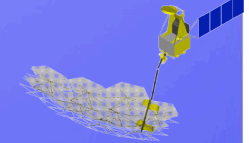


スペース電波干渉計観測の現状と将来

坪井昌人

JAXA 宇宙科学研究本部

ある友人が山を散策していた。



- 登山道を歩いているとザーという水音が聞こえ、水煙も見えた。

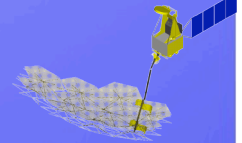
! ?

- これは滝があるに違いないと考えて、どんな滝かと谷を降りて行った。

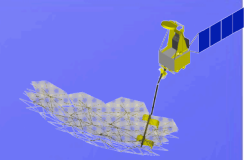


ところが。。。。

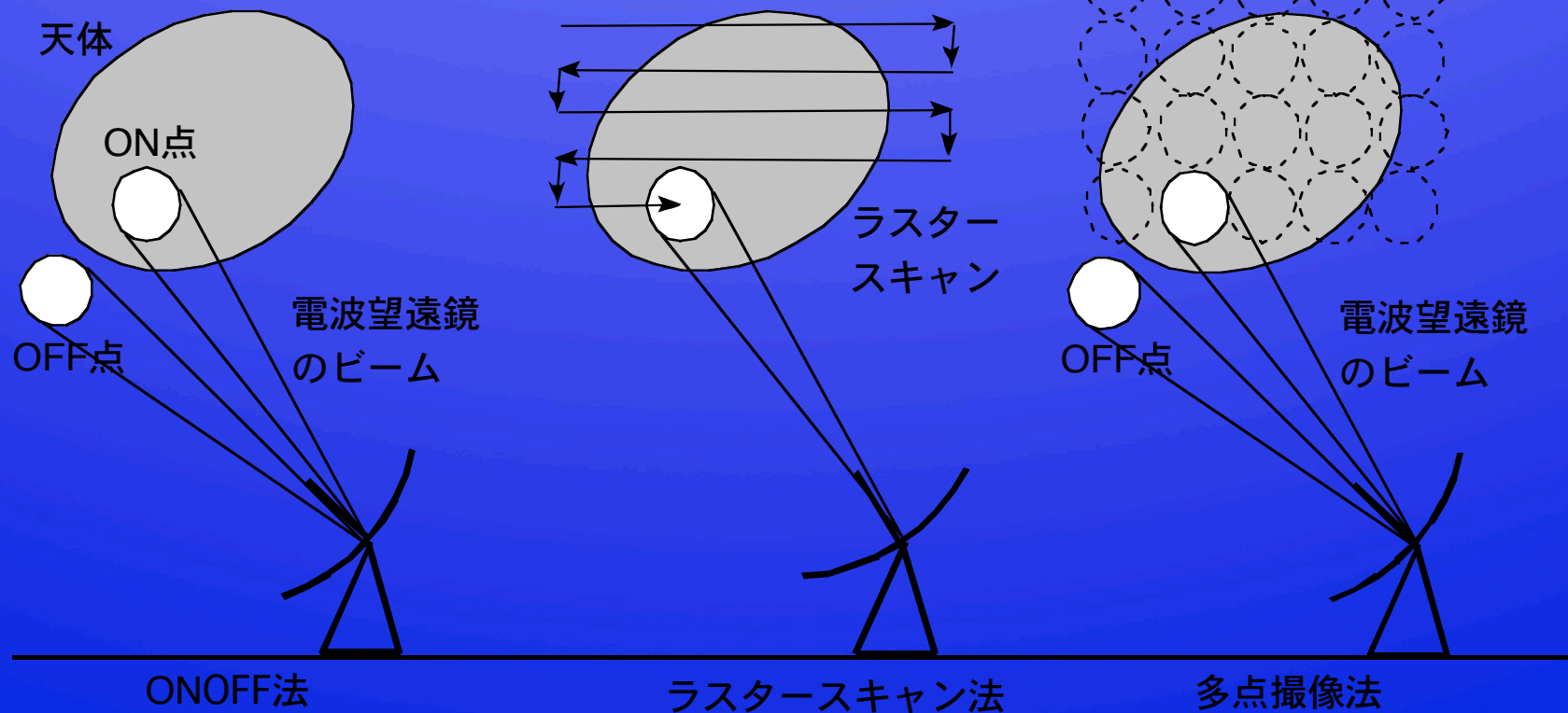
- そこには滝はなく、小さなダムが放水しているところであった。
- (直接) 見ていないものから結論を得ると間違いをおこす場合がある。という良い教訓だと友人は言う。
- 天文学は大丈夫??

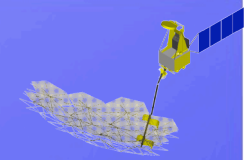


(単一鏡)電波望遠鏡は正面しか
みることができない。

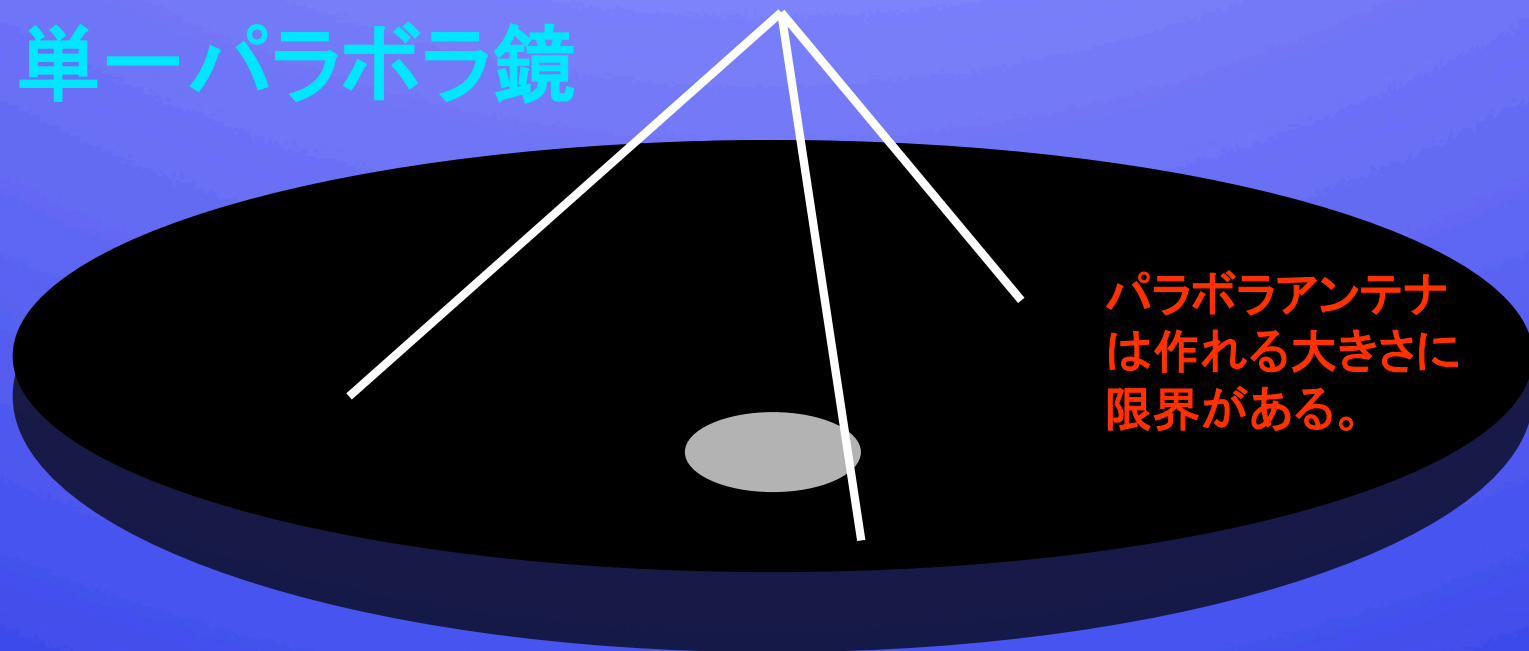


解像度: $\Delta\theta = \lambda/D$
D is diameter or base line





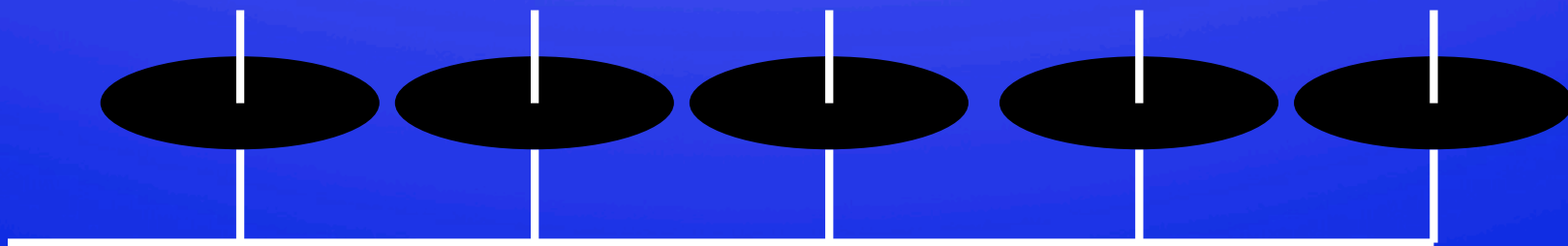
単一パラボラ鏡



パラボラアンテナ
は作れる大きさに
限界がある。

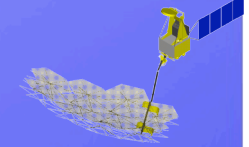
電波干渉計

小さなアンテナをケーブルで結んで
信号を干渉させると限界を超えることが
できる。



マーチン=ライルの開口合成法

電波望遠鏡の歴史は解像度向上の歴史でもある。
電波は波長が長く良い解像度が得難い。



45-m telescope

世界最大の単一鏡型ミリ波望遠鏡
解像度は約15秒角(双眼鏡と同じ)

解像度: $\Delta\theta = \lambda/D$
D is diameter or base line

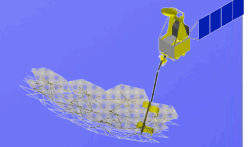


Nobeyama Millimeter Array

6x 10-m dish mm-wave interferometer

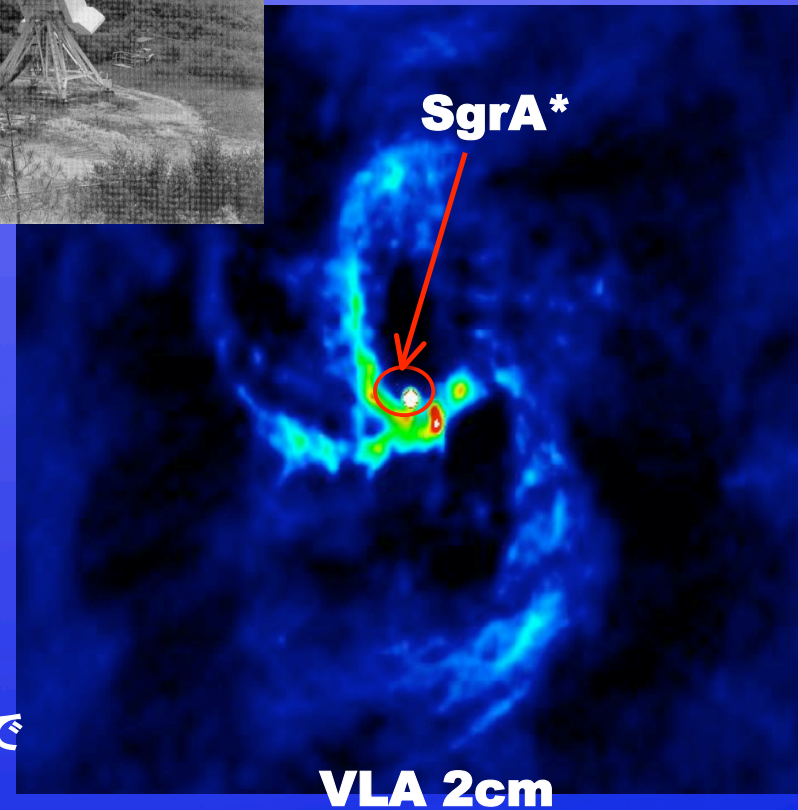
ミリ干渉計の解像度は1秒角で、アマチュア望遠鏡と同じ。

Sgr A* : 我々の銀河中心の発見

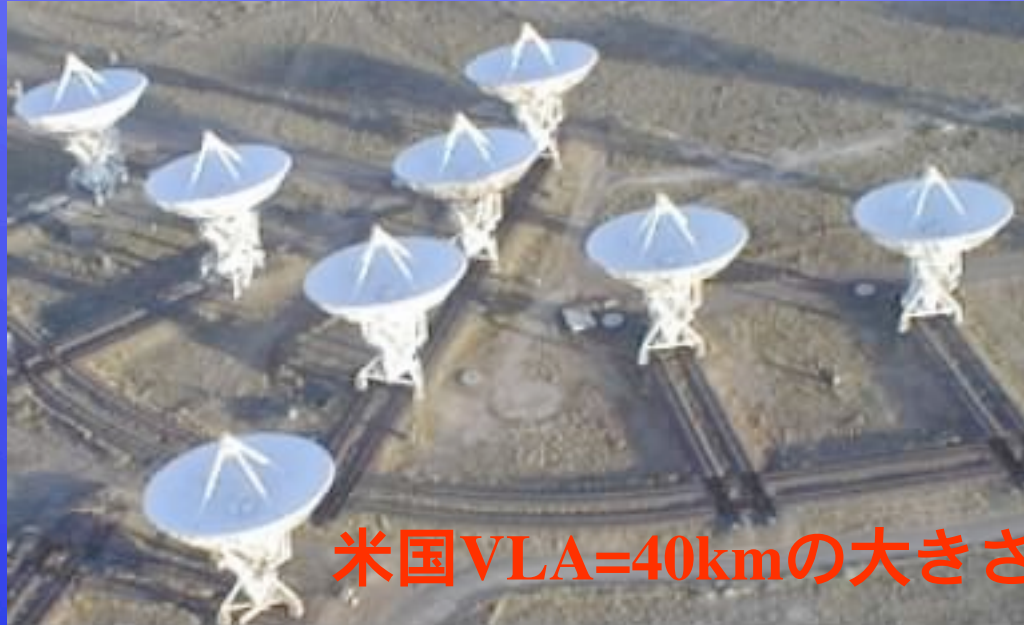


- 1974 B.Balick and R.Brown
グリーンバンク 35km 電波干渉計でフリンジを
発見@波長11cm,3.7 cm
=>これは銀河系中心に点状電波源があるこ
とを証明 ($<0.7''$, $<0.3''$)
=>0.01pc以下のコンパクト天体=ブラックホール
か？

その後、その他のVLBIを含めた電波干渉計で
盛んに観測された。(画像は観測の王道！)

