

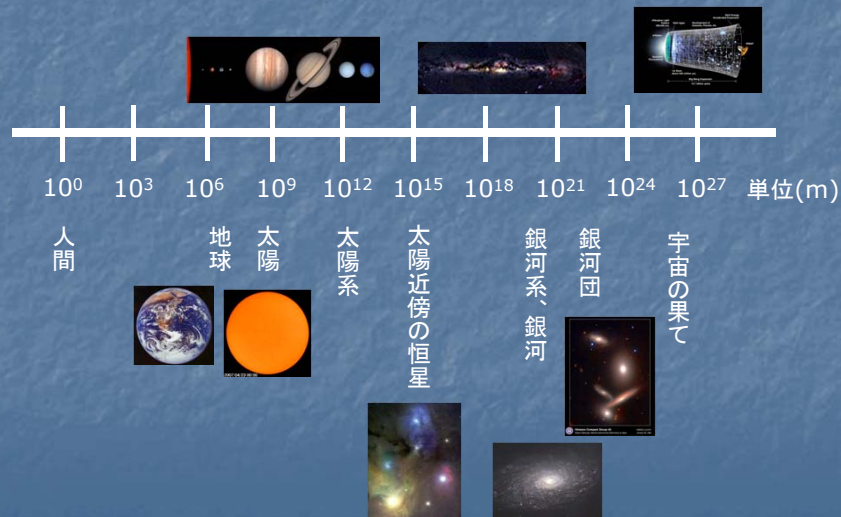
宇宙科学II（電波天文学）
第10回

ブラックホール(2)

前回の復習

宇宙の階層構造

- ログスケールで表示した宇宙の大きさ



ブラックホール

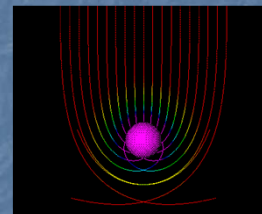
- 強い重力により光さえ飲み込む暗黒の天体

- ブラックホールの大きさ
(シュバルツシルト半径)

$$R_g = 2GM / c^2$$

- 無限遠から初速0でBH近傍の円軌道まで物質を落とすと、

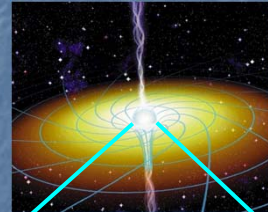
$$E = \frac{1}{4} m c^2$$



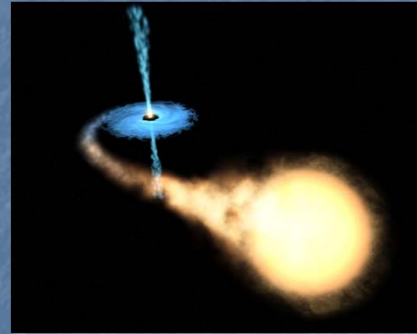
という莫大なエネルギーが取り出せる
(ニュートン力学の近似、実際は静止質量の～10%)

ブラックホールの想像図

■ 銀河中心ブラックホール



・ 連星系ブラックホール



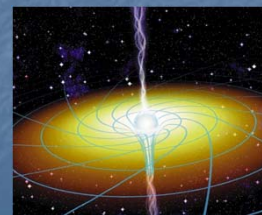
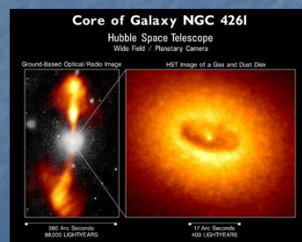
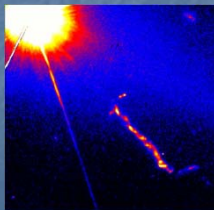
ブラックホールは通常、ブラックホール、円盤、ジェットからなる

AGN : 活動銀河中心核

■ AGN (Active Galactic Nuclei)

= 活動銀河中心核

銀河中心の巨大ブラックホールのうち活動的に明るく輝いているものの総称



AGNの光度

- 質量降着率と高度の関係

$$L = \epsilon \times dM/dt \times c^2 \quad (\epsilon \sim 0.1)$$

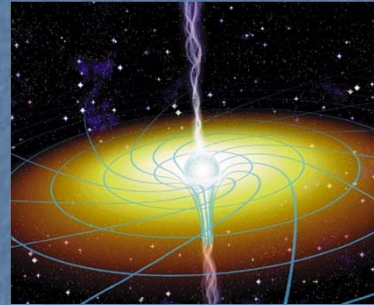
- $dM/dt \sim 0.7 M_{\text{sun}} / \text{yr}$ のとき、 $L \sim 10^{12} L_{\text{sun}}$ 。すなわち、1年あたり太陽質量程度のガスをBHに落としこむと、AGNの莫大なエネルギーは説明可能。
- $L = 10^{12} L_{\text{sun}}$ のAGNがエディントン光度で輝いているとすると、 $M_{\text{min}} \sim 3 \times 10^7 M_{\text{sun}}$

