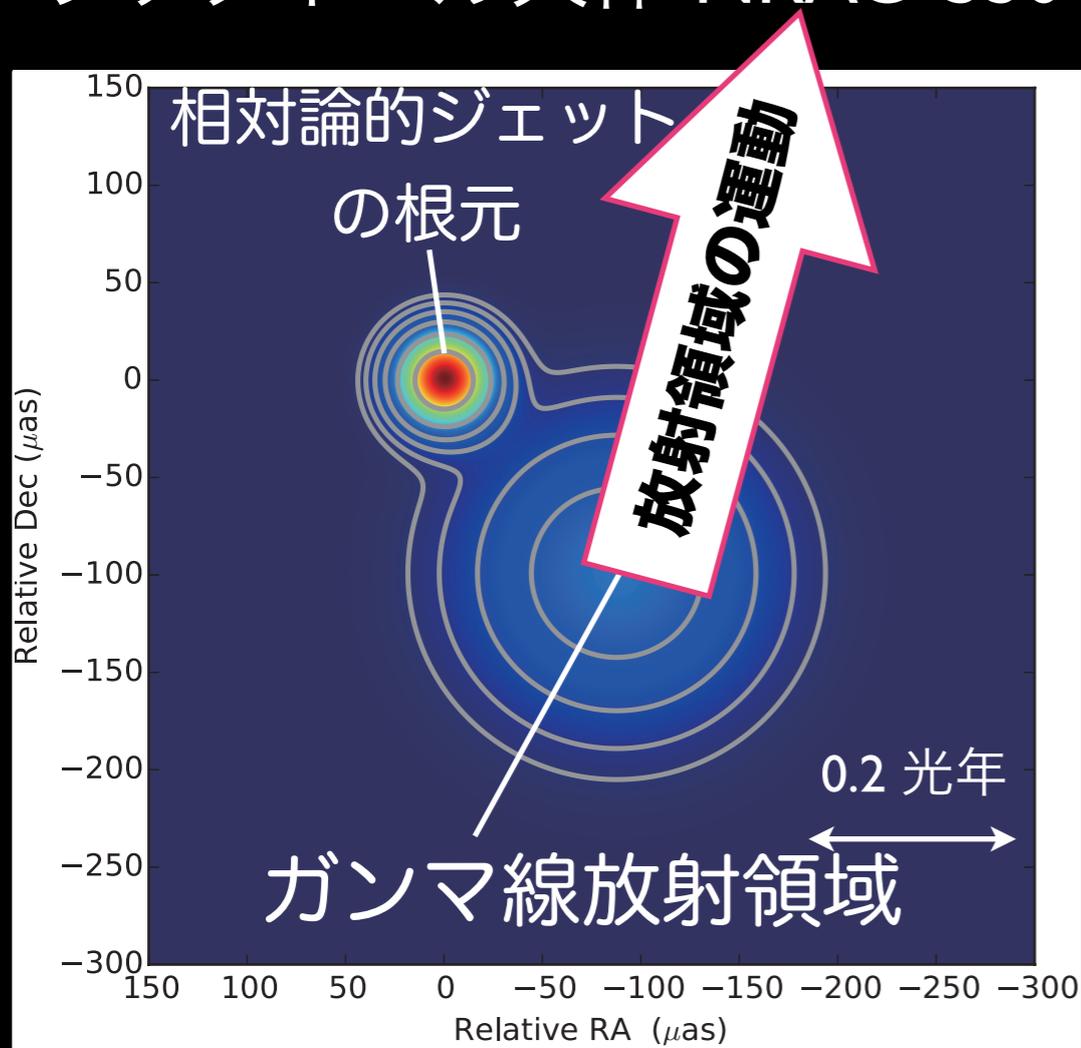
(Lu, Fish & KA et al. 2013, ApJ)

NRAO 530

(KA, Lu & Fish+2015)

EHTのこれまでの歩みと私

ブラックホール天体 NRAO 530



日本経済新聞

銀河でガスジェット曲がる

地球から数十億光年離れた銀河で、超巨大ブラックホールから噴出するガスが、中心部から大きく曲がっていることが、ちりなどが落ち込むを東京大などのチームが電波望遠鏡の観測で見つけた。ブラックホールの

左側のブラックホールから噴出し、曲がるジェットの根元部分の観測図。右側の挿入にあるのは地球からの見え方 (国立天文台・AND YOU社提供)

基本的な性質を解明する手がかりになるといわれる。銀河の多くは中心部に巨大なブラックホールがあり、ちりなどが落ち込む。電波望遠鏡の観測で見つけた。ブラックホールの

東大観測 ブラックホールから噴出

西部にある5台の電波望遠鏡をつないで地球から約53億光年と約73億光年離れた2つの銀河の中心にあるブラックホールを観測。その結果、2つのブラックホールともジェットが根元から「く」の字のように曲がっていた。複数の望遠鏡をつなぐ技術は、天体をより細かく見るのに有効で、今回の観測は月面に置いた約10センチ四方の物を見分けることができる精度。