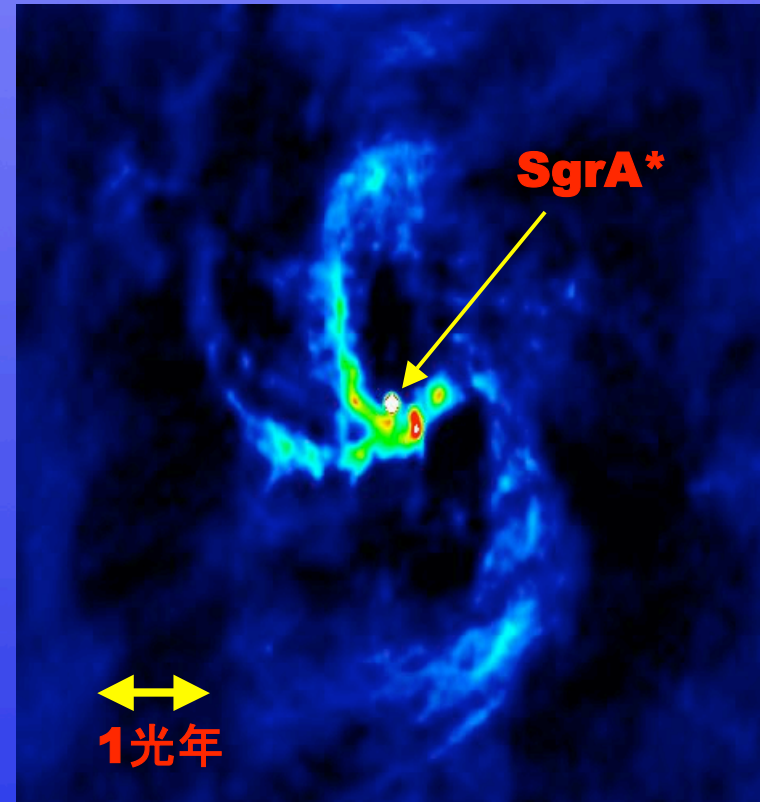


高い分解能を得るには電波干渉計を使うしかない！！




世界最大の結合型電波干渉計**VLA**を使うと角度分解能は0.1秒角程度(光の大型望遠鏡と同じ)である。

VLAで銀河系の中心核を観測すると点状として観測される。**BH**周辺の構造は見えない。



有名なミニスパイラル構造は見えるが**SgrA***=我々の銀河の中心核**VLA**でも点にしか見えない！

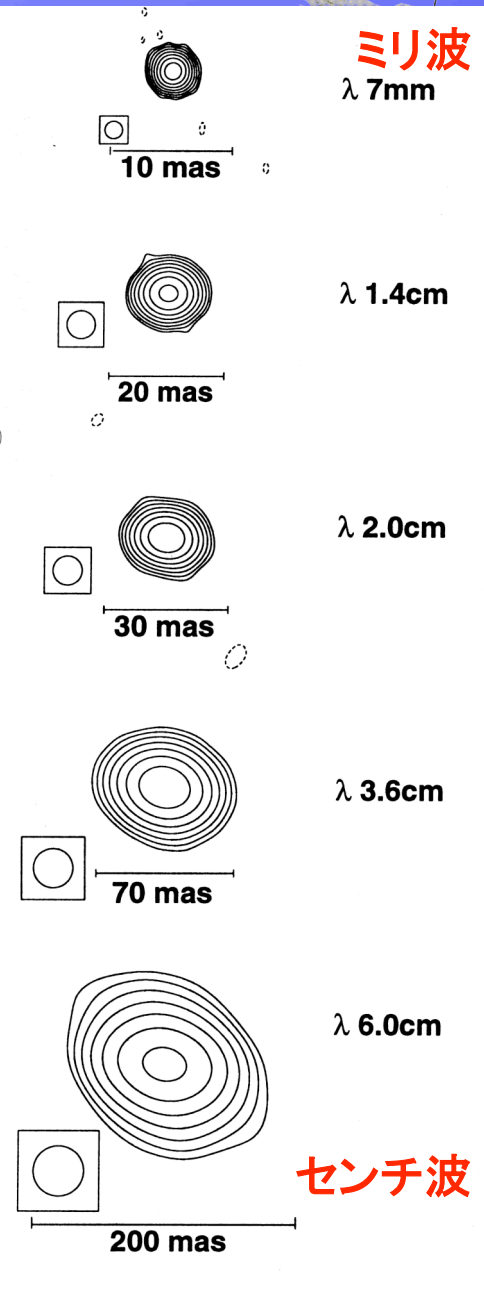
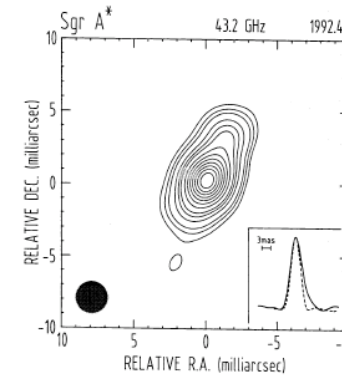
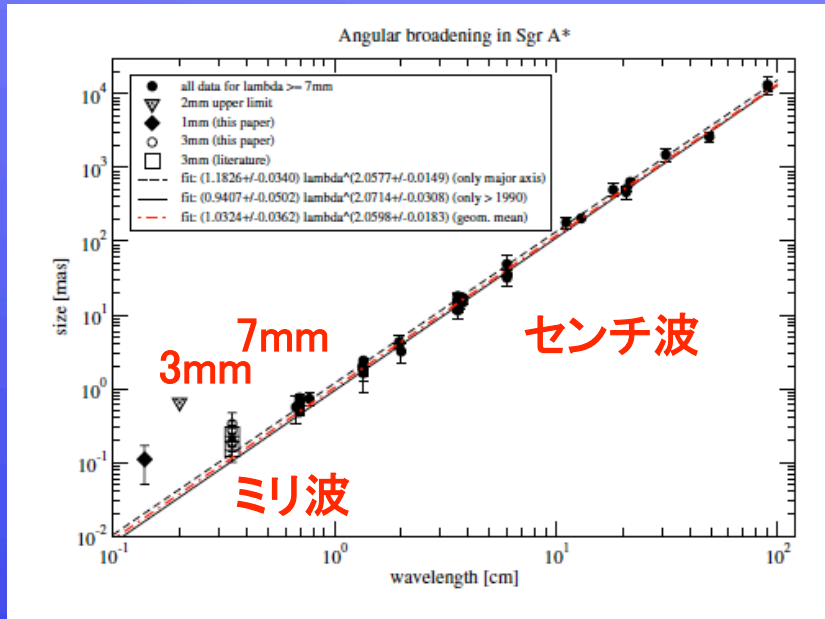
A diagram illustrating the Very Long Baseline Interferometry (VLBI) technique. It shows a view of Earth from space with several radio telescope stations (represented by white dishes) distributed across the globe. Red arrows point from these stations to a central text box. The background features a blue grid pattern representing the Earth's surface or a coordinate system. The text box explains the process: VLBI uses widely spaced ground-based radio telescopes to simultaneously record radio waves from celestial objects. The recorded data is then correlated to create an image of the radio wave distribution.

VLBIは地上の離れた(大陸間)電波望遠鏡を同時に使い天体からの電波**E**をそのまま記録する(**HD**等)。その後それを持ち合い相関をとり電波の画像 (**E²**の分布)を作成する。

$$\Delta\theta = \lambda/d \quad d:\text{base line} \\ < \lambda/d(\text{earth})$$

角度分解能向上の切り札: VLBI

SgrA* のセンチ波のVLB観測



少なくとも40(22?)GHzまではSgrA*のサイズは波長の2乗に比例する。

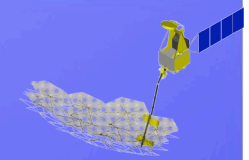
⇒電子散乱でサイズが決まる。

- 電子散乱でintrinsicな構造が見えない。
- 22?GHzまでのVLBは全強度以外は意味が乏しい。⇒ミリ波VLBが必要である。

(全強度も時間方向にならされている?)

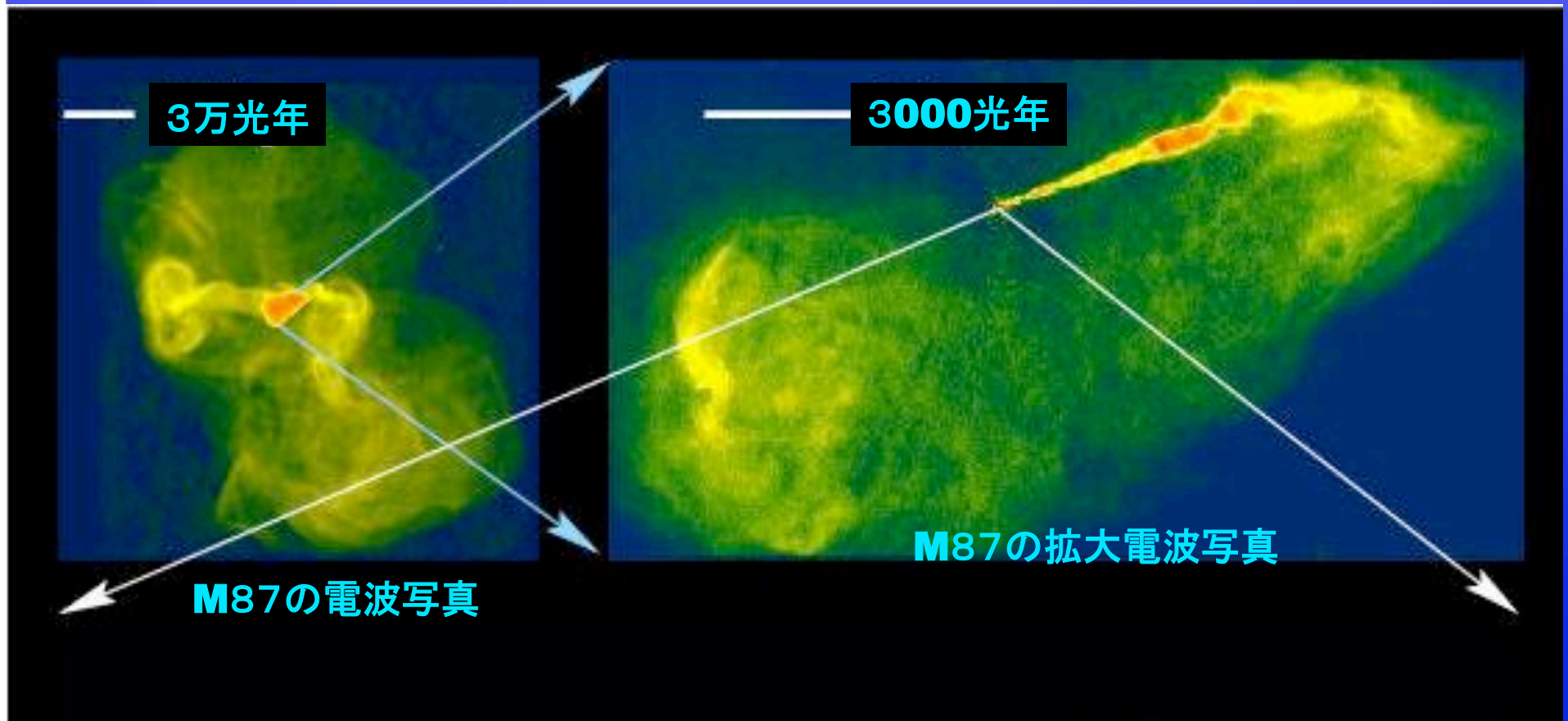
他の銀河中心核ではどうか？

例えば、活動銀河M87



何万光年にも広がる相対論的高エネルギー電子のジェット構造をもっている。しかし、その源は銀河の中心に位置する銀河中心核である。大変に質量の大きい銀河中心核である。

電子散乱の状況は変わらないと考えられるが遠方のため
SgrA*ほどは細部を見ていない。



現在の地上VLBIの角度分解能では相対論ジェット の根元を明らかにできない。

1. ジェットはブラックホールの近傍どのへんから噴出？
2. ジェットの磁場構造=加速メカニズムは？ - MHD jet？
3. ジェット加速メカニズムのエネルギー効率は？

現在は答えられない

highest resolution
map (2007)

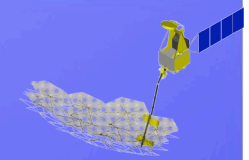
地上のみの
望遠鏡を使った
最高解像度の観測

0.25光年

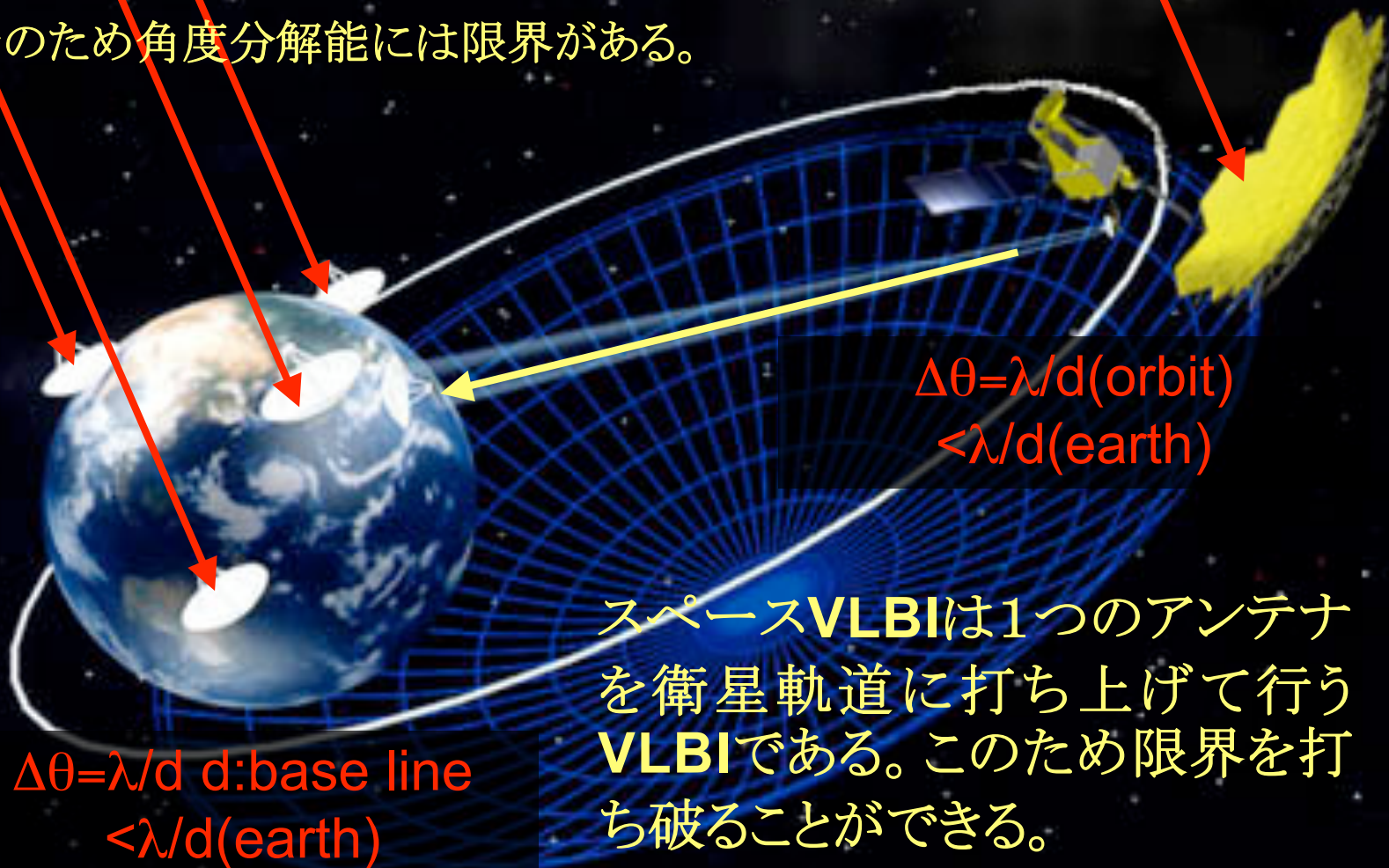
500xブラックホールの半径



What is Space VLBI?



