

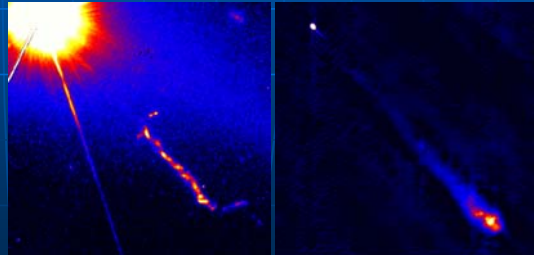
# AGNの発見

- 3C273  
ケンブリッジ大の3Cカタログで発見 (1959)  
月の掩蔽を用いて位置計測と光学同定が行われ、約13等級のクェーサー( $z=0.158$ )が発見された (1963)。

3C273 光学写真



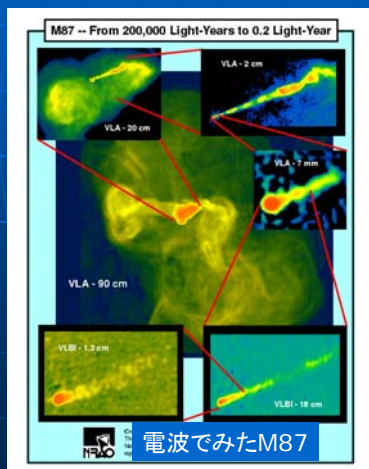
光および電波でみえるジェット



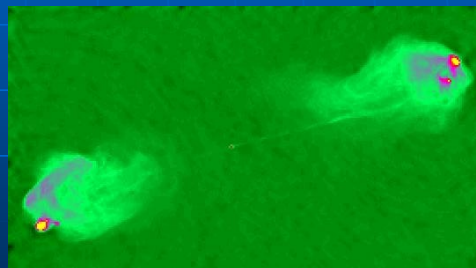
QSOの莫大なエネルギーを説明するためにBHエンジン説が有力に

# 電波銀河、AGN

- AGNから光速に近い速度でジェットが放出され、シンクロトロン放射で明るく輝く。VLBIで中心部を高分解観測可能。



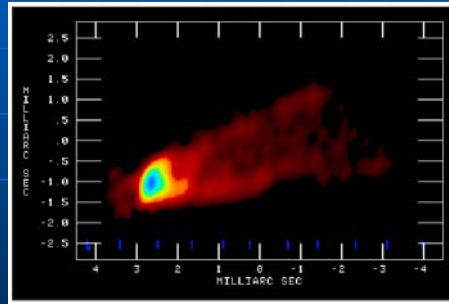
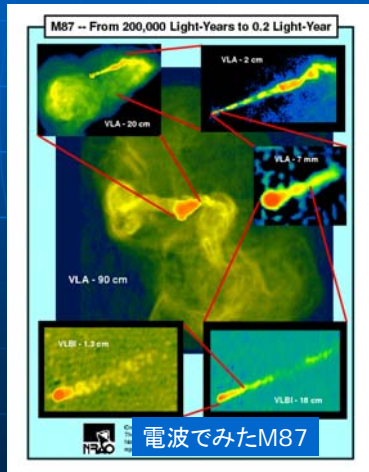
電波銀河 はくちょう座A (VLA)



相対論的ジェット+電波ローブ

## AGNとジェット

- AGNから光速に近い速度でジェットが放出され、シンクロトロン放射で明るく輝く。VLBIで中心部を高分解観測可能。

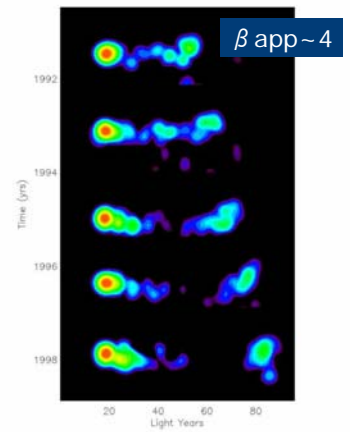


M87の電波コアとジェットのモニター  
(Walker+ with VLBA)

