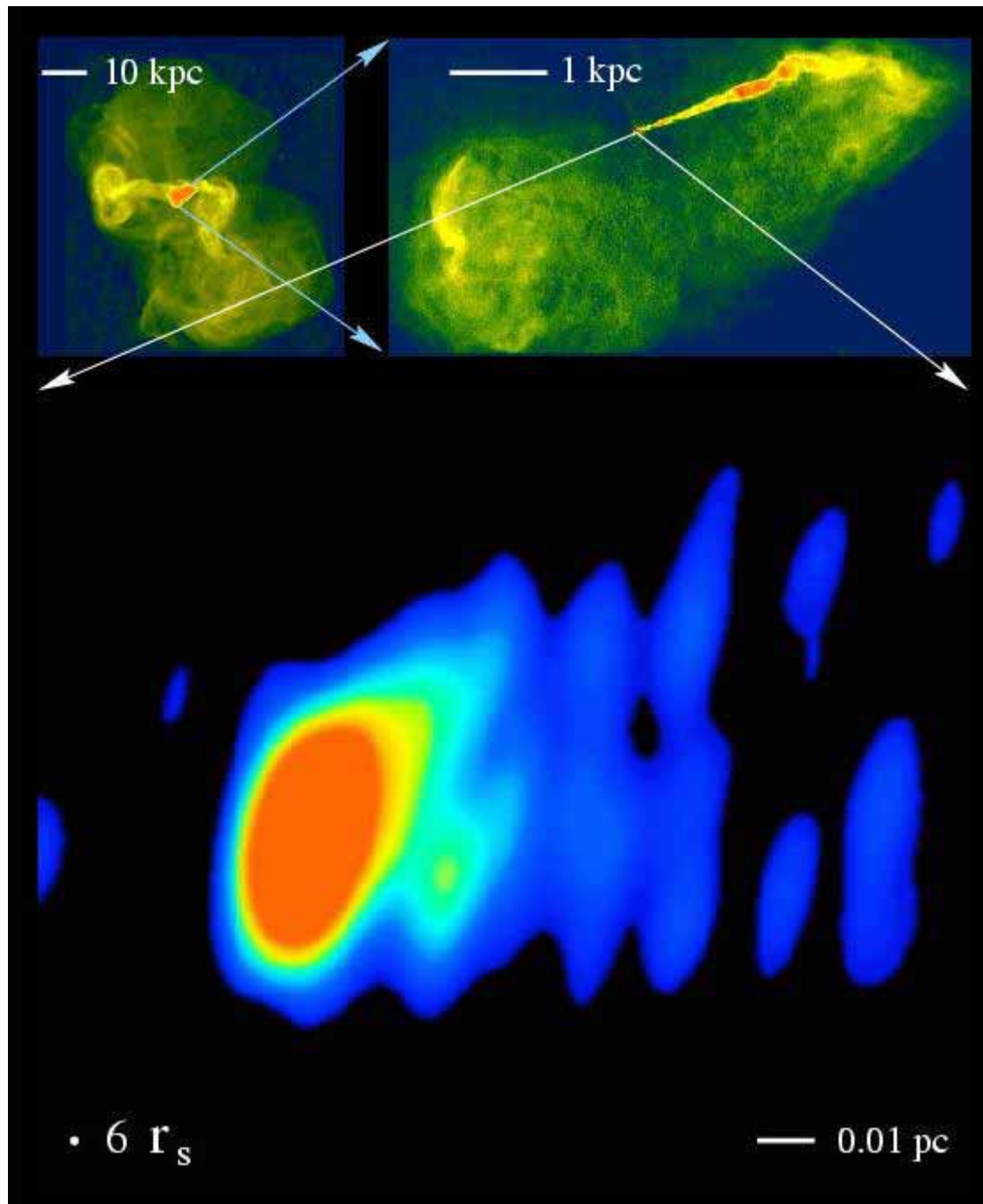


サブミリ波VLBIで
ブラックホール
は、もう見える

三好 真



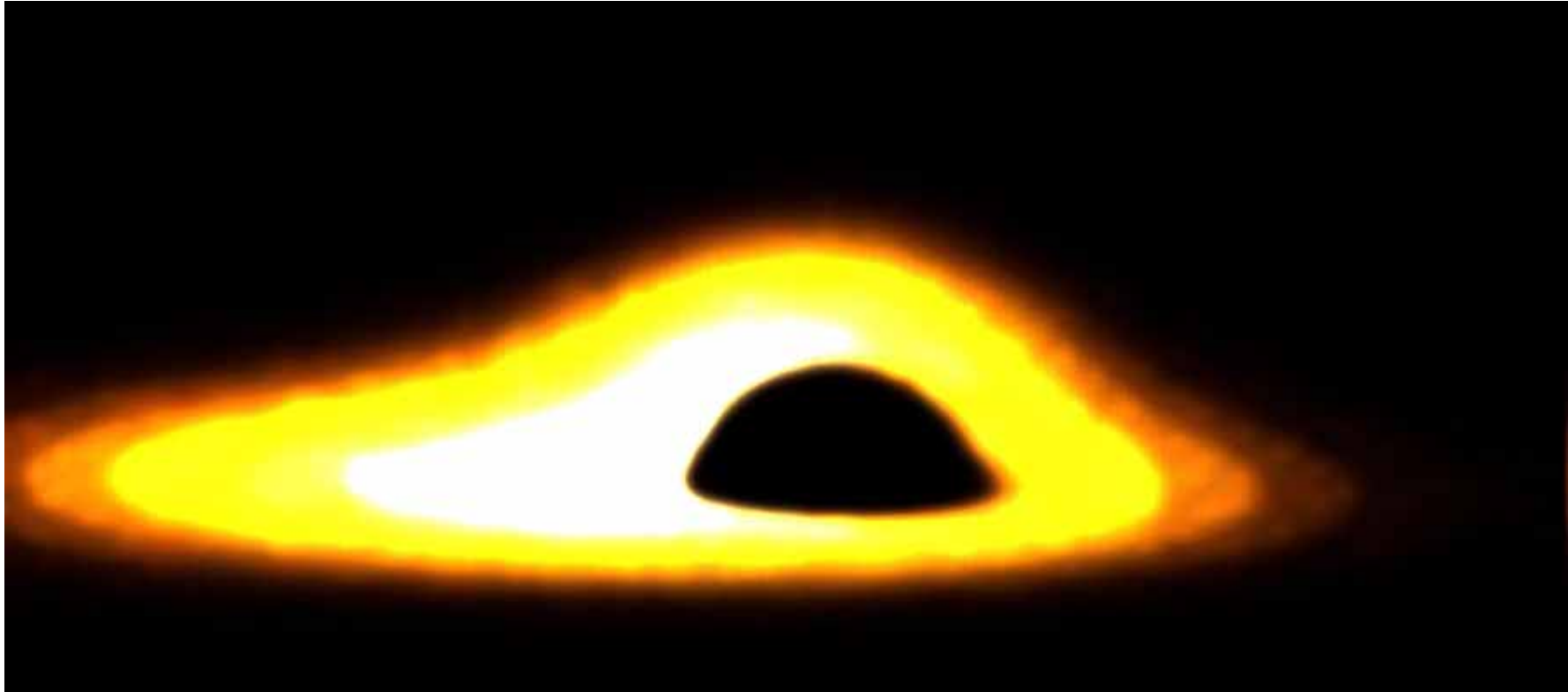
VLBIではAGNのコアまじかのジェットは大変よく見える。

M87.

