銀河中心ブラックホール・キャラバン計画

2013.Mar.06th@ NTHU

A First Black Hole Imager, Caravan-submm at Andes

Makoto Miyoshi
(National Astronomical Observatory, Japan)
With
M. Sekido, Y. Koyama, H. Ujihara, Y. Irimajiri (NICT), H. Ishitsuka, S. Nemoto (IGP), Y. Asaki, M. Tsuboi (ISAS), T. Kasuga (Hosei Univ.), S. Nanbu, A. Tomimatsu (Nagoya Univ.), M. Takahashi (Aichi Univ. Edu.), H. Saida, S. Machiya (Daido Univ.) Y. Eriguchi, S. I. Yoshida (Tokyo Univ.), S. Koide (Kumamoto Univ.), R. Takahashi (Tomakomai), T. Oka, J. Furusawa (Keio Univ.), N. Kawaguchi, Y. Kato (NAOJ) K. Niinuma (Yamaguchi Univ.), T. Daishido (Waseda Univ), K. Wakamatsu (Gifu Univ.) , T. Terasawa, M. Teshima (ICRR), T. Kakimoto, Y. Tunesada (TITEC)

If we construct a sub-millimeter wave VLBI array around Andes, we can observe the black hole of SgrA*.
We are planning a three –stations array around Peruvian Andes, dedicated to the detection of the horizon of SgrA*, around US$ ten-million-level.

From astronomical observations, all people believe the existence of black holes in the universe today, except relativists. But, no one has observed them.

Observing black hole shadow (black hole horizon) is the conclusive evidence of black hole even relativists can be persuaded and <u>a new approach investigating strong field gravity.</u>

Black Hole Metric(mass, spin, charge) governs the Shape of Black Hole Shadow （R. Takahashi, 05).

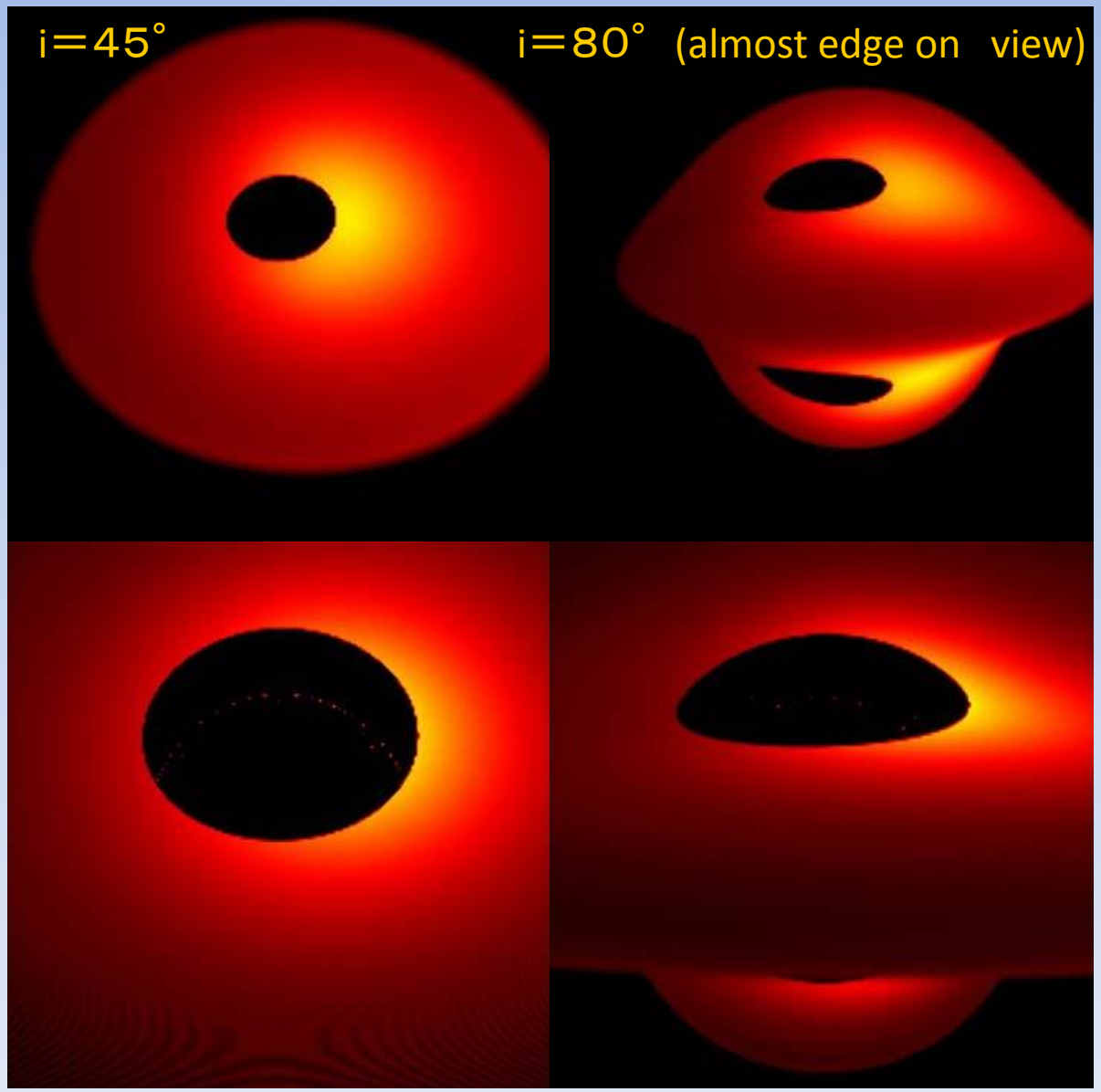
230GHz
SgrA*

Kerr

ADAF（H=1)、
Axis symmetric

Schwarzschild
ADAF
(H=1)
Axis symmetric

Takahashi
et al. (04)



12Rs

The effect of spin on black hole shadow

No Spin　　Maximum Spin

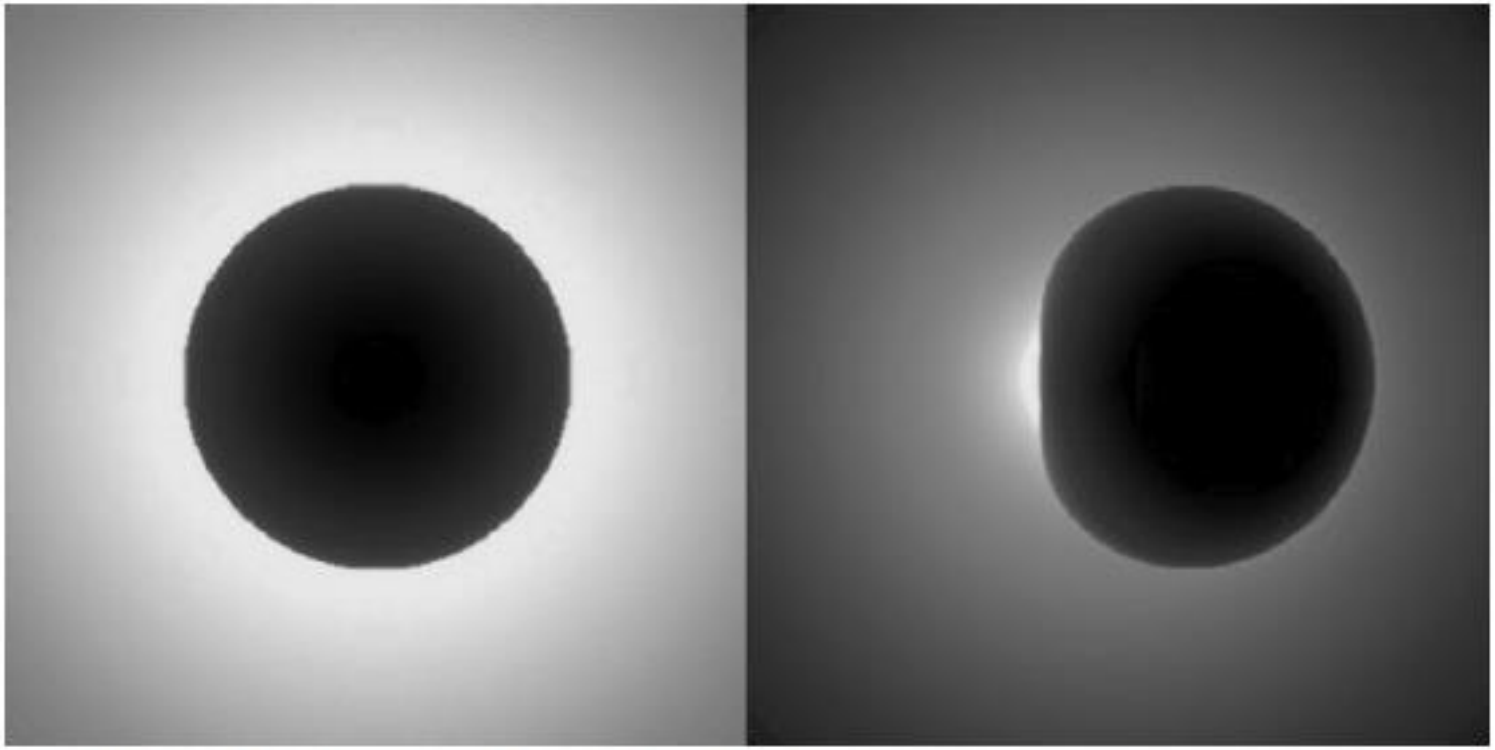


図 3　光学的に薄い降着流中のブラックホールの影：回転なしのブラックホールのイメージ（左図），最大回転するブラックホールを回転軸に対して垂直な方向から見たイメージ（右図）．

R. Takahashi (2004,2005)

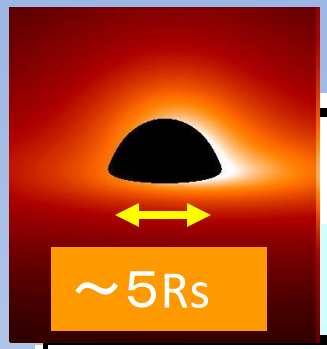
Can we observe black hole?

Yes, we can

with VLBI observations of SgrA*

at sub-millimeter wavelength!

Shadow Size of Black Holes



～5Rs

	Mass (Msun)	D (kpc)	(m)	Rs (au)	(μ as)	Shadow Size (μ as)
StellarBH@pc	1.00E+00	0.001	2.95E+03	1.97E-08	0.02	0.10
M82	1.00E+06	3700	2.95E+09	1.97E-02	0.01	0.03
SgrA*@GC	2.60E+06	8	7.67E+09	5.11E-02	6.39	31.96
SgrA*@GC	3.70E+06	8	1.09E+10	7.28E-02	9.10	45.48
M31	3.50E+07	800	1.03E+11	6.88E-01	0.86	4.30
NGC4258	3.90E+07	7200	1.15E+11	7.67E-01	0.11	0.53
M87	3.20E+09	16100	9.44E+12	6.29E+01	3.91	19.54

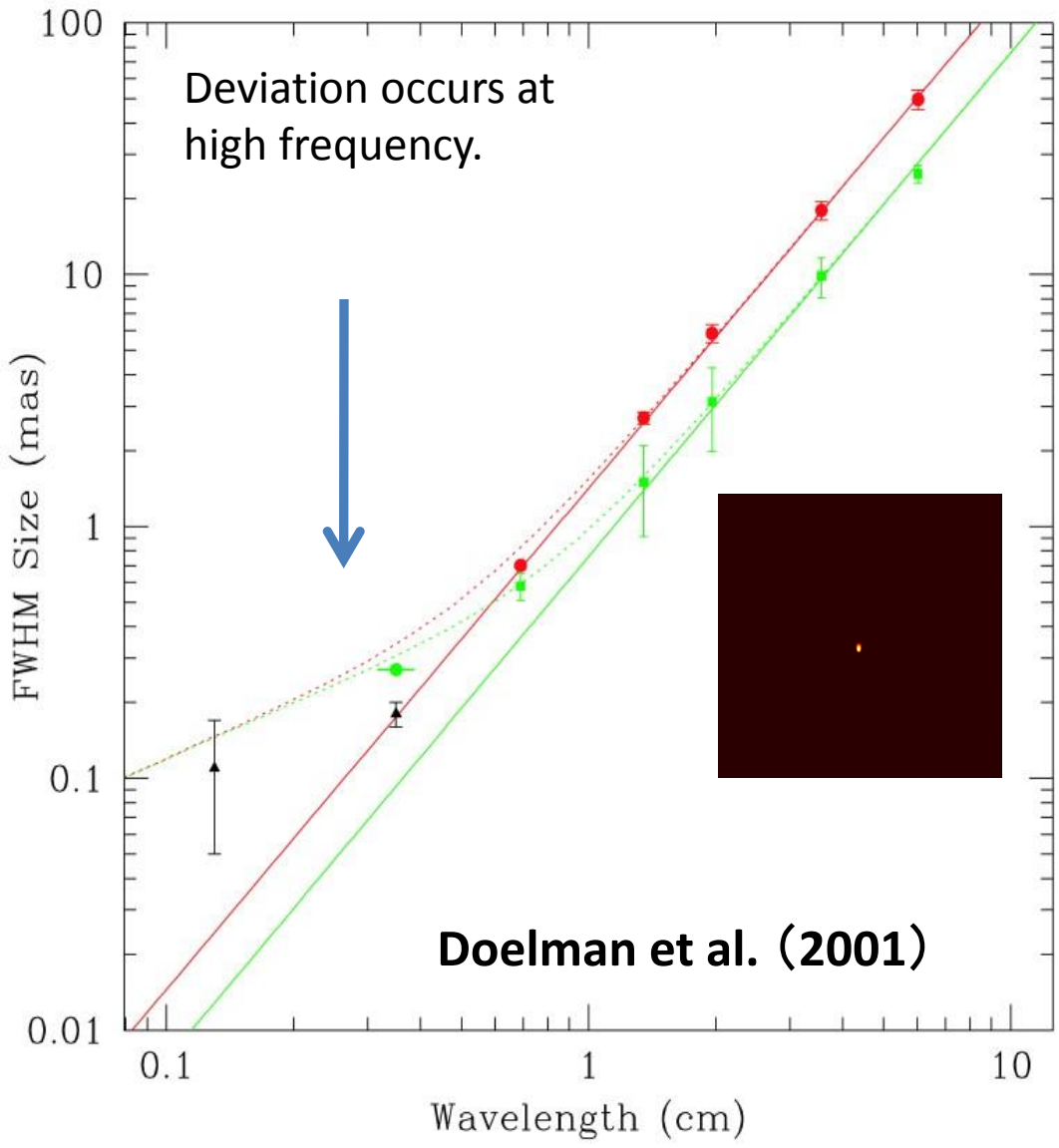
SgrA*, central massive black hole at our galactic center has the biggest apparent size of Rs=6-10μas.
（Schwarzschild case）

SgrA* has been investigated by VLBI again and again with cm to mm wave lengths, but all astronomers failed to get the black hole (shadow) image.

Because the frequency channels they observed were different channel for receiving Black-hole-broadcasting.

So we only have to select the correct broadcasting black-hole channel.

Apparent Size Measurements of SgrA*



At low frequency, SgrA* image is scattered by plasma (∝λ^2).

But

free from scattering

at sub-mm wave length !

So we can expect observe the intrinsic image.

