

2014年11月15日14:15 (30+15min) :

# 「電波干渉計の原理、 ブラックホールのVLBI観測、 &銀河中心モニター」

三好真(国立天文台)

# 内容

1) VLBI:

干渉で天体(光源)の形・位置を調べる装置

2) ブラックホールのVLBI観測

3) 銀河中心モニター:

G2からのガス降着でSgrA \* は輝くか？

# 内容

- 1) VLBI(very long baseline interferometer):  
干渉で天体(光源)の形・位置を調べる装置
- 2) ブラックホールのVLBI観測
- 3) 銀河中心モニター:  
G2からのガス降着でSgrA \* は輝くか？

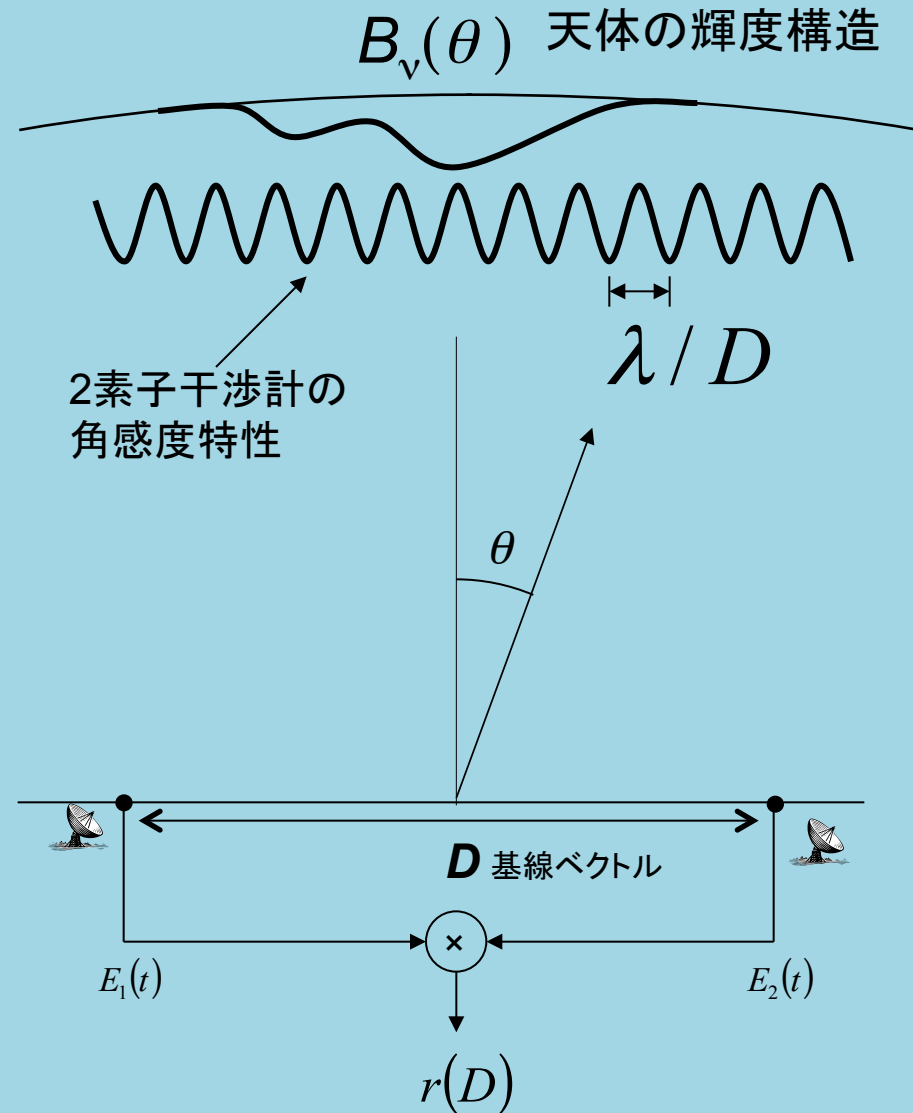
# 干渉計は天体輝度の空間フーリエ成分を計測する:

$$r(D) = \int_S B_\nu(\theta) \exp\left(-2\pi i \frac{D}{\lambda} \theta\right) d\theta$$

- 2素子干渉計の応答関数=ビームパターン(2素子干渉計の角感度特性)
  - 天球面上で正弦波状
  - その間隔(フリンジ間隔)

$$\lambda/D$$

- 干渉計の角度分解能に相当
  - 例:  $D=600\text{m}$ ,  $\lambda=3\text{mm}$   
 $\rightarrow \lambda/D=1 \text{ arcsec}$
  - $D=2500\text{km}$ ,  $\lambda=35\text{mm}$   
 $\rightarrow \lambda/D=3 \text{ milli-arcsec (mas)}$
- (電波)干渉計は、天体の輝度分布から、フリンジ間隔の空間周波数成分を抽出する機械



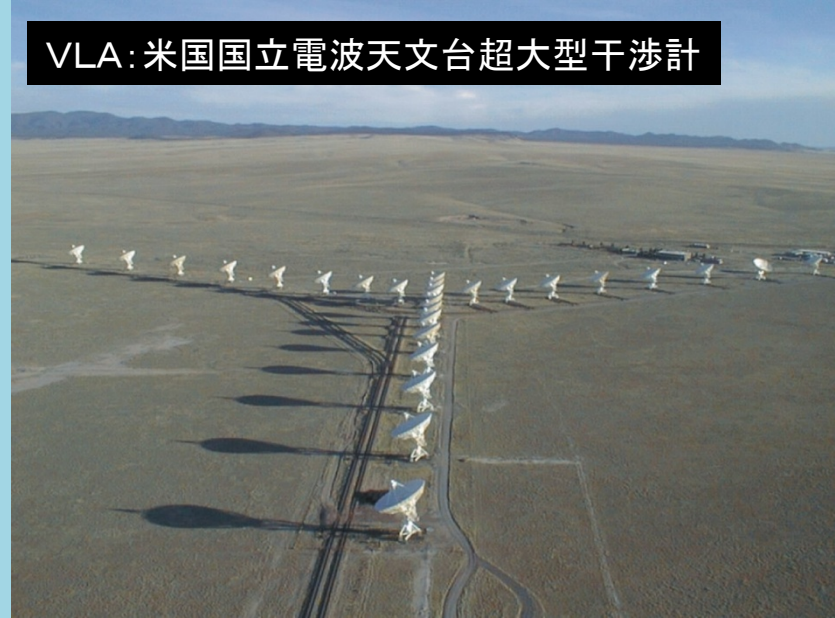
様々なDに対する $r(D)$ を計測、それらをフーリエ逆変換すれば、 $B_\nu(\theta)$ 、天体構造がわかる

# 実際の干渉計

NMA: 国立天文台野辺山干渉計



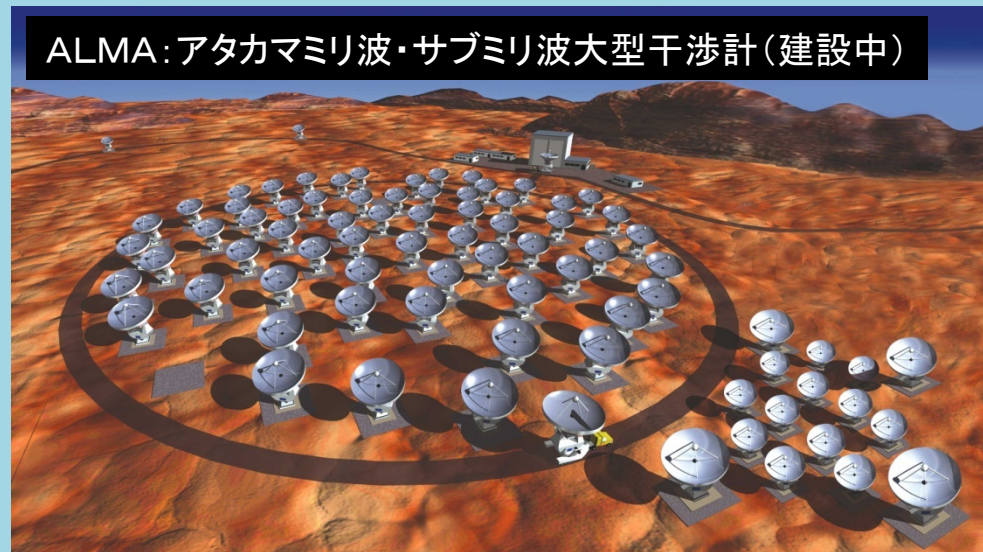
VLA: 米国国立電波天文台超大型干渉計



ATCA: オーストラリア国立天文台干渉計



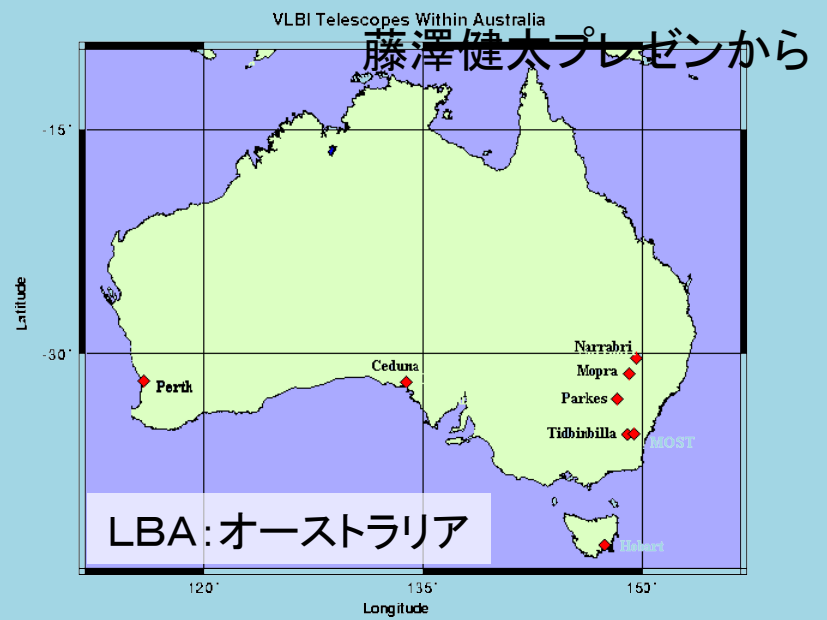
ALMA: アタカマミリ波・サブミリ波大型干渉計(建設中)



