

『一般相対論の直接検証:ブラックホール・シャドーの直接撮像と重力波の検出』

一般相対論検証に向けての

# 電波観測と赤外観測の現状と将来計画

三好 真(国立天文台) 25分+5分

古屋玲 (NAOJ), イシツカ ホセ(ペルーIGP), 朝木義晴, 加藤成晃, 坪井昌人、  
竹内央(ISAS), 春日隆(法政大学), 冨松彰(名古屋大学),  
高橋真聡(愛知教育大学), 江里口良治(東京大学), 小出真路(熊本大学),  
高橋芳太(理化学研究所), 岡朋治(慶應大学), 新沼浩太郎、川口則幸(NAOJ),  
中島潤一, 入交芳久, 小山泰弘, 関戸衛, 市川隆一, 氏原秀樹(NICT)  
+協力・大師堂経明(早稲田)、中田好一(東大)、出口修至(NAOJ), 福江純(大阪  
教育大) & 井上允・浅田圭一(ASIAA)

20世紀末に

ブラックホールの存在  
が確認された。

M87 (おとめ座銀河団の盟主)

NGC4258 (りょうけん座の銀河)

SgrA\* (我々の銀河系中心)

20世紀末に  
ブラックホールの存在  
が確認された。

可視光観測

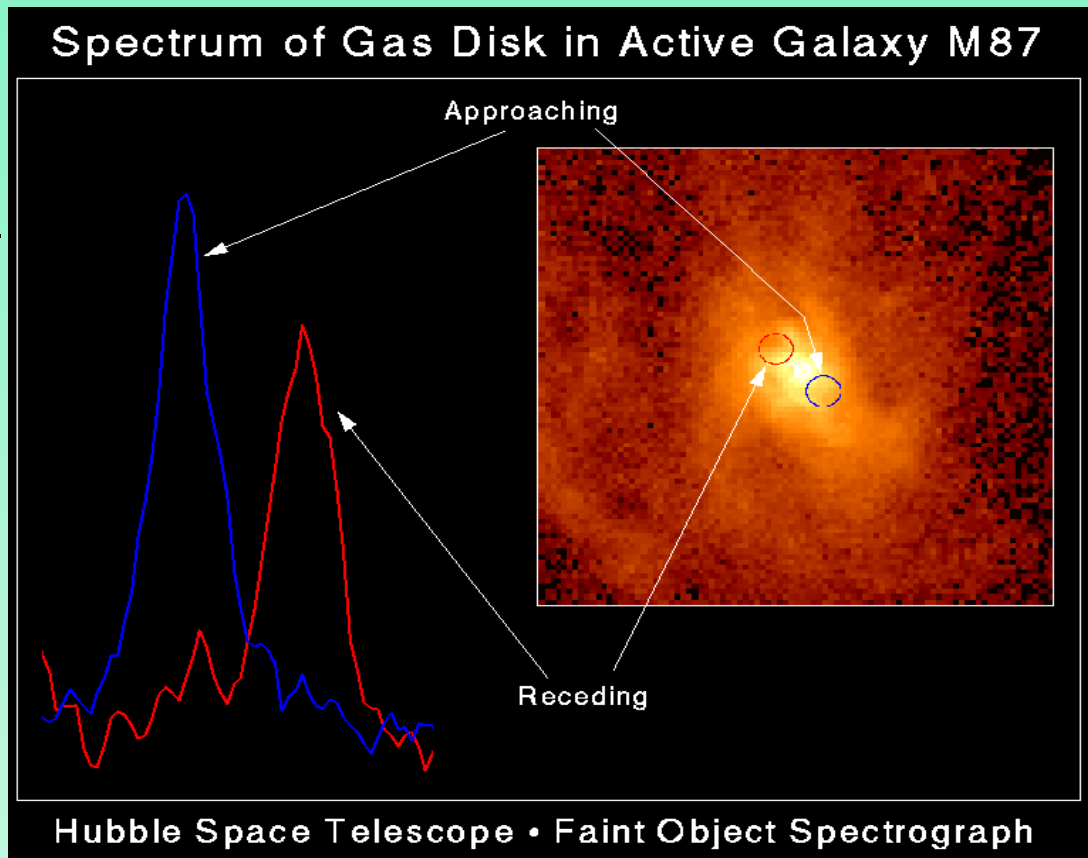
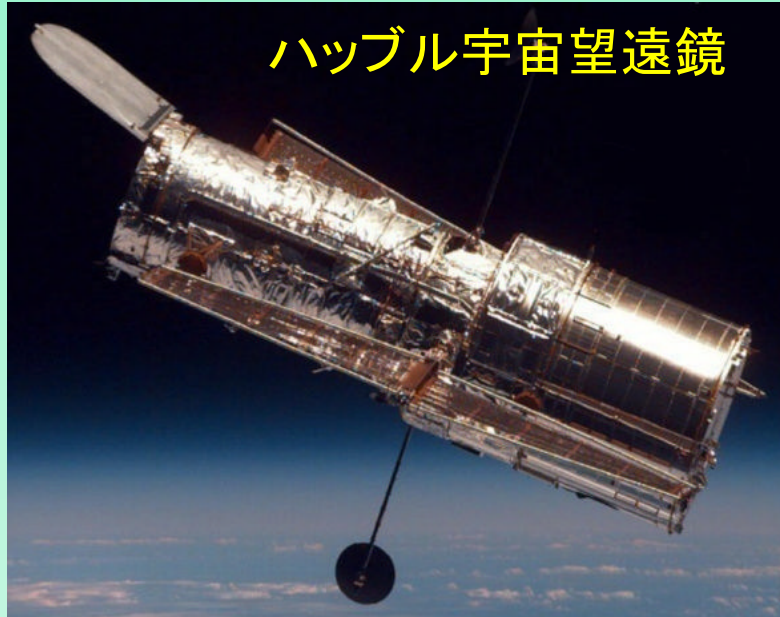
M87 (おとめ座銀河団の盟主)

NGC4258 (りょうけん座の銀河)

SgrA\* (我々の銀河系中心)

# M87

(おとめ座銀河団の盟主)



ハッブル宇宙望遠鏡はおとめ座にあるM87を観測、銀河の中心部分のガスの速度を測定、そのドップラー効果から周辺のガスの運動を調べ、太陽質量の約30億倍の巨大ブラックホールがあることを突き止めた。M87は電波や光の観測から、中心からジェットを噴出していることがわかっている。なお、ハッブル宇宙望遠鏡は数十個の銀河を観測、その巨大ブラックホールの質量を測定している。

20世紀末に

ブラックホールの存在  
が確認された。

M87 (おとめ座銀河団の盟主)

電波観測

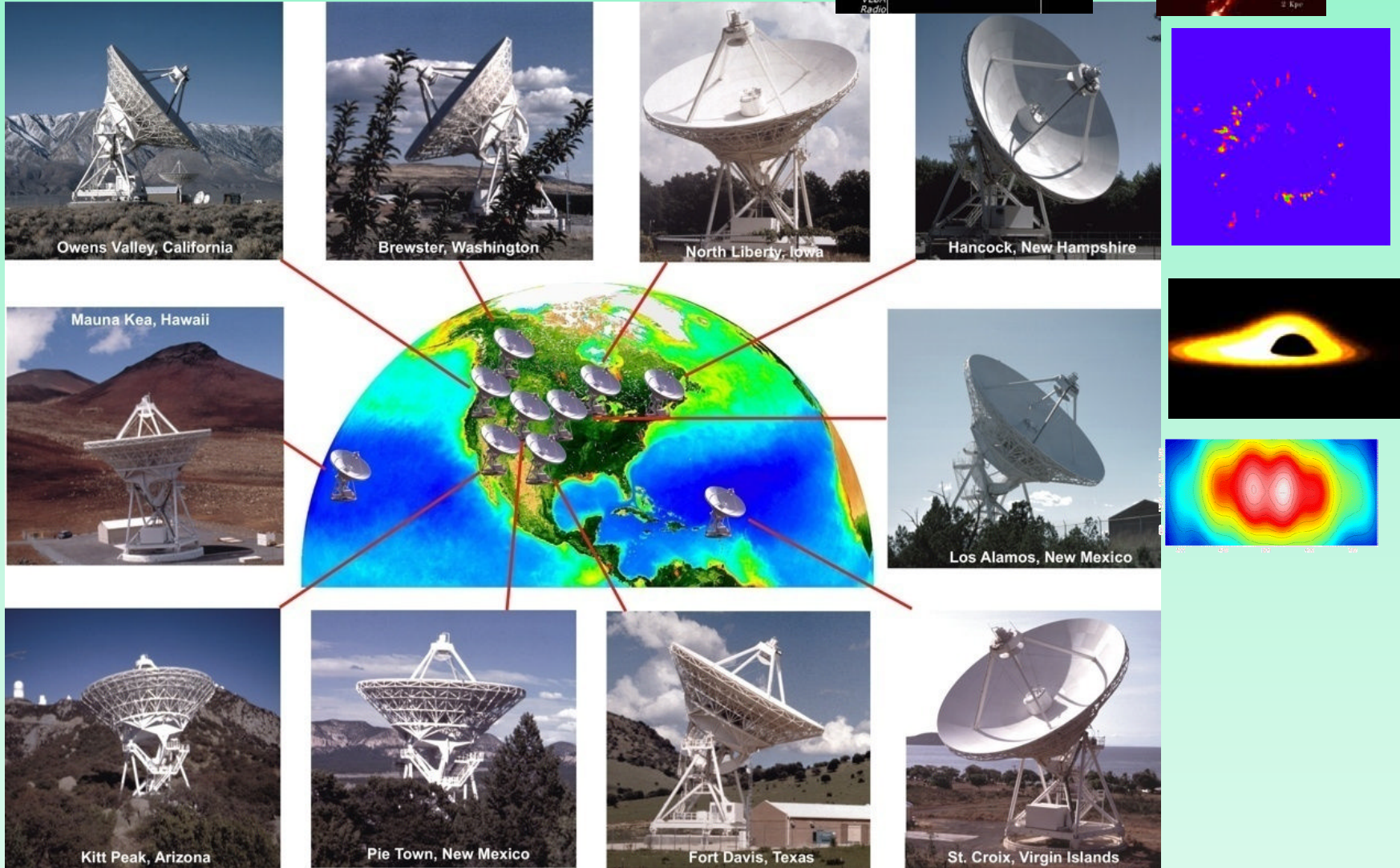
NGC4258 (りょうけん座の銀河)

SgrA\* (我々の銀河系中心)



