

活動銀河核ジェット の電波観測のレビュー

永井 洋

(国立天文台)

自己紹介

- 2007年 総研大博士課程修了
- 現在、国立天文台チリ観測所 特任助教
 - 大型ミリ波サブミリ波電波望遠鏡ALMAプロジェクトに関わる
 - 東アジア地域センターでユーザーサポート業務(特にPIデータ解析の取りまとめ)と、チリの現場で科学評価活動を行う(特に偏波観測を担当)
- VLBI・ALMAを使った高解像度電波観測で活動銀河核ジェットの研究を行う
 - 多波長連携にも力を注ぐ

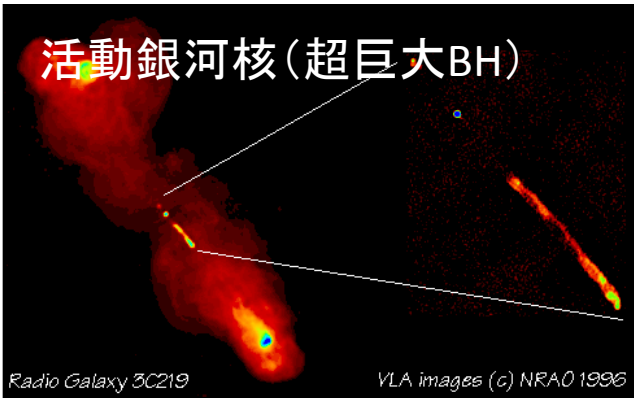
プレゼンを作るにあたって

- 以下の方々のプレゼン資料も参考にさせていただいています
 - ALMAワークショップ「ALMAで挑むブラックホールの高エネルギー現象」 當真賢二
 - 「活動銀河核ワークショップ～2020年代への展望～」 土居明広
 - 天文学会2012秋季年会記者会見 秋山和徳

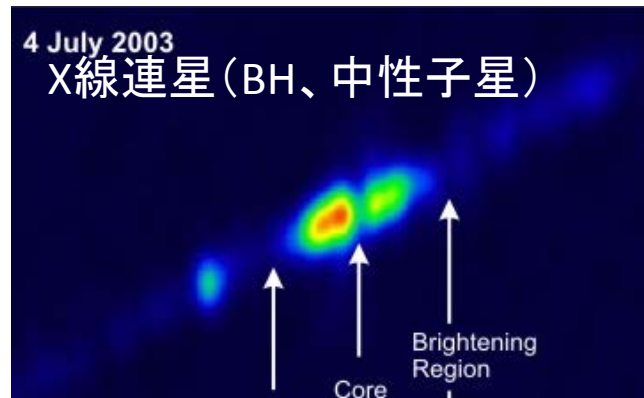
宇宙ジェット

中心の天体システムから双方向に噴出している、細く絞られたプラズマの噴流
「活動する宇宙」第9章より(福江純)

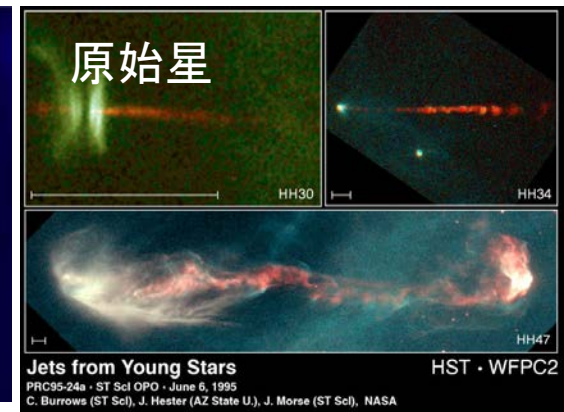
活動銀河核(超巨大BH)



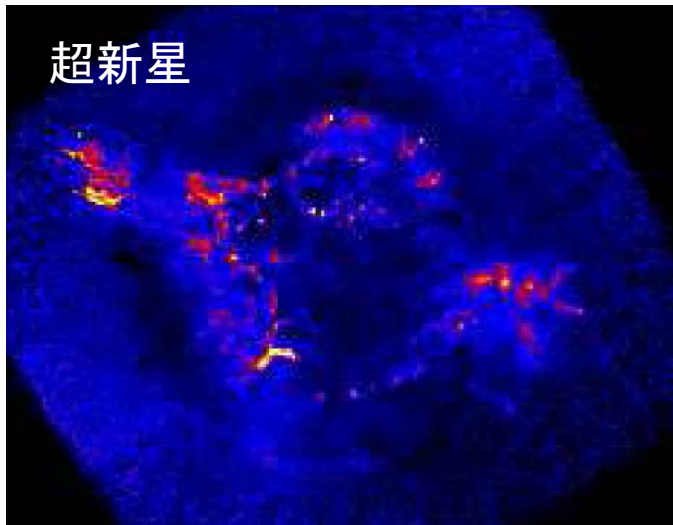
4 July 2003
X線連星(BH、中性子星)



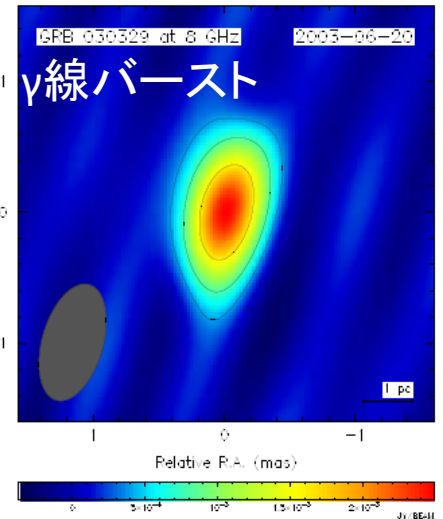
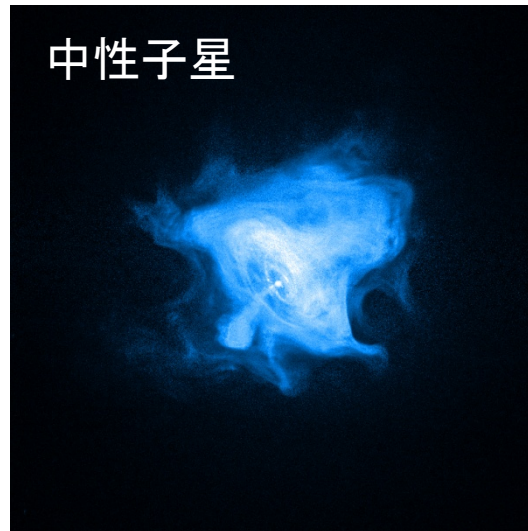
原始星



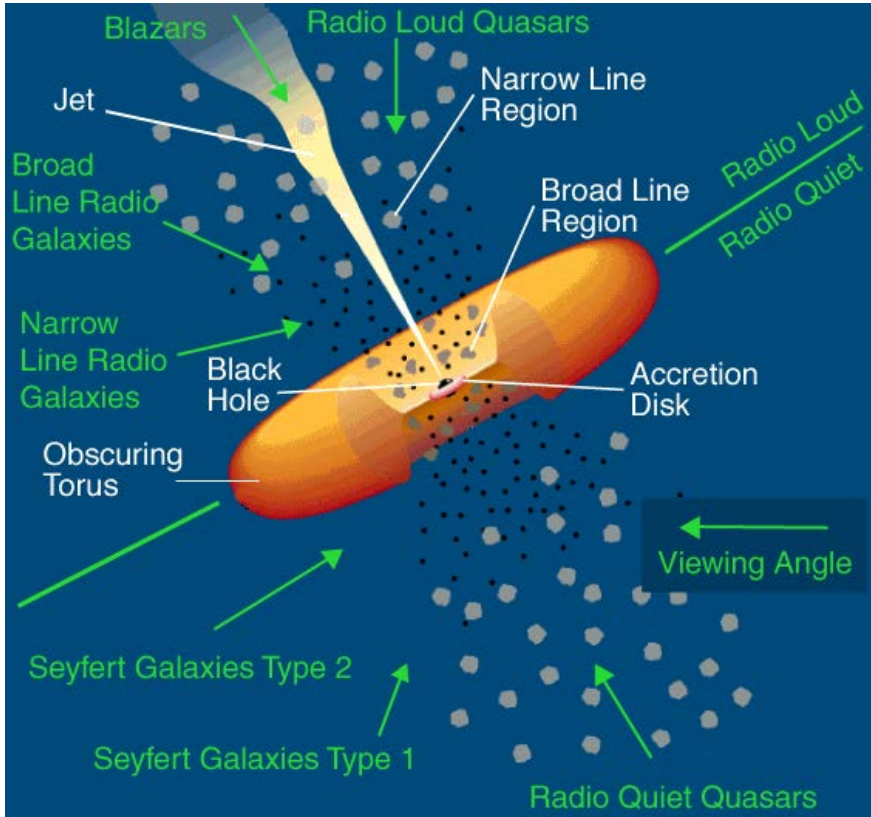
超新星



中性子星



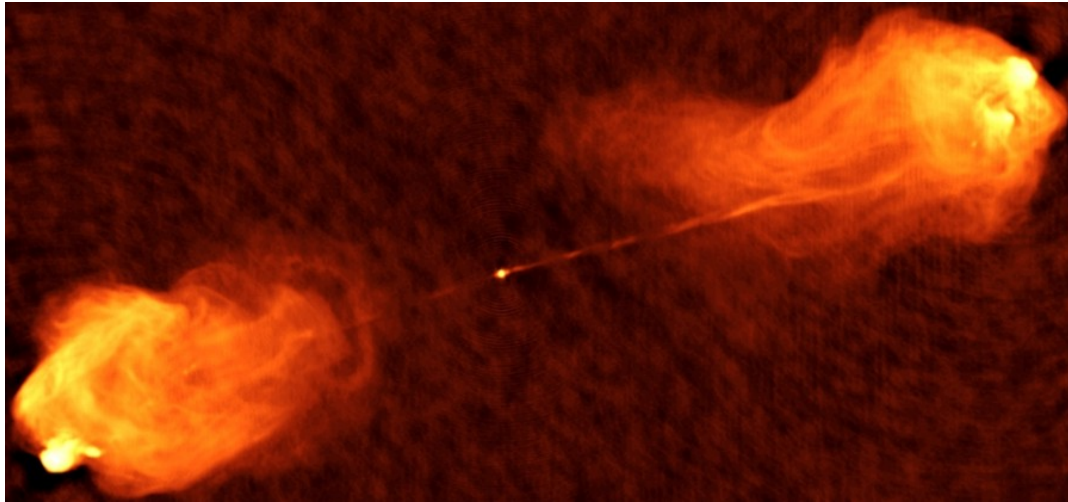
AGNの統一モデル



大雑把にあって、ジェットはradio-loud objectsに付随すると考えられてきた

- セントラルエンジン (=SMBH+降着流) + α からなるシステム
- 本質的な性質の違い
 - セントラルエンジンの性質 ($\propto M_{\text{dot}}$)
 - ジェットの規模 (\propto black hole spin?あまりよくわかっていない)
- 見かけ上の違い
 - トーラスごしにセントラルエンジンを見込む角度の違い

AGNジェットの基本的安全性質



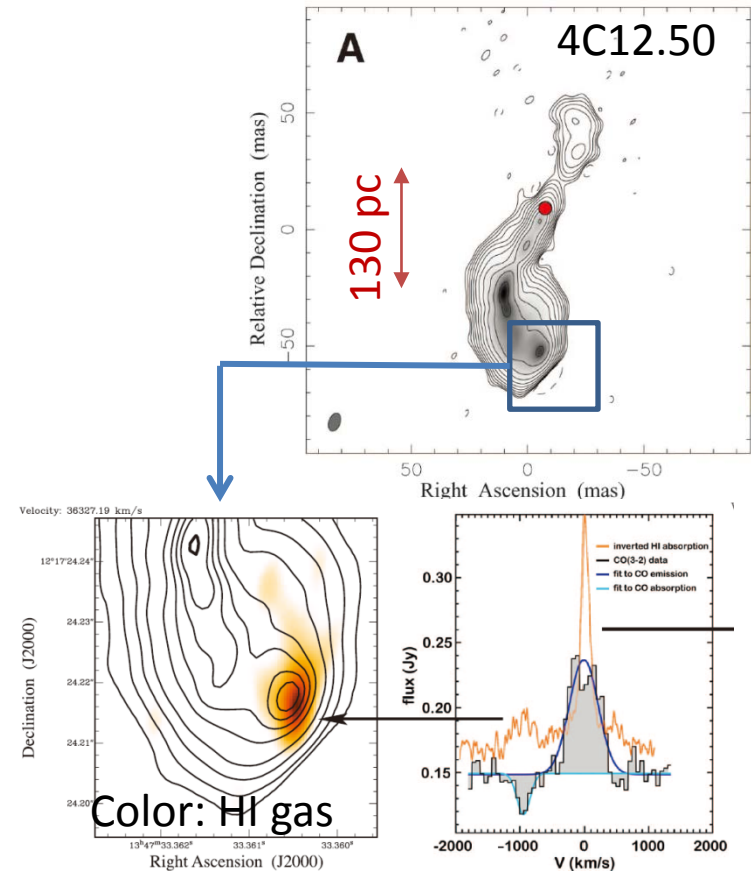
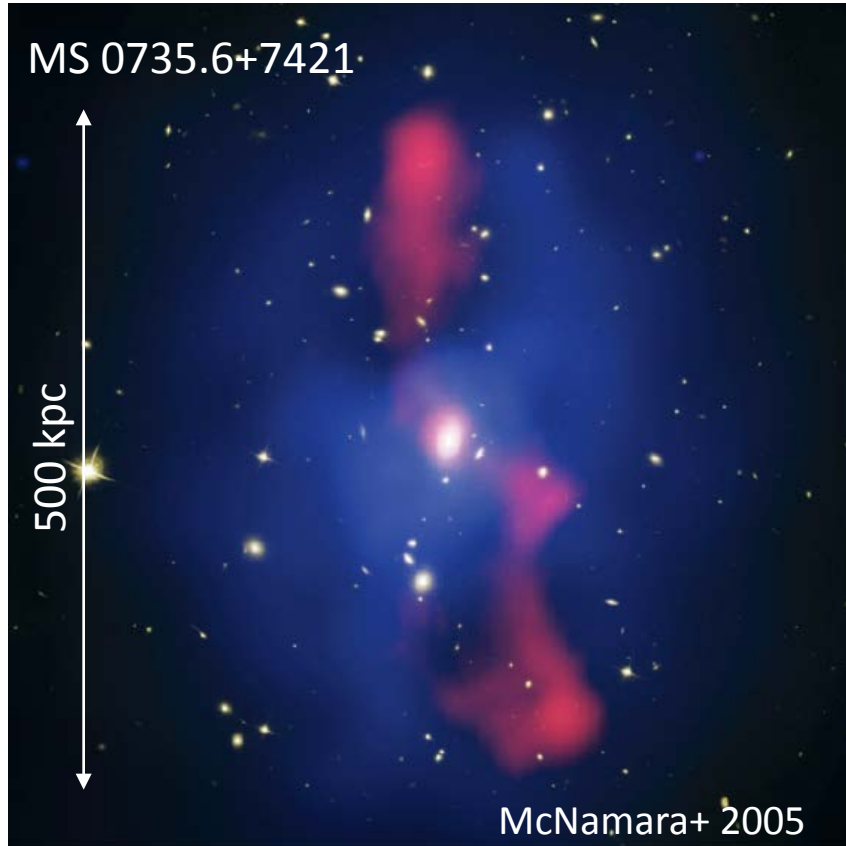
最大の特徴