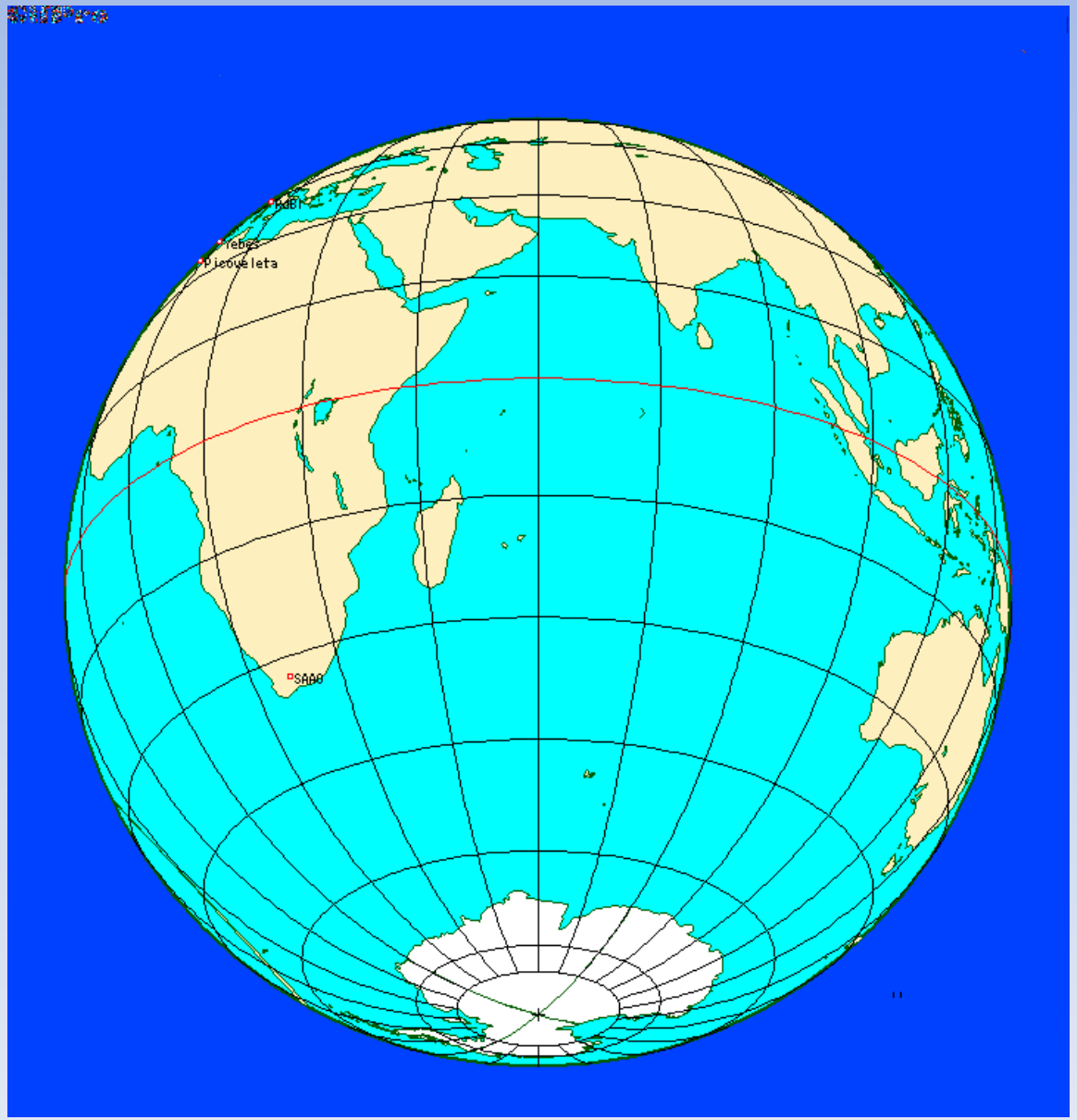
For Imaging a Black Hole:

- The most promising source is SgrA*.
- We need sub-millimeter VLBI observations (230~340GHz) because free from scattering effect.

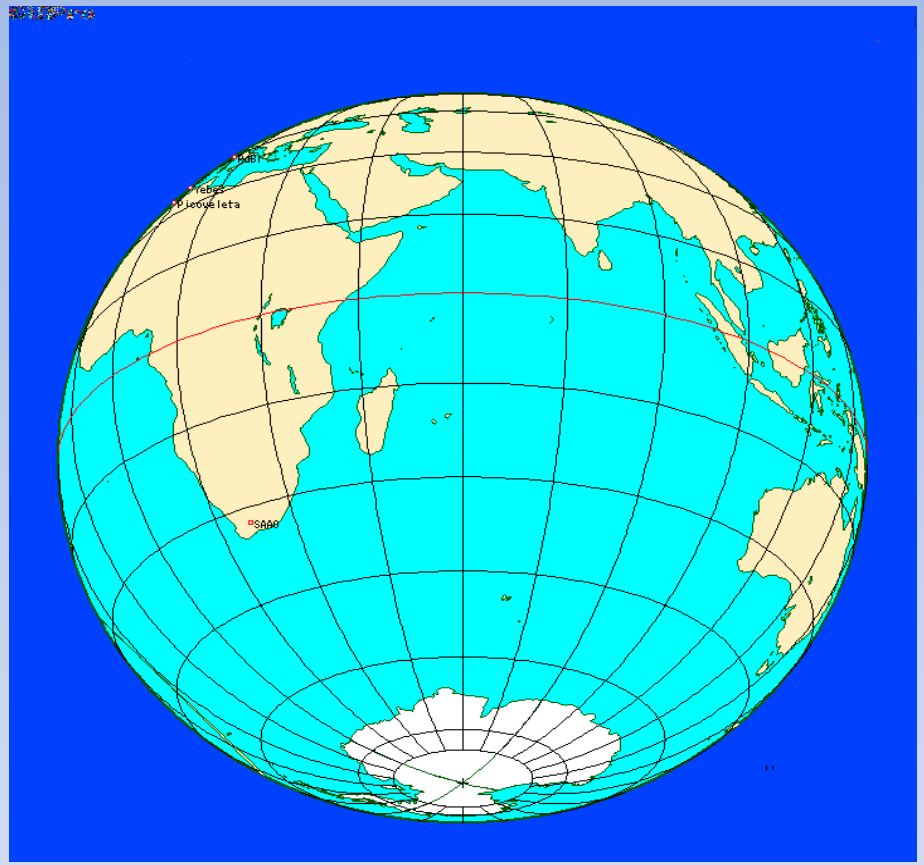
Scattering : not an interstellar but circumnuclear one

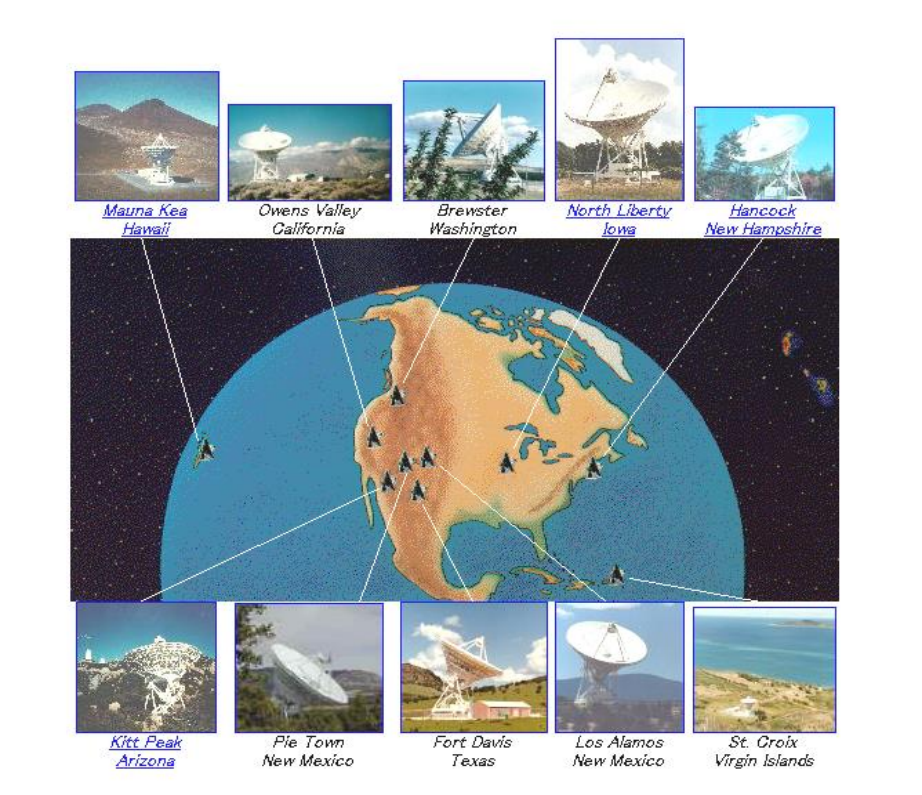
- We need the southern hemisphere array for good uv coverage for SgrA* (10 stations, 8000km extent @230GHz).
- The required sensitivity is already attainable from the viewpoint of present technology.
- We need good sites like that of ALMA for sub-millimeter VLBI array.

The Earth Rotation seen from SgrA* (δ=-30°)



The Earth Rotation
seen from SgrA* (δ=-30°)

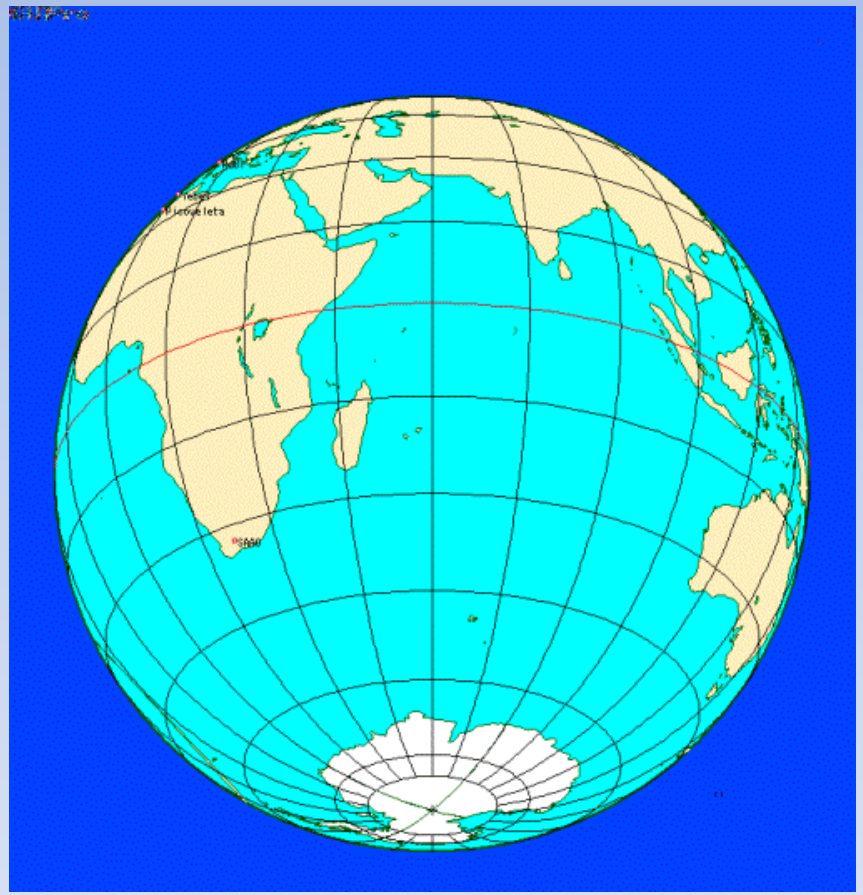


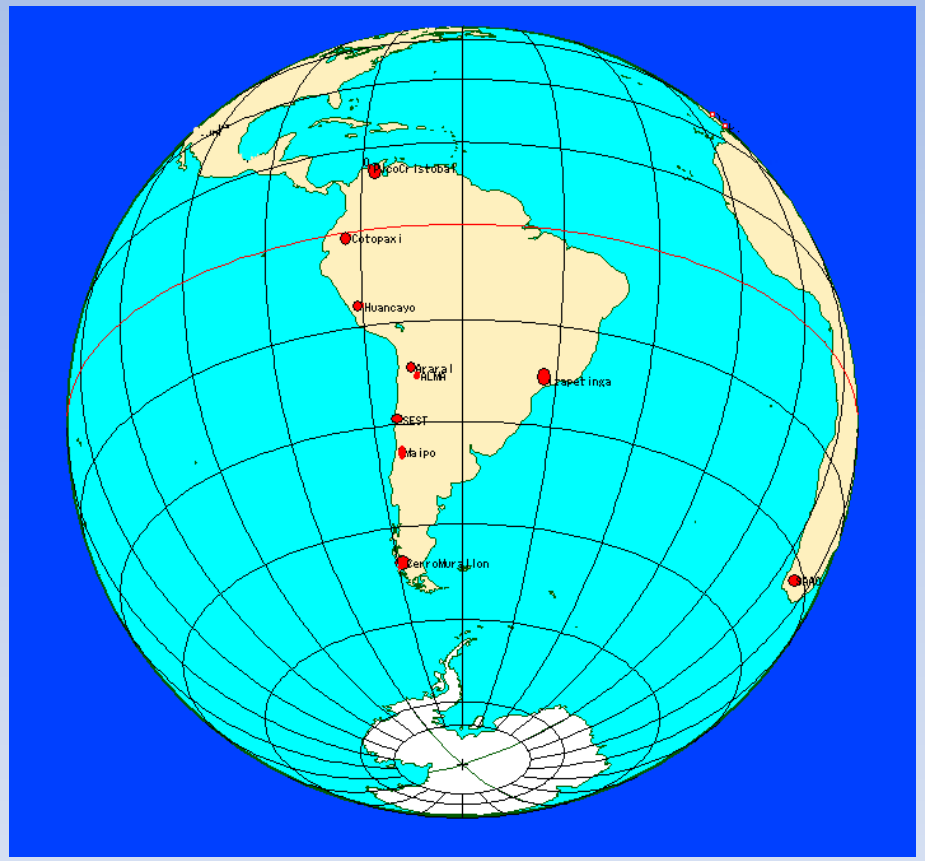


VLBA
(US, North America)