朝日新聞

53億光年の孤独の先に

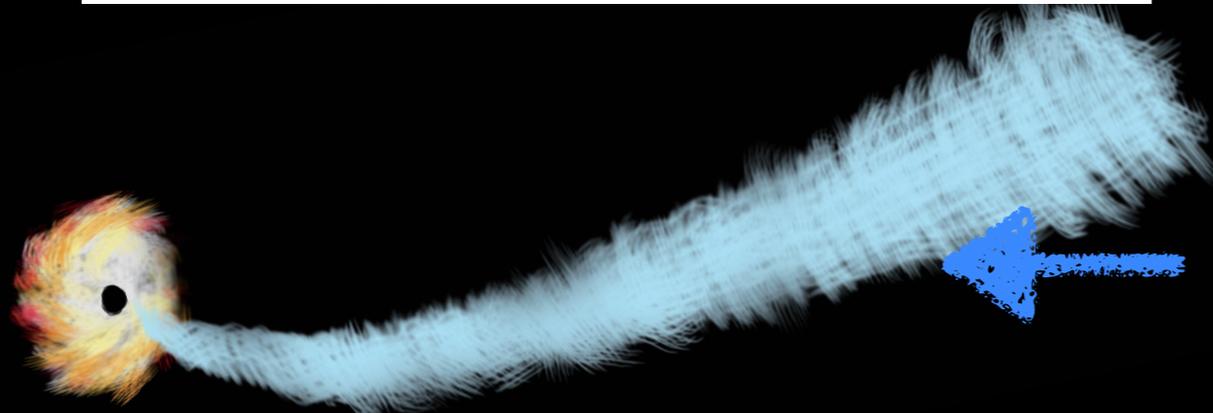
ブラックホールのガス撮影

日本天文学会 (岡村定矩理事長) は18日、地球から約53億光年と約73億光年にある2つの超巨大ブラックホールから噴き出すジェット (ガス) の根元部分について、過去最高の解像度で撮影することに東大や国立天文台の研究者チームが成功した、と発表した。

成功したのは東大大学院生の秋山和徳さんや国立天文台の本間希樹准教授らが参加した国際チーム。複数の電波望遠鏡をつないで観測する「超長基線電波干渉計 (VLBI)」という技術を使い、観測波長を従来の1センチ単位から1・3センチに短くして

撮影。VLBIで天体画像をこれほど高い解像度で撮影できたのは世界で2例目という。チームは「2015年までにブラックホールそのものの撮影を目指したい」としている。画像は11年4月にアメリカ・ハワイ州など3カ所で撮影された。画像によって、ブラックホールから噴出するジェットが根元部分で大きく曲がっていることが分かった。研究チームは「なぜ曲がるのかよく分かっていないが、ブラックホールからガスが噴出するメカニズムの解明への糸口になることが期待される」と説明している。

今回の成果は、19日に大分市で始まる同学会秋季年会で発表される。(伊勢悠)



EHTのこれまでの歩みと私

天体画像 $I(x,y)$

←→
フーリエ変換

複素ビジビリティ $V(u,v)$

$$V(u,v) = A(u,v) \exp(-i\phi(u,v))$$

ビジビリティ振幅

ビジビリティ位相

ビジビリティ振幅の測定

2007年の観測

Sgr A*

(Doeleman et al. 2008, Nature)

2009年の観測

Sgr A*

(Fish et al. 2011, ApJL)

M87

(Doeleman et al. 2012, Science)

ビジビリティ振幅+クロージャ位相の測定

2009年の観測

1921-293

(Lu et al. 2012, ApJL)

2011年の観測 (ここで秋山修士1年)

3C 279

(Lu, Fish & KA et al. 2013, ApJ)

NRAO 530

(KA, Lu & Fish+2015)

2012年の観測

M87 (2大天体を通して初)

(KA, Lu & Fish et al. 2015, ApJ in press.)