- ✓ Kinetic Power $L_j \lesssim L_{\text{edd}}$
- ✓ Bulk Lorentz factor: $\Gamma \sim 10-100$
- ✓ Highly collimated up to ~ 100 kpc

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

- これらの特徴を如何に実現するかが、ジェット研究の基本的な目的

AGNジェットの基本性質



Morganti+ 2014

- ジェットと銀河・銀河団ガスとの激しい相互作用
- 銀河・ブラックホールの共進化に寄与するか？

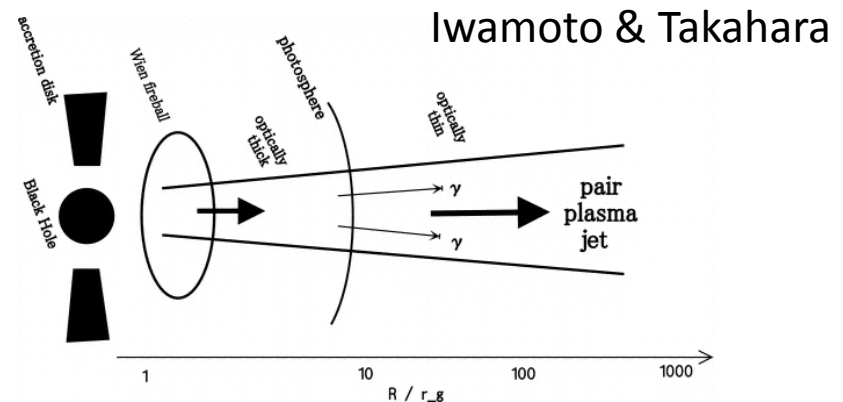
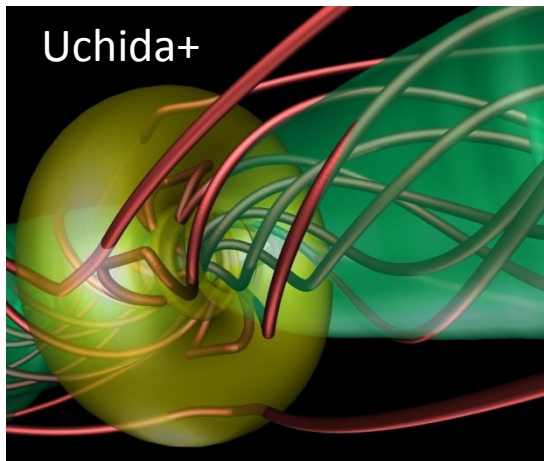
電波観測が果たす役割

- 多波長研究の一端を提供する(あたりまえ)
- 干渉計観測(VLBIを含む)によって、高い解像度(λ/D 、干渉計の場合Dは基線長)でモロフォロジー、偏波、固有運動などの情報を提供する

1. ジェットの駆動機構に迫る

駆動機構

- 前述のジェットを観測的特徴を再現することのできるモデルの構築は、ジェット研究の長年の課題
 - 電磁場駆動 (Blandford & Znajek 77, Blandford & Payne 81, Uchida & Shibata 85, Koide+ 02, McKinney 06, Komissarov+ 07;09,...)
 - (輻射)熱エネルギー駆動(Paczynski 1990, Iwamoto & Takahara 02;04, Asano & Takahara 07;09, Toma & Takahara 2012)



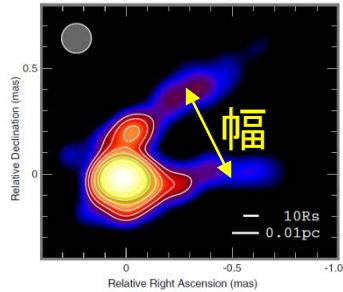
- 観測では、モデルと直接比較が可能な空間スケールを分解しつつある

M 87

- おとめ座銀河団のcD銀河
- $D=16.7$ Mpc (Jordan+ 2005)
- $M_{\text{BH}} = 3 \text{ or } 6 \times 10^9 M_{\text{sun}}$
(Macchetto+ 97, Gebhardt & Tomas 09, Walsh+ 13)
 - $0.1 \text{ mas} = 0.0084 \text{ pc} = 12.8 r_s$
 - SgrA*に続いて最もブラックホール視直系が大きいため、VLBI観測によって計算機実験の世界に迫ることができる

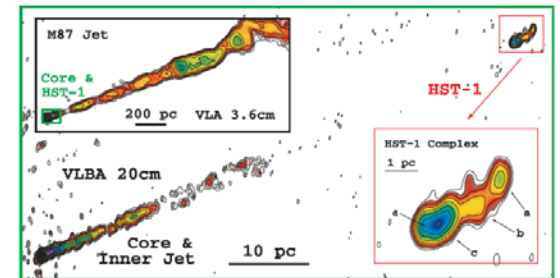
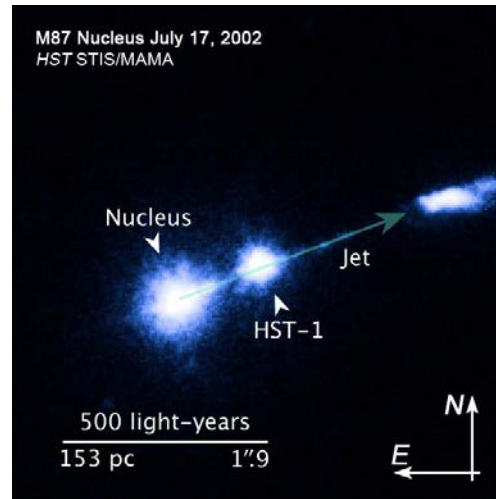
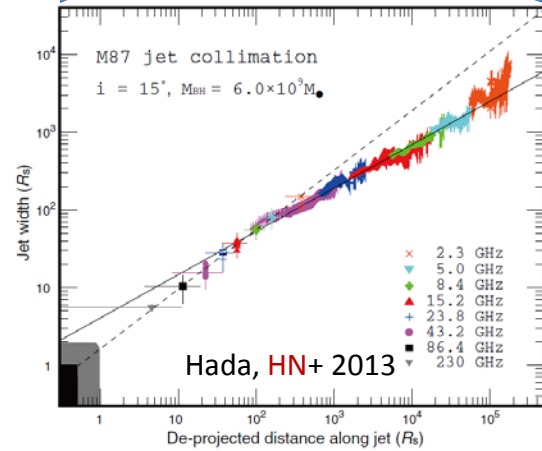
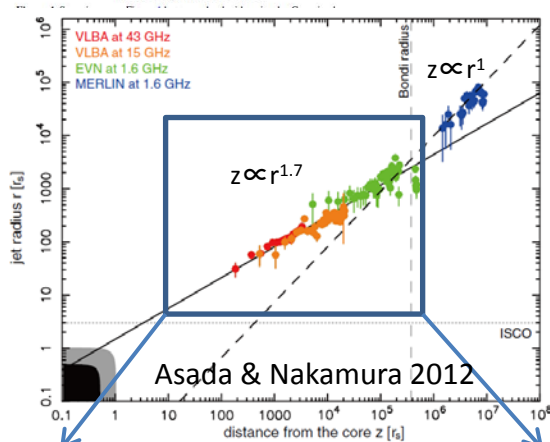
Hada, HN+ 2011, Nature

収束プロフィール



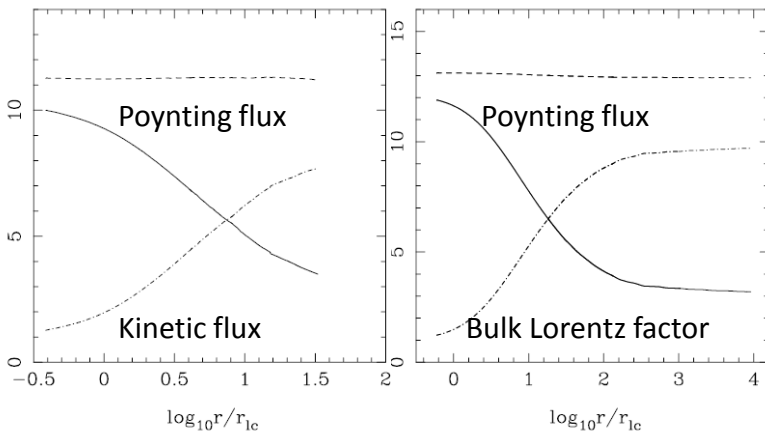
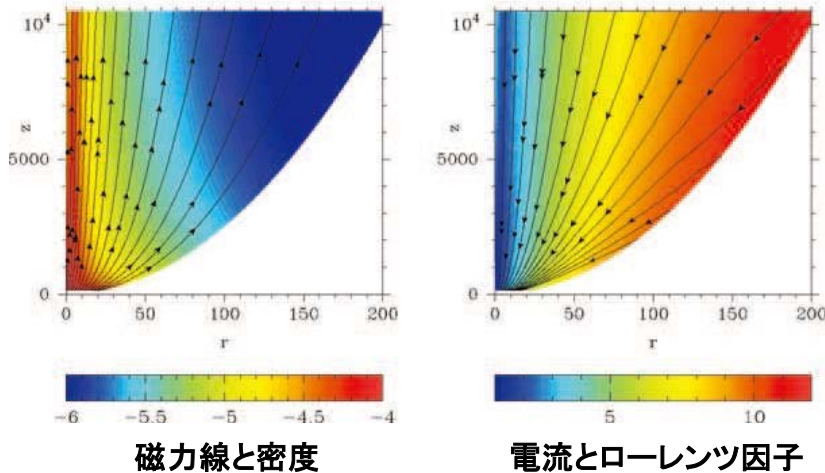
- ジェットの幅を場所場所で測定
- $10^5 r_s$ までは放物形状、以降は円錐形状

– $10^5 r_s$ はちょうどBondi半径程度に相当し、HST-1という不思議な成分が確認されている



Cheung+ 2007

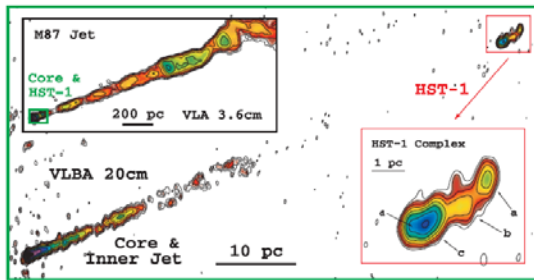
電磁流体モデルとの比較



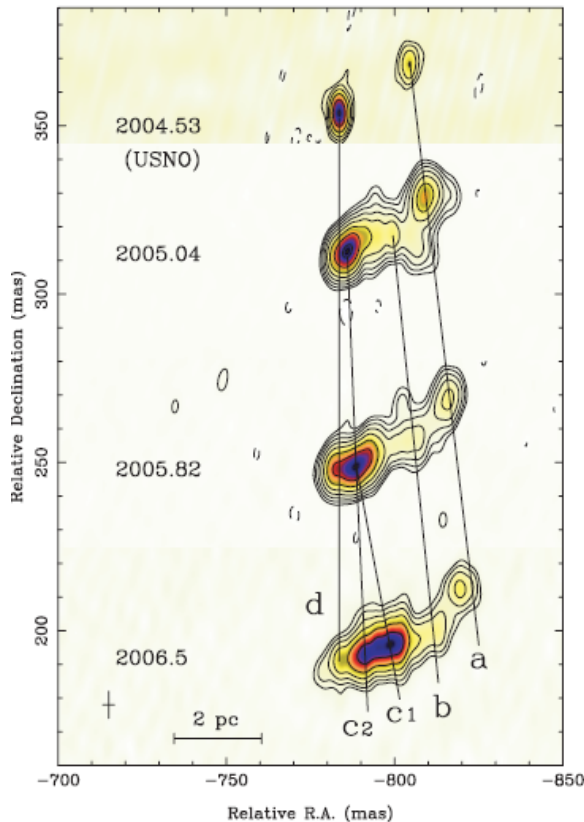
Komissarov+ 2007

- 理論的にはフープストレスだけでは収束は維持できない (Okamoto 99, Nakamura+06, Toma & Takahara 13)
- Komissarov+ 07/09では $z \propto r^{3/2}$ (放物形状) の外壁を設定することで、効率よくジェットを加速できることを示した
- 前頁の $< 10^5 r_s$ の収束プロフィールとほぼ一致

HST-1の解釈

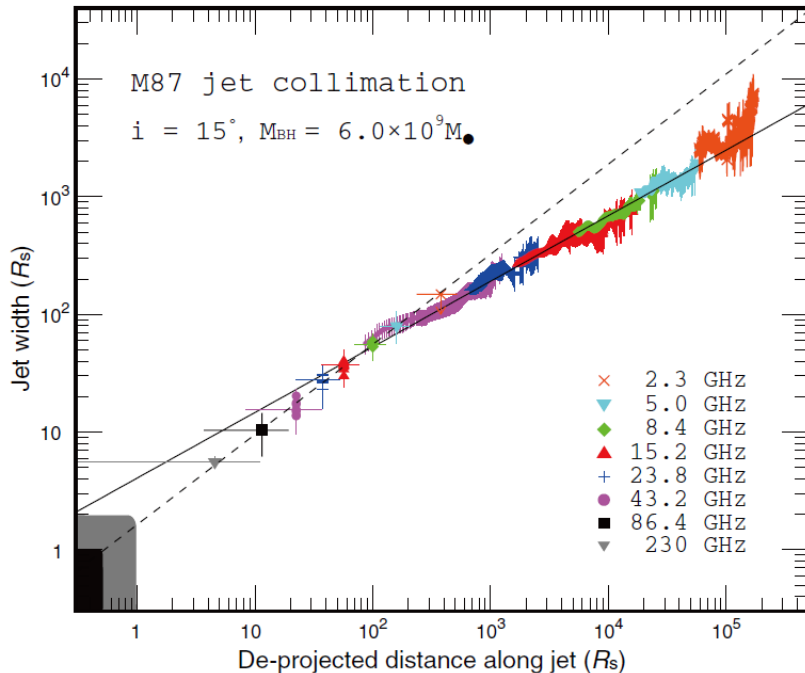


Cheung+ 2007



- ジェットは断熱膨張により内圧 (p_{jet}) が減少、一方で外圧 (p_{ISM}) の減りが緩やかな場合、ある程度の距離になると、 $p_{\text{jet}} < p_{\text{ISM}}$ になり過収束が起こる
 - Recollimation shock (Sanders 1983)
 - 実際に、多くの観測で銀河のコア半径以内でのISMの分布はフラット
- HST-1で観測される超光速ノットの描像とも合う (Cheung+ 2007)

