

活動銀河核 AGN

Active Galactic Nuclei

(この資料は未完成)

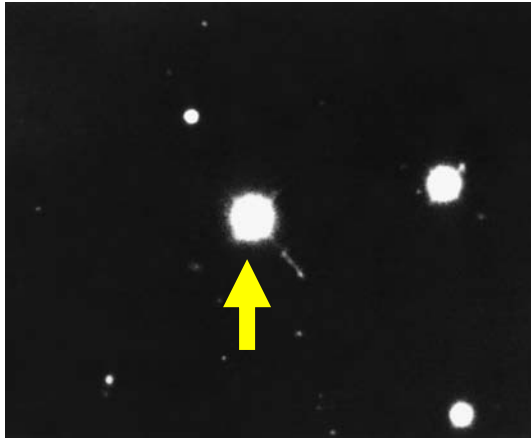
活動銀河核の発見

- ケンブリッジ・カタログ(3C)
 - 1960年代の代表的な電波天体のカタログ
 - 328天体
 - 赤緯 -5 度以北、周波数178 MHzで9Jy以上
 - 様々な種類の天体
 - 超新星残骸、星形成領域、電波銀河、未同定天体...
 - 電波銀河の例:
 - 3C274 = Vir A (M87)・・・おとめ座銀河団中心の大型楕円銀河
 - 3C405 = Cyg A・・・白鳥座の銀河、可視光では18等級と暗い
- 3C273、3C48(クエーサー)
 - 見かけは青い星だが、スペクトルは異常で輝線が同定できない
 - これらは極めて大きな赤方偏移を持つ銀河の中心核(1963年)
 - $3C273=0.158$
 - $3C48=0.37$
 - 同定できなかった輝線は、実は大きく赤方偏移した水素のバルマー系列輝線だった
 - その後の観測で $z=2.012$ などの天体も見つかった
 - これらの赤方偏移は、当時の感覚としては宇宙の果てに近い

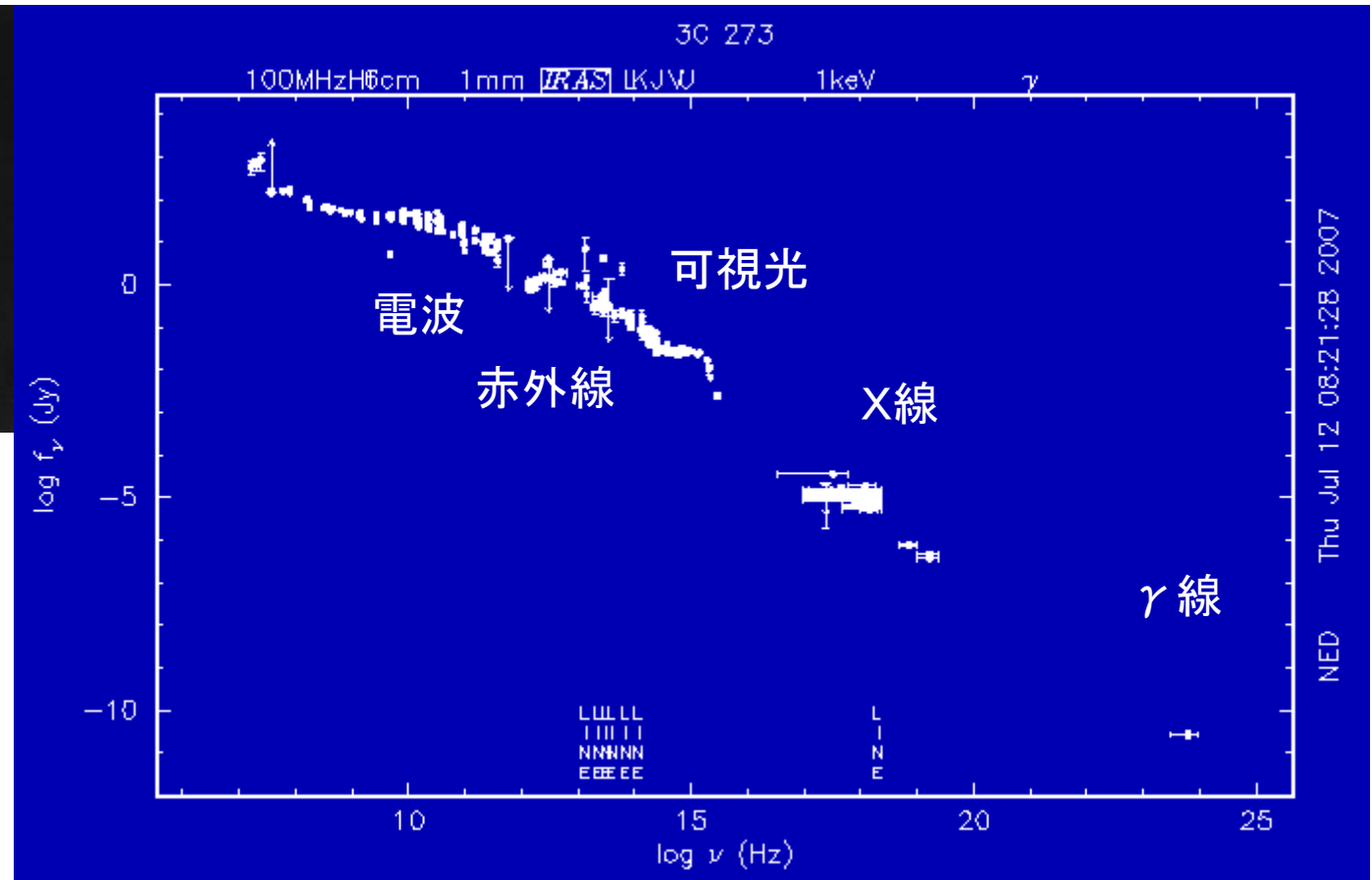
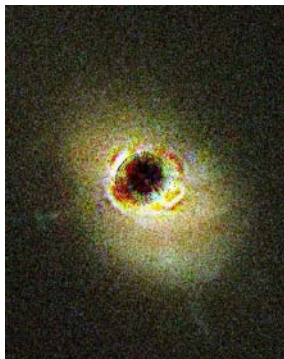


天体の素性の研究、宇宙論的な応用の研究

クエーサー 3C273




隣の星と同程度の明るさの恒星状に見えるが、
実態は赤方偏移
 $z=0.158$ の距離の銀河
の中心核



電波から γ 線まで積分した総放射量(光度)
は $10^{38} \text{ W} \sim 10^{12} L_o$ に達する

活動銀河核 AGN

Active Galactic Nuclei

- 様々な種類・分類
 - － クエーサー (Quasar、例: 3C273)
 - 10^{12} L_oに達する大光度
 - クエーサーのうち1／10程度の割合で、強い電波放射するもの
 - － 電波銀河 (例: Vir A)
 - 通常銀河とは全く異なる強力な電波放射
 - － セイファート銀河 (例: 3C84)
 - 中心部に幅の広い (高速な運動をする) 電離ガス
 - － 通常銀河にも中心部の活動性がしばしば見られる
 - 我々の銀河系の中心にも強い電波の活動性 (Sgr A*) が見られる
- 活動銀河核の本質
 - － 銀河中心の巨大質量 (10^{6-9} Mo) ブラックホール
 - － 降着円盤
 - － ガスの落下によるポテンシャルの解放 

強い放射 (電波～
γ線)
強度変動、偏光、
ジェット...

ブラックホールの根拠

中心核の質量：エディントン限界

- 重力と放射圧のバランス
 - 電離した水素ガス：陽子と電子
 - 重力は陽子に、放射圧は電子に作用
- 重力
 - 主に陽子に作用し、天体のほうへ引き込む
 - 中心天体の質量 M 、半径 r の位置にある陽子 m_p

$$f_g = \frac{GMm_p}{r^2}$$

- 放射圧
 - 主に電子に作用し、天体から遠ざけようとする
 - 中心天体の光度 L
 - σ_T ：トムソン散乱断面積

$$f_p = \frac{L}{4\pi r^2} \frac{\sigma_T}{c}$$

- 重力と放射圧がつりあう光度 L_{Edd}

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMcm_p}{\sigma_T}$$



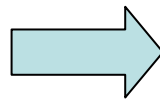
光度から質量の下限值を得る

L_{Edd} より光度が大きくなると、天体自身・周囲のガスを吹き飛ばす。
エディントン光度は質量 M の天体が放射する光度の上限値

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMcm_p}{\sigma_T} = 3 \times 10^4 L_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)$$

- 天体の光度を測定すれば、質量の下限值がわかる
 - 活動性の高い銀河中心核＝クエーサー

$$L = 10^{12} L_{\odot}$$

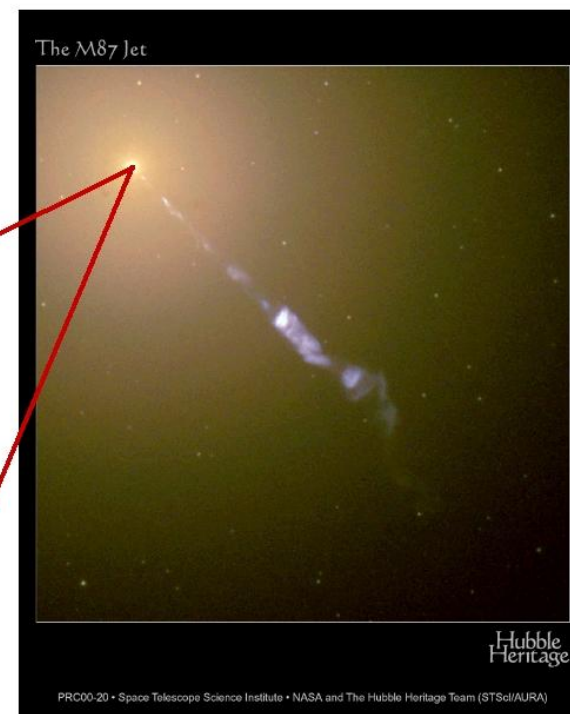
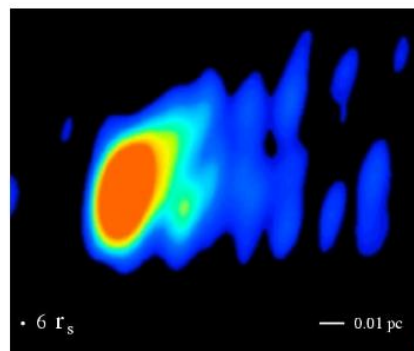


