

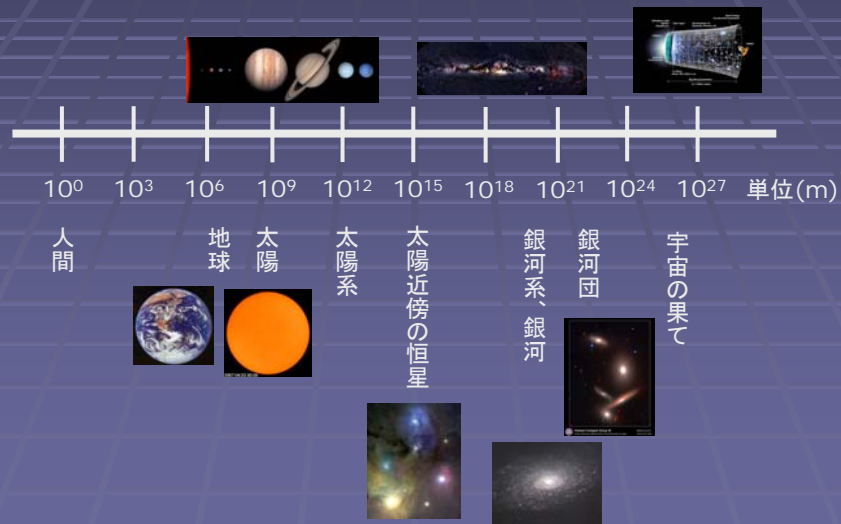
宇宙科学II（電波天文学）
第9回

ブラックホール(1)

前回の復習

宇宙の階層構造

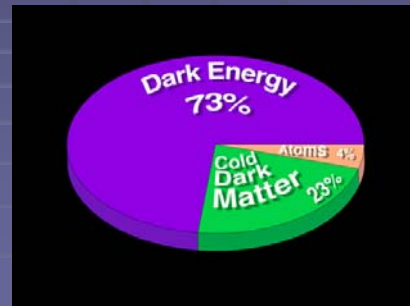
■ ログスケールで表示した宇宙の大きさ



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%

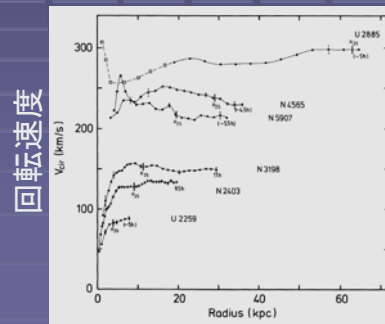
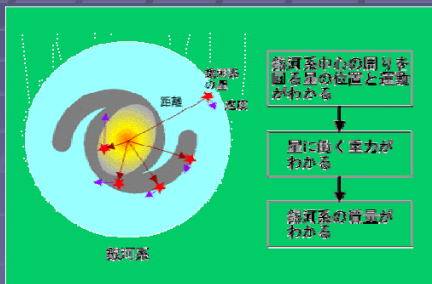
ダークエネルギー、
ダークマターの正体は
現代天文学・物理学の
大きな謎



銀河回転と銀河の質量

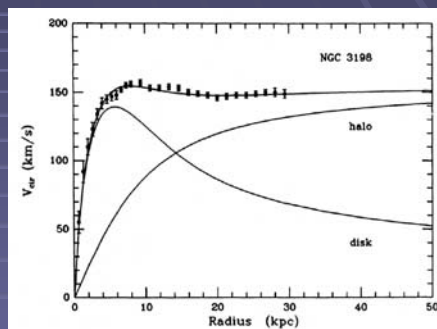
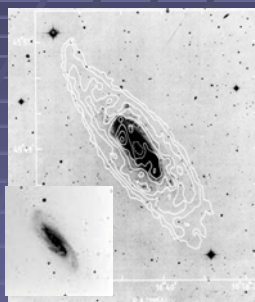
- 円盤銀河の場所ごとの回転速度を銀河中心距離の関数として表したもの
- 渦巻き銀河の質量を測る際に用いられる

$$V^2 = GM/R$$



NGC 3198の例

- 平坦な回転曲線を円盤+ダークハローで説明

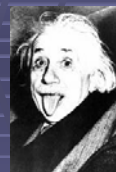


観測を再現する円盤+ハローの組み合わせは一意ではない
通常は円盤の寄与を最大化させ、残りをハローとする。
(maximum disk + dark halo)