Junor et. al 00

VLBAによる

43 GHz



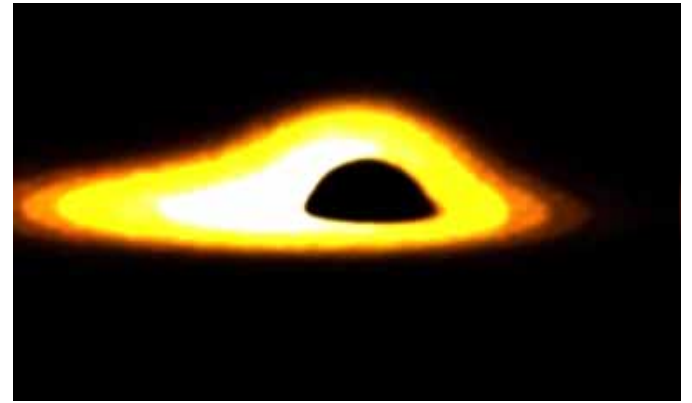
しかし

ブラックホールの周りの降着円盤はみえない。

図はFukue et al 1989。

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

ほらいずん望遠鏡：
ブラックホールの周りの
降着円盤をみよう。



最初「サブミリなら見えるよ」

以外は法螺

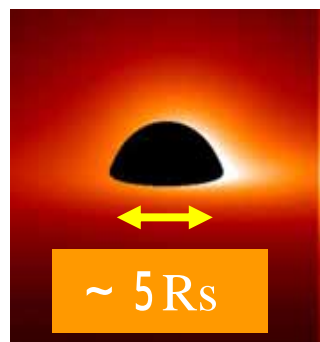
01年：

高宇連シンポ、宇電懇シンポ、V懇シンポ

02年： IVS国際シンポ(筑波)、

IAU太平洋域ミーテング

この辺の発表は法螺



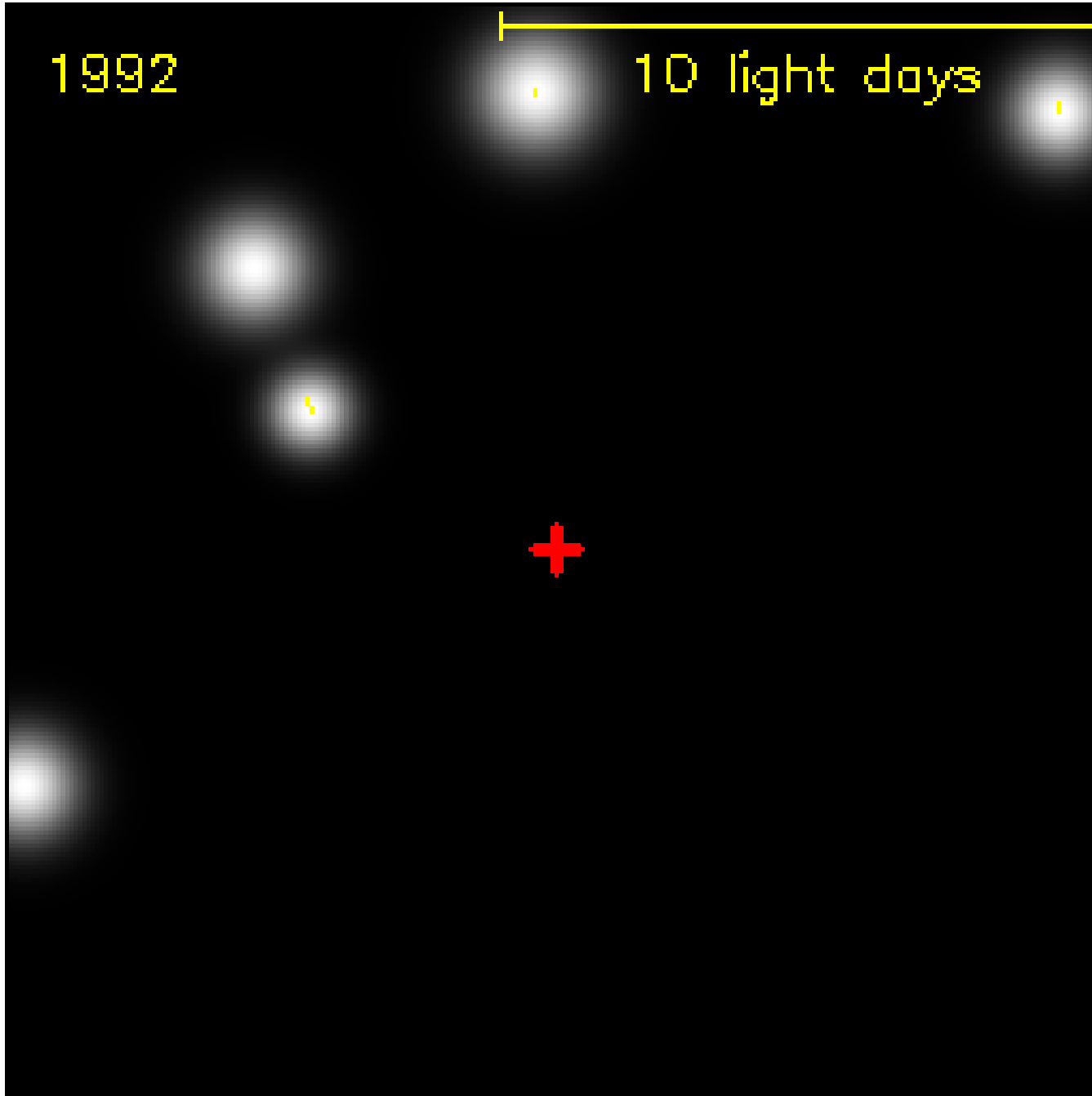
~ 5Rs

| | Mass (Msun) | D (kpc) | (m) | Rs (au) | (μas) | Shadow Size (μas) |
|--------------|----------------|------------|----------|------------|--------------|-----------------------------|
| 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 |

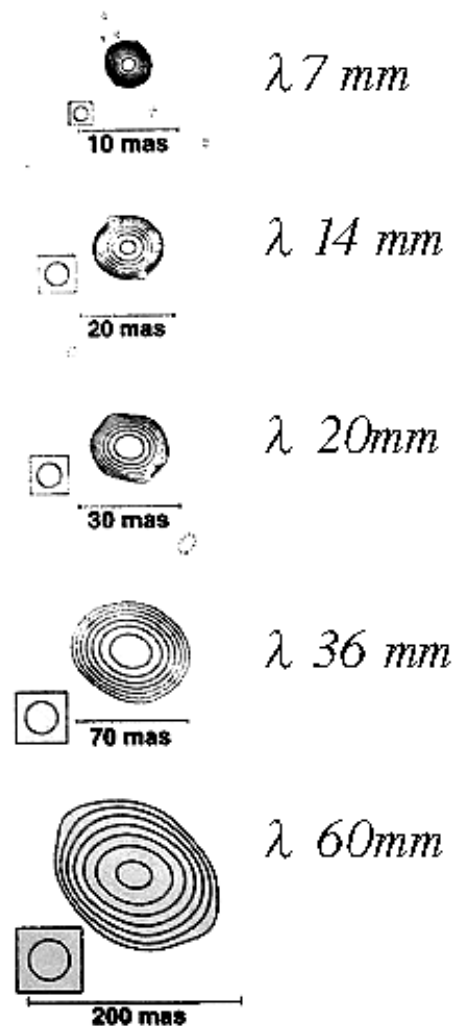
1992

10 light days

SgrA*は
最重要観測天体



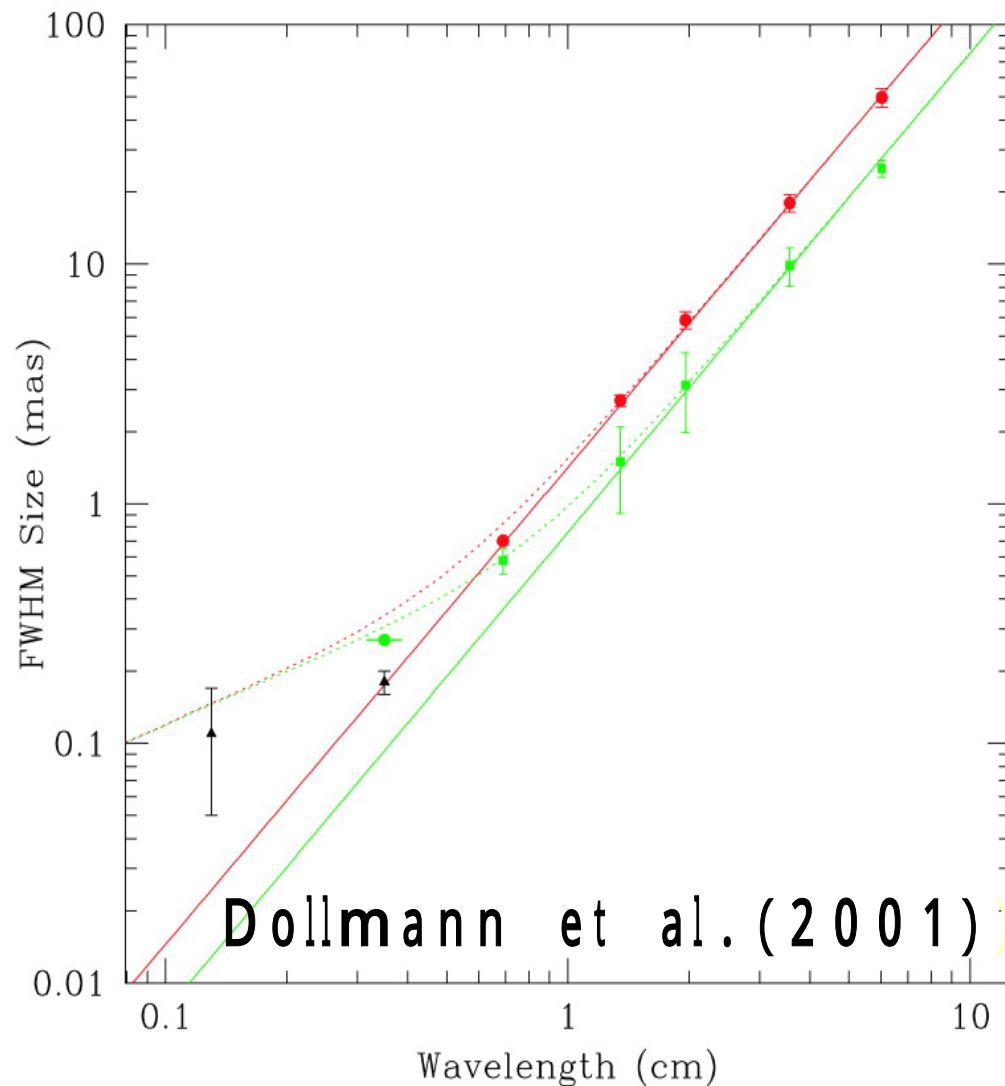
VLBI images of the SgrA* from 5GHz to 43GHz (Lo et al '99)



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 λ^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 = $2.62 \lambda_{\text{cm}}^{1.5}$ 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 $2 \text{ mJy beam}^{-1} \times (-2, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256)$.