すなわち、太陽の3000万倍もある、超巨大ブラックホールが必要になる。

AGNの高分解能観測

ブラックホール周辺の構造

- ブラックホール本体
「黒い穴」?
- 降着円盤
BHへ回転しながら落ち込むガス円盤
- ジェット
BHから双極的に出る質量放出現象



これらの現象を高い分解能で詳しく観測したいと天文学者は考えている

ブラックホールの大きさ

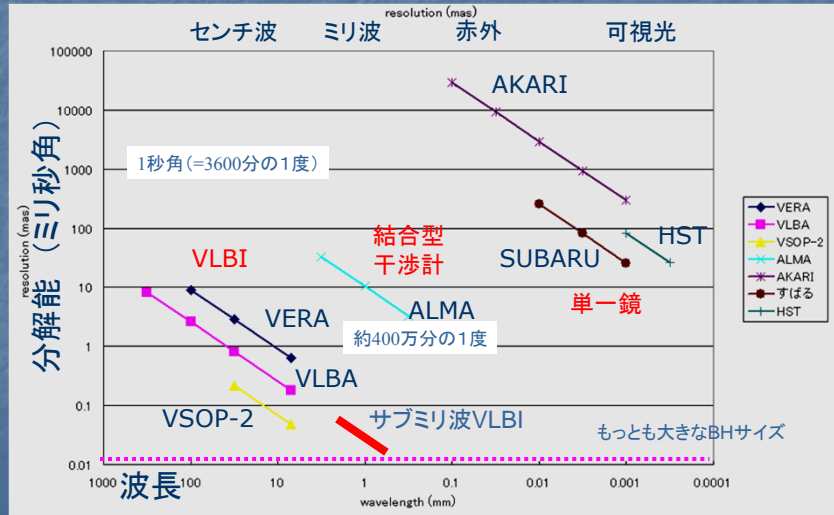
天体	BH質量 (太陽比)	距離	視半径
銀河系中心	4×10^6	8 kpc	10 μ as
M87	3×10^9	15 Mpc	4 μ as
M104	1×10^9	10 Mpc	2 μ as
Cen A	5×10^7	4 Mpc	0.25 μ as



BH近傍を分解するには1 ~ 10 μ 秒角レベルの分解能が必要

VLBIの分解能

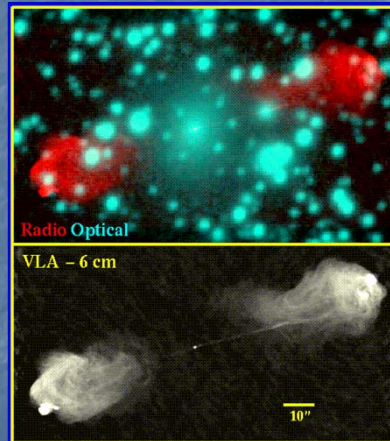
■ 様々な望遠鏡の分解能の比較



ブラックホールからのジェット

電波銀河とジェット

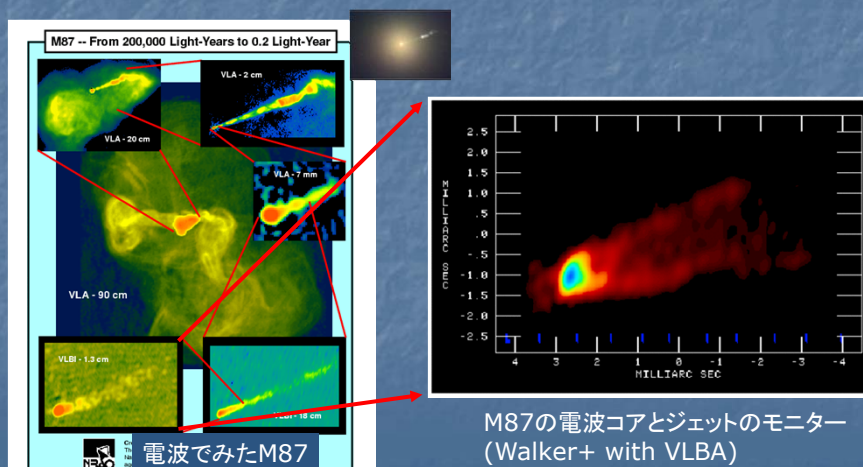
- AGNから光速に近い速度でジェットが放出され、シンクロトン放射で明るく輝く。
- BHから出る電波ジェットは銀河よりも大きな広がりを持つこともある。(電波ローブ)



電波銀河 Cyg-A

M87の電波ジェット

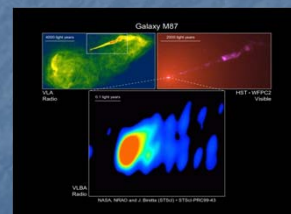
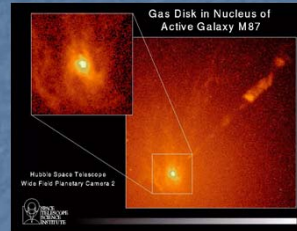
- M87: おとめ座銀河団中の巨大楕円銀河