# VLBI(超長基線電波干渉計)とは？

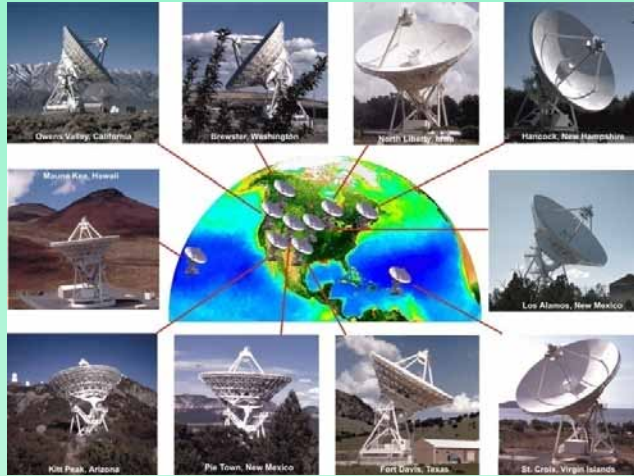
地球上の電波望遠鏡を結んで地球サイズの口径をもつ巨大電波望遠鏡を構成する



アメリカにあるVLBI:口径25mの電波望遠鏡が10台、差し渡し8000kmに配置されている

# NGC4258

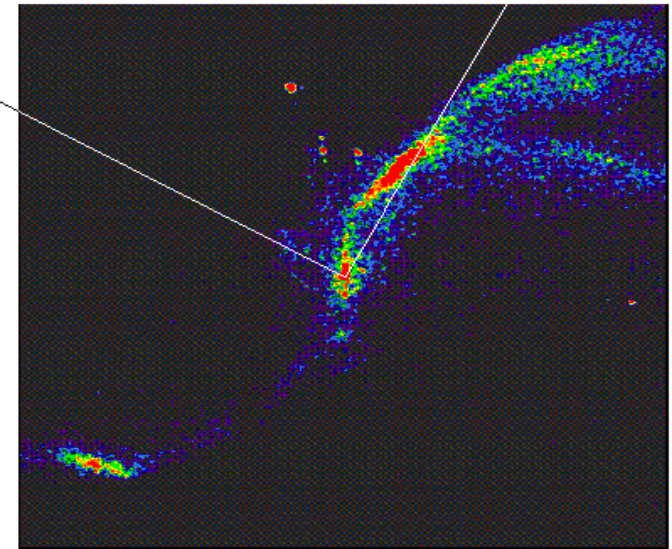
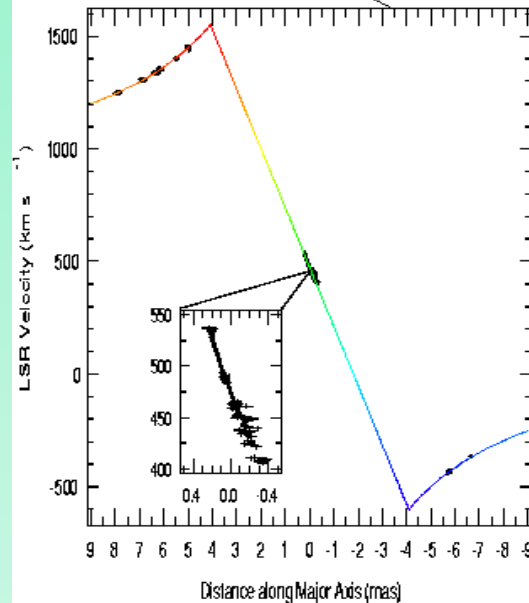
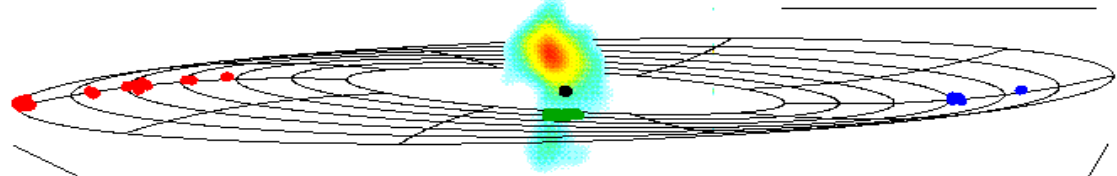
(りょうけん座の銀河)



VLBA

(米国のVLBI望遠鏡)

NGC4258の中心核周円盤(3900万太陽質量) 0.5ly



VLBI(超長基線電波干渉計)による銀河M106(NGC4258)の観測からは、中心部の重力によって秒速約千Kmの速度で回転するガス円盤が見つかっている。太陽系の惑星と同じく、ケプラー運動をしている。

わずか半径0.3光年の空間に太陽質量の3900万倍の天体がなくてはならず、そのような高密度はブラックホール以外では説明できない。

20世紀末に  
ブラックホールの存在  
が確認された。

M87(おとめ座銀河団の盟主)

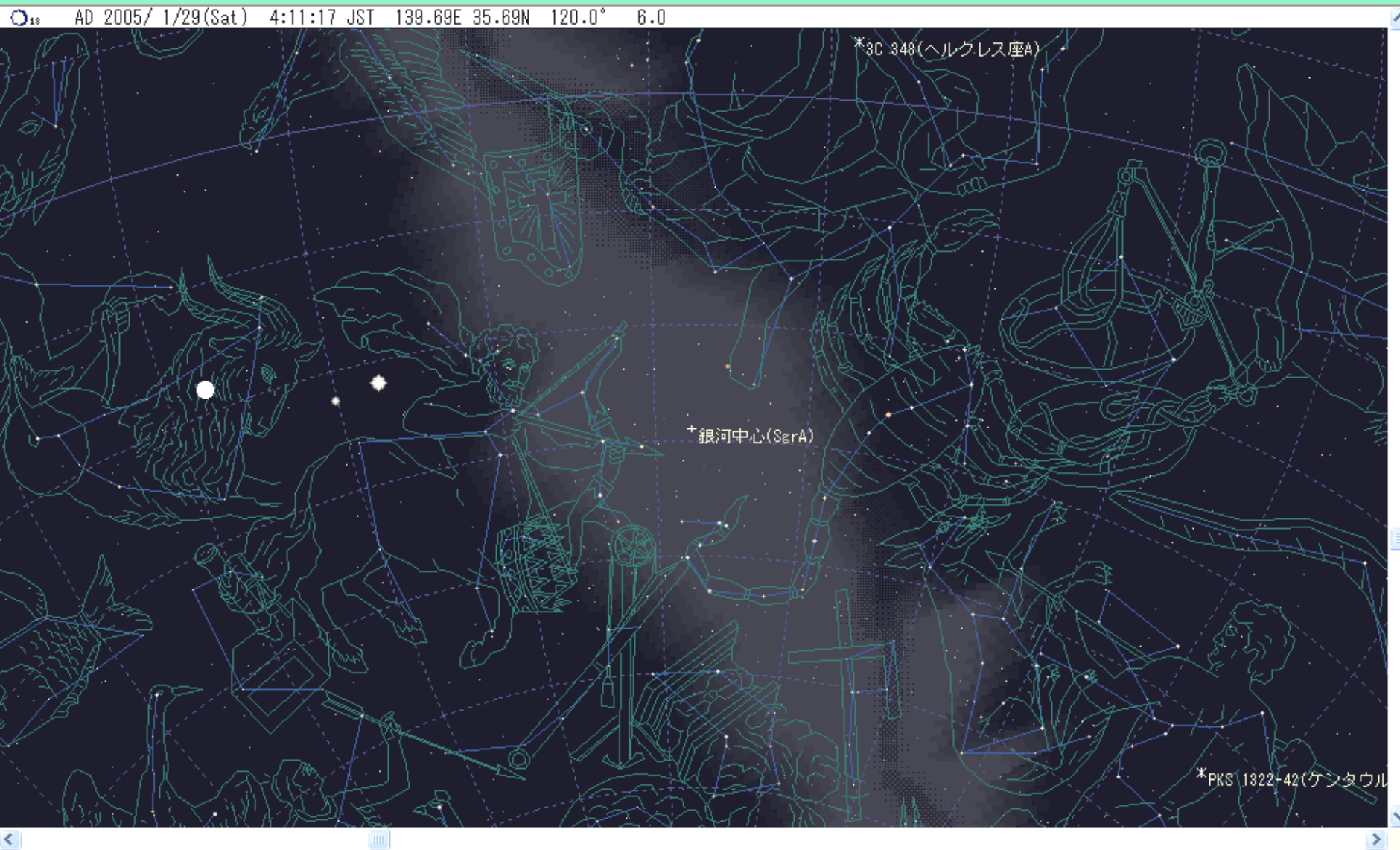
NGC4258(りょうけん座の銀河)

近赤外観測

SgrA\*(我々の銀河系中心)



# 我々の銀河系の中心は「いて座 (=Sagittarius)」方向にある。

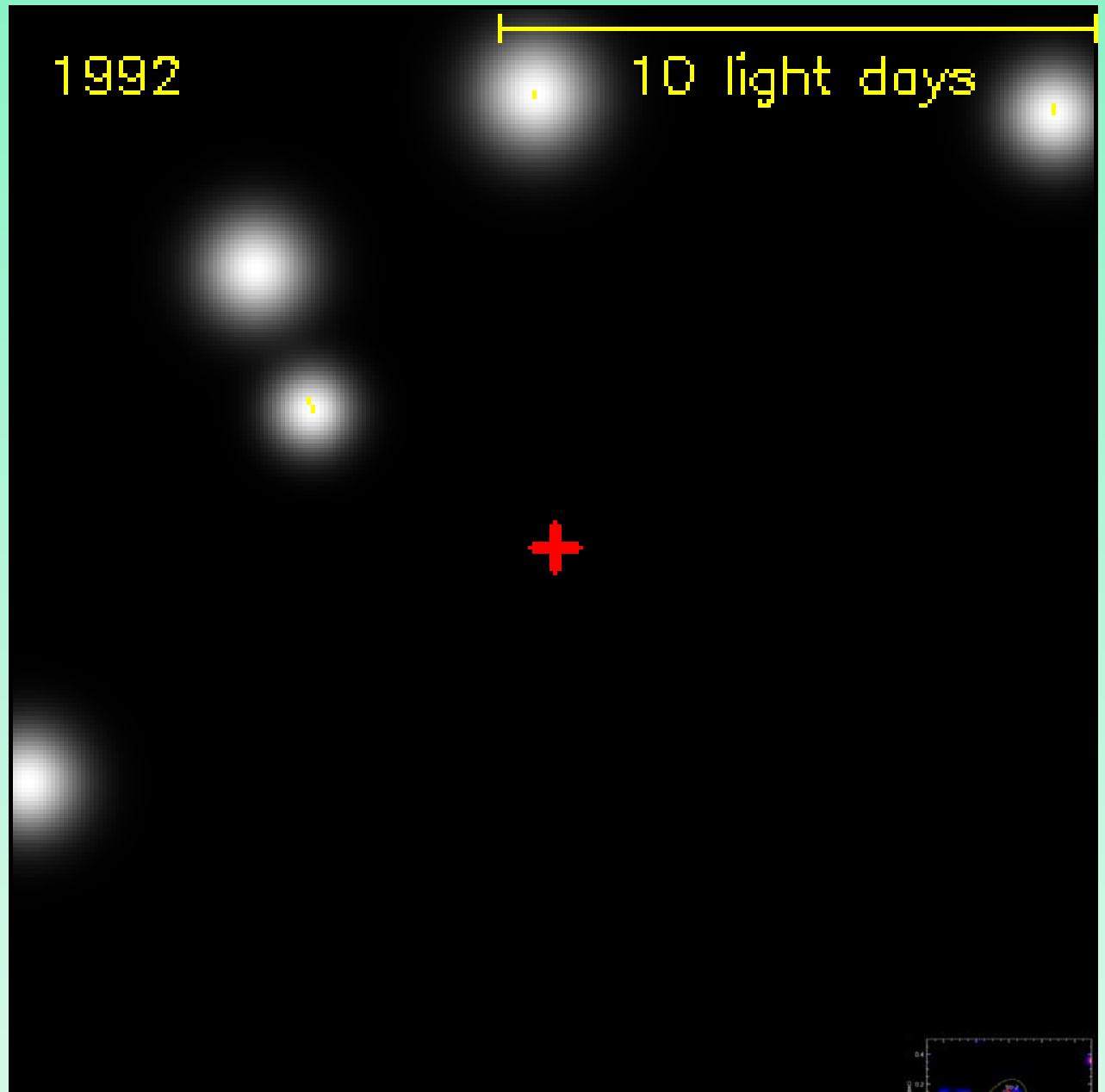


# SgrA\*

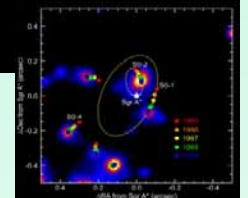
(我々の銀河系中心)