Short observing time, bad condition due to low elevation

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





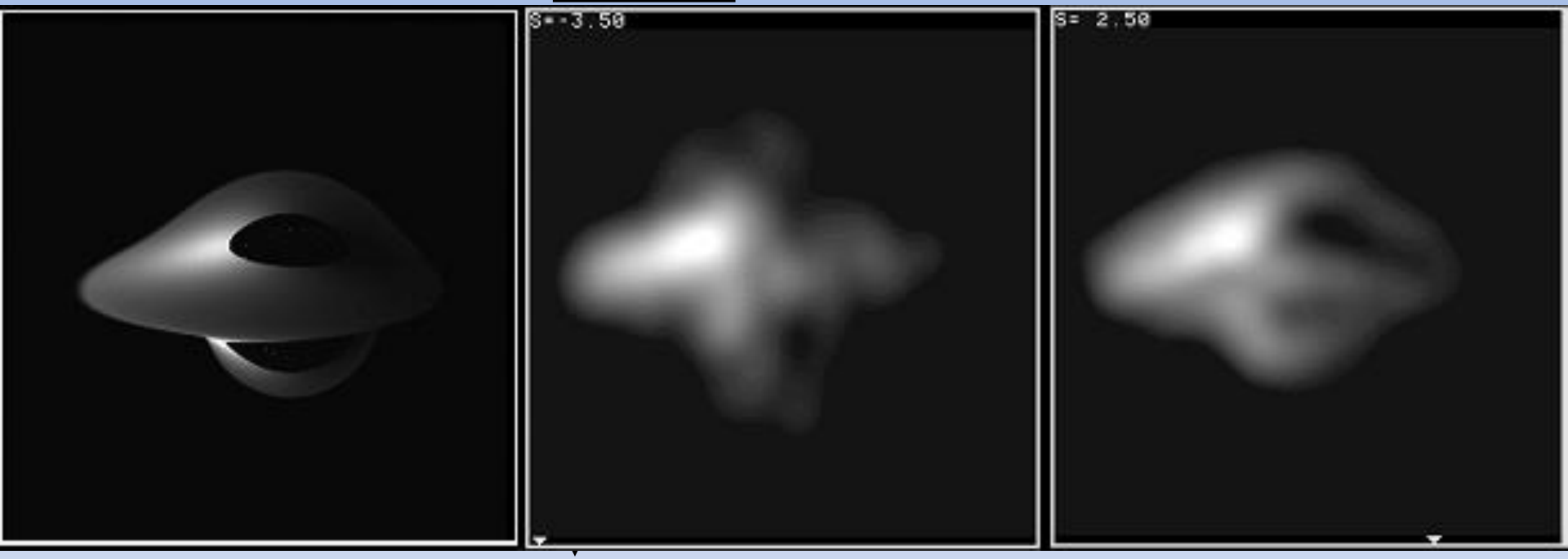
Horizon Telescope @ Andes

Longer observing time, good condition due to high elevation

SgrA* 230GHz
Model Image

The case of
VLBA Location
北半球

The Horizon Telescope
at Andes 南半球



250 μas

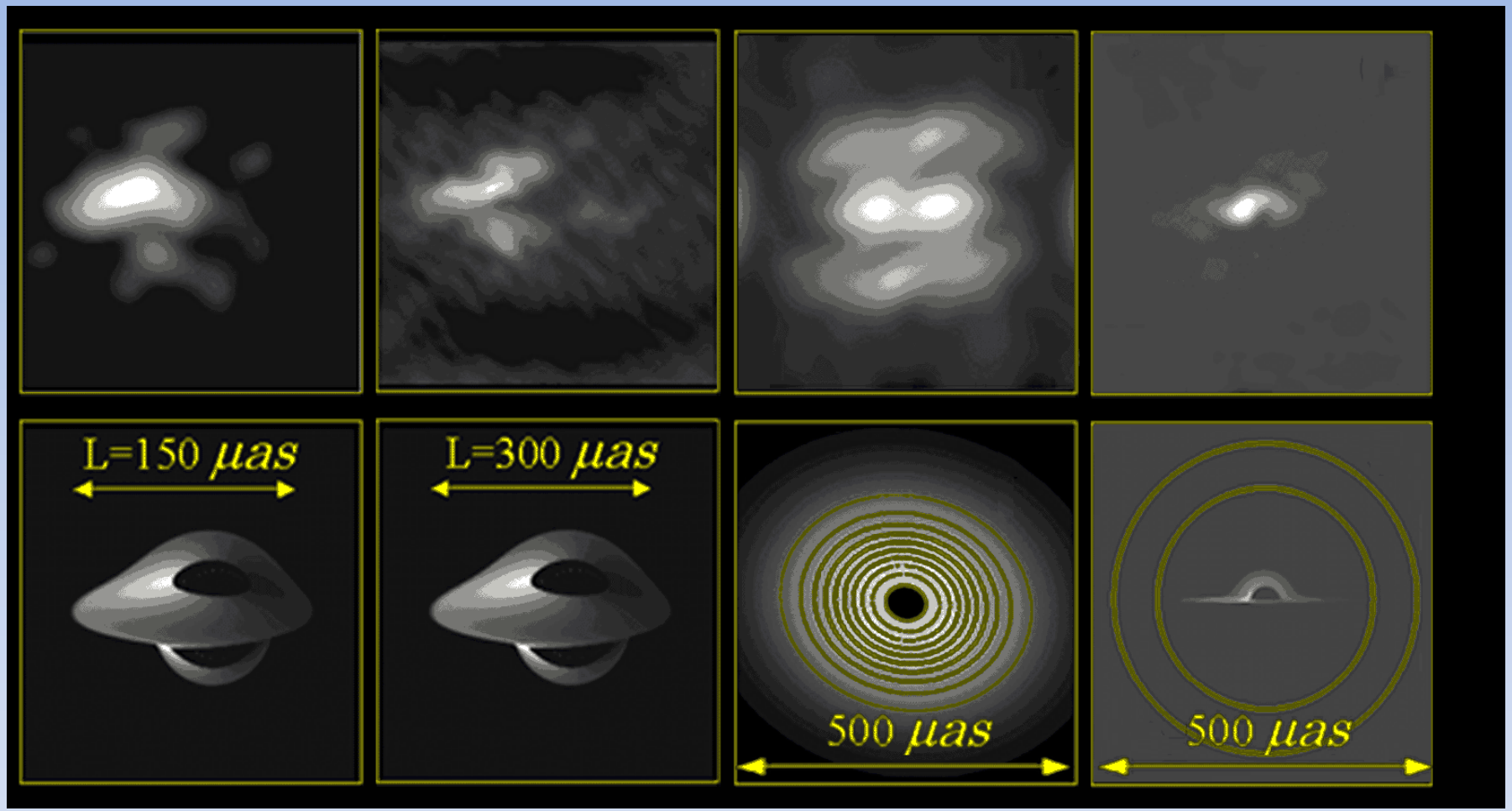
Both array has 10 stations and 8000km Extent, but the better image is obtained from telescopes at Andes.

Here,
we emphasize the importance of shorter baselines in VLBI black hole shadow observations.

simulation (0)

How important shorter base lines in imaging BH?

Even now, longest baselines are available (～8000km), but still difficult to image SgrA* black hole. We need SHORTER baselines!



↑ VLBI Simulation Maps using present sub-mm Telescopes.
Lower Model Images, Upper Resultant maps. {Hawaii, West Coast, ALMA(1 element),＋ Virtual Peruvian + closed SEST }

=Not enough uv-coverage, Lack of shorter base lines＝

Miyoshi et al 2004,2007

simulation (1)

Present longer baselines vs./and Andes shorter ones, with/without p-ALMA

(Miyoshi et al in prep.)

Telescopes around ALMA give us shorter (<2000km) baselines!

Huancayo

Peru
Huancayo
3300m

1000km

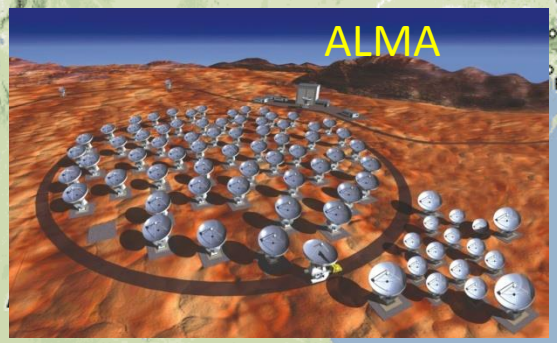
Near Bolivia La Paz **5300m**
The highest Ski Slope in the world
Cosmic Ray Observatory

Cerro Chacaltaya

ALMA

?Mirabel station 4600m

La Silla 2400m
SEST15m鏡 (Closed, but alive)



dDog Consulting, MapLink/Tele Atlas, Europa Technologies - 利用規約

観測局候補　B=1024MHz

きゃらばん

EHT

No	緯度	経度	h	D	eff	Tsys	bit	Station Name		
1	-16.3445	-68.1255	5300	20	0.5	150	2	Chakaltaya, LaPaz, Bolivia	きゃらばん固定局	
2	-12.0143	-75.2792	3370	20	0.5	150	2	Sycaya, Huancayo, IGP,(Peru)	きゃらばん固定局	
3	-29.2500	-70.7330	2400	20	0.5	150	2	SEST		
4	-23.0000	-67.4000	5000	70	0.7	80	2	Phased ALMA		
5	-11.5248	-75.8987	4000	4	0.6	150	2	La Oroya	きゃらばん移動点	
6	-12.1461	-75.6126	4800	4	0.6	150	2	COSMOS	きゃらばん移動点	
7	-33.7340	-69.8801	6000	4	0.6	150	2	Sanchago Cerro Marmolejo Chirri	きゃらばん移動点	
8	-16.3988	-71.5369	3000	4	0.6	150	2	Arequipa	きゃらばん移動点	
9	-20.4341	-41.7966	2890	4	0.6	150	2	Pico De Bandeira Brazil	きゃらばん移動点	
10	-13.5898	-72.8030	4000	4	0.6	150	2	Avancay	きゃらばん移動点	
11	-11.9182	-75.0464	5450	4	0.6	150	2	A	きゃらばん移動点	
12	-11.5224	-75.9066	3800	4	0.6	150	2	B	きゃらばん移動点	
13	-11.6080	-76.2280	4800	4	0.6	150	2	C	きゃらばん移動点	
14	-17.4383	-65.6148	4000	4	0.6	150	2	D	きゃらばん移動点	
15	19.8265	-155.4744	4200	6	0.7	150	2	SM SMA		○
16	-18.0497	-70.2768	400	10	0.8	150	2	TK Peru,Takna	きゃらばん移動点	
17	-15.8433	-70.0236	4000	10	0.8	150	2	PU Peru, Puno,Titicaca	きゃらばん移動点	
18	-23.9900	-65.4000	4200	10	0.8	150	2	LL LLAMA-1,Argentina	きゃらばん移動点	○
19	-81.5000	-80.3700	4100	10	0.8	150	2	DA Dome Argus （南極）		
20	18.9778	-98.3087	4600	50	0.3	150	2	LM LMT, Mexico Puebla, Sierra Negra		○
21	34.7416	-111.4013	1700	10	0.3	150	2	AR SMT, Arizona Radio Observatory		○
22	36.5100	-120.7618	2160	10	0.3	150	2	CA CARMA,Cedar Flat 7200feet		○
23	34.7416	-111.4014	2250	15	0.5	150	2	Pd 15m, Plateau de Bure interferometer		○
24	38.8026	-116.4200	2850	30	0.5	150	2	IR 30m, IRAM, Pico Veleta		○

