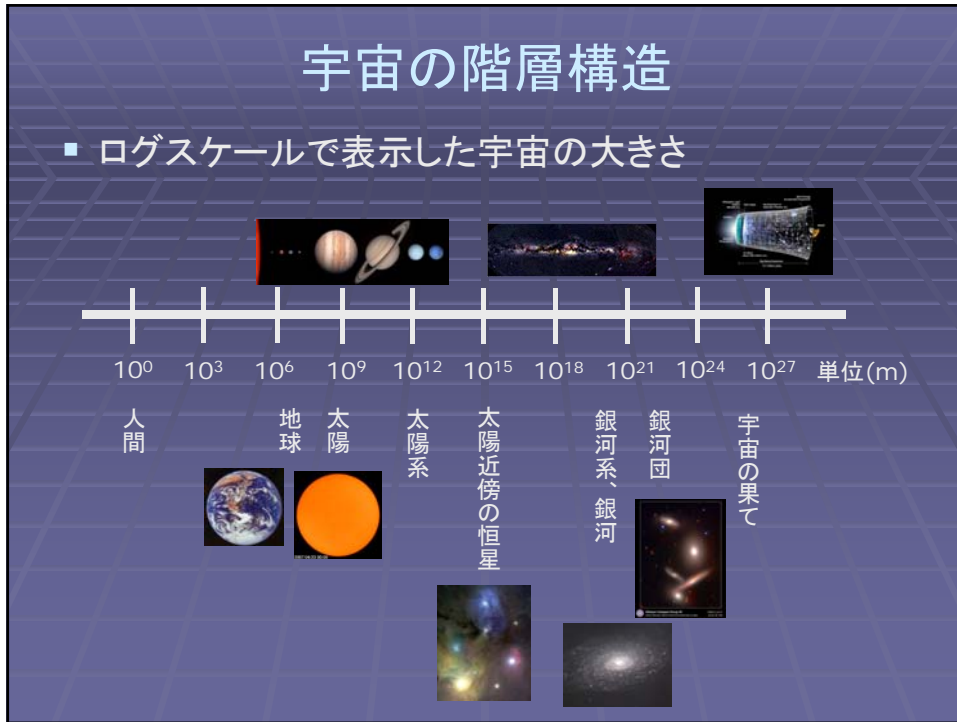


宇宙科学II (電波天文学)  
第11回

ブラックホール(I)

前回の復習



## 銀河とは

- 多数(数億～数千億)の星が重力的に束縛してできた天体
- 様々なタイプの銀河が宇宙には無数にある

M31, M32, M110 (アンドロメダ大銀河と伴銀河)

アンドロメダ銀河M31  
(銀河系の隣の銀河)

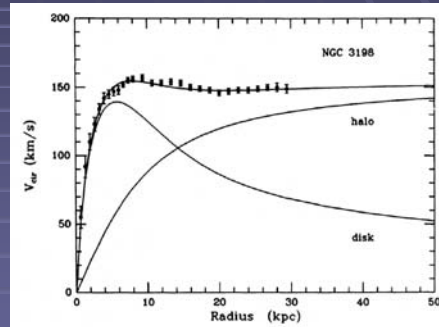
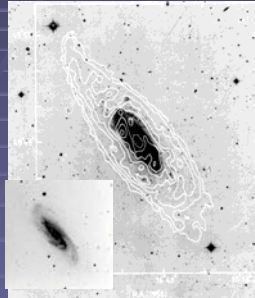
M 87 (NGC 4486)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan  
Copyright © 1999, National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

巨大楕円銀河M87  
(おとめ座銀河団の中心)

## NGC 3198の例

- 平坦な回転曲線を円盤+ダークハローで説明

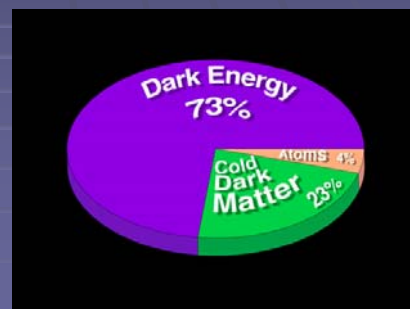


観測を再現する円盤+ハローの組み合わせは一意ではない  
通常は円盤の寄与を最大化させ、残りをハローとする。  
(maximum disk + dark halo)