$$\text{中心質量 } M > 3 \times 10^7 M_{\odot}$$

ブラックホールの根拠

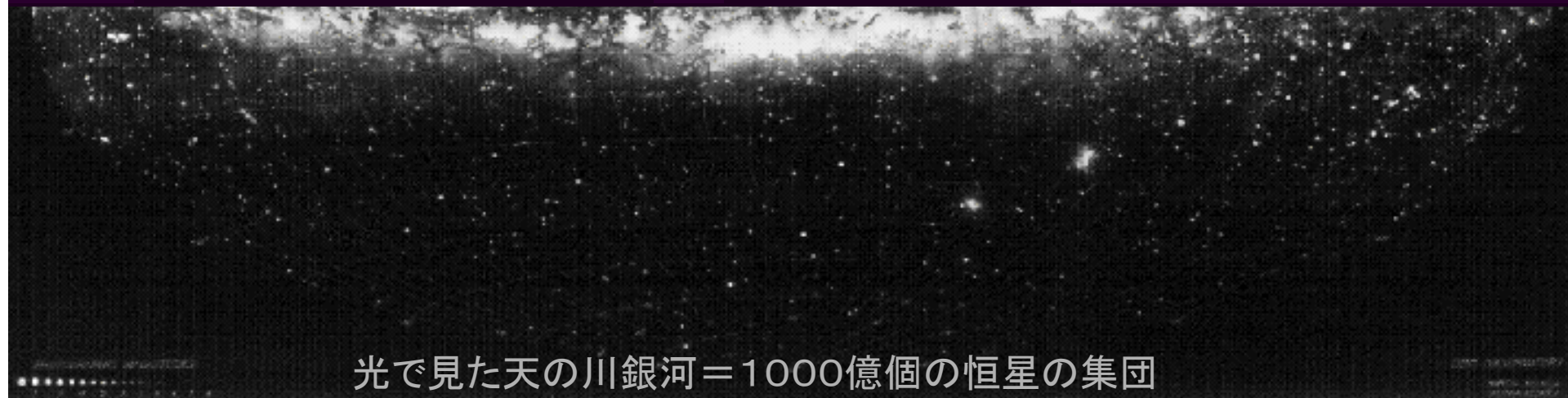
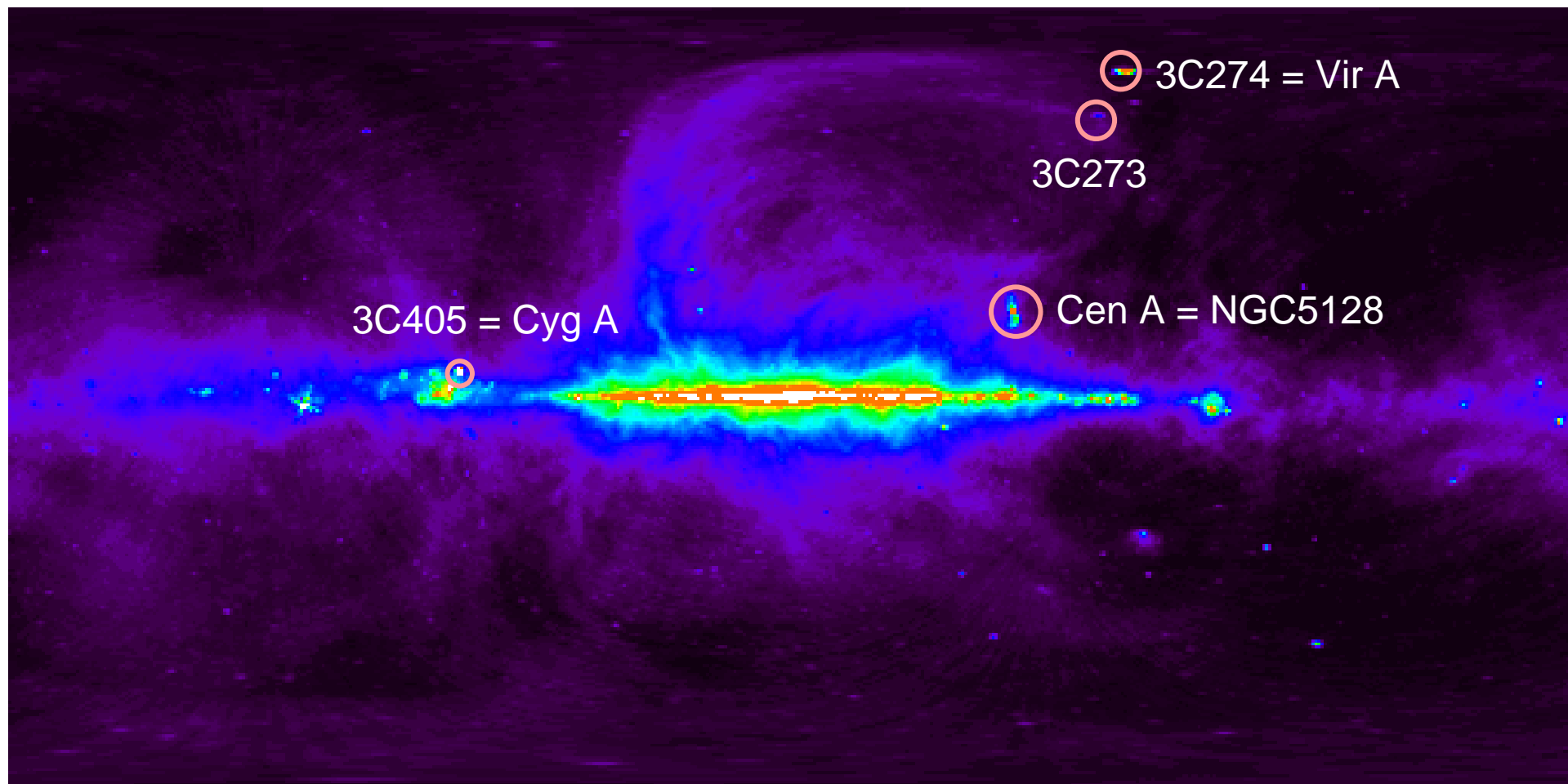
中心核のサイズ: VLBI観測

- VLBI
 - 超長基線干渉計
 - 1ミリ秒角の角度分解能
- 観測の結果
 - 銀河中心核は1ミリ秒角 (5×10^{-9} rad) より小さい
 - 天体までの距離
 - 典型値 = 1 Gpc



ハッブル宇宙望遠鏡によるVir Aの可視光画像
VLBI観測によるVir Aの中心核(左)

$$\text{天体の実サイズ } D < 1 \text{ Gpc} \times 5 \times 10^{-9} = 5 \text{ pc}$$



光で見た天の川銀河＝1000億個の恒星の集団

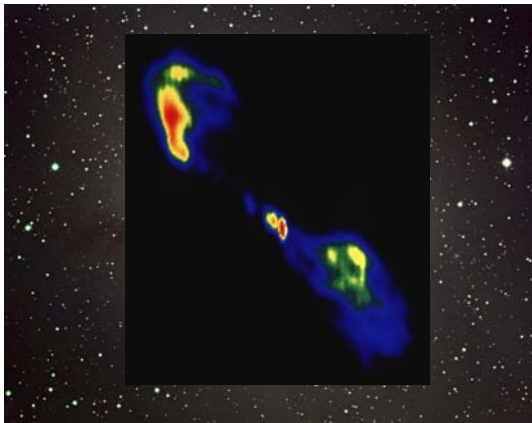
ほとんど全ての電波源は活動銀河核(=銀河のブラックホール)