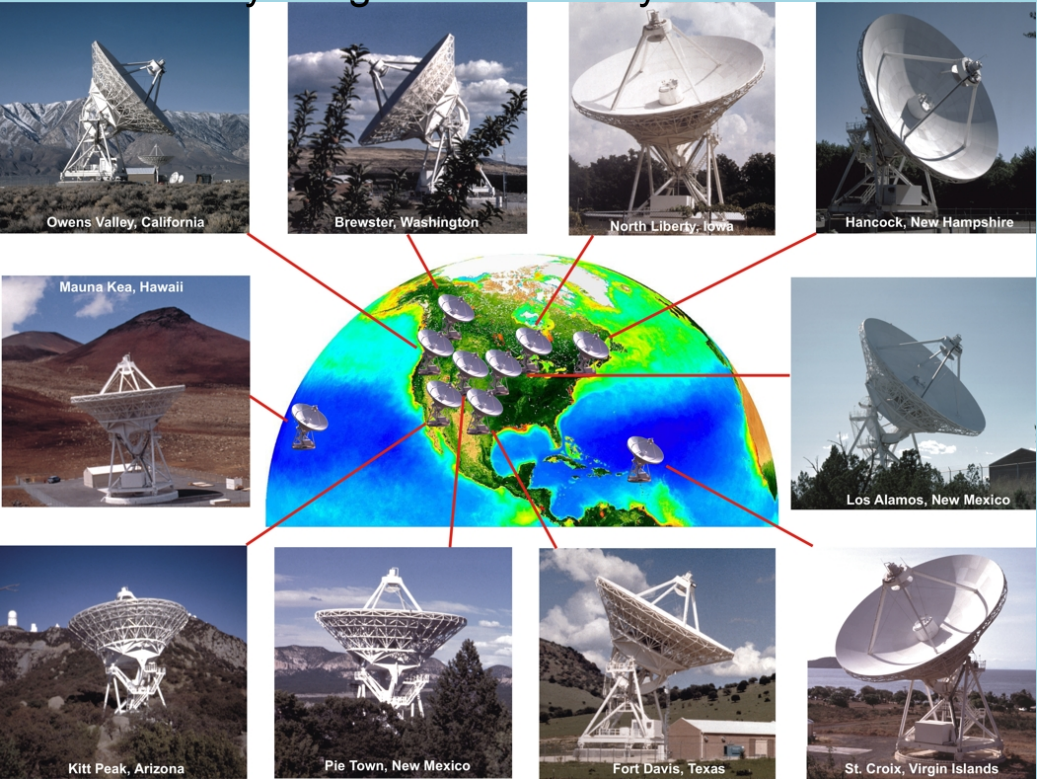


EVN:ヨーロッパVLBIネットワーク

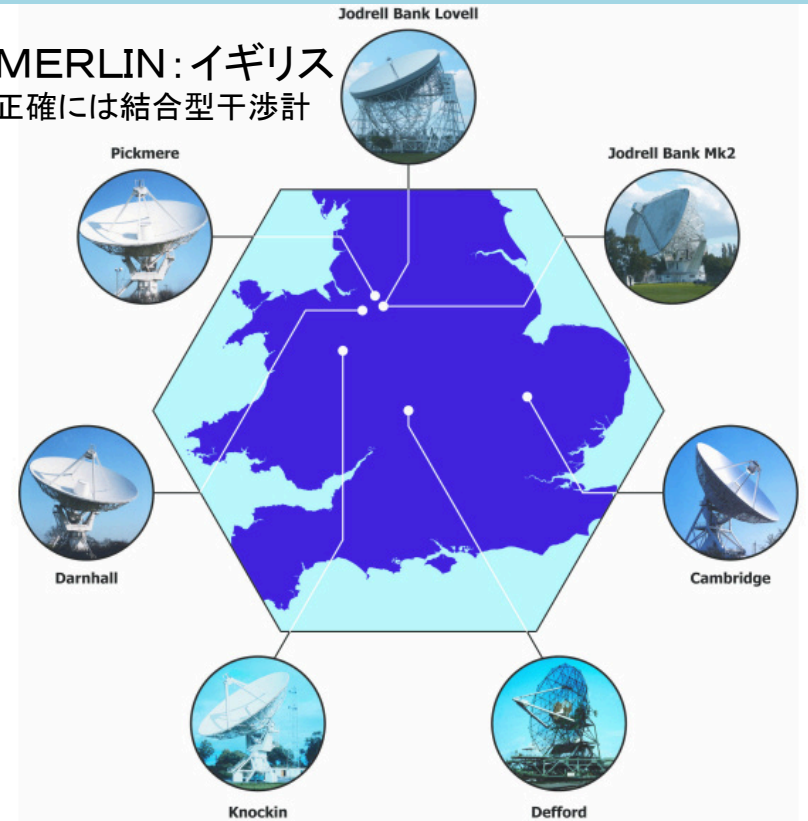
EVN Members MAG 03/2002



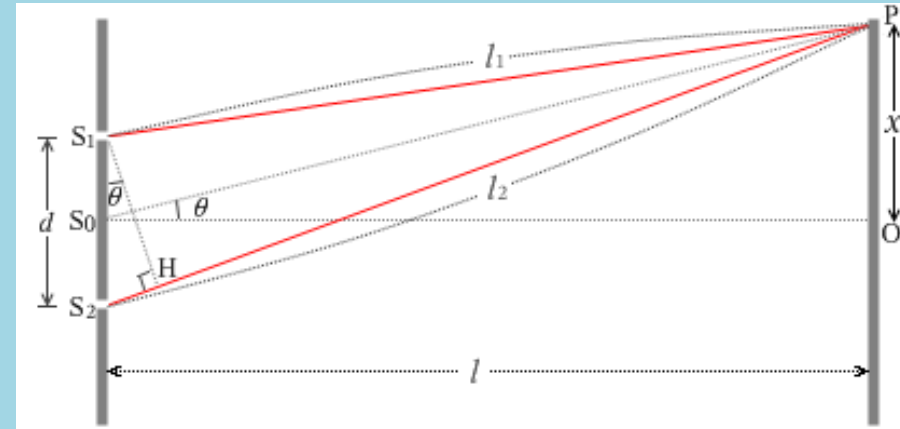
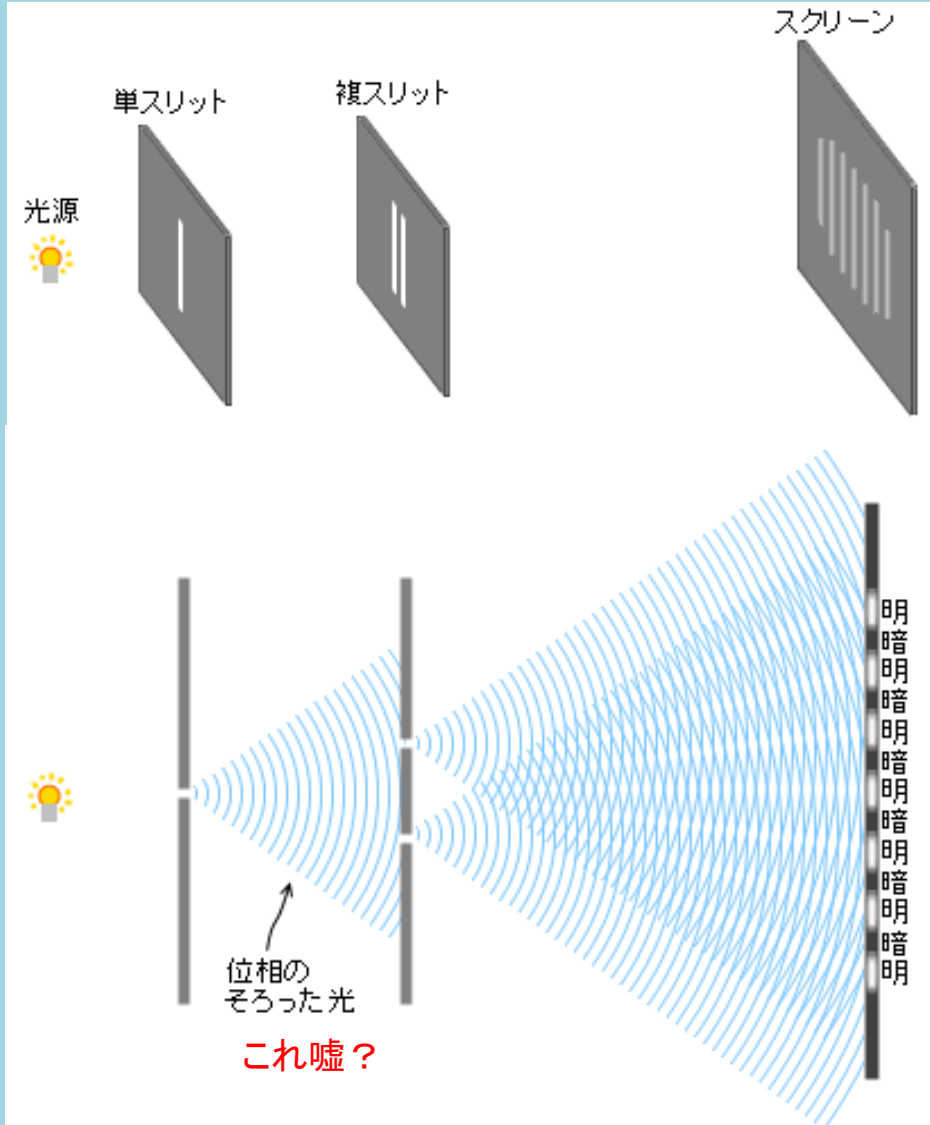
VLBA: Very Long Baseline Array



MERLIN: イギリス  
正確には結合型干渉計



# ヤングの干渉実験と比べる



ヤングの干渉実験

明線の条件  $\frac{dx}{l} = m\lambda$

暗線の条件  $\frac{dx}{l} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m=0,1,2,\dots)$

- \* 図中の光源は単色光(波長 $\lambda$ は1種類)
- \* 図中の光源は『干渉計』の観測天体Bではない!
- \* 『干渉計』観測では波長 $\lambda$ は複数ある。(スクリーンに映るシマシマはどうなる?)
- \* 干渉計の素子アンテナは何に対応?