## ダークマター

- ダークマター(暗黒物質)  
電磁波を(ほとんど)出さず、その重力によって存在が確認される物質
- 宇宙の組成(WMAP衛星による)  
ダークエネルギー 73%  
ダークマター 23%  
通常物質 4%

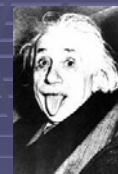
ダークエネルギー、  
ダークマターの正体は  
現代天文学・物理学の  
大きな謎



# ブラックホール入門

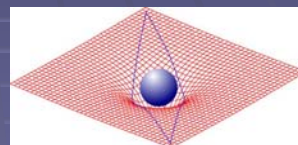
## 相対性理論とブラックホール

- アインシュタインの  
一般相対性理論(1916)年



質量を持った天体の周囲の  
空間がゆがむ

- > 光は直進せず、重力源に  
引っ張られるように運動する



- >> 非常に強い重力を持った天体は光を吸い込む  
= ブラックホール

## ブラックホールの性質

- 強い重力場を持つ天体  
強い重力のために光さえも出てこない  
 > 光を出さない暗黒の天体
- 一度吸い込まれた物質は二度と出てこない
- 物理学的にもブラックホールの中身がどうなっているはわからない(情報が無い、特異点)

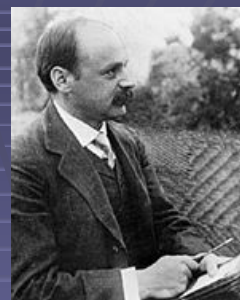


## シュバルツシルト半径

- シュバルツシルト解 (1916)  
アインシュタイン方程式の厳密解  
(球対称解)

シュバルツシルト半径  
(ブラックホールの大きさを表す)  
 $R_g = 2GM / c^2$

この半径より内側に入った光は出てこない。  
 > 事象の地平線とも呼ばれる  
 (星のように表面があるわけではない)



Karl Schwarzschild  
(1873-1916)

第一次大戦従軍中の  
1916年にシュバルツ  
シルト解を発見

## ブラックホールの予言者はだれ？

- Michel (1783), Laplace (1796)  
ニュートン力学的に脱出速度が  
光速度になる天体を考えると




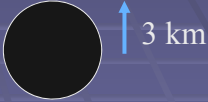
P.L. Laplace  
1740-1827

$$mc^2 / 2 = GmM / r$$

$$r = 2GM / c^2$$

シュバルツシルト半径と同じ答えが(偶然に)得られていた。

## ブラックホールの大きさ

- 地球を押しつぶしてブラックホールにするには  
> 半径 0.5 cm 
- 太陽を押しつぶしてBHにするには  
> 半径 3km 
- ブラックホールの大きさは重さに比例する。

## 星とブラックホールの大きさの比較

1太陽質量の天体の場合（太陽質量= $2 \times 10^{30}$  kg）

■ 太陽	直径 140万 km
	密度 1 グラム/cc
■ 白色矮星	直径 10000 km
	密度 3 トン/cc
■ 中性子星	直径 20 km
	密度 4 億トン/cc
■ ブラックホール	直径 6 km
	密度 150 億トン/cc以上

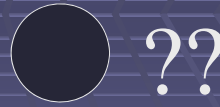
## 宇宙に存在するブラックホール

- Stellar-mass BH : 星と同程度の質量
- Intermediate-Mass BH : 星の100~1000倍の質量
- Super-Massive BH : 星の $10^6 \sim 10^9$ 倍  
銀河の中心核にあるブラックホール

これ以外に宇宙初期に太陽質量よりずっと小さいミニブラックホールができるという説もあるが、見つかってない。

## ブラックホールはどうやって観測する？

- BH自身は光を発しない
  - > BH本体は観測できない
  - > 明るい背景に対しBHの影を見る
- BHの強い重力場は周囲の物質を強く引っ張る
  - > BHに引っ張られた周囲のガスが降着円盤を形成して明るく輝く
- BHと降着円盤の系からジェットが放出されることも多々ある