ブラックホール写真の予想図 (例: M87)

アプローチ
ジェット卓越型

(Broderick & Loeb 2009)

カウンター

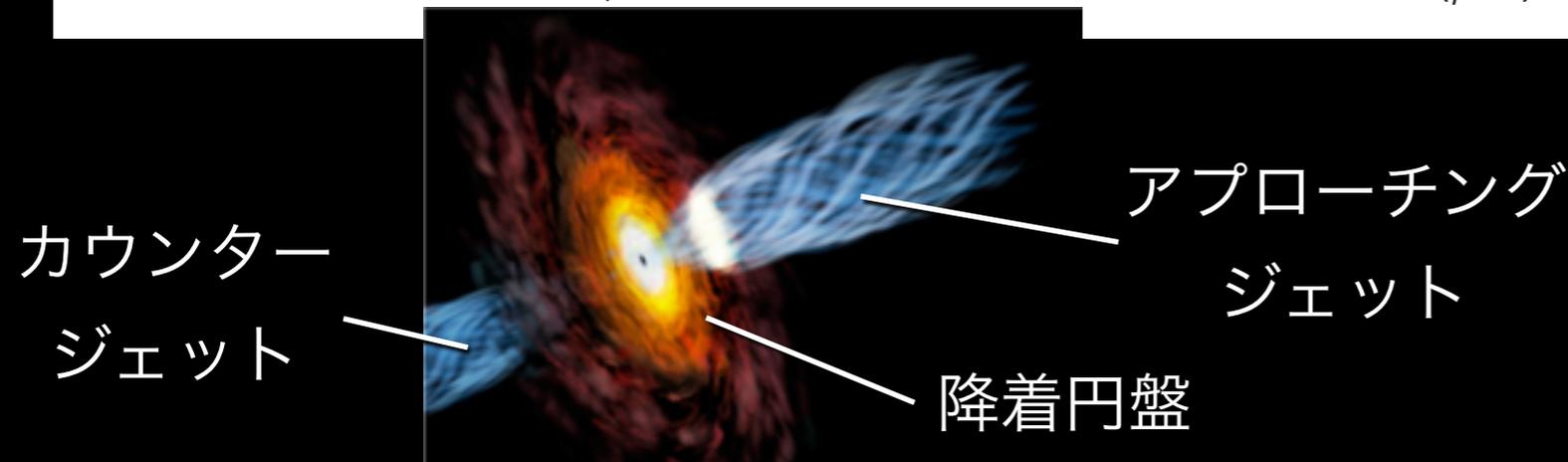
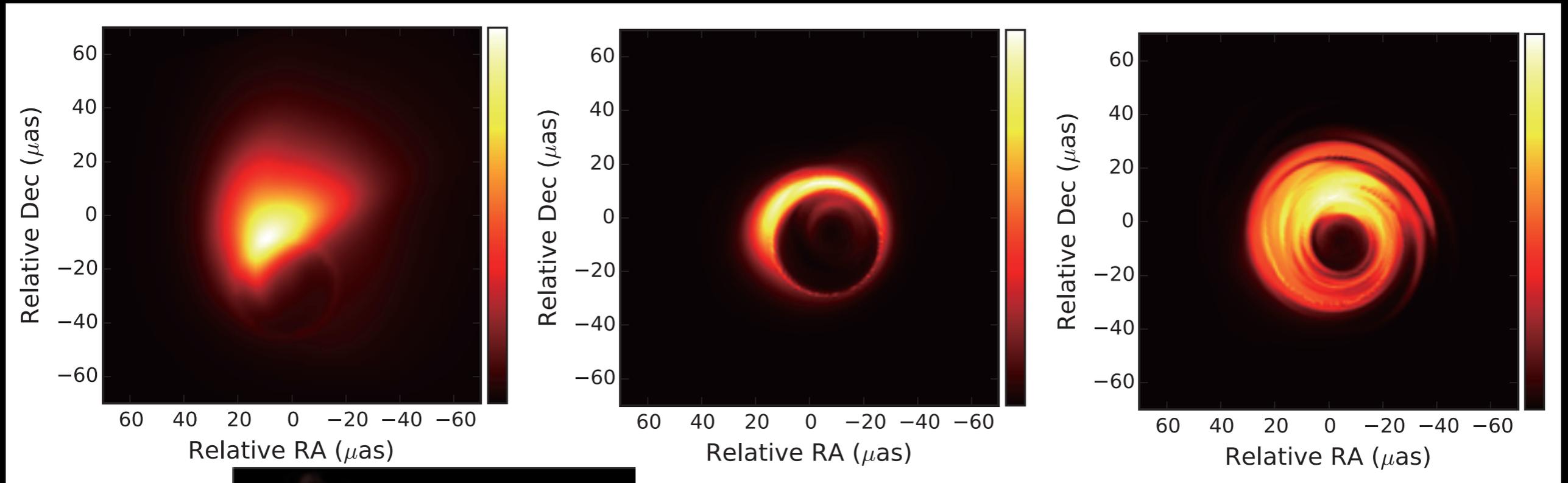
ジェット卓越型

(Dexter et al. 2012)

降着円盤

卓越型

(Dexter et al. 2012)



KA, lu & Fish et al. 2015, ApJ, in press.