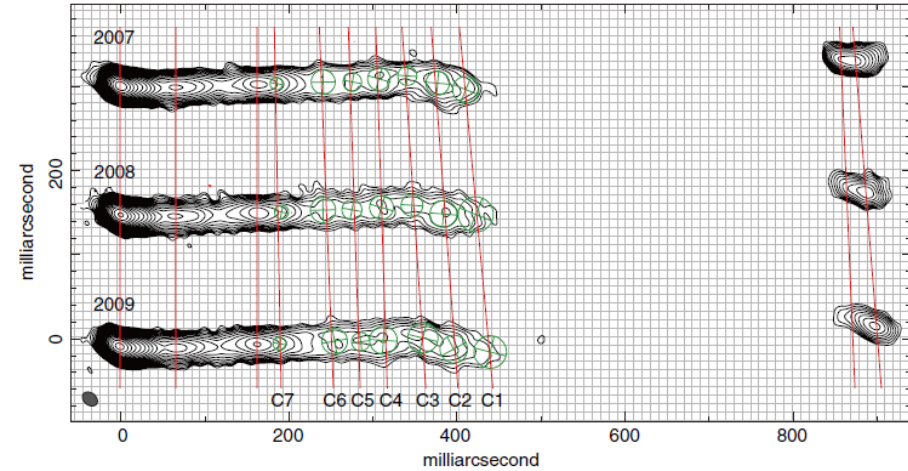
<100 r_s で遷移？



- 100 r_s よりも内側でわずかに収束プロファイルが変化している可能性がある
 - 収束が弱い
- 理論的にはこのあたりに fast-magnetosonic point があり、この点よりも下流で強く収束される
 - “magnetic nozzle” effect (Li et al. 1992; Vlahakis & Königl 2003)
- さらなる分解能が必要

速度プロファイル

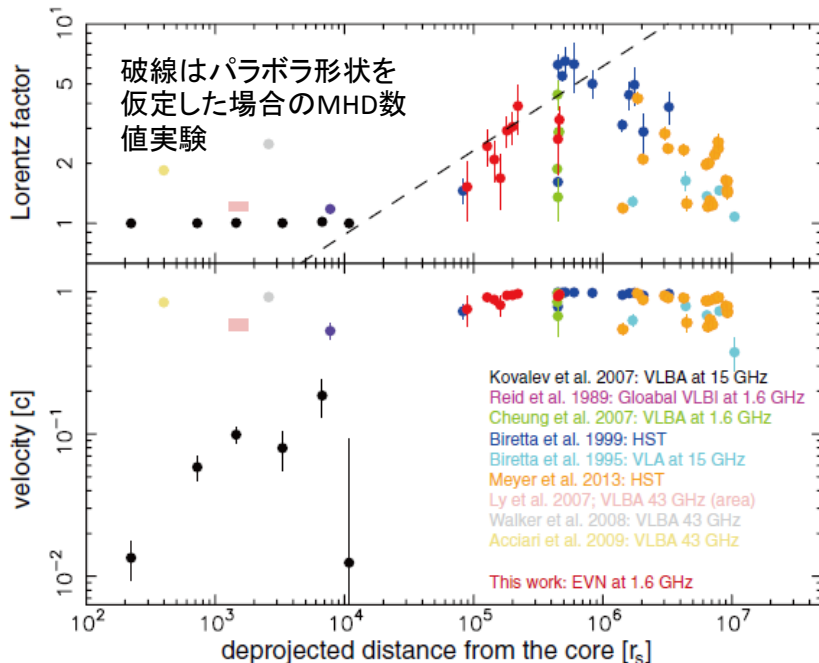
Asada, HN+ 2013



- 10^6 の距離レンジでノット
の速度が測定されている
- $10^5 r_s$ に向かって漸近的
な加速、以降減速

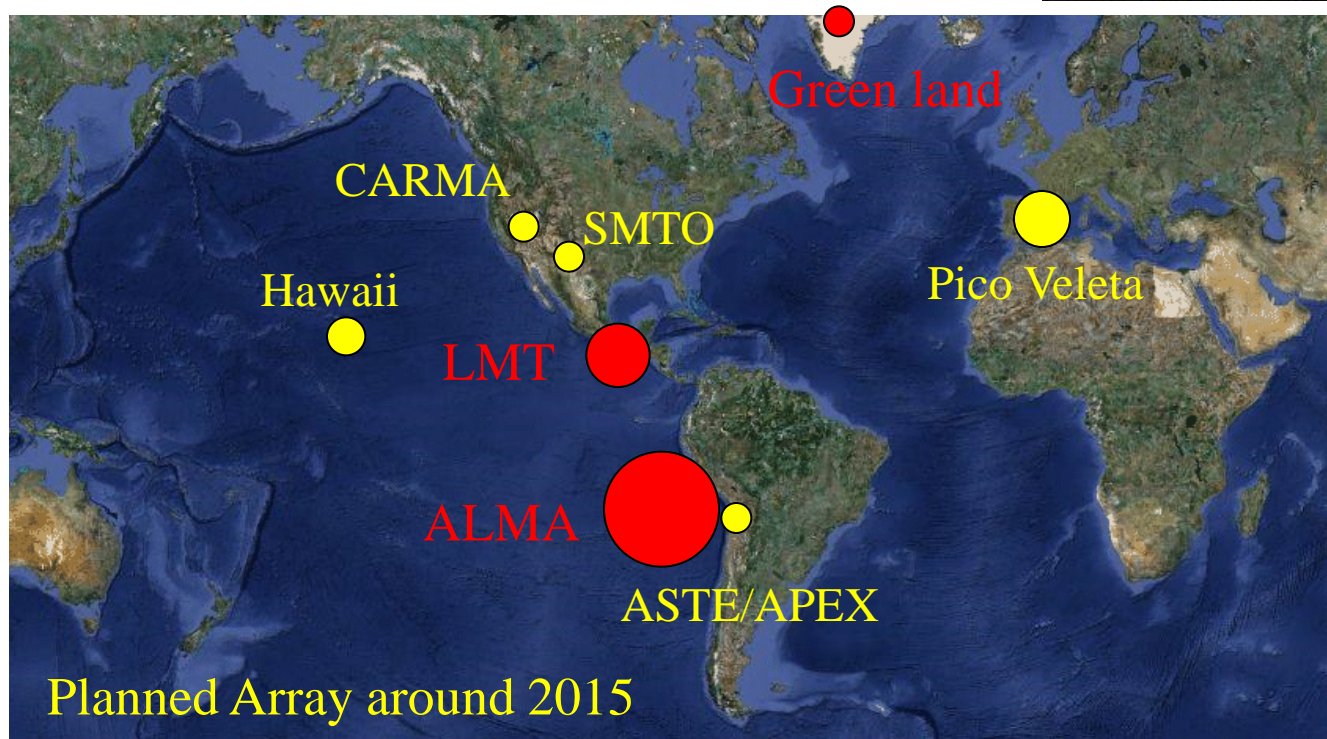
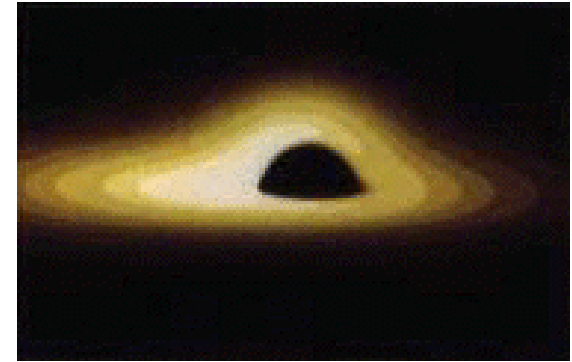
– 収束プロファイルが変化する
場所と一致

- MHDモデルでは収束と加
速が同時に起こるという
点で、MHDモデルの予測
と一致する



BH極近傍に迫る : Event Horizon Telescope

- Global network of mm/sub-mm VLBI to Image BH shadow, jet-root etc.
- Target source : Sgr A*, M87, Blazars, etc.
- Target resolution : $\sim 20 \mu\text{as}$ or higher

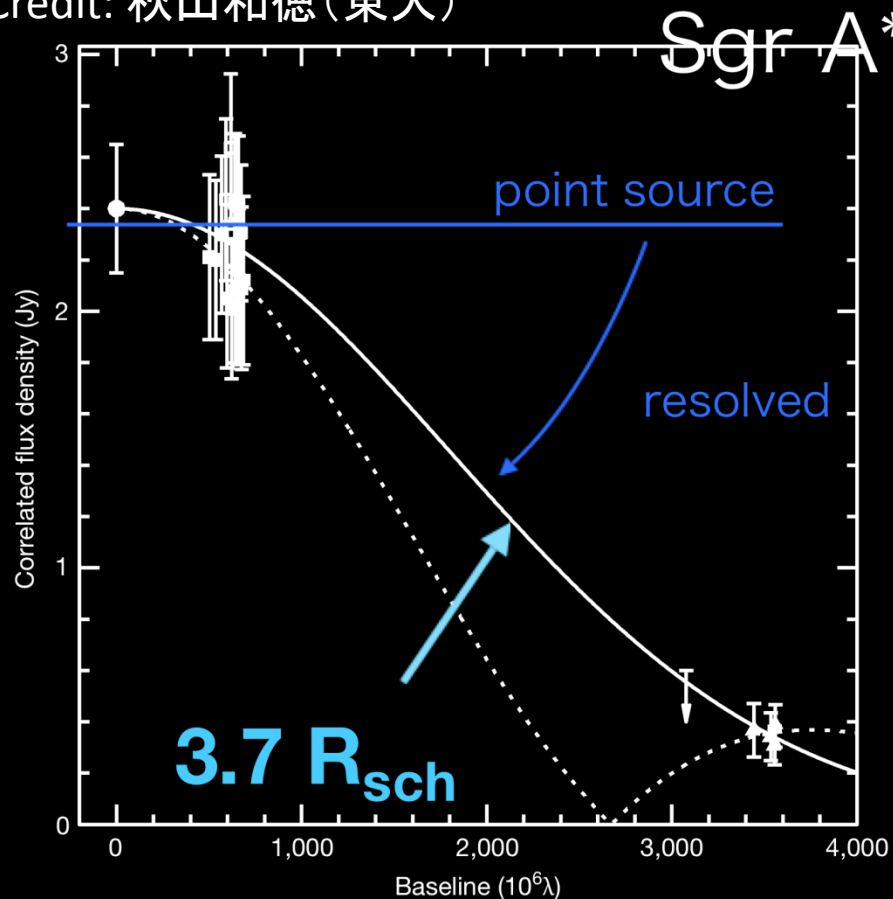


Phase-up ALMA joining in ~ 2015

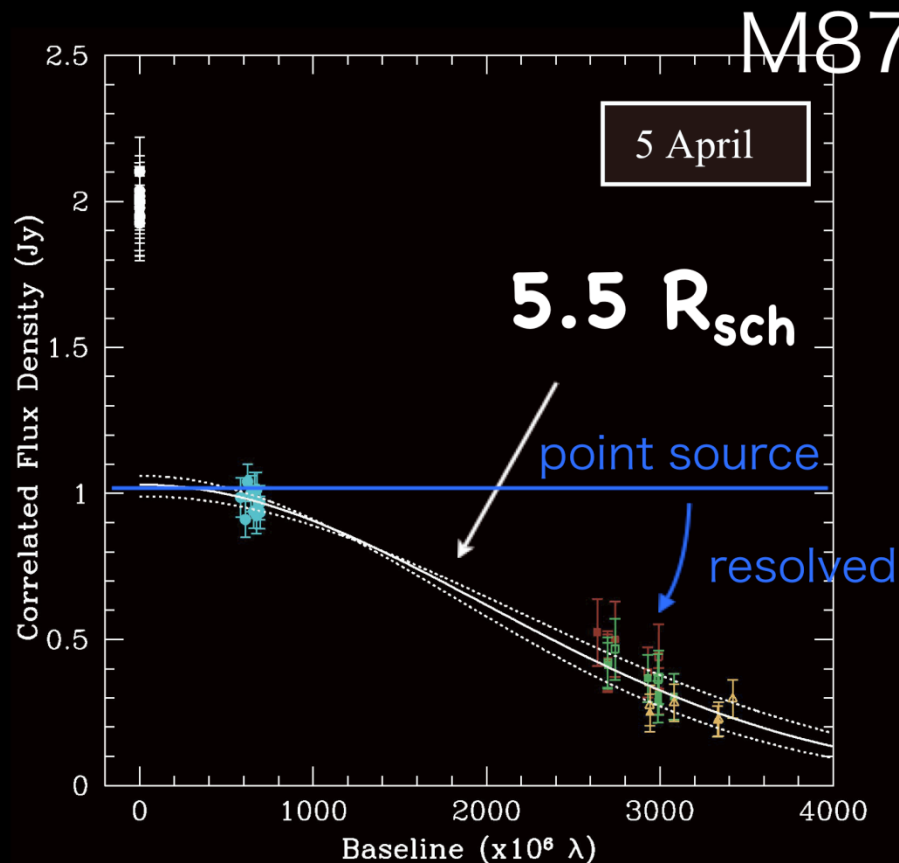
the first EHT observations of Sgr A* and M87

EHT 230 GHz

Credit: 秋山和徳(東大)



Doeleman et al. 2012,
Nature



Doeleman et al. 2012,
Science

- 1.3 mm emission is very compact ($\sim 3.7 R_{Sch}$, $\sim 5.5 R_{Sch}$ for M87)

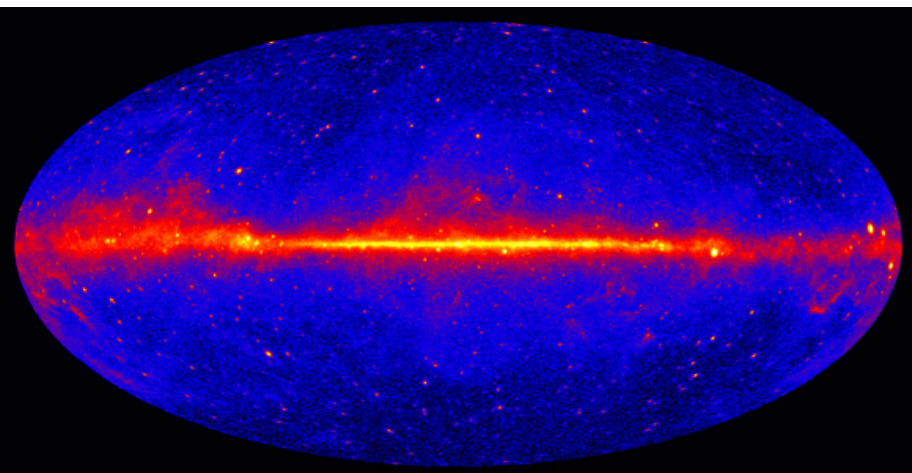
放射体の大きさが測れた段階。撮像はこれから(ALMAのVLBI化が必要)