電波で見た空

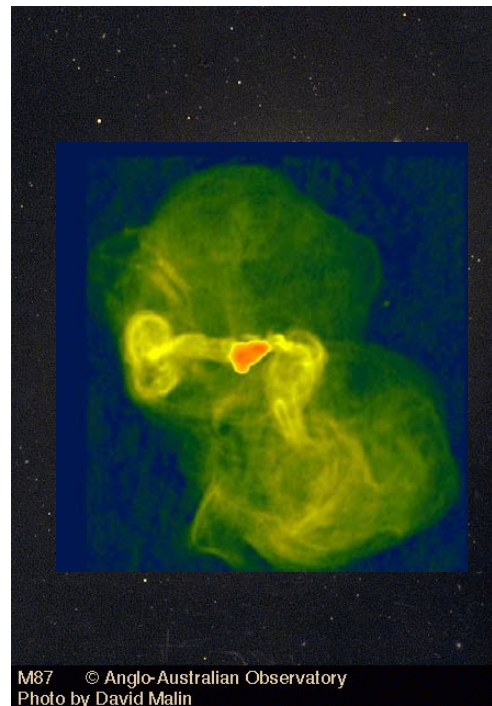


Image courtesy of NRAO/AUI

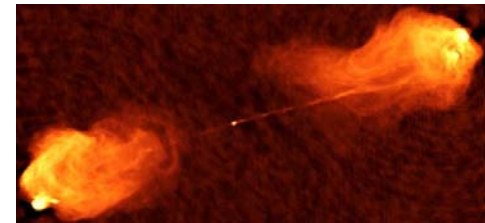
電波銀河



Cen A



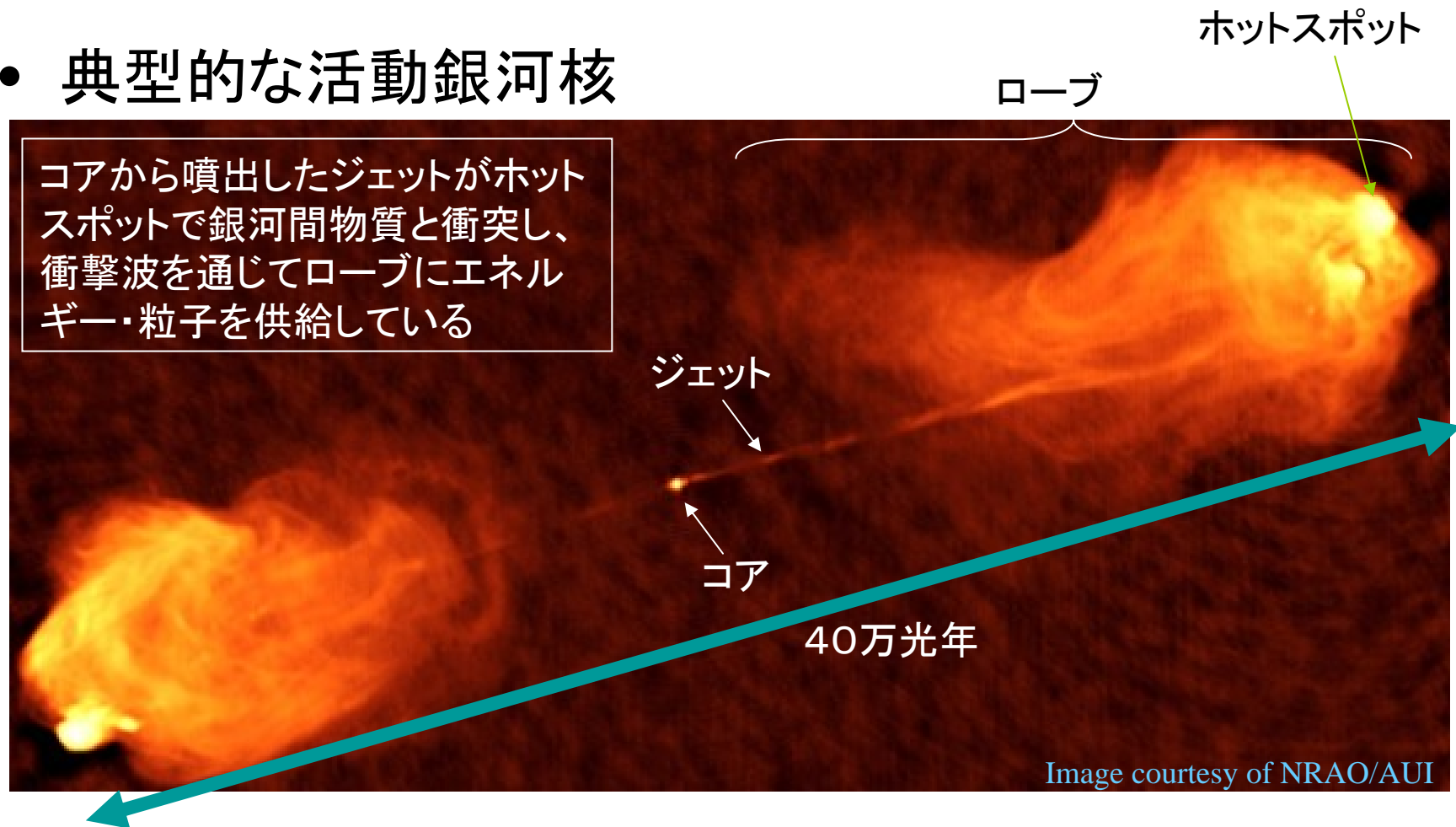
Vir A



Cyg A

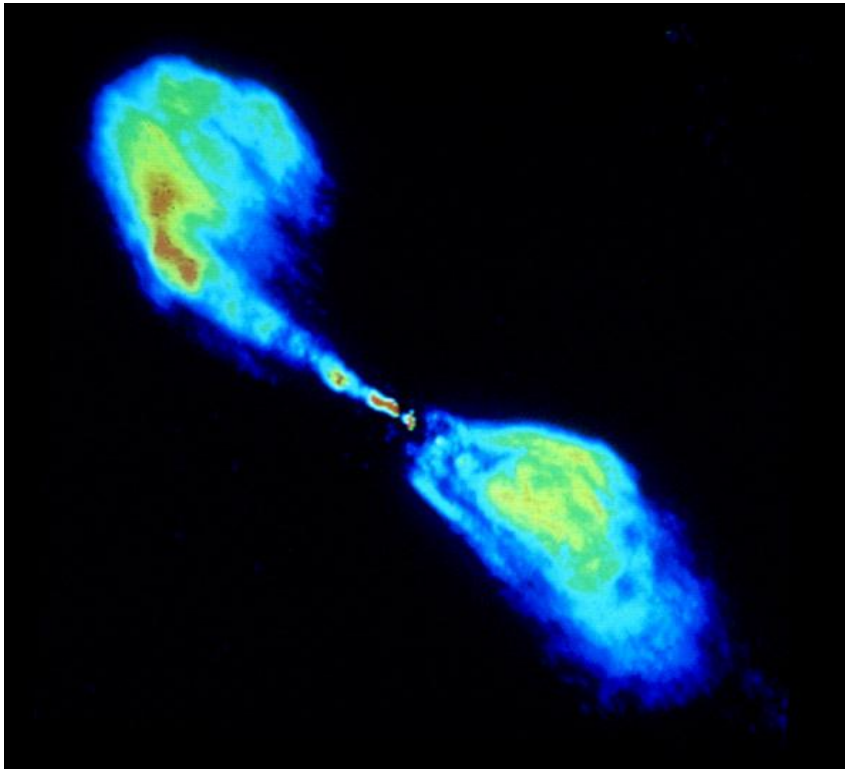
Cyg A

- 典型的な活動銀河核

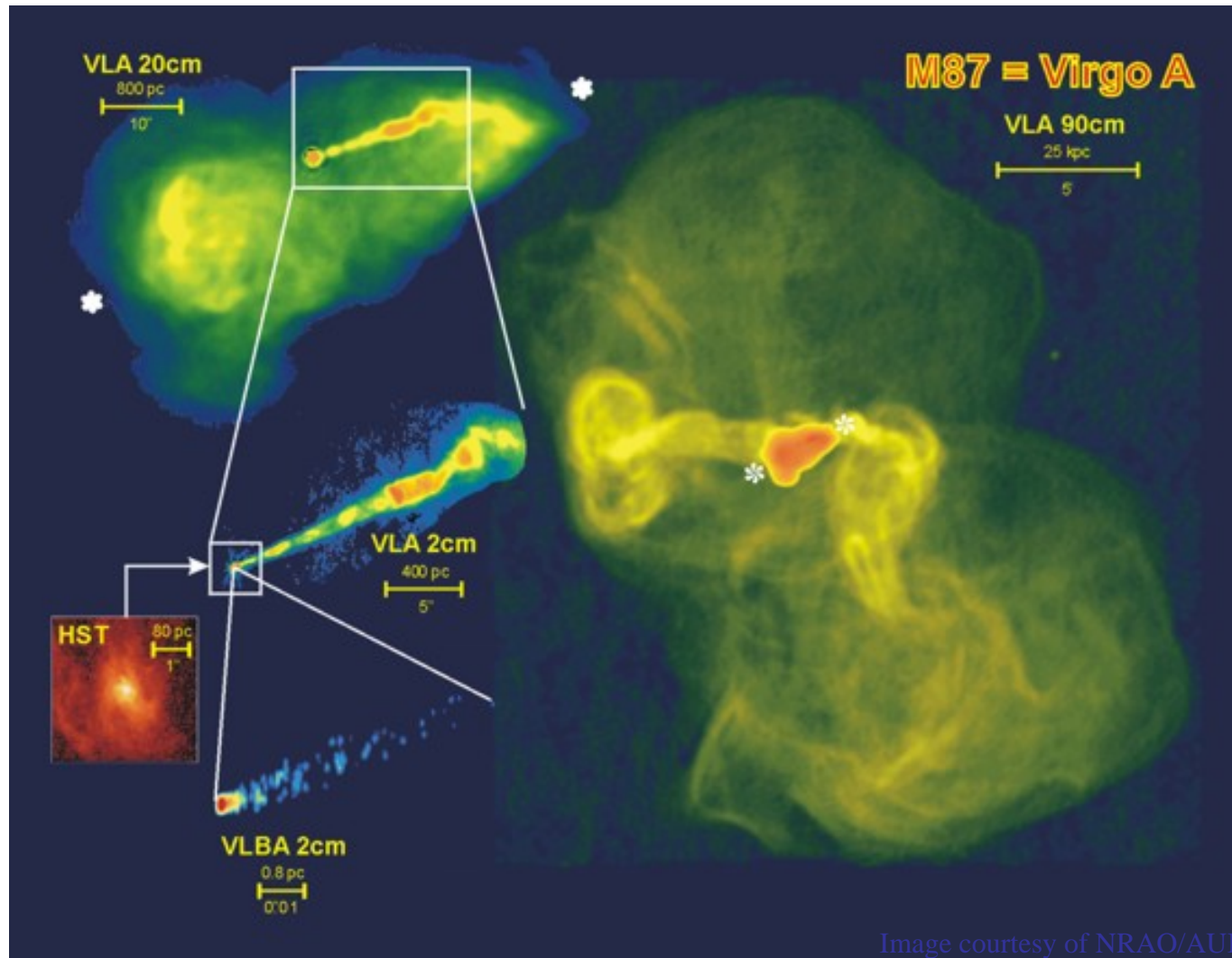


電波ではローブが明るく観測される。高エネルギー粒子＋磁場によるシンクロトン放射

Cen A