7局

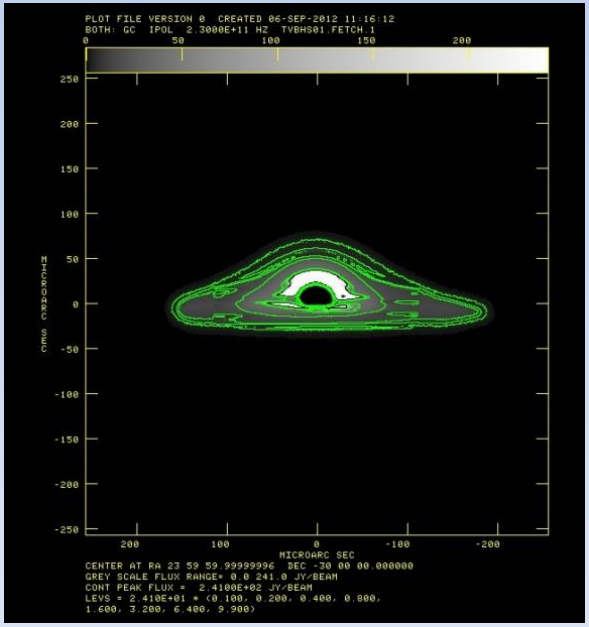
LMT含む

13回移動

Phased ALMAの
有無で比較（1）

U-V面を埋めること
が重要。

像モデル：
降着円盤中心のみ明るい

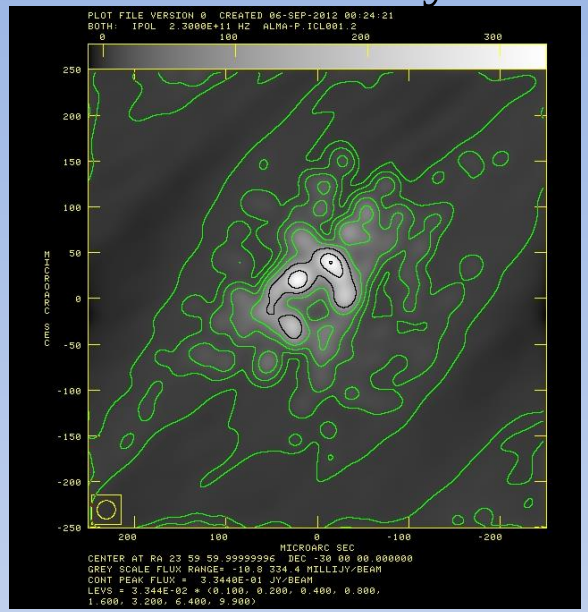


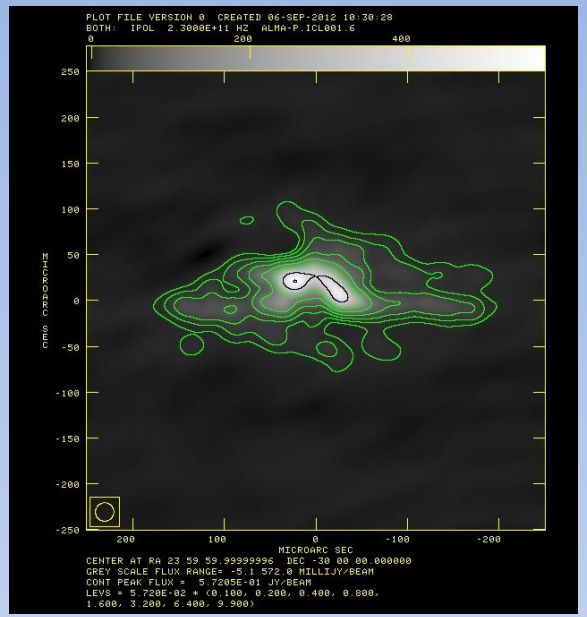
EHT only

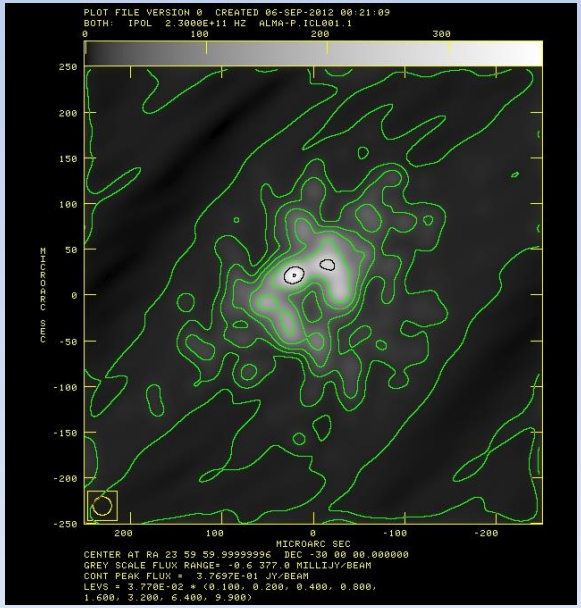
EHT&CARAVAN

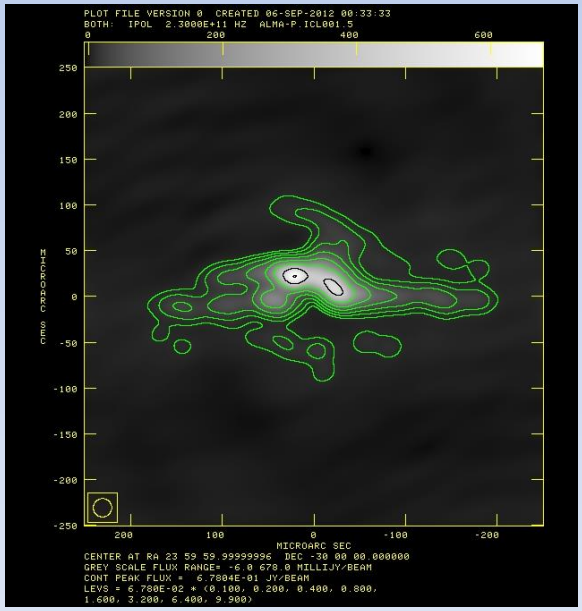
Without pALMA

With pALMA









EHT（超長基線構成）では、あたかもシャドーが見えたかのような像になるが、
間違った構造を示す。そこにCARVAN(短基線uv）が参加すれば、相当に改善される。

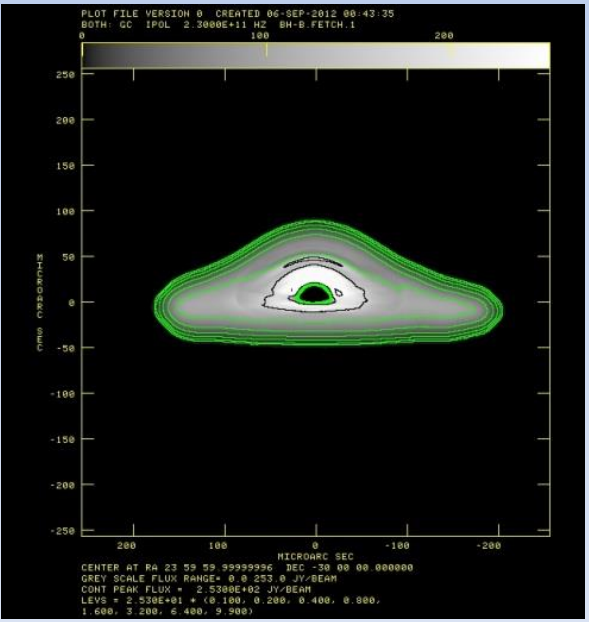
Phased ALMAの
有無で比較（2）

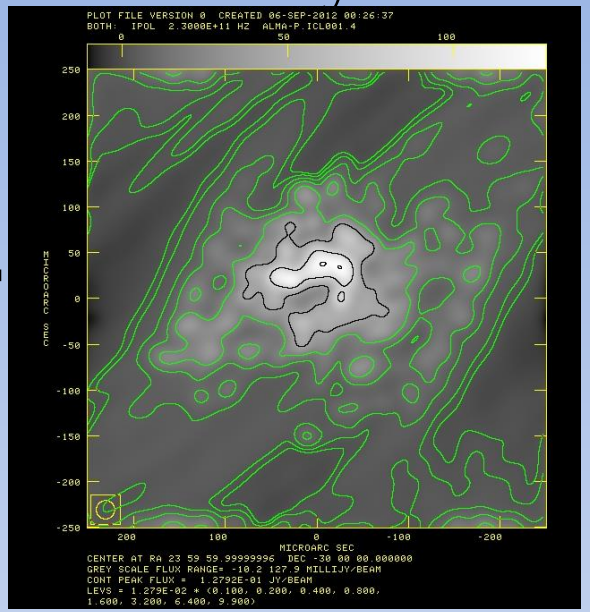
EHT only

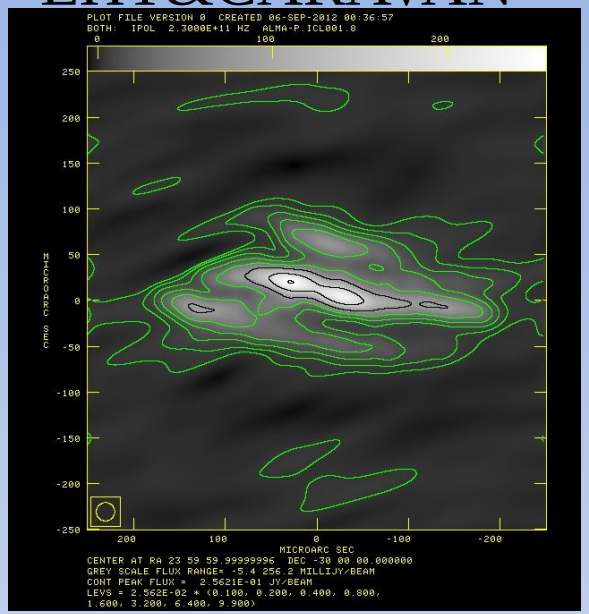
EHT&CARAVAN

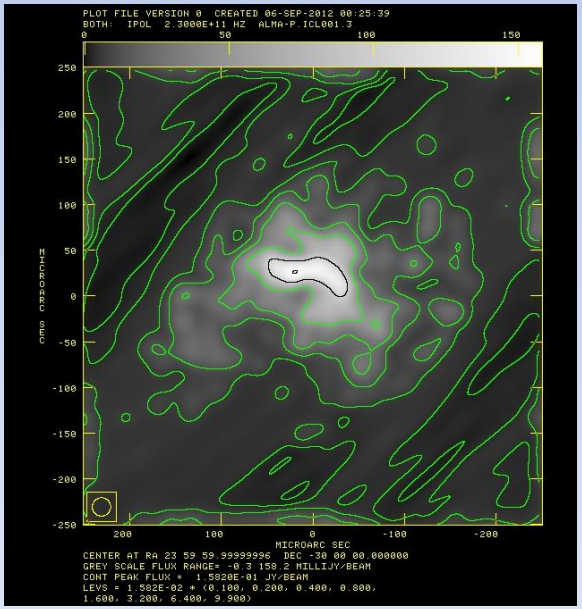
Without pALMA

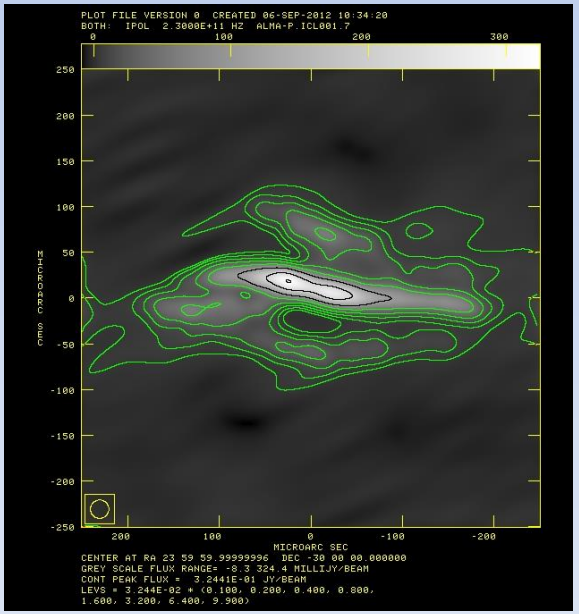
With pALMA











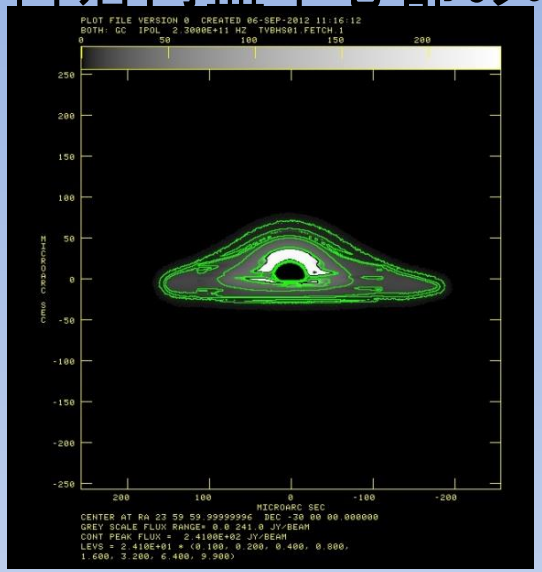
像モデル：
降着円盤全体が明るい

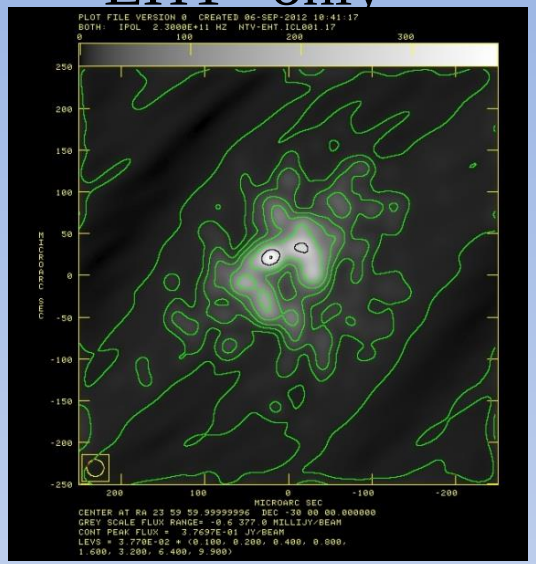
EHT（超長基線構成）では、あたかもシャドーが見えたかのような像になるが、
間違った構造を示す。そこにCARVAN(日本）が参加すれば、相当に改善される。

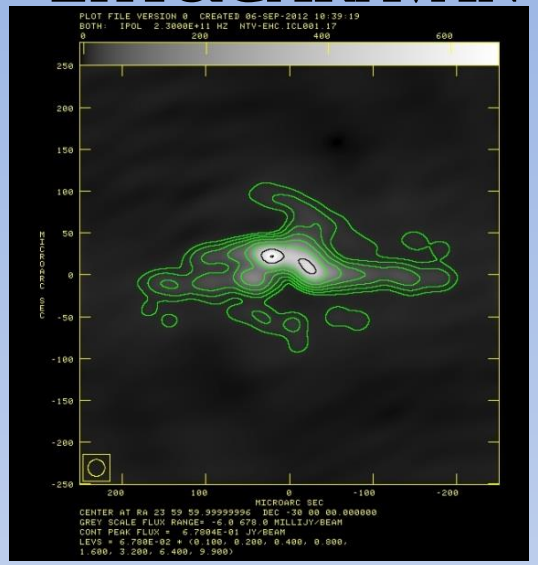
降着円盤中心部のみ明るい

EHT only

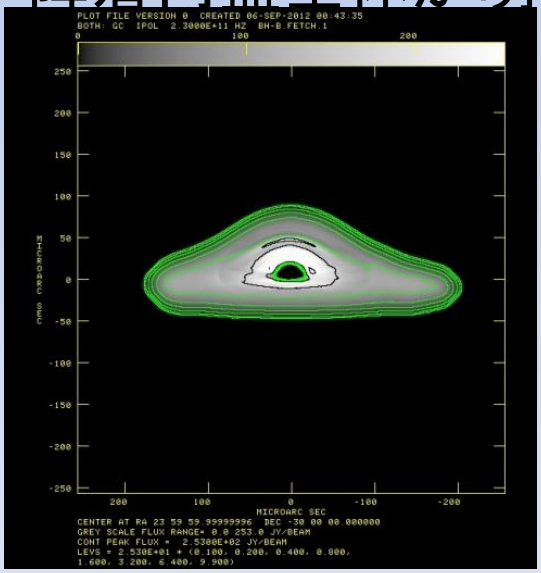
EHT&CARAVAN

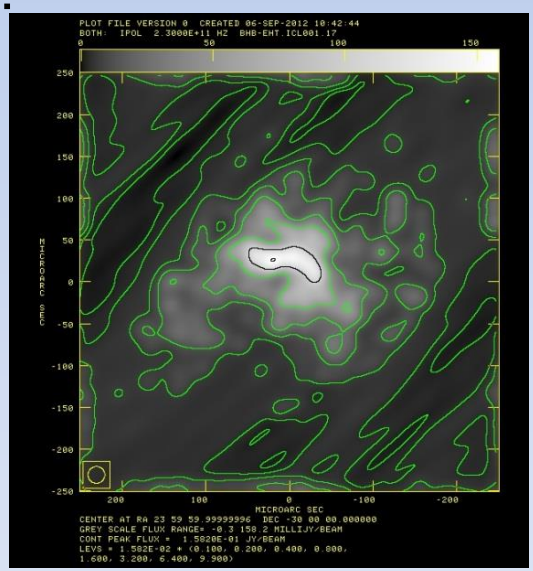


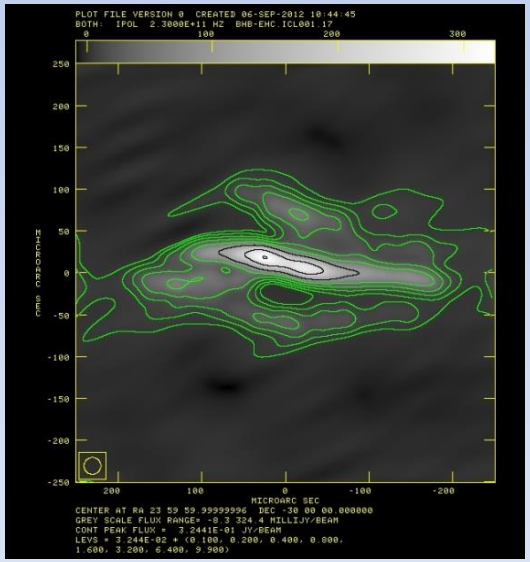




降着円盤全体が明るい:







図はPhased ALMA込み: CARAVAN(日本)の参加が有効策

Image simulations（3）

局配置を仮定し、像モデル・天体位置を変えての像合成性能をsimulationした。
その結果、
（1）EHTではブラックホール周辺像を正しく解像することが相当に困難。
（2）仮にPhased ALMAがEHTに参加しても、その困難度は変わらない。
（3）Caravan単独ではブラックホール周辺を像として捉えるのは難しい。
（4）仮にPhased ALMAがCaravan に参加しても、その困難度は変わらない。
（5）EHTとCaravan が協力すると、ブラックホール周辺像を正しく解像する可能性が高い。
（6）EHTとCaravan が協力、さらにPhased ALMA が参加しても、ブラックホール周辺像の質の改善にはあまり寄与しない。
という、6つが判った。

これは、「良い画質を得るにはu-v カバーを良く埋めることが肝心である」という干渉計像合成の常識どおりの結果である。ブラックホールとその周辺像を画像として正しく得るには数千キロの長基線ばかりではなく、短基線の存在が必要である。

Phased ALMAがVLBIに参加した場合の貢献は検出感度に対するものであり、観測可能天体数を増すことに役立つ（ブラックホールの解像性能の向上ではない）。

モデル1～5(上から)

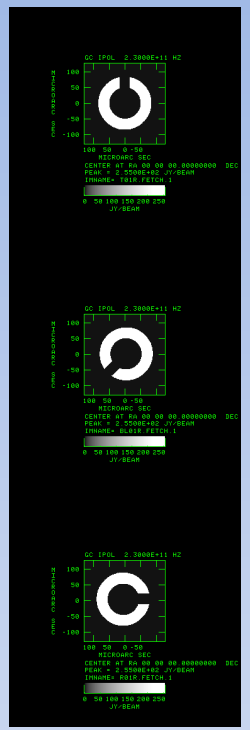
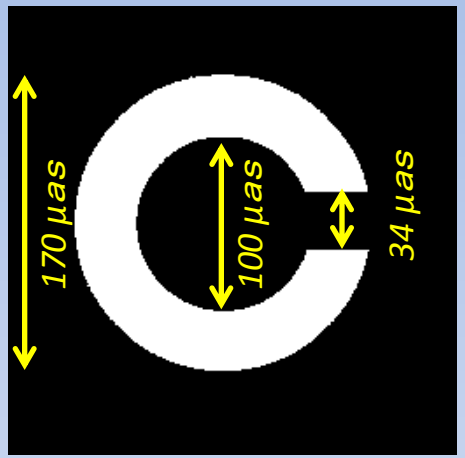
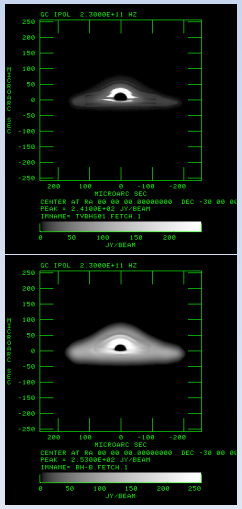