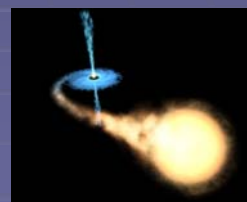
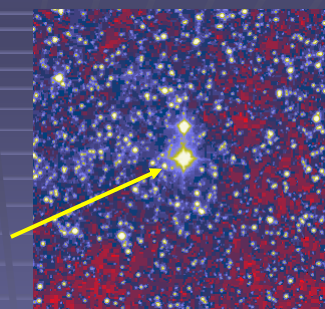


## ブラックホール観測の歴史1: Cyg X-1

- X線天文学の幕開け  
1962年、最初のX線衛星打ち上げ  
(ジャコーニ R.Giacconi ら)
- Cyg X-1 X線で1ms秒程度の強度変動を示す特異な天体 (Oda 1971)

その後、光学同定で青くて重い星(9等星)が発見され、5.6日周期の連星であることがわかった

暗い天体の質量は9太陽質量程度あり、ブラックホールである可能性が高い





## 2002年ノーベル物理学賞

- R. Giacconi
  - X線天文学の創始者
- R. Davis
  - ニュートリノ天文学
- M. Koshiba
  - ニュートリノ天文学



**The Nobel Prize in Physics 2002**

"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

"for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"

		
<b>Raymond Davis Jr.</b>	<b>Masatoshi Koshiba</b>	<b>Riccardo Giacconi</b>
1/4 of the prize	1/4 of the prize	1/2 of the prize
USA	Japan	USA
University of Pennsylvania Philadelphia, PA, USA b. 1914	University of Tokyo Tokyo, Japan b. 1926	Associated Universities Inc. Washington, DC, USA b. 1931 (in Genoa, Italy)

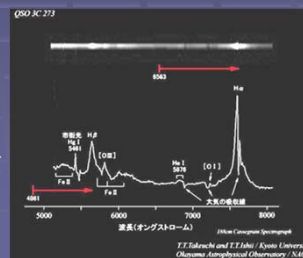
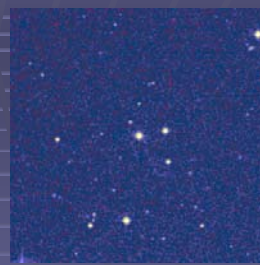
## ブラックホール観測の歴史2: ケーサー

- ケーサー（準恒星状天体）  
超遠方にある銀河中心核で、非常に明るく輝いている

最初は電波で明るい特異な天体として認識された

1963年、電波源3C273が13等の天体に光学同定される

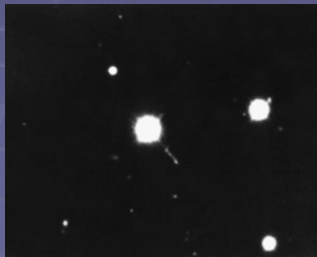
特異なスペクトルから銀河系内の星ではなく、遠方の天体であることが判明（距離約25億光年）



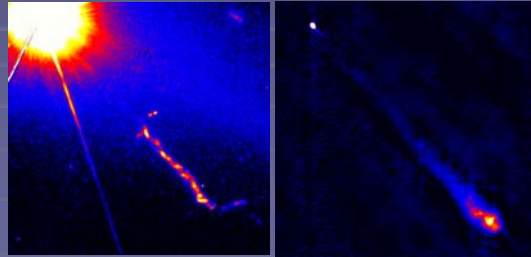
## クェーサーの発見

- 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

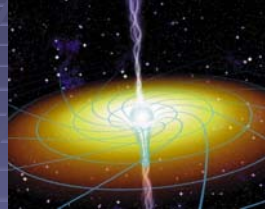


## クェーサーの光度

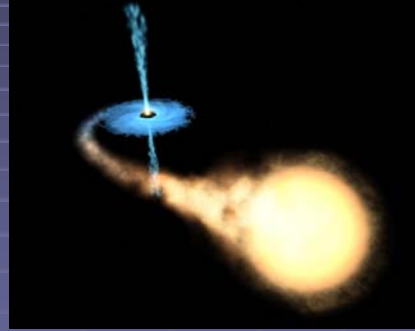
- 明るいクェーサーは  $10^{12} L_{\text{sun}}$
  - 大きな銀河1個に相当する明るさを極めて狭い領域から出す。
  - 星の集団ならば星同士がぶつかってすぐに合体してしまうので、安定ではられないはず
- ブラックホール? (後で詳しく)