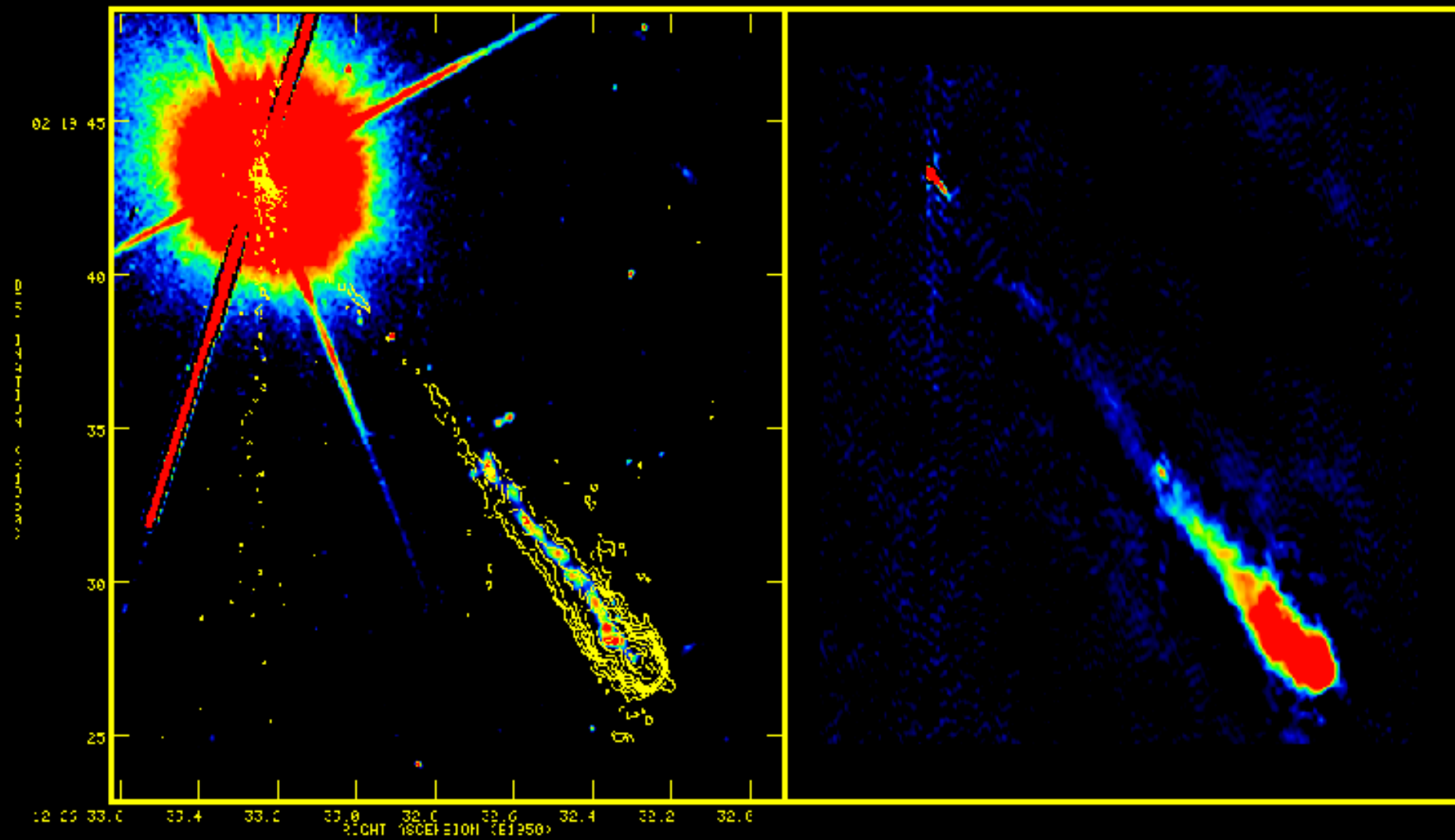
Vir A



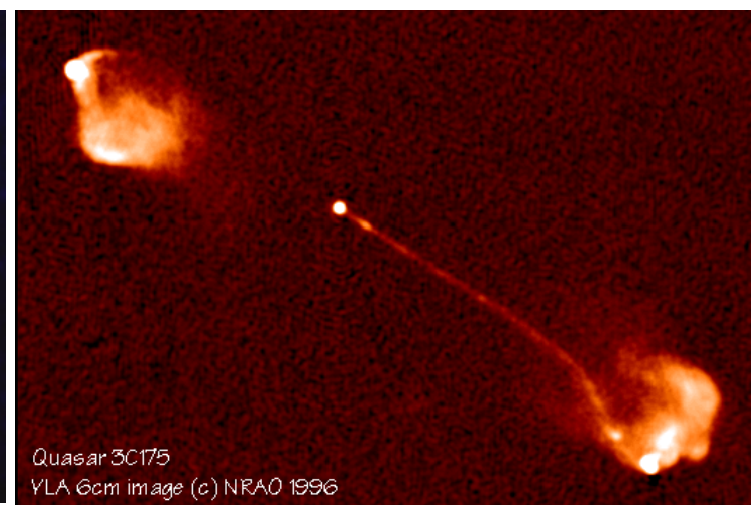
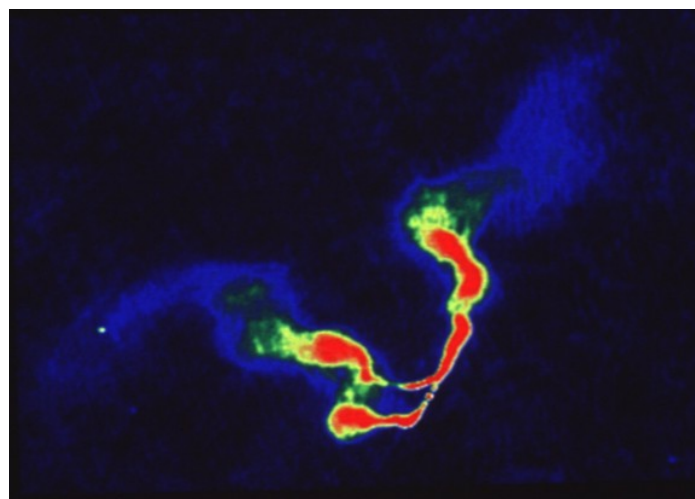
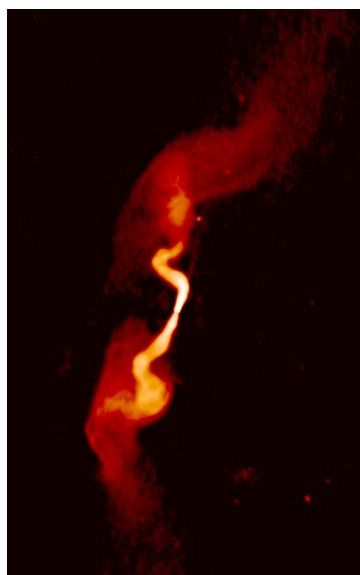
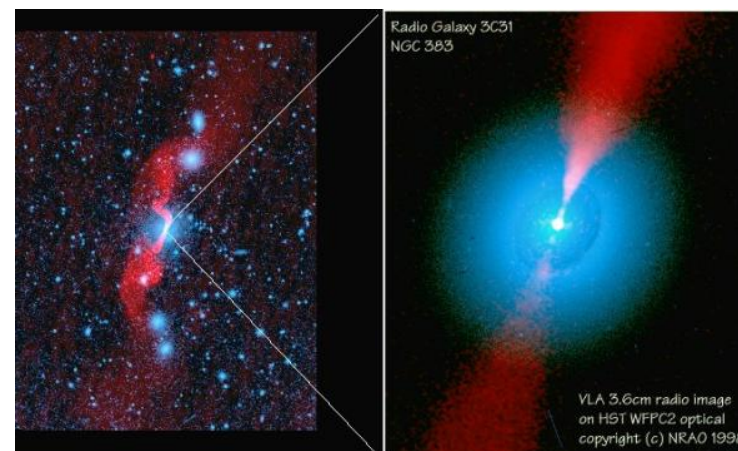
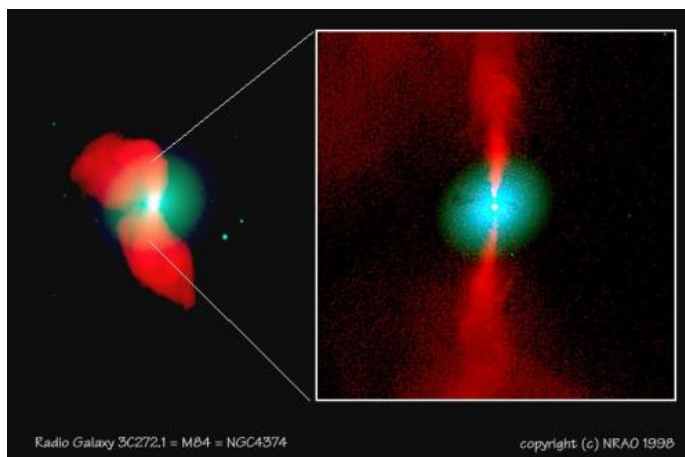
3C273

HST WFPC2 / MERLIN

MERLIN 18cm

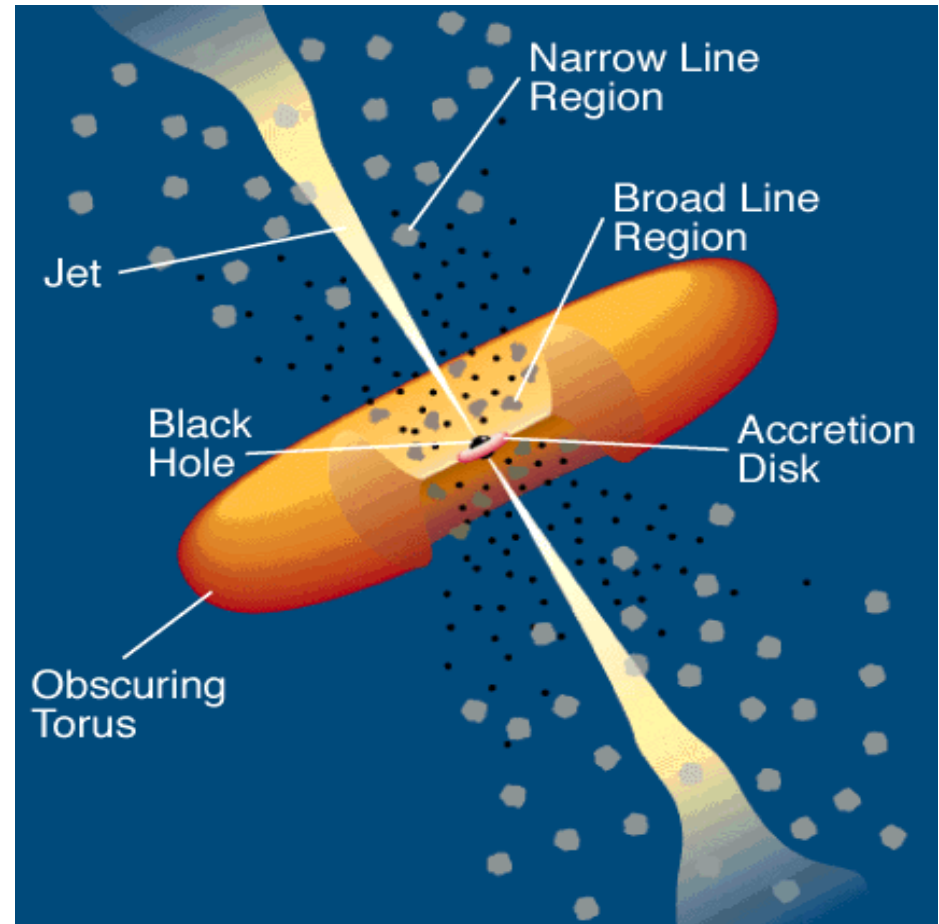


様々な活動銀河核



活動銀河核の中心部(想像図)