2. 多波長放射

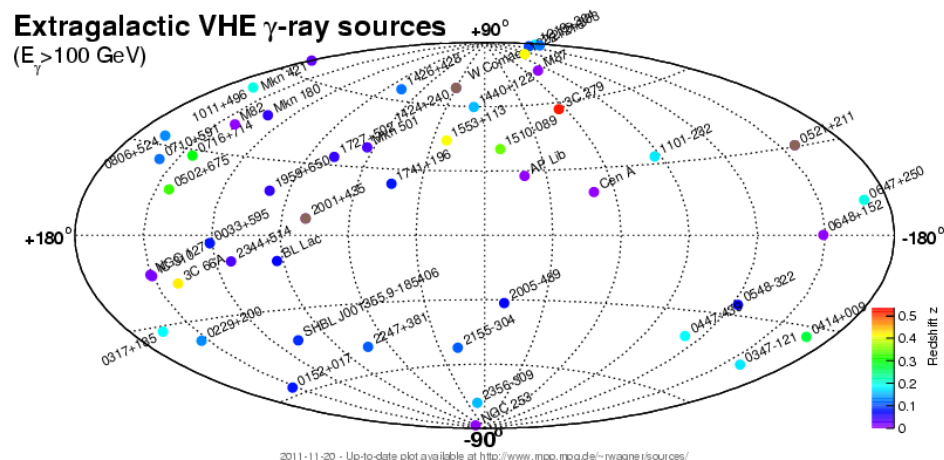
(特に高エネルギー放射と電波放射の関係)

HE/VHE Gamma-ray Sources

Fermi/LAT 5-yr (GeV)

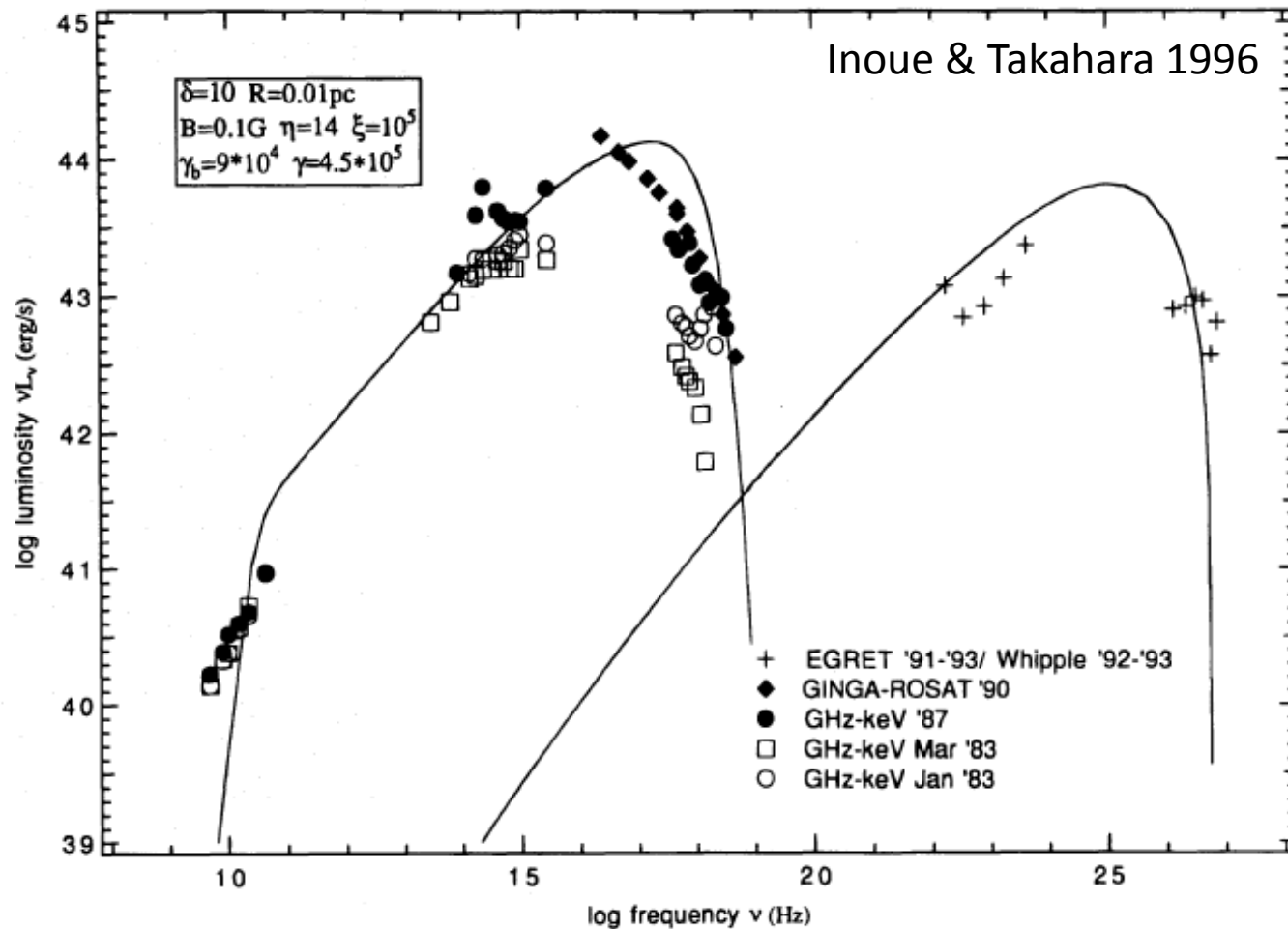


Cherenkov (>100GeV)



- Extragalactic HE gamma-ray sources ~ 1000
- Extragalactic VHE gamma-ray sources ~ 50
- ほとんどはブレイザー、わずかながら電波銀河、NLSy1 など

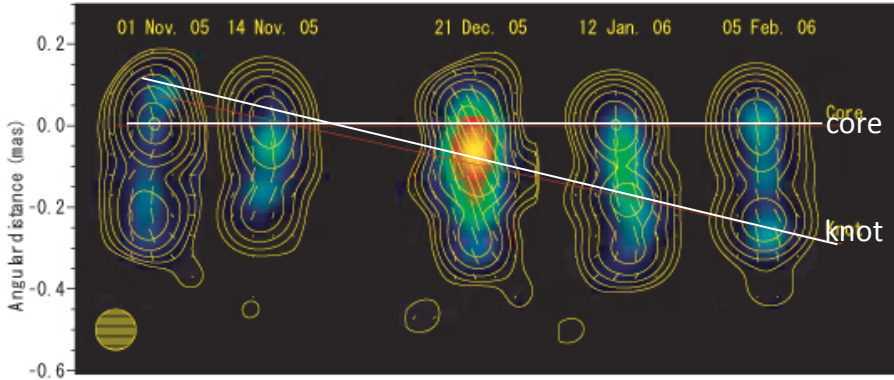
γ 線放射の基本的理解



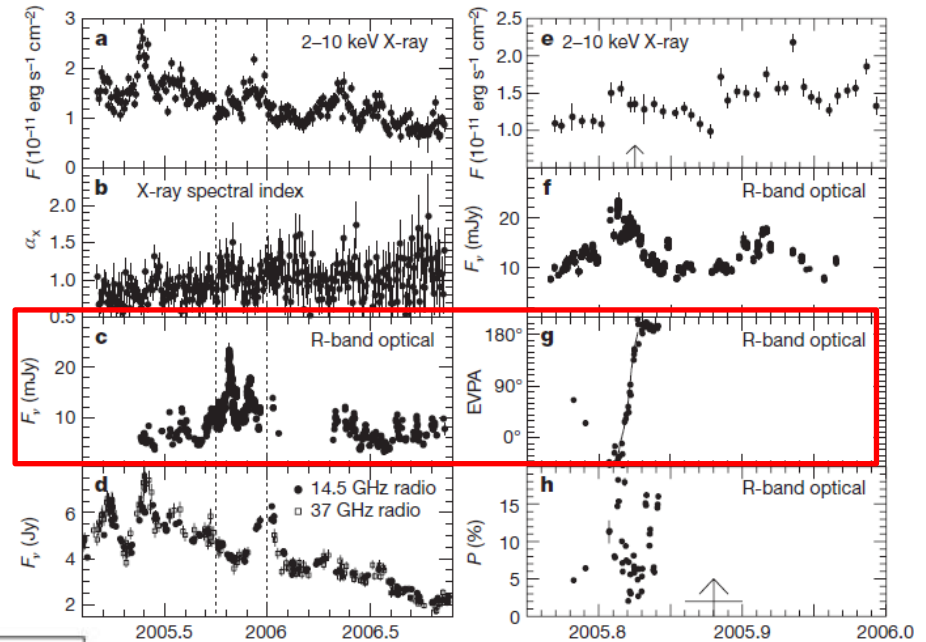
- 低エネ側のシンクロトン光子 (and/or 外部光子) を逆コンプトンすることで γ 線を作る (相対論的ビーミングが必要 $\Gamma \sim 10$)

γ線放射源はどこか？

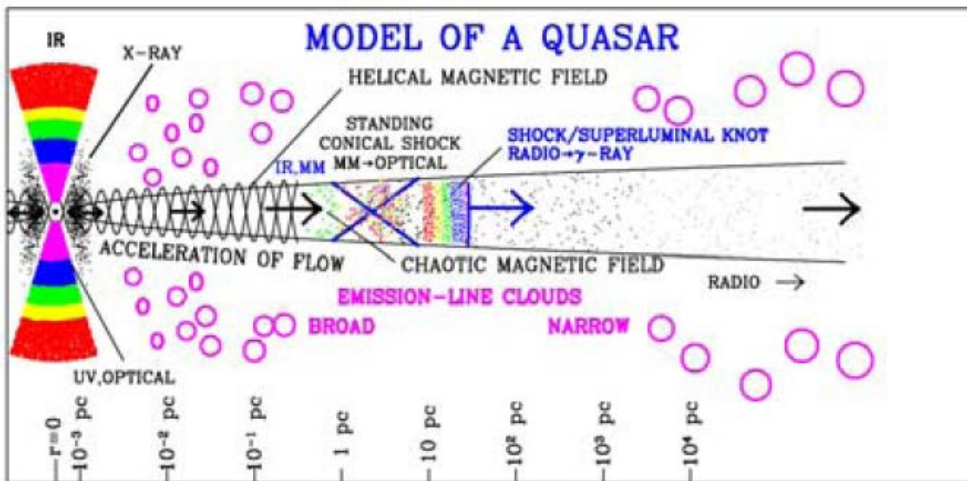
BL Lac



Marscher+ 2008, Nature

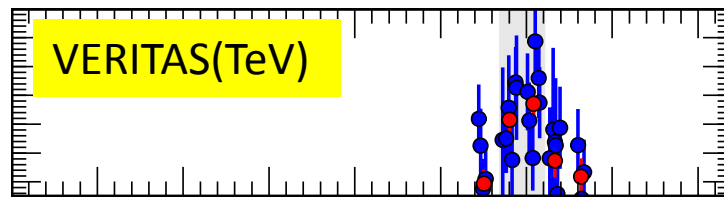
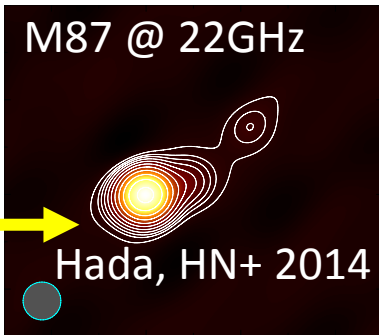
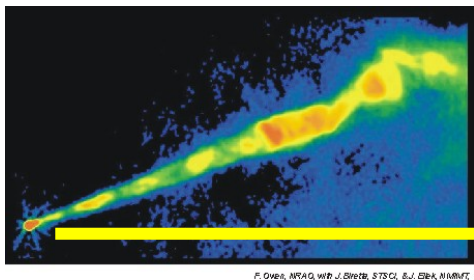