地上VLBIはアンテナを地球の直径より離しておく事ができない。
そのため角度分解能には限界がある。

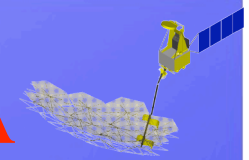


$$\Delta\theta = \lambda/d \quad d:\text{base line} < \lambda/d(\text{earth})$$

$$\Delta\theta = \lambda/d(\text{orbit}) < \lambda/d(\text{earth})$$

スペースVLBIは1つのアンテナを衛星軌道に打ち上げて行うVLBIである。このため限界を打ち破ることができる。

The First Space VLBI satellite=HALCA



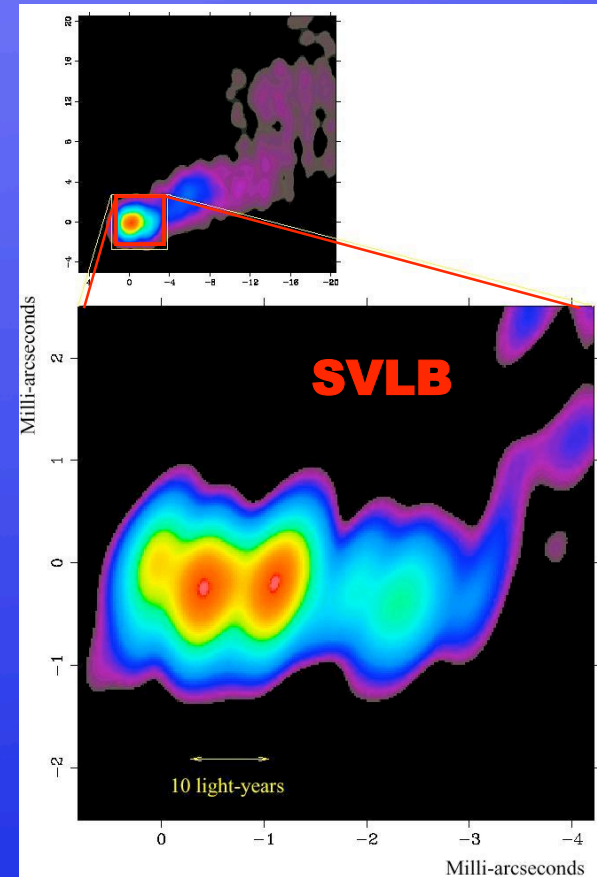
HALCA was launched by a M-V rocket in 1997 as an engineering test satellite of ISAS.



apogee 21,300km
perigee 540km
inclination 31d
weight 830kg
Antenna Diam. 8m
Freq. 1.6, 5, (22) GHz

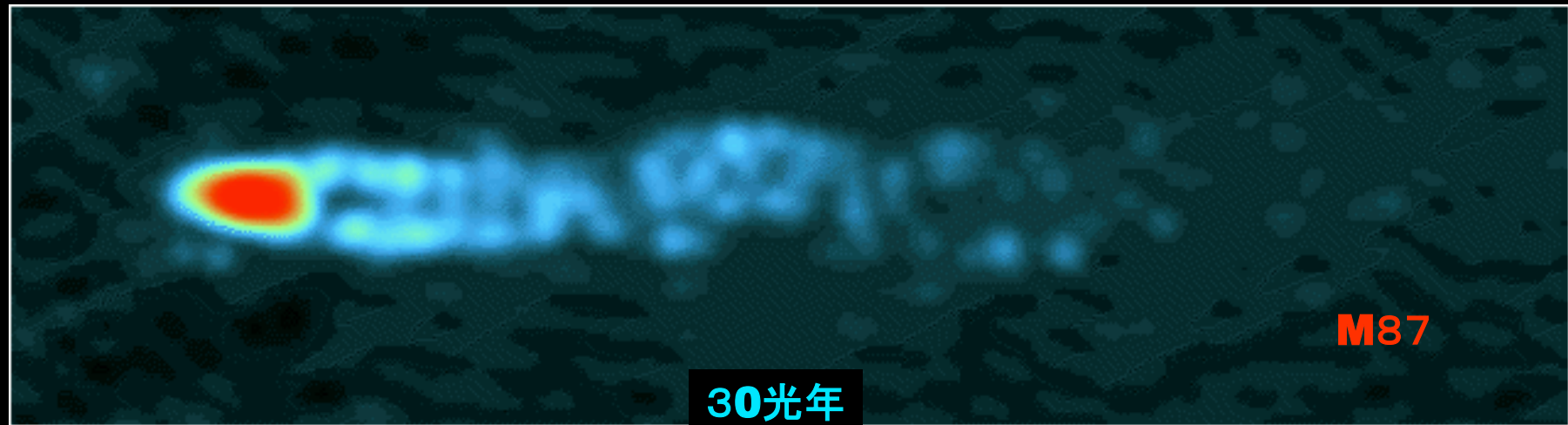
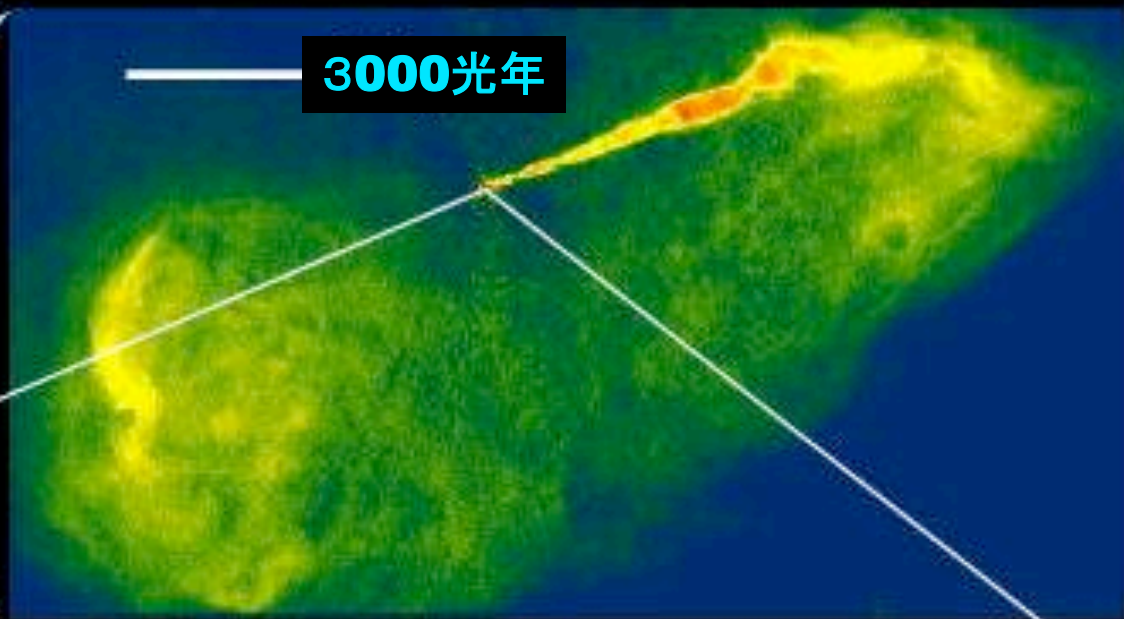
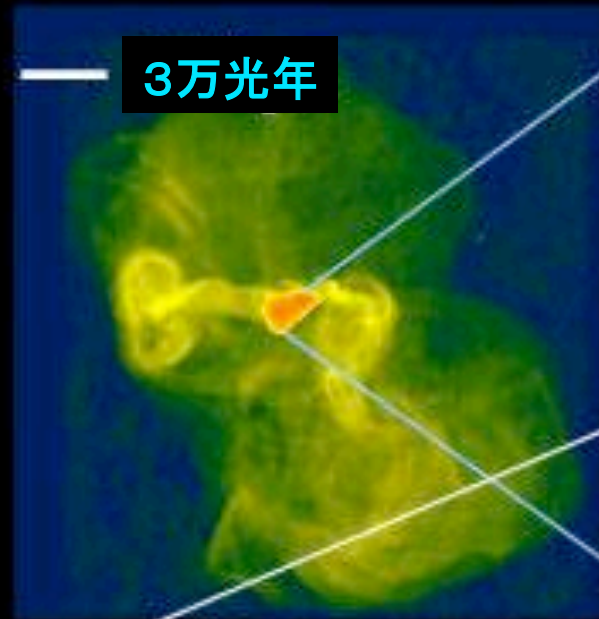
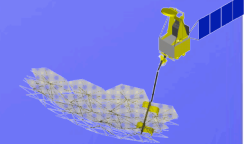


360 μ as

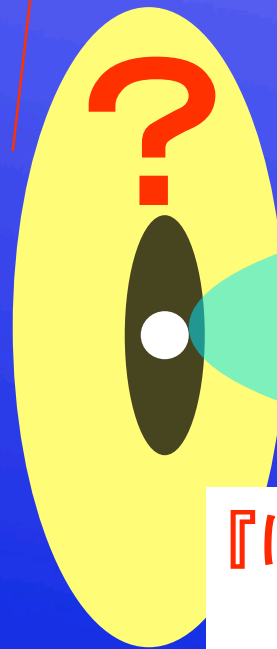
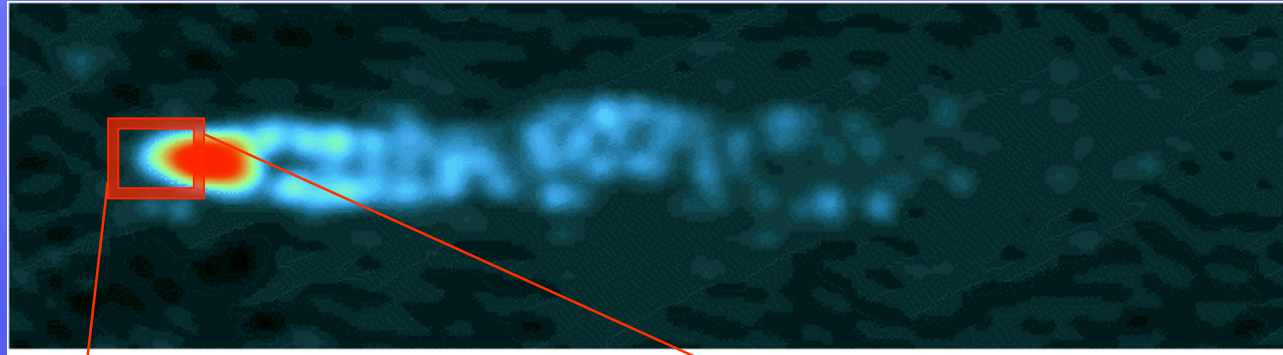
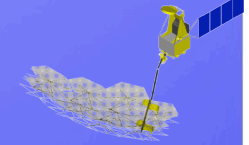


3C345

VSOP1の成果



でも本当に見たかったのはこれではない。



『はるか』ではこの中がどうなっているかは全くわからなかった。



ここ10年はVSOP2/ASTRO-Gで行く！



VSOP2/ASTRO-G はミリ波スペース
VLBI衛星です。

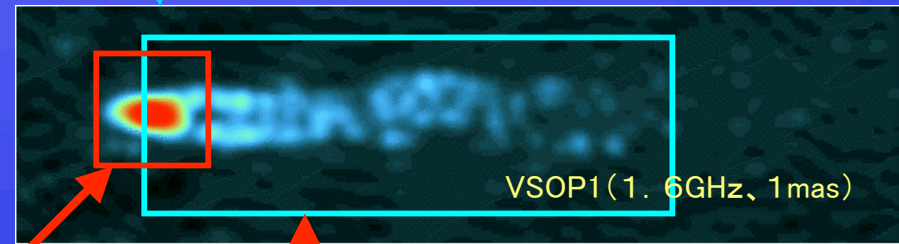
VSOP2/ASTRO-G は『はるか』衛星の
10 倍の分解能です。

～ 38 マイクロ秒角は月に上に立
つものがウサギかかぐや姫かの区
別できます。

VSOP2/ASTRO-G の
観測領域



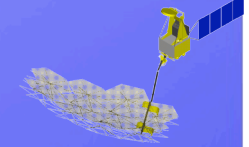
Radio galaxy M87 with HST



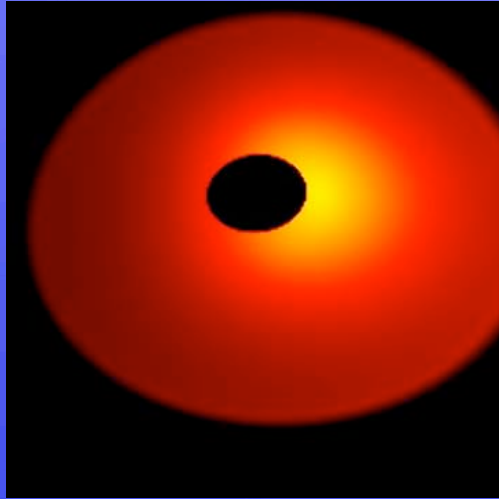
Fine structures in Jet of M87 with VSOP.

VSOP1/HALCA の
観測領域

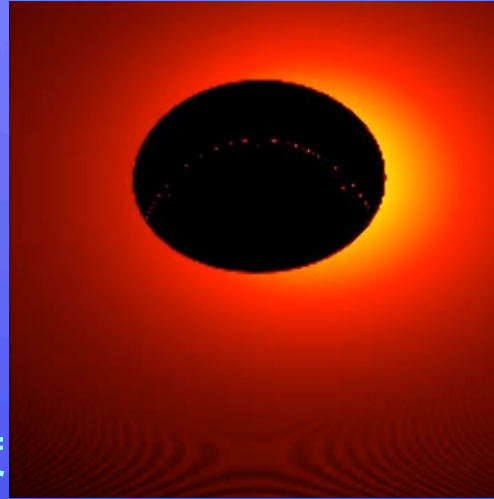
ブラックホールの”穴”は見えるか？



80度

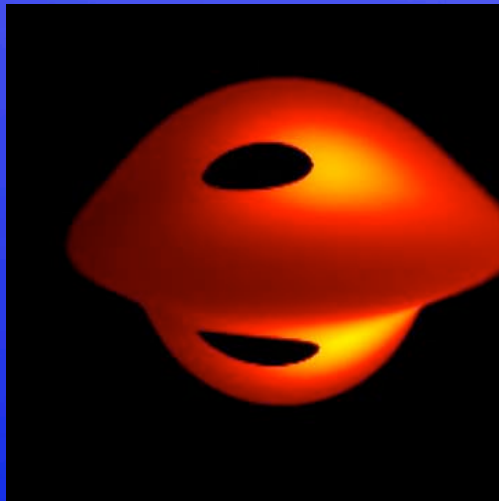


80度

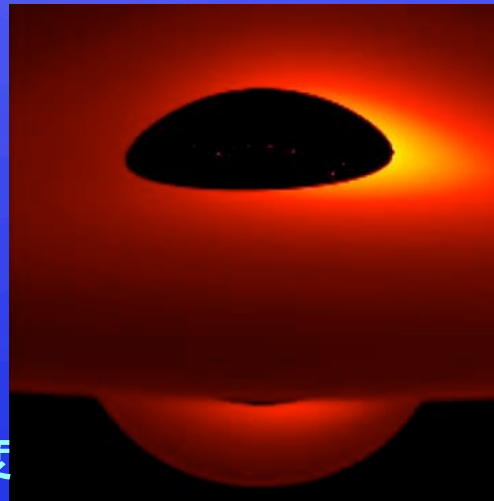


ブラックホール
の大きさ

45度



45度

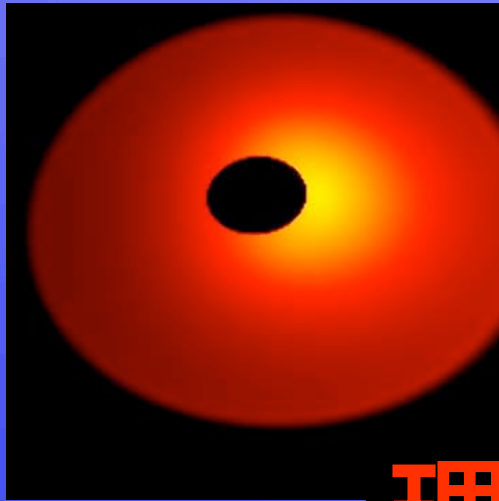
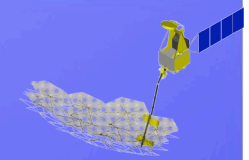