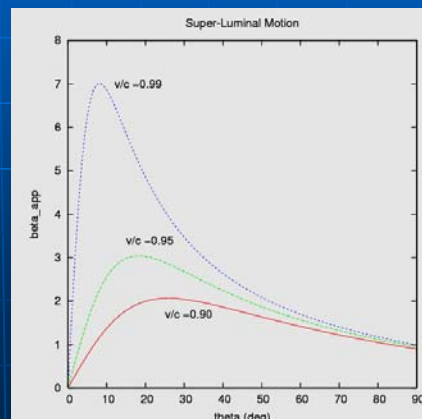
## ジェットの超光速運動

- 光速に近いジェットの天球面上での見かけの速度は光速度よりも大きく見えることがある（光速近くまで加速された証拠）

電波でみた3C279の超光速運動

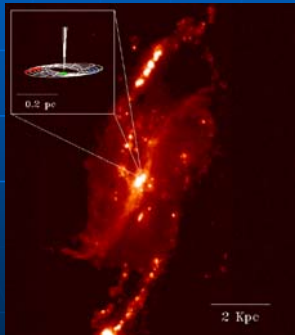


ジェットの見かけの運動速度と  
ジェットを見込む角の関係

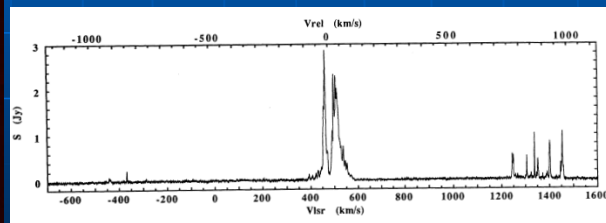


## VLBIでBHの質量を測る

- NGC4258 (M106)
  - + / - 1000km/sにもおよぶ幅の広い
  - スペクトルの発見 (1993、野辺山45m鏡)



光学写真



中心部の水メーザーのスペクトル

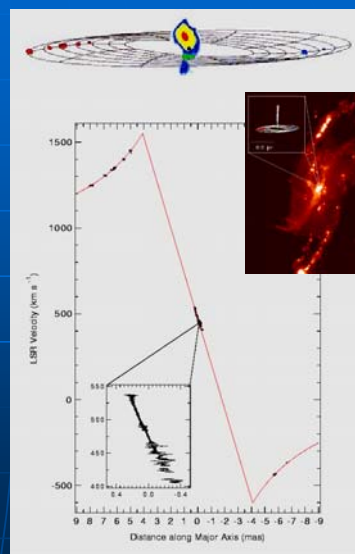
中心成分は視線速度が系統的に変化する(加速)

## AGNメガメーザー

- VLBAによるイメージング
  - ブラックホール周りの回転ガス円盤を検出

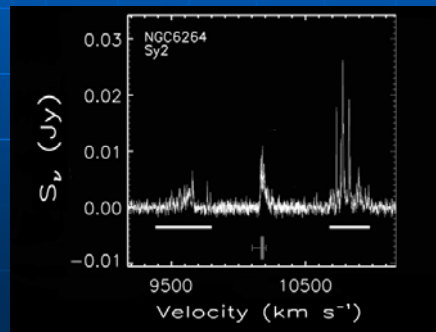
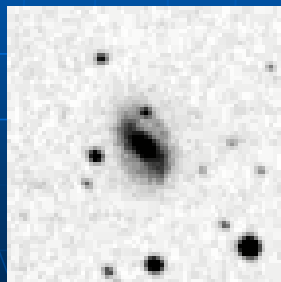
その大きさと回転速度が  
ブラックホールの質量が  
3600万太陽質量と分かった  
(精密な距離も同時に決定)

もっとも確からしいブラック  
ホールの証拠  
(日米共同研究、1995年)



## AGN Maser Cosmology

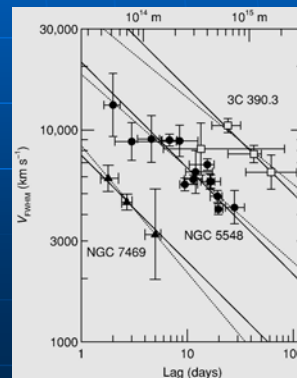
- AGNメガメーザー円盤は遠方銀河の距離を超高精度に測れる唯一の手段 ( $v=r\omega$ ,  $a=r\omega^2$ ,  $\theta = r/D$ )
- GBT100m + VLBAによる多数のAGN観測により、ハッブル定数の超高精度決定を目指すプロジェクトが米国で進行中