ブラックホール入門

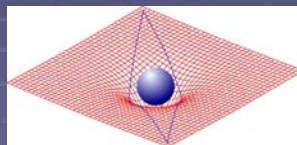
相対性理論とブラックホール

- 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

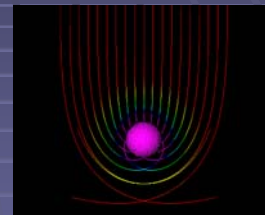
ブラックホールの性質

- 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(特に中心は特異点)

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解(球対称)

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



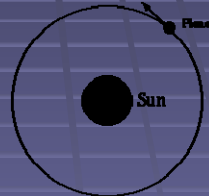
この半径より内側に入った光は出てこない。
➢ 事象の地平線とも呼ばれる
(星のように表面があるわけではない)

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
星の引力と光速で運動
する天体のつりあいを解く

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

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



太陽と惑星の公転

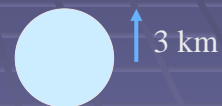


P.L. Laplace
1740-1827

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 = 2×10^{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
 - > 明るいもの背景を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

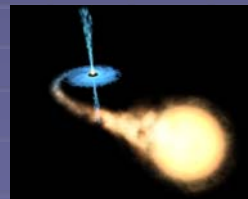
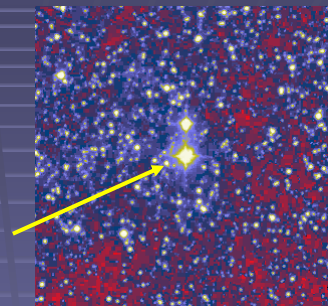


ブラックホール観測の歴史1: Cyg X-1

- 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

 **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"

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

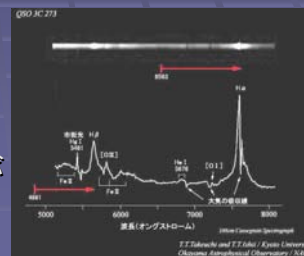
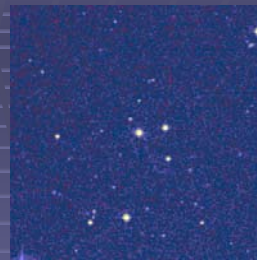
ブラックホール観測の歴史2: ケーサー

- 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）



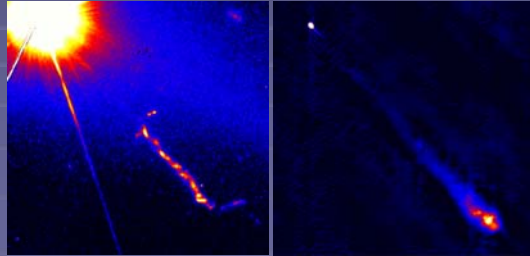
クェーサーの発見

- 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



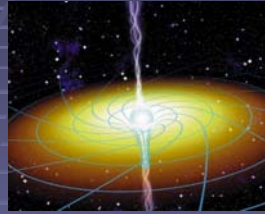
クェーサーの光度

- 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、安定ではいられないはず

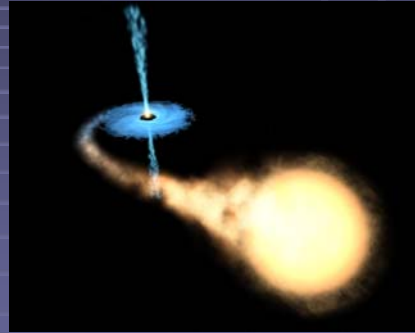
→ ブラックホール? (後で詳しく)