AGNから出るジェット

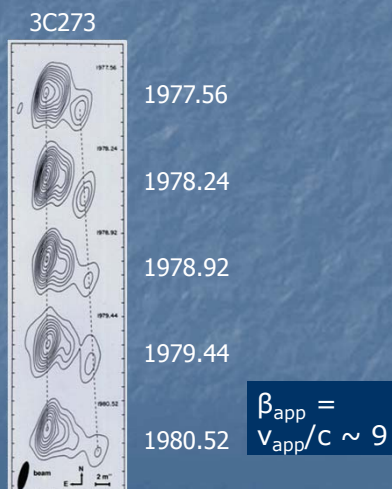
- 中心にあるブラックホールからジェットが出ている様子が多数見つかった。
- ジェットの速度は光速の90%に達するものもある

これらの高速ジェットもブラックホールに関連していると考えられる

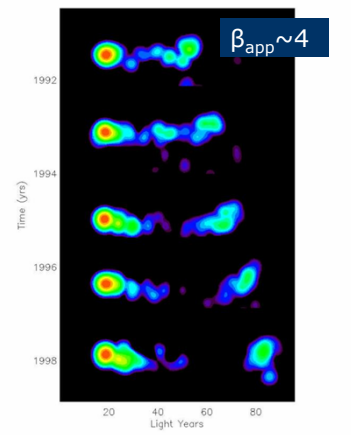


ジェットの超光速運動

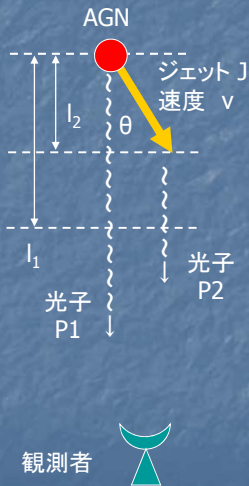
- VLBIでミリ秒角スケールまでジェットを分解してモニターすると、ジェットの見かけの運動速度が光速度を超えることがある



電波でみた3C279の超光速運動



ジェットの超光速運動 (2)



- 時刻 0 にAGNから出た光子P1, ジェット J, および時刻 t にジェット J から出た光子P2を考える

- P1, P2が観測者に届く際の時間差は $\Delta t = (l_1 - l_2)/c = (1 - v/c \cos\theta) t$

- 時間間隔 t の間のジェットの見かけの動きは $\Delta x = v t \sin\theta$

ジェットの超光速運動 (3)

- ジェットの見かけの速度

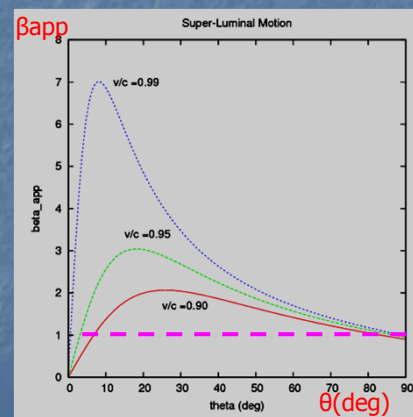
$$v_{app} = \Delta x / \Delta t$$

$$\begin{aligned} \beta_{app} &= v_{app} / c \\ &= \beta \sin\theta / (1 - \beta \cos\theta) \\ (\beta &= v/c) \end{aligned}$$

- β_{app} は $\beta \sim 1, \theta \ll 1$ のとき、1よりも大きくなる。

超光速運動 ($\beta_{app} > 1$) は、ジェットが光速に近い速さまで加速された証拠。

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



ジェットの速度とBH

- AGNジェットの $\beta \sim 1$ の意味

ジェットのような質量放出現象では、その放出速度は中心天体の脱出速度程度となる(オーダー評価)

理由1) 脱出速度に満たない物質は出てこれない

理由2) 脱出速度を超えた物質はすぐに重力を振り切ってしまうので、脱出速度よりもはるかに大きな速度まで加速するのは難しい

- 光速に近いジェット($\beta \sim 1$)の存在は、中心天体がブラックホールであることの間接的な証拠(BH表面の脱出速度は光速)

ジェット研究の課題

- どうやって光速近くまで加速するか
- どうやって細く絞るか

(輻射圧、磁場 etc ??)

これらに答えるには、ジェットの根元の詳細な観測が必要(BH近傍を分解する必要がある)

降着円盤とBH

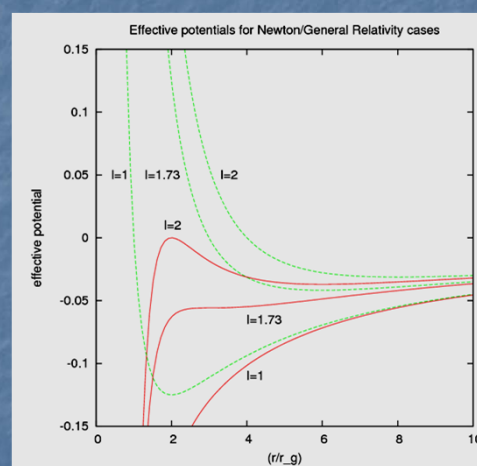
BH近傍の粒子の運動

- 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

標準降着円盤

- ガスの降着によって解放するエネルギーを局所的な黒体輻射で放射する円盤

- 円盤の温度(オーダー評価)