NGC6264の写真とスペクトルの例

## BHの質量決定

- メーザー円盤 VLBI  
(距離も求まる)
- 銀河中心の星の速度分散  
高分解能分光
- Reverberation mapping  
(光度変動の時間ラグと線幅の関係)  
分光モニター



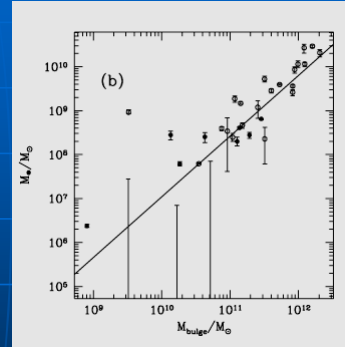
Reverberation mappingの例

## BHと銀河の共進化

- ブラックホールとspheroid  
(バルジ／楕円銀河本体)  
の質量間に良い相関  
(Magorrian関係)

$$M_{bh}/M_s \sim 0.001$$

ブラックホールの形成、進化に  
母銀河が関連していることを示唆  
しかし、この関係の背景の理解はまだ  
(原因 or 結果?)



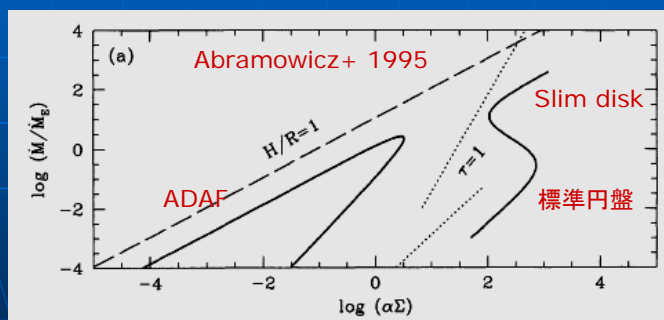
Magorrian+ 1998

## VLBIのBH観測スケール

- N4258分子ガス円盤       $\sim 0.1 \text{ pc}$   
( $10^5 R_g$ )
- M87ジェットの根元       $\sim 4000 \text{ AU}$   
( $200 R_g$ )
- M87降着円盤       $\sim 10 R_g$   
with VSOP-2?
- Sgr A\*のシャドウサイズ       $\sim 5 R_g$   
with submm-VLBI?

## 降着円盤

- BH周囲の降着円盤には物理状態の異なるいくつかの状態がある。



VLBIで円盤を直接観測できる可能性があるのはADAF円盤  
(重力エネルギーを放射で解放しないため、きわめて高温になる)

## VSOP-2と降着円盤

VSOP-2 : VLBI Space Observatory  
Program-2

10mクラス、打ち上げ2013年  
(2006年3月に計画承認)

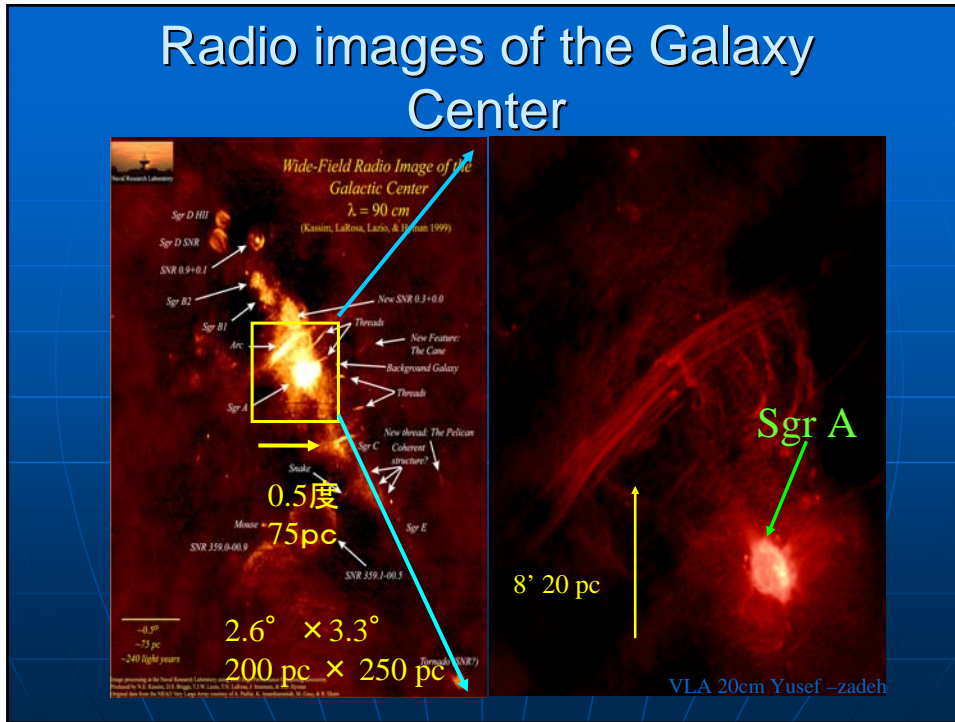
最長基線: 30000 km  
最高分解能 :  
38  $\mu$  as @ 43 GHz