## 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

## ブラックホールの エネルギー

## ブラックホールのエネルギー源(1)

- ブラックホールに落ち込む物質は、その過程で莫大な重力ポテンシャルエネルギーを解放可能
- ニュートン力学では、重力源の周囲を円運動する物質のエネルギーは

$$E = \frac{1}{2} mv^2 - GMm / r$$

$$v^2 = GM / r$$

よって、

$$E = -GMm / 2r$$

## ブラックホールのエネルギー源(2)

- 無限遠で初速0(すなわち $E=0$ )の物質をブラックホールに落としたとき、BHの表面すれすれで円運動をする物質のエネルギーは

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

- すなわち、BHにガスが落ちこむとき、静止質量の25%に相当する莫大なエネルギーが解放される
- この計算は相対論を無視したニュートン力学的な扱いなので、厳密ではない。詳しい計算によるとBHに落ち込む物質は静止質量の10%程度を解放可能とされている

## 核反応との比較

- 恒星のエネルギー源である核融合反応のエネルギー解放率は

$$\varepsilon = 4 m_{\text{H}} - m_{\text{He}} / m_{\text{He}} \sim 0.7 \%$$

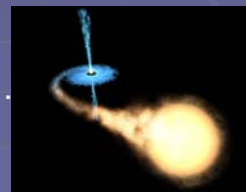
- BHの場合、先の議論より

$$\varepsilon \sim 10 \%$$

すなわち、エネルギー解放効率が一桁以上大きい  
(かつ、燃料の種類や反応温度などの条件も一切ない)

## ブラックホール発電所？

- 宇宙で最もクリーンな発電所はBH発電？
- BHに物質を落とし込んで、その物質が解放するエネルギーを受けて発電する
- 物質は何でも良い(家庭ごみとか放射性物質とか...。エネルギー問題と環境問題を一気に解決！)
- 建設方法および安全性の確立が課題...



## クェーサーの光度

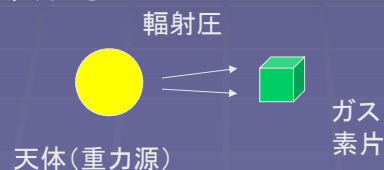
- BHに単位時間あたりに落ち込むガスの量は質量降着率と呼ばれる( $dM/dt$ )
- 質量降着率にエネルギー解放効率をかけると、BHから単位時間に出るエネルギー(光度)が得られる

$$L = \epsilon \times dM/dt \times c^2$$

- $dM/dt \sim 0.7 M_{\text{sun}} / \text{yr}$  のとき、 $L \sim 10^{12} L_{\text{sun}}$  すなわち、太陽質量程度のガスをBHに落としこむと、クェーサーの莫大なエネルギーは説明可能。

## エディントン光度

- 天体が放射可能な光度の上限
- 天体が明るくなると輻射圧が強くなり、周囲のガスを吹き飛ばしてしまう。
- 輻射圧と引力の釣り合いから、限界光度(エディントン光度)が決まる



## 輻射圧

- 光子のエネルギー $e$ と運動量 $p$ の関係  

$$p = e / c$$
- 光度 $L$ の天体の輻射圧  

$$P = L / (4\pi r^2 c)$$
- 粒子の断面積 $\sigma$ 、数密度  $n$ のガス素片(体積  $dV$ )にかかる輻射圧  

$$f_{\text{rad}} = P \sigma n dV$$

## 重力との比較

- 数密度  $n$ 、粒子質量 $m$ のガス素片(体積  $dV$ )にかかる重力  

$$f_{\text{grav}} = (GM/r^2) \times m n dV$$
- 輻射による力と重力のつりあり( $f_{\text{rad}} = f_{\text{grav}}$ )より、  

$$L_{\text{max}} = 4\pi c G M m / \sigma$$

この光度はエディントン光度と呼ばれる

## 具体的な値

- 恒星や銀河中心核のように温度の高い天体の場合、ガスはプラズマ化しており、 $\sigma$ は電子のトムソン散乱断面積、 $m$ は水素質量になる。

$$\sigma = 6.7 \times 10^{-29} \text{ m}^2$$

- これを用いると

$$L_{\text{max}} = 3 \times 10^4 (M/M_{\text{sun}}) L_{\text{sun}}$$

となる。

## クェーサーのBH質量

- クェーサーがエディントン光度以上で輝けないとすると、ブラックホールの質量の下限値を見積もることが可能。

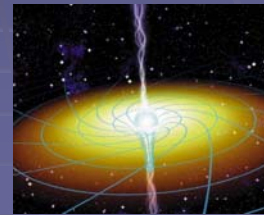
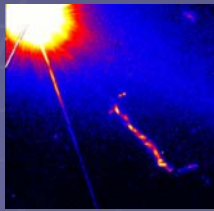
- $L = 10^{12} L_{\text{sun}}$  のクェーサーの場合、  
 $M_{\text{min}} \sim 3 \times 10^7 M_{\text{sun}}$