AGNの明るさ $L \sim GM \, dM/dt / 2r$

円盤の大きさを R とし、平均温度 T の黒体輻射とすると、

$$L \sim 2 \times \pi R^2 \times \sigma T^4$$

- これより、 $T \sim (GM \, dM/dt / 4\pi\sigma R^3)^{1/4}$

標準降着円盤 (2)

- 典型的なAGNのパラメーター

$$M \sim 3 \times 10^7 M_{\text{sun}}, \, dM/dt \sim 1 M_{\text{sun}} / \text{yr}$$

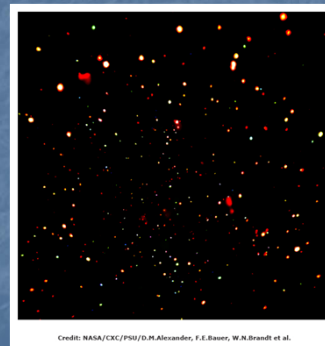
$$R \sim 3 R_g$$

を用いると、

$$T \sim 2 \times 10^5 \text{ K}$$

→ 紫外線~X線で明るく輝く

(実際のAGNからの放射は
熱放射だけでなく、非熱的な
成分の寄与が大きい)

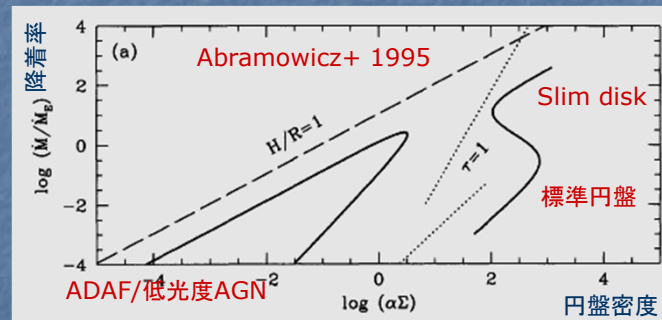


Credit: NASA/CXC/PSO/D.M.Alexander, F.E.Sauer, W.N.Brandt et al.

X線衛星Chandraで見た遠方銀河。
明るいAGNが選択的に多数観測される。

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)

低光度AGN

- 活動性が低い(暗い)AGNは、標準円盤では説明できない。
- もっとも顕著な例は、銀河系中心のBHであるSgr A*

$$M \sim 3 \times 10^6 M_{\text{sun}}, \quad L \sim 2.5 \times 10^3 L_{\text{sun}}$$

$$dM/dt \sim 2 \times 10^{-9} M_{\text{sun}} / \text{yr}, \quad R \sim 3 R_g$$

を用いると、

$$T \sim 7000 \text{ K}$$

→ 可視光で明るい天体のはず(実際は見えない)

低光度AGNとBH

- Sgr A*の場合、周囲のガスの質量から、最低でも
 $dM/dt \sim 10^{-6} M_{\text{sun}}$
 程度と期待される。この場合、
 $L \sim 10^6 L_{\text{sun}}$
 となり、観測値を大きく上回る。このような放射が外部に出ないためには、降着円盤のガスの放射効率が悪く、重力エネルギーの解放によって得られたエネルギーを熱として蓄えたまま、ブラックホールに落ちていく必要がある
- Sgr A*には通常天体のような表面はなく、ブラックホールであることを示唆する
- このタイプのAGNは、光度が低く温度が極めて高い($T \sim 10^9 - 10^{10}$ K)円盤を持つ

VSOP-2と降着円盤

VSOP-2 : VLBI Space Observatory Program-2

10mクラス、打ち上げ2015年?
 (2006年3月に計画承認)

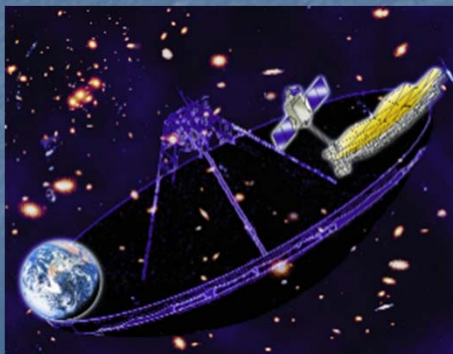
最長基線: 30000 km

最高分解能:

38 μas @ 43 GHz

= M87 BHの10 R_g

降着円盤が直接見える! ?