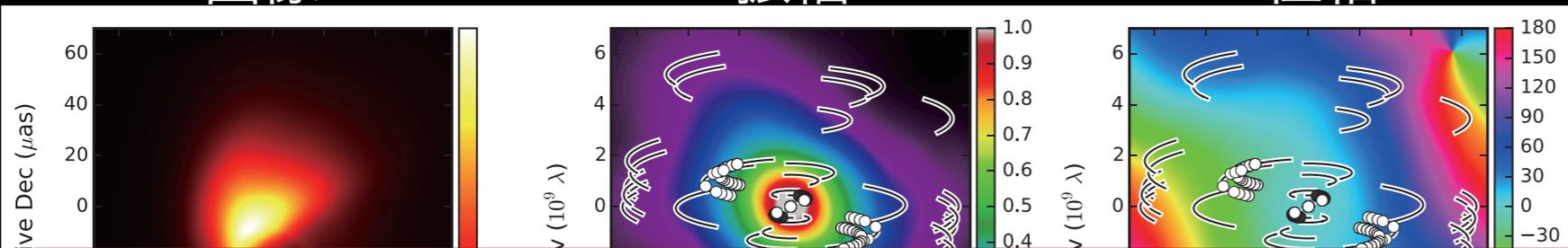
©水木プロ

天体モデルと複素visibilityの分布 (例: M87)

画像

振幅

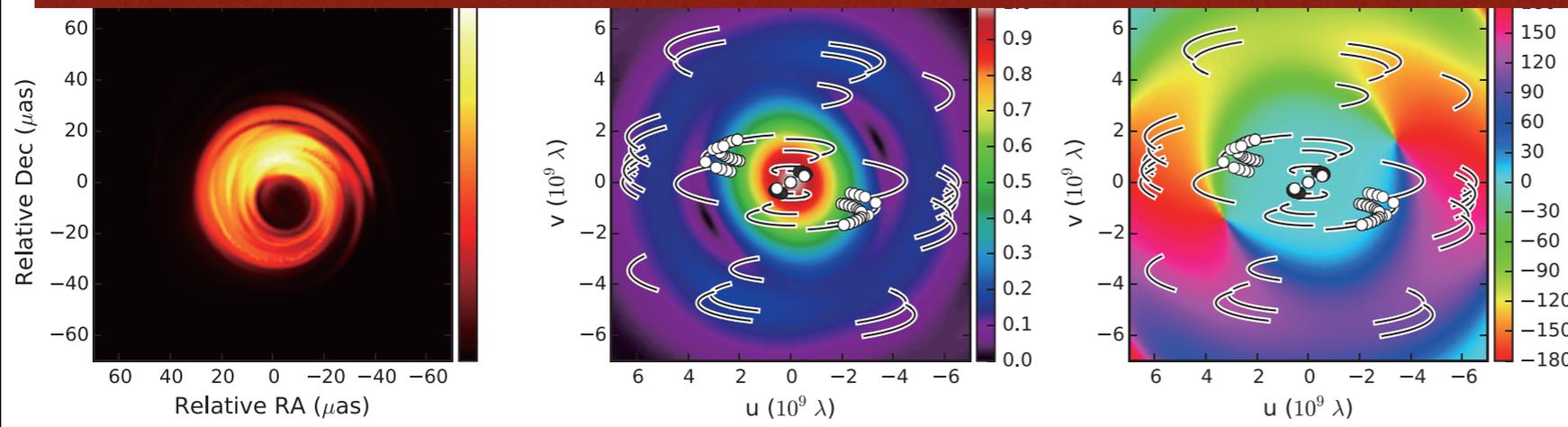
位相



- 既存の観測データとモデルは振幅・位相ともによく一致
=> 悪く言えばモデルの縮退が解けていない。

- 2015年以後のデータでは少なくともvisibility平面上では顕著な差
=> **visibility平面上の情報をいかにイメージングで生かせるかが鍵**

KA, Lu & Fish et al. 2015, ApJ, in press.