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 : 活動銀河中心核

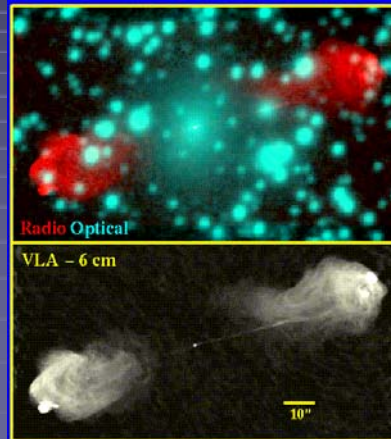
- AGN (Active Galactic Nuclei)  
= 活動銀河中心核  
銀河中心のブラックホールのうち活動的に明るく輝いているものの総称



## ブラックホールの観測

## ブラックホール関連現象のスケール

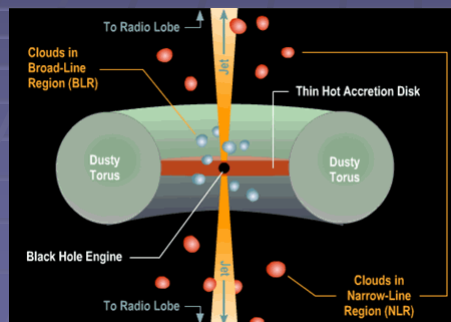
- ブラックホールは極めてコンパクト  
 $10^9 M_{\text{sun}}$ のBHでも  
 $r_g = 3 \times 10^9 \text{ km}$   
 (~20 AU)
- 一方、BHから出る電波  
 ジェットは銀河よりも大き  
 な広がりを持つこともある。  
 (電波銀河)



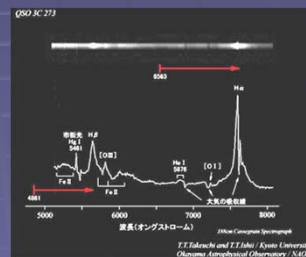
電波銀河 Cyg-A

## BHとその周辺の概観

- ブラックホール本体の周囲に降着円盤がある
- その周囲はトーラス、broad line region, narrow line regionなどが存在
- BHジェットから放出されるジェットも



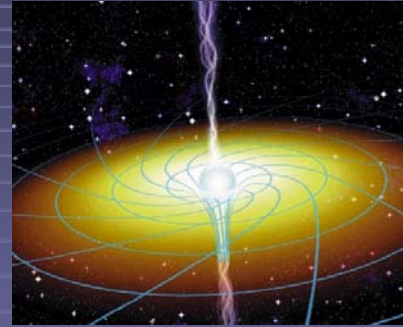
AGNのモデル図



AGNの光学スペクトル例

## ブラックホール周辺の構造

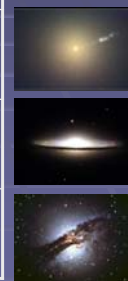
- ブラックホール本体  
「黒い穴」?
- 降着円盤  
BHへ回転しながら落ち込む  
ガス円盤
- ジェット  
BHから双極的に出る質量放出現象



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	$4 \times 10^6$	8 kpc	$10 \mu\text{as}$
M87	$3/6 \times 10^9$	15 Mpc	$4/7 \mu\text{as}$
M104	$1 \times 10^9$	10 Mpc	$2 \mu\text{as}$
Cen A	$5 \times 10^7$	4 Mpc	$0.25 \mu\text{as}$