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

ブラックホールから解放される
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

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

- 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

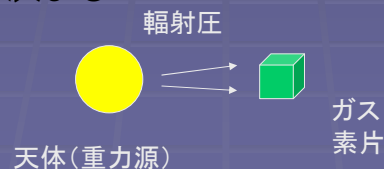
- BHに単位時間あたりに落ち込むガスの量は質量降着率と呼ばれる(dM/dt)
- 質量降着率にエネルギー解放効率をかけると、BHから単位時間に出るエネルギー(光度)が得られる

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

- $dM/dt \sim 0.7 M_{\text{sun}} / \text{yr}$ 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 σ 、重さ m 、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

- 重さ m 、数密度 n のガス素片(体積 dV)にかかる重力
$$f_{\text{grav}} = (GM/r^2) \times n m dV$$
- 輻射による力と重力のつりあり($f_{\text{rad}}=f_{\text{grav}}$)より、
$$L_{\text{max}} = 4 \pi c G M m / \sigma$$

これが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、 σ 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

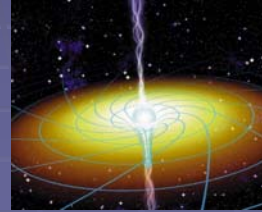
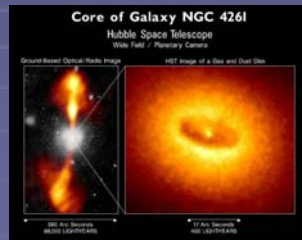
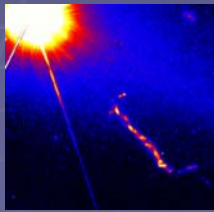
- クェーサーがエディントン光度以上で輝けないとすると、ブラックホールの質量の下限値を見積もることが可能。

- $L=10^{12} L_{\text{sun}}$ 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

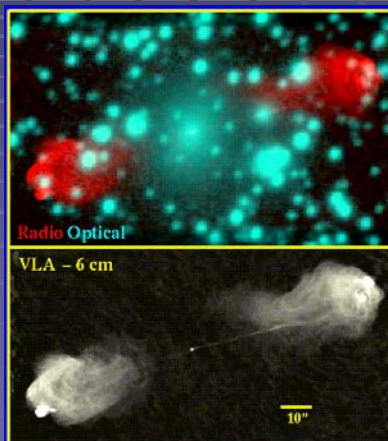
- AGN (Active Galactic Nuclei)
= 活動銀河中心核
銀河中心のブラックホールのうち活動的に明るく輝いているものの総称



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

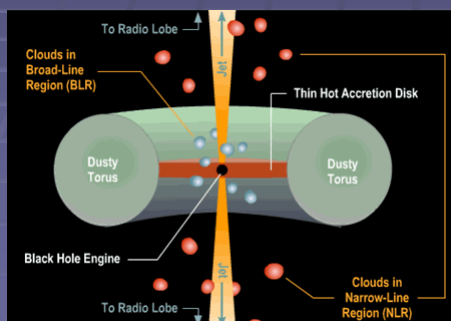
- ブラックホールは極めてコンパクト
 $10^9 M_{\text{sun}}$ のBHでも
 $r_g = 3 \times 10^9 \text{ km}$
($\sim 20 \text{ AU}$)
- 一方、BHから出る電波
ジェットは銀河よりも大き
な広がりを持つこともある。
(電波銀河)



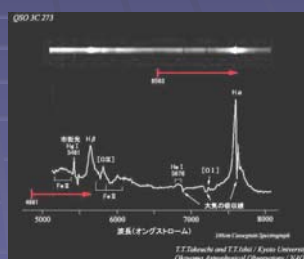
電波銀河 Cyg-A

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	$10 \mu \text{ as}$
M87	3×10^9	15 Mpc	$4 \mu \text{ as}$
M104	1×10^9	10 Mpc	$2 \mu \text{ as}$
Cen A	5×10^7	4 Mpc	$0.25 \mu \text{ as}$