Image Models：

1) Total flux density of each model　3 Jy



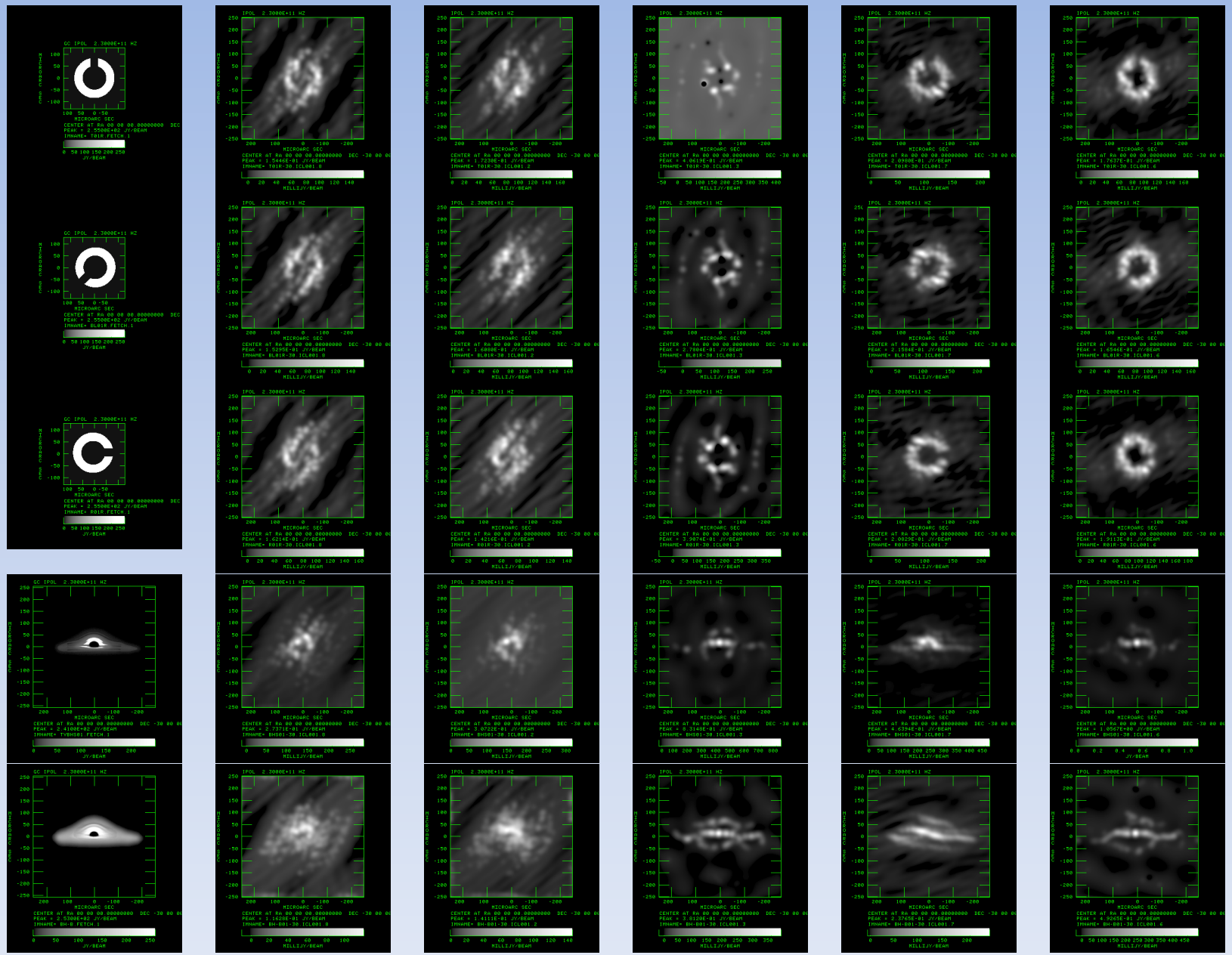
2) モデル1,2,3は“視力検査表”から。
サイズは左記のとおり。
切れ目はモデル1，2，3の順に、
PA＝0，135，270°である。
リング上では一様の輝度とした。



3) モデル　4,5は降着円盤をほぼ真横（80°）で見込むもの。
中心部分は円盤をRIAFモデル、相対論的効果をレイトレーシングで追って計算。しかし、周辺部をフォトショップで加筆した図である（=つまり、この像モデルには物理的根拠は無い）。
輝度が最高輝度の半分になる位置は100μas（東西方向）で同じ。
ただし、周辺での減光のパターンが異なり、モデル4では中心部分のみ明るく、モデル5では円盤部分全体が明るくなるようにした。
ブラックホール・シャドーは差し渡し、40μasである。

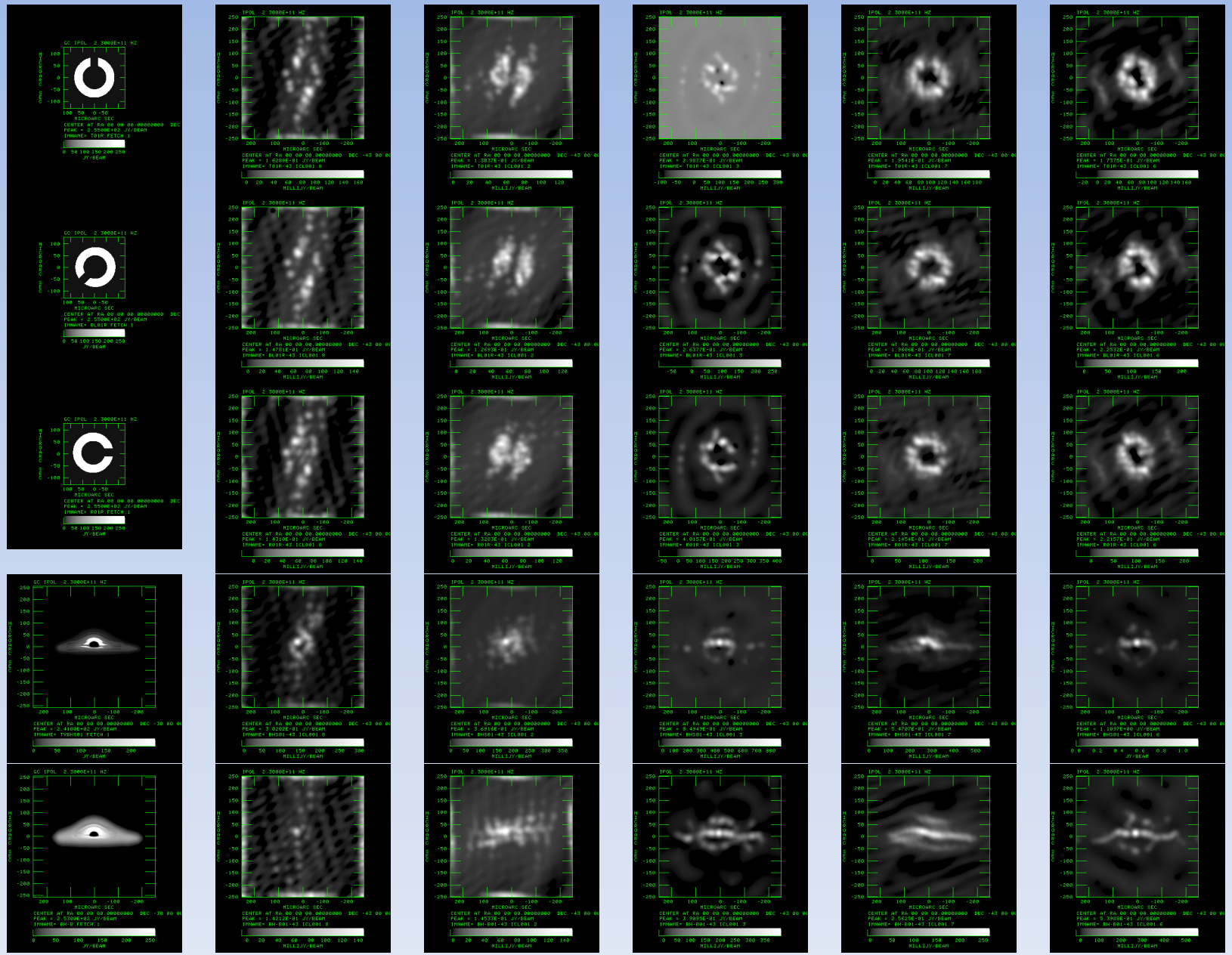
δ=-30° (SgrA*)

EHT-only | EHT+pALMA | Caravan-only | Caravan+EHT | CAR+EHT+pALMA



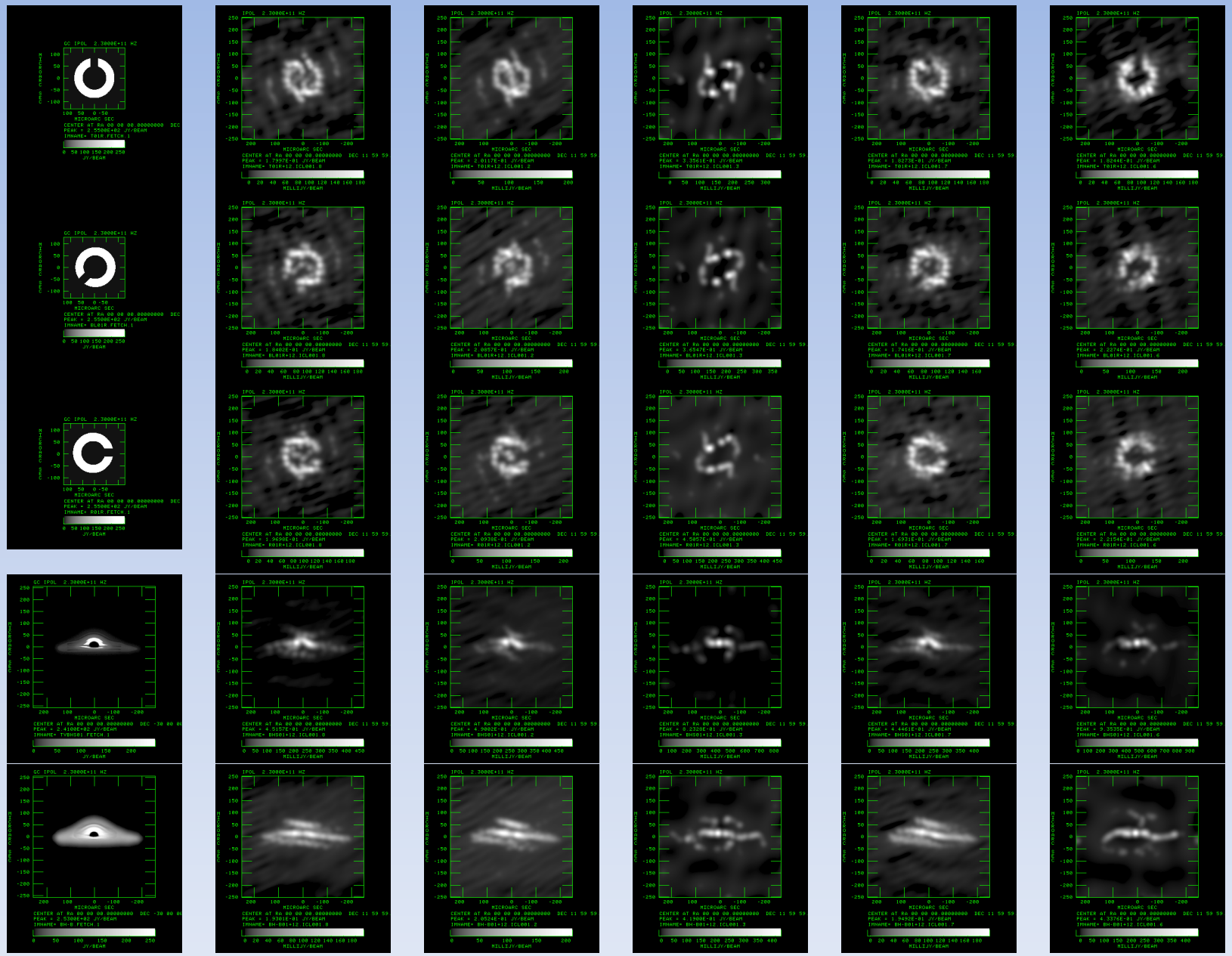
δ=-43° (CenA)

EHT-only | EHT+pALMA | Caravan-only | Caravan+EHT | CAR+EHT+pALMA



δ=+12°
(M87)

EHT-only | EHT+pALMA | Caravan-only | Caravan+EHT | CAR+EHT+pALMA



Andes around ALMA is surely suitable place of the sub-mm VLBI network
with shorter baselines.

A First Black Hole Imager at Andes:

(0) Cost down is the most important now!

(1) Larger Dish for Sensitivity at Chacaltaya & Huancayo. must be with low cost!

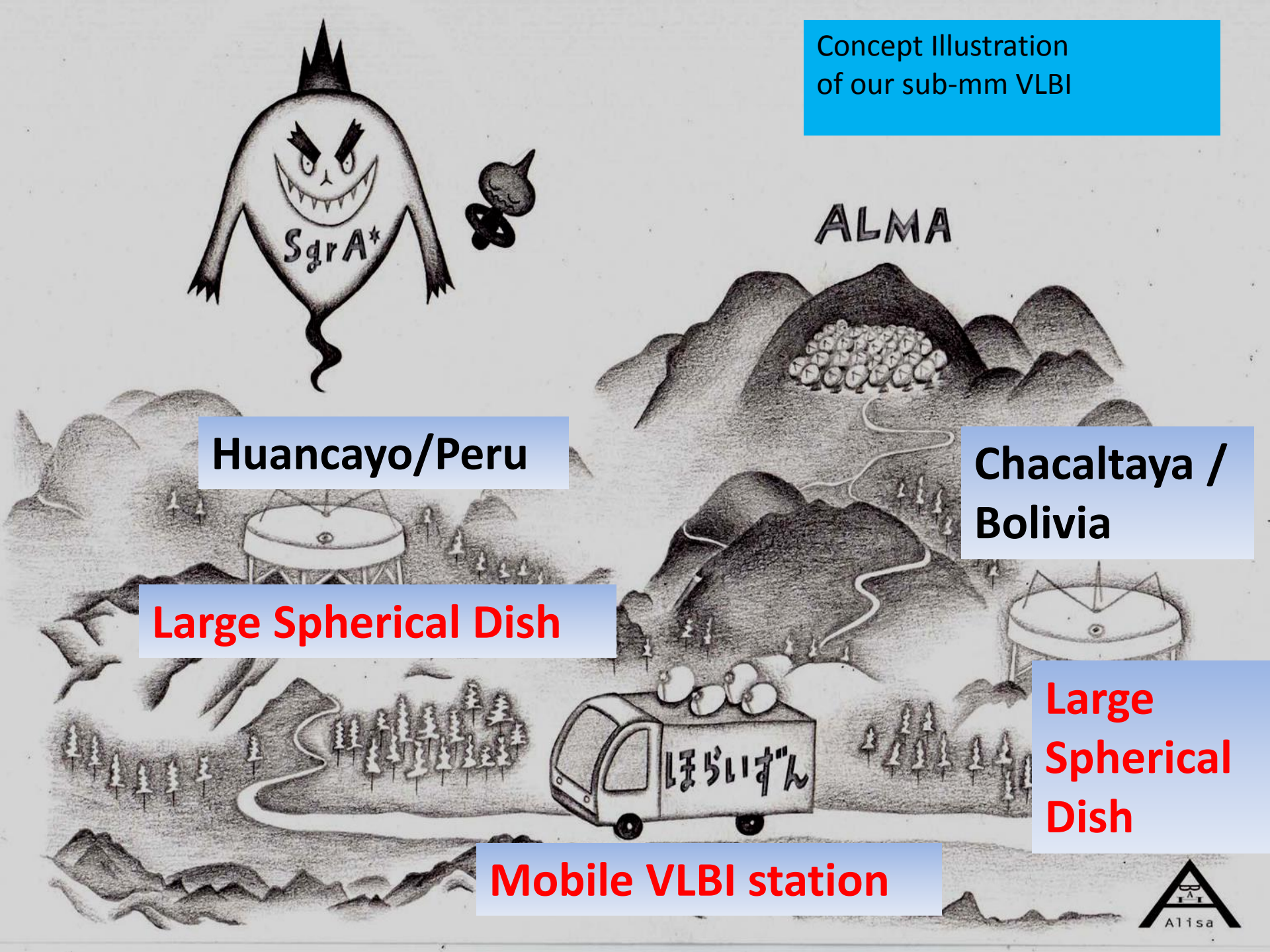
(2) Usage of Mobile Small Dish for collecting uv-cover. Large uv-cover with low cost!

(3) Dedicated to SgrA*, aiming at the detection of the black hole shadow (black hole horizon).

We want to observe many AGN. Dedication is only for low cost!

Cost down!

Concept Illustration
of our sub-mm VLBI



A First Black Hole Imager at Andes:

(1) Larger Dish for Sensitivity at Chacaltaya & Huancayo.

Chacaltaya
Cosmic ray Observatory
At 5300 m (La Pas, Bolivia)
Here we wish to build a
new radio telescope.

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.