Apparent Size of SgrA*

**Free from Scattering
Effects by Plasma**

(λ^2)

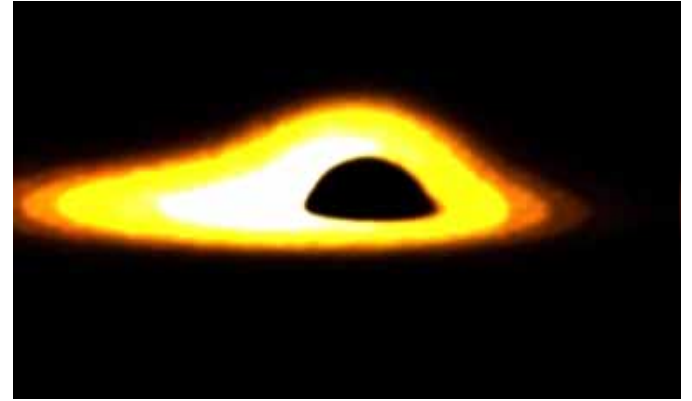
**At mm-, sub-mm wave
length !**

**So we can expect observe
the intrinsic image at
mm-, sub-mm wave
length.**

230GHz帯でプラズマによる散乱は本当に晴れるか？

-----もう晴れているらしい-----

(Bower et al. 2004)



ほらいずん望遠鏡:

ブラックホールの周りの降着円盤をみよう。

2003年まじめな検討をやってみた。

・分解能 230GHz、地上8千kmでOK

基線2千km程度が役にたつ

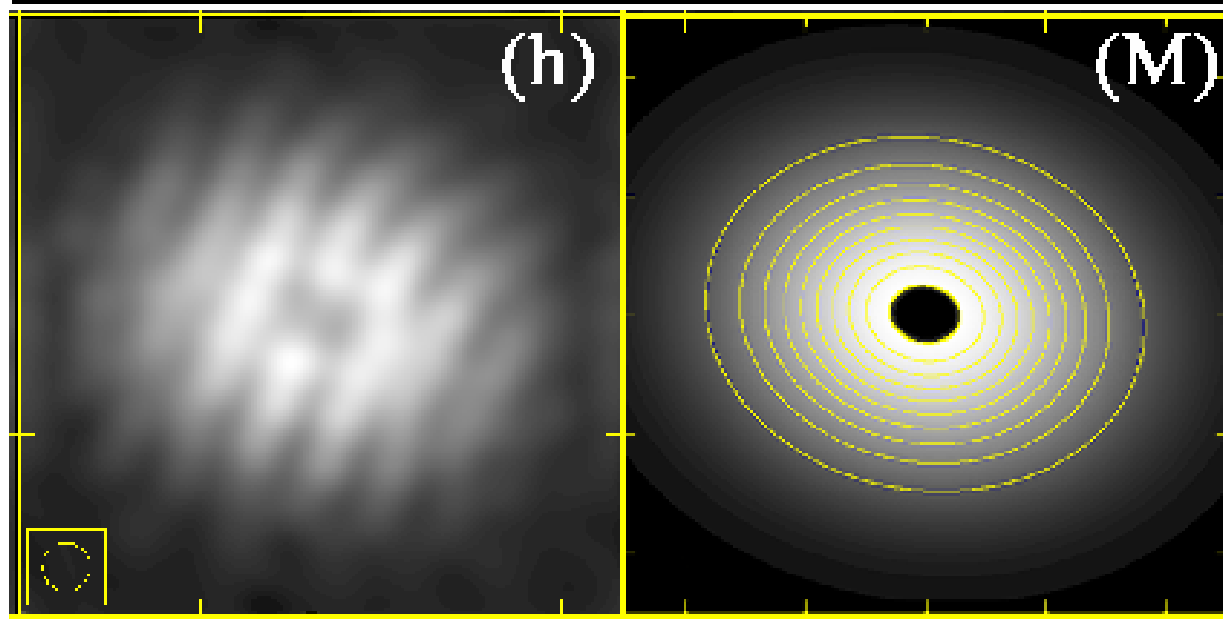
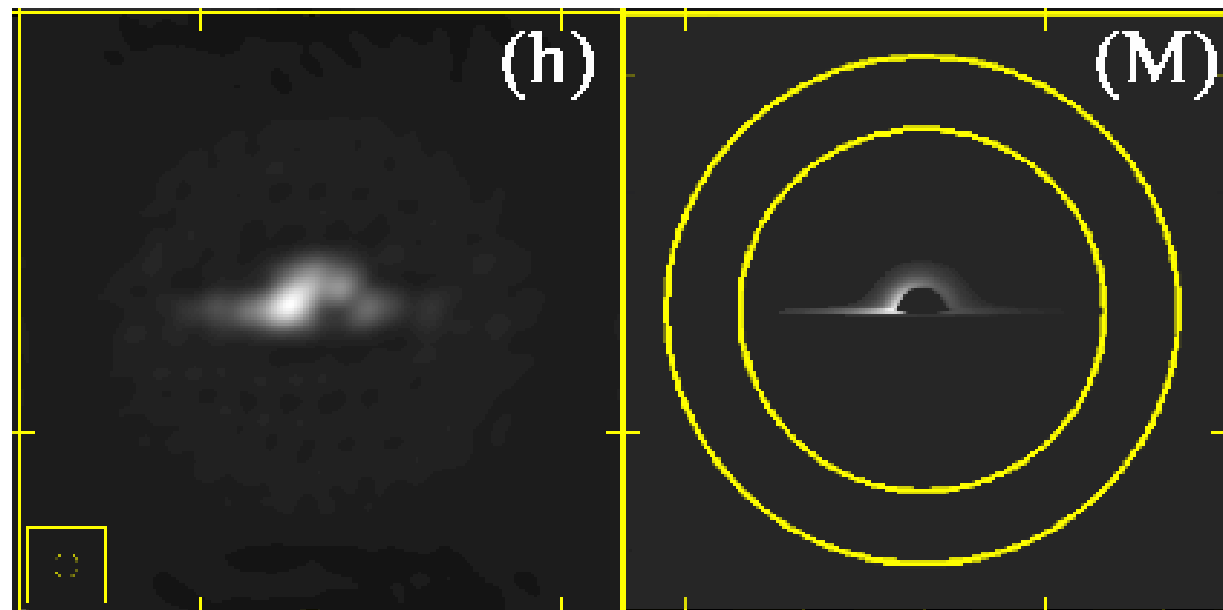
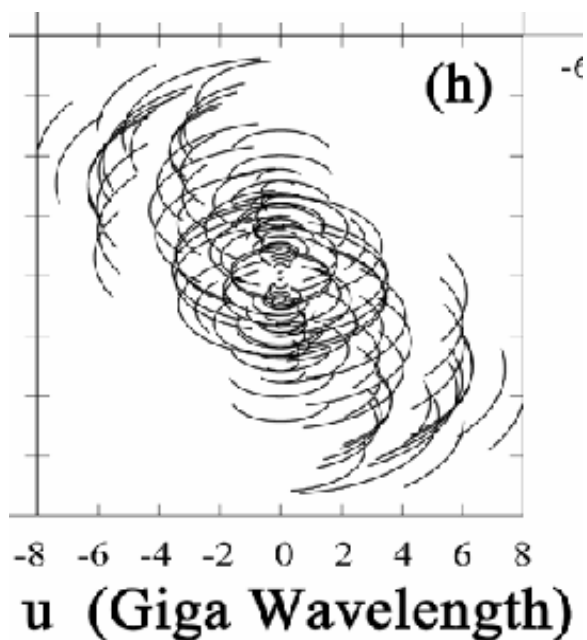
・感度 現最高性能230GHz(150K)

記録バンド幅(1GHz以上)

で足りている。

基線;地上でたりる

南半球 10局 構成の 場合



クリーン後

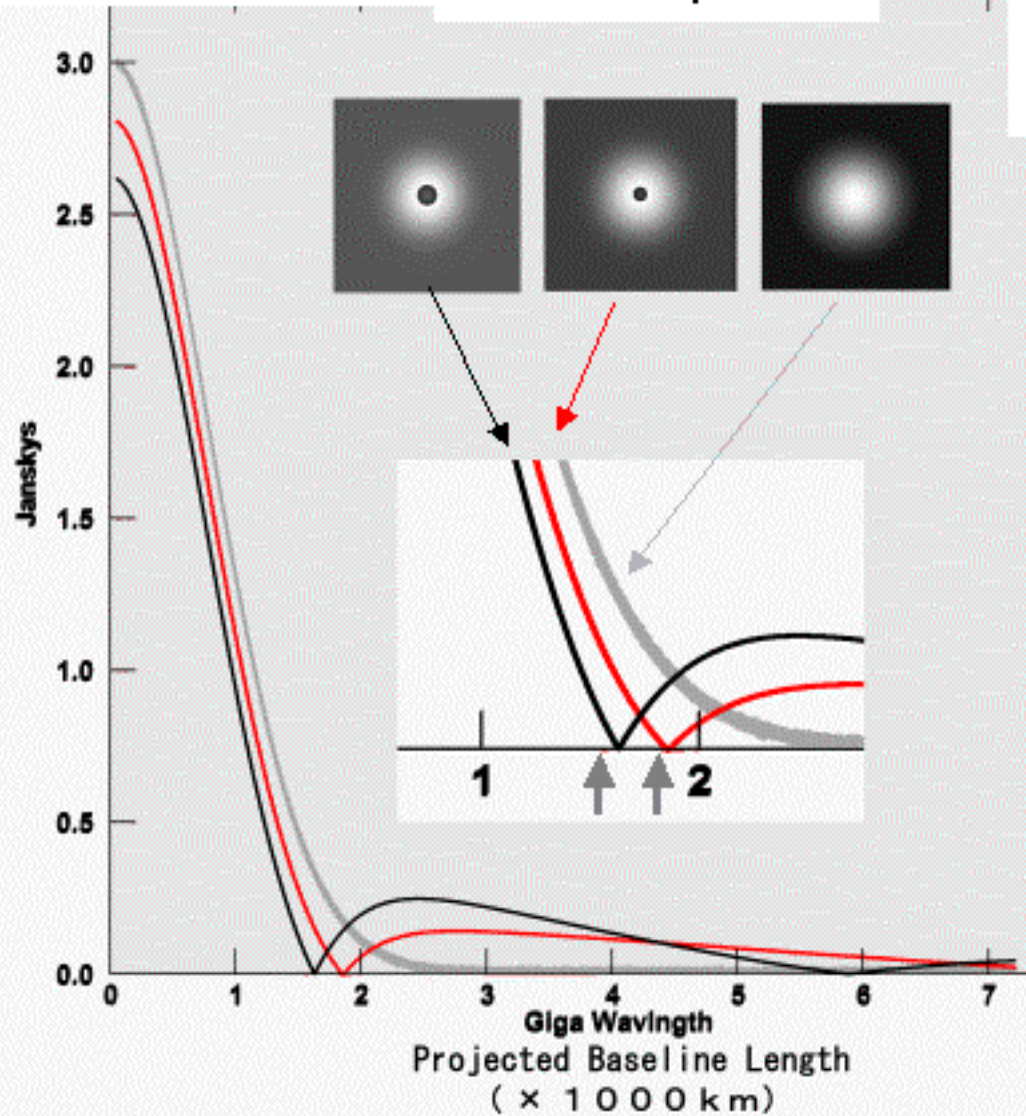
像モデル

An Example of the relation of Visibility Amplitudes and Structure of SgrA* (230GHz)