Takahashi

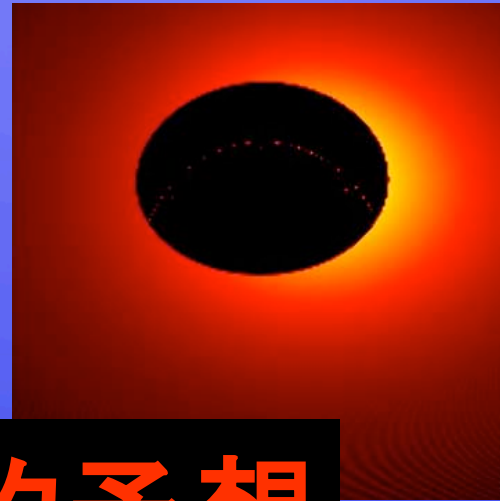
カー ブラックホール

シュワルツシルト ブラックホール

ブラックホールの”穴”は見えるか？

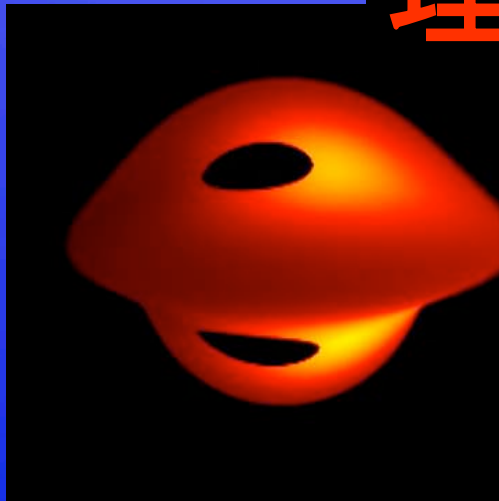


80度

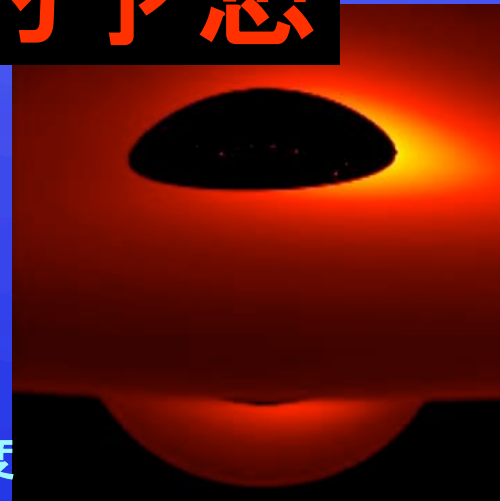


ブラックホール
の大きさ

理論的予想



45度



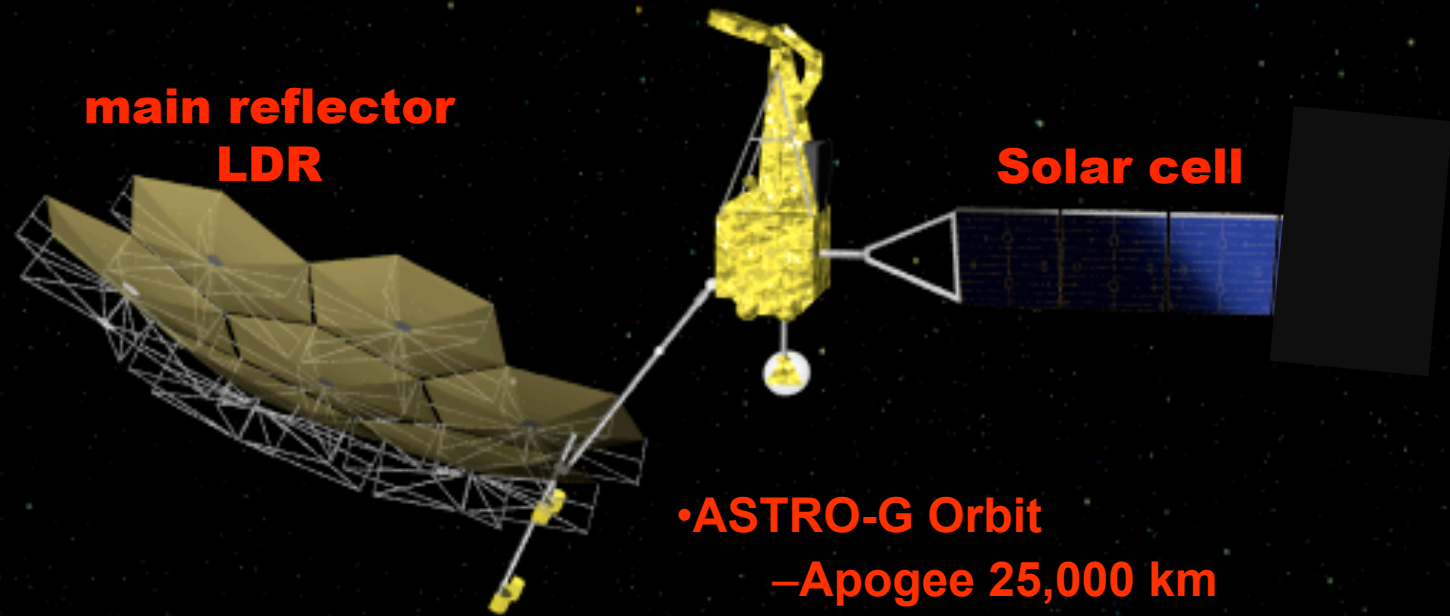
45度

Takahashi

カー ブラックホール

シュワルツシルト ブラックホール

ASTRO-G



**main reflector
LDR**

Solar cell

10m

- ASTRO-G Orbit
 - Apogee 25,000 km
 - Perigee 1,000 km
 - Inclination 31°
 - Orbit Period 7.5 hours
 - => ~ 38 μ arcsecond at 43 GHz

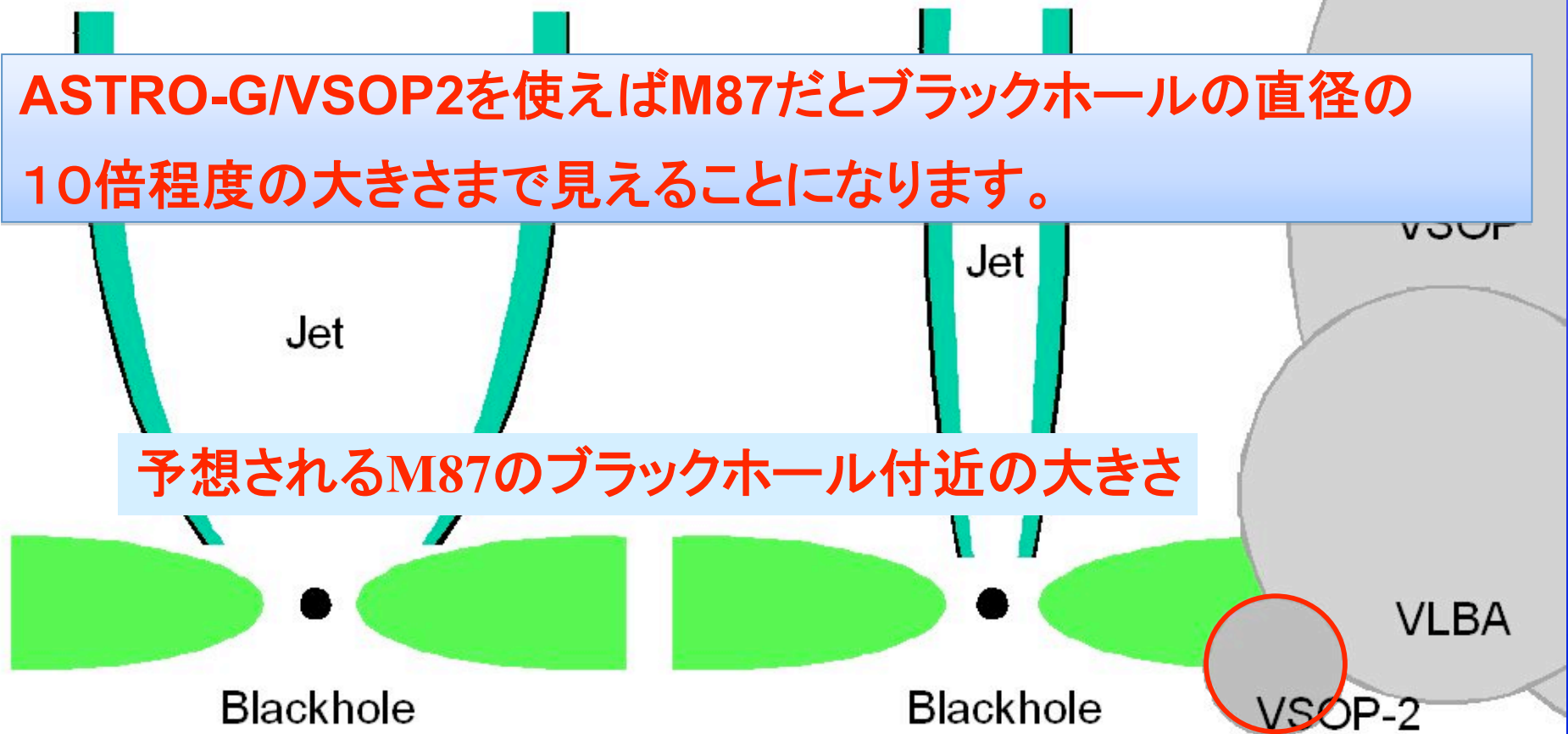
Target Life Time is 3 years.



Beam sizes of VLBI instruments

VSOP

ASTRO-G/VSOP2を使えばM87だとブラックホールの直径の10倍程度の大きさまで見えることになります。



予想されるM87のブラックホール付近の大きさ

VSOP

Jet

Jet

Blackhole

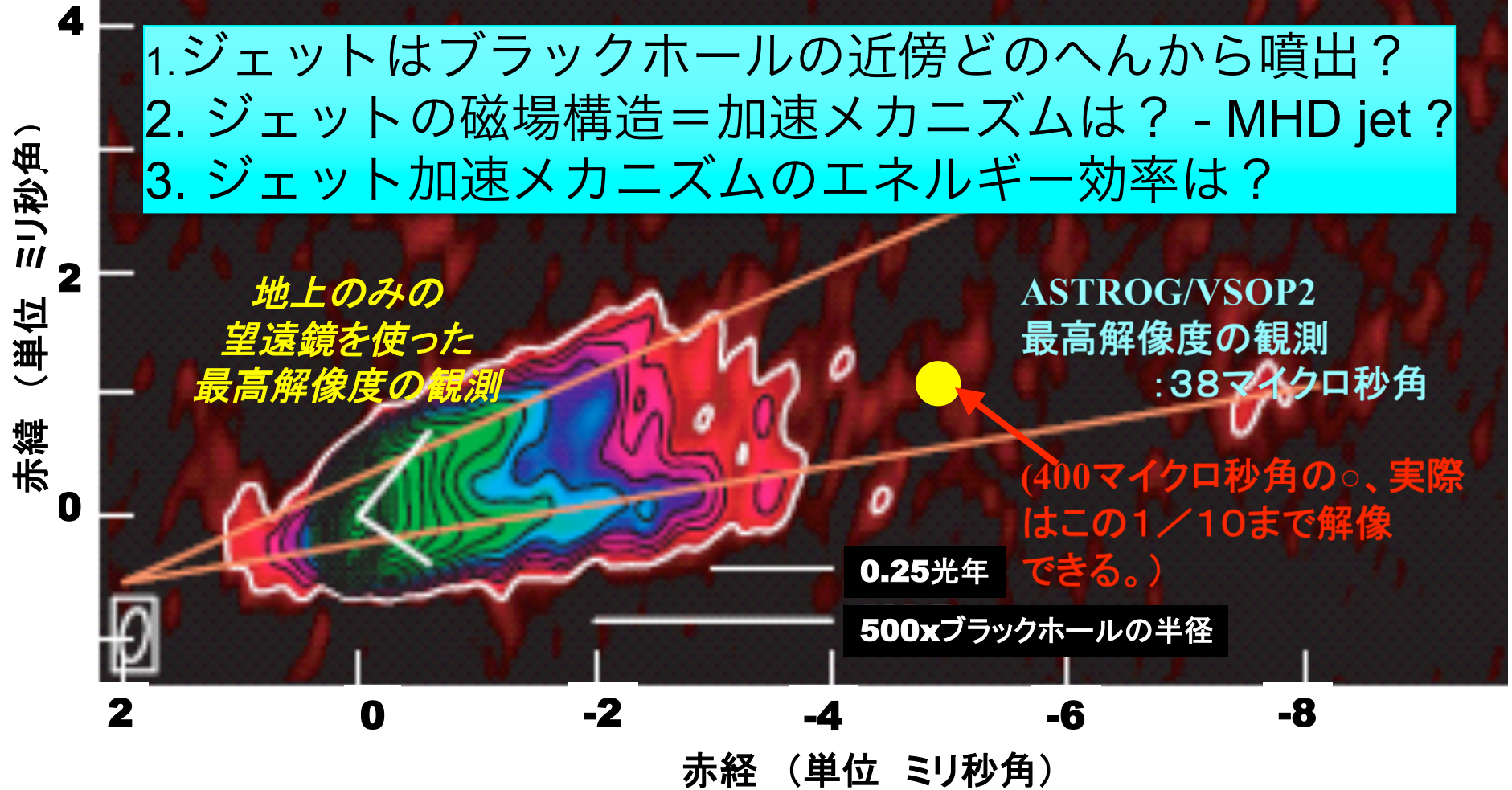
Blackhole

VLBA

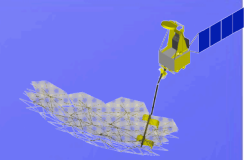
VSOP-2

VSOP2の角度分解能では相対論ジェット の根元を明らかにできるはずである。

1. ジェットはブラックホールの近傍どのへんから噴出？
2. ジェットの磁場構造=加速メカニズムは？ - MHD jet ?
3. ジェット加速メカニズムのエネルギー効率率は？

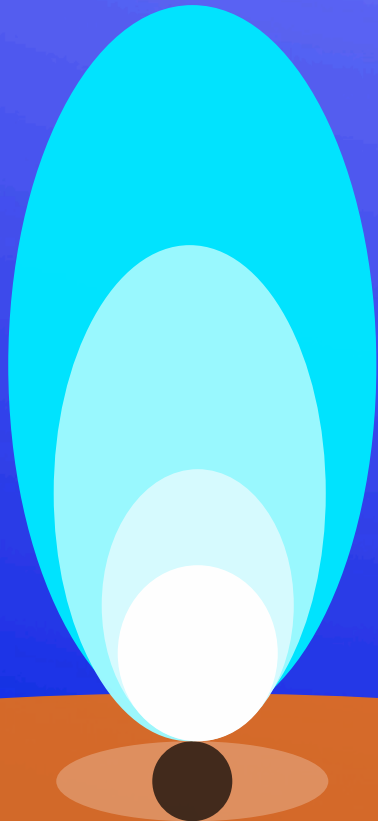


スペースVLBIの角度分解能で相対論ジェット
の根元を明らかにする。



1. ジェットはブラックホールの近傍どのへんから噴出？
2. ジェットの磁場構造=加速メカニズムは？ - MHD jet？
3. ジェット加速メカニズムのエネルギー効率率は？