= M87 BHの10 R<sub>g</sub>  
降着円盤が見える! ?

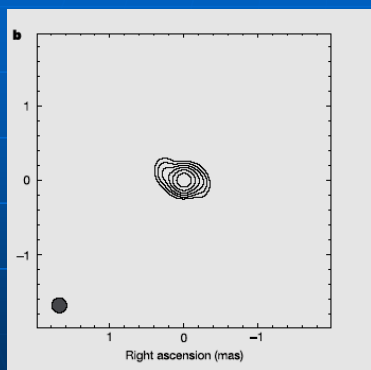
VERAや大学連携、  
東アジアネットはその  
地上局として貢献

# Radio images of the Galaxy Center

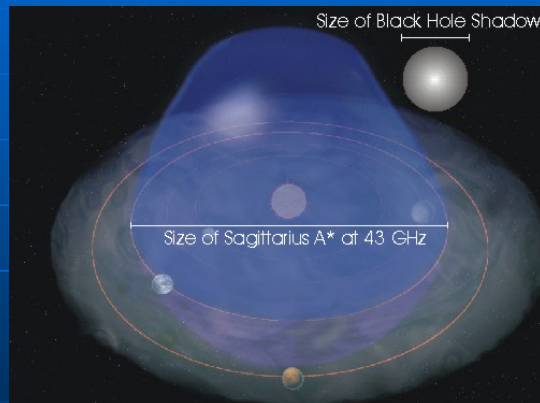


# VLBI image of SgrA\*

Sgr A\* size :  $< 1 \text{ mas}$  ( $< 100 R_g$ ) : c.f.  $R_g \sim 10 \mu \text{ as}$



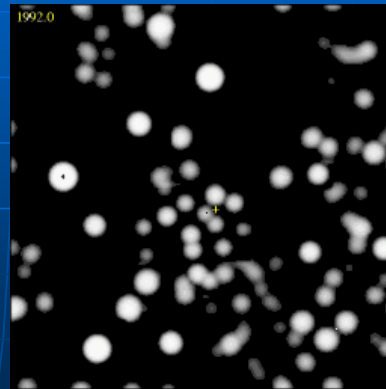
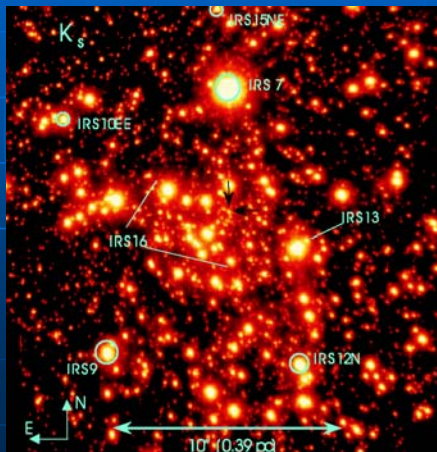
VLBA 86GHz map  
 by Shen et al.(2005)



<http://www.astro.ru.nl/~falcke/bh/Pictures/sgrastar-size-solarsystem-small.jpg>

## Stars' motions around Sgr A\*

- Deep infrared imaging and astrometry of stars at the G.C.



Motion of stars (Genzel et al.)

## Why Sgr A\* ?

Sgr A\* is a unique source for black hole study

- bright, compact radio source (observable with VLBI's high angular resolution)
- precise mass measurement  
 $M_{bh} \sim 4 \times 10^6$  solar mass
- Nearby source ( $D \sim 8$  kpc)  
 $\rightarrow$  the largest angular size:  $\theta_g \sim 10 \mu$  as  
it can be resolved in near future !?