1-10 pc (10^5 - $10^6 r_s$) from BH



- 超光速ノットが電波コアを通過する際にγ線フレア
- その直前に可視光偏光角の回転起こる

電波銀河M87の場合



Fermi

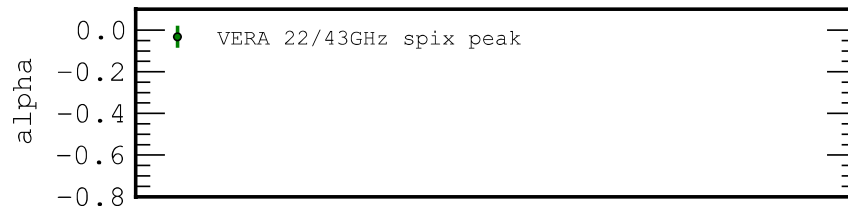
SMA

EVN

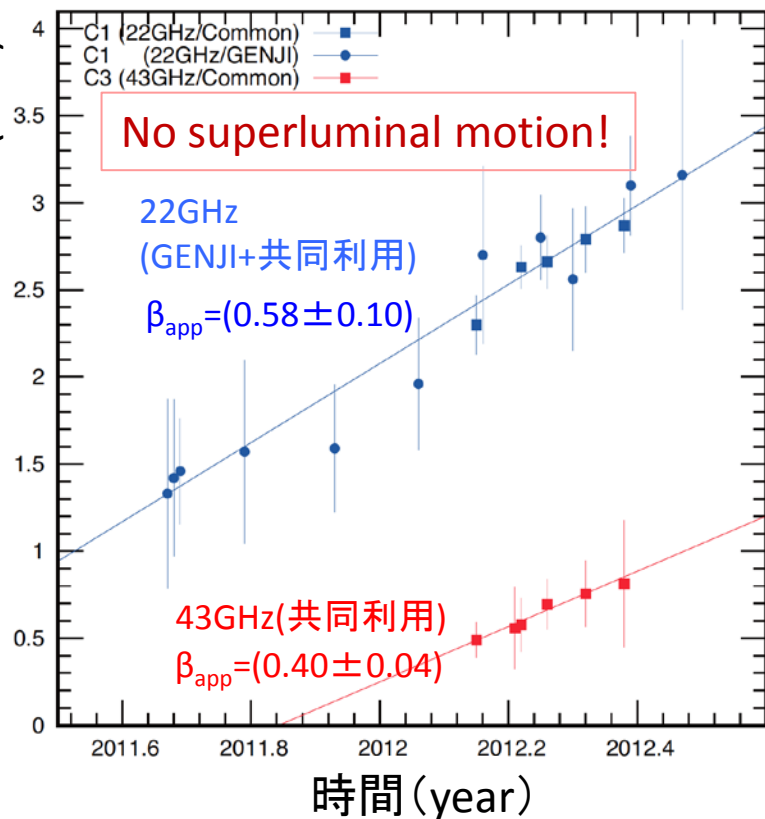
VERA共同 43GHz

GENJI/VERA 22GHz

EVN



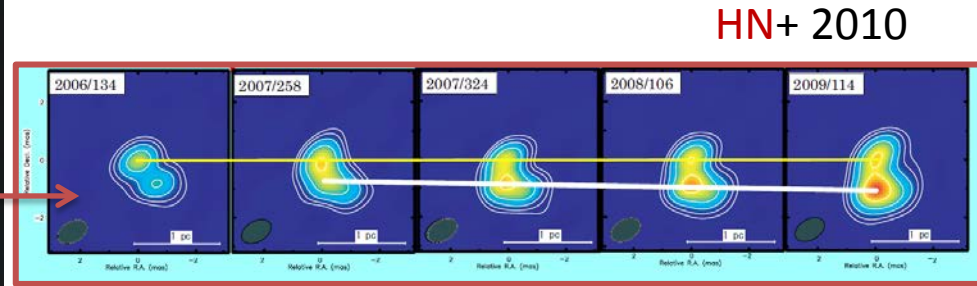
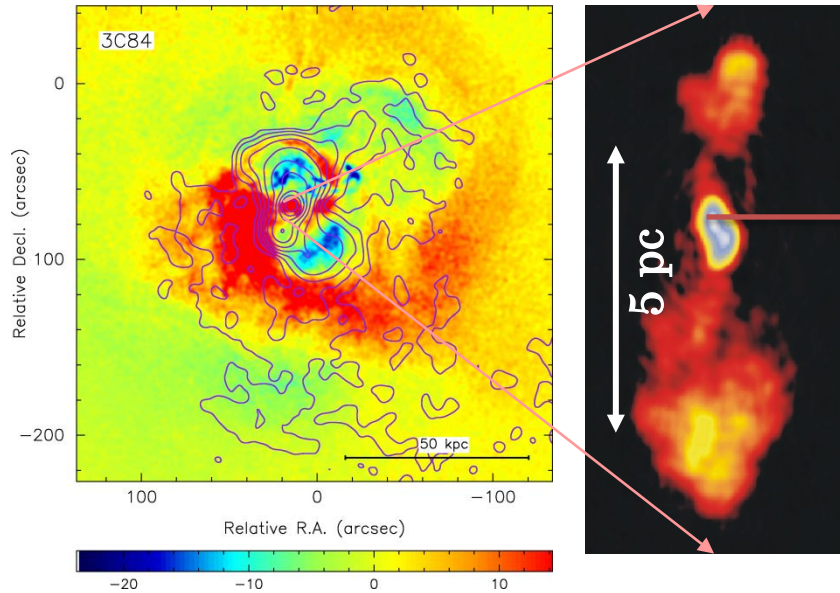
電波コアからの距離 (mas)



以内

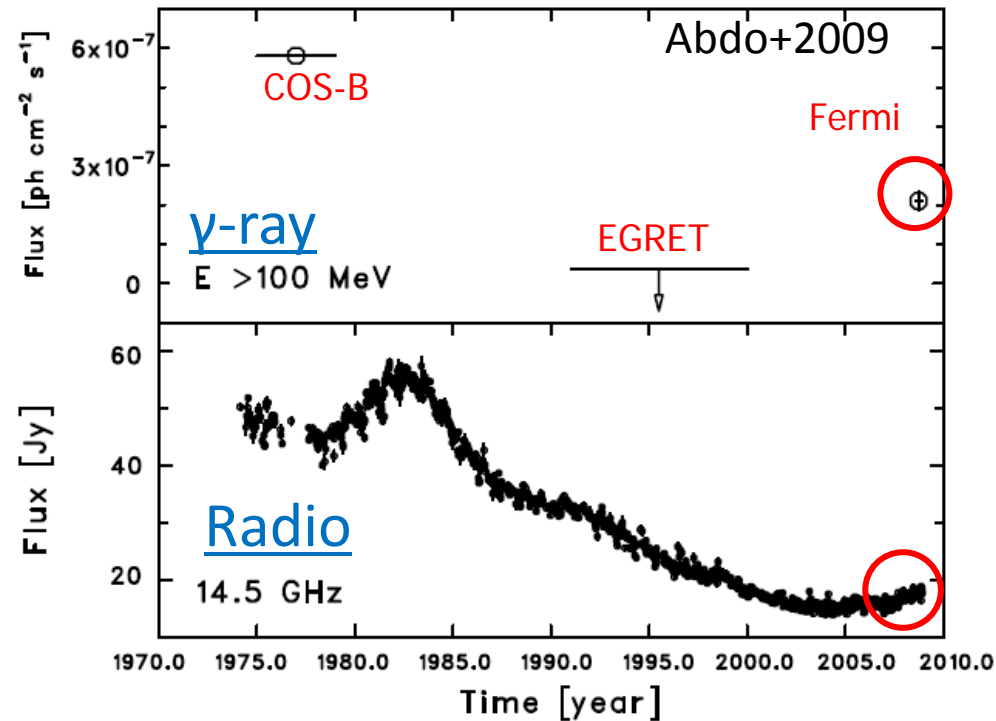
me (MJD)

Perseus A (3C 84)

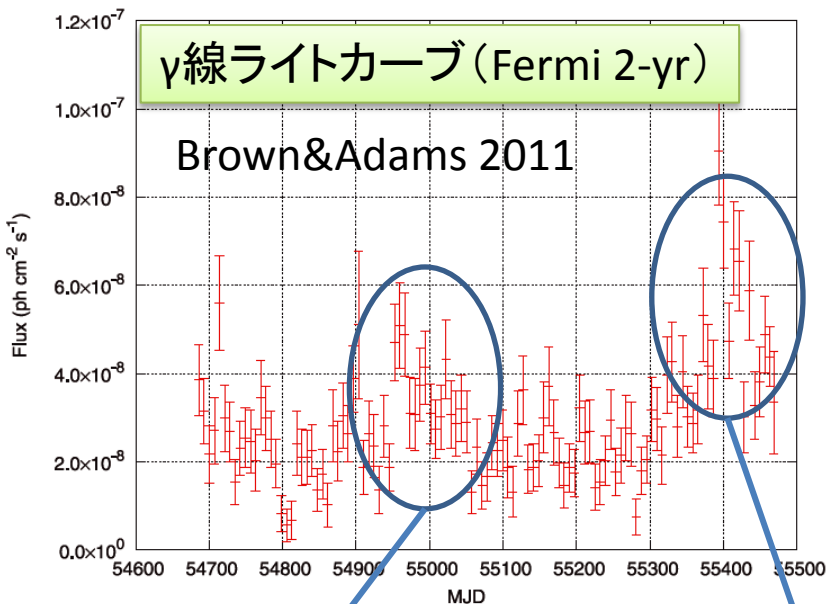


$v \sim 0.3c$ (see also Chida's presentation)

- γ 線が検出されている数少ない電波銀河
- 長期的には電波コアと γ 線の活動に相関がある
 - γ 線放射領域はコア付近



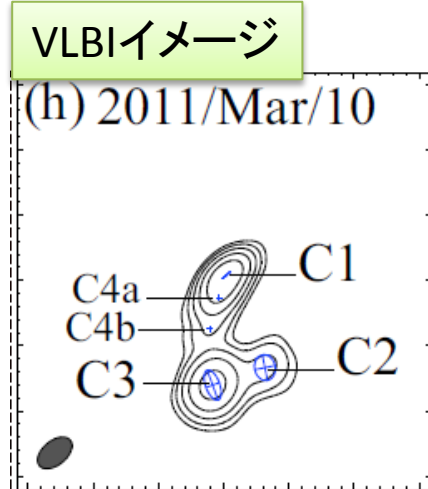
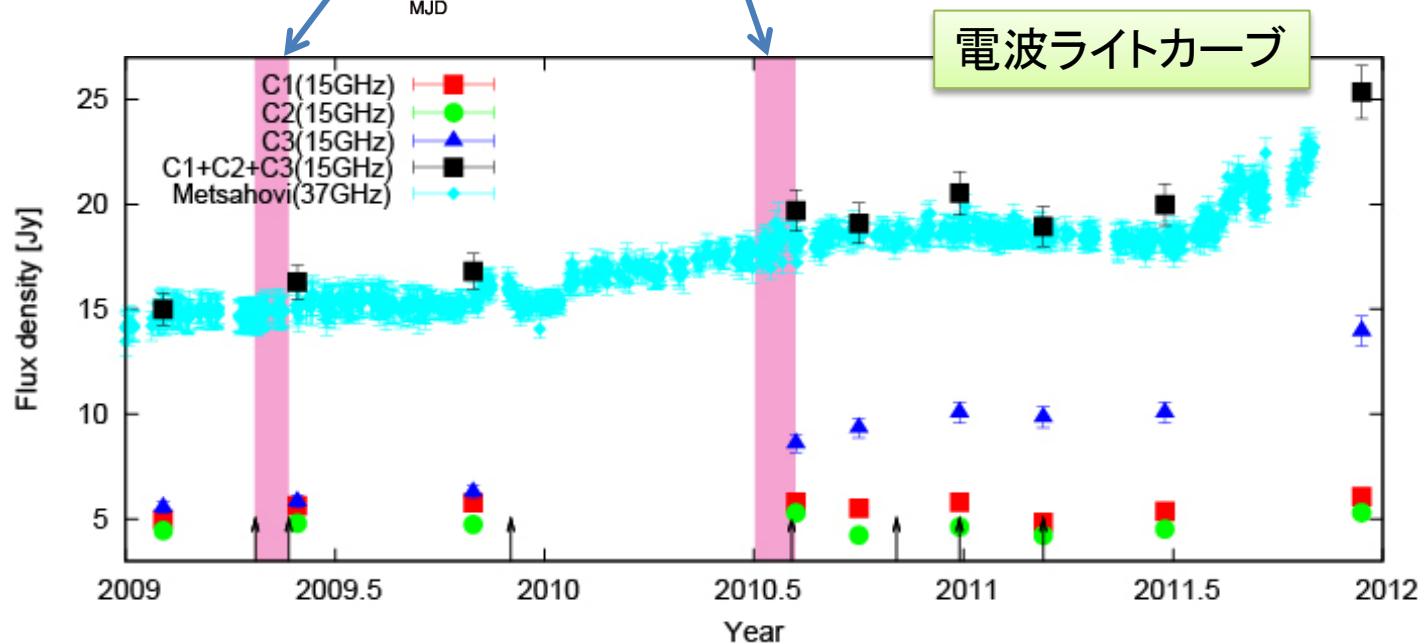
Perseus A (3C 84)



- 2回の顕著なガンマ線フレア
– ~days-weeksスケールの変動

- これに対応した電波変動は発見できなかった

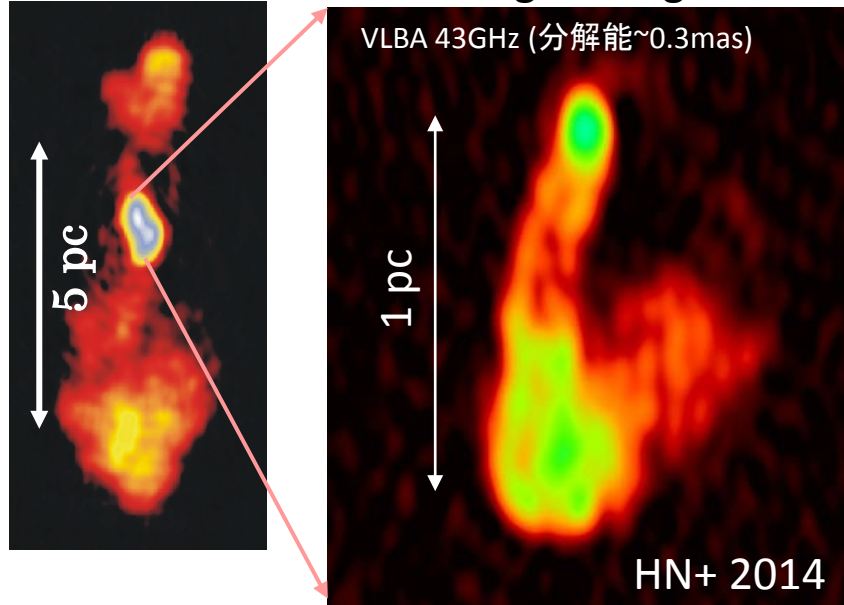
※単一鏡ライトカーブとVLBIライトカーブのトレンドはよく一致しているのので、単一鏡で見られる増光成分はVLBIスケールに起因していると考えてよい



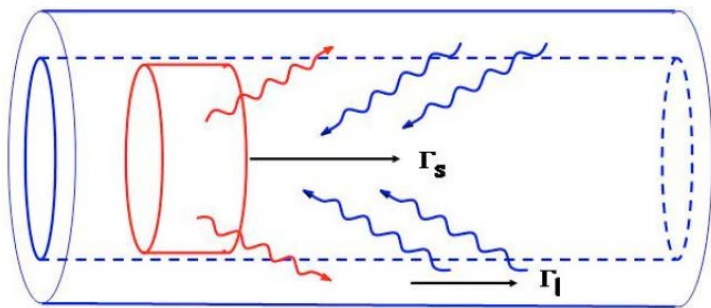
HN+ 2012

円筒構造 -> 多層構造の示唆

3C84で観測されたlimb brightening

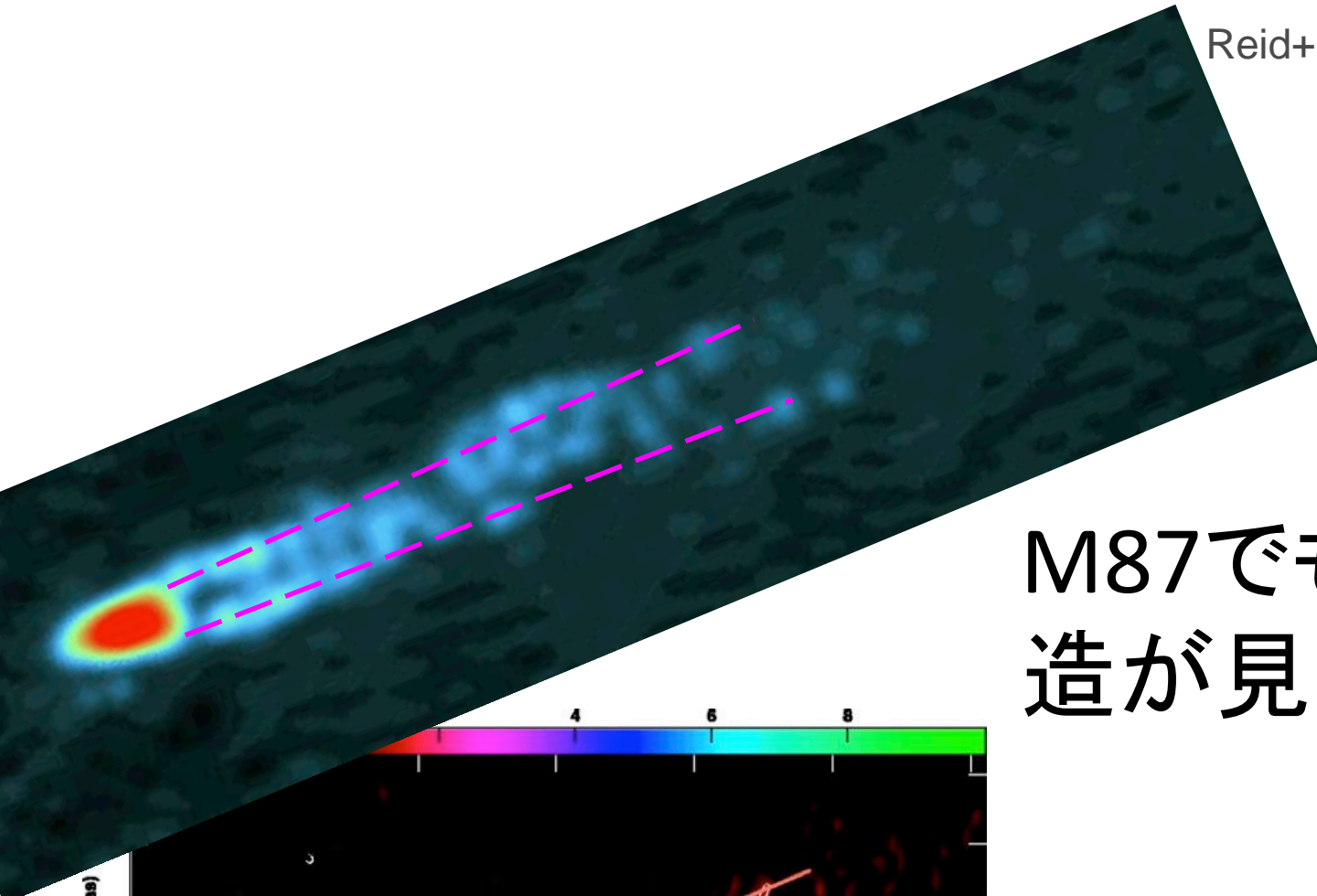


- 軸(spine)と鞘(sheath)で速度の異なる流れ
- 電波放射: sheathからのシンクロトロン
- γ 線放射: sheathまたはspineからの種光子を逆コンプトン
- Spineからの種光子の量が変化した場合、 γ 線光度は変動するが電波は変動しない