地上の望遠鏡による  
赤外線観測でとらえ  
た我々の銀河中心像。  
(CGではありません。  
観測結果です！)

秒速千kmを越える高  
速で星が軌道運動して  
いることがわかった。こ  
れにより、我々の銀河  
中心SgrA\*は400万  
太陽質量のブラックホ  
ールであることがわ  
かった。



我々の銀河中心での星の運動(Genzel et al.03)



20世紀末に

ブラックホールの存在  
は観測から確認。

M87 (おとめ座銀河団の盟主)

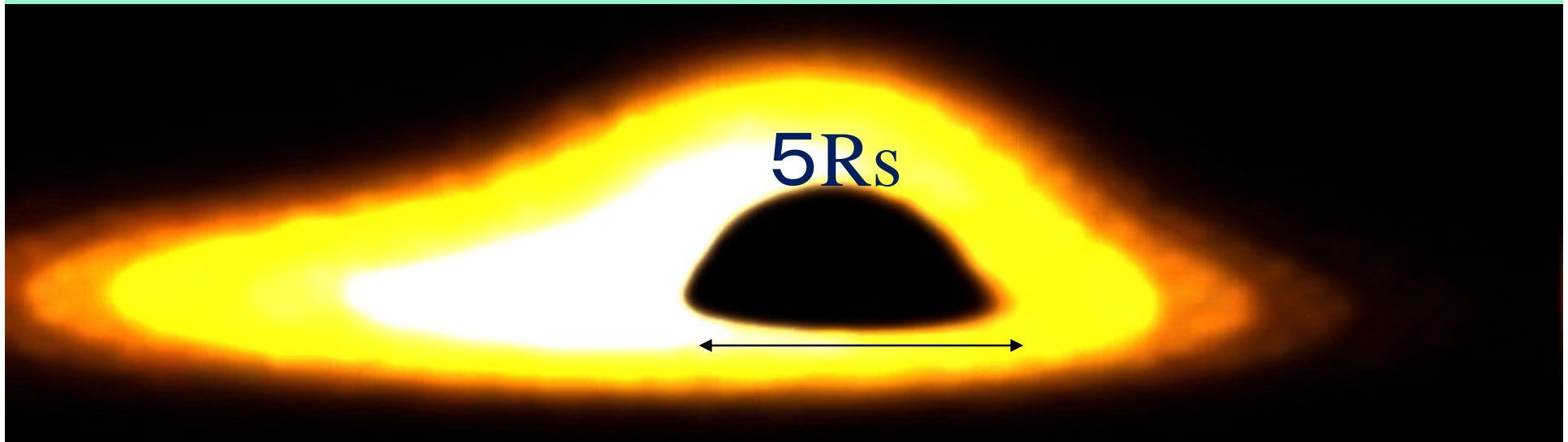
NGC4258 (りょうけん座の銀河)

SgrA\* (我々の銀河系中心)

宇宙にはありふれた存在である

ブラックホール  
あるのはわかった。  
しかし、  
誰も見たことはない。

## 下) 理論的計算からのブラックホール像(福江ら)



サブミリ波帯のVLBIなら、本当に見えるBH降着円盤  
事象の地平線を示すブラックホール・シャドー

その形状はブラックホール・メトリックのみで決まる

=>ミリ秒パルサー(=弱い重力場での相対論検証)をしのぐ、

**強重力場における一般相対論の直接観測検証場**

図: <http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~fukue/>より。





距離が遠いと天体小さく見える（見かけの角度）。  
 質量が大きいと、比例してブラックホール半径も大きくなる。両方の効果をかんがえると、見かけ上最も大きいブラックホールは**SgrA\***の50マイクロ秒角。

ブラックホール名	質量(太陽の)	距離	ブラックホール半径 (Schwarzschild半径)	その見かけ	黒い穴の差し渡し
架空のBH	1倍	3光年	3 km	0.02 マイクロ秒角	0.10マイクロ秒角
NGC4258	3900万倍	2300万光年	$1.2 \times 10^{11}$ km	0.11 マイクロ秒角	0.55マイクロ秒角
M87	30億倍	5300万光年	$9.4 \times 10^{13}$ km (6天文単位)	3.90 マイクロ秒角	19.5マイクロ秒角
SgrA*	400万倍	2万4千光年	$1.1 \times 10^{10}$ km	10 マイクロ秒角	50マイクロ秒角

我々の銀河中心SgrA\*が断然、  
“見える”ブラックホールの候補。

(見かけの半径の大きさ、  
1Rs=10マイクロ秒角)

だから、これまでも重要視され、  
観測されてきた。

で、その結果はどうだったか？

SgrA\*のセンチ波からミリ波のVLBI観測が過去に行われてきた。  
波長が短くなると小さくなっていくが、黒い穴はまだみえない。

43GHz(波長7mm)



←東西に0.7mas→

核周プラズマによる電波散乱により、低い周波数では電波像がにじんでしまいます。  
にじみ方は観測波長 $\lambda^2$ に比例して大きくなる。

5, 8, 15, 22, and 43 GHz でみたSgrA\*の見かけの大きさ  
<http://www.astro.ru.nl/~falcke/bh/sld10.html>