疎性モデリング：最新の統計数理手法による高品質イメージング

脳科学・生命科学分野で使われる

統計数理の最新手法を輸入

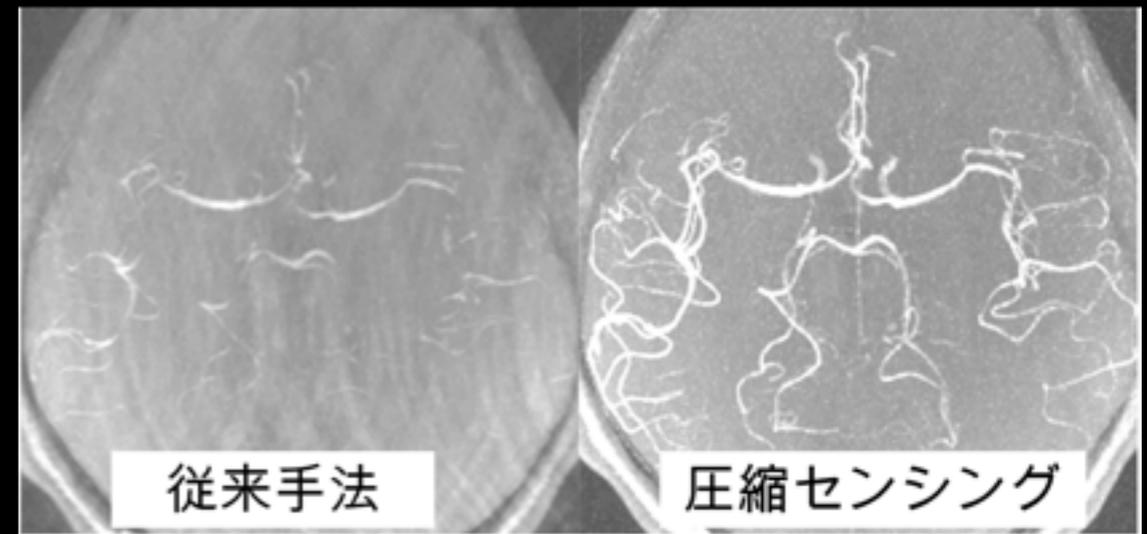
(統計数理研究所・東大脳科学のグループ

などとのコラボ)