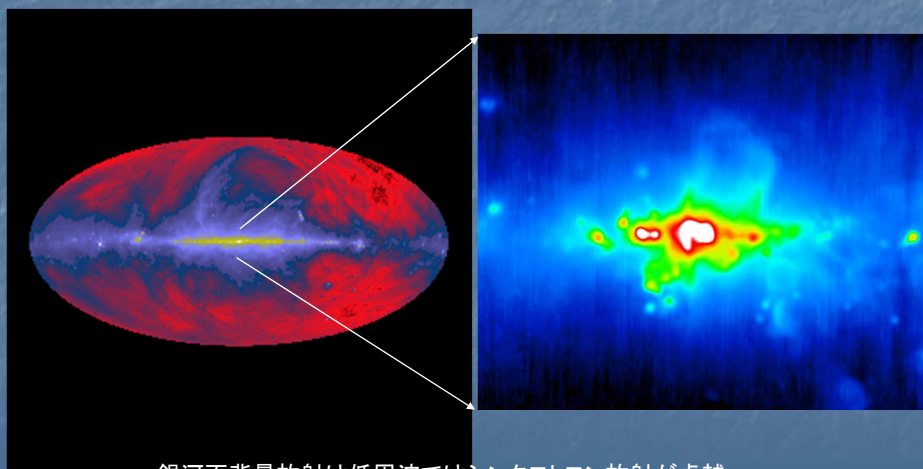


低光度AGNが主な観測対象(円盤の温度が極めて高い)

銀河系中心のブラックホール

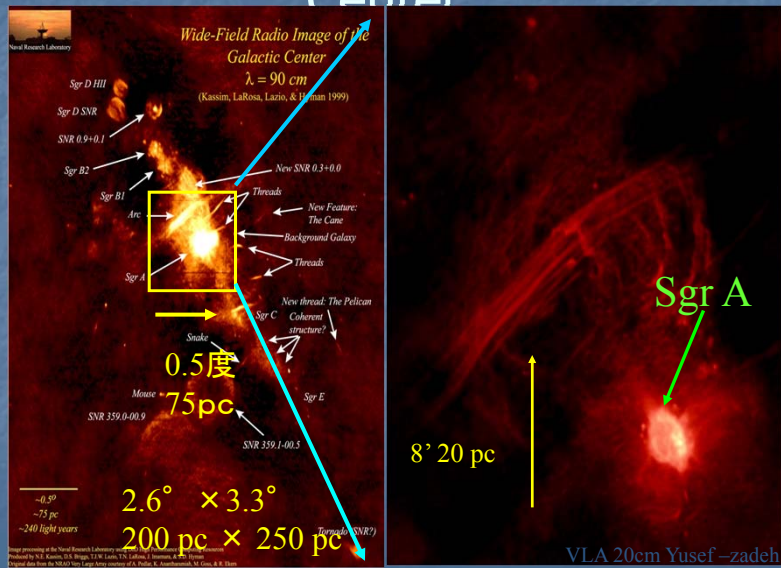
銀河面放射と銀河系中心

- 408MHzの全天マップ(左)と8GHzでみた銀河系中心部(右)



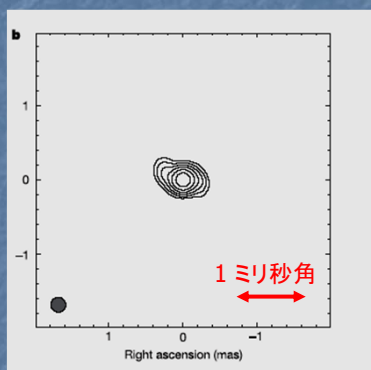
銀河面背景放射は低周波ではシンクロトン放射が卓越
GHz帯になると、星形成領域からの制動放射なども混じる

Radio images of the Galaxy Center

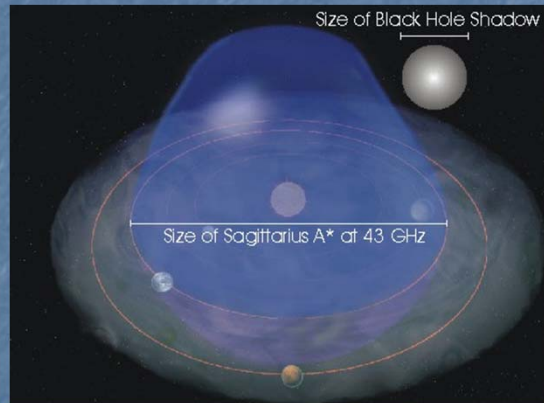


86GHzのVLBI 観測

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



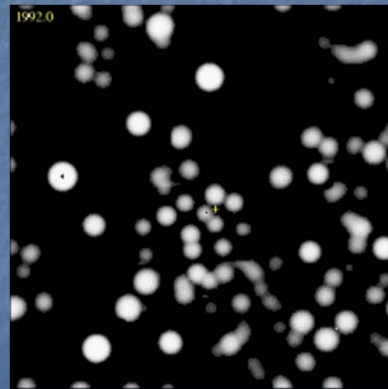
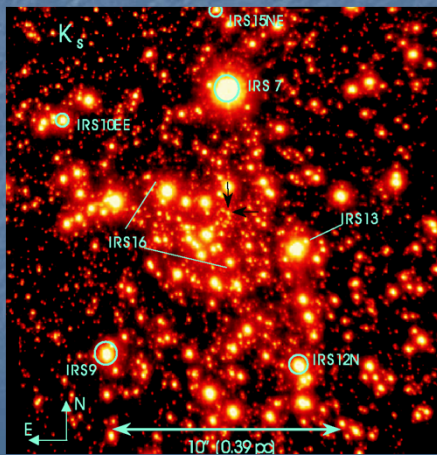
VLBA 86GHz map by Shen et al.(2005)