# 内容

1) VLBI:

干渉で天体(光源)の形・位置を調べる装置

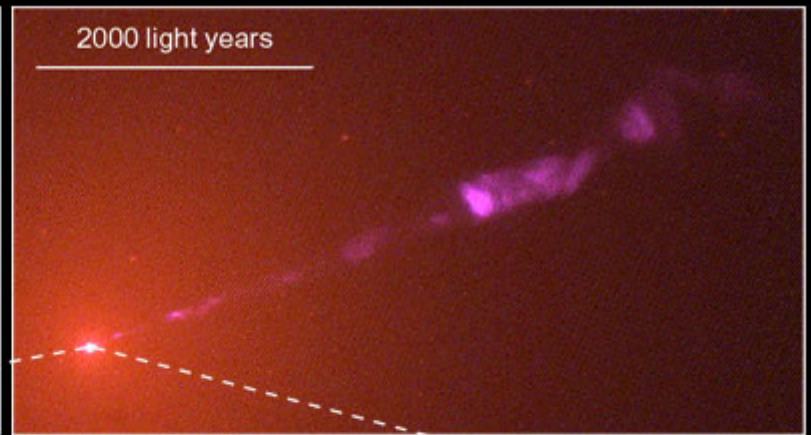
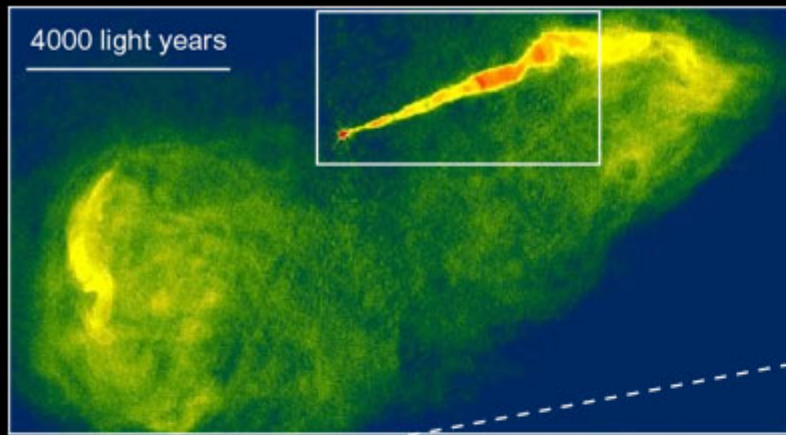
2) ブラックホールのVLBI観測

3) 銀河中心モニター:

G2からのガス降着でSgrA \* は輝くか？

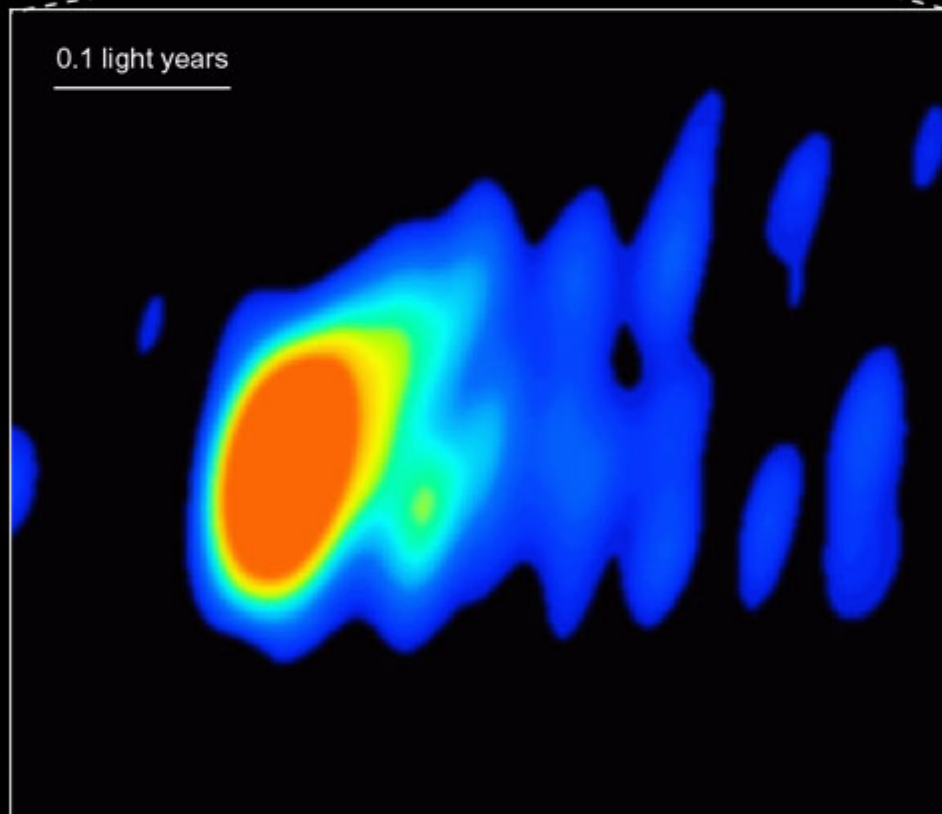


# Galaxy M87



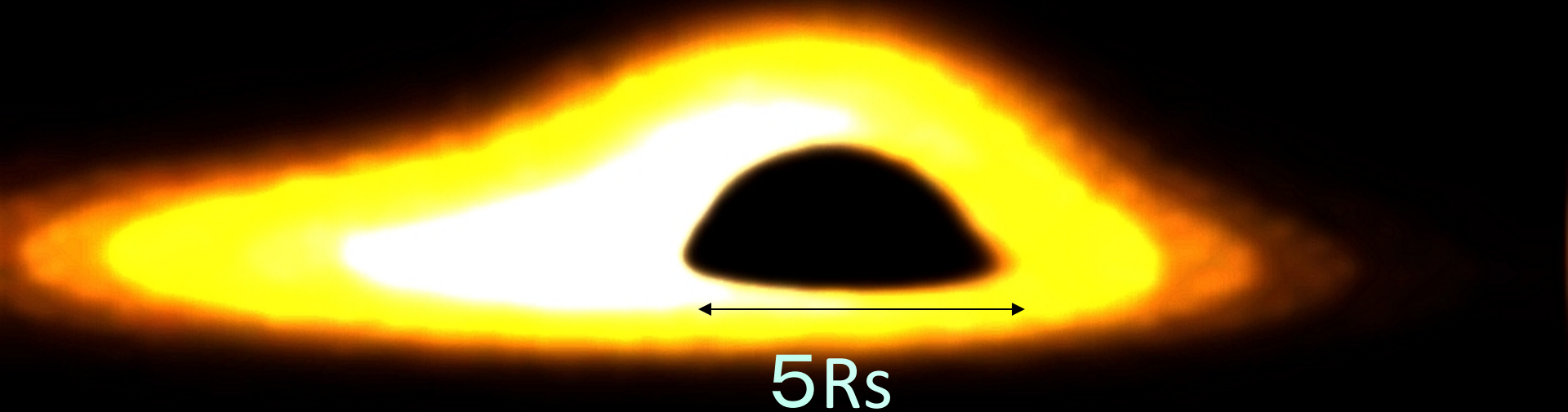
VLA  
Radio

HST • WFPC2  
Visible



VLBA  
Radio

# ブラックホール近傍が見えたら面白い。



ブラックホールは見えないが、その重力による光の屈折によって、中心部分に暗がりができる。またブラックホールの周囲の円盤(=ブラックホールに落ちてきた物質が作る)はドップラー効果で左右の明るさが変わる上、光の屈折(重力レンズ効果)のため、向こう側の円盤部分がせり上がって、見えてしまう重力による蜃気楼で向こう側が浮き上がって見える!