- 巨大ブラックホール＋降着円盤
 - ブラックホールへの降着エネルギーが活動の元
- 活動銀河核ジェットの謎
 - ジェットの加速・形成
 - 高速の99%を超えるジェットをどうやって形成するか(理論的研究)
 - 組成も良くわかっていない(電子－陽子 or 電子－陽電子)
 - ジェットの収束・方向維持
 - 細い形のジェットを維持し、一方向に噴出し続けるのは流体力学的に困難
 - ジェット形成を直接観測する研究も進行中(スペースVLBI、ミリ波VLBI)

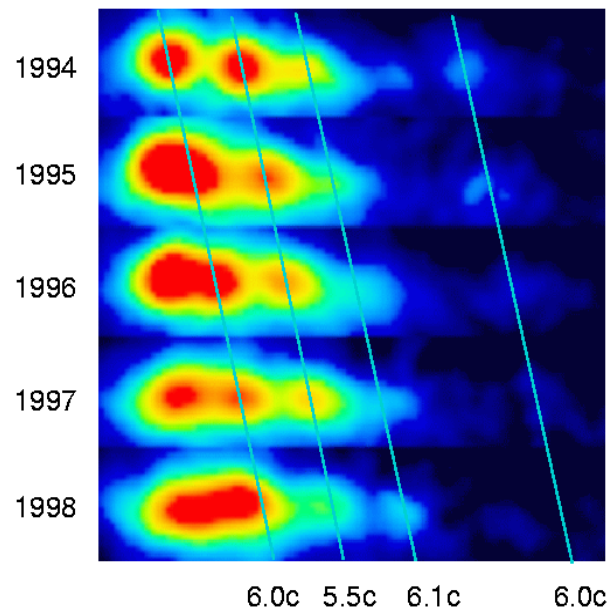
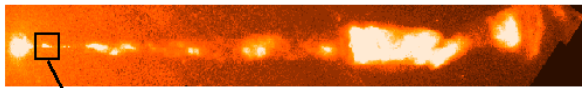


数光年以下のスケール

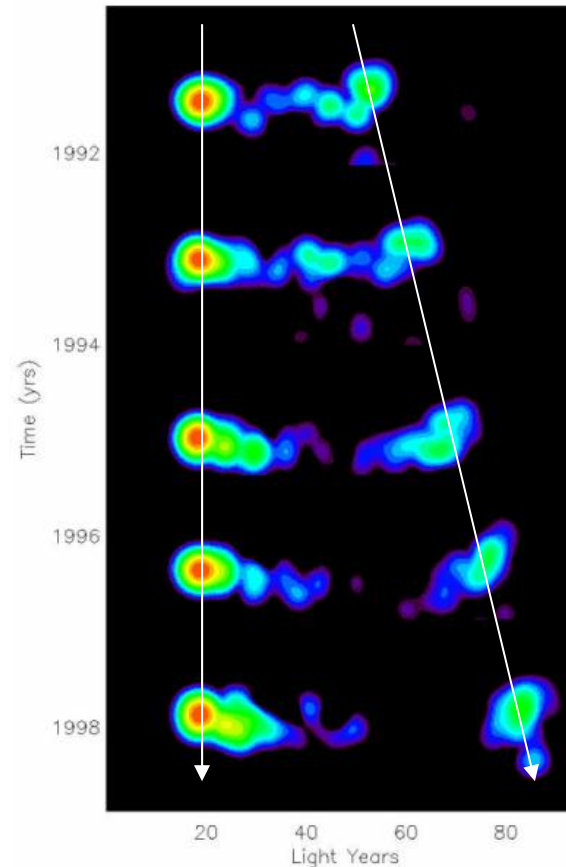
ジェットの超光速運動

- AGNのジェットの高分解能観測
- ジェットの塊が、光速以上で運動するように見えることがある

Superluminal Motion in the M87 Jet



Vir Aの超光速運動



3C279

相対論的速度で運動する物体の観測

- 光速で規格化した速度 β
- (相対論的)ドップラー係数 δ

$$\beta = v / c$$

- 非相対論的 $\beta \ll 1$
- 極相対論的 $\beta \sim 1$

- ローレンツ係数 Γ

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

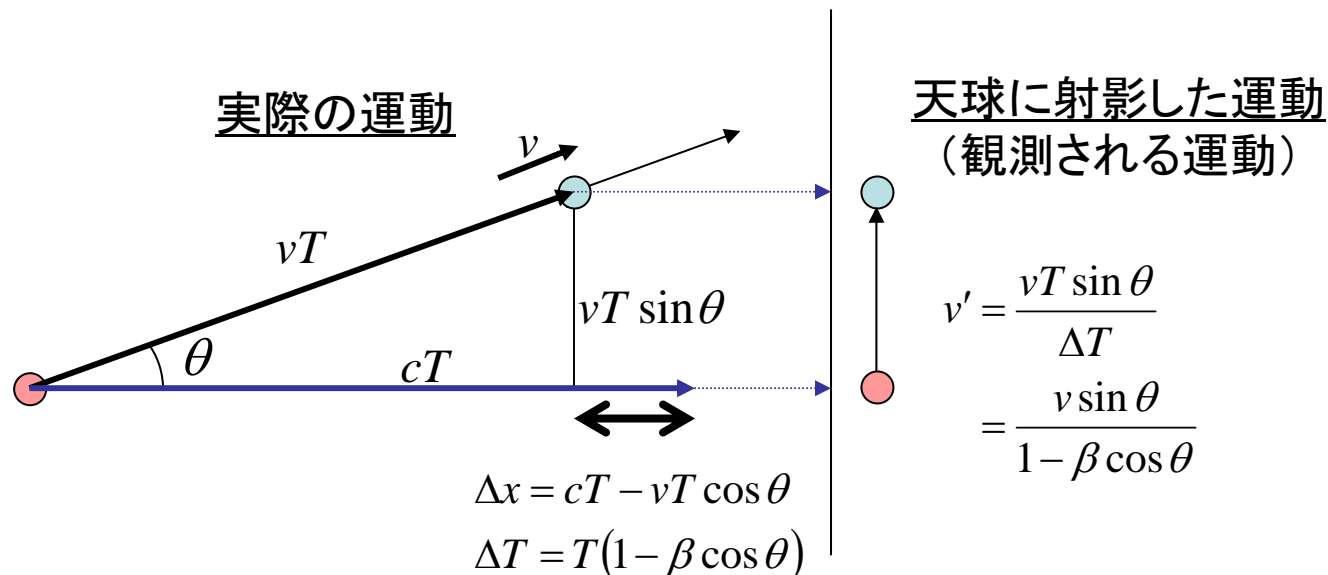
- 非相対論的 $\Gamma \sim 1$
- 極相対論的 $\Gamma \gg 1$
- 無次元化したエネルギーと考えられる(静止質量エネルギーで規格化)

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)} \\ &= \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta}\end{aligned}$$

- 観測者視線と運動方向のなす角 θ
- 観測をする場合に重要なパラメータ
- 観測される振動数(現象の頻度)の変化を表す係数

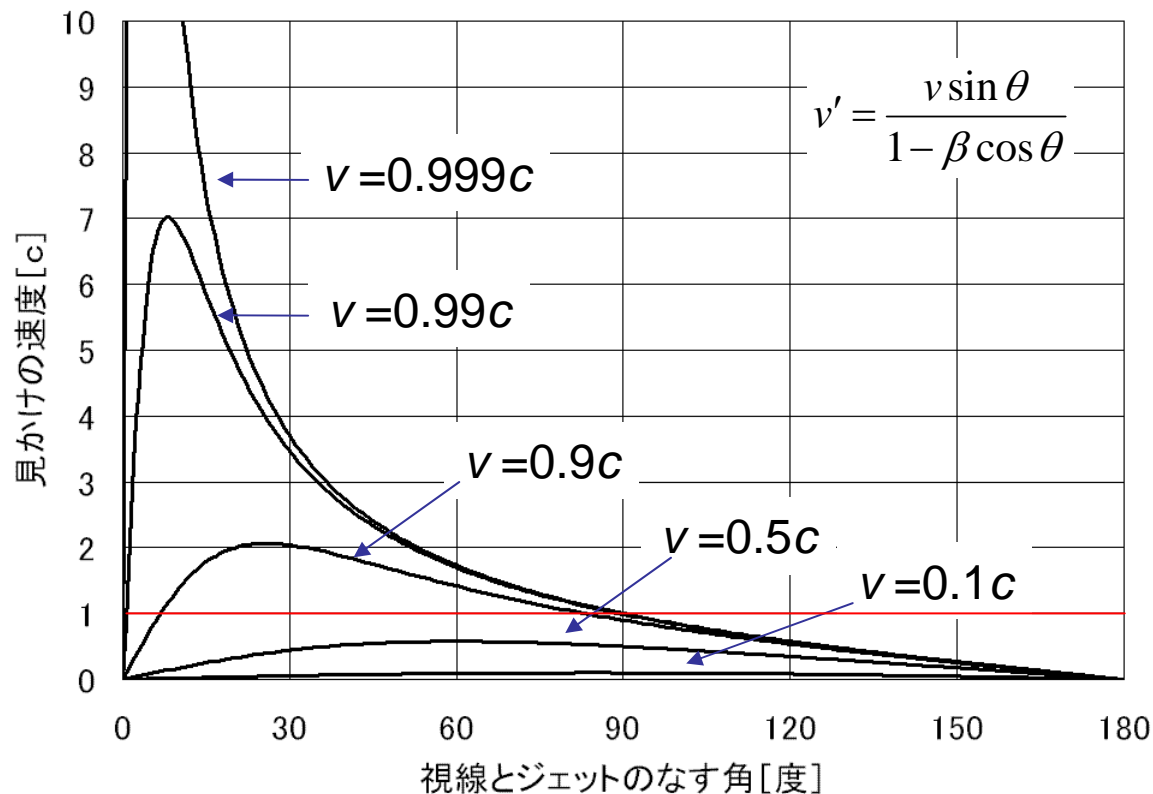
超光速現象

- 光速に近い($\beta \sim 1$)ジェットが視線方向に接近($\theta \sim 0$)すると、見かけ上、極めて高速に運動する
 - 例(3C279の場合)
 - $\theta = 0.65 \text{ deg}$ 、 $\beta = 0.997$
 - $v' = 3.7 c$
- 超光速現象
 - 光速以上で運動するように見えることもある
 - あくまでも見掛けの現象
 - しかし相対論的なジェットが存在することの証拠