Fukue+ 1989



Is BH really a "black hole"?



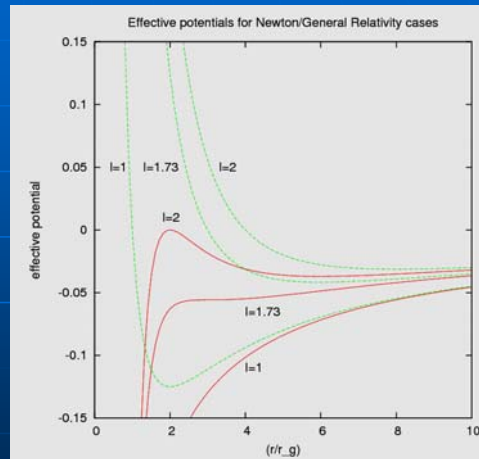
# BH近傍の粒子の運動

- BH近傍で安定な円軌道が存在しない
- シュバルツシルト場の場合

$$R = 3 R_g$$

が最内安定円軌道  
(Innermost Stable  
Circular Orbit)

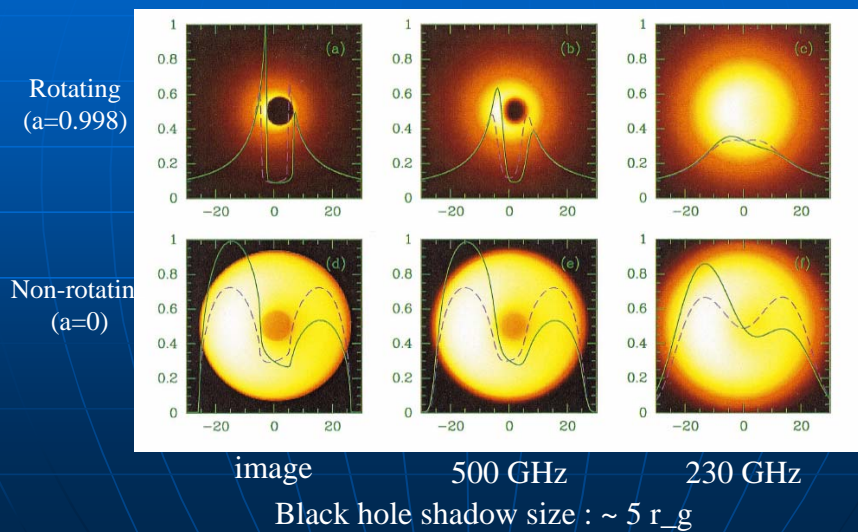
降着円盤は真ん中に穴が  
あいたドーナツ状になる



ニュートンの／相対論的な場合の実効ポテンシャル

# Sgr A\* “black hole” may be observable in sub-mm

Simulated image by Falcke et al. 2000

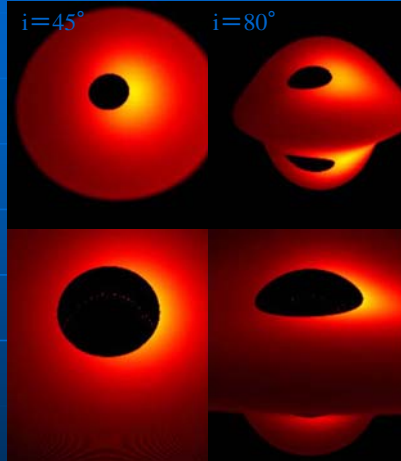


## Simulated image of Sgr A\* black hole shadow

Takahashi et al.(2004)

ADAF with different BH parameters  
(spin, disk inclination)

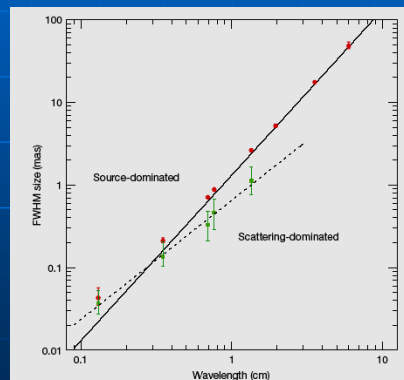
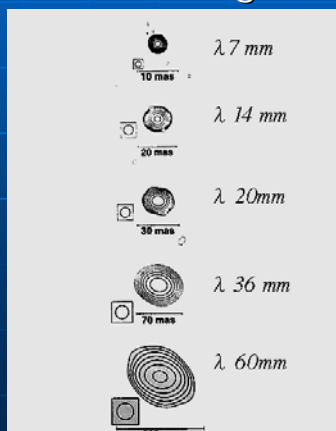
Different metric gives  
different shape of black  
hole shadow



black hole shadow >  
provides an ultimate evidence of BH existence  
allows us to measure the metric