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

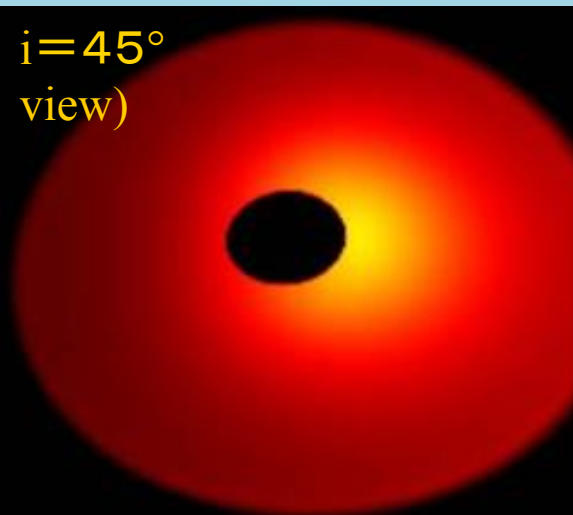
# Shadowの形状はブラックホールの質量、スピン、電荷が 決めている(メトリックがわかる)。(R. Takahashi)

230GHz  
SgrA\*

Kerr

ADAF (H=1)、  
Axis symmetric

$i=45^\circ$   
view)



$i=80^\circ$ (almost edge on  
view)



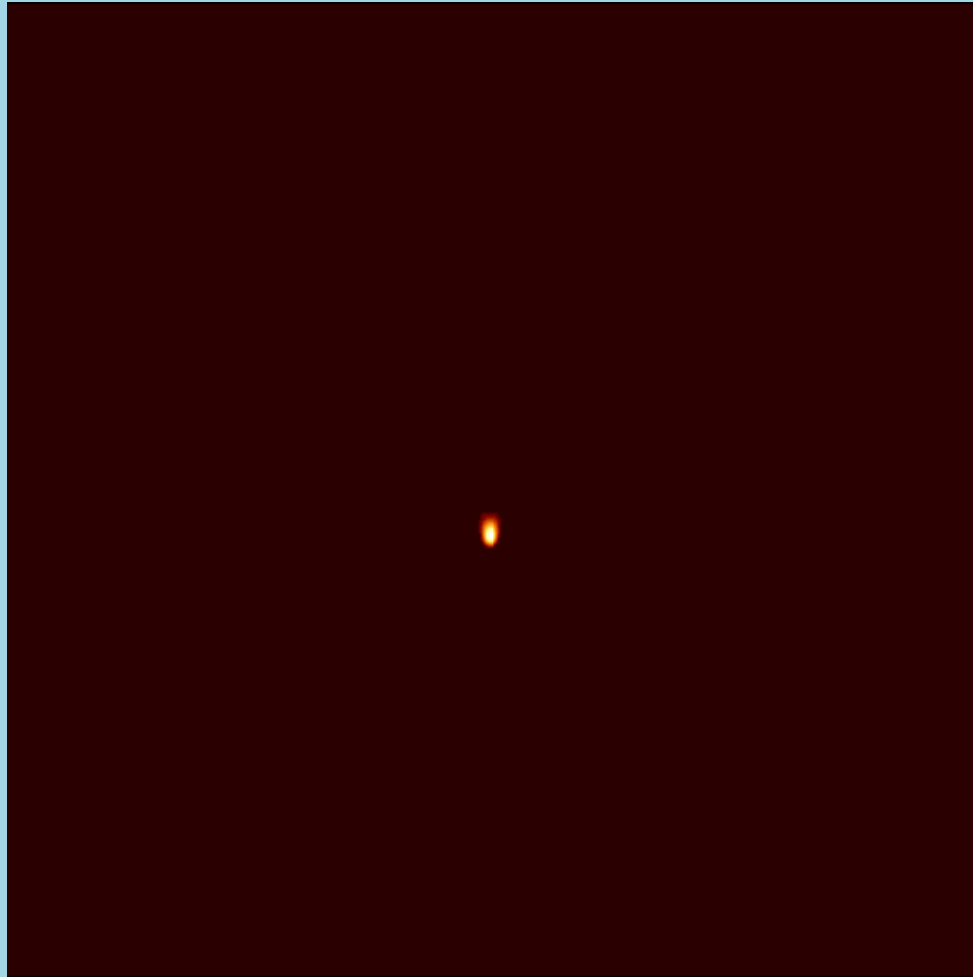
Schwarzschild  
ADAF  
(H=1)  
Axis symmetric

Takahashi  
et al. (04)



12R<sub>s</sub>

低周波数では、核周プラズマで電波が散乱されるので、見えない。より高周波の観測が必要



5, 8, 15, 32, and 43 GHz でみたSgrA\*の見かけの大きさ  
<http://www.astro.ru.nl/~falcke/bh/sld10.html>

核周プラズマによる  
電波散乱により  
低い周波数では  
像がぼける。ボケは観測  
波長 $\lambda^2$ で効く

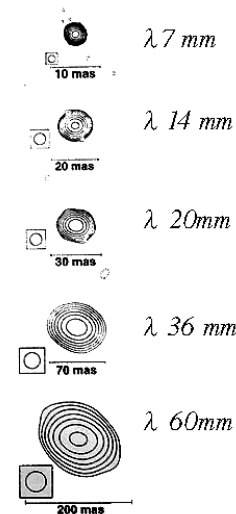


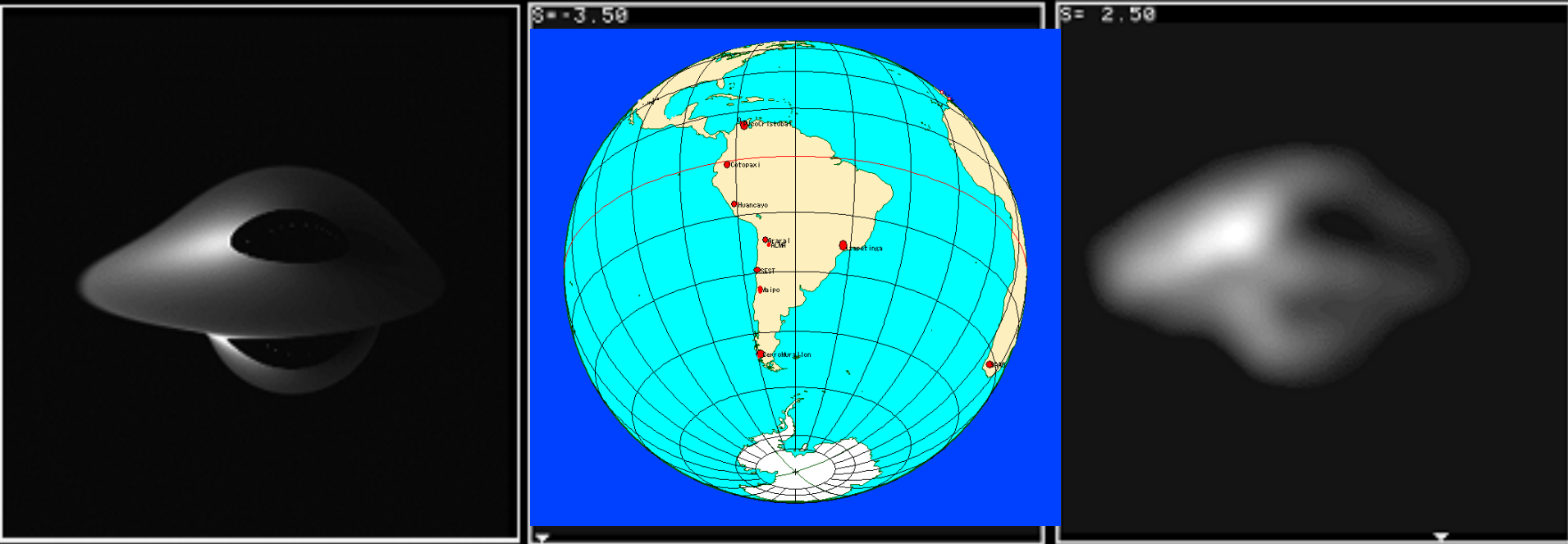
Figure 3. VLBA images of Sgr A\* at wavelengths 6.0, 3.6, 2.0, 1.35 cm and 7 mm made with DIFMAP. These images are smoothed to a circular beam of FWHM =  $2.62 \lambda^2$  mas as shown on the left-bottom corner on each image. At 7 mm, FWHM beam = 1.5 mas  $\sim$  mean synthesis beam size; and at 6 cm FWHM beam = 38 mas that is close to the mean scattering size at this wavelength. The contours are  $2 \text{ mJy beam}^{-1} \times (-2, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256)$ .

Lo他  
1999

SgrA\* (SgrA\*観測に最適化した南半球中心のアレイの場合)

230GHz  
モデル像

南半球サブミリ波  
ほらいずん望遠鏡



250  $\mu$ as

10局stations, 8000kmの広がり展開すれば、ブラックホール近傍像はよく観測できる。

# 装置概念図(ポンチ絵)

2012. 9. 23付け

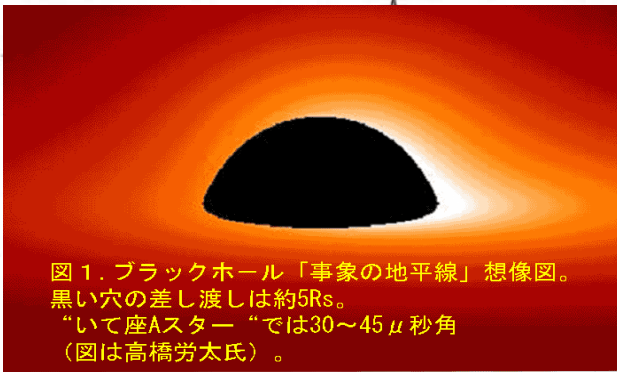


図1. ブラックホール「事象の地平線」想像図。  
黒い穴の差し渡しは約 $5R_s$ 。  
“いて座Aスター”では $30\sim 45\mu$ 秒角  
(図は高橋 勇太氏)。