超光速現象

超光速運動



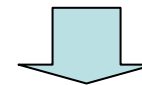
光速に近い($v > 0.9c$)ジェットは、容易に「超光速」となりうる

- 見かけの速度が最大となる角度・速度

$$\cos \theta = \beta \quad \text{のとき}$$

$$\text{最大値} \quad v' / c = \beta \Gamma$$

- 超光速現象が観測される天体のジェット
 - ローレンツ係数 $\Gamma \gg 1$
 - ジェットの角度 $\theta \sim 0$



超光速現象のジェットは、極めて高速で、ほぼ視線方向を向いている

ドップラー係数 δ

- 特殊な場合

- $\theta = 0$

($\Gamma \gg 1$ の場合)

$$\delta = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} = (1+\beta)\Gamma \quad \delta \cong 2\Gamma$$

- $\theta = 180 \text{ deg}$

($\Gamma \gg 1$ の場合)

$$\delta = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} = \frac{1}{(1+\beta)\Gamma} \quad \delta \cong \frac{1}{2\Gamma}$$

ドップラー係数 δ は最大の場合でおよそ 2Γ 。
 Γ が大きいと、観測量に様々な変化を起こす

- 観測への3つの影響

1. 放射電磁波の周波数が変化して観測される
 - 依存性 δ^{+1}
 2. 単位時間当たりの光子の到来数が変化して観測される
 - 依存性 δ^{+1}
 3. 進行方向への放射の集中(角度依存性)が観測される
 - 依存性 δ^{+2}
- これらの効果により、ドップラー係数 δ の物体の光度 L は δ^{+4} 倍に観測される

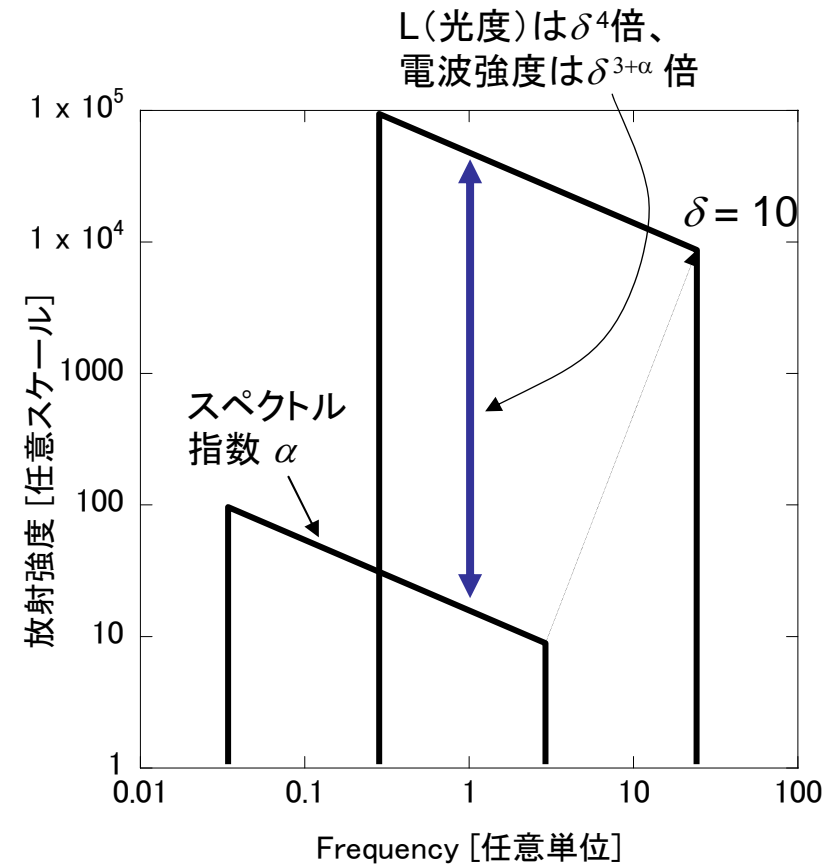
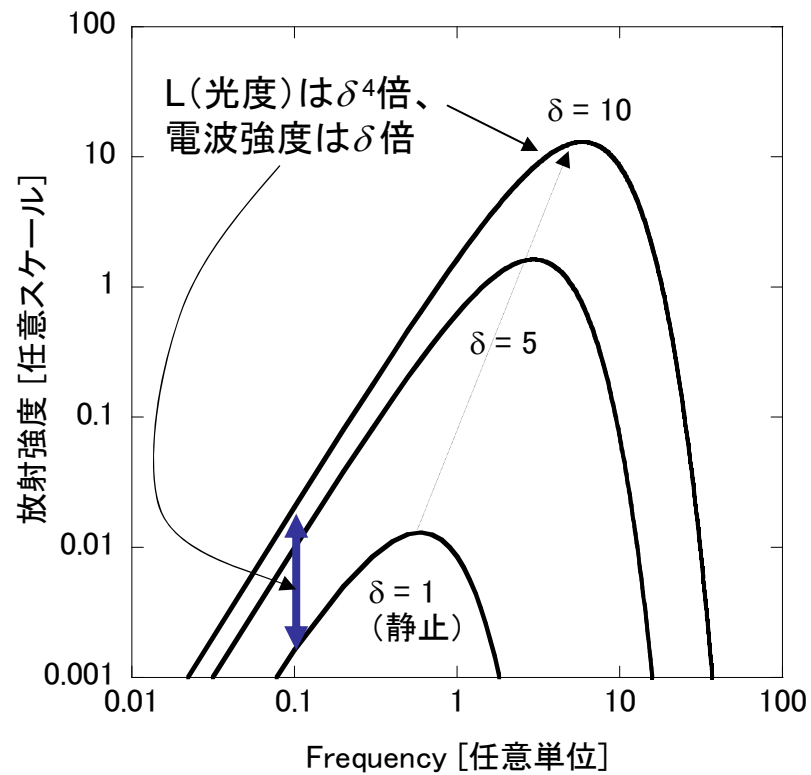
$$L_{obs} = \delta^4 L$$