これまでの(センチ波～ミリ波)VLBIでは  
ブラックホール近傍は見えてない  
(←チャンネルを間違えていた)。

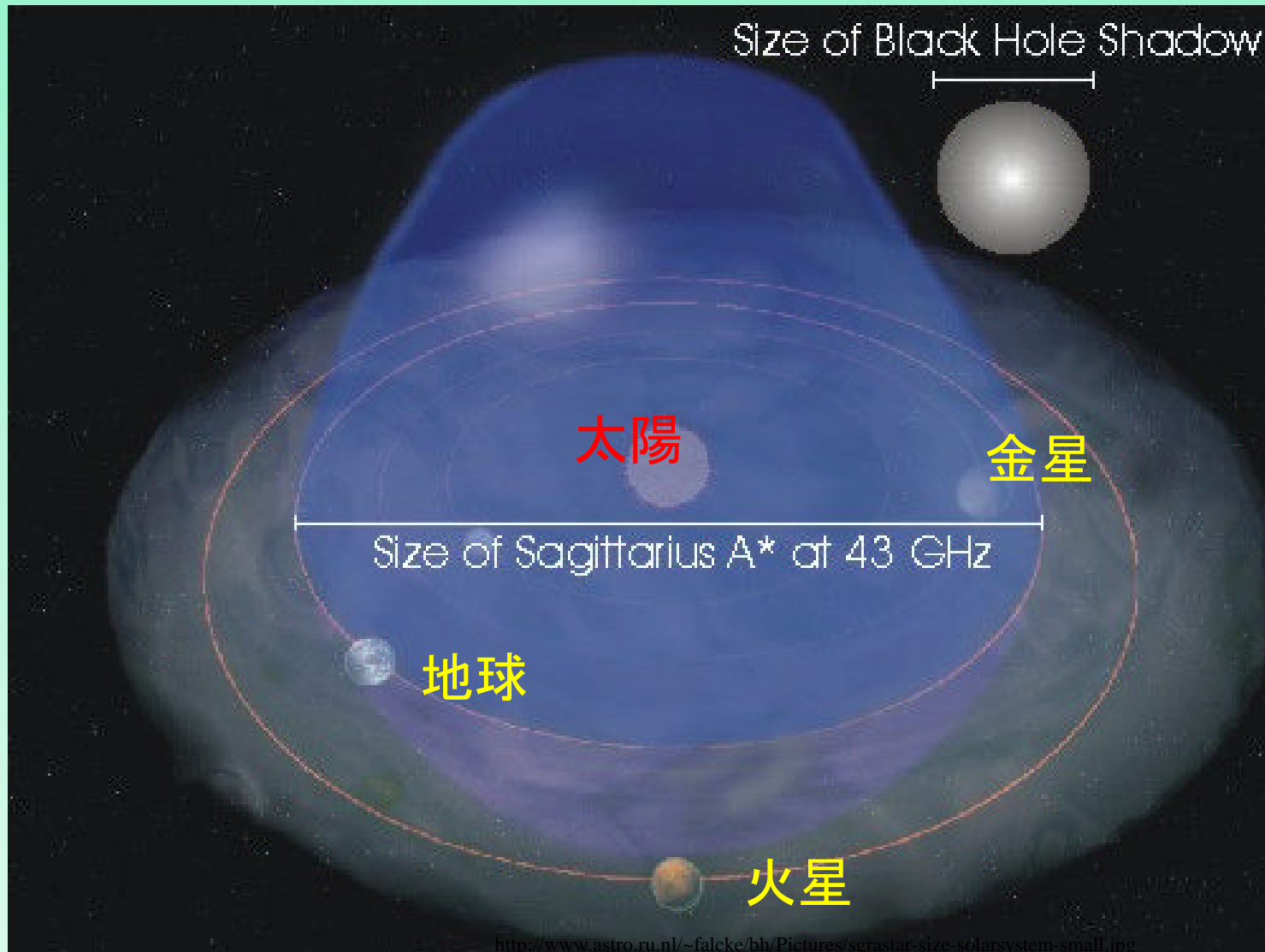
だから、

見えるチャンネル(周波数)で見れば  
良い。

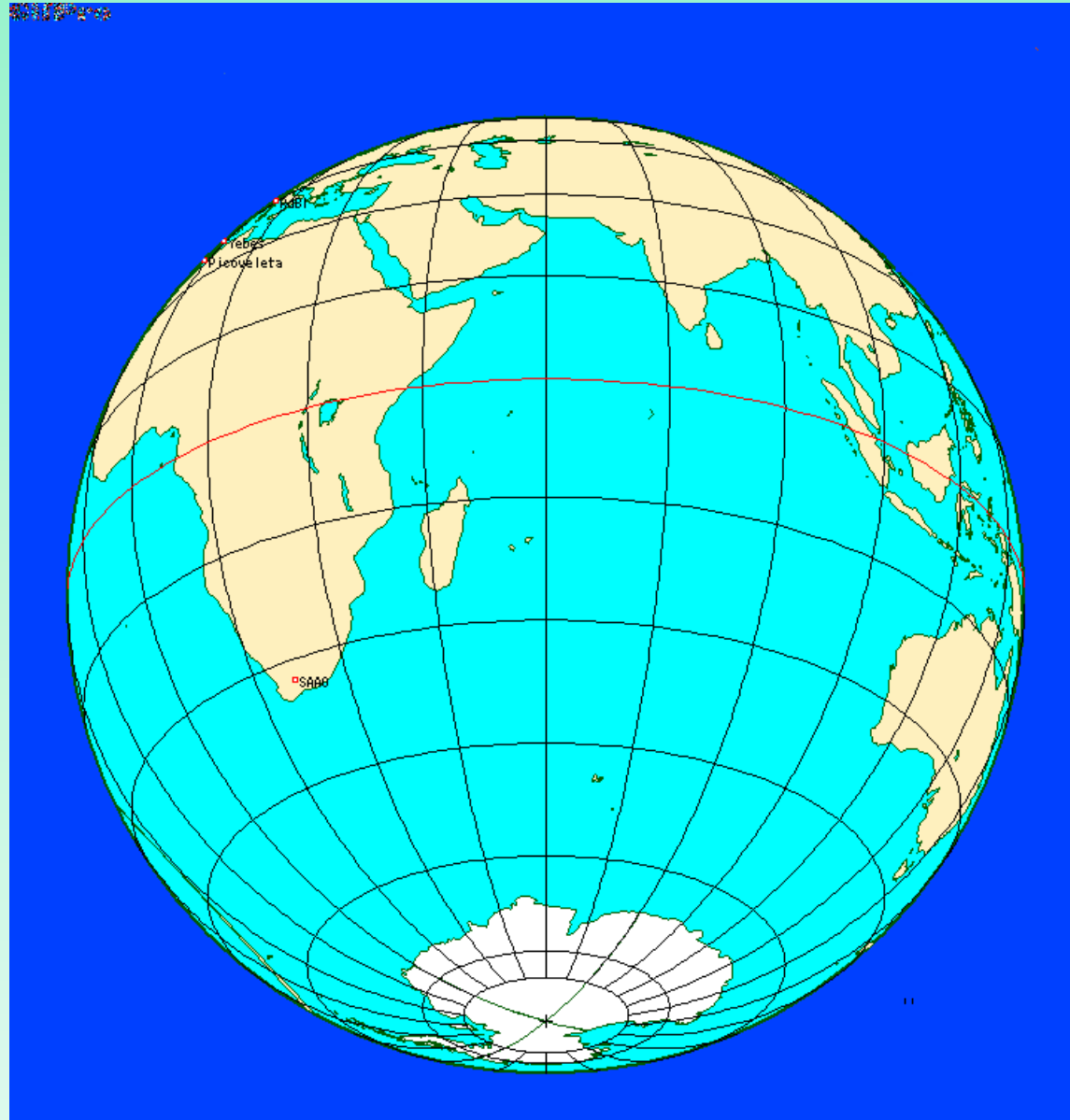
サブミリ波が  
ブラックホールの  
見えるチャンネル。  
(散乱しなくなるから)



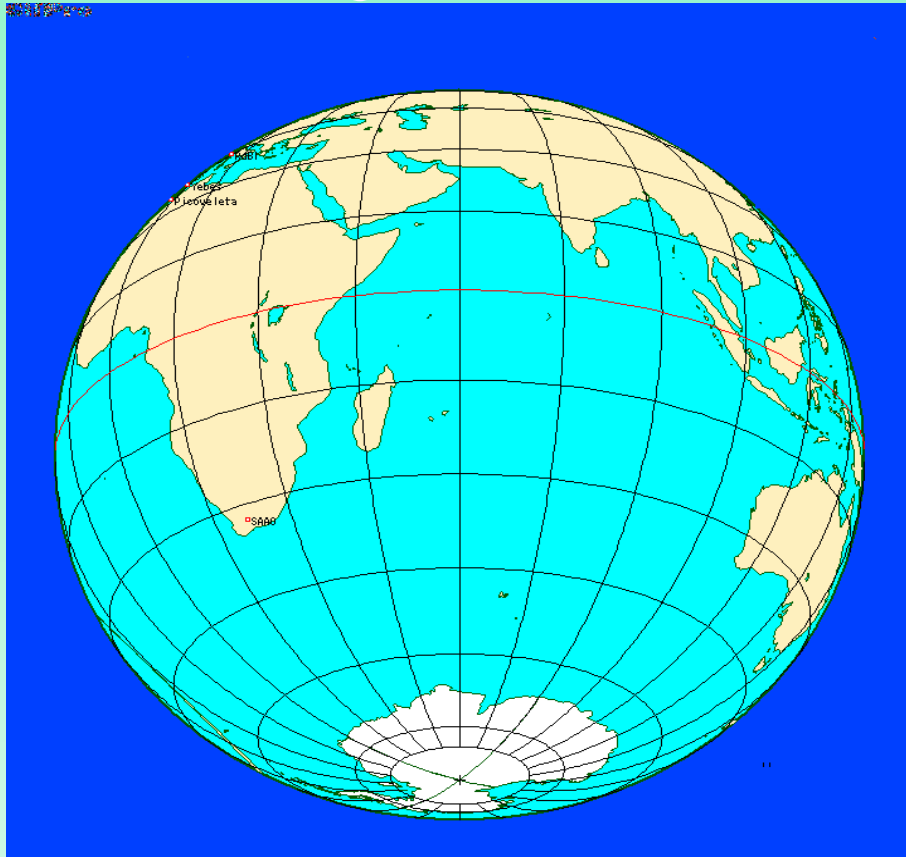
SgrA\*の周辺円盤はおよそ太陽系(太陽-地球軌道)の大きさ  
火星・地球・シャドーサイズの比較図



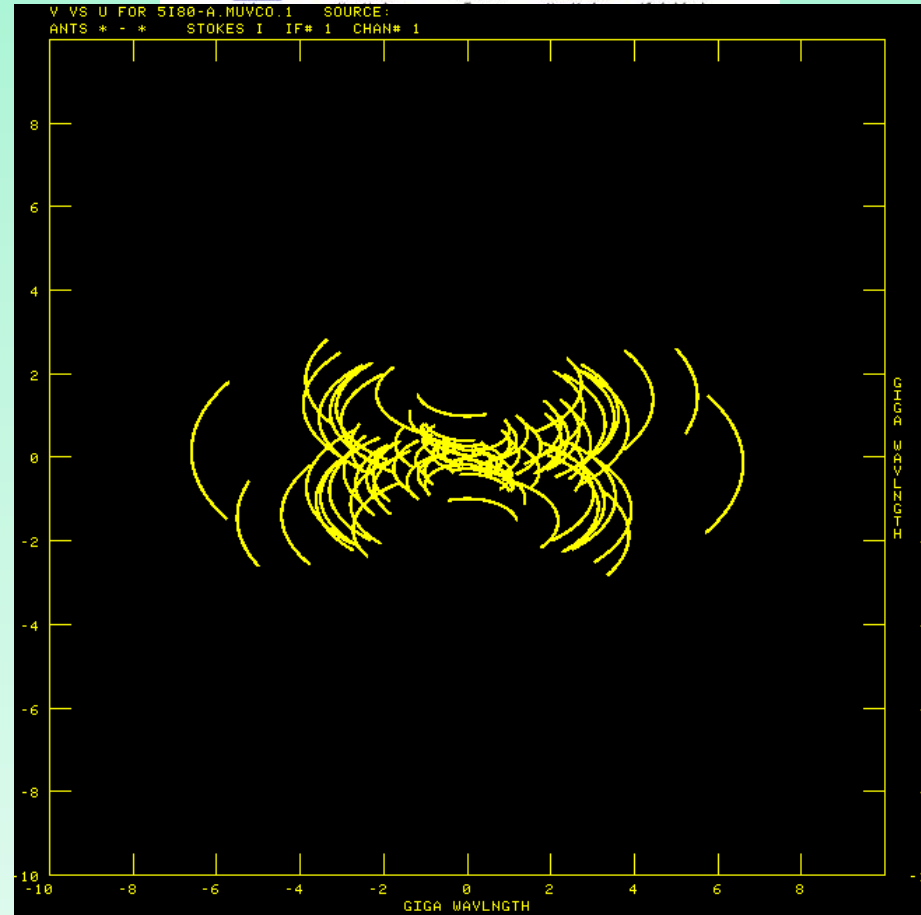
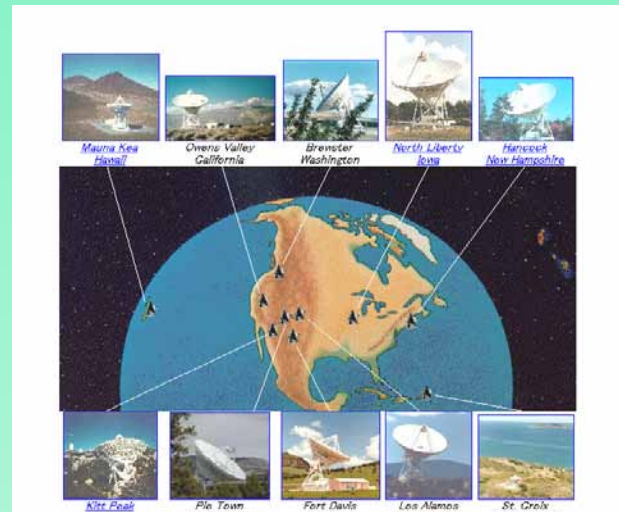
# SgrA\*から見た地球回転の様子 ( $\delta = -30^\circ$ )