BH近傍を分解するには $1 \sim 10 \mu$ 秒角レベルの分解能が必要

BHの観測

- BHの周辺領域
ジェットが存在 → 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

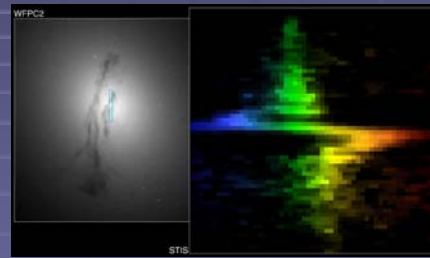
M84中心部のブラックホール

- M84 おとめ座銀河団
中の楕円銀河



おとめ座銀河団とM84

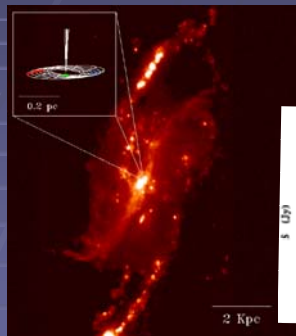
ハッブル望遠鏡でみた
中心部の速度分散



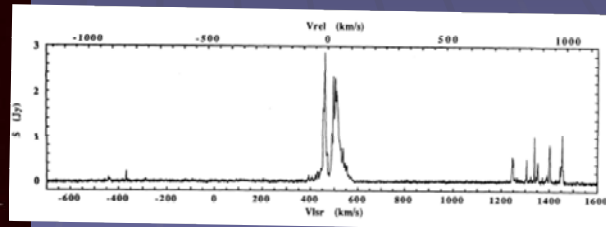
中心部で大きな速度分散.

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



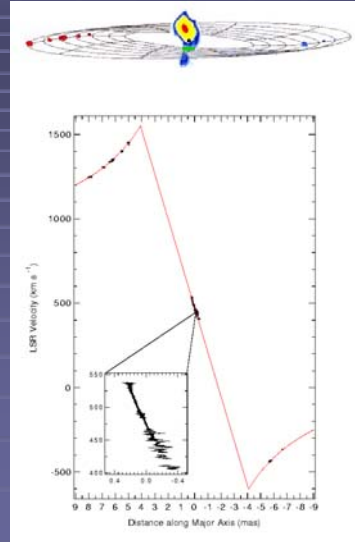
中心部の水メーザーのスペクトル

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

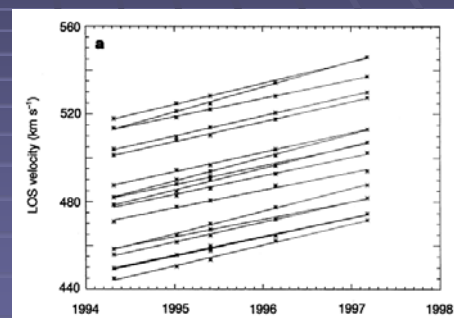
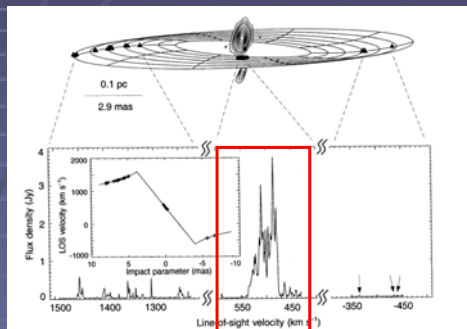
もっとも確からしいブラック
ホールの証拠
(日米共同研究、1995年)



NGC4258のブラックホール (3)

円盤モデル

視線速度の加速

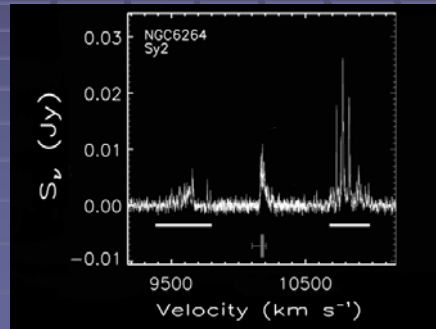
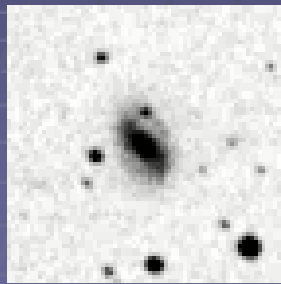