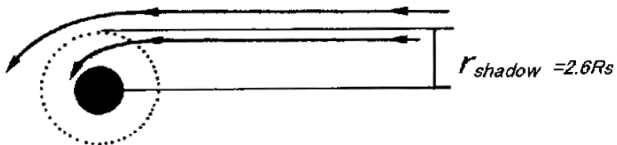
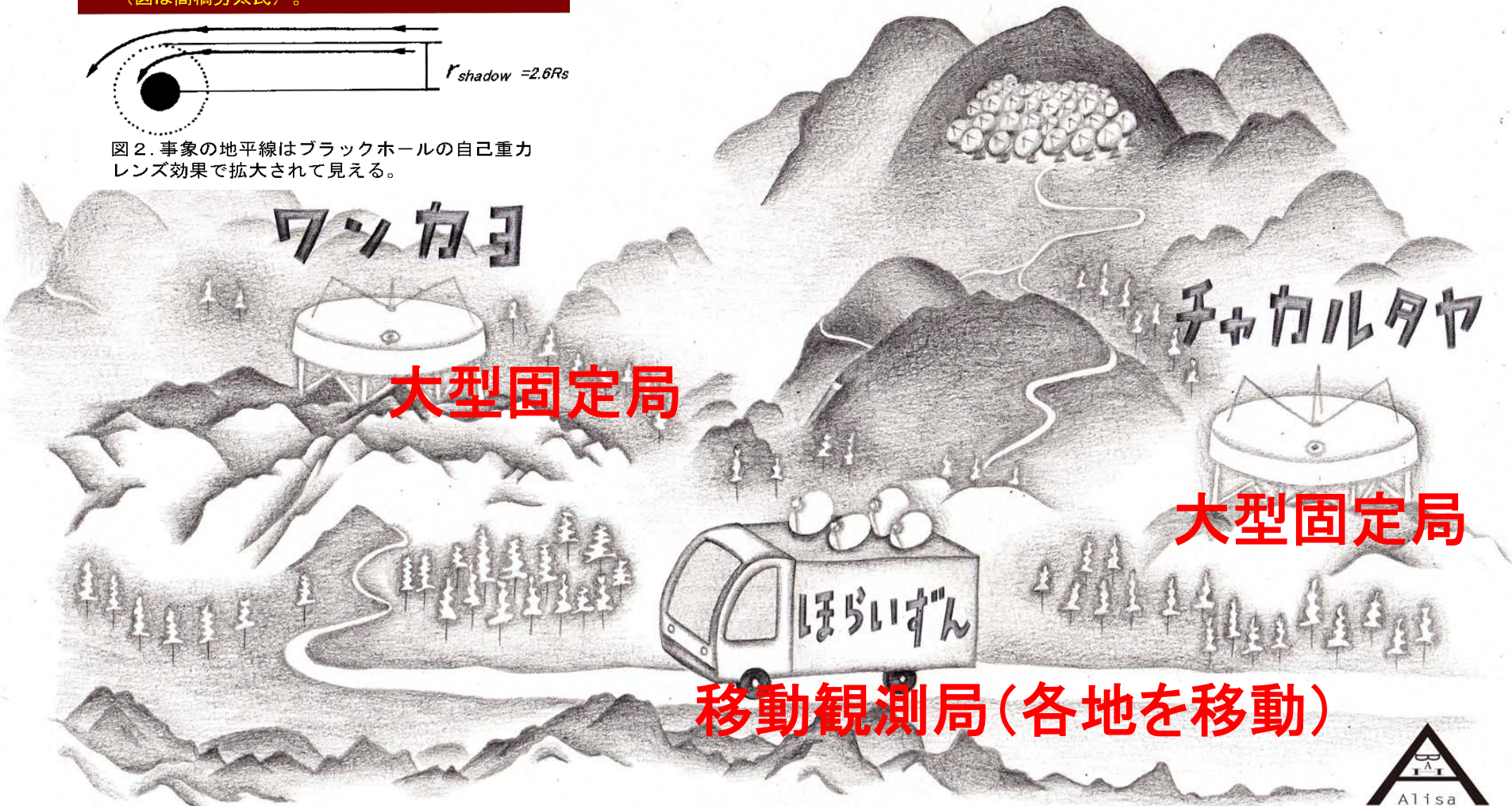


図2. 事象の地平線はブラックホールの自己重力  
レンズ効果で拡大されて見える。



# Phased ALMAの 有無で比較(1)

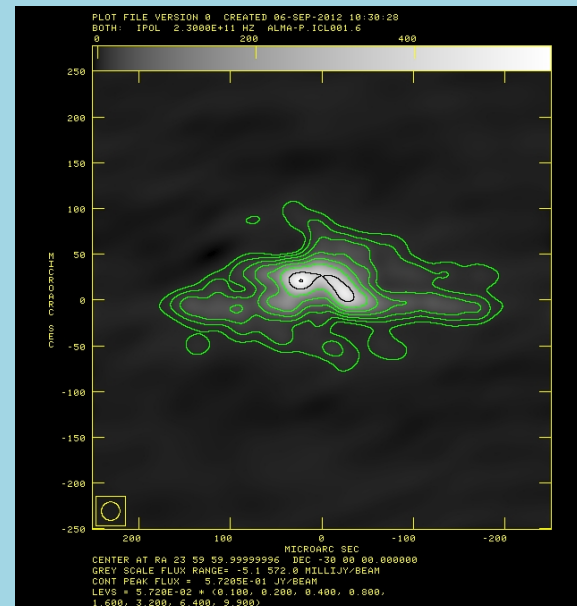
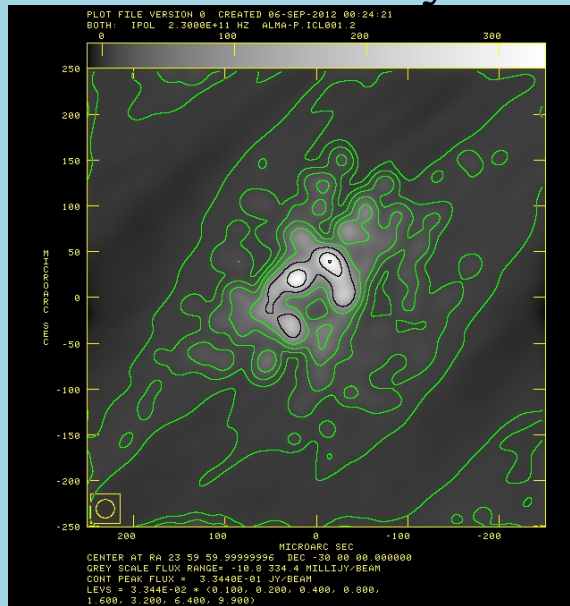
1000~2000kmの  
基線長が重要

像モデル:  
降着円盤中心のみ明るい

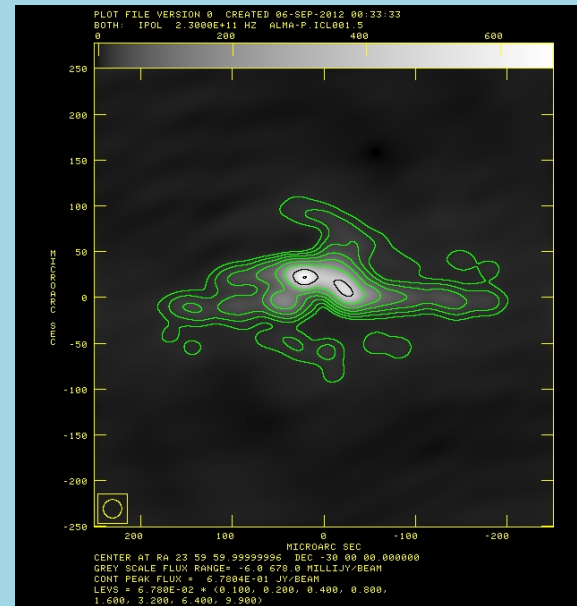
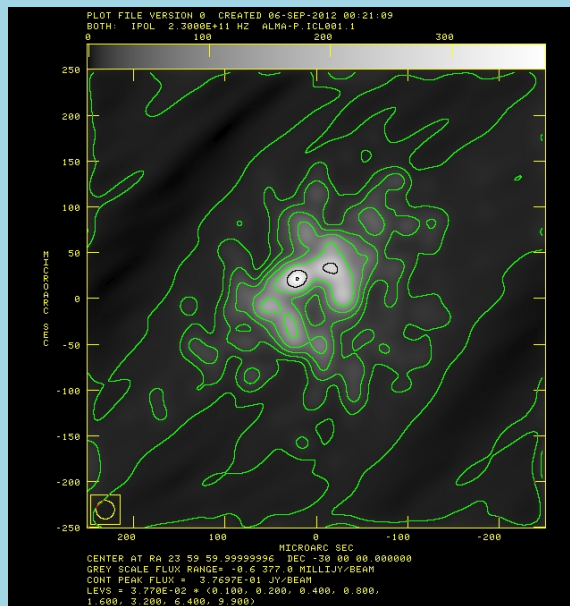
EHT only

EHT&CARAVAN

Without pALMA

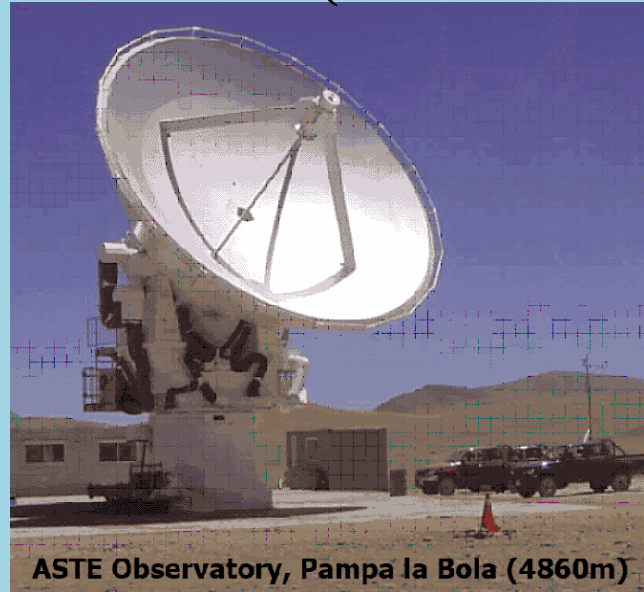
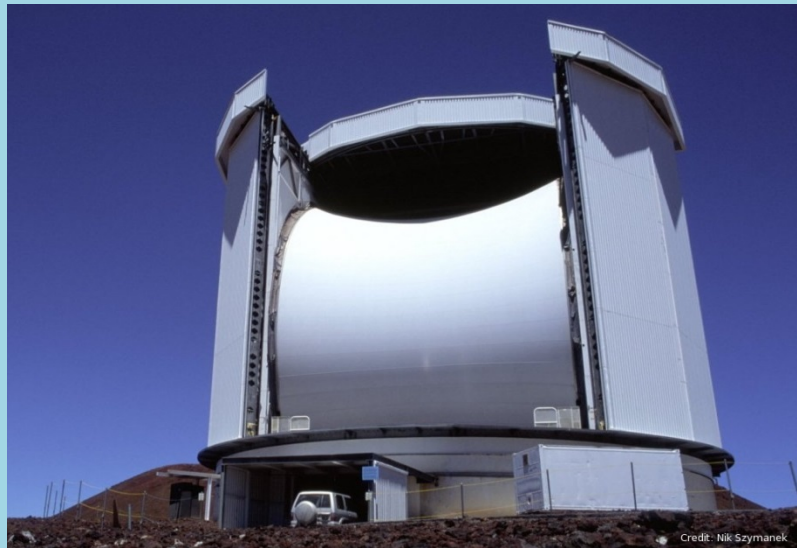