BH近傍を分解するには1 ~ 10 $\mu$ 秒角レベルの分解能が必要

## BHの観測

- BHの周辺領域  
 ジェットの存在 → 活動的な天体(BH?)の存在がわかる  
 ガスや恒星の運動 → 速度からBH天体の重さがわかる
- BH近傍:ブラックホールに関連する様々な現象が研究対象  
 ジェット(の根元)  
 降着円盤  
 BH本体

いずれも、高い空間分解能が必要

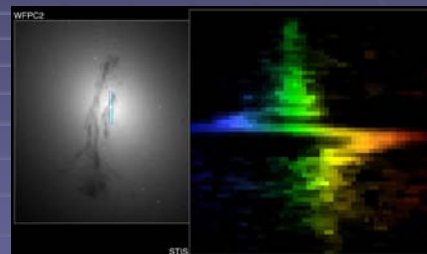
## M84中心部のブラックホール

- M84 おとめ座銀河団  
 中の楕円銀河



おとめ座銀河団とM84

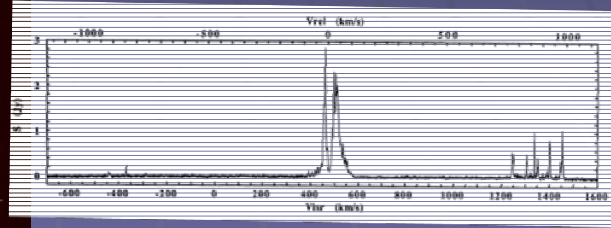
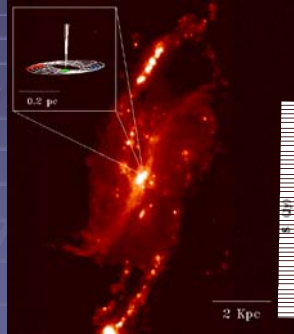
ハッブル望遠鏡でみた  
 中心部の速度分散



中心部で大きな速度分散.

## NGC4258のブラックホール (1)

- 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

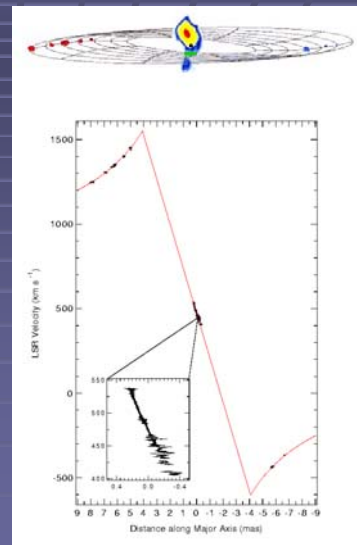
中心部の水メーザーのスペクトル

## NGC4258のブラックホール (2)

- 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

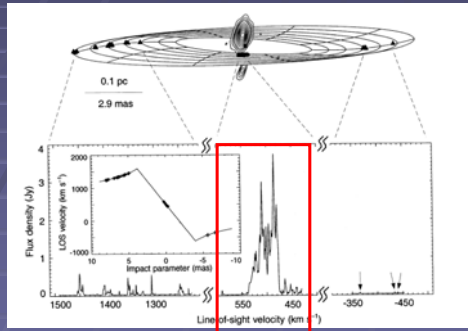
その大きさと回転速度が  
ブラックホールの質量が  
3600万太陽質量と分かった

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)

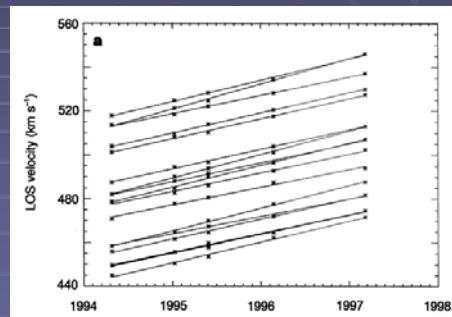


## NGC4258のブラックホール (3)

### 円盤モデル



### 視線速度の加速

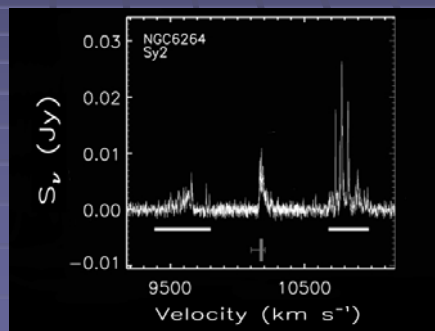
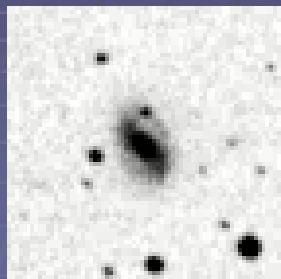