加速を示す
成分

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

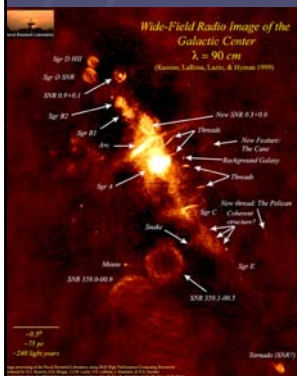
- AGNメガメーザー円盤は遠方銀河の距離を超高精度に測れる唯一の手段 ($v=r\omega$, $a=r\omega^2$, $\theta = r/D$)
- GBT100m + VLBAによる多数のAGN観測により、ハッブル定数の超高精度決定を目指すプロジェクトが米国で進行中



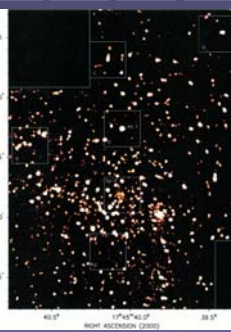
NGC6264の写真とスペクトルの例

Sgr A*周囲の星の運動

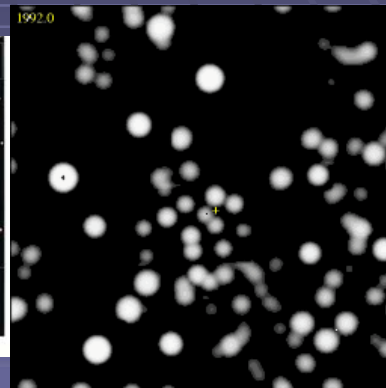
- 1990年台に入り、赤外線観測や補償光学の技術が格段に進歩 > 銀河系中心周囲の星を観測できるようになった。



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



M31

ほか多数

M87



- 中心にブラックホールが見つからなかったもの



M33: 3000太陽質量以上のBHはない

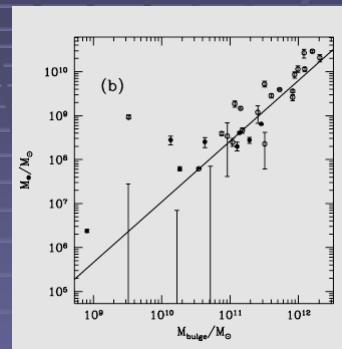
バルジの重さと関連？

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)

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

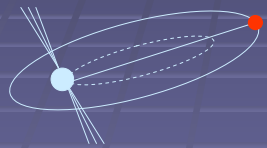
ブラックホールの形成、進化に母銀河が関連していることを示唆
しかし、この関係の背景の理解はまだ (原因 or 結果?)



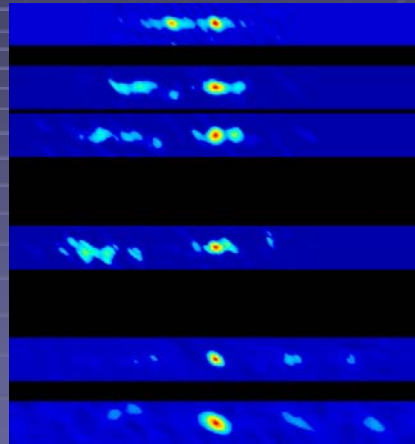
Magorrian+ 1998

マイクロクエーサー

AGNのミニチュア版
 銀河系内の連星系
 star + compact objects
 (WD, NS, BH ?)



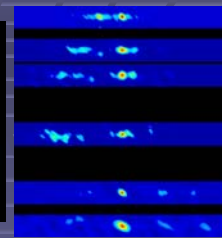
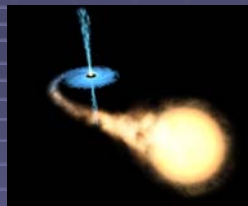
距離と軌道決定
 → 質量, エネルギー
 天体の正体



GRO 1655-40 with VLBA

GRO1655-40と超新星爆発

- GRO1655-40
 6太陽質量程度のブラックホールを含む連星



伴星のスペクトルには超新星爆発で形成される重元素が大量に含まれていた。

超新星爆発によるBH形成を支持