With pALMA



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。

国立天文台は3台のサブミリ望遠鏡を世界各地に所有(除くALMA)！  
 JCMT15m(ハワイ)      ASTE10m(チリ)



国際政治には  
 まらず  
 日本主導で  
 グローバル  
 サブミリ波  
 VLBIが実現

ASTE Observatory, Pampa la Bola (4860m)

SPART望遠鏡(旧F号機・野辺山)



さらにアルゼンチン12m、RXを送る



180kmの  
 短基線が  
 できる！

ESA Malargüe 32GHz  
 LLAMA could work at 43 GHz and even at 22 GHz    Itapetinga: 22GHz and 43 GHz  
 Sicaya: will have a receiver at 22GHz    SEST: could be reactivated, 22GHz and 43 GHz





# 内容

1) VLBI:

干渉で天体(光源)の形・位置を調べる装置

2) ブラックホールのVLBI観測

3) 銀河中心モニター:

G2からのガス降着でSgrA \* は輝くか？

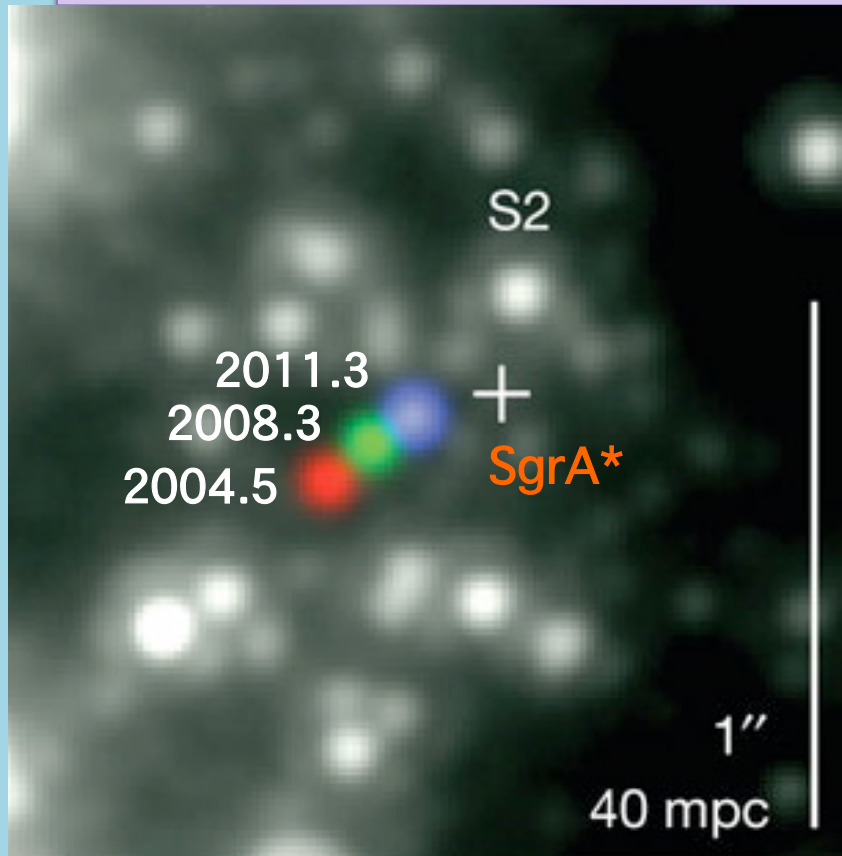
2014年9月12日 日本天文学会坪井プレゼン

# No Microwave Flare of Sgr A\* around the G2 Periastron Passing

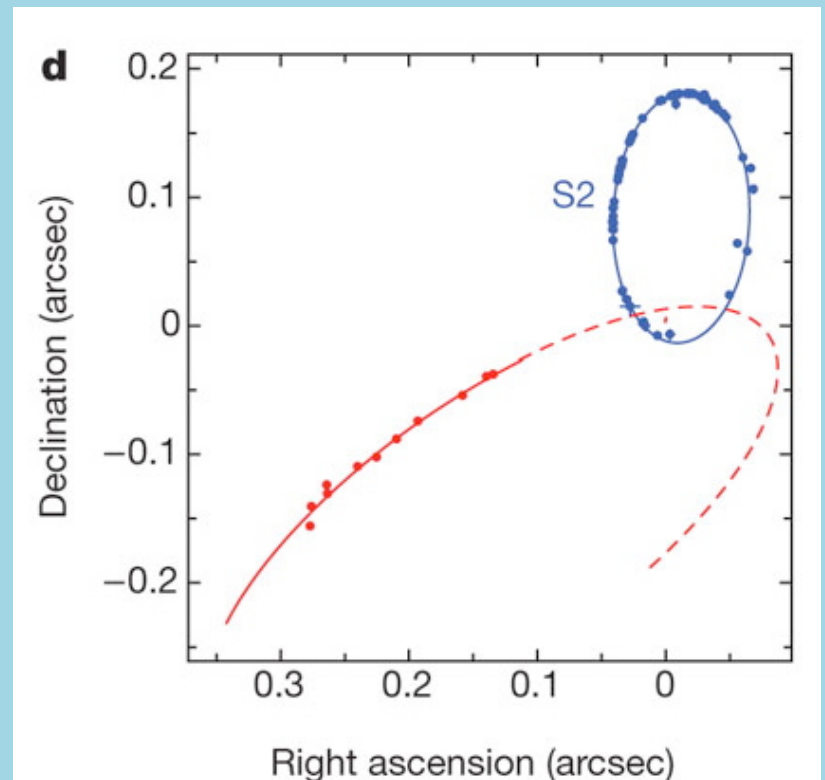
M. Tsuboi, Y. Asaki (ISAS/JAXA), Y. Yonekura, Y. Miyamoto(Ibaraki Univ.), H. Kaneko, M. Seta, N. Nakai (Univ. of Tsukuba), O. Kameya, M. Miyoshi (NAOJ), H. Takaba, K. Wakamatsu (Gifu Univ.), Y. Fukuzaki (GSI), K. Uehara (Univ. of Tokyo), and M. Sekido (NICT)

銀河系中心の大質量ブラックホール (SMBH) である Sgr A\* へ落下するガス雲が近赤外線観測で発見され、2012年1月「Nature」に掲載された (Gillessen et al. Nature 2012, 418, 51)

- 銀河系中心 Sgr A\* の周囲を VLT を使った赤外線観測を10年以上続けた結果、中心に向かって移動するガス雲が見つかった。(3.76ミクロン)
- 赤外線 Br $\gamma$  線の撮像観測—2014年3月 (DOY=77 また 91) には近心点約 2000Rs まで接近すると推定される。(最新の予想値)



(Gillessen et al. Nature 2012, 418, 51)