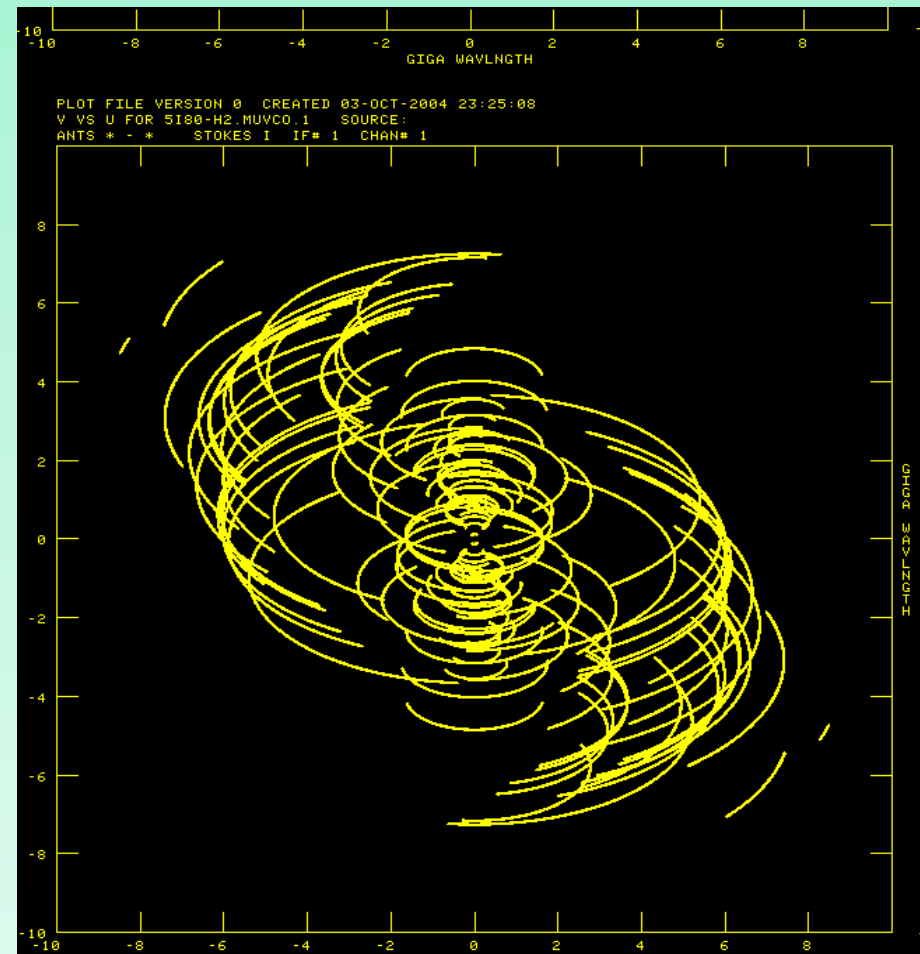
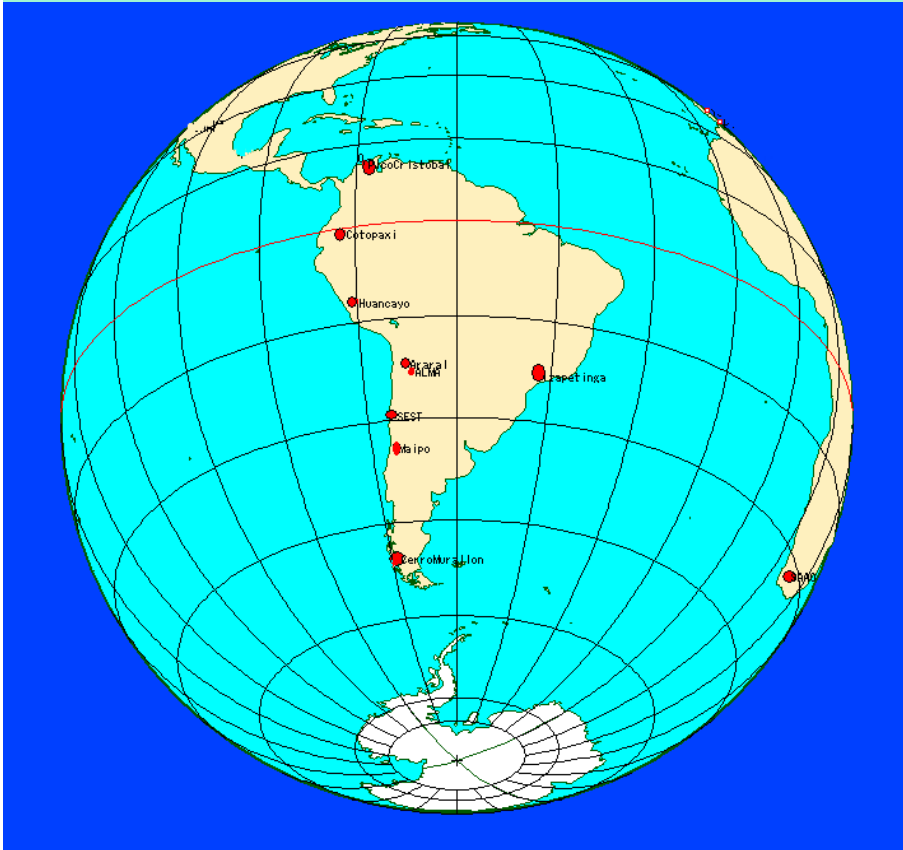
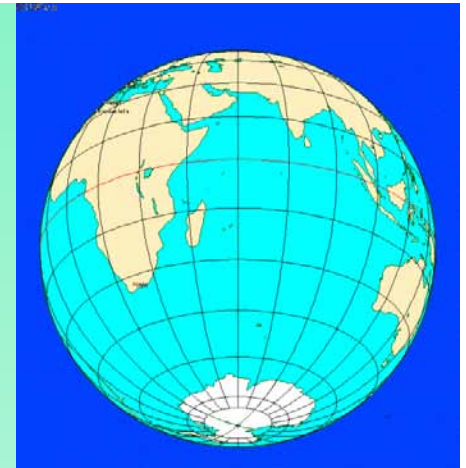
# The Earth Rotation seen from SgrA\* ( $\delta=-30^\circ$ )



The uv coverage of VLBA  
seems poor for SgrA\*.



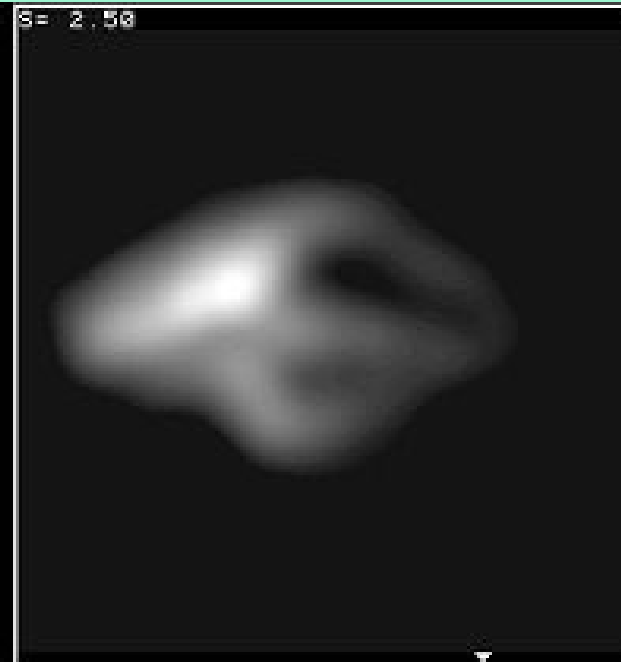
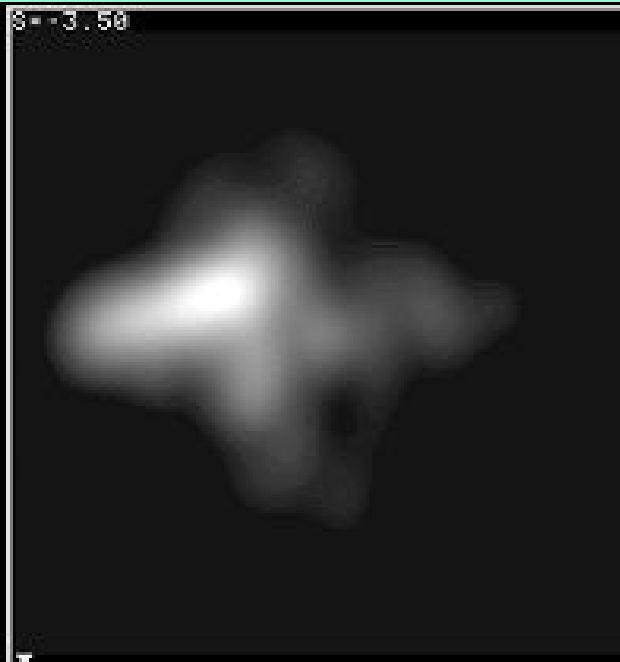
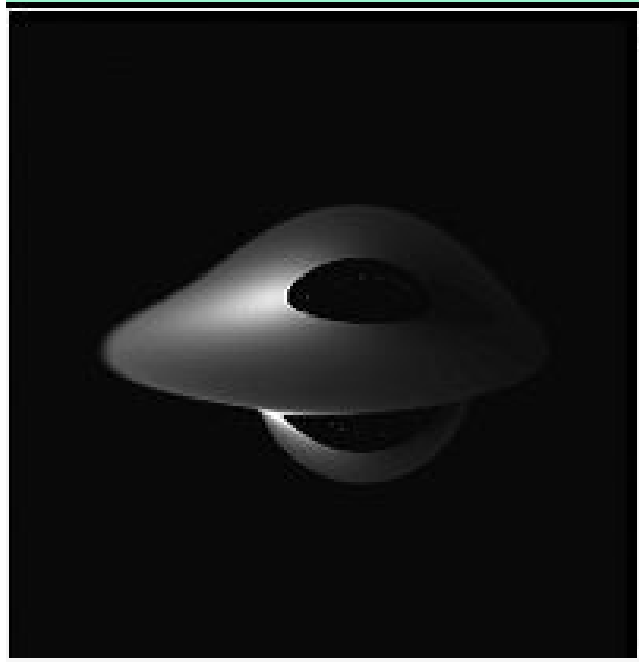
Virtual southern array (10 stations)  
The uv coverage seems enough for SgrA\* ?



SgrA\*  
230GHz  
モデル像

北半球  
VLBA  
の配置

南半球サブミリ波  
VLBI:  
ほらいずん望遠鏡



250  $\mu$ as

どちらも10局構成、8千kmの広がり。  
南半球、ほらいずん望遠鏡の勝ち。



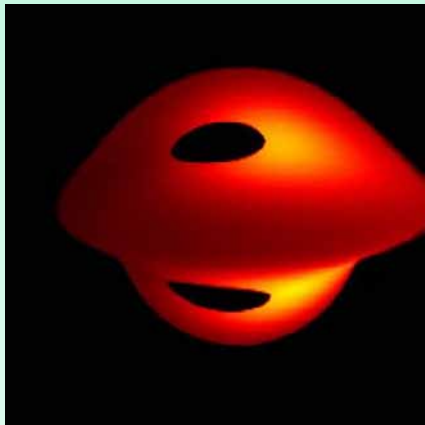
先に、まとめ：

20世紀：観測からブラックホールの存在は確実に。

21世紀：ブラックホールのそば、はもう見える。

ブラックホールの解像は現在の技術レベルでできる(デジタル技術・サブミリ波電波技術など)。

あとは専用の望遠鏡を作るだけです。



# ところが、21世紀の日本は....

「百年に一度の金融危機」(2008)



「コンクリートから人へ」(2009)

日本では科学もコンクリートに見えるらしい....