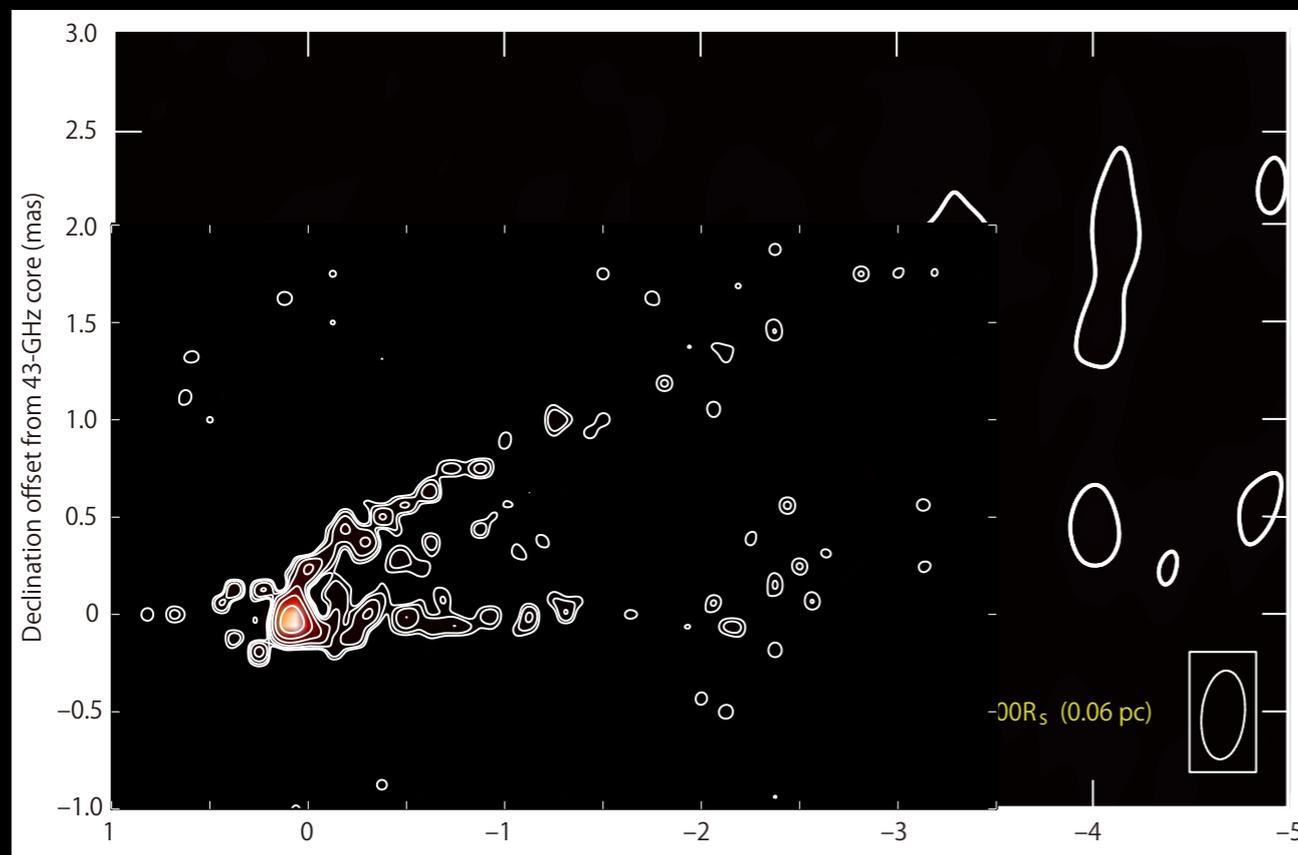
新学術領域研究

「スパースモデリングによる高次元データ駆動科学の創成」

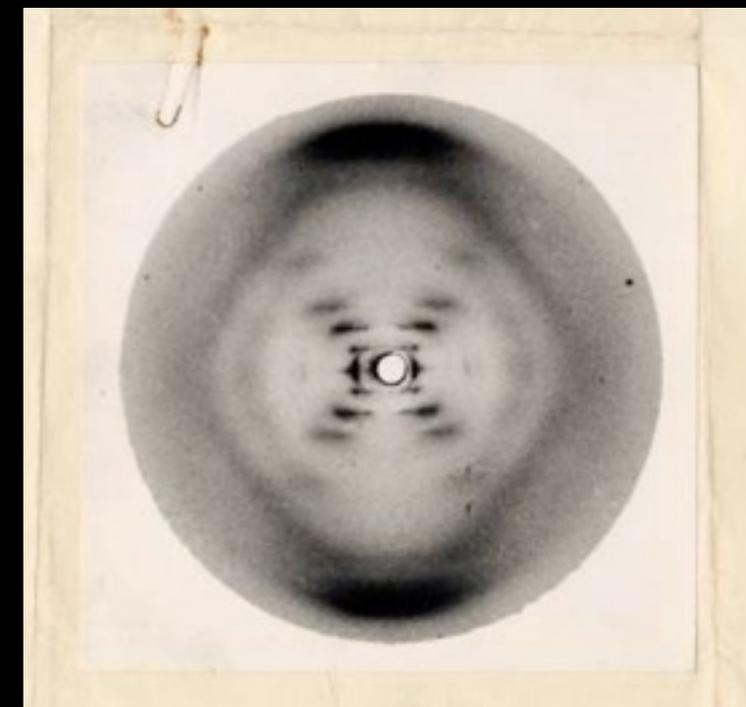
<http://sparse-modeling.jp/>



脳血管のMRI画像



実データへの応用例



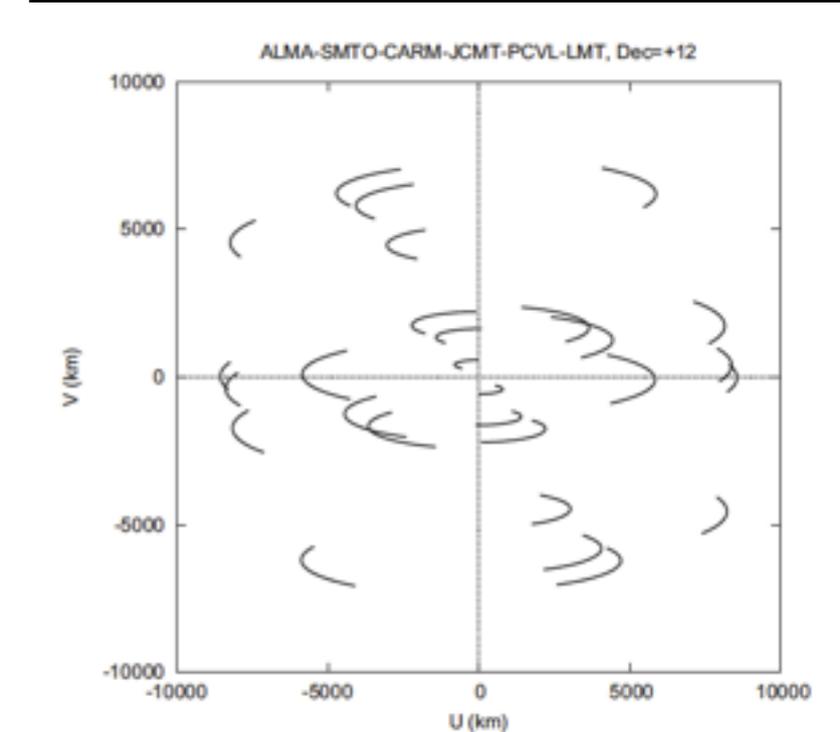