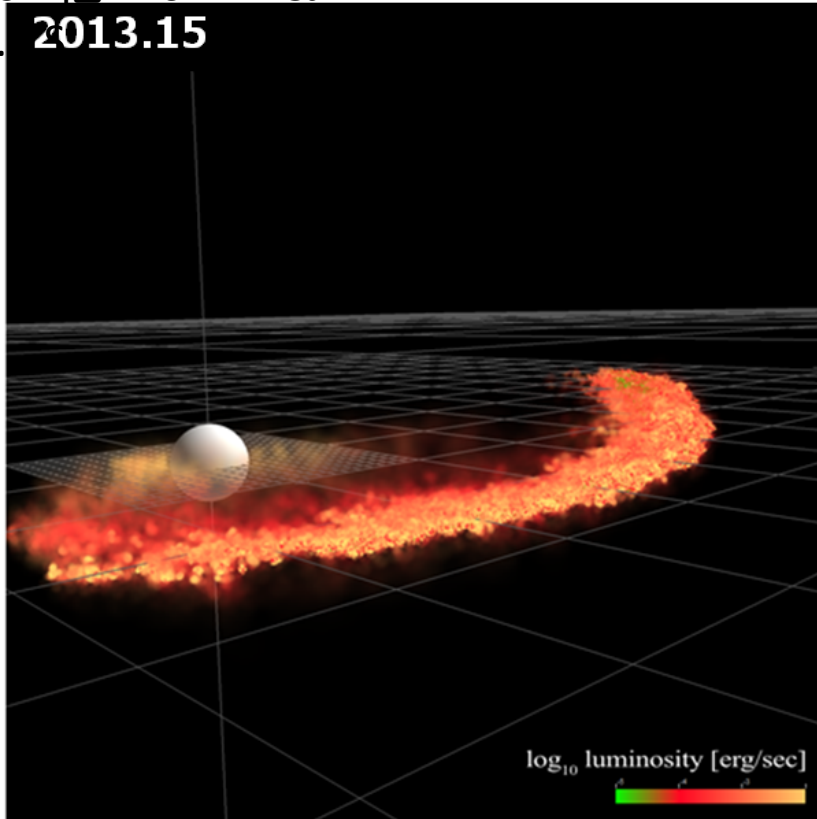


# Saitoh simulation

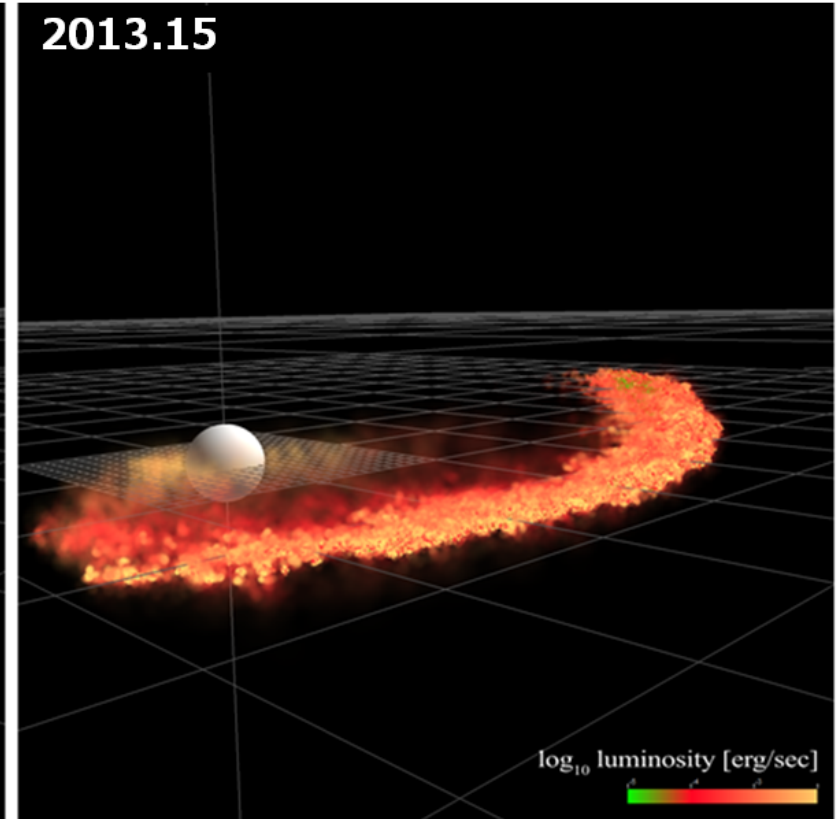
「2012年暮れから、先行するガスが  
SgrA\*に落ちていくはず」

Saitoh 他 2014PASJ...

66... 2013.15



2013.15



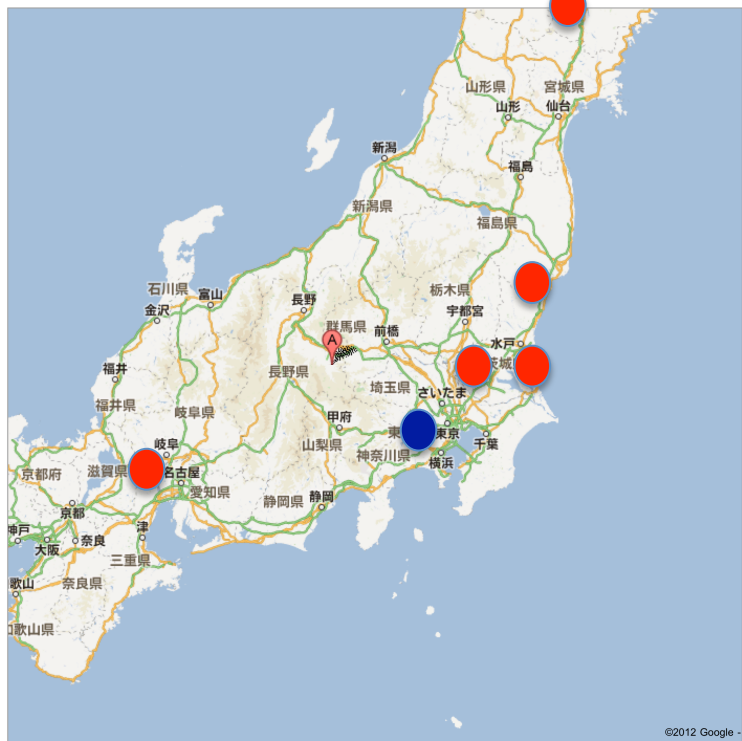
ガス雲「G2」が超巨大ブラックホールSgr A\* (白球)の強力な重力の影響で引き延ばされ、薄く潰されながら近傍を通過する。このときガス雲の輝きが急激に増す。この図は交差法による立体可視化可能にしたもの。クレジット: 斎藤貴之 (シミュレーション)、武田隆顕 (可視化)

# 3次元N体simulation 齊藤(東工大)ら



## Saitoh+G2.avi

SgrA\*が大フレアを起こす瞬間を日本で捉えて、世界に通報しよう。



## 22GHz VLBIモニター

- 22GHzで2013年2月よりSgrA\*のVLBIモニターを実施している。
- 水沢 10-m RT, 高萩/日立 32-m RT, 岐阜 11-m RTのJVNのアンテナを用いているが、条件が許せば鹿島34mRT、筑波 32mRTが参加している。相関局は宇宙研である。
- これらのアンテナによる基線は90-140 kmになりSgrA\*を周辺の広がった成分から分離しながらresolved outせずに正確な測光観測ができる。