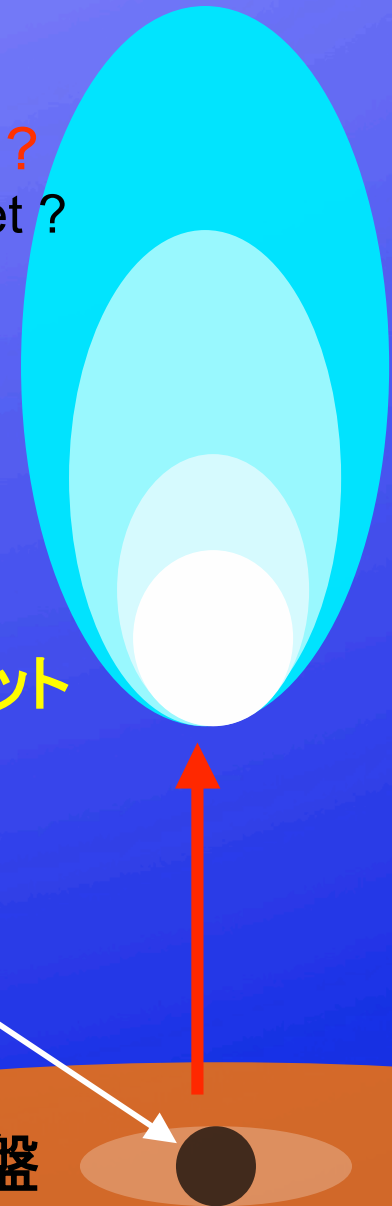
相対論的ジェット



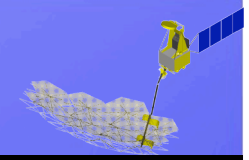
降着円盤

相対論的ジェット
遠くで光る！

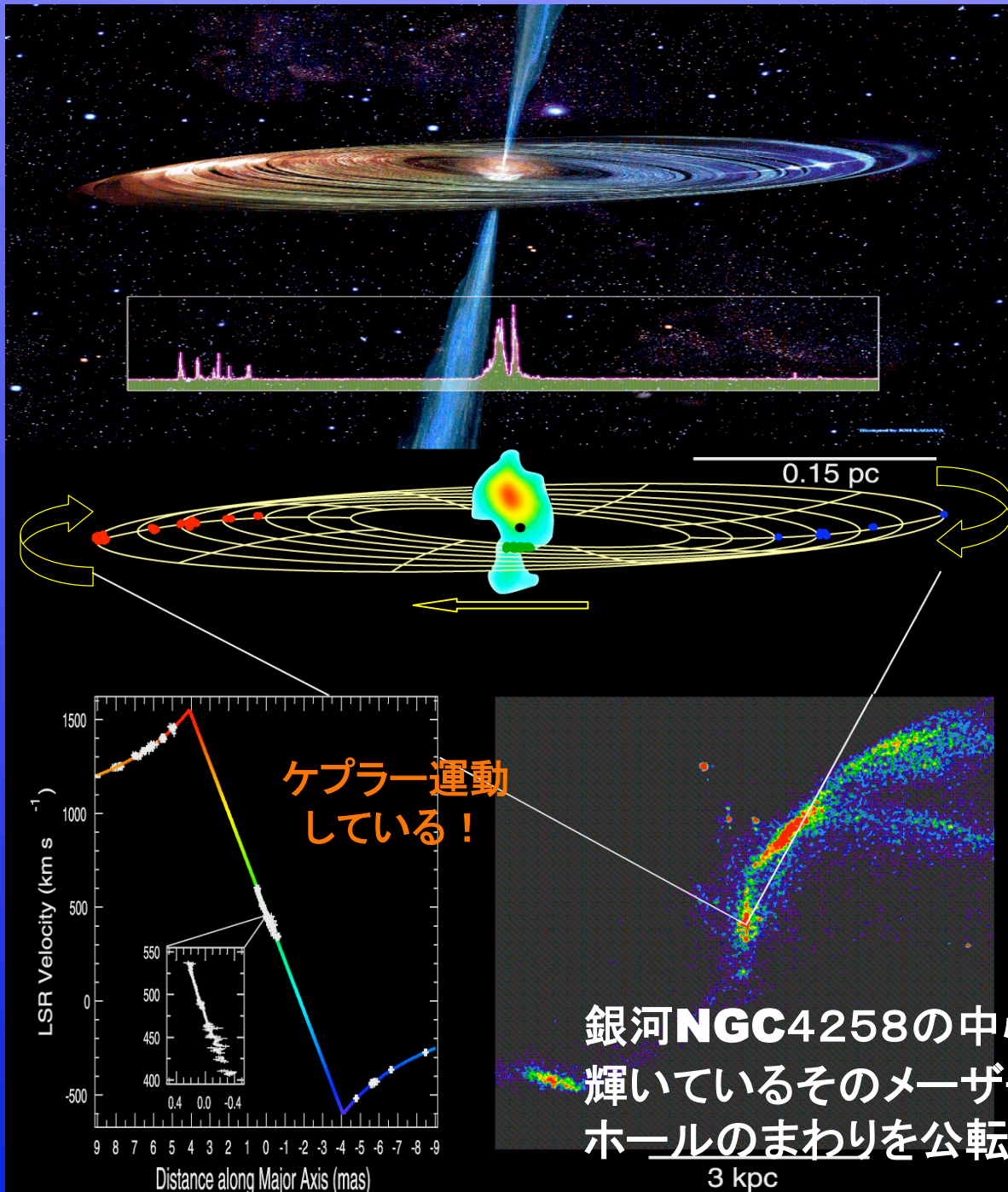
ブラックホール



降着円盤



NGC4258 Disk masers₈



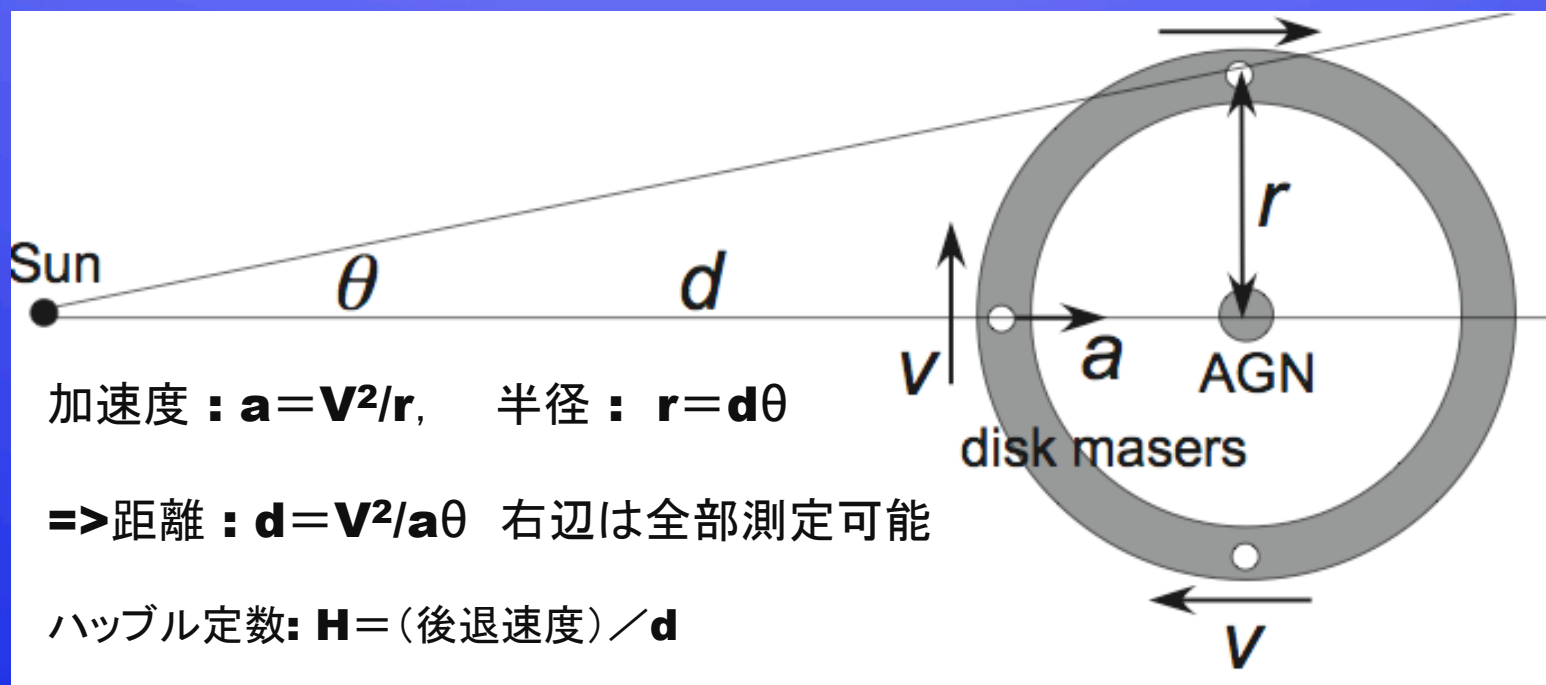
円盤上を運動
している！

銀河**NGC4258**の中心核は水メーザー輝線で
輝いているそのメーザー源はこの銀河のブラック
ホールのまわりを公転しているらしい。

宇宙論への挑戦

銀河NGC4258の中心核は水メーザー輝線で輝いているそのメーザー源はこの銀河のブラックホールのまわりを公転しているらしい。

その公転速度 v 、公転運動の加速度 a 、そして見かけに運動の大きさ θ をつかうとこの銀河までの距離 d が求まる。



これまでにない精度でこれまでの観測と独立にハッブル定数を測定できることの天文学的価値は大きい。

ASTRO-Gはいつ打ち上がるのですか？

VSOP2?ASTRO-G 計画は 2007年
7月から正式にスタートしてい
ます。 .

この衛星計画はJAXAと国立天文台
の合同プロジェクトです。他、
東大、法政大、大阪府立大、鹿
児島大など多くの大学が参加し
ています。

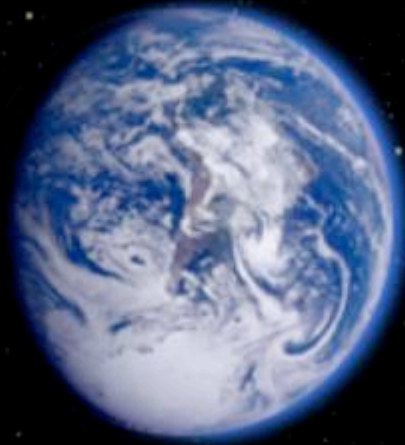
公式の打ち上げロケットはHIIAロ
ケットで、打ち上げ時期は20
12年度を予定しています。

HIIAロケットの打ち上げ能力はこの
衛星に比べ、大きいので相乗り
相手の選択が行われています。



MHI HIIA rocket
Payload 4-6 ton

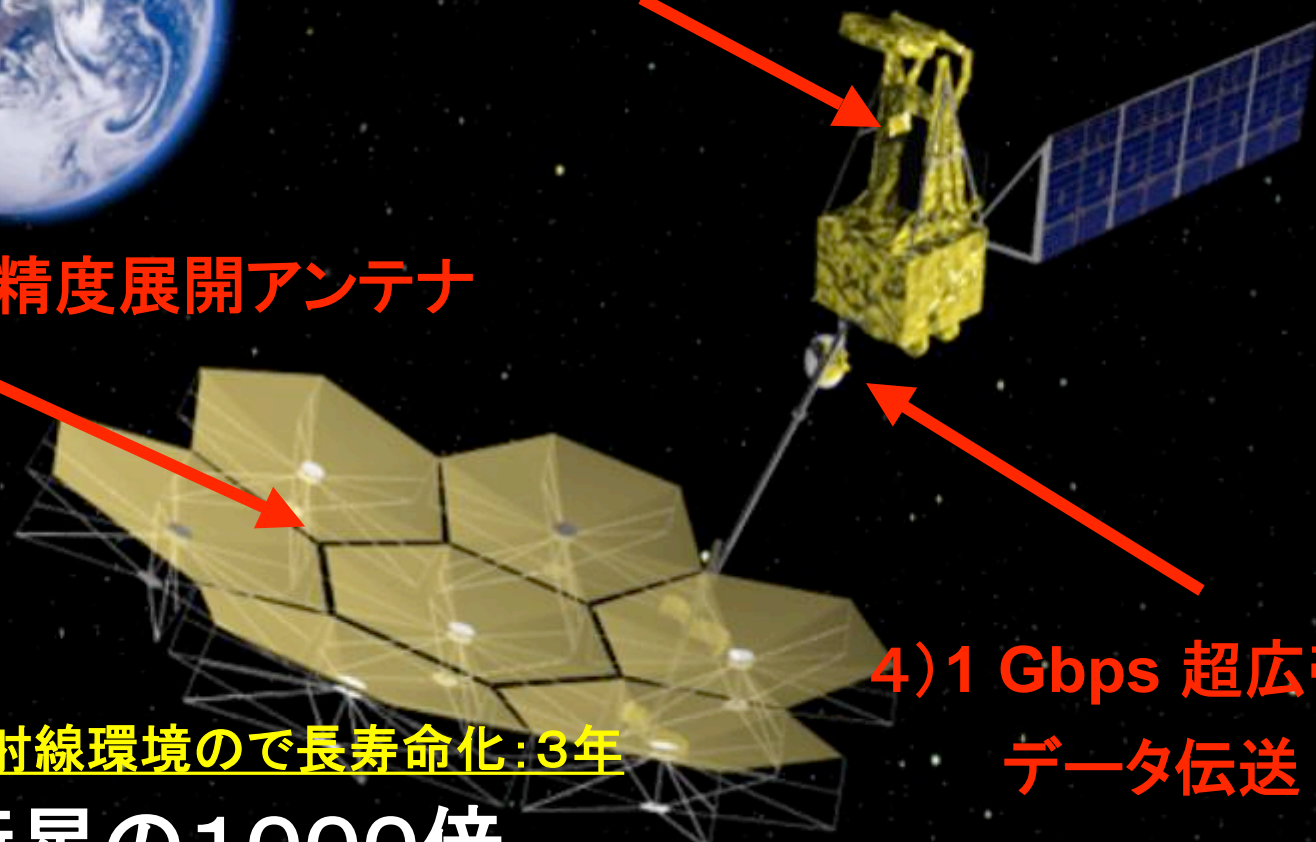
ASTRO-G衛星には沢山新技術が使われています。



2) 冷却ミリ波受信機

3) 位相補償能力

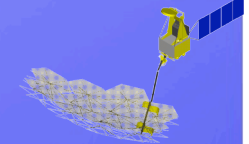
1) 9.3 m 高精度展開アンテナ



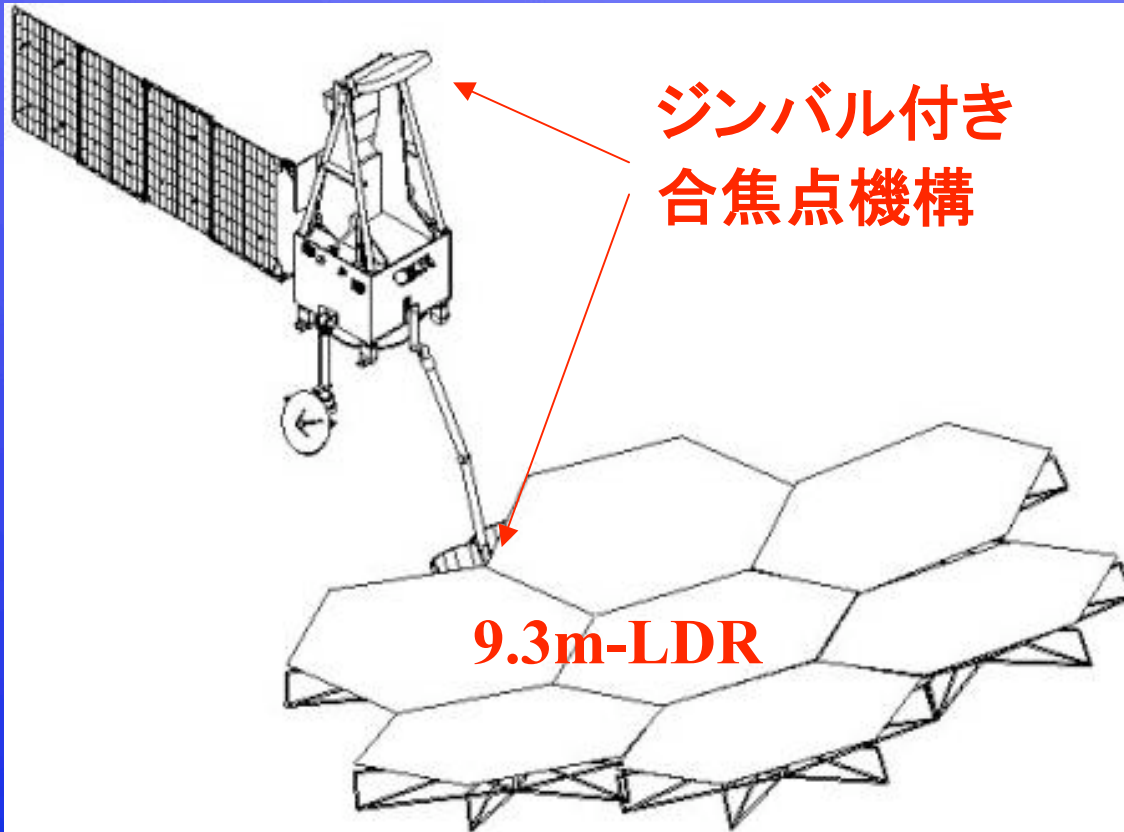
4) 1 Gbps 超広帯域
データ伝送

超！過酷な放射線環境ので長寿命化:3年

X線衛星の1000倍



ASTRO-G 9.3 m 高精度展開アンテナ



ジンバル付き
合焦点機構

9.3m-LDR

ミリ波用金属メッシュ反射面

9.3-m LDR

Deployable offset Cassegrain antenna with module structures

Light weight 200 kg

Mesh as Surface of LDR

We also used Mesh as Surface of LDR for HALCA.