The other site candidate, Huancayo in Peru

32-m telecommunication antenna
-- Not for sub-mm observation --

A First Black Hole Imager at Andes:

(1) Larger Dish for Sensitivity

at Chacaltaya & Huancayo with low cost!

We need drastic cost down！
大型固定局を安価に作る方法（思いつき）

現在の60億円規模の予算額は固定局にALMA12mアンテナと同等のものを購入して、建設する場合の額である。

本計画では、実現のため、装置のコストダウンは重要と認識している。

固定局のコストダウンについては、全く、思いつきの段階ではあるが、以下の4つを紹介する。

Idea１：Reuse of SEST15m

（１）main mirror seems good, NO-receiver, NO-drive control,　Need of repair of controller of sub-reflector at our visit in 2009.

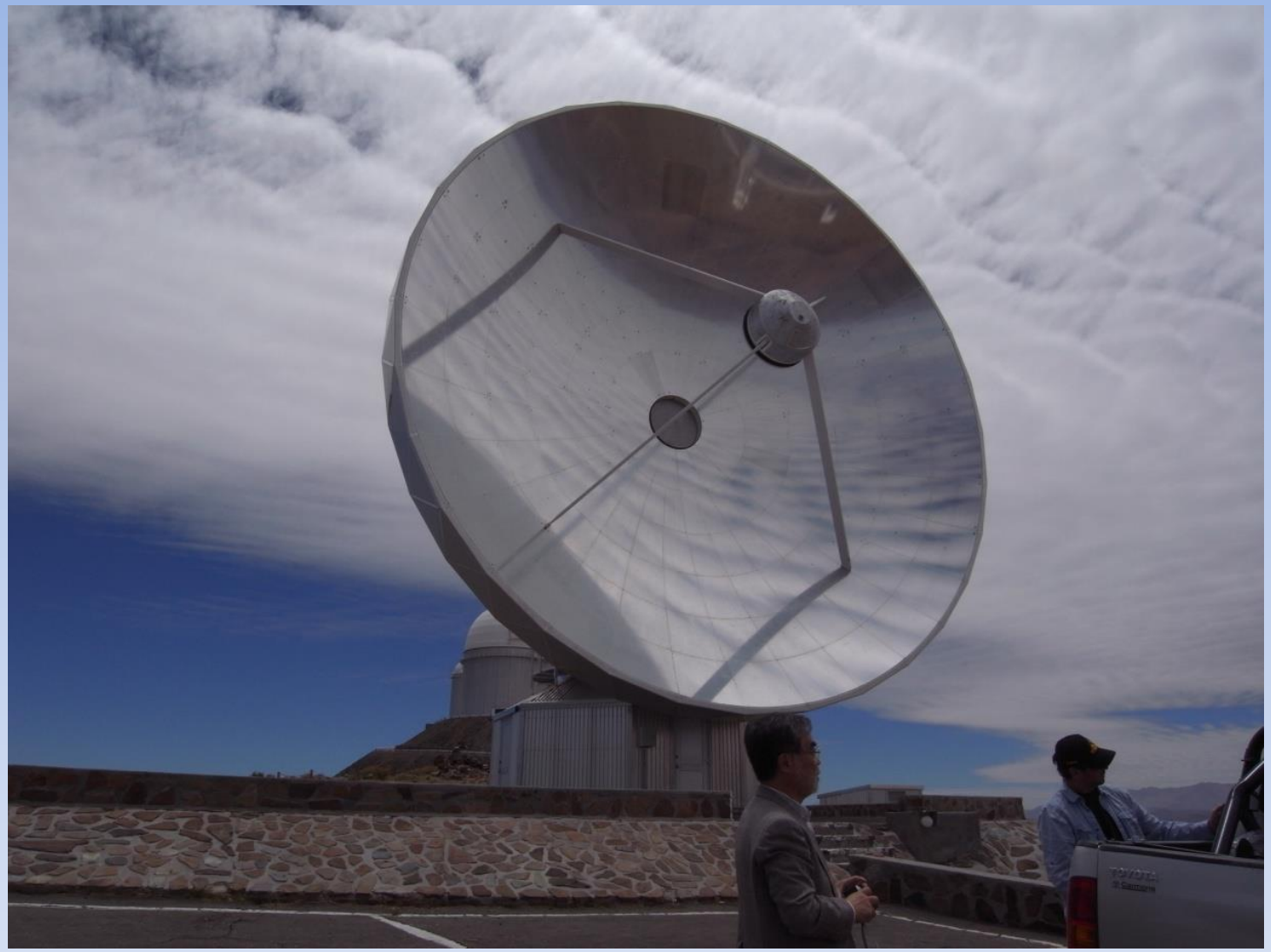
（２）Repair fee 2億円? (2×10^8Yen)??

management fee at old days 年2億円(2×10^8Yen/year)

（by Dr. R. Booth in 2004)

（３）The present site is not so good (h=2400m). Movement to higher site (h>4000 m)

整備、移設で2+2=4億円 (4×10^8Yen)？？

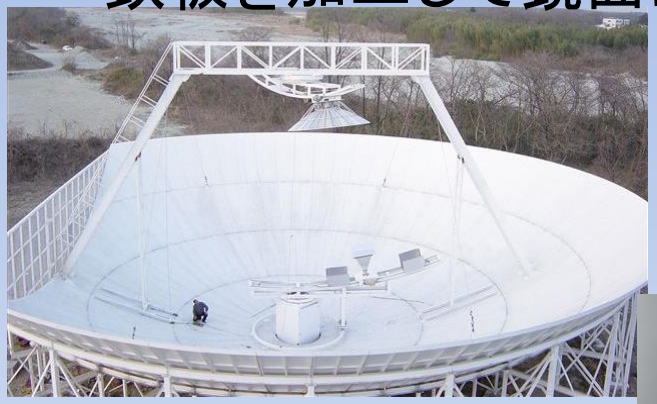


SEST 15m telescope at Li Silla Chili is still alive though closed at 2003. (our visit 2009.11.09)

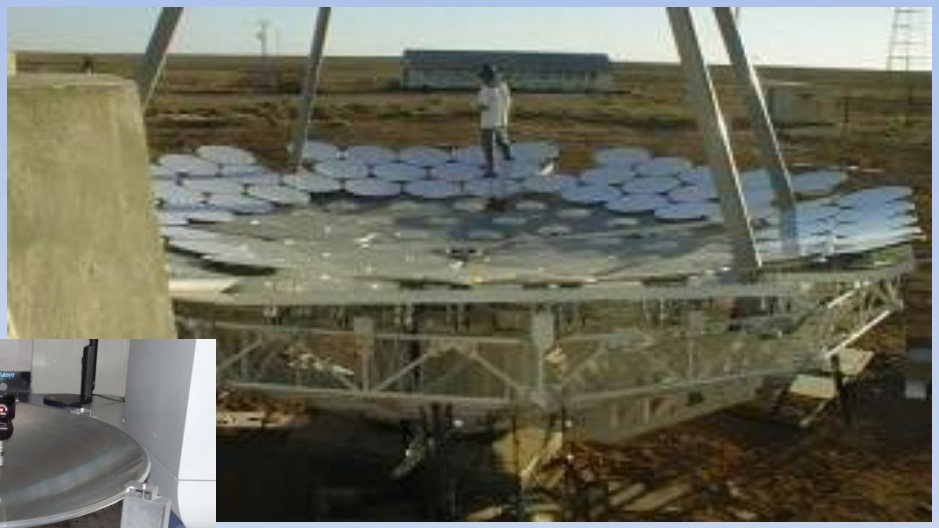
Idea 2：sub-mm fixed spherical telescope

（original = Prof. Akabane at ‘70）

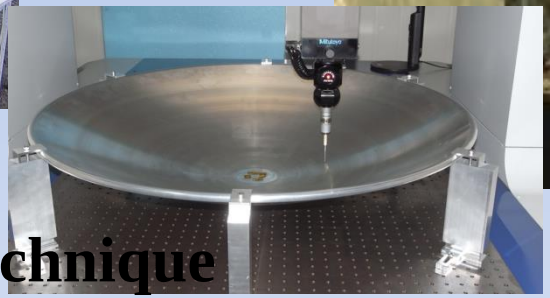
Waseda 30m 固定球面鏡
（Daishido・科研費A、10GHzまで）
鉄板を加工して鏡面に



カンガルー望遠鏡：CFRP80cm
球面鏡を並べて10m口径に。



へら絞りアンテナ
By lancet spinning technique



へら絞り小型球面鏡（60μm精度・1m・4万円）を敷き詰め、地面は見ないよう受信ホーンを工夫、熱変形対策に、日射防御シートを主鏡にかぶせる。30m開口面を埋める小球面鏡群1100万＋調整機構2000万+全体構造5000万＝8000万、ガラだけなら約1億円?????
調整は現地で人海戦術で安くする (ex.オンサラ20mは人海戦術)。

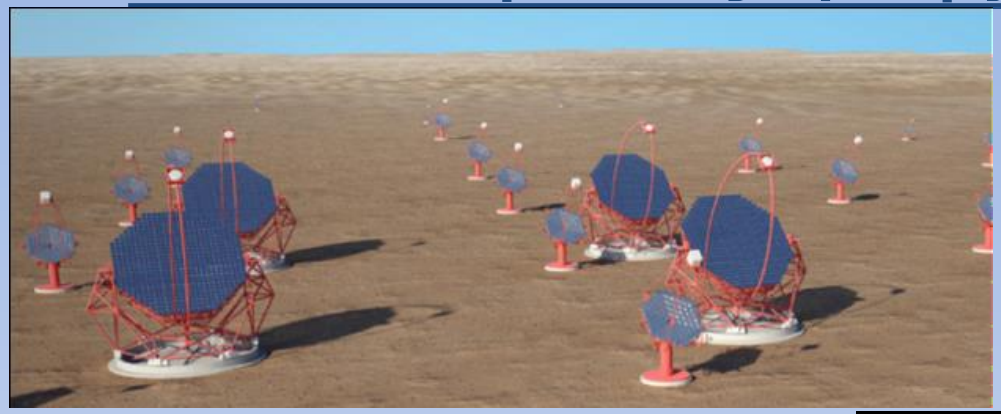
Idea 3：Learn from Kyoto Univ. Project

http://www.kusastro.kyoto-.ac.jp/psmt/image/tel_movie.wmv

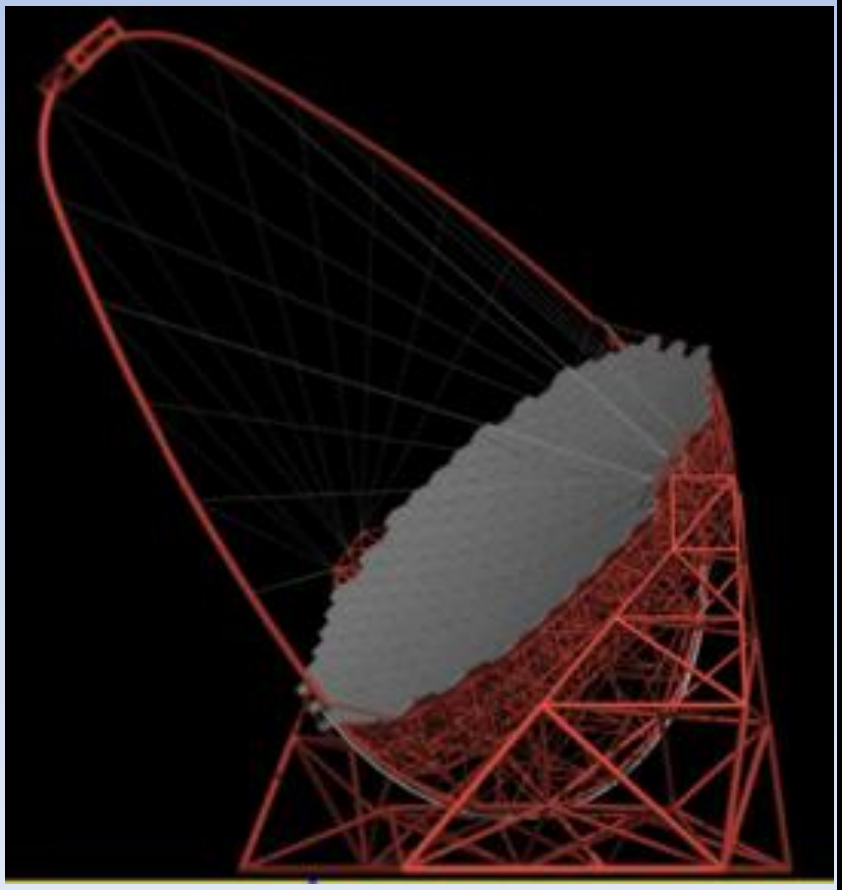
京大3.8m鏡
（概算要求数億円）
まねて、安く、作る。
10億円以下になる?
（根拠なし）

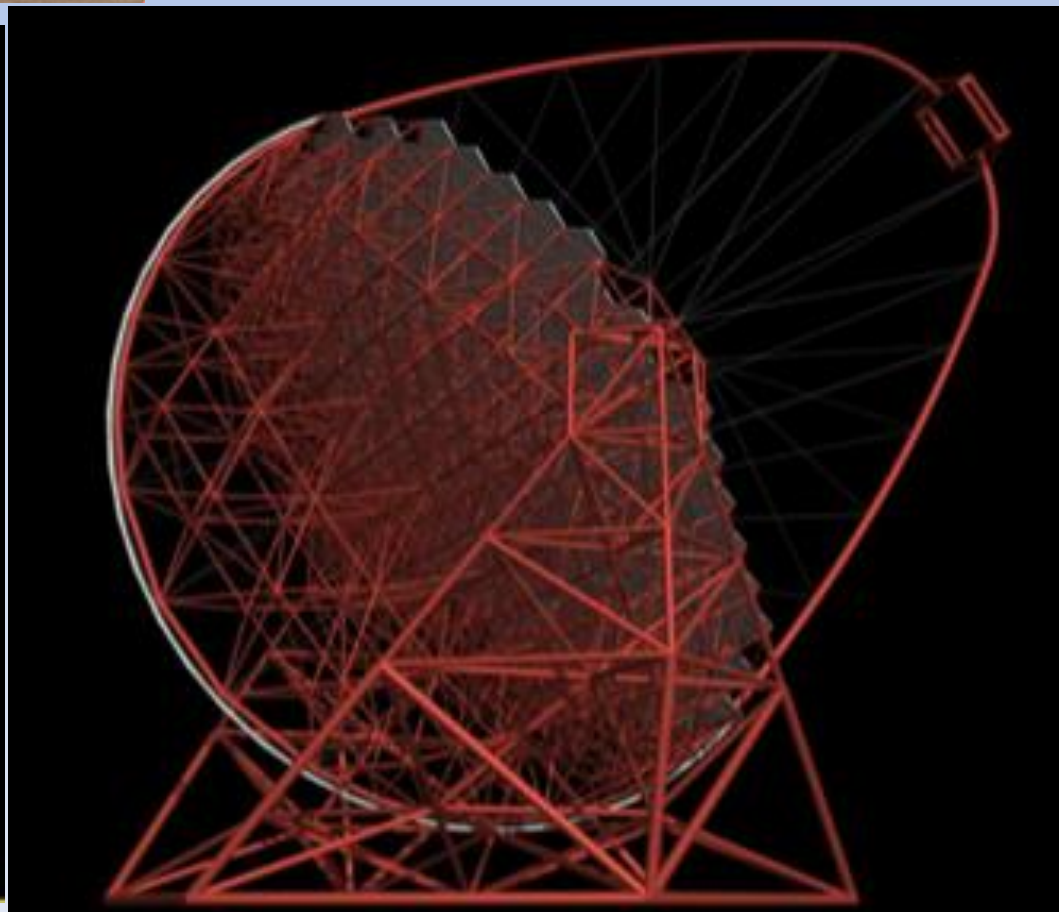
Reber’s Radio telescope

Idea4: 東大宇宙線研CTAと組む。



23mチェレンコフ望遠鏡2億円で。
6m鏡を5千万円で。
必要追尾精度はサブミリVLBI用と同じ。





A First Black Hole Imager at Andes:

(2) Usage of Mobile Small Dish for collecting uv-cover. Large uv-cover with low cost!