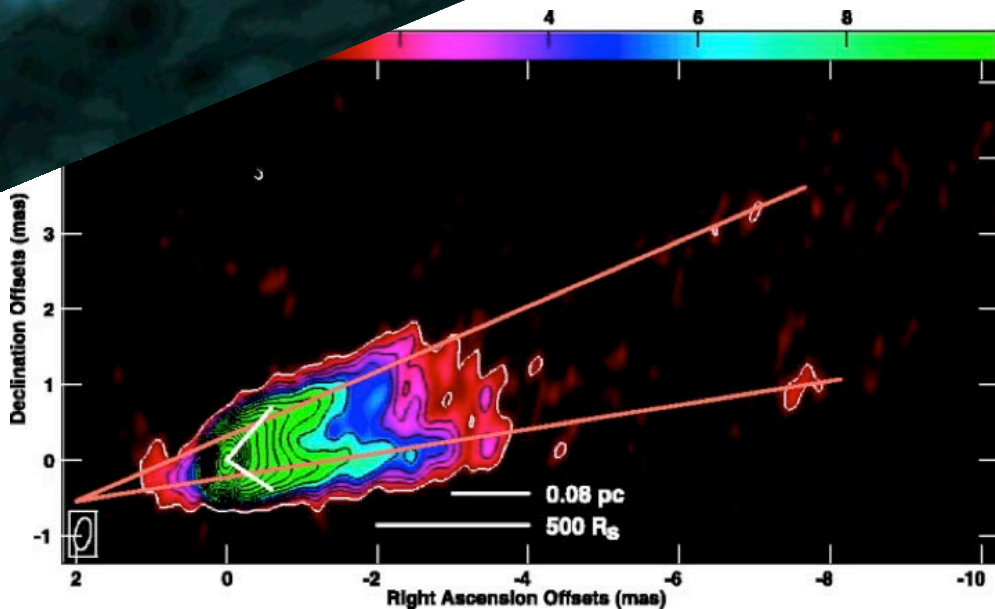


Spine-Sheath model (Ghisellini+ 2005)

Reid+



M87でも円筒構造が見えている



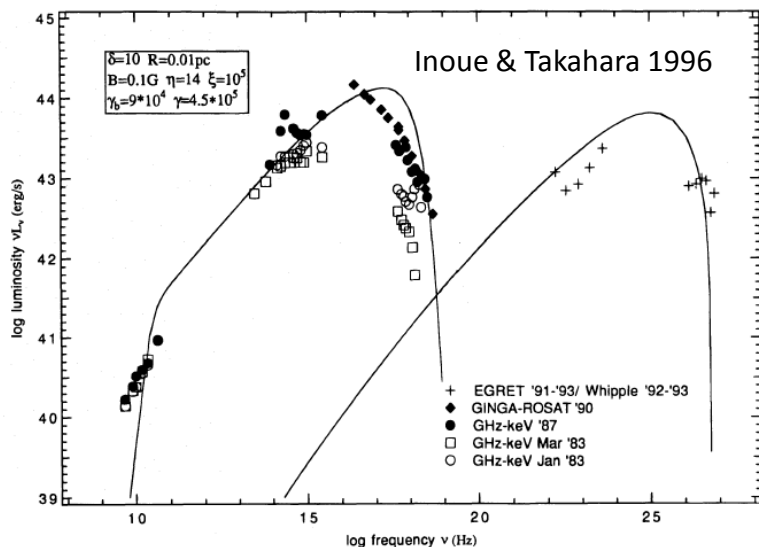
Walker+

ここまでのまとめ

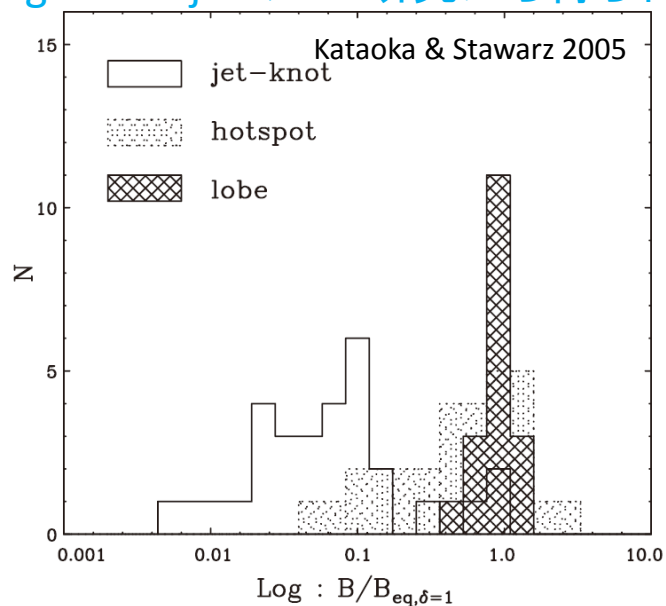
- γ 線フレアには個性があるが、大局的には以下のようにまとめられる
 - ブレーザー（視線角が小さいジェット）
 - γ 線フレアと電波増光は密接に関係
 - 超光速電波ノットが出現
 - 電波銀河（視線角が大きいジェット）
 - M87: VHE γ 線フレアに呼応した電波コアの増光。しかし、ジェットは準相対論的
 - 3C 84: HE/VHE γ 線フレアに呼応した顕著な電波変動は見られない。ジェットは準相対論的？
- ⇒ 電波銀河ではクリアな相関がない傾向
- 視線角によって、電波と γ 線の相関の度合いが変わる
 - 多層構造が有力な解釈

電磁場優勢 vs. 物質優勢

ブレイザー(ジェットの根元)のSED



Large scale jetのSED研究から得られた磁場



- ジェットの多波長SED

- Synchrotron + Synchrotron-self Compton (SSC)

- $L_{SSC}/L_{syn} \propto u_e/u_B$

- ジェットの根元 (blazar zone) では粒子のエネルギーが約10倍卓越

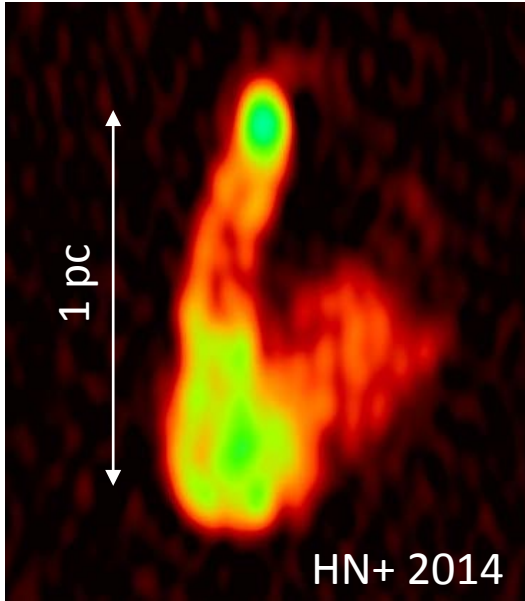
- BH近傍で電磁場卓越であっても、放射領域までに物質優勢になっていなければならない

- kpcスケールのノット、ホットスポット、ローブでも、おおよそ $u_e > u_B$

- 下流に至るまで物質優勢の状態が保たれる

理論の主流(MHD)との整合性は悪い

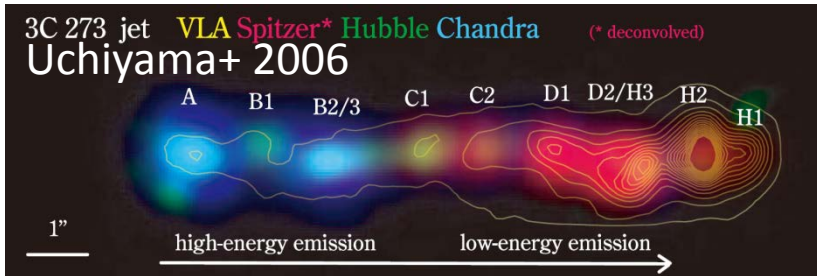
多層構造を考慮した場合の u_e/u_B



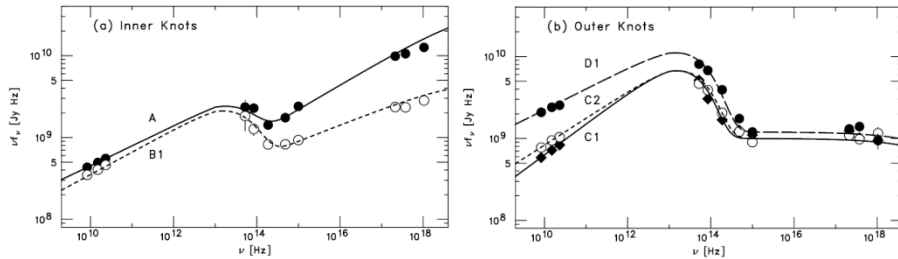
- 3C 84, M 87のように円筒構造は、太さ方向に流れの速度が変化する多層構造を示唆する

- **Mkn 501:** Fig. 2 shows the “fits” to the SED of Mkn 501 in its flaring state of April 1997 (Pian et al. 1998). Note the rather moderate bulk Lorentz factor used for the spine ($\Gamma_s = 15$), which has the same value as the one used by GK03. The rather large value of the magnetic field ensures near-equipartition between magnetic and particle energy
- **Mkn 421:** Figure 3 shows our model compared with different simultaneous SED of this source, and aiming to “fit” the highest state. The bulk Lorentz factor of the spine is $\Gamma_s = 17$, which at a viewing angle $\theta = 2.5^\circ$ leads to a beaming factor $\delta = 22$. The remarkable difference with respect to a simple one zone SSC model is the much larger value of the magnetic field: 1 Gauss compared with $B \sim 0.02\text{--}0.1$ Gauss (see the references quoted in the Introduction). This brings

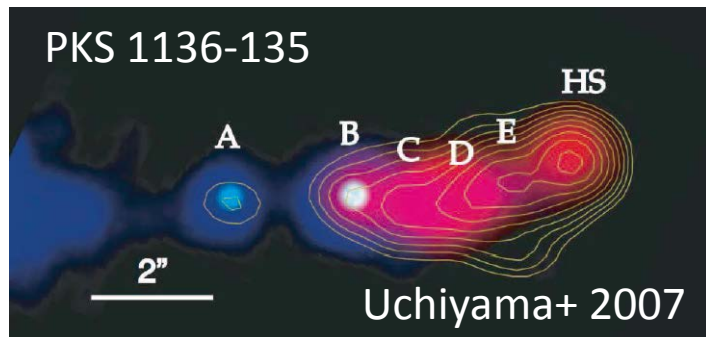
Large scale jetの場合



- Synch+ICではなく、double SynchrotronでもSEDが表現できることが示された

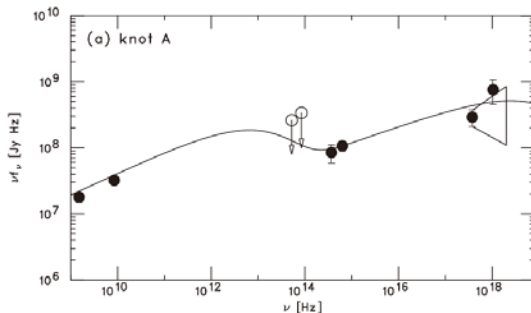


- Synch + IC(と、そこから導かれた粒子卓越)の描像に疑問を投げかける



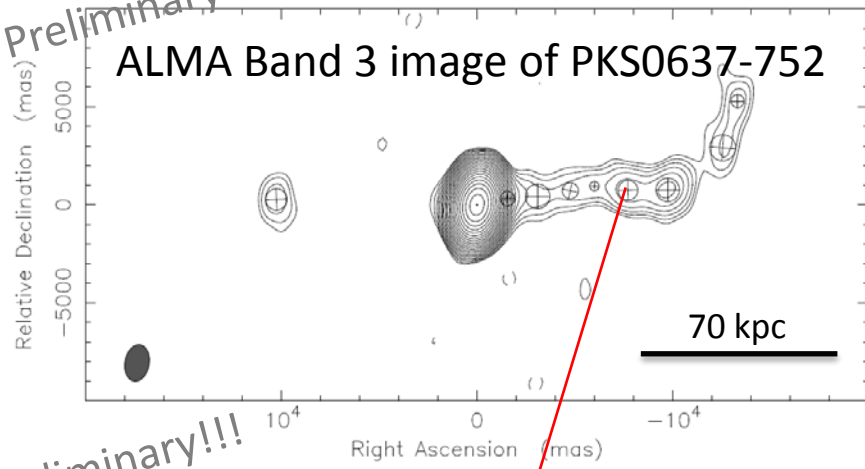
- 驚くべきことに、下流と上流で低エネ成分と高エネ成分の比が変化する

— 一成分では説明が難しい



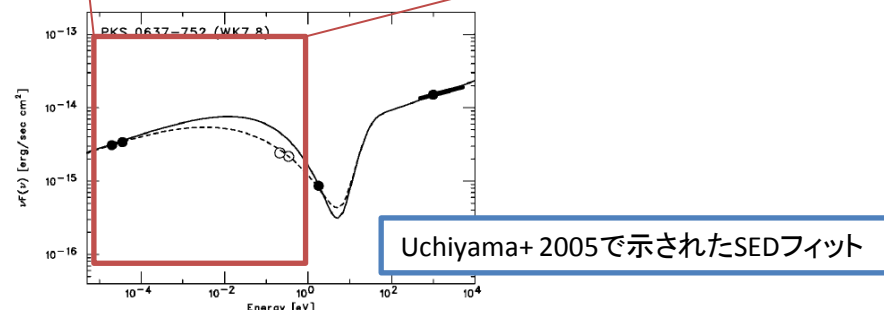
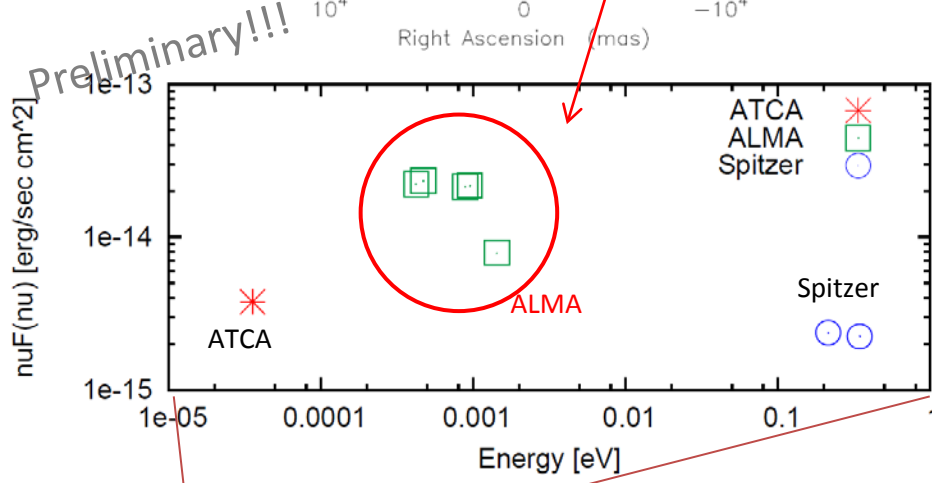
ALMAによるディープイメージング