2009. 12. 05

## 最速ブラックホール結像装置: キャラバン-sub

「100年に一度の金融危機」「政権交代」

「生活重視の民主党」、「事業仕分け」

に対応すべく、

超低コスト、超高・観測成果の

サブミリ波VLBI装置を考察。

目標を「SgrA\*の事象の地平線検出」に特化、

コストダウン。目標コスト10億円で。

大師堂アンテナのサブミリ波版30m級球面鏡を2基で集光力を稼ぎ、  
一方、合成開口4m級のキャラバン局がアンデスを行脚uvを埋める。

露出時間長めの像合成。

不変部分である事象の地平線を検出をめざす。

コストダウン型  
ブラックホール解像装置概念図



Huancayo/Peru

大型固定球面鏡

ALMA

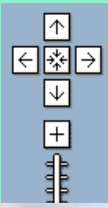
Chacaltaya /  
Bolivia

大型固定  
球面鏡

移動VLBI観測車





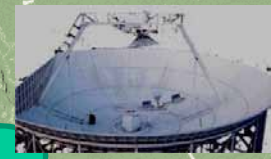


地図 航空写真 地形



ワンカヨ32m  
センチ波(通信アンテナ)

ペルー  
ワンカヨ  
3300m



1000km



ボリビア・ラパス近郊5300m  
世界最高所のスキー場、宇宙線研究所

チャカルタヤ

ALMA

Mirabel候補地



ラ・シラ  
2400m  
ISEST15m鏡



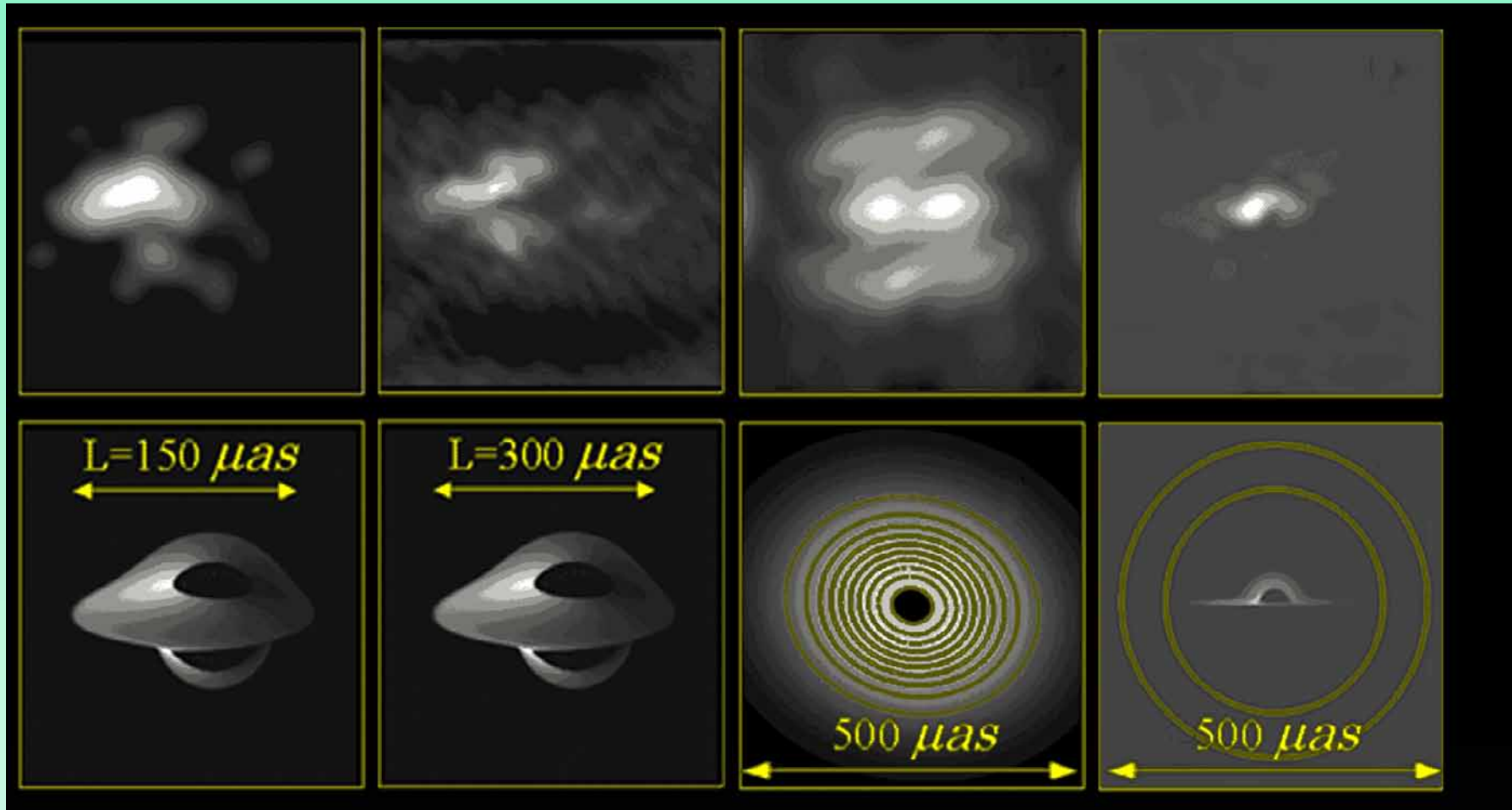
500 km  
200 マイル



SgrA\*の事象の地平線の撮像は  
短基線を作ることが、鍵。  
(超長基線はもうあるし。)

ALMAから適度に離れたアンデスに新局をつくれれば、よい。





↑図1: 既存のサブミリ望遠鏡群による場合のVLBI観測シミュレーション。下段がモデル像。上段がそれぞれの像合成・計算結果。

＝うまく撮像できない＝

ハワイ・米西海岸・ALMA周辺＋仮想ペルー＋SEST(チリ、閉鎖)

既存のサブミリ波望遠鏡を寄せ集め、  
230GHzのVLBIで、フリンジは検出  
(Doeleman等'08)

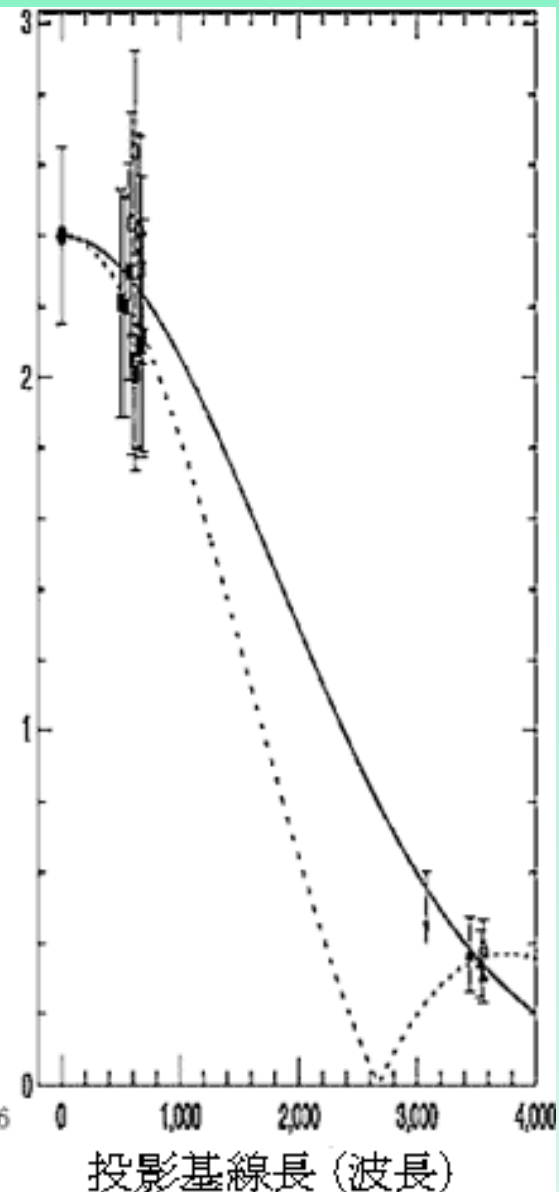
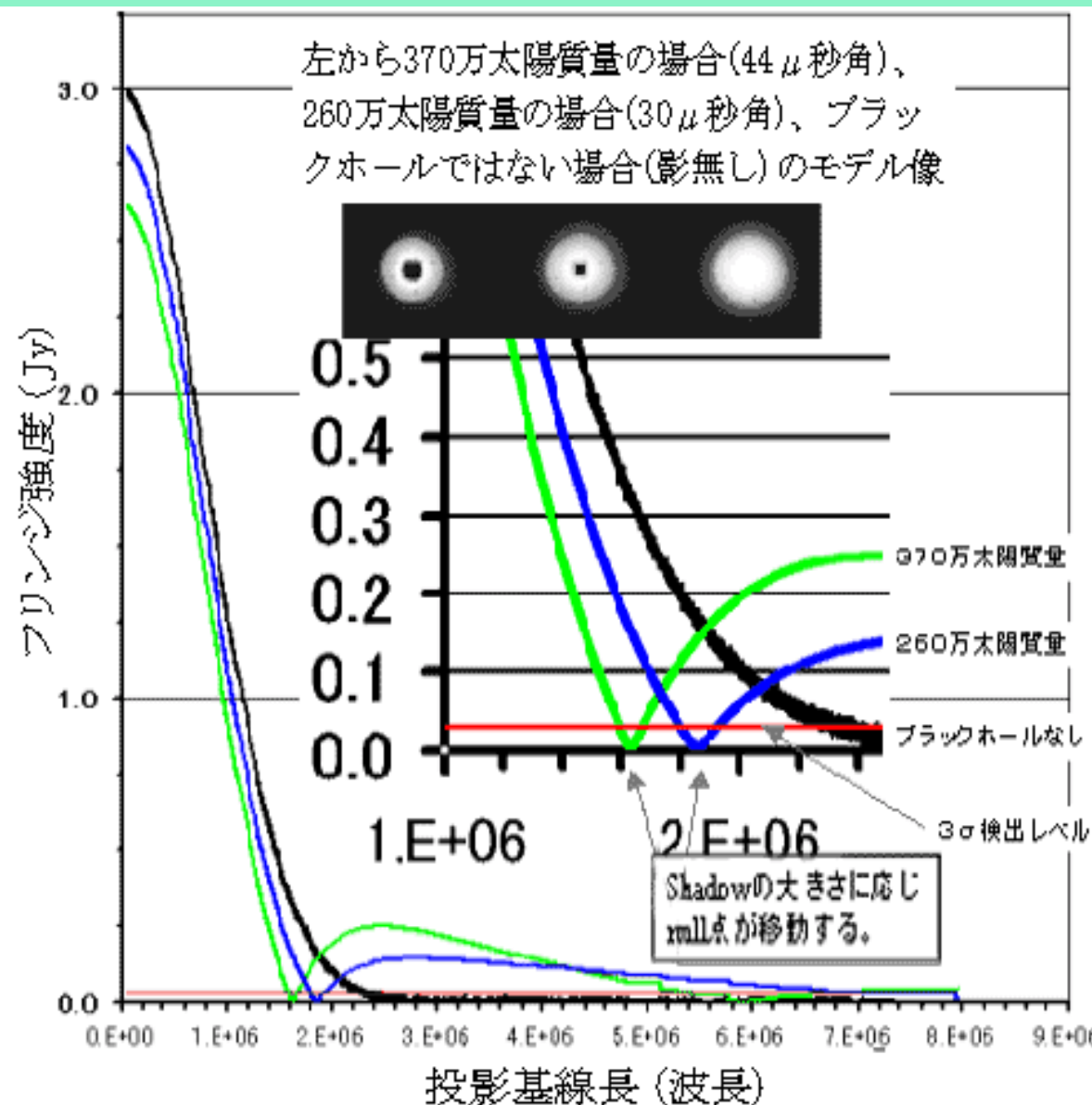
しかし、撮像は既存望遠鏡群では  
かなり難しい(事実上不可能)。  
←uvが不足。特に短基線の欠落が  
効いている。



既存のサブミリ波望遠鏡を  
寄せ集め、230GHzのVLBI  
で、FRINGEは検出。  
(Doeleman等'08)







(左) Miyoshi et al. (04, 07) より改変

(右) Doeleman (08) の図 1 より



# 「最速(早期)・最安値システム」 SgrA\*観測だけが目標

- 2m級鏡面\*4~6=phase-upでVLBI移動局:uv(基線ベクトル)を埋める。
- 大きな球面鏡30m2台で集光力(感度)を稼ぐ。  
=>スローシャッターでの平均的電波像を得る。  
時間変化しないはずのブラックホールシャドーは見える(はず)。