BH $3.7 \times 10^6 M_{\odot}$
 $D_s = 44 \mu\text{as}$

BH $2.6 \times 10^6 M_{\odot}$
 $D_s = 30 \mu\text{as}$

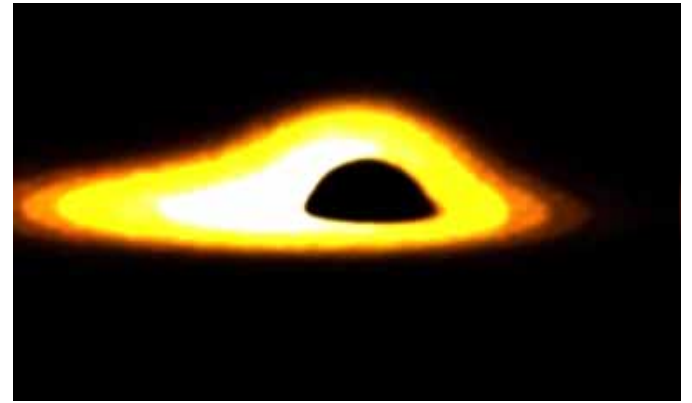
NO Black
hole
NO Shadow



Null point shifts
with the size of BH
shadow, namely BH
mass

あるいは、多波長観測、
理論から予想される構
造とのモデルフィッテ
ングを行う。。。
(昔の電波干渉計、
VLBIで行われた方法)

ほらいずん望遠鏡:ブラック
ホールの周りの降着円盤を
みよう。



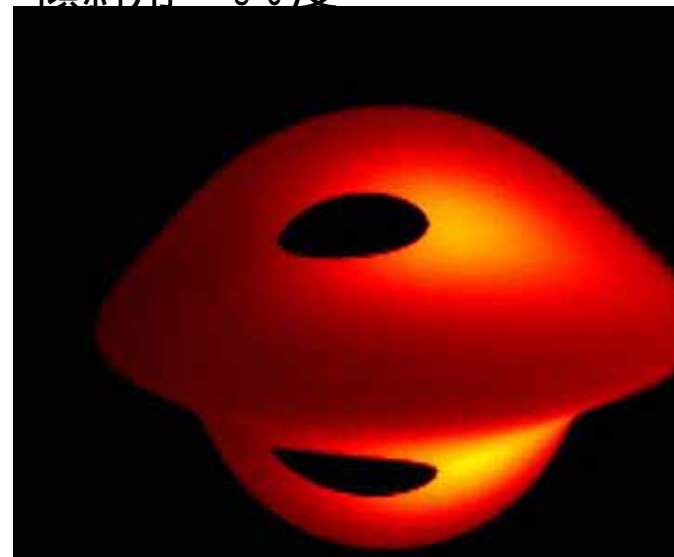
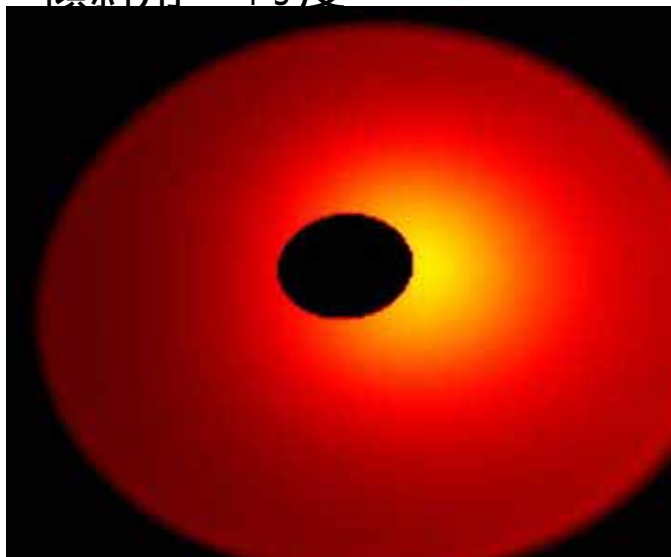
2004年はさらにまじめな検討

- ・光学的に厚くて中は見えない？ 一見える。
(ただし検討計算したのは高橋氏)
- ・プラズマの散乱は230GHzで晴れる。
(くわしく調べたのはBower et al. 2004)

傾斜角 = 45度

傾斜角 = 80度

Kerr
ホール
ADAF
(H=1)、
軸対称

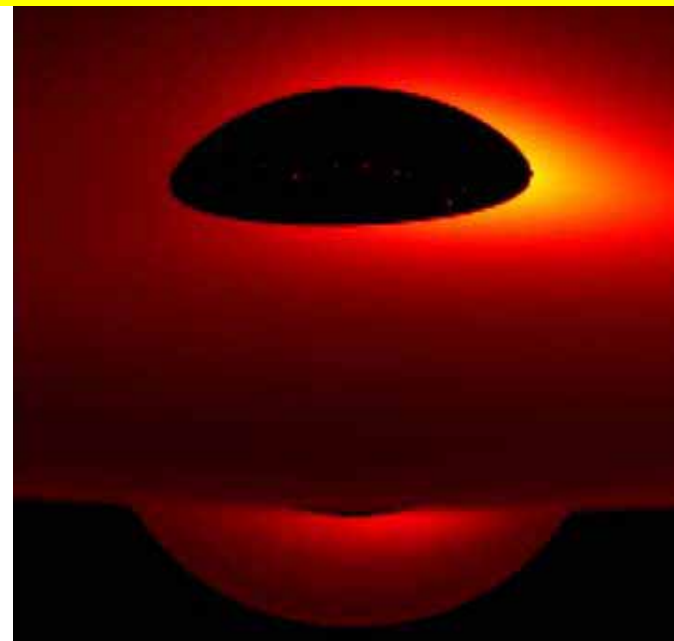
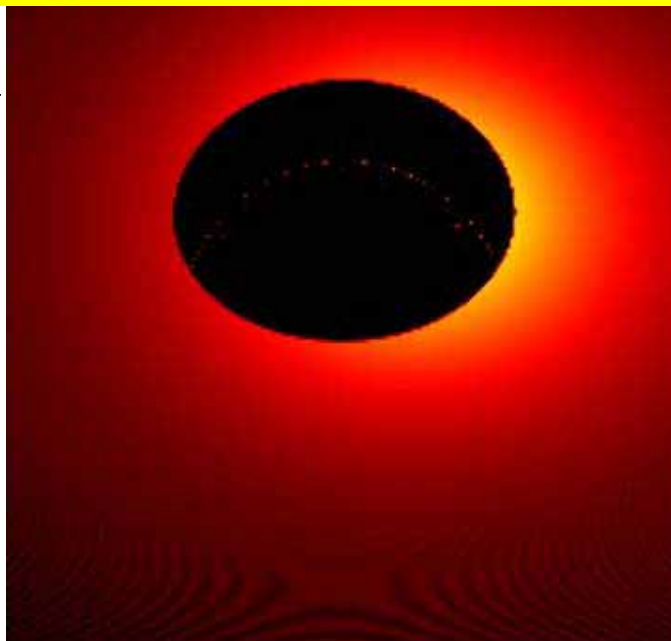


230
GHz

SgrA*

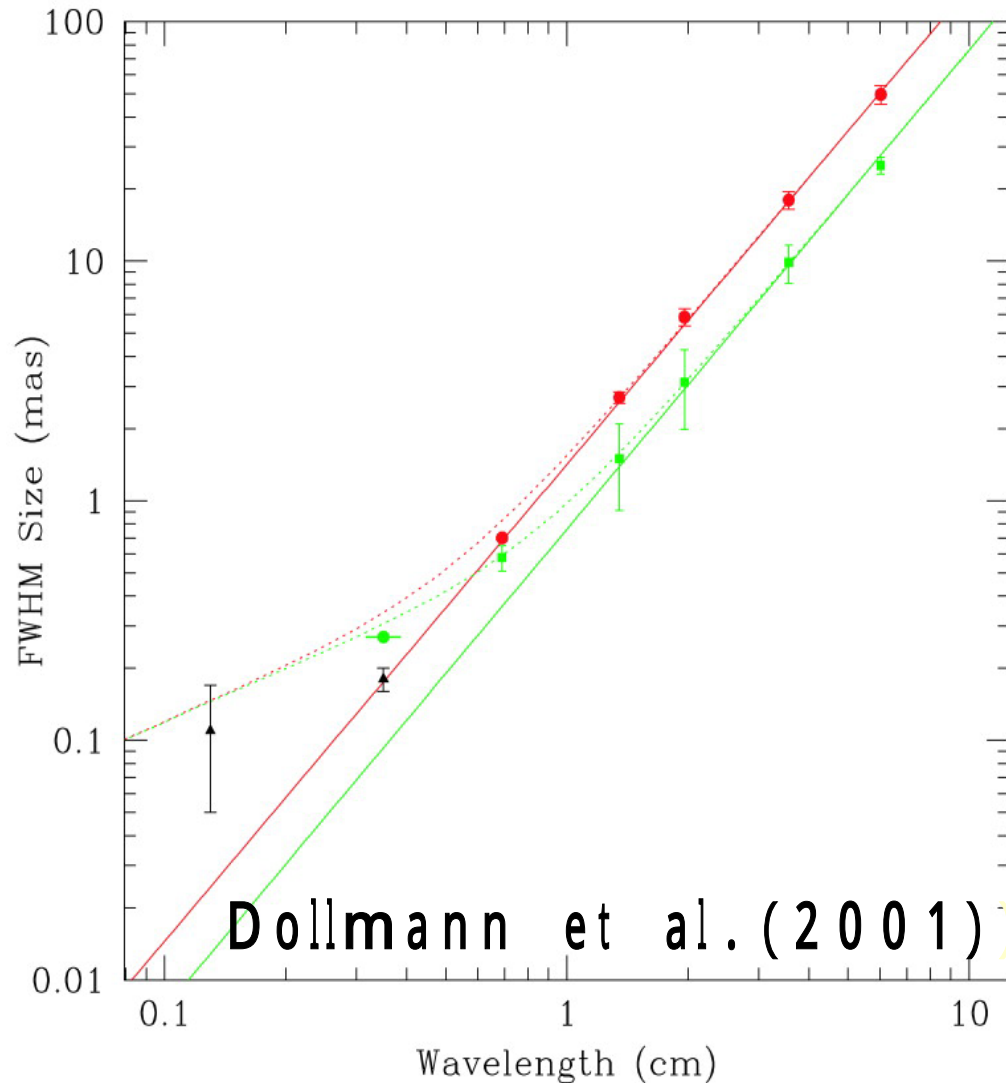
230GHzでは光学的にあつくて中のBHの影は
見えないのではないか？ --高橋氏による計算----OK.