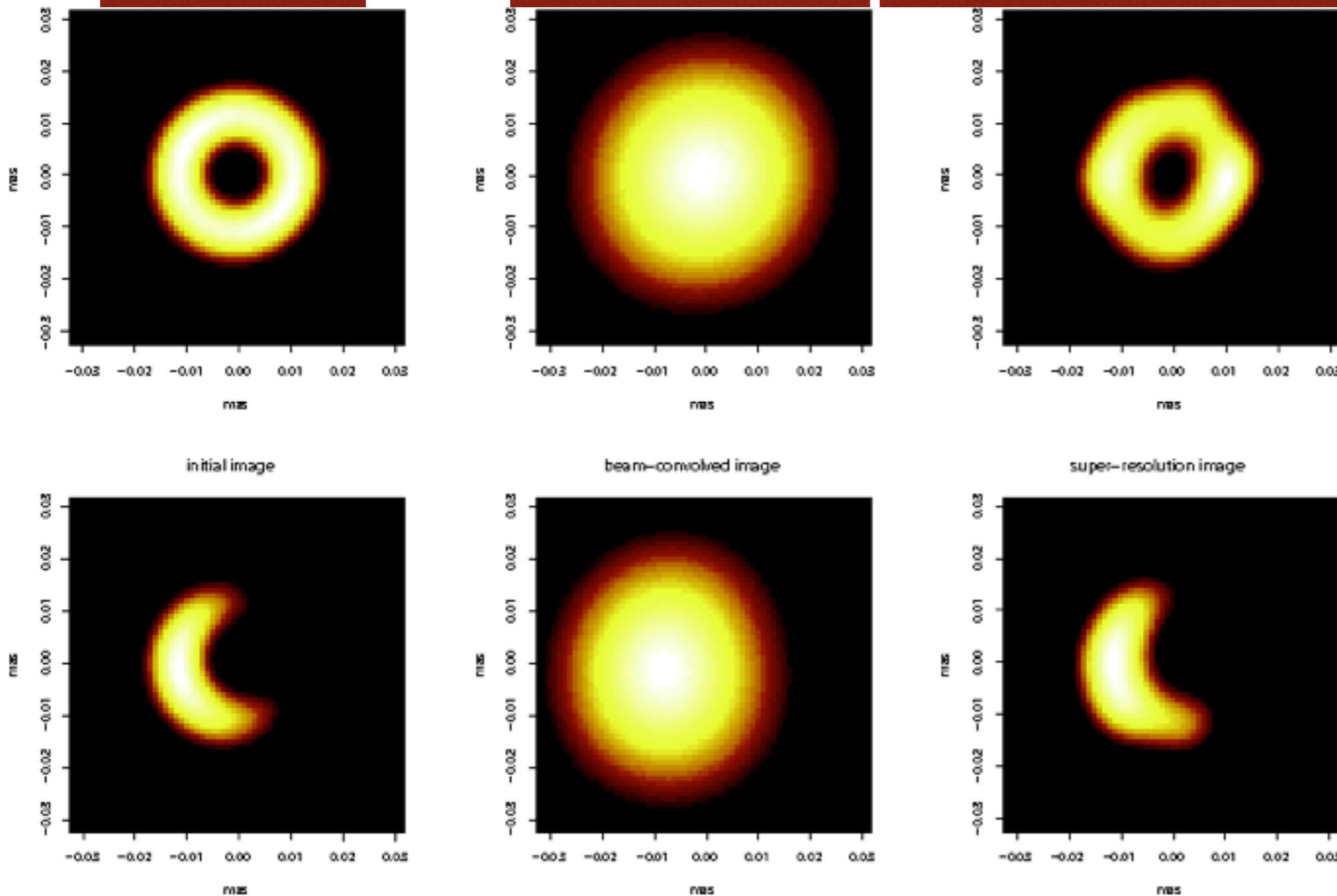
DNA X線回折

ブラックホール撮像の観測シュミレーション (M87)

モデル

CLEAN

疎性モデリングによる復元



EHT (2015)のuv-coverage

Black Holeの穴のサイズが小さい

ワーストケースでも絵を復元できる

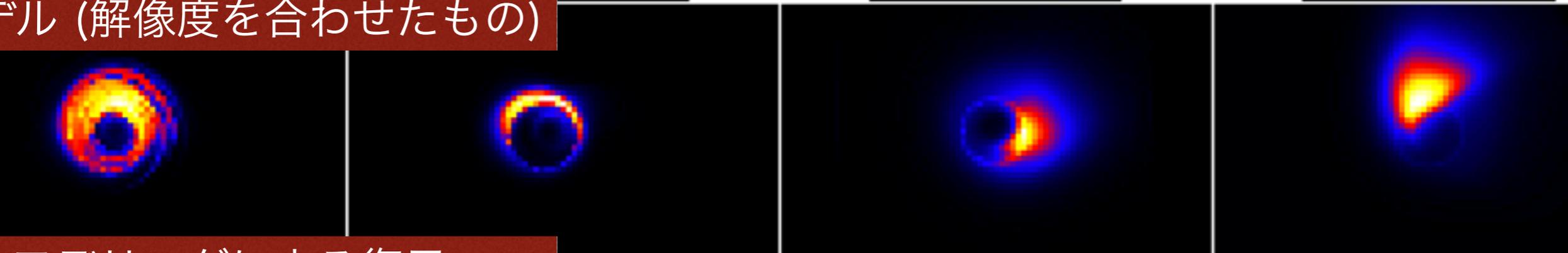
Honma, **KA**, Uemura & Ikeda 2014, PASJ