太陽系程度の大きさの構造まで分解

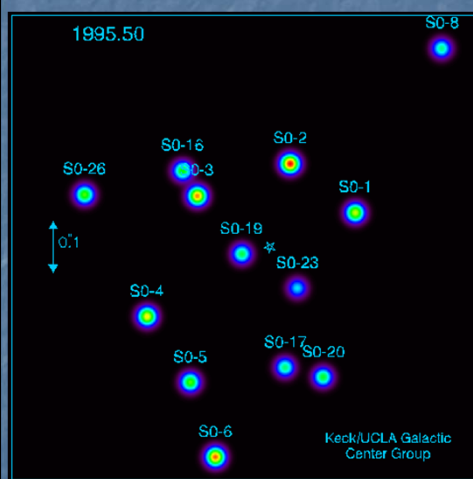
Sgr A* 周囲の星の運動

- 銀河系中心部の赤外線によるモニター観測



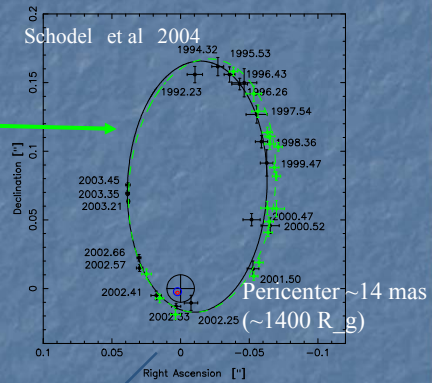
Motion of stars (Genzel et al.)

Sgr A* に最も近い星の軌道



Ghez et al. 0.8'' 0.032 pc

NTT+VLT black
Keck green



Most likely mass of the BH
~ 4 x 10⁶ solar mass

銀河系中心 Sgr A*

- 電波やX線で観測される銀河系の中心天体
- 星の軌道の重心に一致する
- 推定質量 $4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$
- 低光度AGNの性質を示す

超巨大ブラックホールである可能性が高い。

全天で見かけの大きさが最も大きなブラックホール候補天体である

ブラックホールは見える？

- ブラックホール自身は暗い(はず)
- ブラックホールに落ち込むガスが回転しながら高温で明るく輝くので、それを背景に「黒い穴」が見えると期待される。



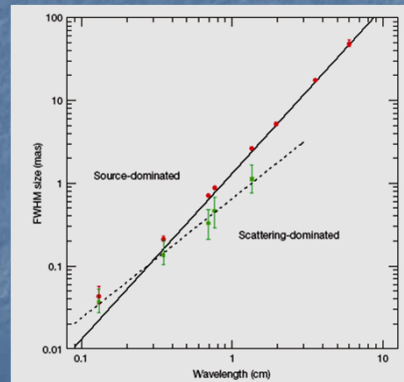
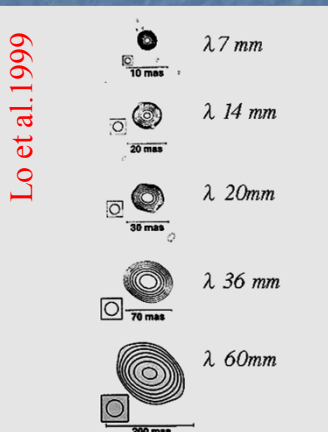
Fukue et al. (1989)

銀河系中心のブラックホールは「黒い穴」の見た目が最も大きい

直径~30マイクロ秒角
(波長の短い電波干渉計なら分解可能)

サブミリ波VLBIの重要性

- 長い波長の電波は、プラズマによる散乱を受けて、像がぼやける
- 短い波長が有利 ($\theta \sim \lambda/D$ で分解能も向上)

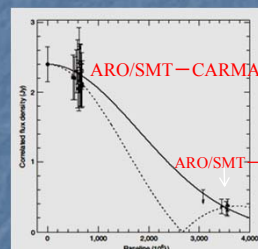
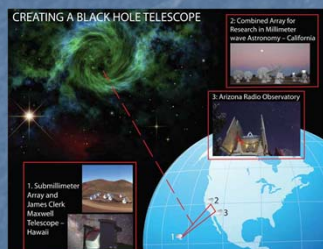


Scatter effect $\propto \lambda^2$

230GHzでのSgr A*観測

Sgr A*: 見かけが最も大きいBH
その分解にはサブミリ波VLBIが有効

- 1) shorter λ , higher resolution
- 2) less interstellar scattering



Doeleman et al. 2008 in Nature

Doeleman et al. (2008)は1.3mmでSgr A*の構造を
~40 μ 秒まで分解。「黒い穴」の分解まであと一歩?