Schwarzschild
ADAF
H=1
軸対称



12Rs

Takahashi
et al (04?)



Apparent Size of SgrA* Free from Scattering Effects by Plasma

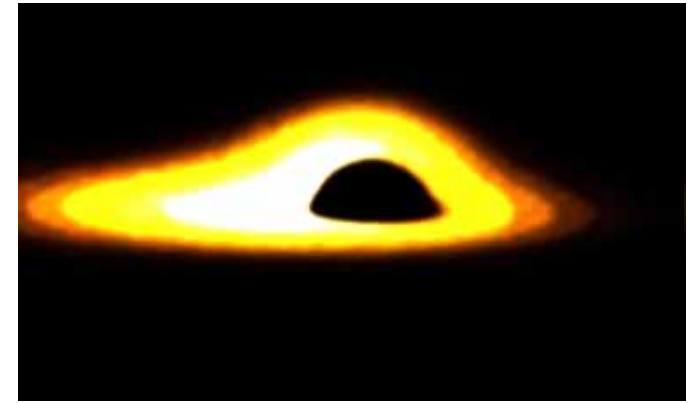
$$\left(\quad \right)^2$$

At mm-, sub-mm wave
length !

So we can expect observe
the intrinsic image at
mm-, sub-mm wave
length.

230GHz帯でプラズマによる散乱は本当に晴れるか？
 -----もう晴れているらしい-----
 (高橋氏講演、Bower et al. 2004)

ほらいずん望遠鏡: ブラック
ホールの周りの降着円盤を
みよう。



2001年から2002年まで

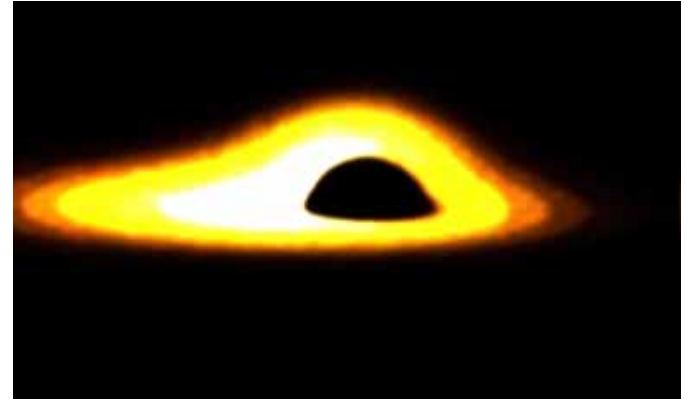
「サブミリなら見えるよ」以外は法螺

2003年、分解能・感度もうOK

2004年はさらにまじめな検討

・光学的に厚くて中は見えない? 見える

・プラズマの散乱は230GHzで晴れる(他人)



ほらいずん望遠鏡:ブラック

ホ - ルの周りの降着円盤をみよう。

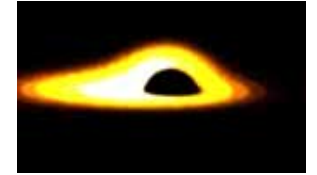
・赤外やX線天文技術との比較ー

20 ~ 30年はサブミリ波VLBIが有利

ほらいずん望遠鏡: ブラックホールの周りの降着円盤を
みよう。

2001年から2002年まで

「サブミリなら見えるよ」以外は法螺



2003年、分解能・感度もうOK

2004年はさらにまじめな検討

- ・光学的に厚くて中は見えない? 見える
- ・プラズマの散乱は230GHzで晴れる(他人)
- ・赤外やX線技術との比較ー

20~30年はサブミリ波VLBIが有利

ブラックホールの穴が見えてなにがわかる?
形はメトリックを示す(質量・電荷・角運動量)

あとはサイト調査のみ
地上VLBIで
230GHzくらいはできる。

ただしサイトを注意深く
選ぶ必要がある。

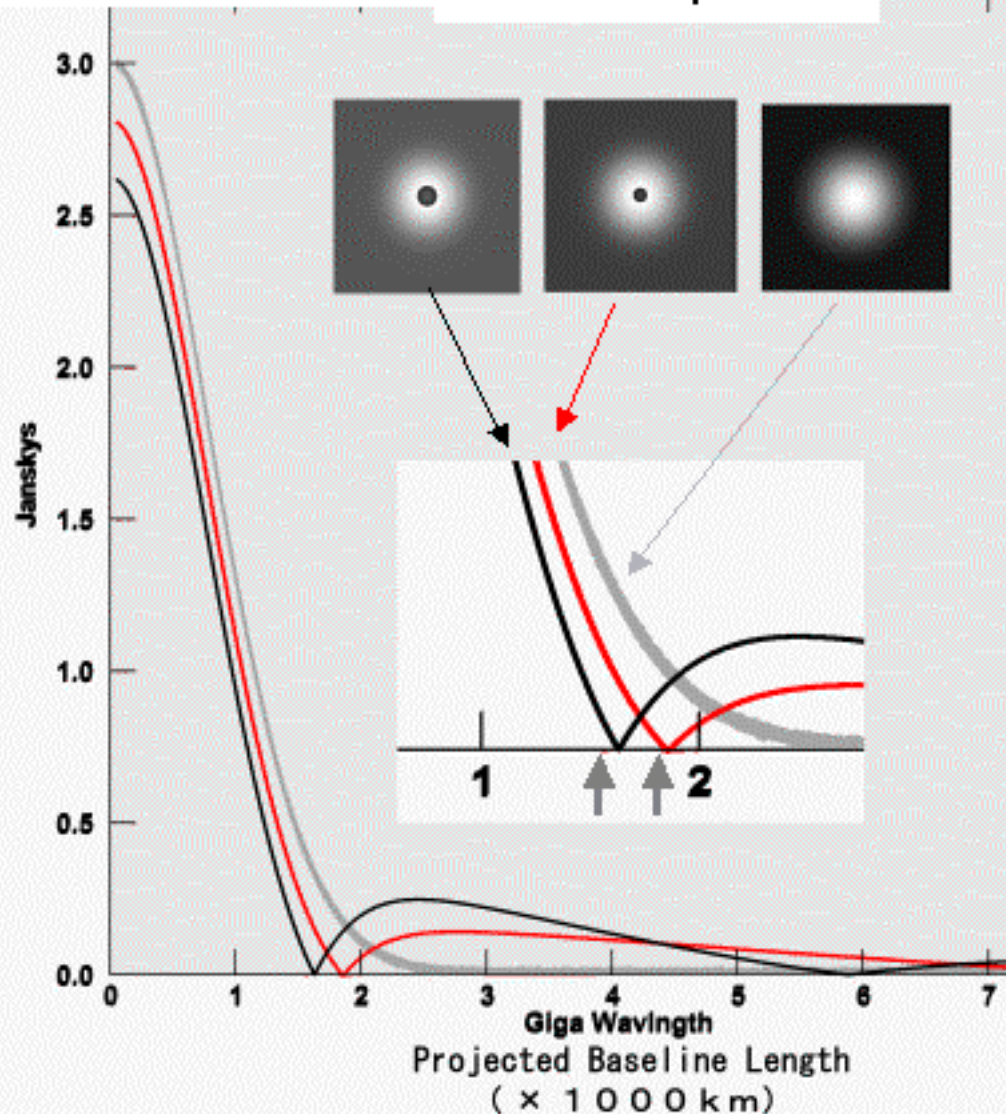
ついでに高周波数VLBI(100GHz以上)
に対する偏見を打破する実験が必要
(なんとも今までの成果・結果が....
毎回その場しのぎのセットアップ。
天候への考慮なし。そもそも低地サイトが悪い。)

An Example of the relation of Visibility Amplitudes and Structure of SgrA* (230GHz)

BH $3.7 \times 10^6 M_{\odot}$
 $D_s = 44 \mu\text{as}$

BH $2.6 \times 10^6 M_{\odot}$
 $D_s = 30 \mu\text{as}$

NO Black
hole
NO Shadow



Null point shifts
with the size of BH
shadow, namely BH
mass

あるいは、多波長観測、
理論から予想される構
造とのモデルフィッテ
ングを行う。。
(昔の電波干渉計、
VLBIで行われた方法)

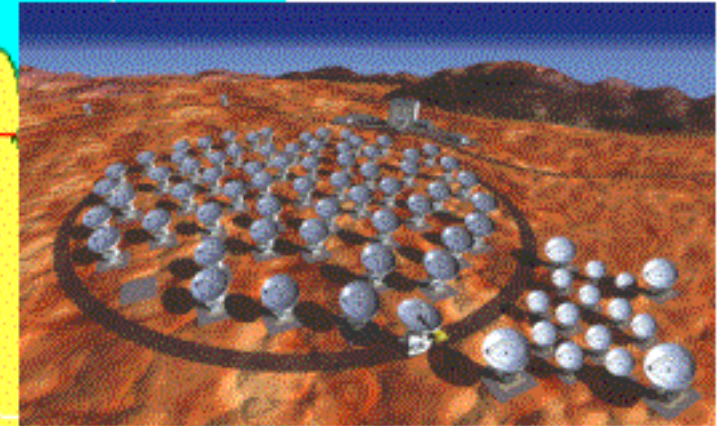


Old 32m communication antenna

Huancayo

例えばALMAをふくむ3局構成

ALMA



SEST...