表面粗さは

$r.m.s < 0.4 \text{ mm}$

Observing Frequency

1.6, 5,(22)=>8,22,43 GHz

Gimbal -focusing system

Mission lifetime 3 years

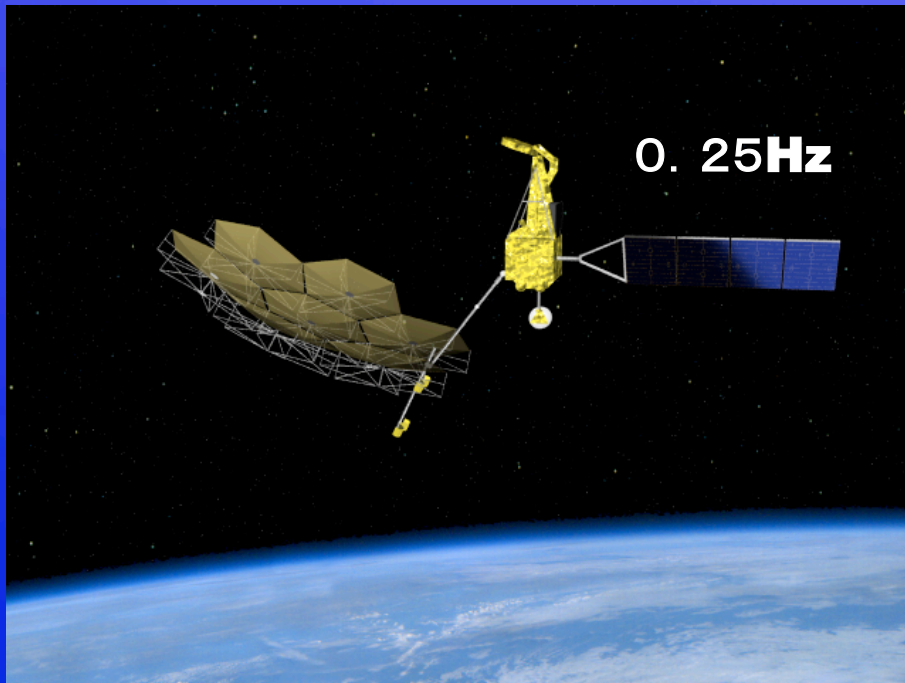


5Hz

NRO45m鏡も柔らかい望遠鏡でこんなにやく望遠鏡と言われたがASTRO-G**はこんなにやくでできた傘である。**



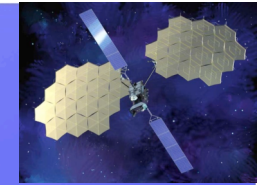
1Hz



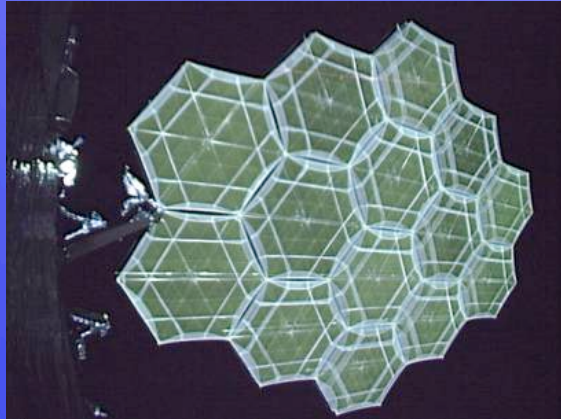
0.25Hz



Large Deployable Antennas -ETS-VIII Deployment Mechanism-



ETS-VIII
(Dec. 2006)

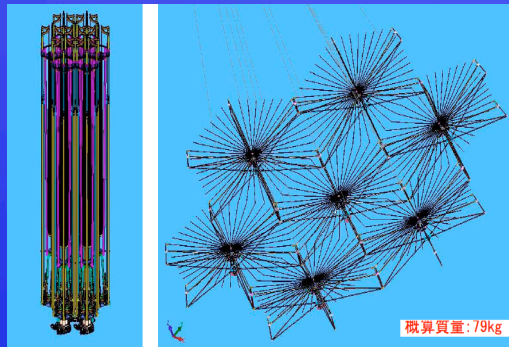


Module-type offset-Cassegrain antenna
ETS-VIII (2006) deployment mechanism

Deployment Test of ETS-VIII



Seven Modules (Stow / Deployment)



ASTRO-G LDRの基礎開発

TEST MODEL
FOR ANTENNA
MODULE



ASTRO-G展開アンテナの開発

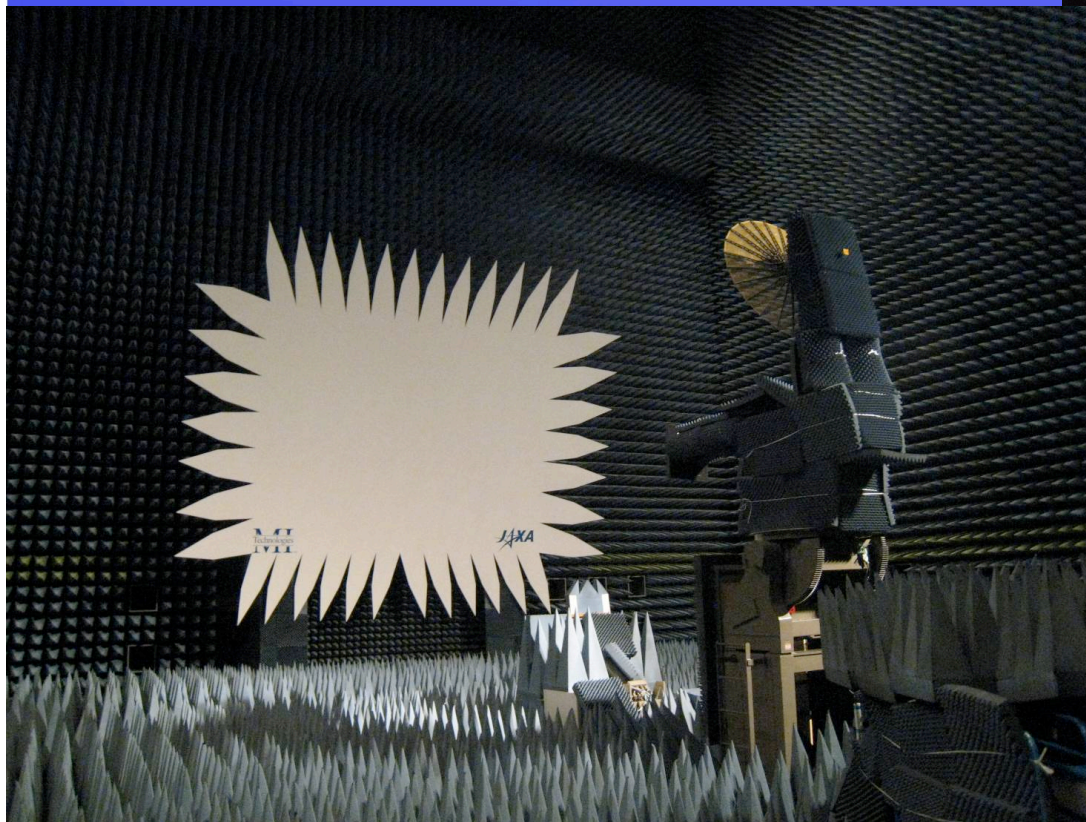
RF試験用小型アンテナ

@筑波電波暗室

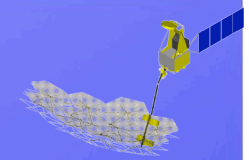
2008年9-12月

メッシュを含むアンテナ電磁界
設計法の確認

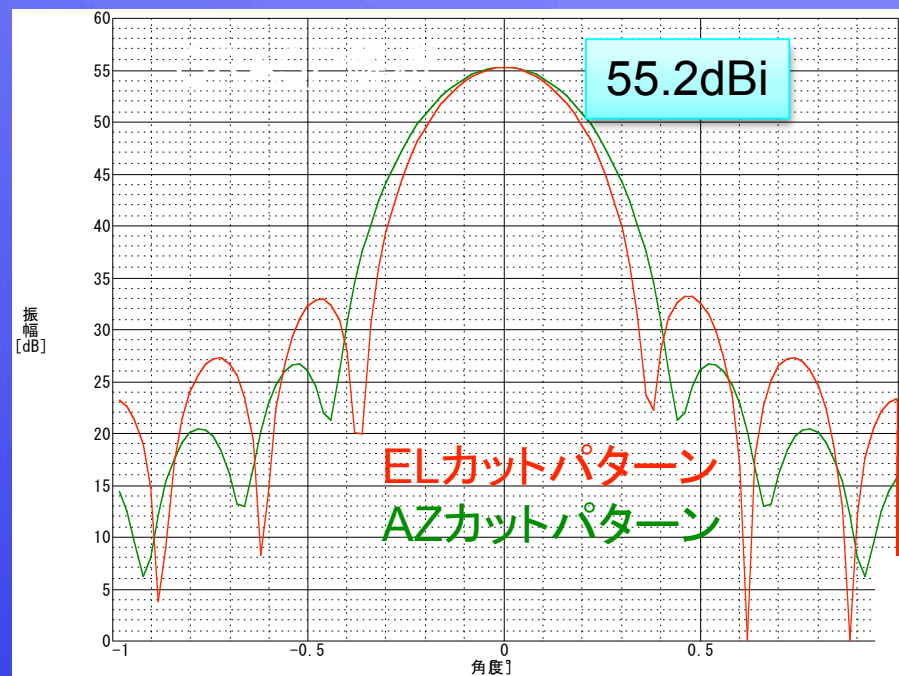
RF試験用小型アンテナ



JAXA電波試験棟での
ASTRO-G主鏡用試験
コンパクトレンジ電波暗室
での測定の様子



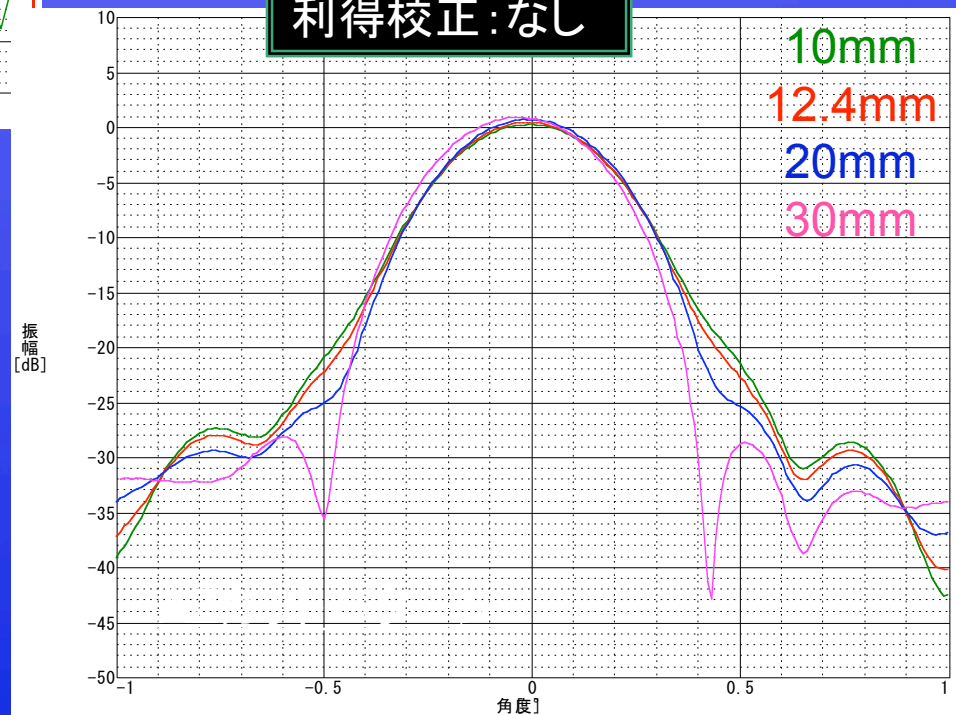
アンテナ 測定結果



周波数: 43GHz
供試体
利得校正: なし

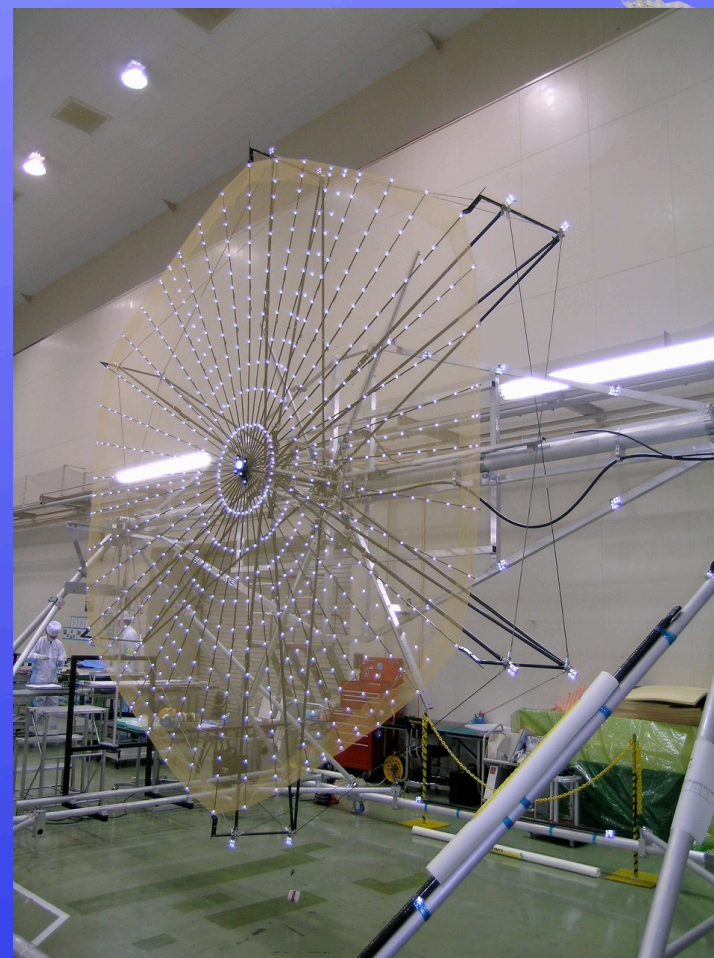
周波数: 43GHz
GRASP解析
パラボラ鏡面は理想鏡面

現在設計値と測定値は
10%以内まで一致している。



実機サイズ 1モジュールEMでの熱真空試験

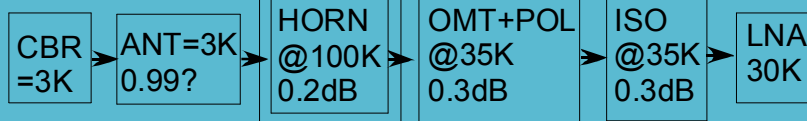
大型展開アンテナ7モジュールのうち中心1モジュールについてEMを製作して宇宙環境を模した熱真空室での試験行なった。