加速を示す成分  
Herrnstain et al. (1999)

速度および加速度から、天体の距離(D=7.2 Mpc)も精密に求まる。

## AGN Maser Cosmology

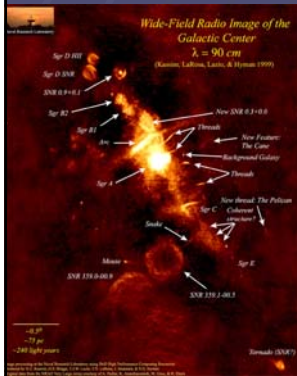
- AGNメガメーザ円盤は遠方銀河の距離を超精密に測れる唯一の手段 ( $v=r\omega$ ,  $a=r\omega^2$ ,  $\theta= r/D$ )
- GBT100m + VLBAによる多数のAGN観測により、ハッブル定数の超精密決定を目指すプロジェクトが米国で進行中



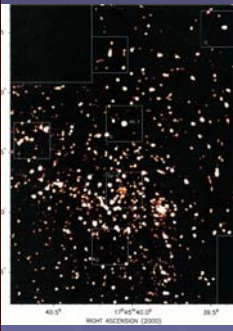
NGC6264の写真とスペクトルの例

## Sgr A\*周囲の星の運動

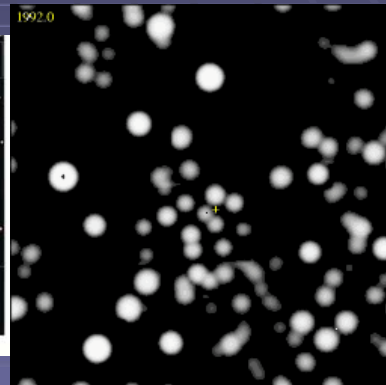
- 1990年代に入り、赤外線観測や補償光学の技術が格段に進歩 > 銀河系中心周囲の星を観測できるようになった。



電波で見た銀河系中心



赤外線で見えた銀河系中心



Sgr A\*の周囲の星の動き

## 近傍銀河中心のブラックホール

- 中心にブラックホールが見つかったもの
- 中心にブラックホールが見つからなかったもの



M31

ほか多数

M87



M33: 3000太陽質量以上のBHはない

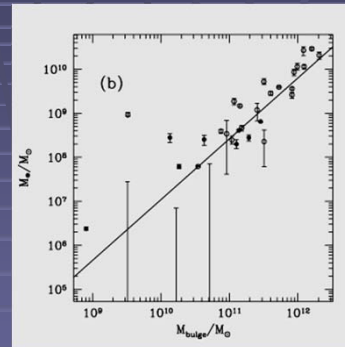
バルジの重さと関連？

## BHと銀河の共進化

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

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

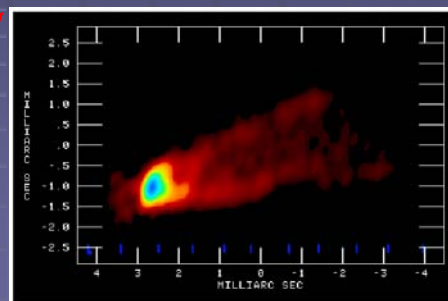
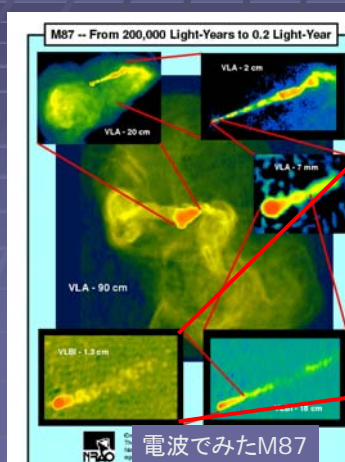
ブラックホールの形成、進化に母銀河が関連していることを示唆  
 しかし、この関係の背景の理解はまだ (原因 or 結果?)



Magorrian+ 1998

## M87の電波ジェット

- M87: おとめ座銀河団中の巨大楕円銀河



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



## 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