岐阜大11m鏡



国立天文台/茨城大  
高萩32m鏡



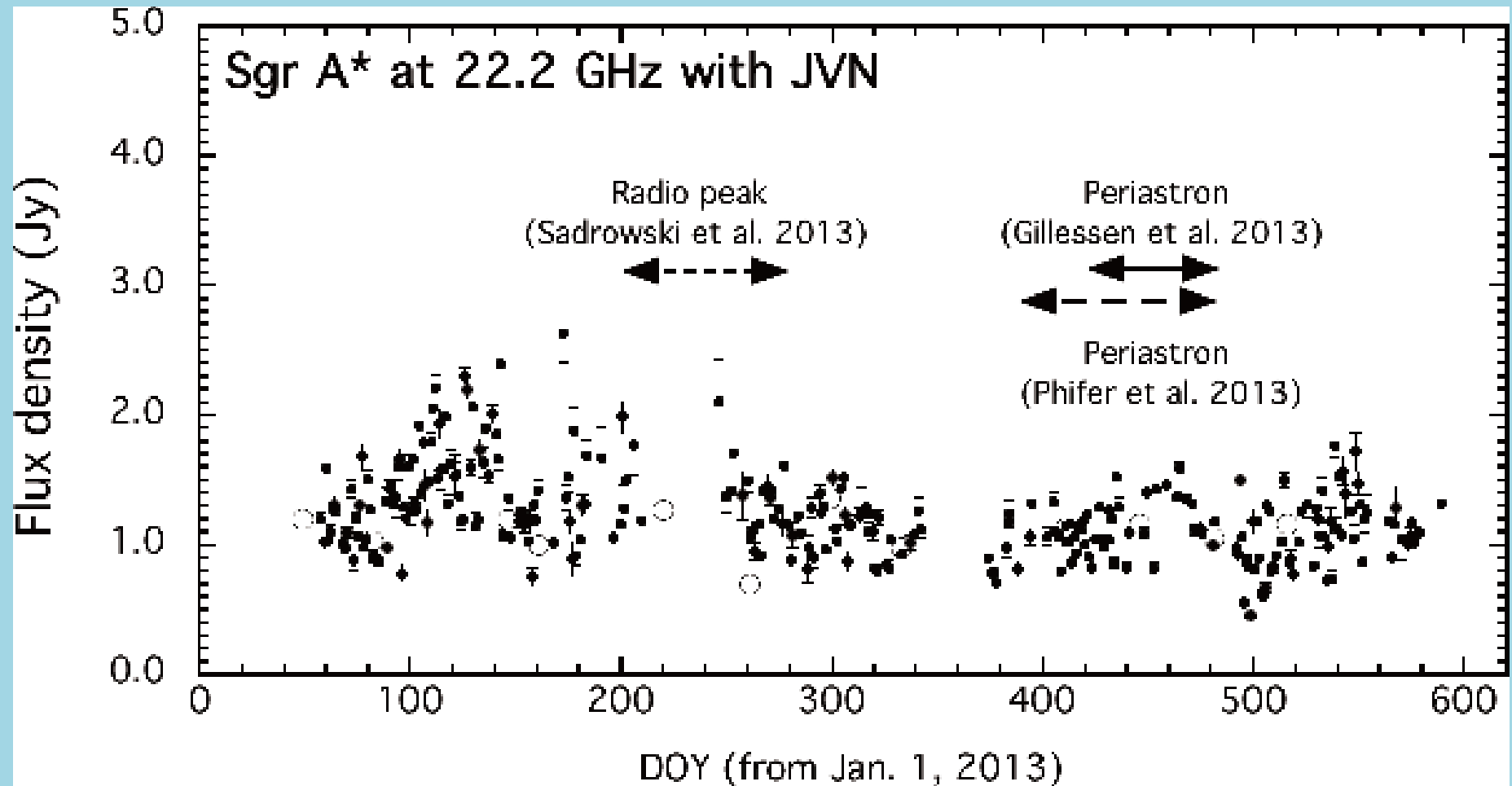
国立天文台  
水沢 10m鏡



NICT 鹿嶋34m鏡 国土地理院/筑波大32m鏡  
条件がゆるせば参加している。



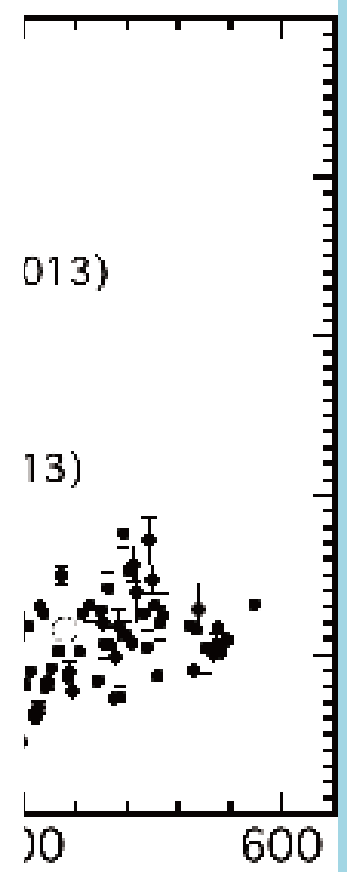
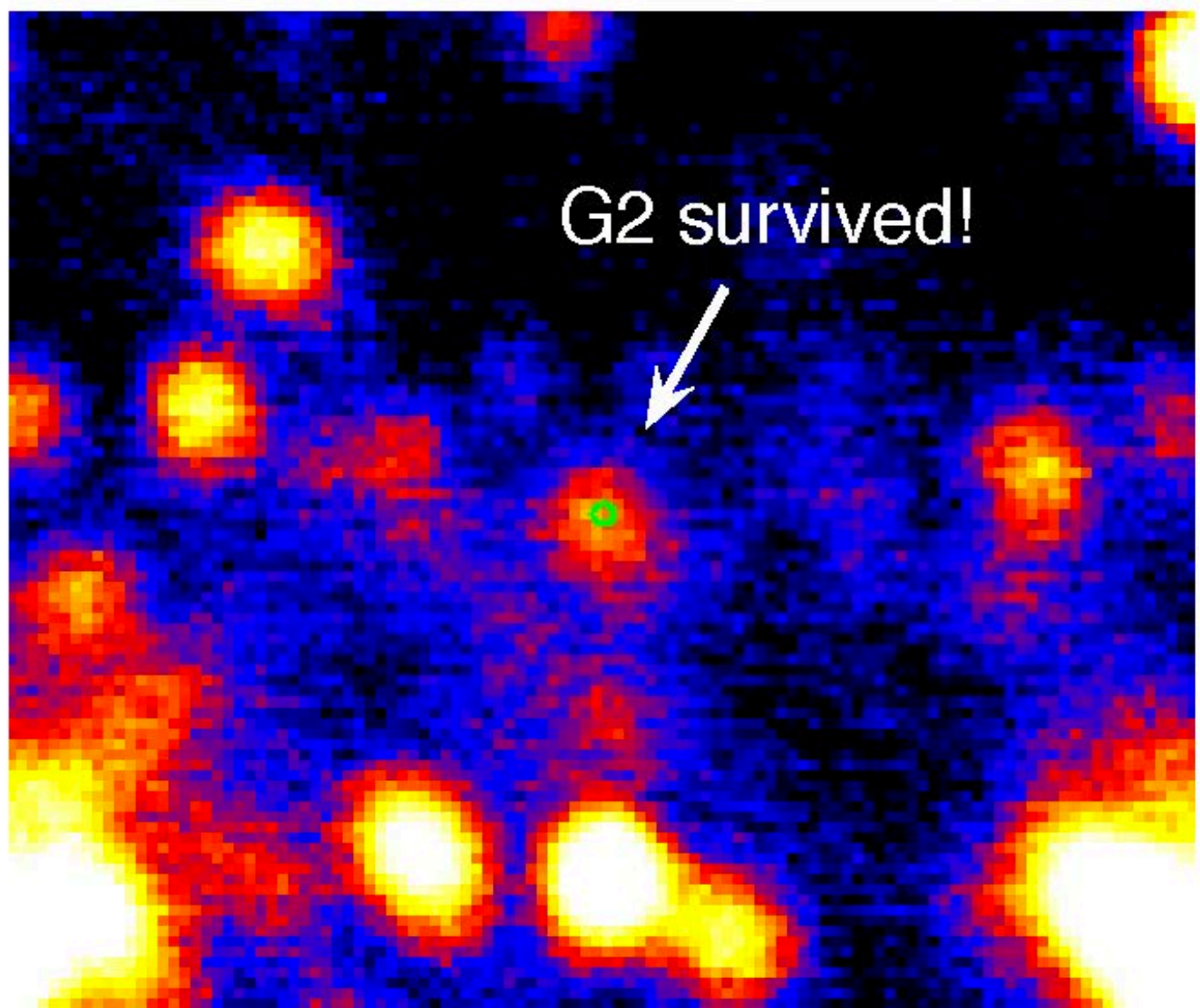
# No Microwave Flare of Sgr A\* around the G2 Periastron Passing



N. M. ... E. ... G. ... A\*

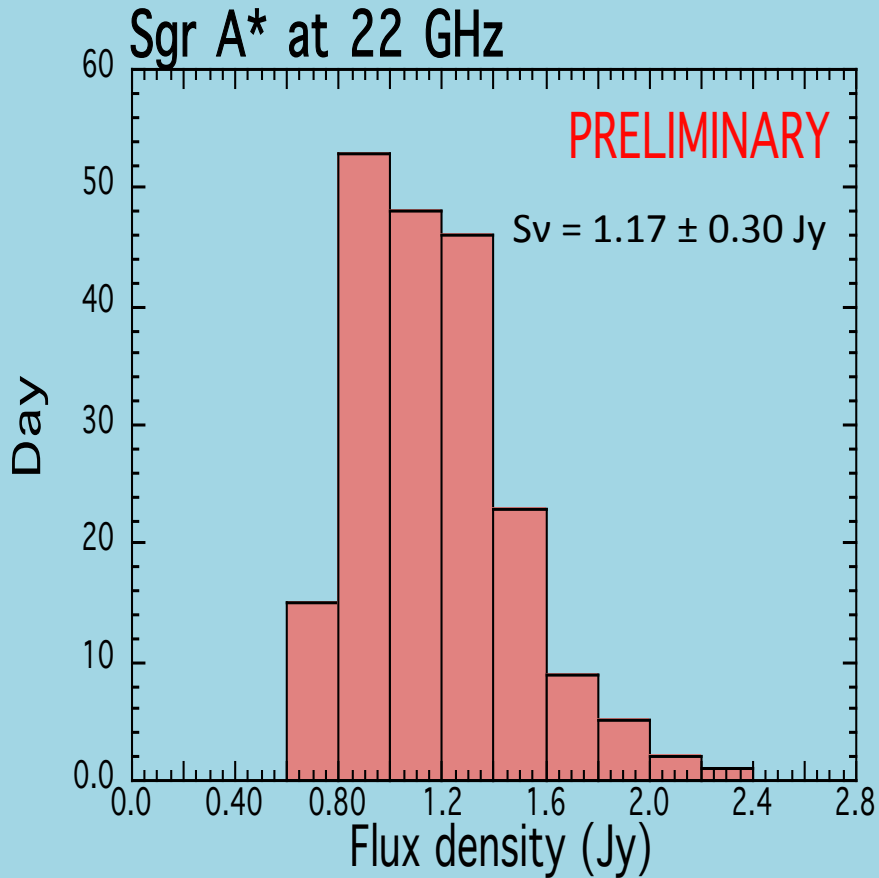
...sing

Elvis ... (W)

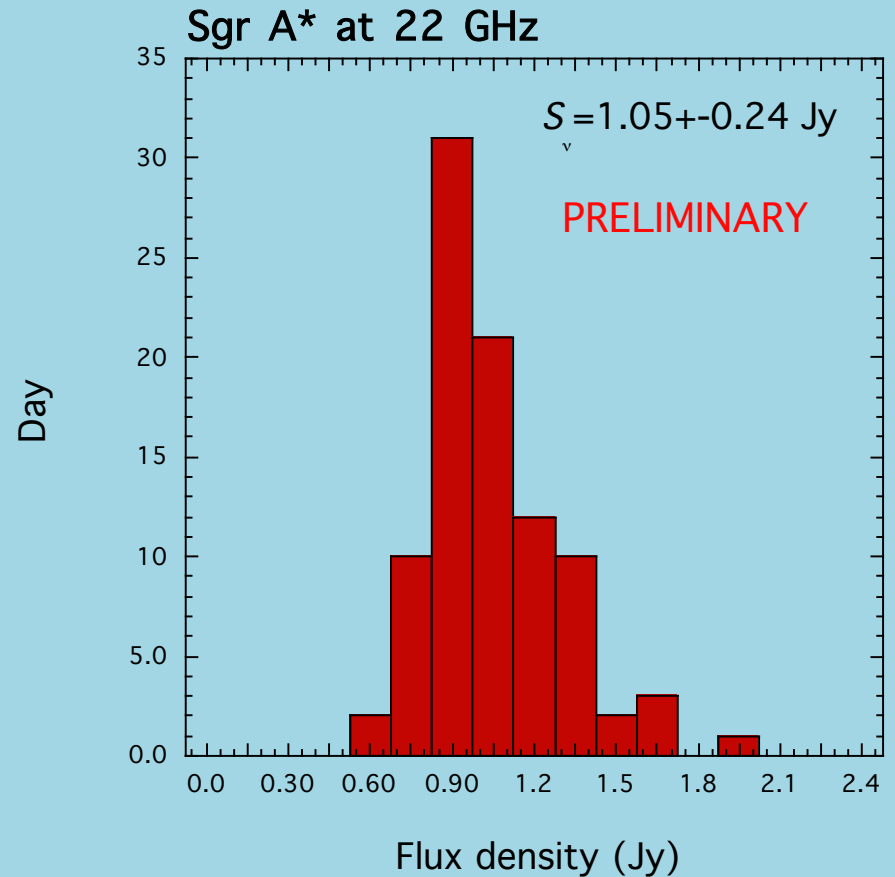


Witzel/UCLA Galactic Center Group/W. M. Keck Observatory  
ApJL, 796:L8 (6pp), 2014 November 20





全データのヒストグラム



2基線以上のデータのヒストグラム

The average flux density of Sgr A\* is  $S_v = 1.2 \pm 0.3 \text{ Jy}$ . The average and the data scattering are still consistent with previously observed values (e.g. Herrnstein et al. 2004).