J0637-7520 at 114.062 GHz 2012 Apr 06



- Cycle 0アーカイブデータ
- PKS 0637-752
- phase calibratorとして観測

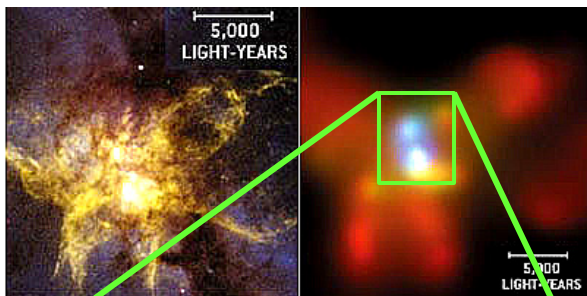
- “しっかりと”イメージングすると、large scale jetが浮かび上がった
- センチ波 (ATCA) と赤外線 (Spitzer) は単一のシンクロトロンで結ぶのは困難
- kpcジェットにおける新たなSED研究の幕開けの予感
- 今後、ALMAで発展が期待される分野



3. 様々なAGN種族の電波放射 (アラカルト)

AGN jets in LIRG

NGC 6240

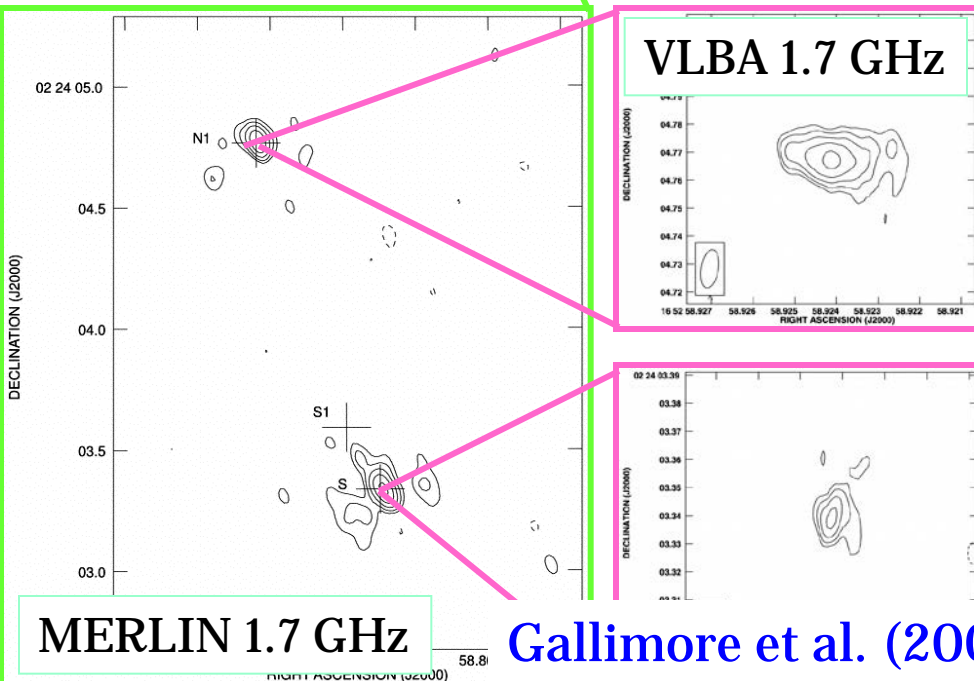
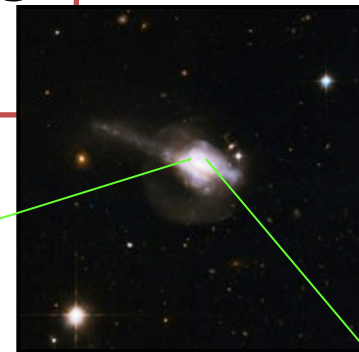


NASA/ROLAND P. VAN DER MAREL and
JORIS GERSSEN *Spitzer Telescope*
Science Institute

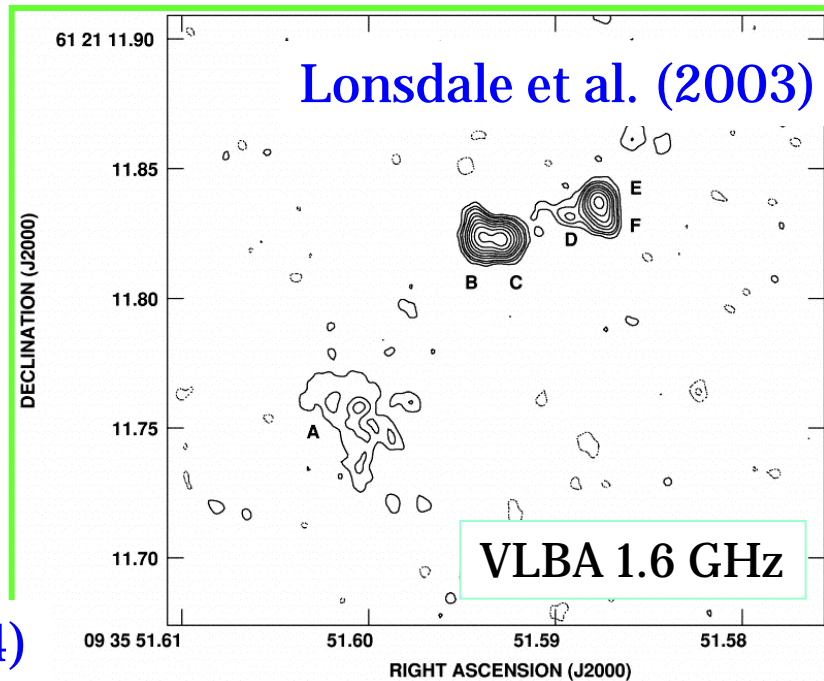
NASA/CXC/STEFANIE KOMASSA
Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics

この天体の場合、
エネルギー源が AGN である
可能性は残る

UGC 5101



Gallimore et al. (2004)



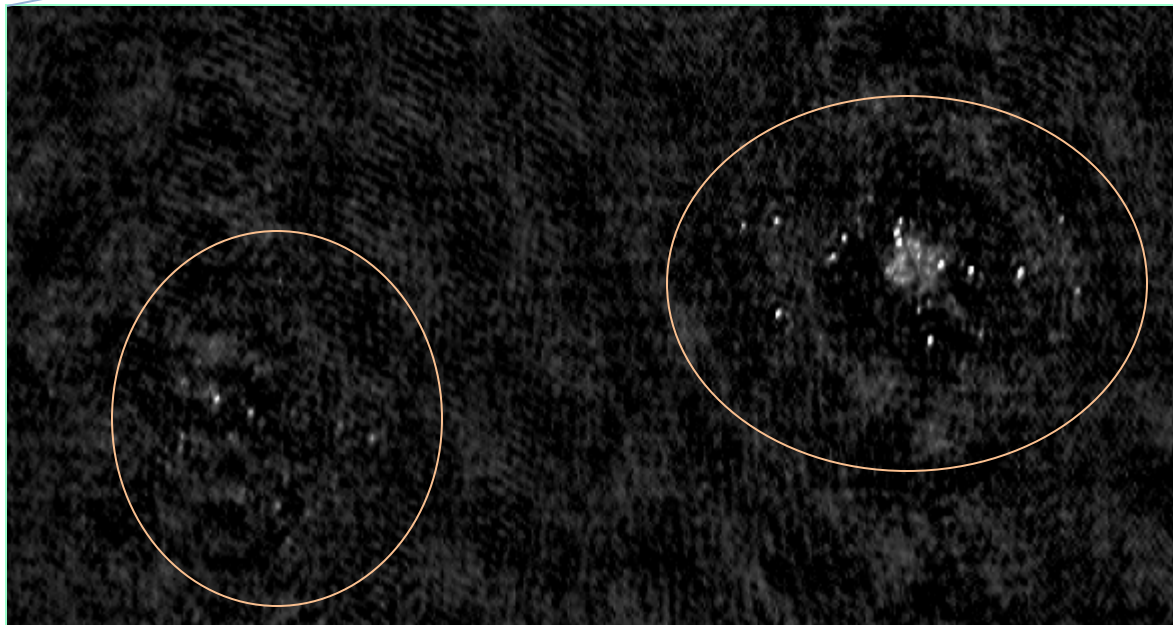
Lonsdale et al. (2003)

SNRs in LIRG

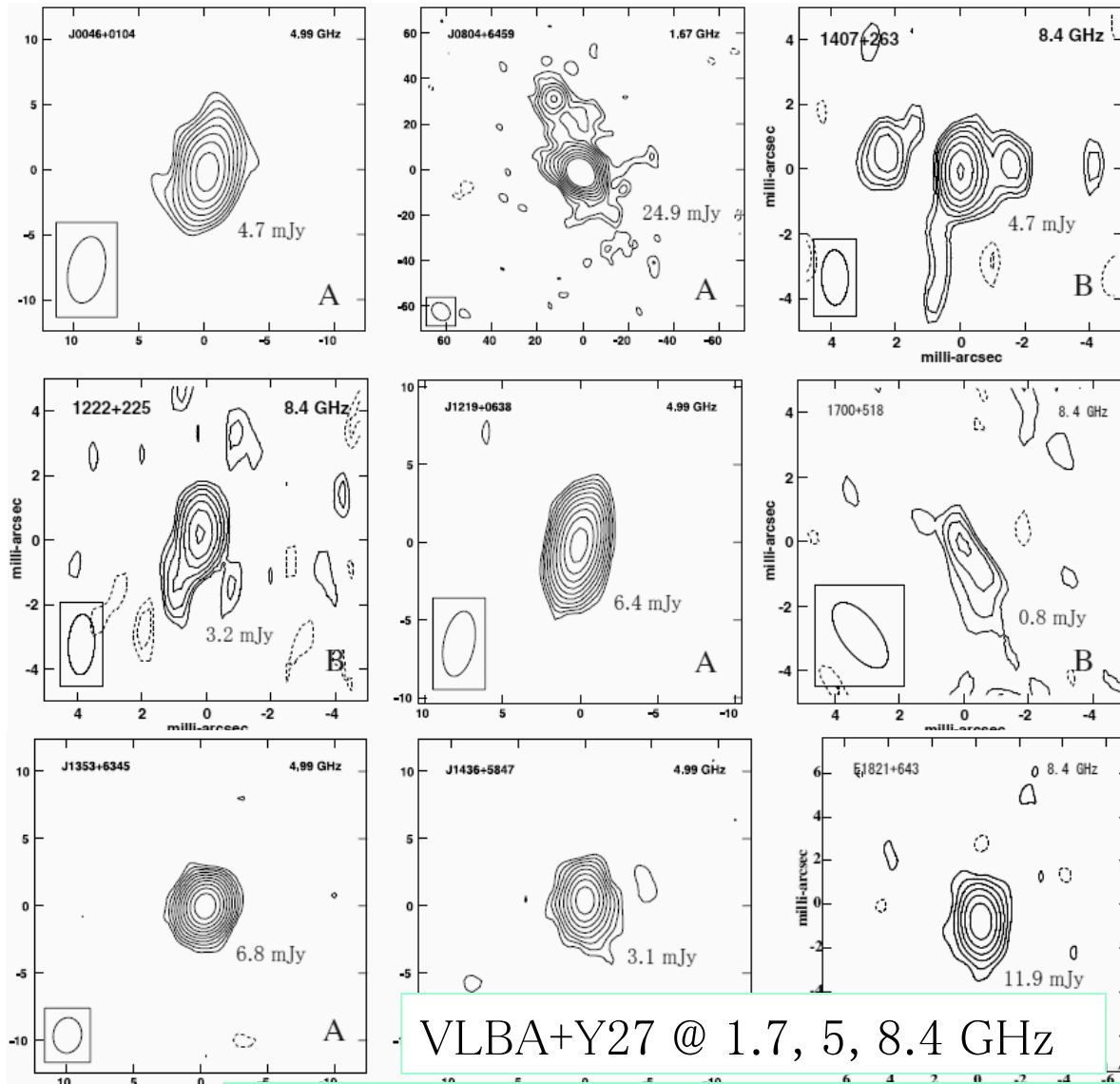
Lonsdale et al. 2003

VLBA+Y27+GBT+Arecibo+EVN × 5 @ 1.6 GHz

- 約50 の微弱点源 (超新星クラスター)
- エネルギー源は nuclear starburst か



Radio-quiet QSO (RQQ)