- $\delta = 10$ の場合、光度は 10^4 倍に観測される。黒体なら温度が δ 倍に観測される

➡ ドップラー増幅効果

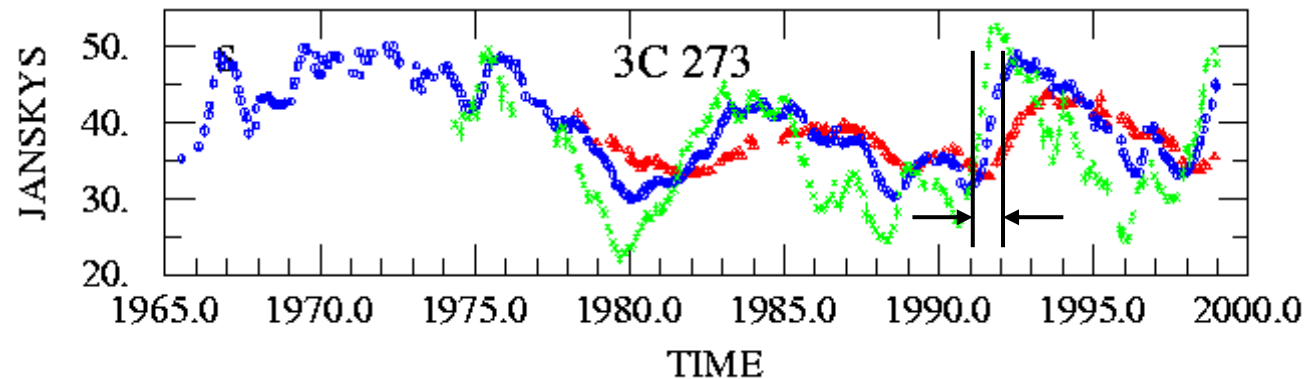
ドップラー増幅効果

- 黒体放射スペクトルの場合
- 非熱的放射スペクトルの場合



観測される放射強度はドップラー係数によって大きく変化する

強度変動の時間スケール



3C273の電波
強度の時間変化
赤:4.8GHz
青:8GHz
緑:14.5GHz

- 典型的な強度変動の時間スケール τ
 - 3C273 : $\tau \sim 1$ 年
- ドップラー効果による変化

$$\tau' = \delta^{-1} \tau$$

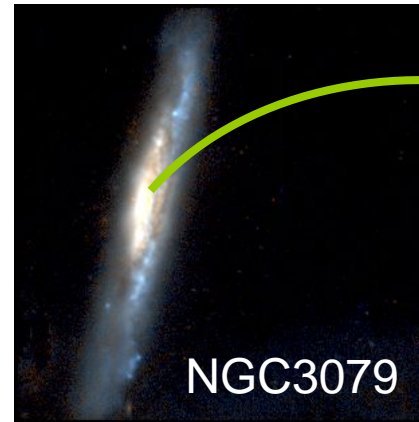
- 変動が短時間に観測される

- Light crossing time
 - 天体の強度変動 τ から、天体の空間サイズ D を推定

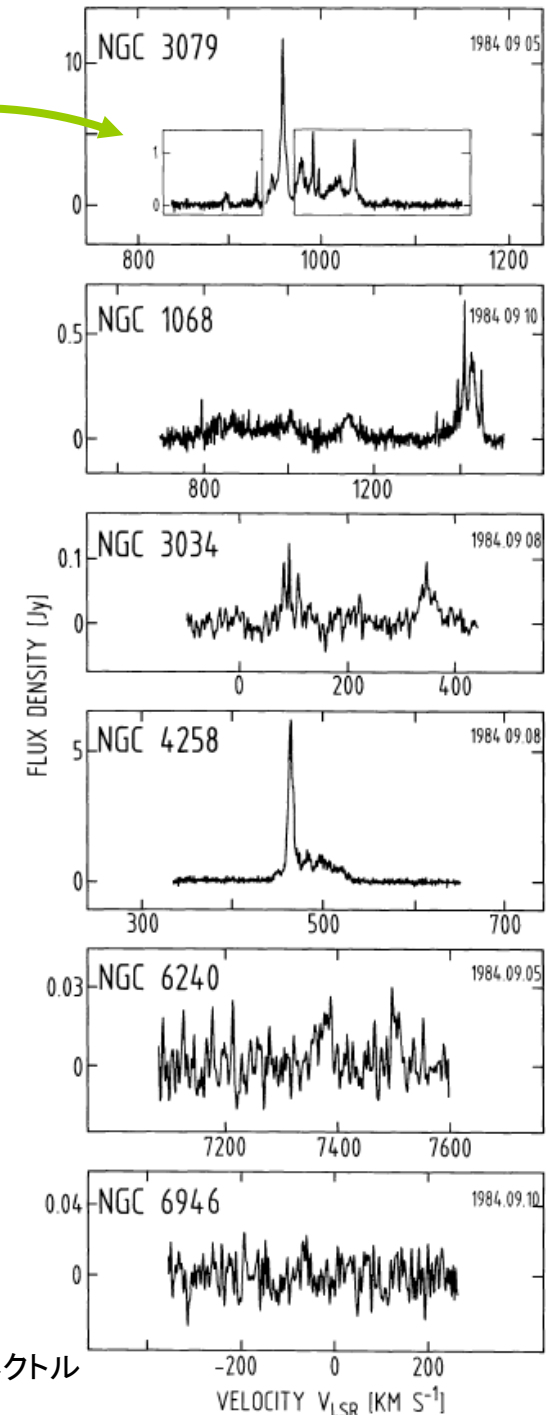
$$D = c \tau' = c \delta^{-1} \tau$$

- ドップラー係数分 (δ^{-1}) だけ天体を小さく見誤る
- 立体角は δ^{-2} 倍に見誤る
- 輝度(温度)は δ^{+2} 倍に見誤る
 - 強度もドップラー増幅されているので、輝度温度の推定値は極めてあいまい

メガメーザ



- 活動銀河核に見られる強力なメーザ放射
 - OH、H₂Oの2種
 - SiO、CH₃OHは無い
 - 速度幅が広く、数百kms⁻¹に達する
 - 銀河系内のメーザ(数kms⁻¹)と対照的
 - 銀河系内の典型的なメーザ天体(星形成領域など)の10⁶倍も強いことがある
 - →「メガ」メーザ
 - 活動銀河核の活動性に関連がある



H₂Oメガメーザのスペクトル
(Henkel 1984)

NGC 4258

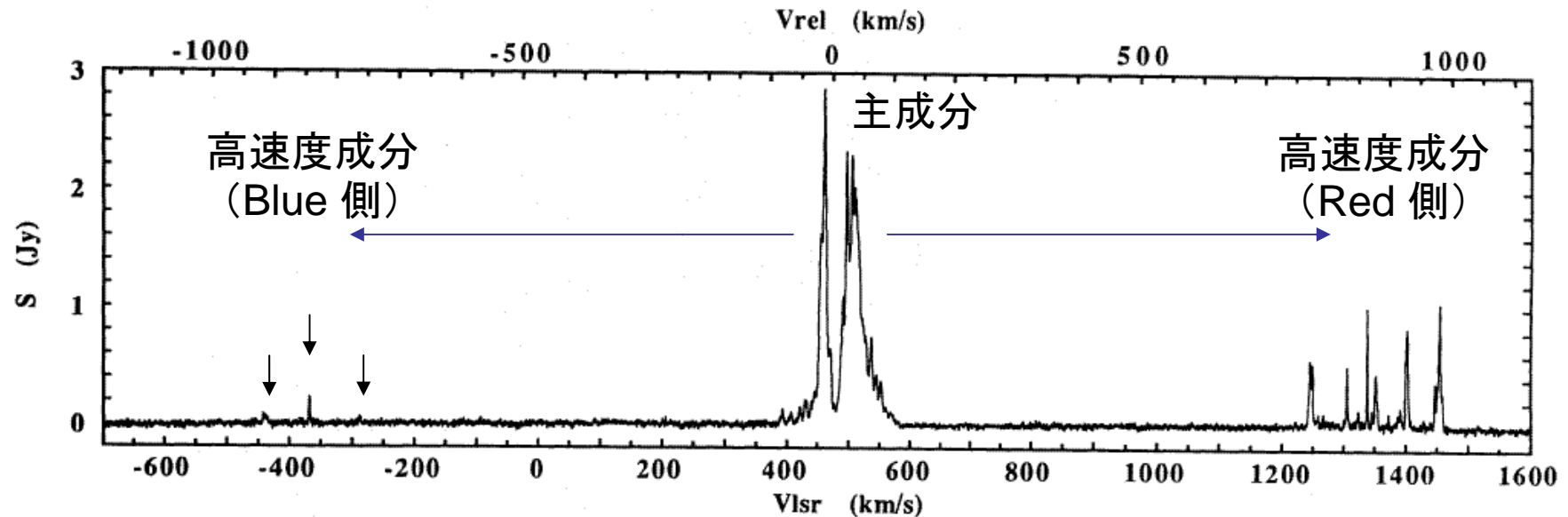


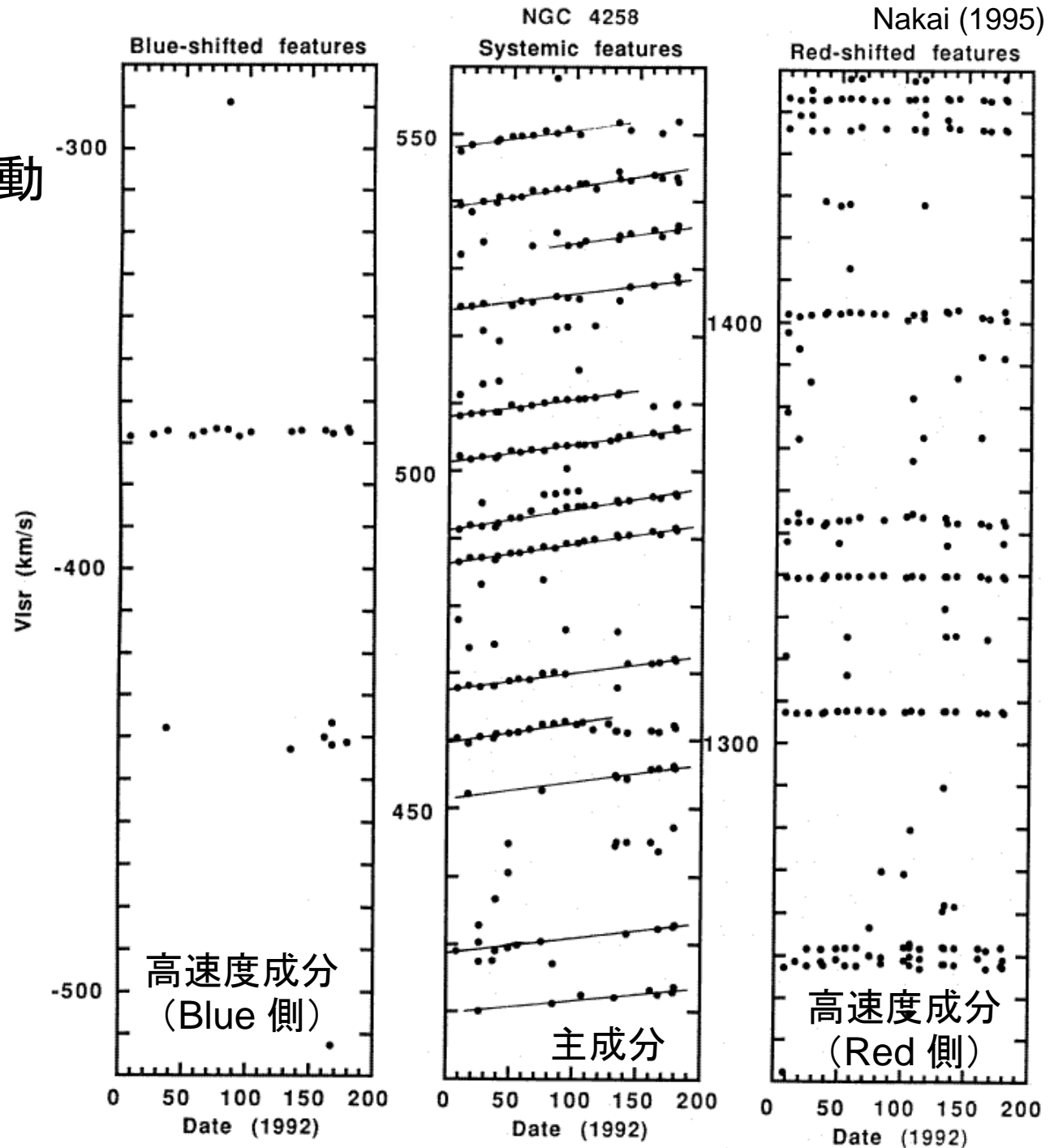
Fig. 9. Detected H₂O maser features of NGC 4258. The maser emission comprises the systemic features ($V_{LSR} \approx 380$ – 580 km s^{-1}) near to $V_{sys} = 476 \text{ km s}^{-1}$ and the blue- ($V_{LSR} \approx -515$ – -285 km s^{-1}) and red- ($V_{LSR} \approx 1240$ – 1460 km s^{-1}) shifted high-velocity features. Nakai (1995)

- 高速度成分の発見
 - 主成分スペクトルから $\pm 900 \text{ km s}^{-1}$ も離れた高速度成分が存在
- 加速度運動
 - 主成分は視線方向に加速度運動
 - 高速度成分は加速度が無い