# Geodetic VLBI mobile station was developed by NICT

URL <http://www2.nict.go.jp/w/w114/stsi/index.html>

## CARAVAN2400のS/X化に成功！！



図1 新フロントエンドを搭載したCARAVAN2400。かつてサブレフがあった場所に広帯域クワッドリッジホーンアンテナ、高性能常温LNA、ダイプレクサ等を取付けている。

新型フロントエンド



図2 2007年12月5日に実施したフリッジテストの様子。手前が新フロントエンドを搭載したCARAVAN2400、後方が34mアンテナ。

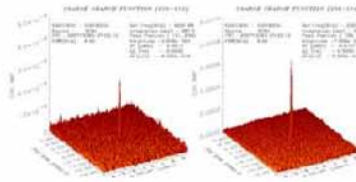


図3 2007年12月5日のVLBI実験で検出されたクワッドリッジホーンアンテナによるS/X初フリッジ(左がXバンド、右がSバンド)。

本VLBIニュース107号でも紹介しましたが、NICTは国土地理院と共同で、GPS比較基線場検定用の超小型VLBIシステムの開発を進めています。このシステムは、大型アンテナと組み合わせたVLBI観測を行い、超小型アンテナどうしで結ばれる約10kmの基線長をRMS2mmで決定することを目指しています。このため、既知の誤差要因を層内での位相速度が差を軽減するため、これまで、広帯域クワッドリッジホーンアンテナを用いた高性能の常温LNAを用いた。2007年12月5日に34m S/X双方での初フリッジテストを実施した後、開発したフロントエンドによりさらに開発を進

←NICT Kashima

ミリ波サブミリ波電波の信号を受信するためには、高精度な鏡面をもつパラボナアンテナが必要である。

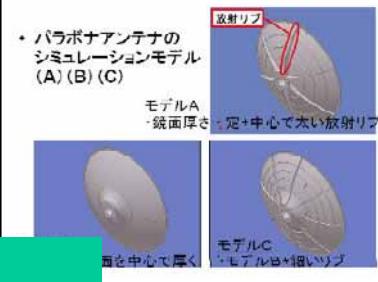
我々はシミュレーション解析を行い、パラボナアンテナにおける重力、熱、風などによる変形の最適化構造を設計した。

これをもとに、アルミ鋳造で本体の製作を行い、鏡面は切削により形成する方法を開発した。

これにより従来より経費、時間差を大幅に削減した。

### 高精度パラボラアンテナ

- 高周波帯での観測に向け、高精度の口径2mの主鏡の開発を行う。
- 鏡面精度目標は 40um r.m.s
- 重力、風、熱による変形をANSYSで検討。



• パラボナアンテナのシミュレーションモデル (A) (B) (C)

モデルA - 鏡面厚さ一定+中心で太い放射リブ

モデルB - 鏡面厚さ一定+中心で薄い放射リブ

モデルC - モデルB+細かいリブ

シミュレーションをもとにリブ等の構造を決定 (モデルCを採用)



鋳造により本体製作を行うための木型(実際には発泡スチロール)の製作



アルミ (AC4C) 鋳造により作られたパラボラ鏡面



旋盤により鏡面を切削加工

726

出来上がり 鏡面の誤差30ミクロン達成!

An experience of making a small cheap sub-mm dish by Ogawa.

北嶋綾製作所(東京羽田・09年11月)

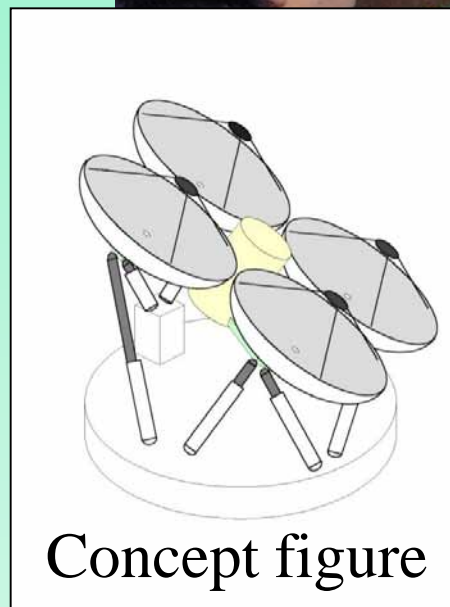
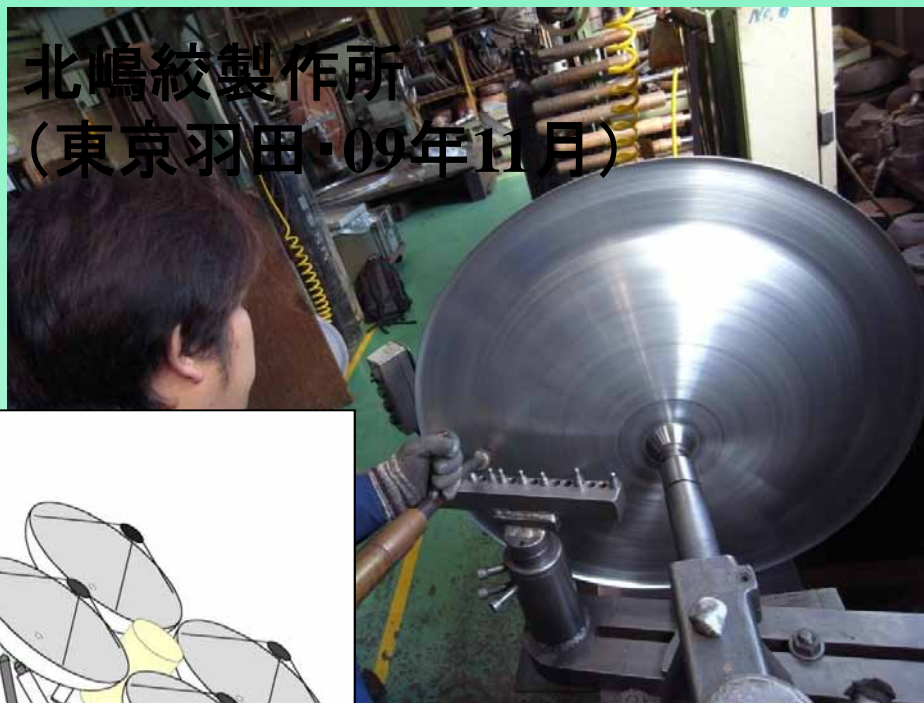
「絞り」による94cm  
アンテナの製作。  
鏡面精度測定、  
研磨による鏡面修  
正を繰り返し、  
100ミクロンまでいく  
か？



「サブミリVLBIのための  
鏡面パネルコストダウン研究」 開始。  
(春日PI: 国立天文台・先端技術センター利用)