?



SESTは閉鎖中。年間100万ユーロ(約1億円)で運営できます。南半球一のミリ波電波望遠鏡

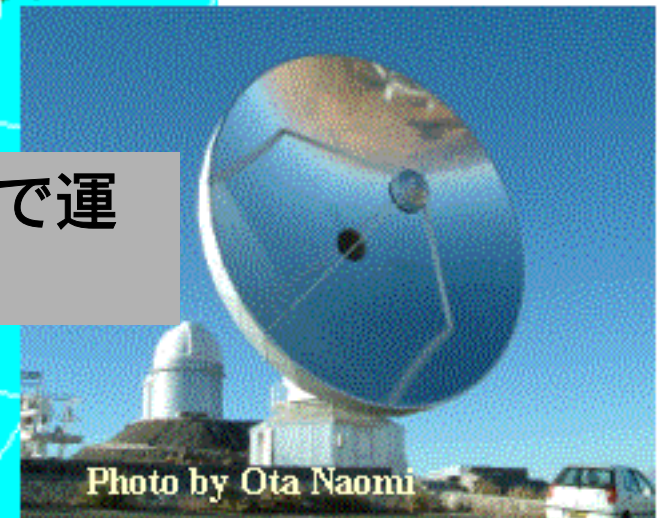
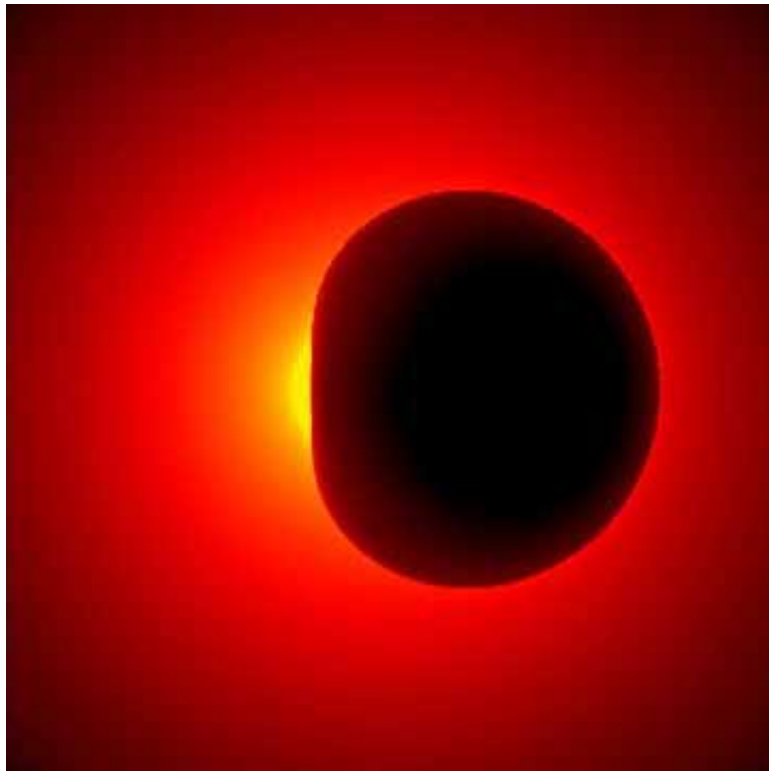


Photo by Ota Naomi

サブミリ波VLBI
(230GHz-)
でブラックホール
は、もう見える！
で高橋さんへ

ブラックホールの直接観測 に関連するサイエンス



光学的に薄い降着流中で最大回転するBH。
一般相対論的輻射輸送計算により作成。
スピン $a/M=0.9999$ 。

高橋 芳太
Rohta Takahashi
京都大学基礎物理学研究所

次世代天文学 大型観測装置とサイエンス
2004年12月25日～27日@東京大学

ブラックホールの直接観測

まとめ

に関連するサイエンス

メトリックの情報を直接知ることができる

ブラックホール自体に関するもの

質量・角運動量・電荷 (恐らく) 余裕で決められる。

BH摂動、BH連星 (3C 66B)、BHを貫く磁場 (Wald 1974)、など

重力理論に関するもの

超強重力場での重力理論の検証、量子重力 (電荷の有無、BH摂動) など

強重力場の物理に関するもの

各場所でのスペクトル・時間変動・偏光・相対論効果

エネルギー・角運動量の散逸・輸送過程を直接分解

降着円盤 (定常・非定常)、降着流中の Shock、MRI・磁気散逸過程、
ジェット生成噴出過程、Blandford-Znajek 過程、粒子加速の素過程、
Strong Lensing効果、偏光と降着流、連星BHへの降着流、磁場形状、など

BHスピンの測定法 —過去に提案された方法—

過去に提案された方法

1. QPO (Quasi Periodic Oscillation) *
2. 降着流の Minimum Timescale *
3. 蛍光鉄輝線 *
4. Spectral Fitting *
5. Bardeen-Peterson効果 or Spin-induced Precession *
6. 降着流からの X 線の偏光 * *
7. 重力波 * *

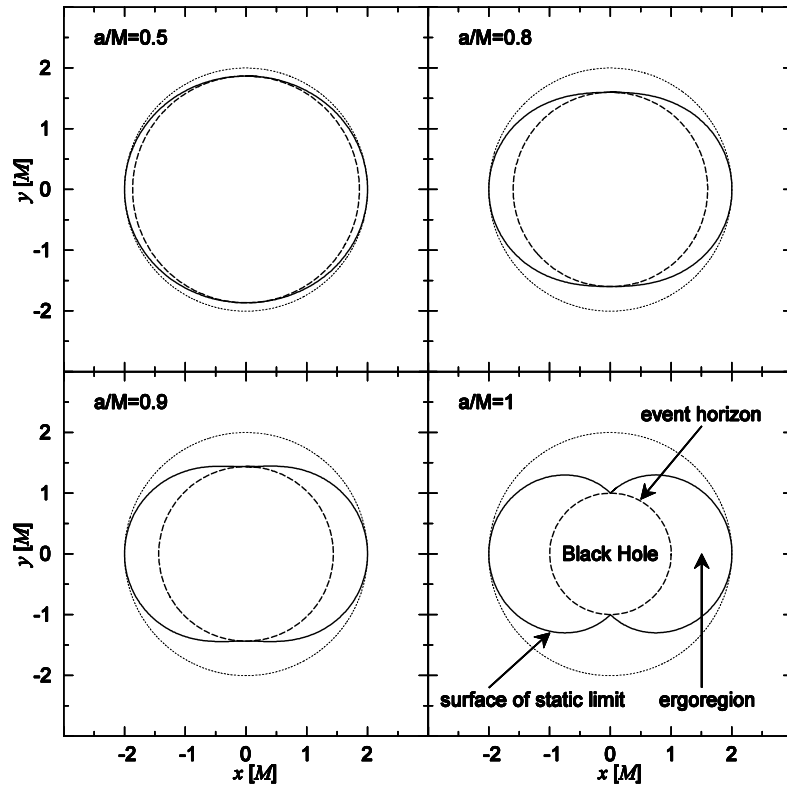
* : 空間分解できていない。
複数の説明が存在 or
起源が不明 or
降着円盤モデルに強く依存
方法自体にコンセンサスが
取られていない。
* : 将来的に観測される(だろう)
* : BH周囲の天体の存在を仮定