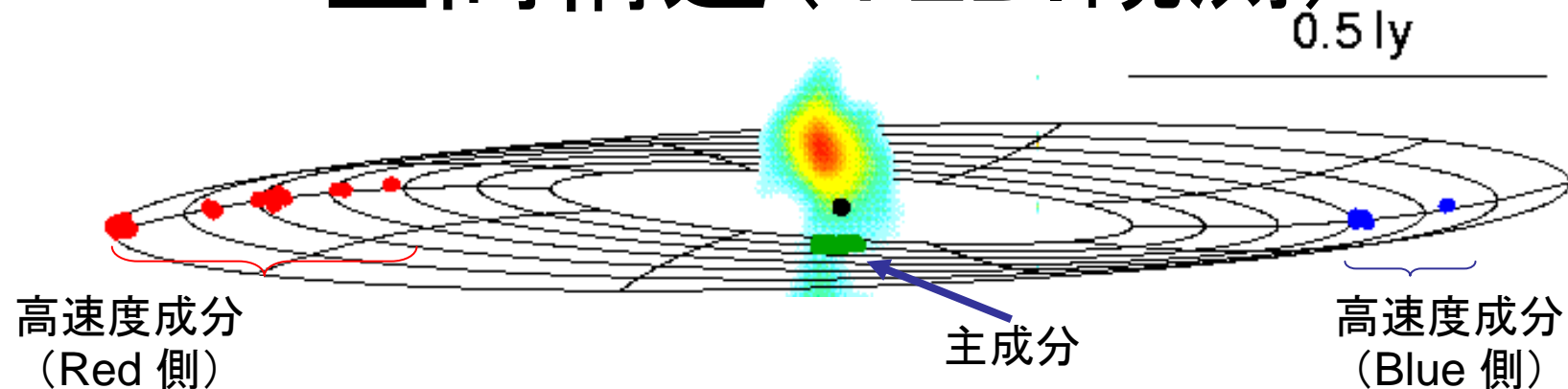
NGC4258

水メーザの加速度運動

- スペクトルピーク
速度の時間変化
 - 1992年、200日間
の観測
- 加速度運動
 - 主成分
 - 時間と共に視線
速度が増大して
いる
 - $9.6 \text{ kms}^{-1}\text{yr}^{-1}$
 - 高速度成分
 - 時間変化なし



空間構造 (VLBI観測)



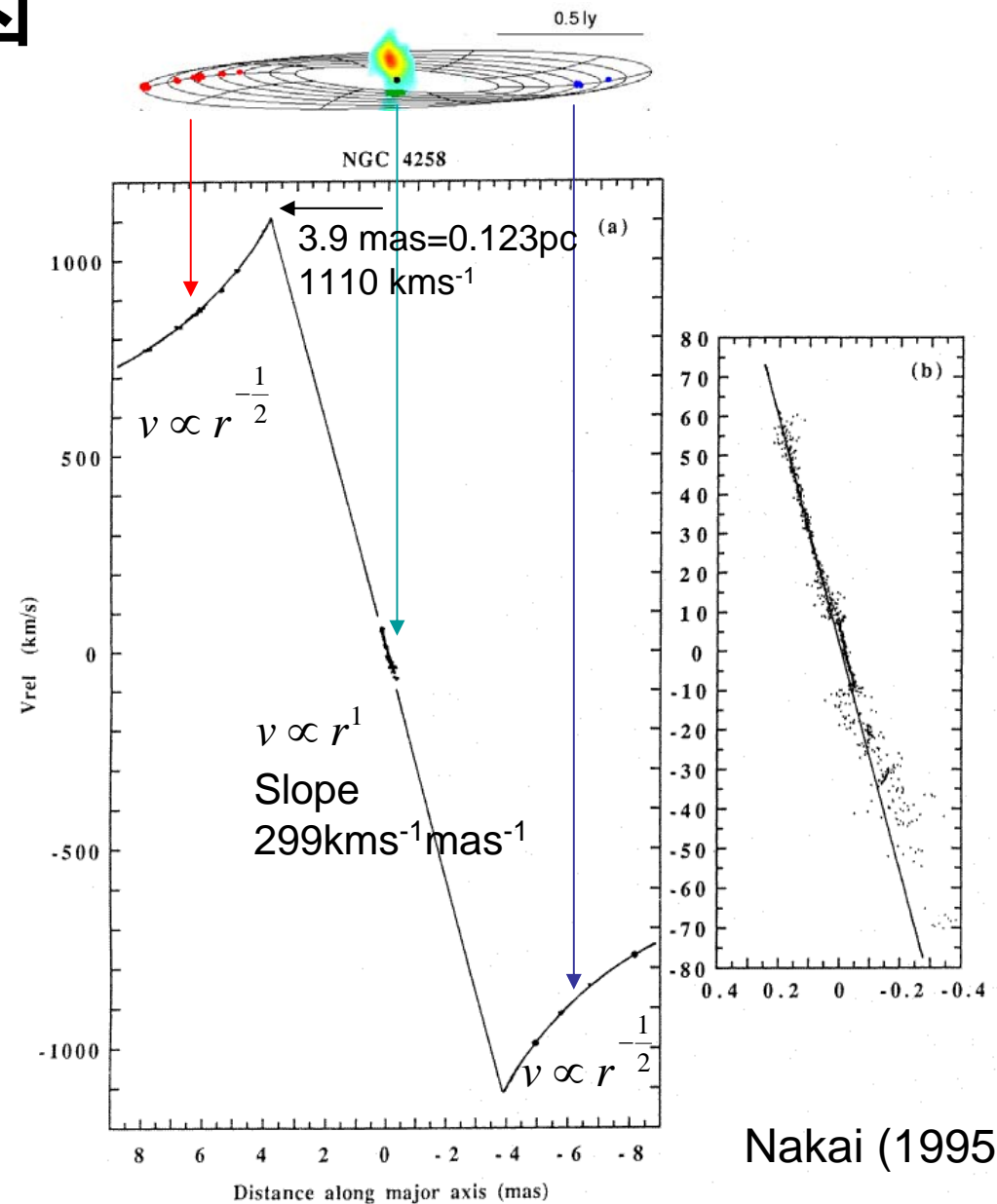
- ほぼ一直線に並んだ構造
 - 銀河中心領域の1pc程度の領域
 - 回転する円盤と考えられる
 - 弱い連続波放射とメーザの主成分が重なっている
 - 背景電波の増幅？
- 回転する円盤のモデル化
 - パラメータ: 中心質量 M

位置－速度図

- 主成分
 - 速度 v は位置 r に比例
- 高速度成分
 - 半径が大きくなると速度は低下



太陽系天体と同様な運動
(ケプラー回転)



Nakai (1995)

回転円盤のモデル

- 系の質量が中心天体に集中していると仮定

- 距離 r の回転速度

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{GM} \cdot r^{-\frac{1}{2}}$$

- 角度 θ の位置における見かけの位置 x と視線速度 v_{obs}

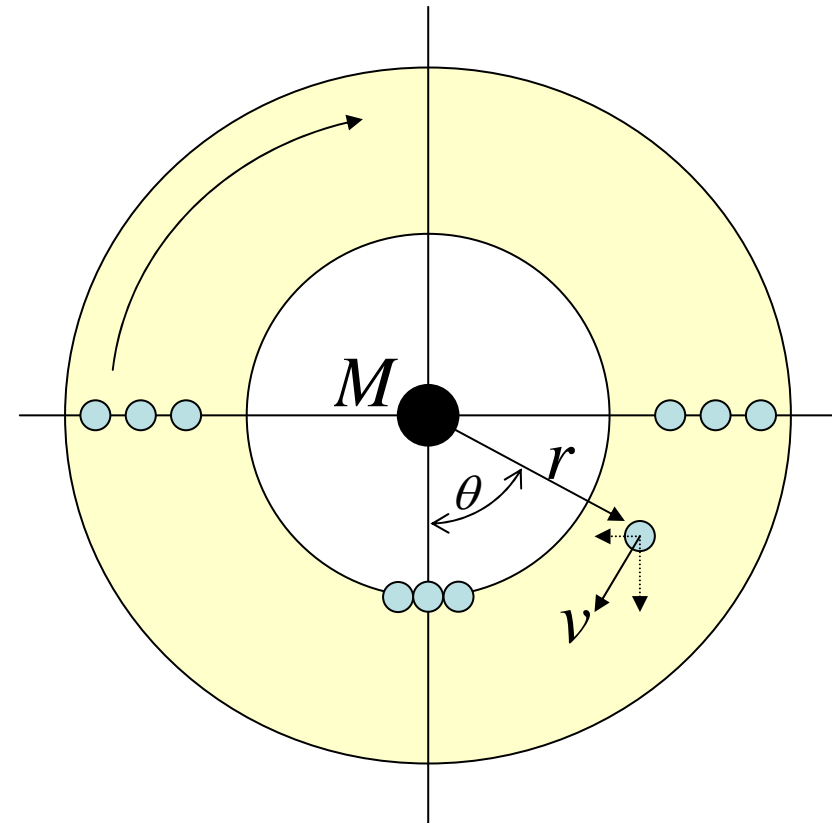
$$x = r \sin \theta$$

$$v_{\text{obs}} = v \sin \theta = v \frac{x}{r}$$

- 角度 θ の位置における視線速度の加速度 a_{obs}

$$a_{\text{obs}} = GM \cdot r^{-2} \cos \theta$$

$$\cong GM \cdot r^{-2} \quad \dots \theta \sim 0 \text{ の場合}$$



↑
観測者

回転円盤と中心天体

- 円盤
 - 半径
 - 0.15-0.26 pc
 - 回転速度
 - 1120 km s^{-1} @ 0.123 pc
 - メーザ放射領域
 - 主成分: 円盤内縁
 - 高速度成分: 接線部
- 中心天体
 - 質量 $3.6 \pm 0.2 \times 10^7 \text{ Mo}$
 - 半径 $R < 0.12 \text{ pc}$
- 中心天体のパラメータ
 - 得られた質量と半径ではブラックホールの条件を満たさないが、これほど高密度であればブラックホールが安定な存在形態
 - ブラックホールの存在を立証する結果
 - 活動銀河核の研究でこれほど高精度な観測量が得られたのは初めて