複数のRQQで確認

$T_B > 10^8$ K の放射
 \Rightarrow AGNジェット起源

RLQと本質的には変わらない

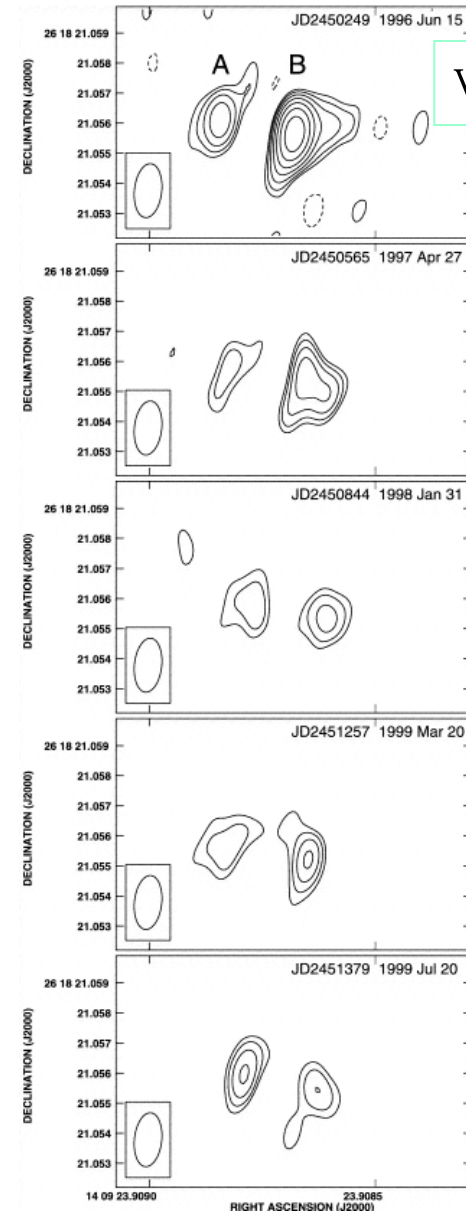
VLBA+Y27 @ 1.7, 5, 8.4 GHz

Superluminal motion in RQQ

Blundell et al. 2003

400日のうちに
構造の劇的な変化

ドップラーファクター $\delta > 10$
の相対論的ジェットを示唆

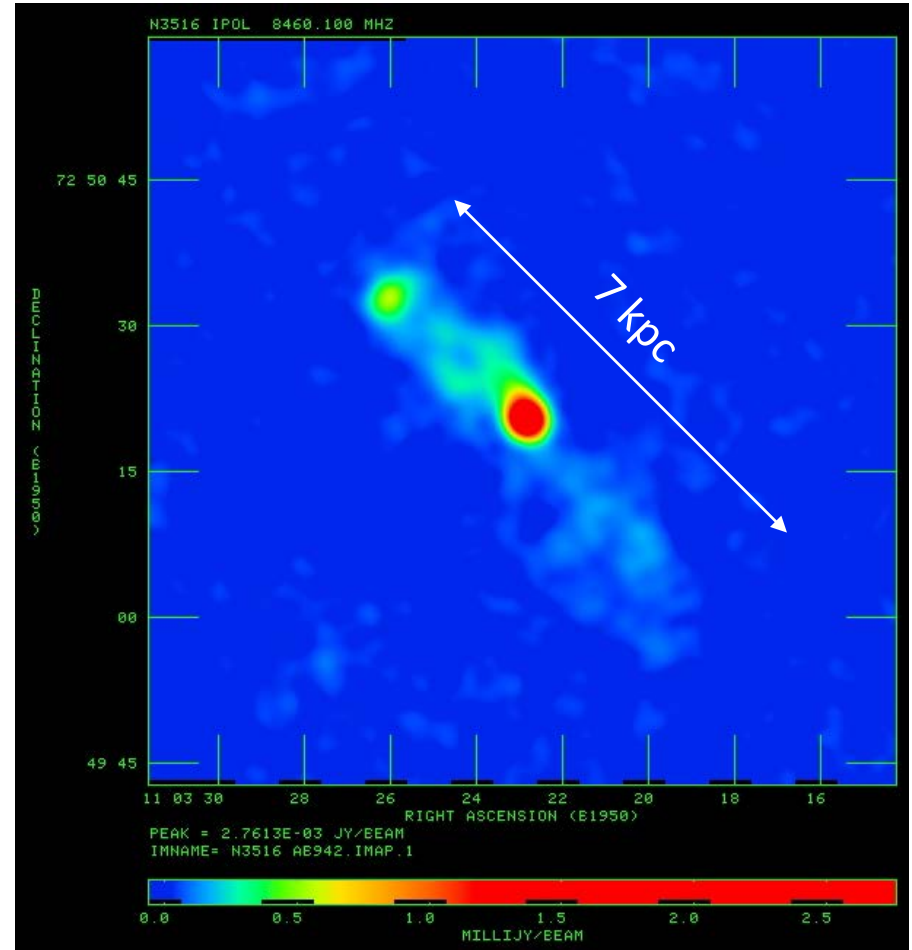


VLBA+Y27

PG 1407+263

Seyfert galaxy

- NGC3516
- 中心核フラックス $\sim 3\text{mJy}$
- 高感度イメージングすると、しっかりとした電波ローブが浮かび上がる
 - 同様のSeyfertの報告例多数 (Giroletti+ 09, Orienti+ 10, Nagar+ 05)
 - 中心核パワーによらず、比較的大きな電波構造を作れることを示唆？
- FR1.5-like morphology
 - ジェットパワーが非対称？



HN, Noda+ in prep.

低光度AGN

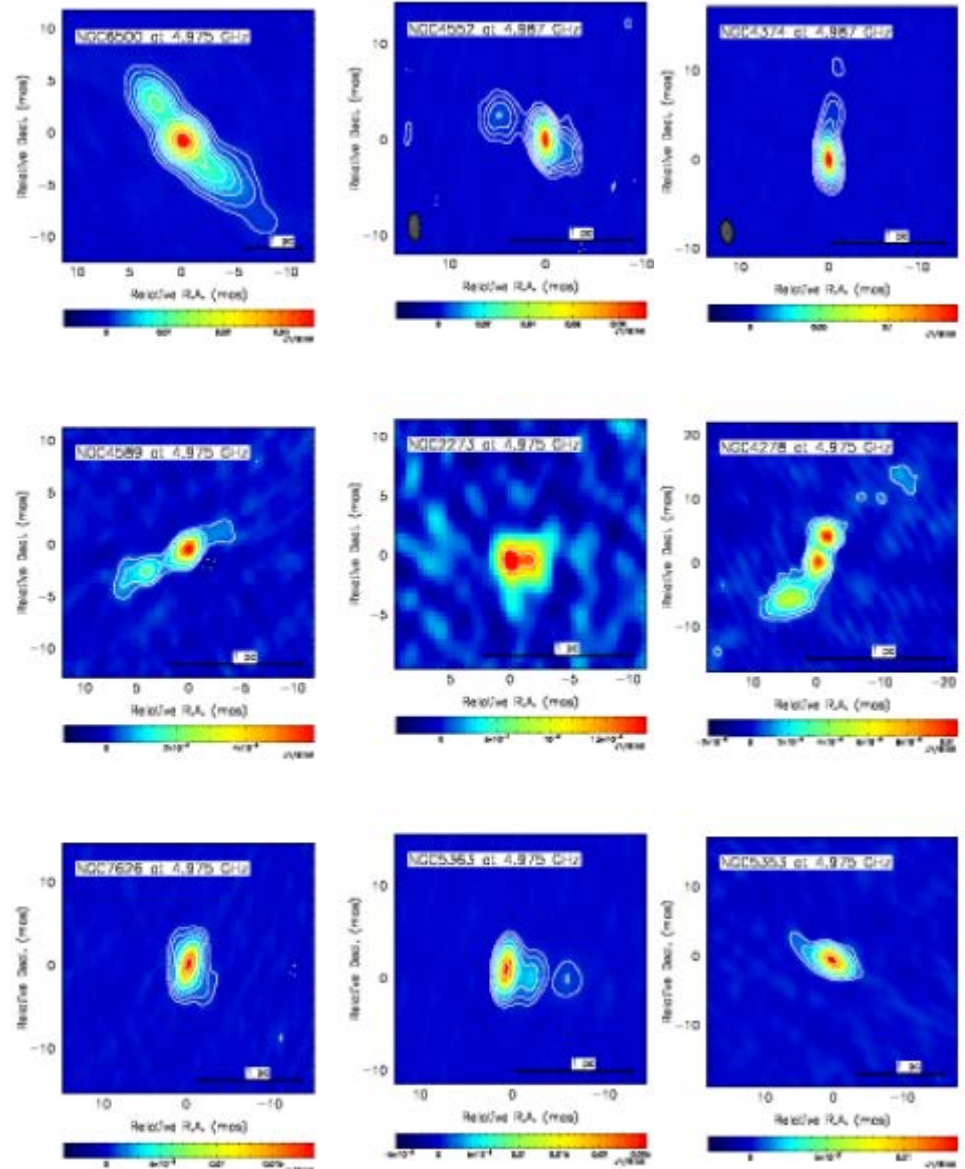
Nagar, Falcke, Ulvestad, Anderson

VLBIの感度向上により、低光度AGNの高分解能イメージが見られるようになって来た(see also Nakahara's poster)

■ All known LLAGNs of >1.5 mJy

■ Results

- * 42/43 detected
- * Two types:
 - core+weak jet
 - FR-I core?
- * core: still unresolved



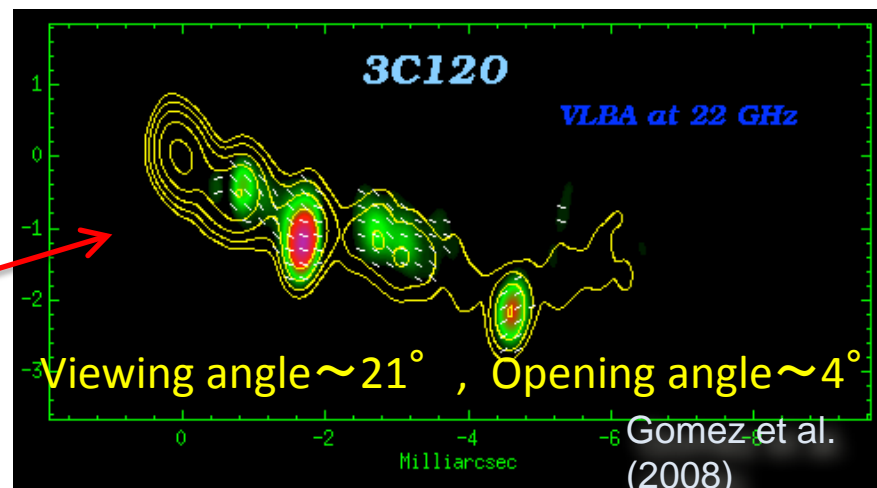
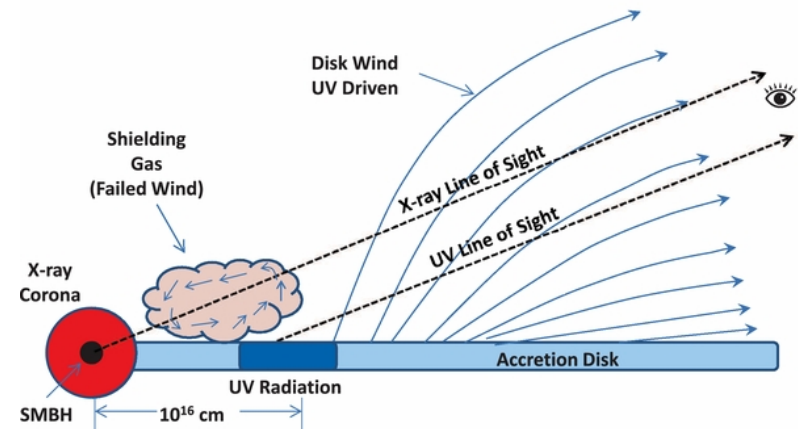
Pole-on Viewed UFOs/BAL?

List of Known UFO sources

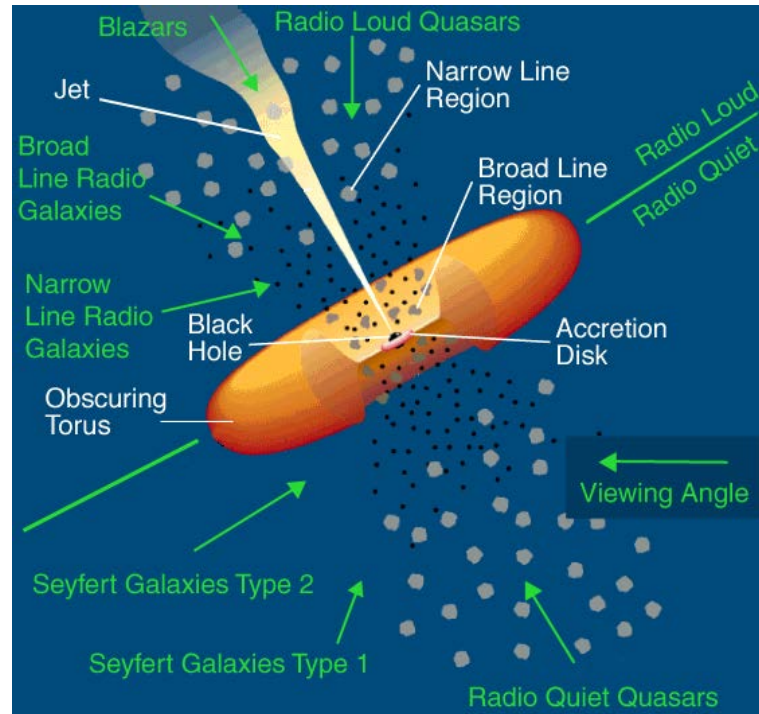
NGC 4151	
IC4329A	
NGC 3783	
NGC 3516	
Mrk 509	
Ark 120	
Mrk 279	NLS1
Mrk 79	NLS1
NGC 4051	NLS1
Mrk 766	NLS1
Mrk 841	
ESO 323+G77	
1H419-577	
Mrk 290	
Mrk 205	
PG 1211+143	NLS1
MCG-5-23-16	
NGC 4507	
NGC 7582	
3C 111	super-luminal RG
3C 120	super-luminal RG
3C 390.3	super-luminal RG
APM 08279+5255	BAL
PG 1115+080	HiBAL
PDS 456	NLS1

Intriguingly,

- many NLS1s
- including both of strong and weak radio sources (→ Ohsuga+2009)
- including famous super-luminal radio galaxies



まだまだ混沌



- LIRGとAGNの関係
- Radio-quietなのに、Radio-loudと本質的に変わらない: RQQ, Seyfert, LLAGN
- 同じ種族に種別されているのにpole-on / edge-onがいる: BAL/UFO

まとめ

AGNジェットの電波観測で明らかになったことを中心に以下のトピックスについて紹介をした

- ジェット駆動機構
 - 計算機実験と比較できる時代が到来した
 - MHDモデルと一致する収束・加速プロファイルが明らかになりつつある(M87)
- 多波長放射
 - ブレーザー/電波銀河で電波- γ 線相関の度合いが違う(ただし電波銀河は観測数が少ない)
 - 多層構造を示唆か
 - Large-scale jetのSEDでも多成分の必要性が示唆される
 - アルマによって発展が期待される分野
- 様々なAGN種族の電波放射
 - AGNの統一モデルとそぐわない例をどう説明するか？