近い将来実現可能で、かつ万人が納得する
スピン決定方法は存在するのだろうか？

[Ans.] Yes. ブラックホール影の観測

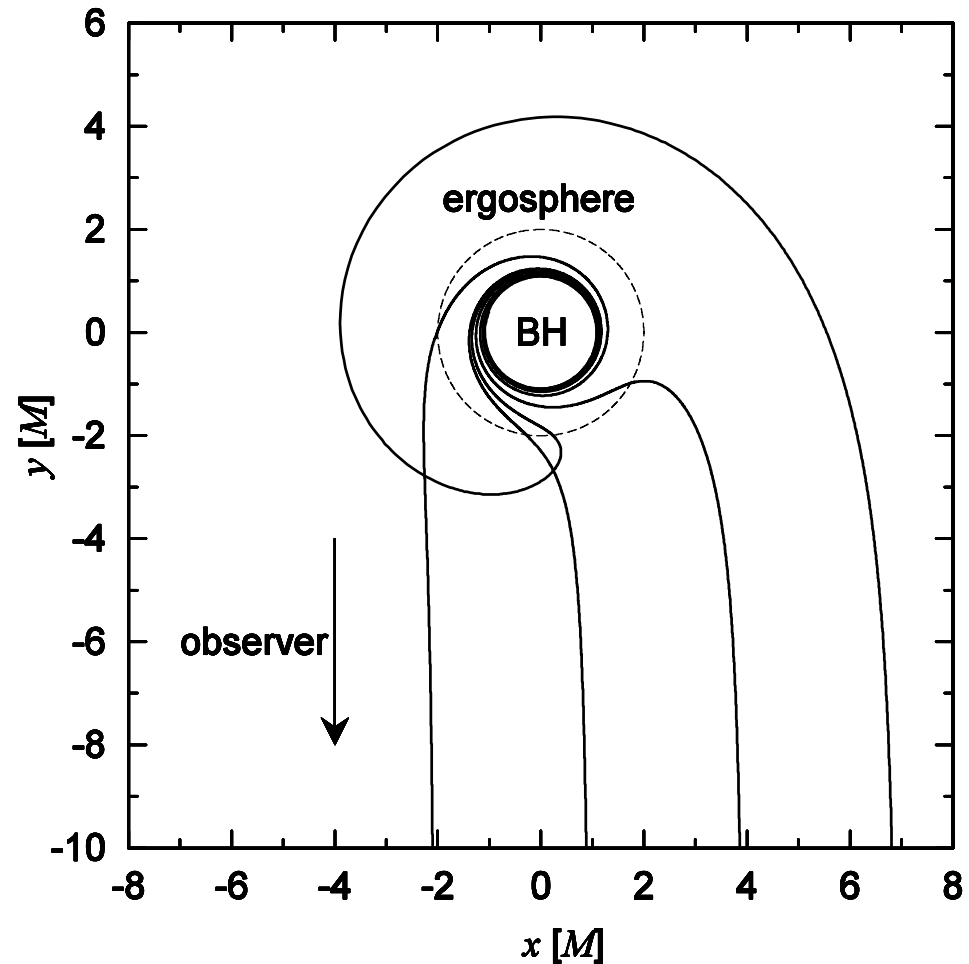
カーBH での *Frame Dragging Effect*

エルゴ領域



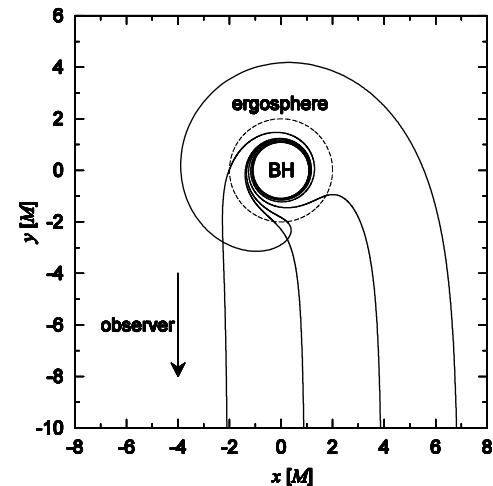
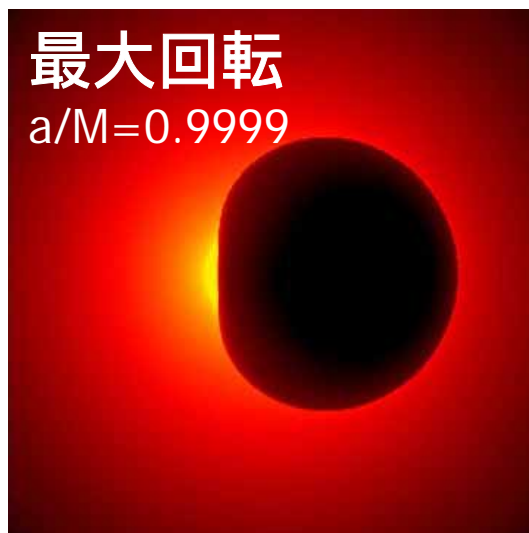
時空に引きずられた光子軌道

@赤道面 & 最大回転BH



BHスピンの測定法 -BH影の観測による方法-

BH影の直接観測による方法



時空の引きずり
非対称な光の経路
非対称なBH影の形

光学的に薄い波長で観測する場合

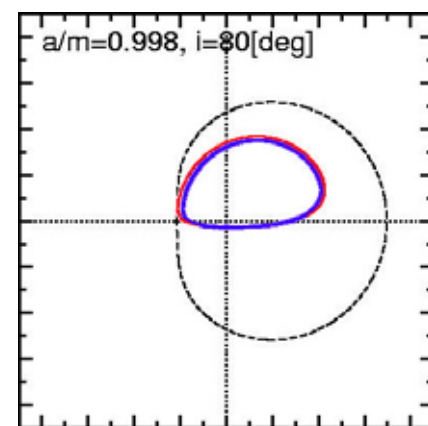
仮定

一般相対論

static black hole

モデル依存性の少ない

シンプルなスピン決定方法

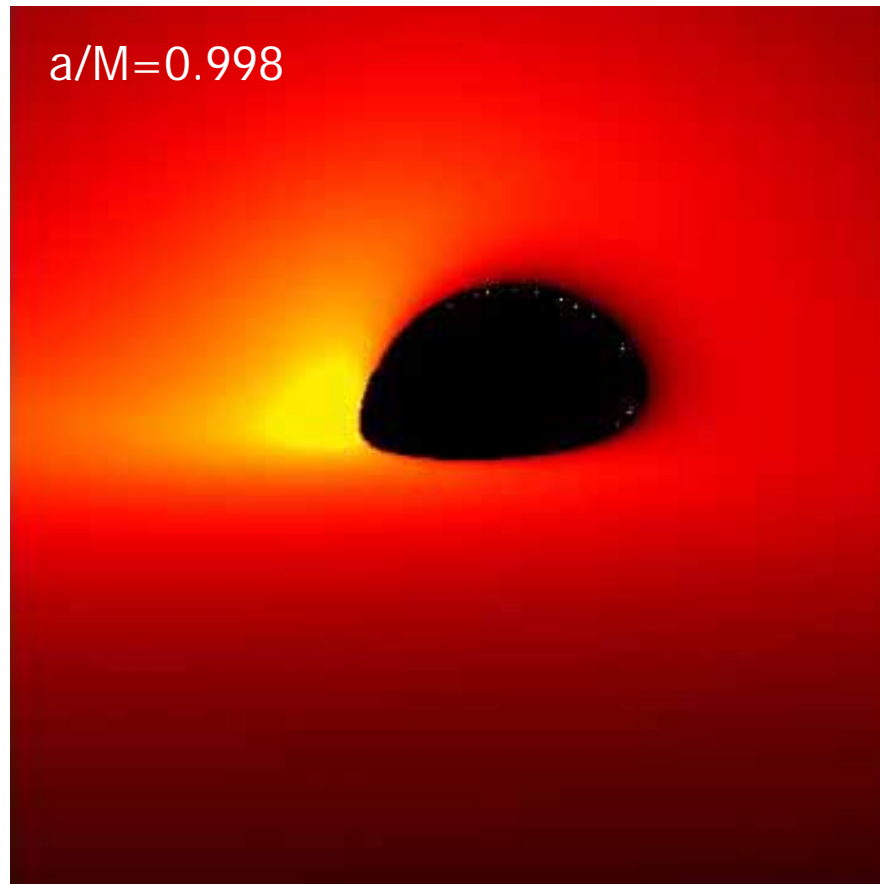


Takahashi (2004)