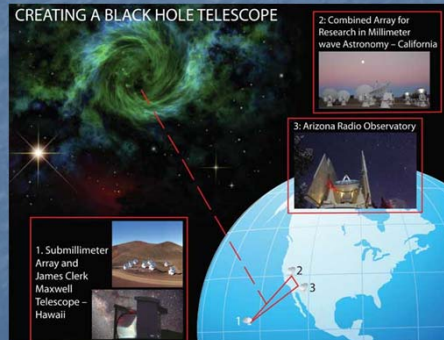
ASTEを用いたサブミリ波VLBI

- ASTE : Atacama Submillimeter Telescope Experiment
国立天文台が南米チリに有する10m電波望遠鏡
- これを米国の観測局と組み合わせて銀河系中心のブラックホールを観測する計画が現在進行中



ASTE 10m telescope
(@4860m above sea level)

+



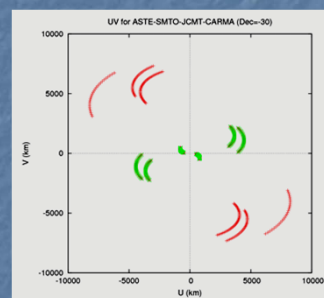
sub-mm VLBI array in US

ASTE参加の利点

- 南天の良好なサイト
- 基線長が倍増 → 高分解能



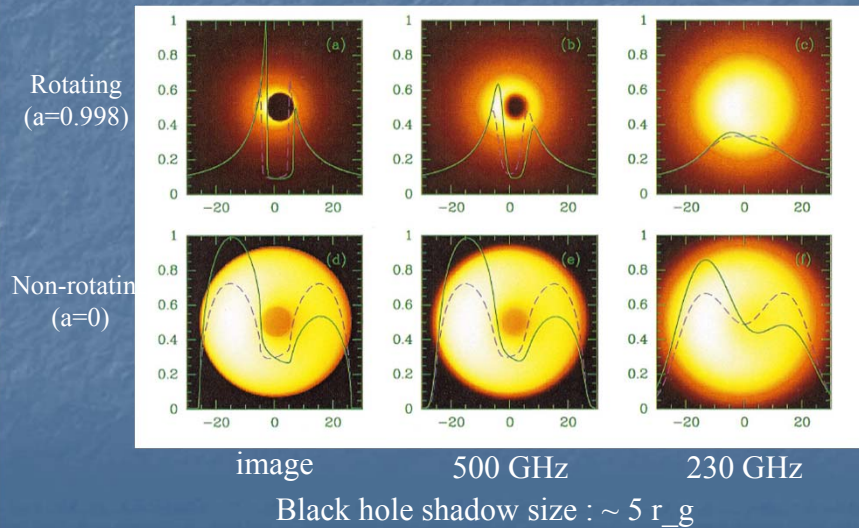
2010年春に初観測を実行



UV coverage for Sgr A*
(red: UV with ASTE)
fringe spacing $\sim 30\mu\text{as}$

Sgr A* ブラックホールはサブミリ波で見える？

Simulated image by Falcke et al. 2000



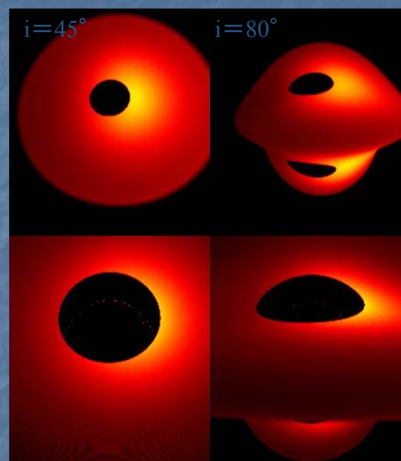
Sgr A*ブラックホールのシュミレーション

Takahashi et al.(2004)

ブラックホールのパラメーターによってさまざまなイメージが期待される

ブラックホール質量、スピン

降着円盤の傾きなど



ブラックホールシャドウ >

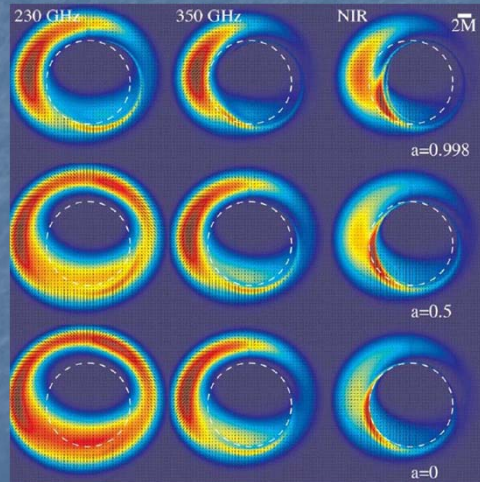
ブラックホール存在の証拠であり、また
ブラックホールのパラメーターを決める重要情報

Sgr A*ブラックホールのシュミレーション

Broderick (2006)