We learned from space VLBI!

=> HALCA was a mobile VLBI station in space.

=> Caravan includes a mobile VLBI station in Andes!

There are Convenient Ways in Peru-Bolivia Andes:

We need no special motor vehicle like a heavy tank or an armored car for transporting our mobile radio telescope.
望遠鏡移動にあたって戦車・装甲車などの
特殊車両は必要ありません。

A Main Line at 4800m Sea-Level in Peru: Very Large Vehicle, People in Casual Wear, and Children (2003).

East-west traversing road is now constructing in South America.

Geodetic VLBI mobile station was developed by NICT.

NiCT 鹿島VLBIニュース

第115号 平成19年12月 5日

独立行政法人情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター
IVS技術開発センター発行
TEL 0299-84-7142 FAX 0299-84-7159
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、ダイプレクサ等を収めている。

図2 2007年12月5日に実施したフリンジテストの様子。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。

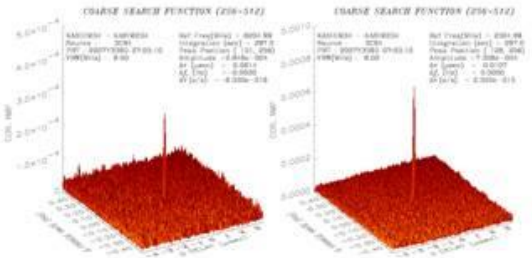


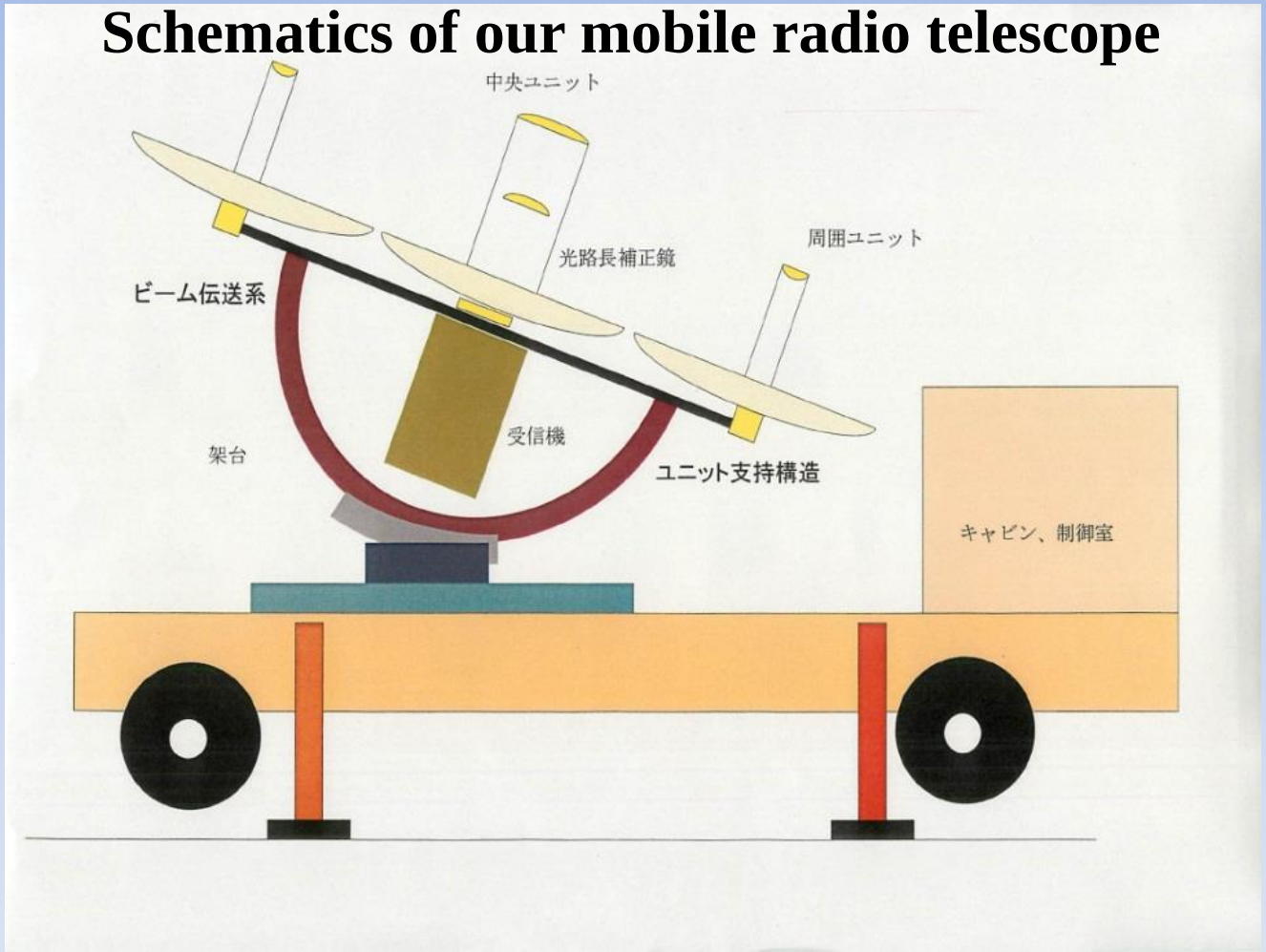
図3 2007年12月5日のVLBI実験で検出されたクワッドリッジホーンアンテナによるS/X初フリンジ(左がXバンド、右がSバンド)。

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。この測定精度を達成するためには、できるだけ既知の誤差要因を取り除くことが重要で、その意味で電離層内での位相速度が周波数に依存して変化する“伝播遅延誤差”軽減のため、フロントエンドのS/X化が不可欠です。

これまでに、CARAVAN2400をテストベッドとして、広帯域クワッドリッジホーンアンテナ(図1)と超小型で高性能の常温LNAを用いたフロントエンドの開発を進め、2007年12月5日に34mアンテナとCARAVAN2400との間で、S/X双方での初フリンジ検出に成功しました(図2、3)。今後、開発したフロントエンドを用いた測地実験の実現に向けてさらに開発を進めていく予定です（RI&AI記）。

A mobile sub-mm radio telescope with low cost

- **D：4～5m**



“車上観測”or“地面基礎設置”？　要検討。

Mount for suitable for our mobile use was already developed in Japan by an optical astronomer!

Kurita Mount（ULT－1）

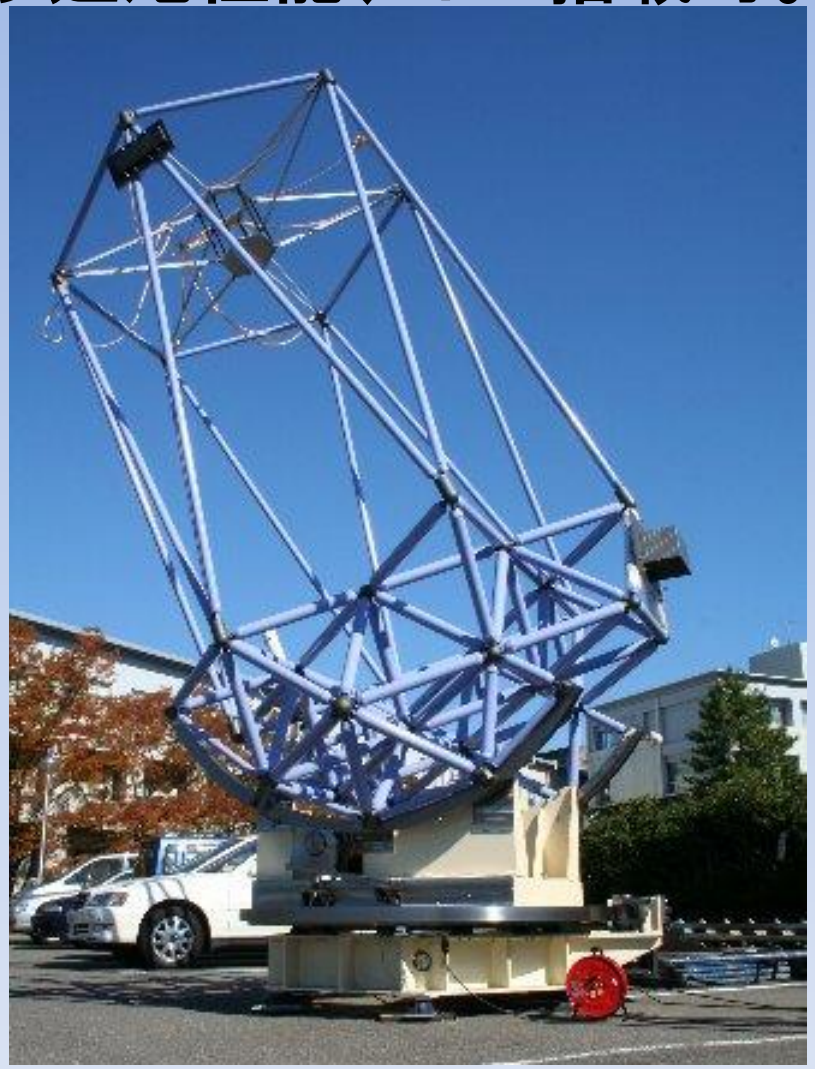
- Designed for a D=2.5m optical telescope.
- Design with considering mobility.
- Ultra light weight with truss structure

  -- <5 ton, about 10 % of that of conventional telescope mount --
- Cost Down

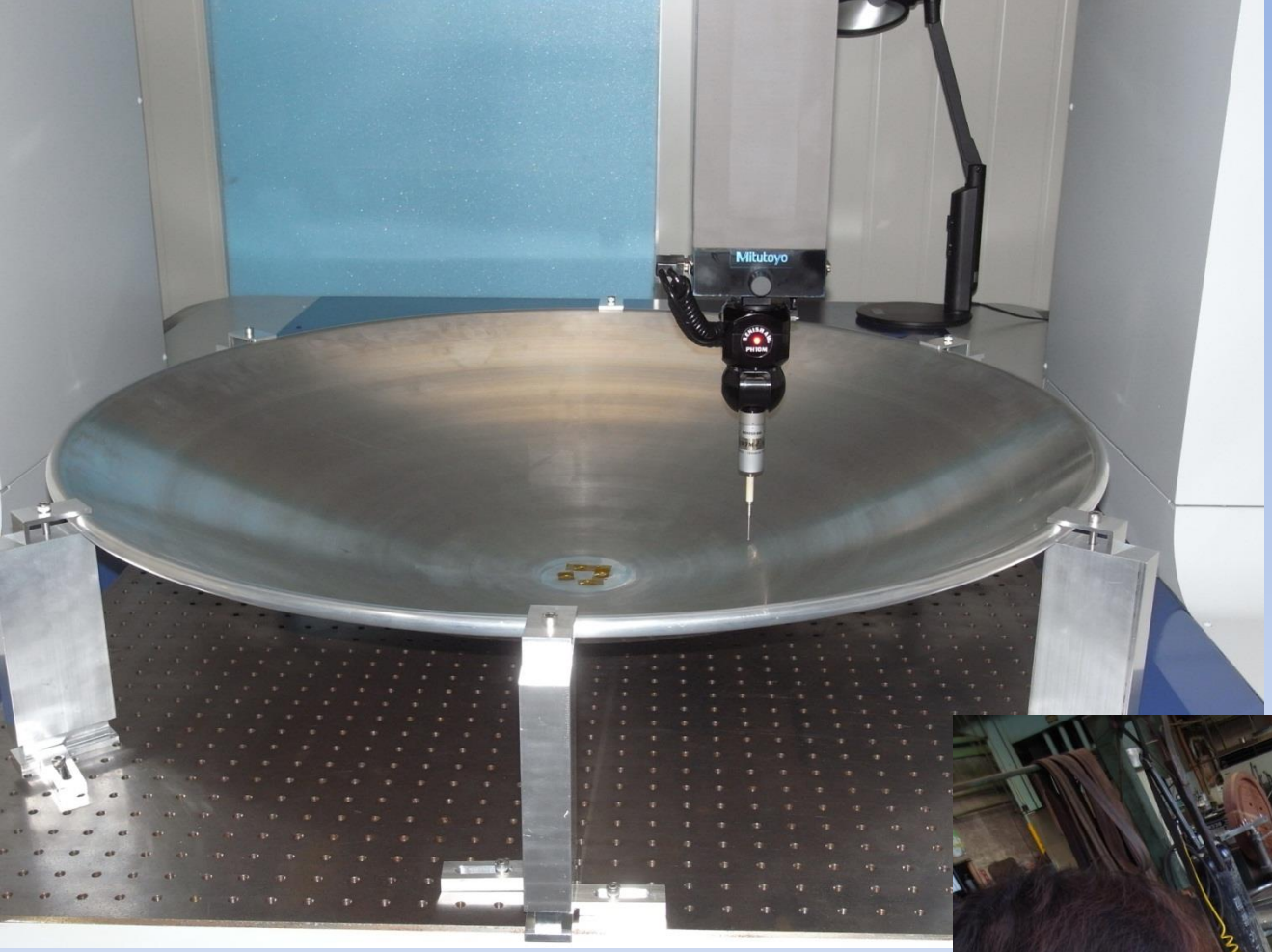
  -- 3×10^7Yen, about 10% of that of conventional mounts
- Tracking accuracy ～0.1asec level.
- Planned 3.8m Optical Telescope (Kyoto Univ.) is a successor of this mount.

Spec of Kurita Mount satisfies requirements of our mobile sub-mm radio telescope.
We need no development for our telescope mount.

4トン車で架台は運搬できる。
0.1秒追尾性能、5トン搭載可。



Dr. Kuriata (Nagoya Univ.)
developed this new mount



国立天文台
技術センタ三次元
測定機による
面精度測定
3D measurements
at Advanced Technical
Center in NAOJ.