テストモジュール
直径4m

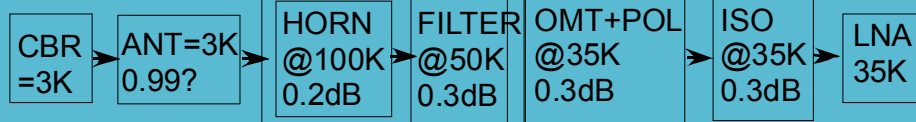
ミリ波受信機システム

22GHz system

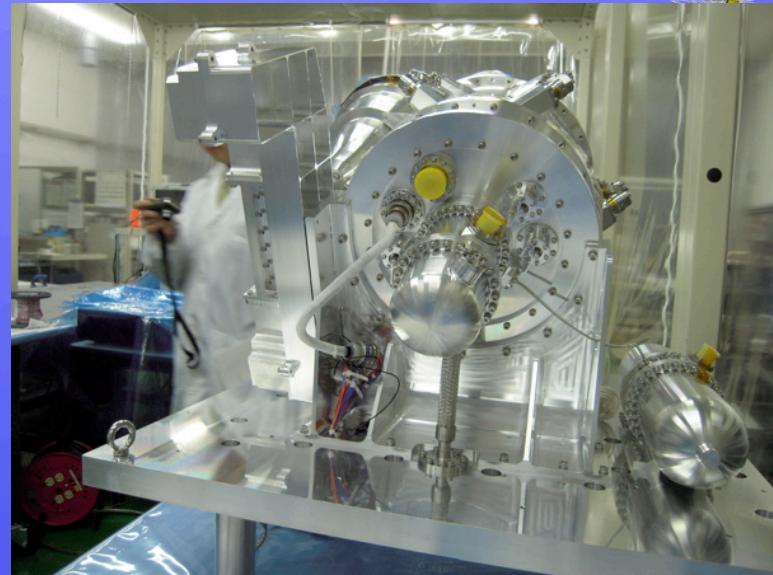


==> $T_{sys}=52K$

43GHz system



==> $T_{sys}=65K$



22/43 GHz
Cryostat

Stirling-cycle
refrigerator

From
LDR

8GHz Horn

8GHz LNA

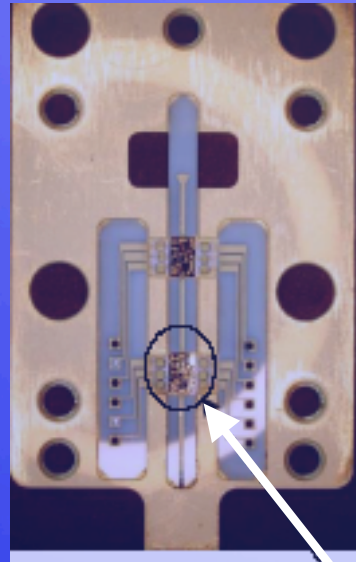
Stirling-cycle
refrigerator

8GHz system



==> $T_{sys}=90K$

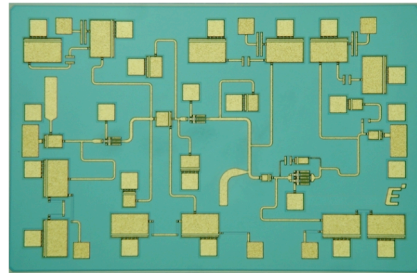
22/43 GHz LNA用専用MMICの開発



LNA

この分野の日本の技術
はすごい！

**Dedicated
GaAs MMIC**



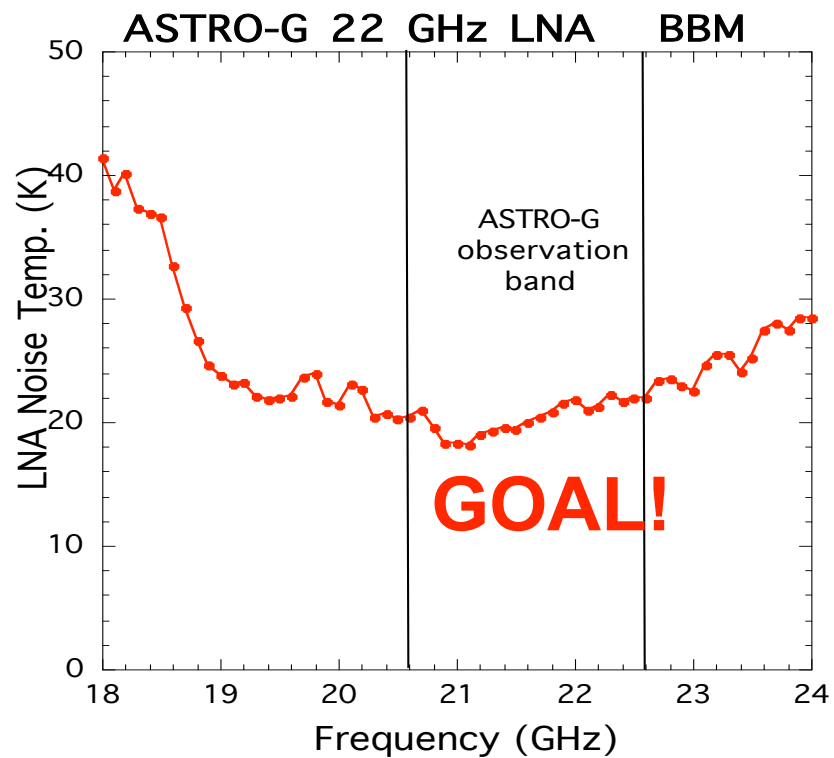
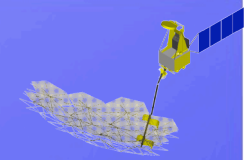
Low noise <25K (K) <40K(Q)
High gain > 30dB
Light weight <100g
High reliability
Radiation Hard >100kRad
&
Unconditionally Stable

Receivers at 22 and 43 GHz
cryogenically cooled to 30 K.

present status of LNA

<25 K at 22 GHz at EM done

<40 K at 43 GHz at EM done

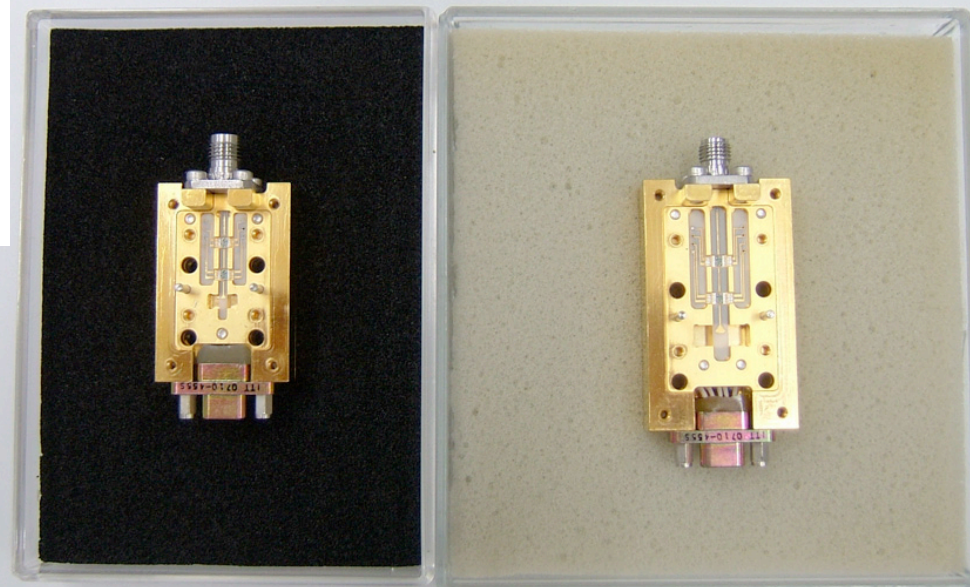


2008年10月からフロントエンドは
宇宙研内でEMを組み立てた。

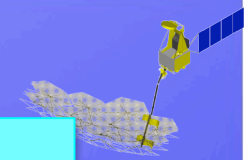
問題なし

BBMレベルアンプは順調に
開発終了。
EMレベルのアンプを製作し
単体レベルの冷却／振動試験、
RF性能試験を実施した。

問題なし

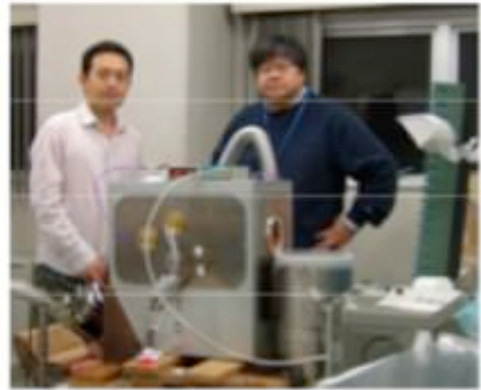


冷却フロントエンドの開発



EM Test Receiver at ISAS

クーデューワ-内のホ-ンアツシイ
↓今日も疲労の色濃い測定者



ASTRO-G 冷却受信機

22、43 GHz 2周波数
2偏波

冷却: スターリングサイクル
冷凍機(2段)

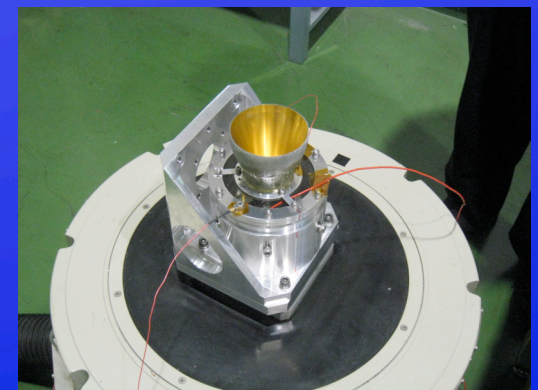
冷却温度: 30K

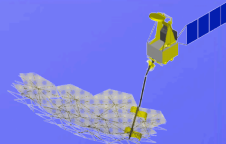
宇宙研相模原実験室での RF性能試験



宇宙研相模原実験室
クリーンルームでの
組み立てと振動試験

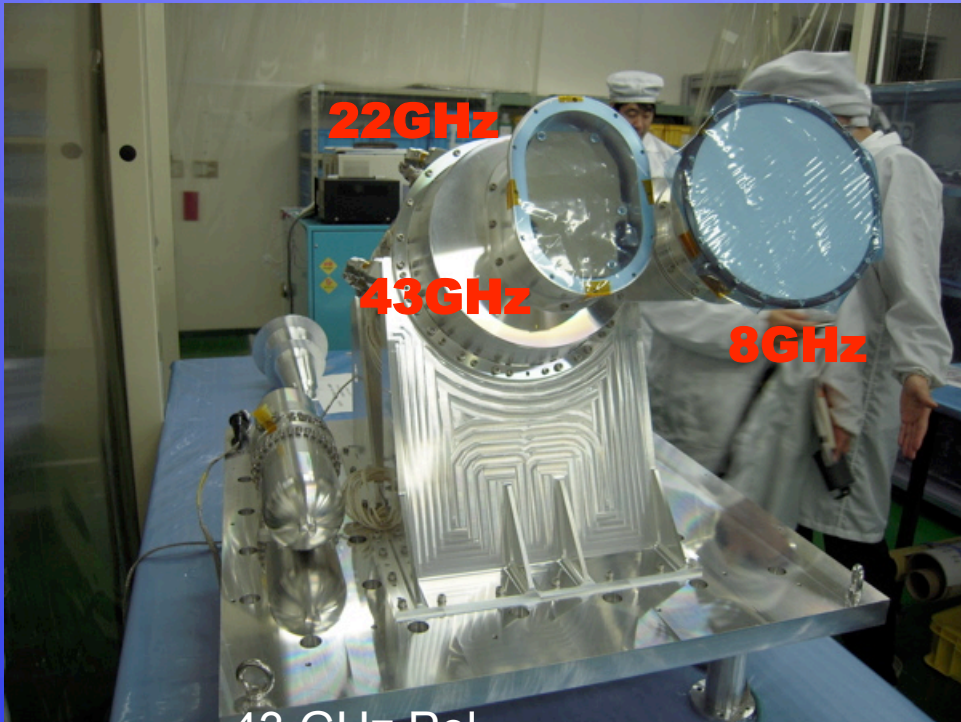
振動試験器への セットアップ



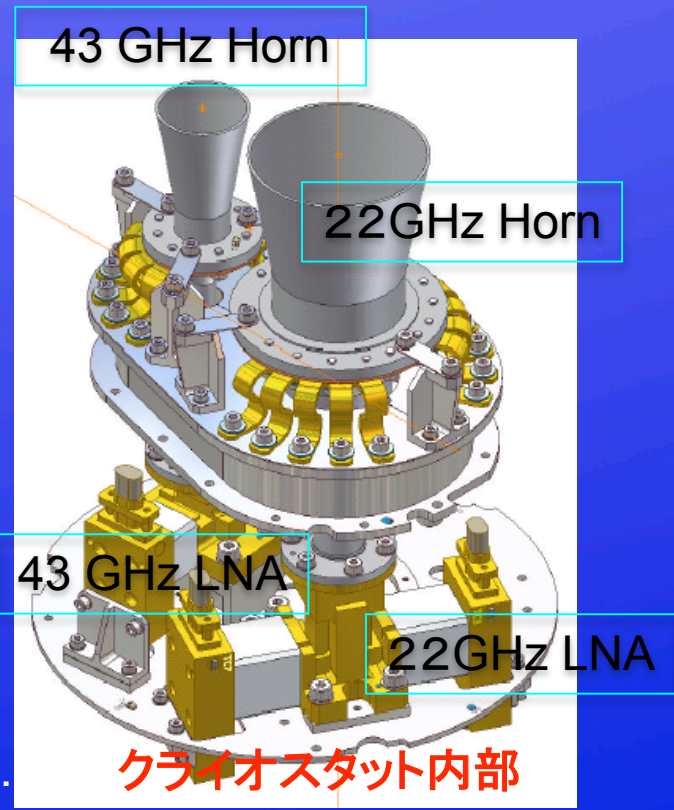
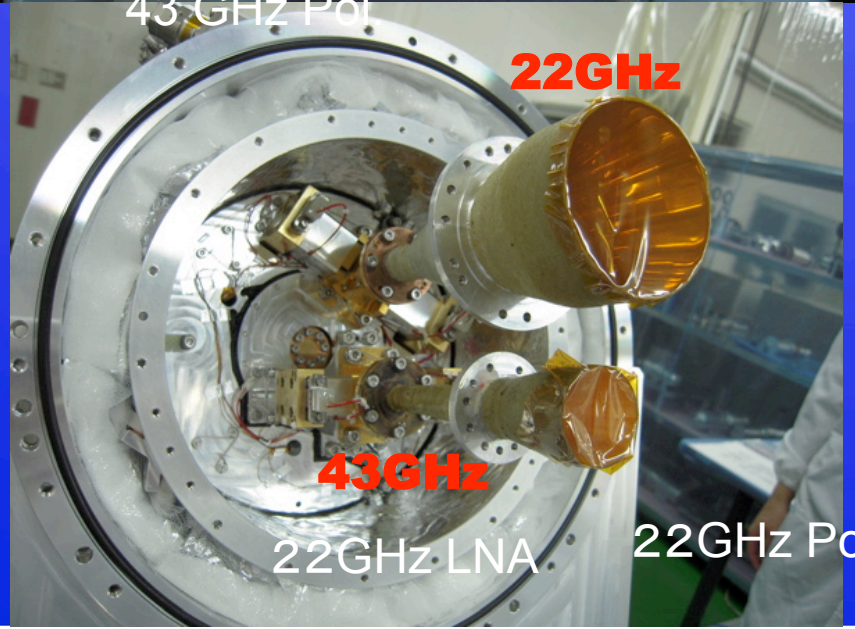


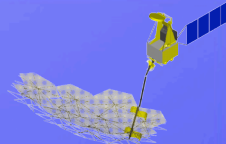
EM受信機の完成 @SHI新居浜工場

2009年3月
8/22/43GHzの各受信機
は無事クライオスタットに組み付いた



43-GHz Pol





衛星レーザー反射器

超高精度軌道決定技術

ASTRO-G

GPS受信機

EM製作と技術検討がされている。

地上レーザー測距局

GPS

GPS

GPS

GPS

GPS

GPS衛星群

目標軌道決定精度は
< 10cm (できれば 3 cm)

VSOP-2 の観測には国際協力が大変重要です。

ASTRO-G 衛星(日本)
 地上望遠鏡(日、韓、中、米、欧州)
 データリンク局(日本、スペイン)
 相関器(韓/日、米、欧州)
 軌道決定(日本、米国など)



Correlator



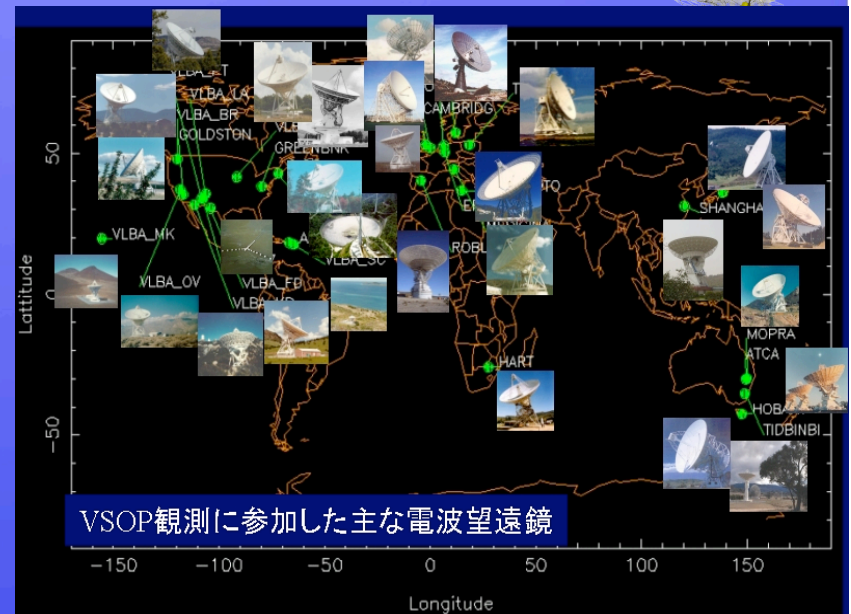
地上望遠鏡(日、韓、中、米、欧州)