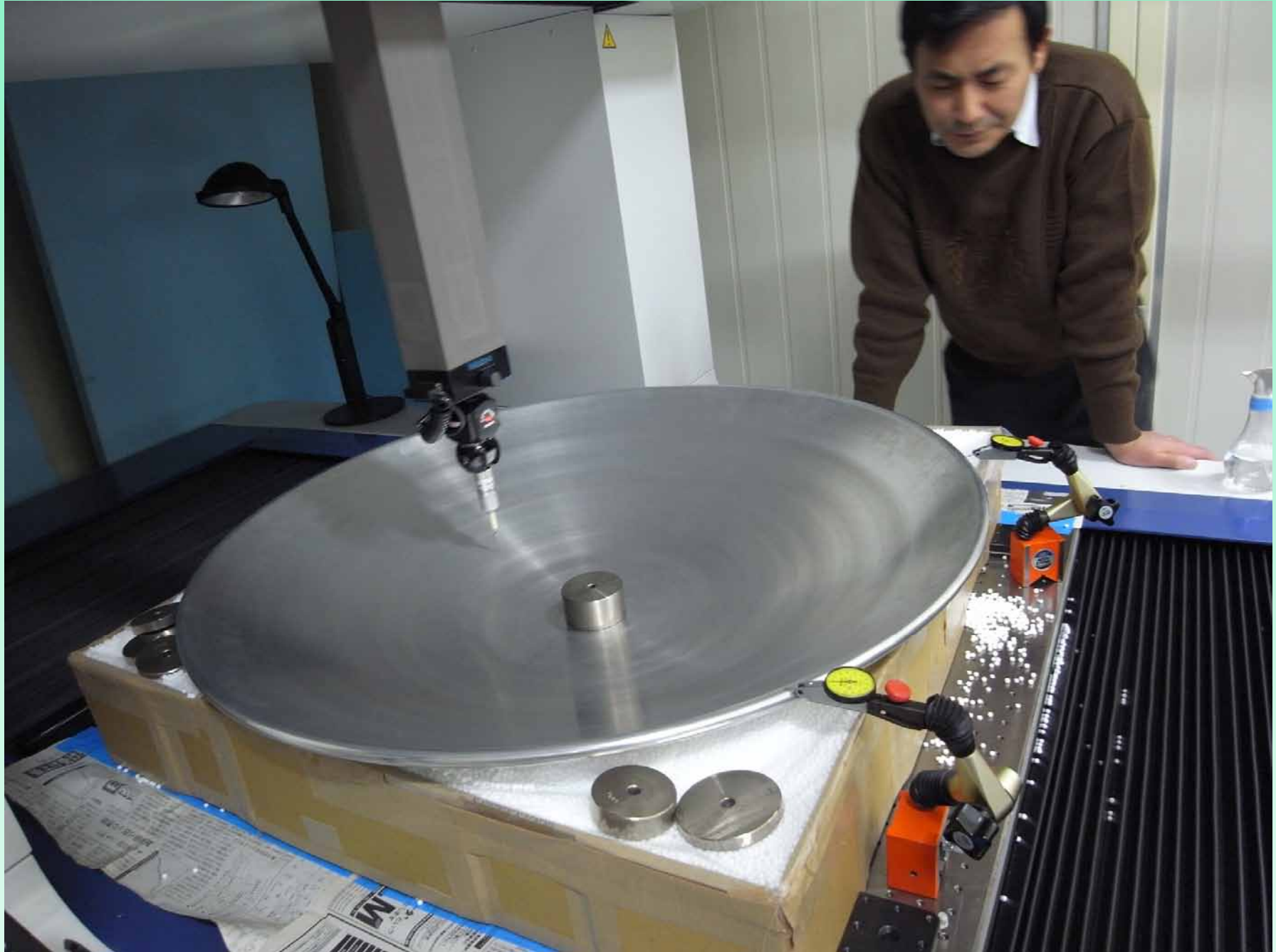


## Surface accuracy measurement.

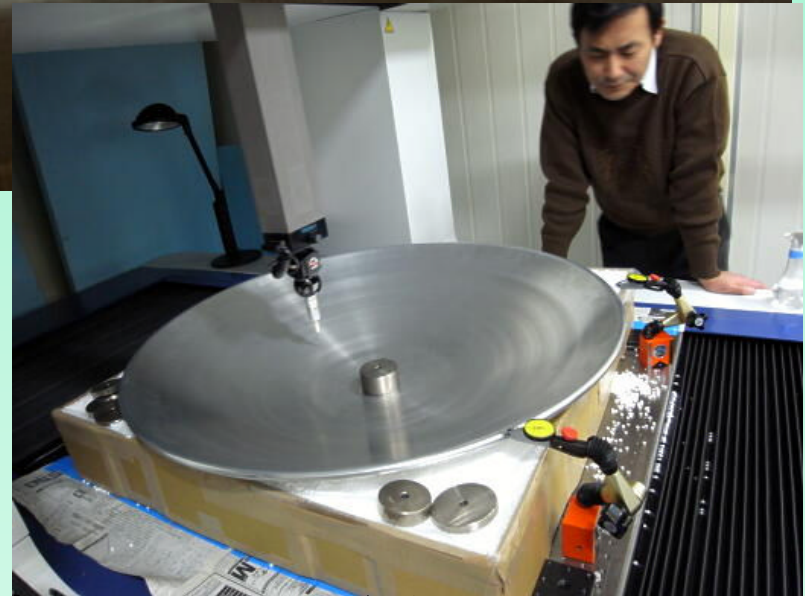
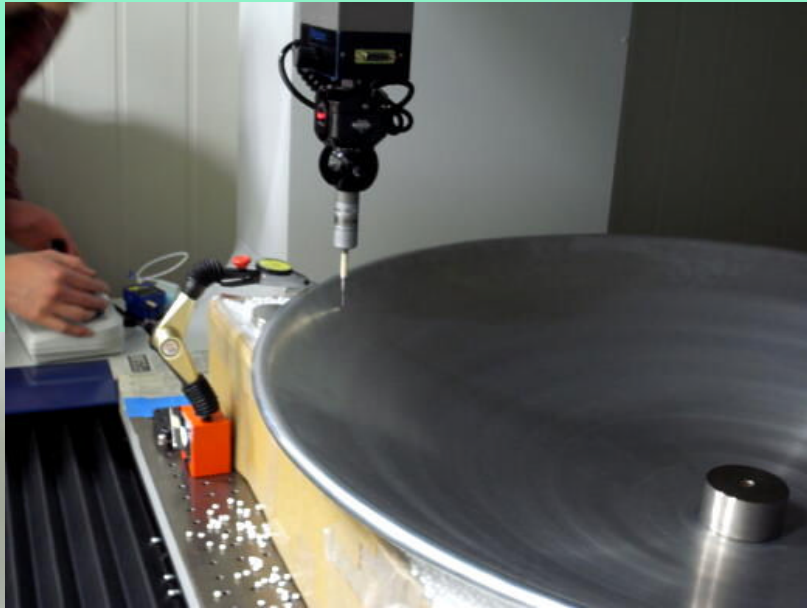


製作費4万円

A new attempt to make a sub-mm dish with very low cost by Kasuga: we are aiming to get a  $100\mu\text{m}$  rms (for 230 GHz use).

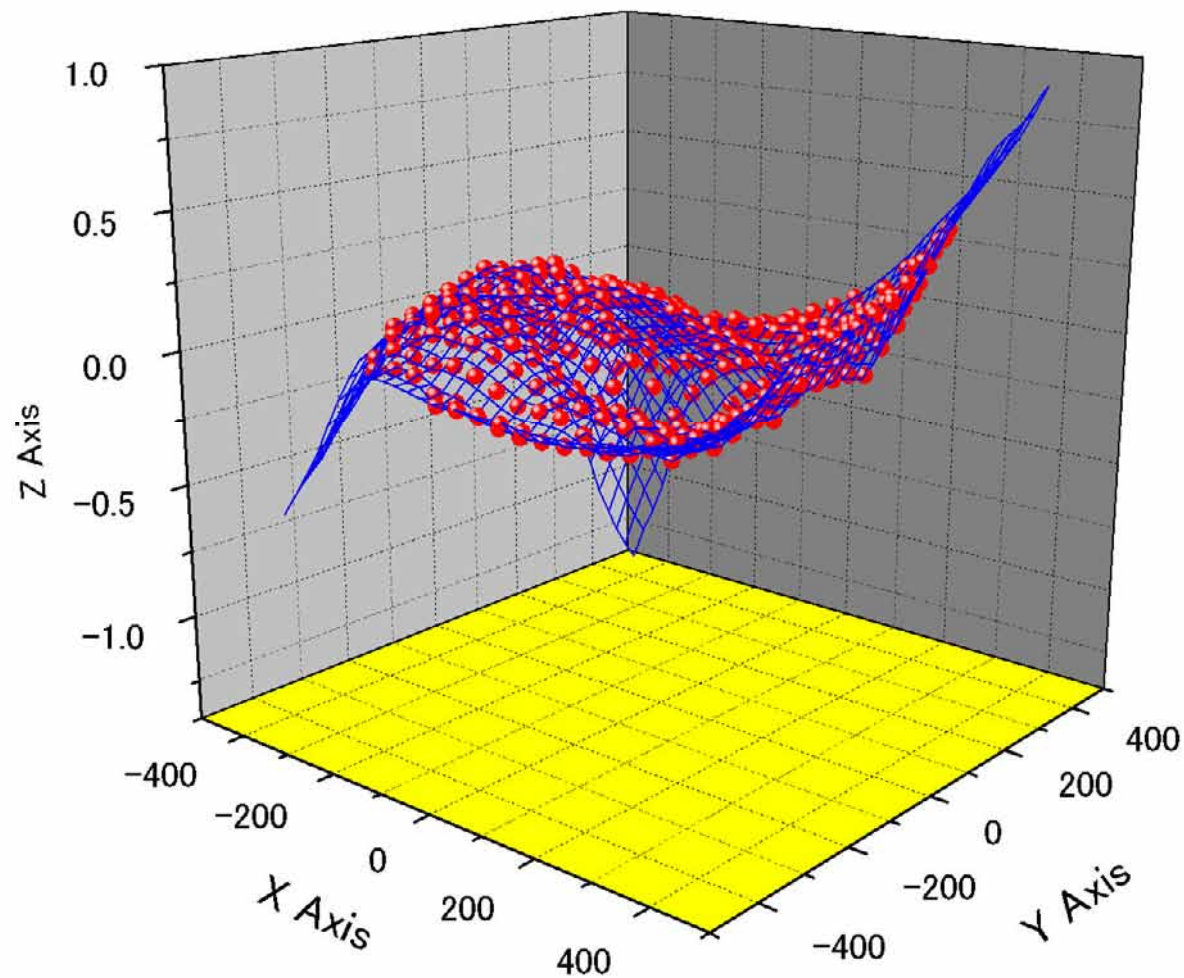






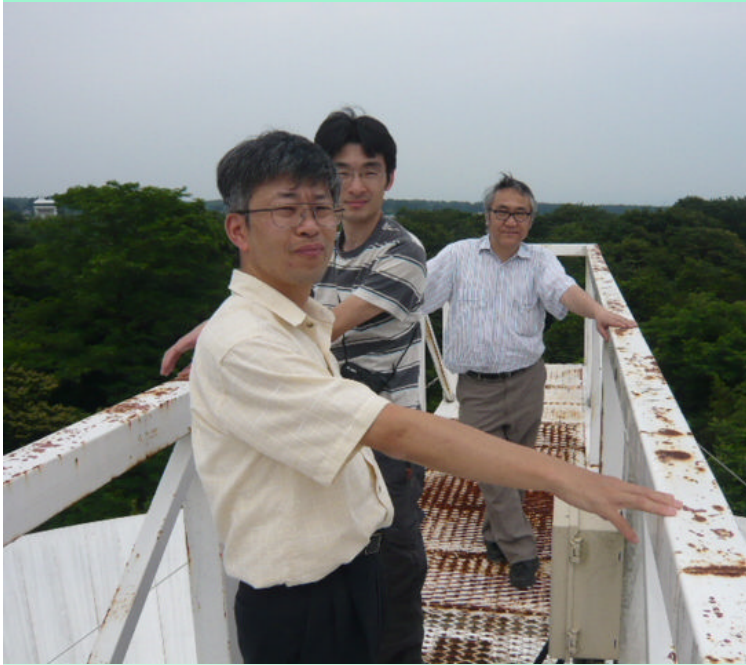
ビーズが隙間から出てくる。  
しっかりふさぐべきだった。  
春日氏側の鏡面部分がどんどん沈み込む  
プローブの接触で40ミクロン程度変化する

残差はすでに120ミクロンr. m. s.。だが  
全体的に3次関数群で示せるゆがみがある。





# 早稲田・那須の大師堂研・大型球面鏡



球面鏡には焦点は無いが、副鏡を非球面の副鏡によって焦点を作る。副鏡の駆動で数時間の追尾可能。同一曲率のパネル大量製作によるコストダウン、大型主鏡面固定による自重変形からの解放などの利点

# Chacalyata Cosmic ray Observatory (標高5300m, La Pas, Bolivia) 訪問(09年11月)

- ・アンテナ設置、歓迎。
- ・NAOJとの協定OK。  
(協力:IGPイシツカ氏)







# Observatorio de *Huancayo*, IGP

**Instituto Geofísico del Perú**

Sector Educación

Latitud: -12.037875 N -1.80 N

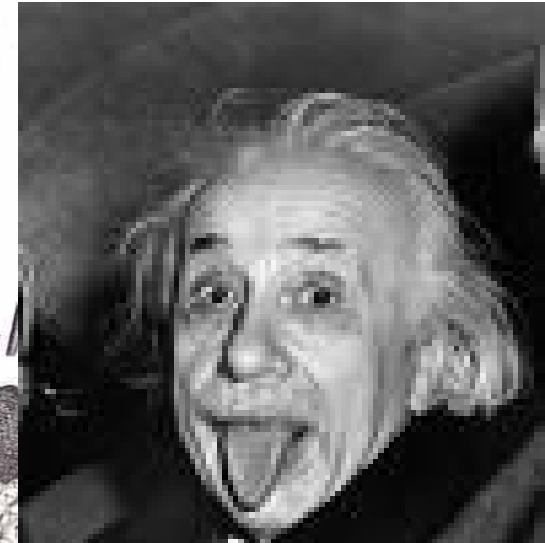
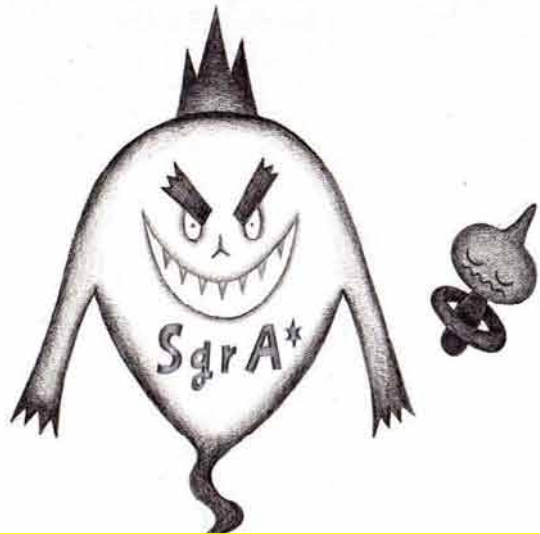
Longitud: 284.681633 E -3.46 E

Altitud: **3336.0 m.s.n.m.**



32-m telecommunication antenna

-- Not for sub-mm observation --



We hope to detect an event horizon by the 100 years' anniversary of general relativity in 2016.

L<sub>45</sub> Huancayo/Peru h



Ch **Large**  
Bo **Spherical**  
**Dish**

**Mobile VLBI station**



**BH2010@プラハ、2010年2月  
サマリートーク: Fabian先生激賞!**