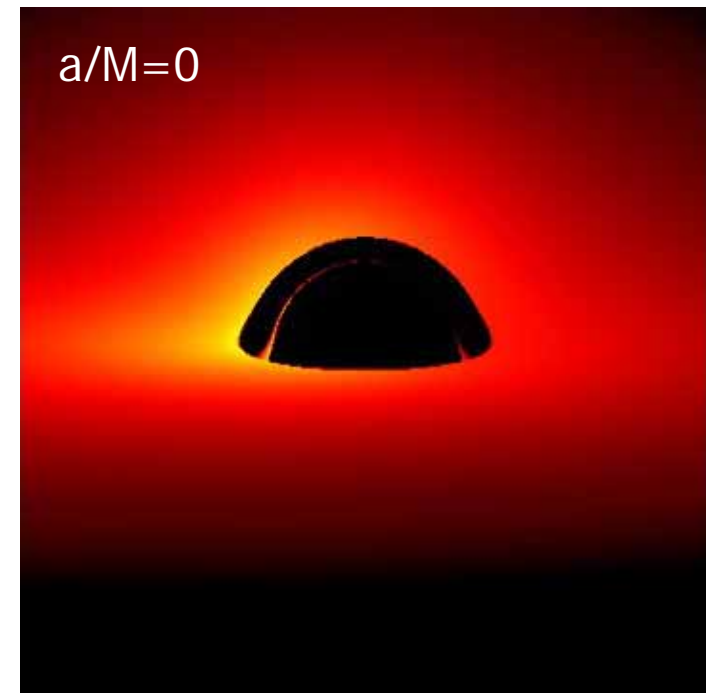
ただし、回転軸の真上から見る場合はBH影の形が円なので物理量が縮退する。

降着円盤中の回転するBH

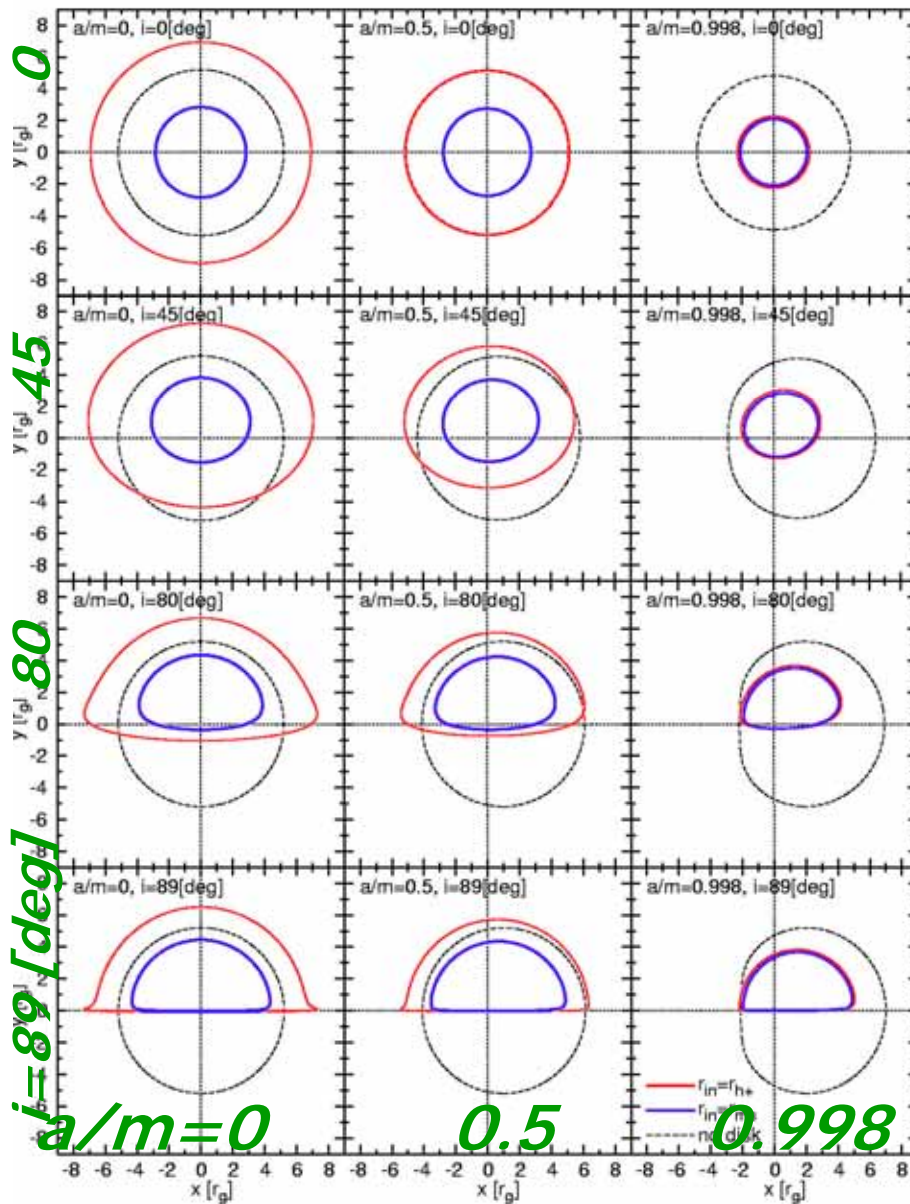
カーBH



(参考)
シュバルツシルトBH



降着円盤中のBHの影とBHスピン



Rin=Rh+の円盤

Rin=Rmsの円盤

円盤なし

円盤の最内縁
 → 影のサイズ
 傾き角
 → 影のつぶれ
 BHの回転
 → 影の非対称性

降着円盤が存在してもBH影からBHスピン決定が可能。

Takahashi (2004, ApJ, 611, 996)

BH電荷測定 or 中性性の検証

BHは電氣的に中性であるのか？
 どのようにそれを確かめるのか？
 電荷を持つ場合には、観測的に
 求められるか？

電荷を持つ場合のBH影の輪郭を記述する式

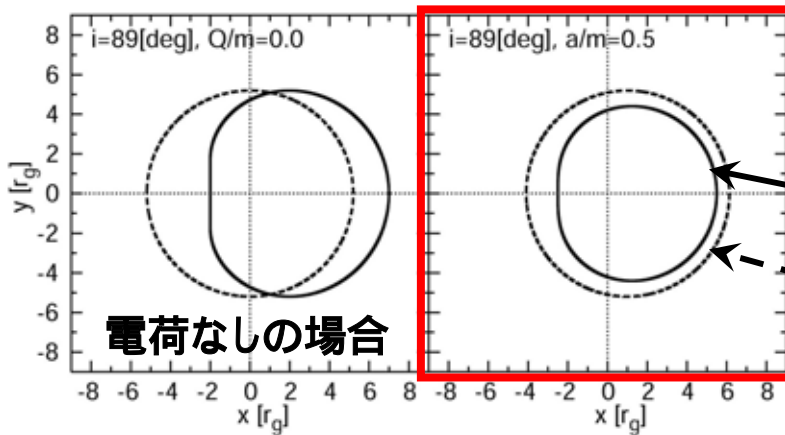
$$x = -\frac{\xi}{\sin i}$$

$$y = \pm \left[\eta + a^2 \cos^2 \theta - \frac{\xi^2}{\sin^2 \theta} \right]^{1/2}$$

$$\xi = \frac{-r^3 + 3Mr^2 - a^2r - Ma^2 - 2Q^2r}{a(r - M)}$$

$$\eta = \frac{r^3(-r^3 + 6Mr^2 - 9M^2r + 4Ma^2) - 4r^2Q^2(r^2 + a^2 + Q^2 - 3Mr)}{a^2(r - M)^2}$$

式の中に
 スピン・電荷・傾き角
 の縮退はない



実線：電荷あり、スピンa/M=0.5
 点線：電荷なし、スピンa/M=0.5

Takahashi (2004,
 submitted)

< 電荷の効果 >

BH影のサイズが小さくなる。

← ホライズン $r_{h+} = M + (M^2 - a^2 - Q^2)^{1/2}$

回転している場合は縦長になる。

← BH角速度 $\omega = \frac{2ma}{r^3} + O\left(\frac{1}{r^4}\right)$

特に、BH影の最大幅が

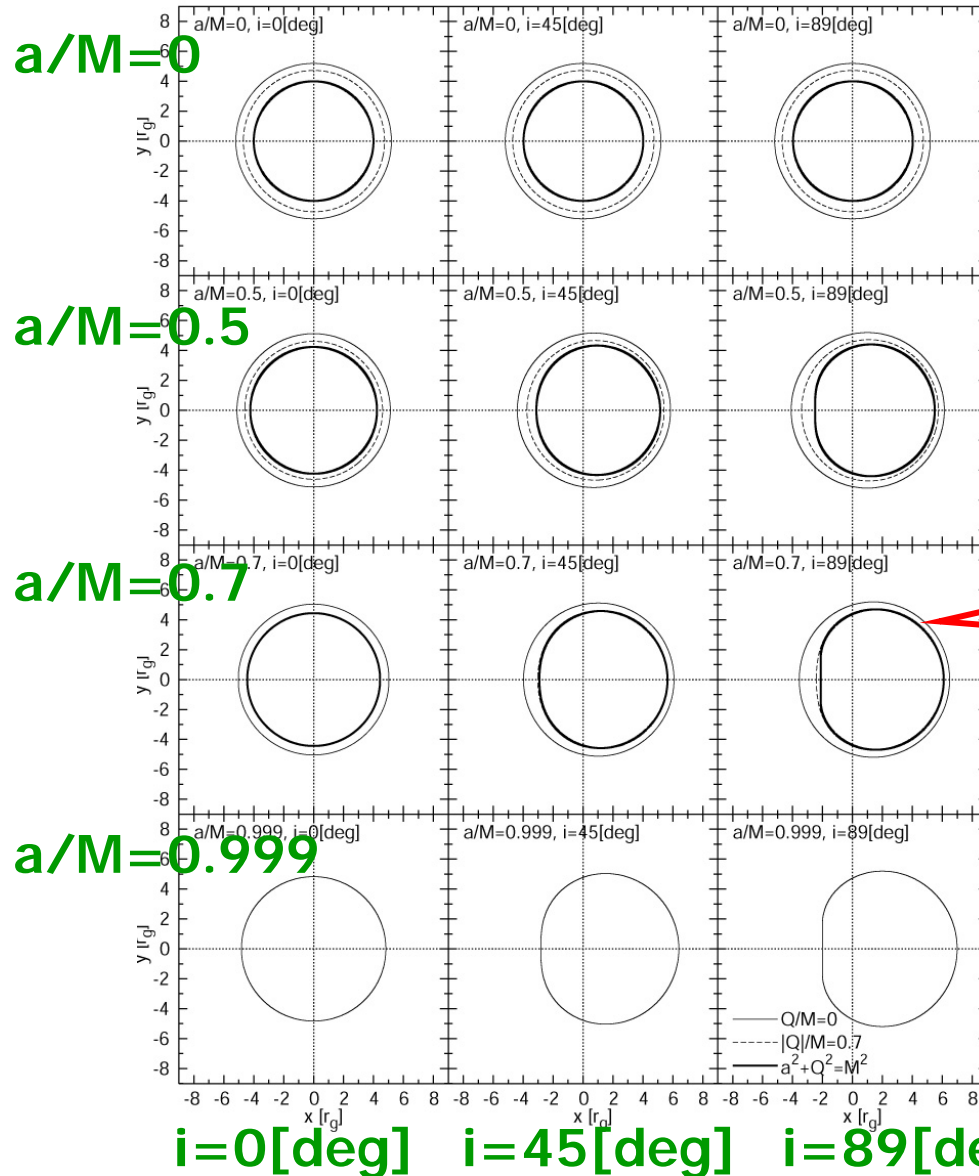
$$4(1 + 2^{1/2})M$$

より小さい場合はBHは
 必ず電荷を持つ。

結論：BHの電荷は
 測定できる。

BH の影とスピン・電荷

Takahashi (2004, submitted)



- ホライズン

$$r_{h+} = M + [M^2 - (a^2 + Q^2)]^{1/2}$$

- BHである条件

$$(a/M)^2 + (Q/M)^2 \leq 1$$

- BHの角速度

$$\omega = \frac{2Ma}{r^3} - \frac{2Ma^3 - Q^2a}{r^4} + O\left(\frac{1}{r^5}\right)$$

太線：最大電荷
細線：電荷なし

スピンの効果
→ 影の非対称性
電荷の効果
→ サイズを小さくする

ブラックホールの直接観測

まとめ

に関連するサイエンス

メトリックの情報を直接知ることができる

ブラックホール自体に関するもの

質量・角運動量・電荷 (恐らく) 余裕で決められる。

BH摂動、BH連星 (3C 66B)、BHを貫く磁場 (Wald 1974)、など

重力理論に関するもの

超強重力場での重力理論の検証、量子重力 (電荷の有無、BH摂動) など

強重力場の物理に関するもの

各場所でのスペクトル・時間変動・偏光・相対論効果

エネルギー・角運動量の散逸・輸送過程を直接分解

降着円盤 (定常・非定常)、降着流中の Shock、MRI・磁気散逸過程、
ジェット生成噴出過程、Blandford-Znajek 過程、粒子加速の素過程、
Strong Lensing効果、偏光と降着流、連星BHへの降着流、磁場形状、など