北嶋絞り製作所：既存金型による
パラボラ面製作
Drawing compound
at Kitajima Shibori factory

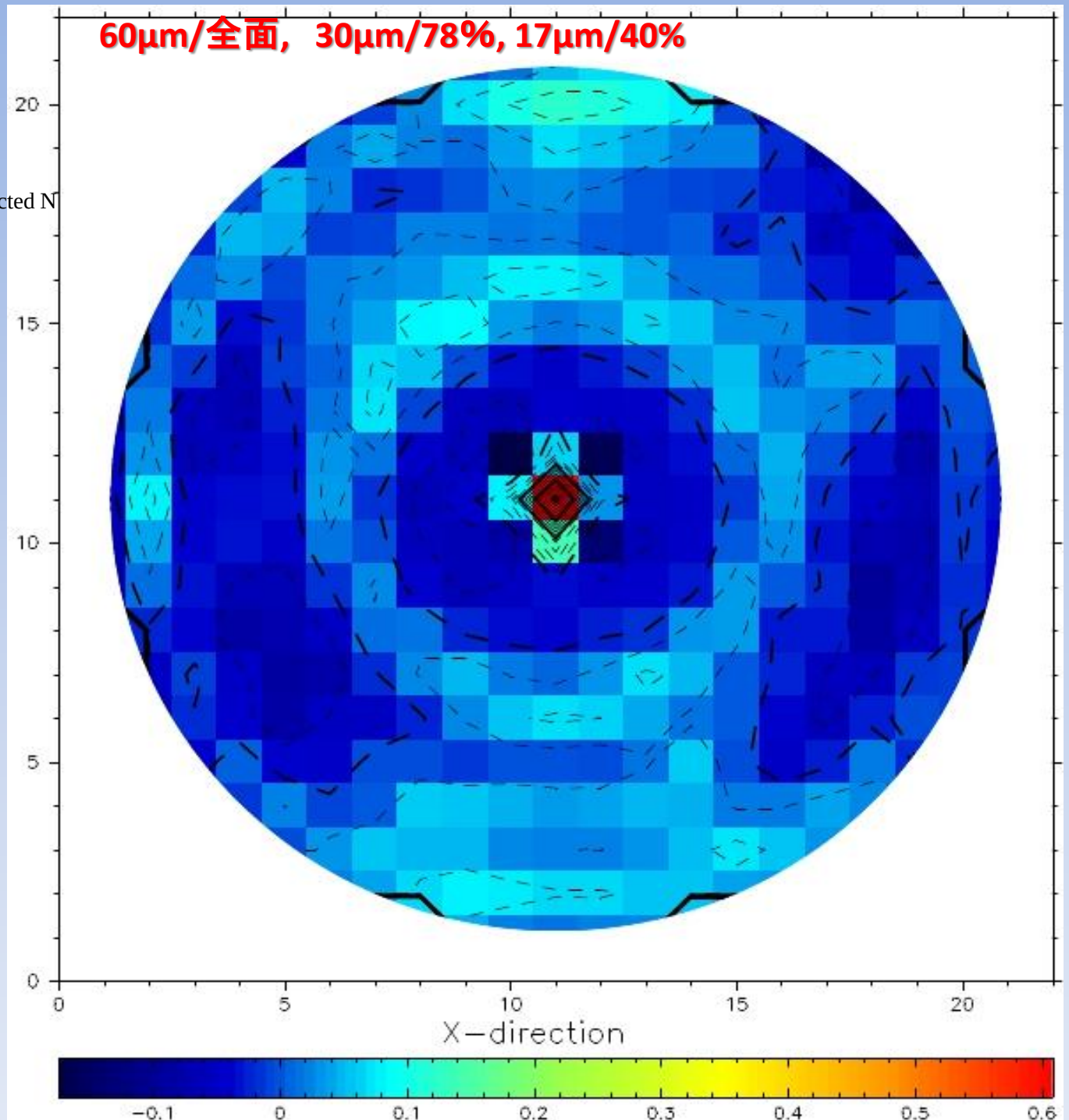
data= 20120828-CCant28.out
ndata= 349
highest(mm)= 0.60838 (sig=10.732)
lowest(mm)=-0.17403 (sig=-3.070)
average(mm)= -0.663434E-04

rms (mm)= 0.05669

Within Sigma rms"(mm) used DATA(%) ejected N

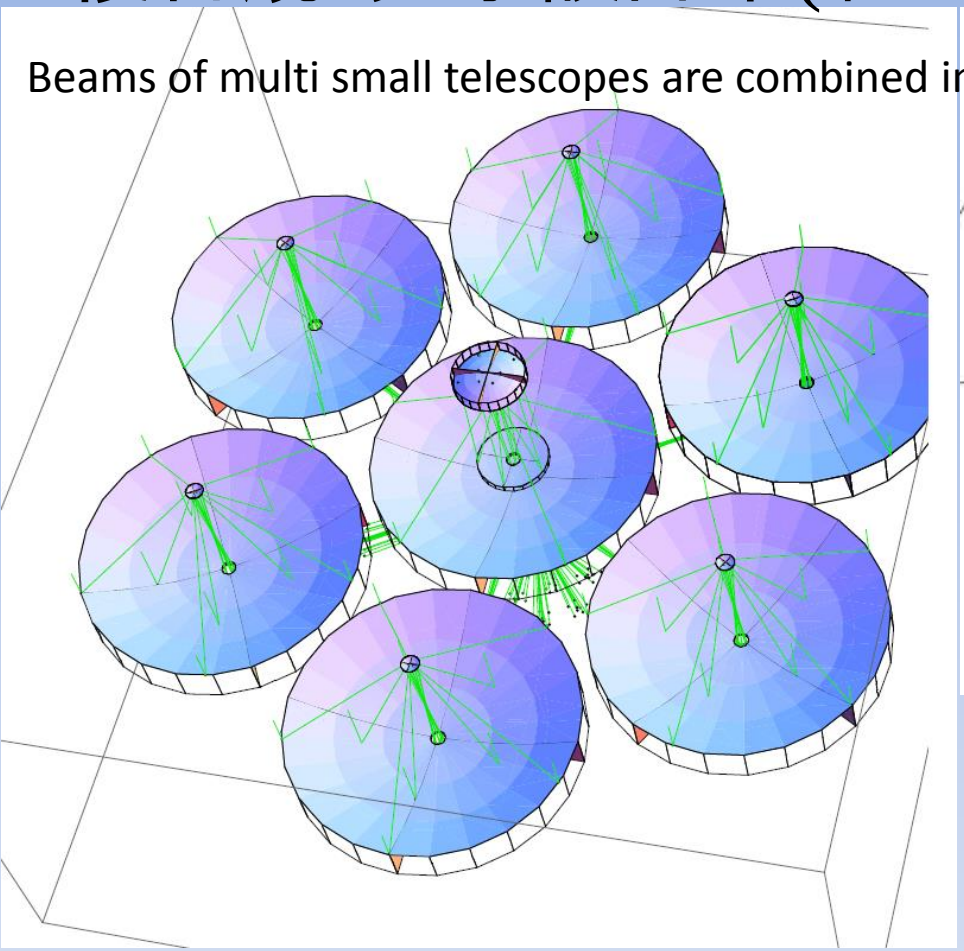
10.732	**0.056688**	**349(100.0)**	**0**
9.500	0.046431	348(99.7)	1
9.000	0.046431	348(99.7)	1
8.500	0.046431	348(99.7)	1
8.000	0.046431	348(99.7)	1
7.500	0.046431	348(99.7)	1
7.000	0.046431	348(99.7)	1
6.500	0.046431	348(99.7)	1
6.000	0.046431	348(99.7)	1
5.500	0.046431	348(99.7)	1
5.000	0.046431	348(99.7)	1
4.500	0.046431	348(99.7)	1
4.000	0.046431	348(99.7)	1
3.500	0.046431	348(99.7)	1
3.000	0.045567	347(99.4)	2
2.500	0.044858	346(99.1)	3
2.000	0.043422	343(98.3)	6
1.500	0.041104	334(95.7)	15
1.000	**0.031737**	**274(78.5)**	**75**
0.500	**0.016449**	**148(42.4)**	**201**
0.250	0.008074	68(19.5)	281

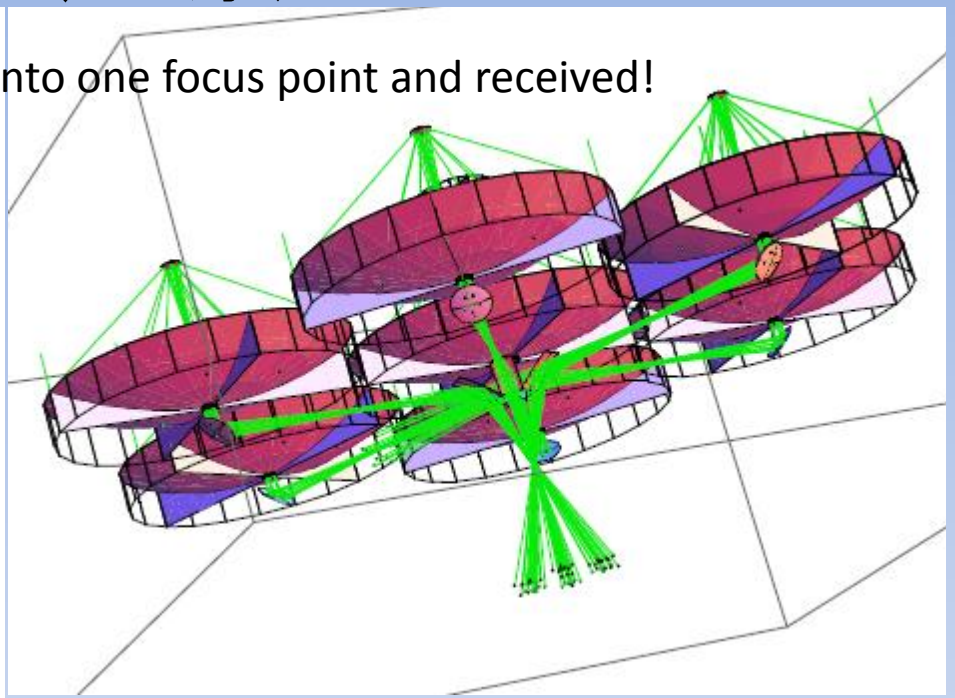
最初に作った丸い縁、1.5mm厚。
中心部に4つ穴を開けたもの。



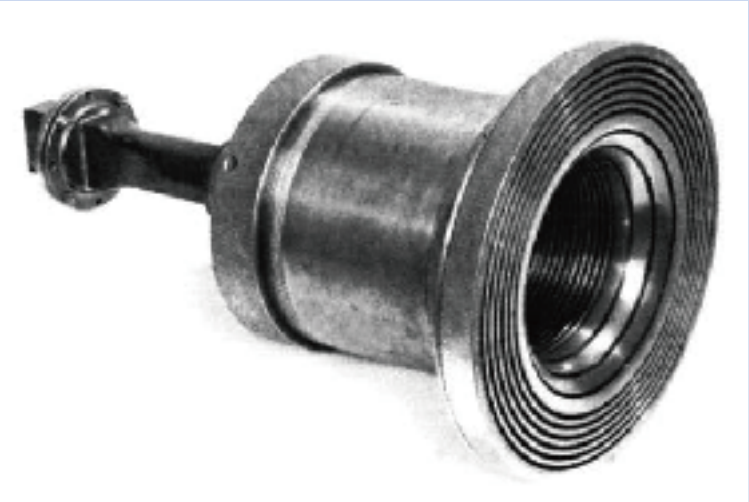
複合鏡:光学設計中(春日、氏原)

Beams of multi small telescopes are combined into one focus point and received!



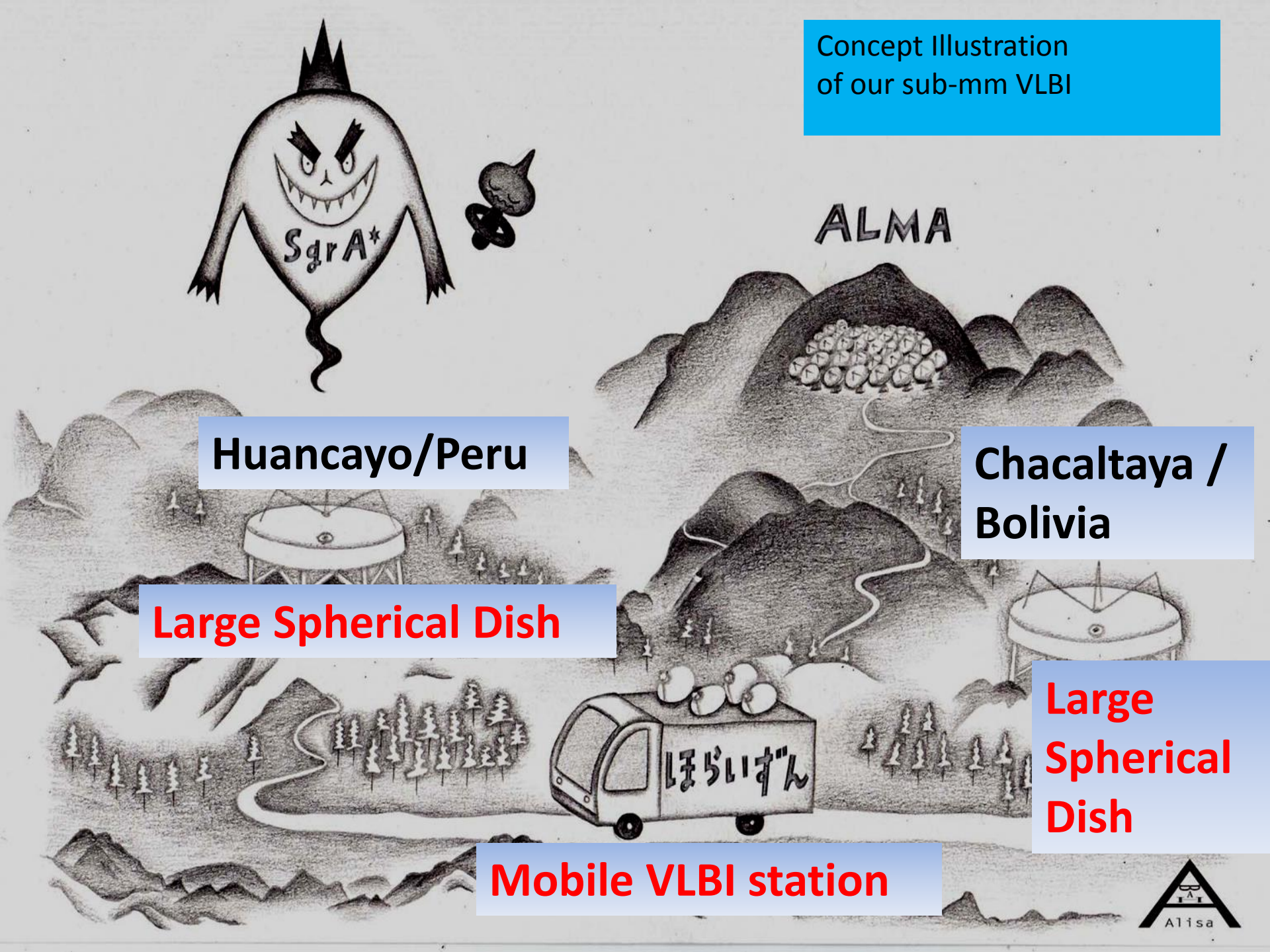


Pioneering work by Parks observatory(‘70年代)
-- horn with ring like directivity.



A Dedicated Receiving Horn is Required:

Concept Illustration
of our sub-mm VLBI



きゃらばん・サブ（Caravan-Submm）

First of all, we will develop 0th-mobil station in Japan, and perform experiment at Nobeyama, and detect the first domestic fringe at 230 GHz VLBI.

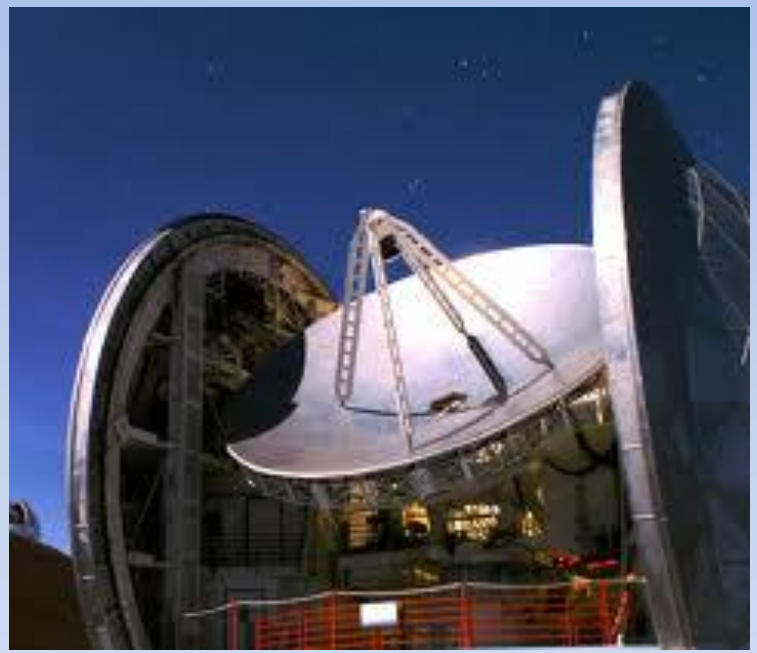
Another proposal :
CSO-ASTE（-Greenland) VLBI project?!

- Recently, we had a time to discuss the promotion of black hole imaging using sub-mm VLBI in Japan with the NAOJ director.
- To promote the research, the director suggested us VLBI observing experiment using CSO (EA core)-ASTE(NAOJ).
- Such a project will surely enhance the observing technique and black hole investigation.

ASTE: Atacama Submillimeter Telescope Experiment

D=10m
Chile (alt 4800m)

CSO:Caltech Submillimeter Observatory



D=10.4m
Hawaii (alt 4200 m)