喧嘩しないように 国際委員会VISC2を 作りました。

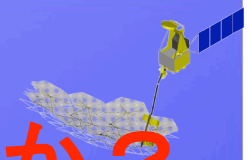
VSOP-2 conference @ISAS in 2007



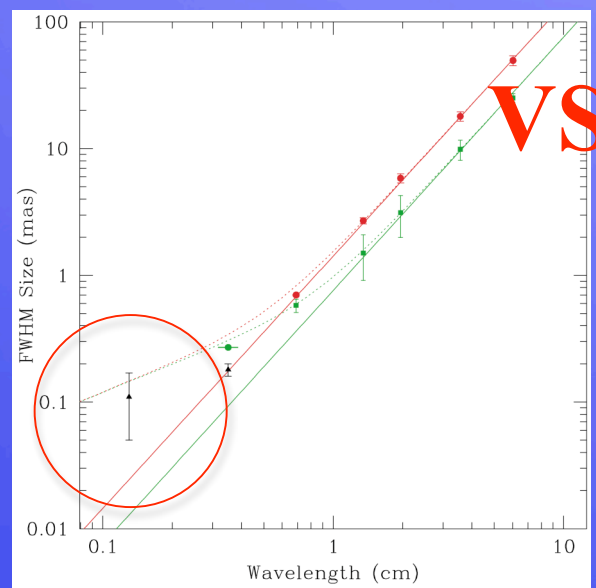
熱い議論でお疲れ
です。。。。



First VISC2 @MPI in May 2008

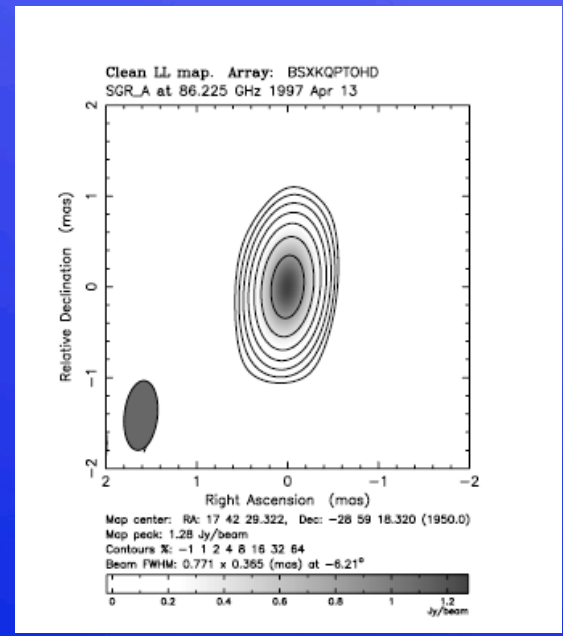


VSOP2はSgrA*は見ないのか？ 3mm VLBI:SgrA*の画像

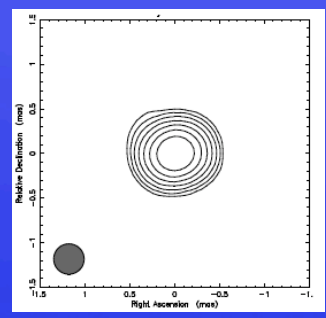


Doeleman et al. 2001

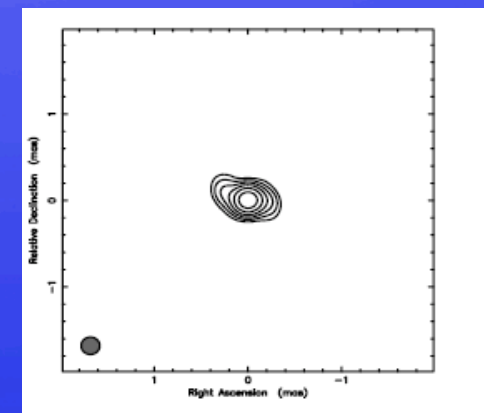
波長2乗則は3mmでは崩れる。 **7mmは？**
3mm VLBIでサイズの情報はわかる。
以下はスーパーレゾリューション



Krichbaum et al. 2006



Lu et al. 2008

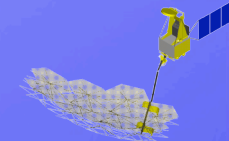


Shen&Lo 2004

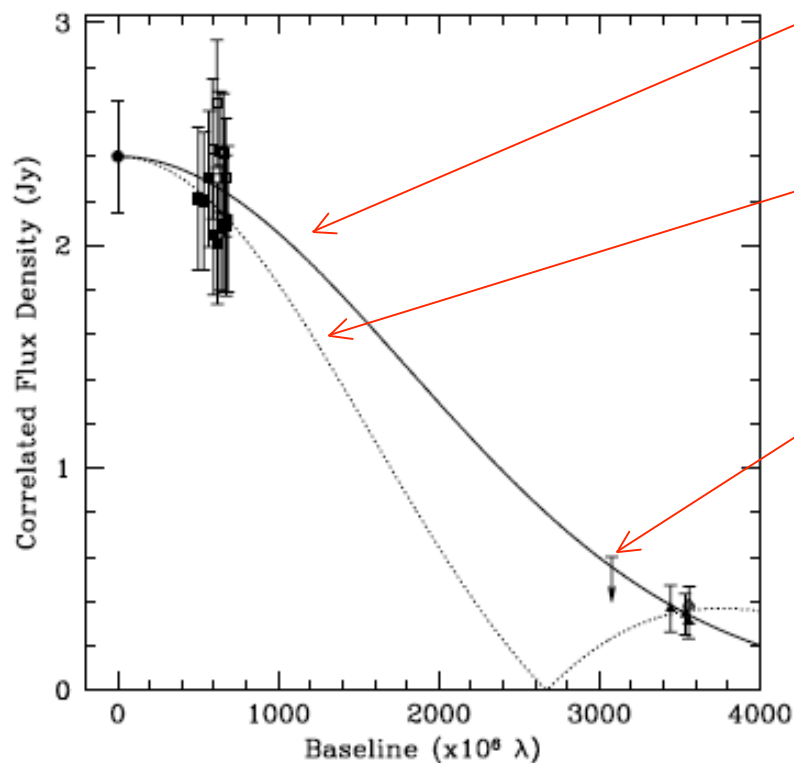
3mm VLBI観測の結果

$\Rightarrow \theta_{FWHM} \sim 0.3-5mas$

銀河系中心Sgr A*の1mm VLBI



JCMT-CARMA-ARO



実線がブラックホールによる穴が見えない場合

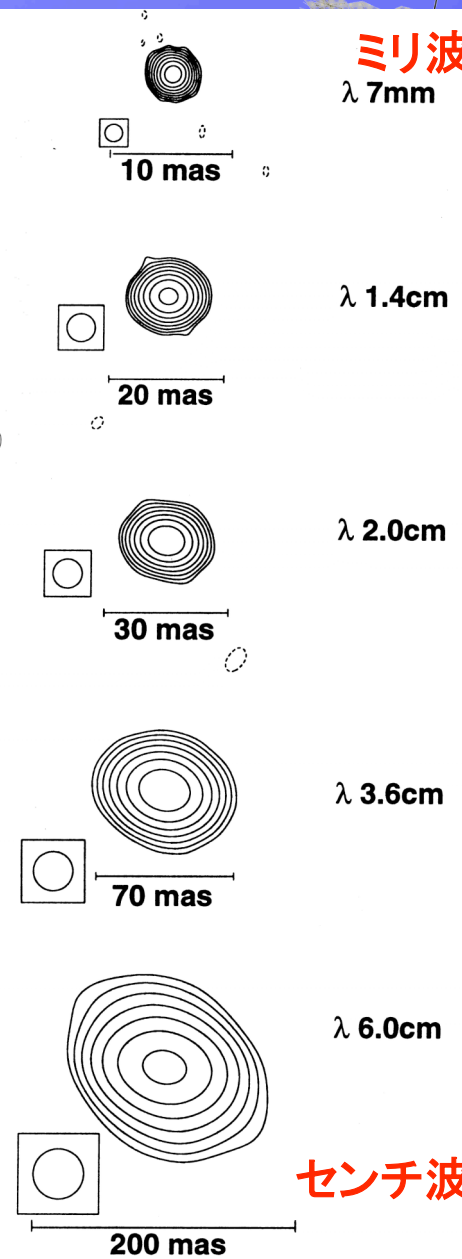
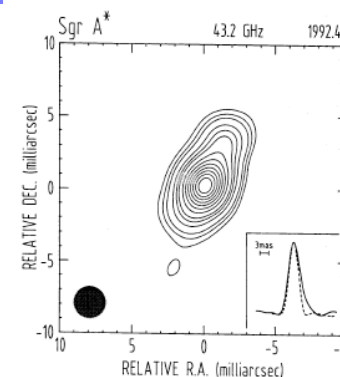
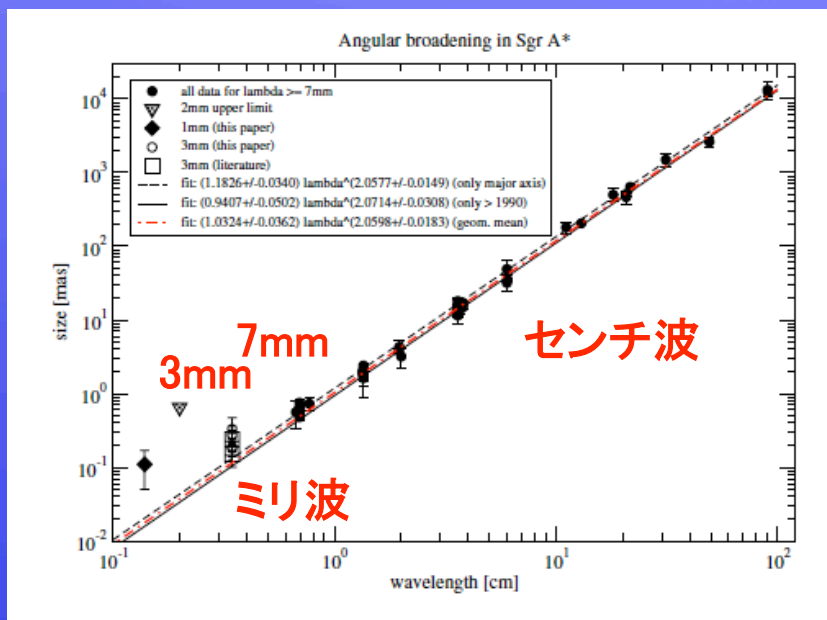
点線がブラックホールによる穴が見える場合

このデータが上限値になっている。穴があるとして矛盾がない。

ブラックホールの穴が見えかかっていると主張している。

Doeleman et al. 2008

SgrA* のVSOP2観測で見えるか？

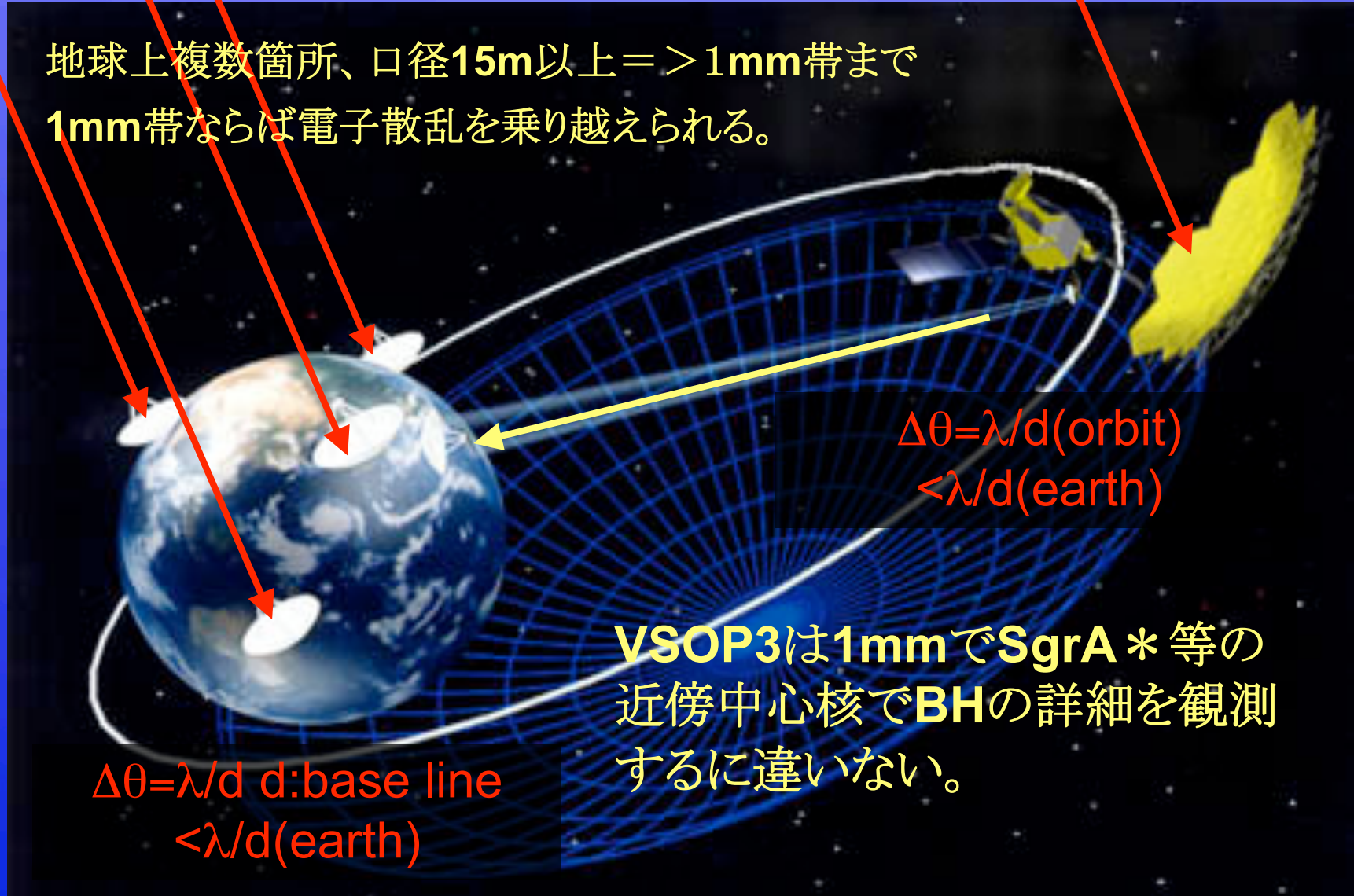


Partly Cloudy なSgr A*の仮説

いつもいつも曇って見えないかは
確かめる必要がある。特に43GHz！！

VSOP3は1mmで銀河中心BHを見る？

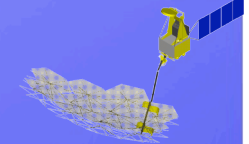
地球上複数箇所、口径15m以上=>1mm帯まで
1mm帯ならば電子散乱を乗り越えられる。



$$\Delta\theta = \lambda/d(\text{orbit}) < \lambda/d(\text{earth})$$

VSOP3は1mmでSgrA*等の
近傍中心核でBHの詳細を観測
するに違いない。

$$\Delta\theta = \lambda/d \text{ d:base line} < \lambda/d(\text{earth})$$



1) **VSOP2**は2012年度から大きく遅れず打ち上がり、**AGN—BH**周辺、相対論ジェットの根元の撮像観測に成功する(はず)。

2) **VSOP2**はもしかしたら近傍銀河の**BH**の撮像ができる??

3) **VSOP3**は2025年ころには打ち上がり**1mm**帯の撮像観測からもしかしなくても近傍銀河の**BH**の撮像ができる。(少なくとも技術的には可能)

Thank you.