パラメーターによる
違いや周波数による
違いも

実際の観測ではどう
なっている？
(今後の課題)



Sgr A*の赤外線観測

- Sgr A自身を赤外線で検出
- 短期間での強度変動が見えてきた
- 周期成分あり？
物質がブラックホールの周囲を回っている証拠？

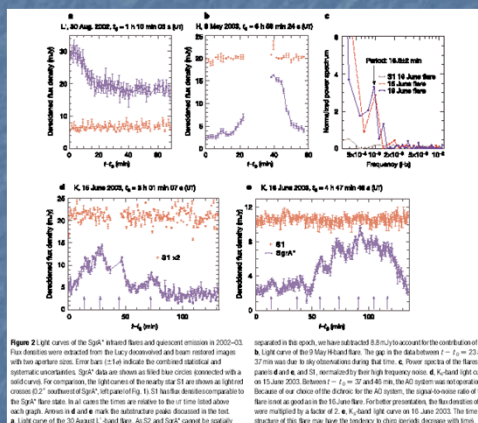
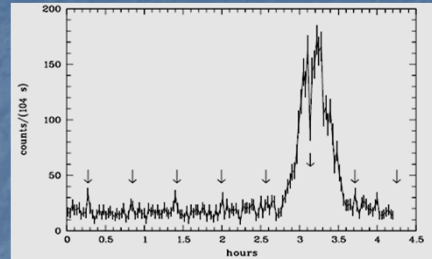


Figure 2. Light curves of the Sgr A* infrared flares and quiescent emission in 2002-03. Flux densities were extracted from the Lucy deconvolved and beam restored images with the aperture sizes. Error bars (1 σ) indicate the combined statistical and systematic uncertainties. Sgr A* flares are shown as filled blue circles connected with a solid curve; for comparison, the light curves of the nearby star S2 are shown as lighted circles (S2's outburst of Sgr A* outburst of Fig. 1). S2 has the development comparable to the Sgr A* flare state. In all cases the times are relative to the time listed above each graph. Arrows (if any) mark the administrative spikes discussed in the text. a. Light curve of the 20 August L-band flare. At S2 and Sgr A* cannot be spatially separated in this epoch, we have subtracted 8.5 mJy to account for the contribution of S2. b. Light curve of the 8 May K-band flare. The gap in the data between $\nu = 22$ and 37 mHz was due to the observations during that time. c. Power spectra of the flares in panels d and e and S2, normalized by their high-frequency noise. d. K-band light curve on 16 June 2003. Between $\nu = 27$ and 40 mHz, the AO system was reconfiguring. Because of our choice of the S2 flux for the AO system, the signal-to-noise ratio of the flare is not as good as in the 16 June flare. For better presentation, the flux densities of S2 were multiplied by a factor of 2. e. K-band light curve on 16 June 2003. The time structure of this flare may have the tendency to drop periods decrease with time.

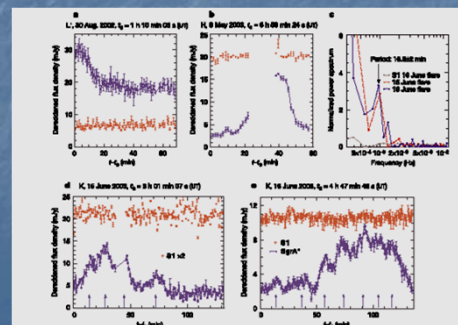
Sgr A* の準周期変動

- X-rayで30分程度の準周期性 (Aschenbach et al. 2004)



- 赤外線で15分程度の準周期性? (Genzel et al. 2003)

周期性が見えるときもあれば
見えないときもある ...



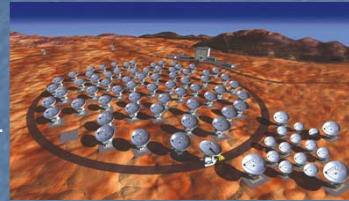
Sgr A*観測の将来展望

- 「黒い穴」の分解
- 降着円盤構造の詳細な研究
- ジェットの発生メカニズム
- 強重力場での一般相対性理論の検証

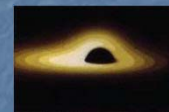
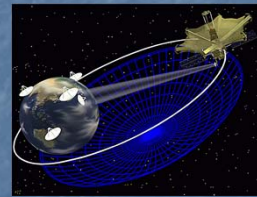
etc.

ASTE以後の将来展望

- 日米欧が国際共同でチリに建設中のALMA も参加？
(Atacama Large Millimeter/Sub-millimeter Array)
感度が桁違いに向上！



- 日本が得意とする電波天文衛星でサブミリ波VLBI？



分解能がさらに向上

「黒い穴」に加えて、BH周囲の細かい構造も見える時代が来る？

まとめ

- BHの存在については、さまざまな観測結果の積み上げから、間違いない
- ただし、その究極の証明(黒い穴)の検出はまだ。
- BH近傍の詳細な観測は今後10年の電波天文学の最重要課題の一つ