## sub-mm VLBI is the key

- Sgr A\* suffers from significant interstellar scattering at cm—mm wavelength

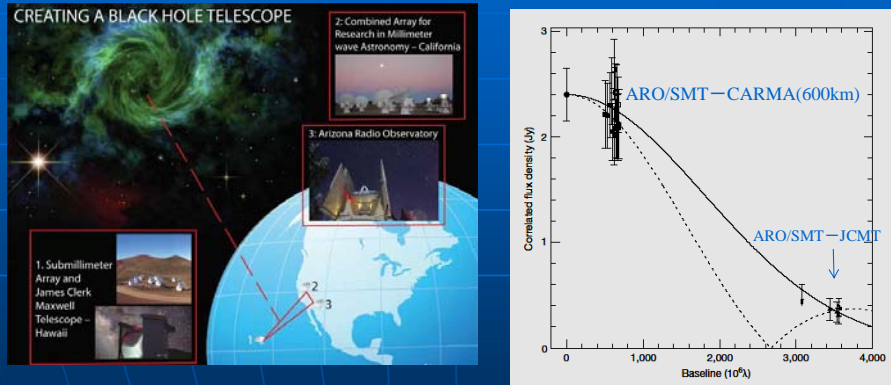


$$\text{Scatter effect} \propto \lambda^2$$

Lo et al.1999

# Event-horizon-scale structure detected !?

Doeleman et al. 2008 in Nature

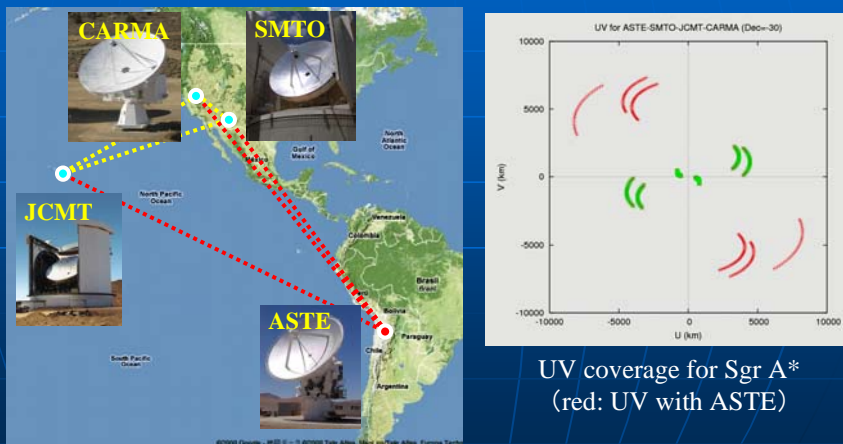


Non-imaging analysis (traditional UV distance plot)

- $37 \pm (16,10)$  Intrinsic diameter of Sgr A\*
- Non detection on the JCMT-CARMA (3075 km)

# Sub-mm VLBI with ASTE

ASTE will be a key station for Sgr A\* observations (good site, longest baselines)



Array map of sub-mm VLBI with ASTE

Minimum fringe spacing  $37 \mu$  as

## Current status of sub-mm VLBI with ASTE

- ASTE team and VLBI team at NAOJ agreed to very positively seek a way to conduct sub-mm VLBI observations with ASTE (PI: Honma)
- Currently discussing how to obtain instruments which should be installed to ASTE (230G receiver, H-maser, data-recording system etc.)
- Also discussing the observation schedule in collaboration with the team led by Doeleman.



ASTE site (4860m above sea level)



## Future prospect

- US/ESO ALMA Test Facilities (12m x 2) may be handed over to some institute for additional submm VLBI stations (decision will be made quite soon)
- ACA/ALMA phase-up array will significantly boost the sensitivity of submm VLBI
- VSOP-3 as a submm VLBI satellite (one of the possible candidates)  
targets : Sgr A\* and M87