ブラックホール撮像の観測シュミレーション (M87)

モデル



モデル (解像度を合わせたもの)



疎性モデリングによる復元



Tazaki, **KA**, Ikeda & Honma+

2015年以後の観測ではブラックホールシャドウがあれば捉えられる。

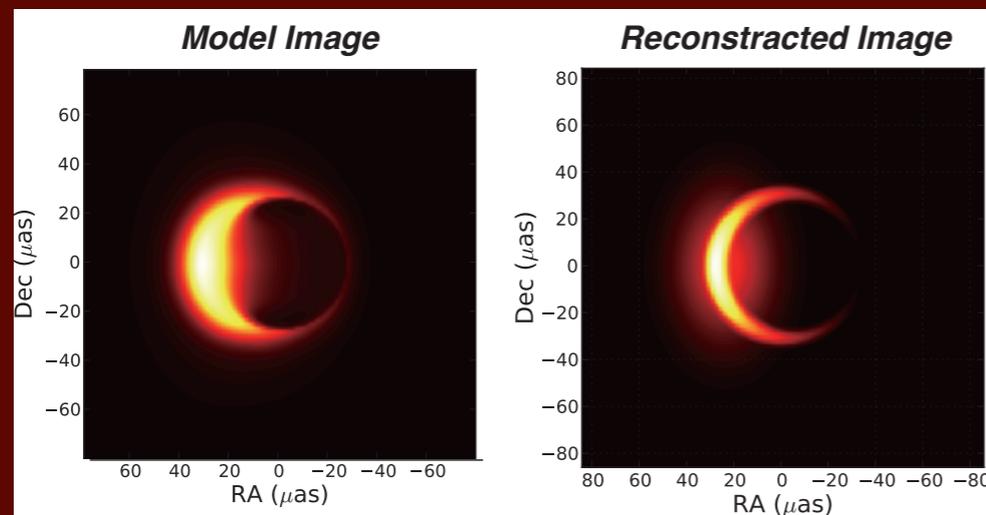
まとめ

2015-2016年：ALMA望遠鏡などがEHTへの参加

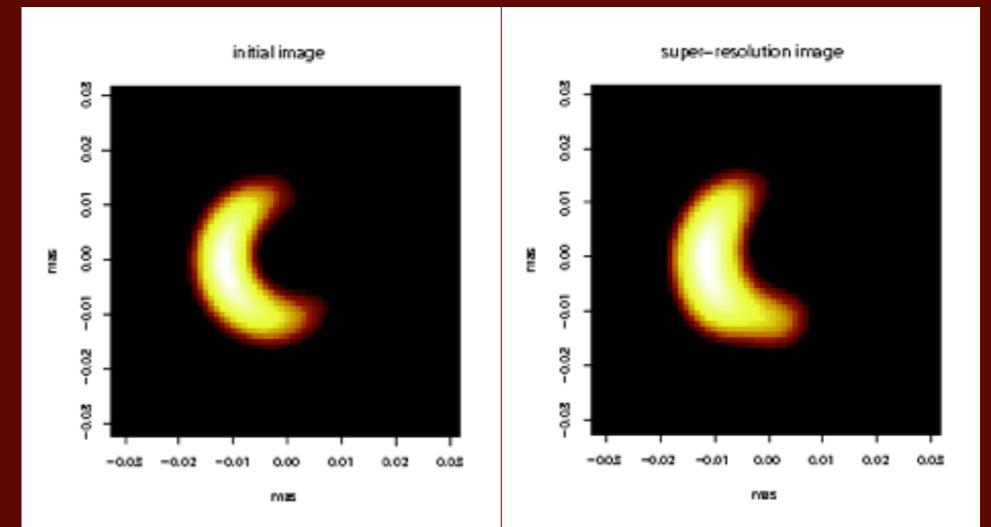
ブラックホール撮像に必要なデータが揃う

+

日本のグループが開発してきた天体画像のイメージング手法



交換モンテカルロ法



疎性モデリング

||

ブラックホールの事象の地平面の直接撮像が実現？