

活動銀河核の活動性と母銀河環境について (銀河 07c) 前林 隆之 (東北大学 2年)

1. Outline

このレビューでは、Hardcastle *et al.* (2006)、Allen *et al.* (2006)、Hardcastle *et al.* (2007) の論文を紹介する。そして、中心核の放射が強い Radio-Loud AGN (RL-AGN) と放射が弱い RL-AGN の性質を紹介し、その“活動性の違いの原因は、降着過程・物質の違いである”とするモデルを紹介する。

前半 (2. ~ 5.) では、イントロを兼ねて活動銀河中心核 (Active Galactic Nuclei, AGN) の統一モデルを紹介し、その構造を紹介する。その後 (6. ~ 8.) で、論文のレビューをする。そして最後 (9.) に、中心核の放射が強い/弱い RL-AGN の性質をまとめる。

2. Structure of the Universe and AGN

2. では、宇宙の構造と AGN の構造の空間スケールを紹介する。

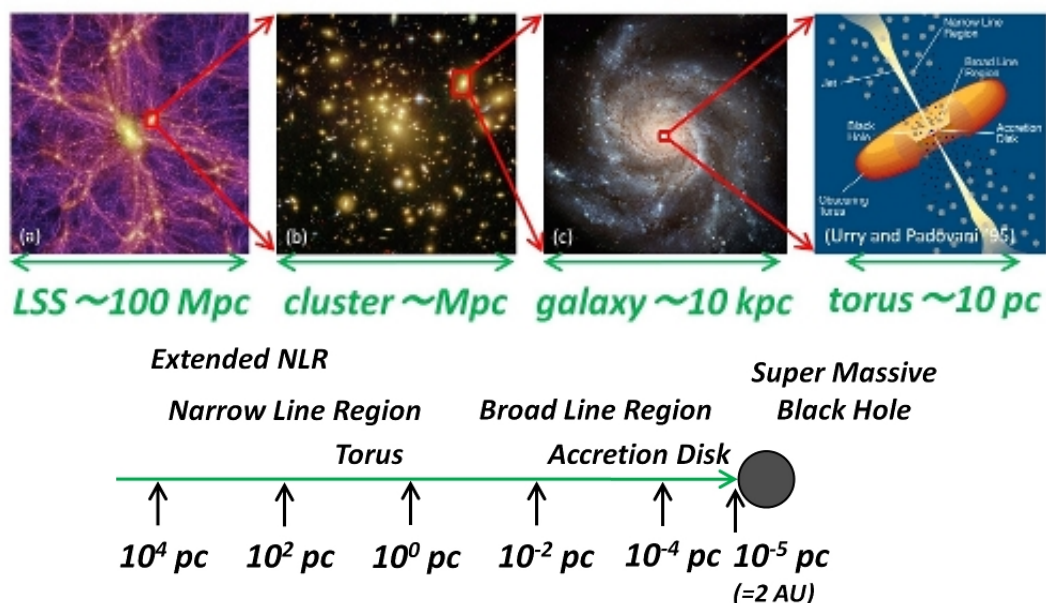


Fig. 1. 宇宙の階層構造と AGN の構造の空間スケール

Fig.1 の左側から順に、小さな空間スケールにズームアップしている。(a) は $z = 0$ での (ダークマターの) 大規模構造 (Large Scale Structure, LSS) のシミュレーション画像、(b) は $z = 0.1872$ にある銀河団 Abell 1689 の可視光画像、(c) は近傍の Sc 型渦巻き銀河 M 101 の可視光画像、一番右は AGN の内部構造の模式図である。ここで、下図の超巨大ブラックホール (Super Massive Black Hole, SMBH) とその周辺の降着円盤の空間スケールは、 $M_{\text{BH}} \sim 10^8 M_{\odot}$ の SMBH を仮定している。

3. AGN family and their properties

3. では、AGN 種族とそれらのおおまかな性質を紹介する。

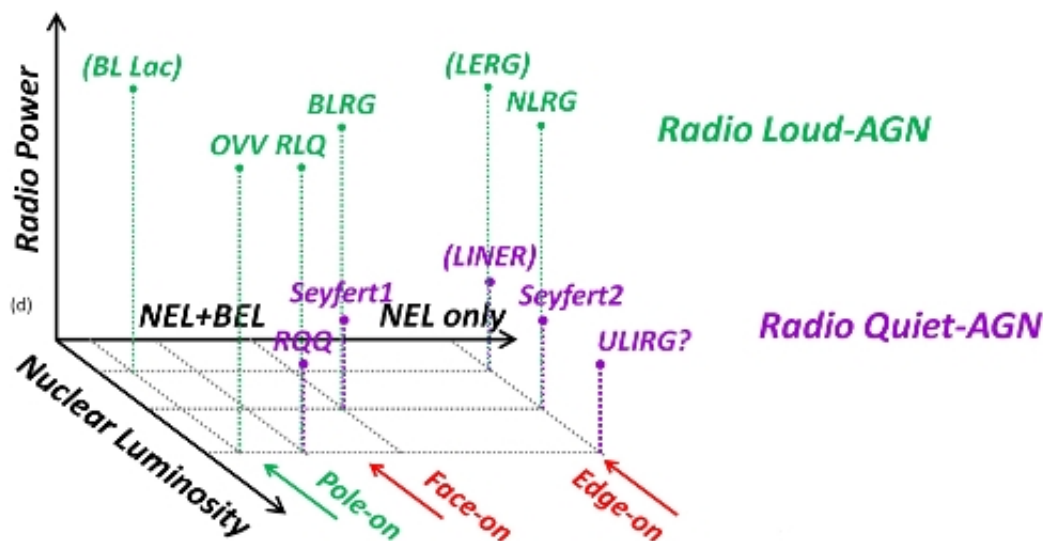


Fig. 2. AGN 種族とそれらのおおまかな性質

AGN 種族には、様々な天体が属している (Fig.2)。それらは、あくまで観測的・現象論的な分類であり、必ずしも物理的な本質を反映しているわけではない。

AGN はまず、電波で明るい暗いか (Radio Loud/Radio Quiet, RL-/RQ-) で 2 種類に大別できる。そして、さらに中心核の光度や (紫外域から可視域にかけての) 輝線の性質で分けることができる。特に、スペクトルに狭輝線 (Narrow Emission Line, NEL) しか見られない AGN を ‘2 型 AGN’、広輝線 (Broad Emission Line, BEL) と狭輝線の両方が見られる AGN を ‘1 型 AGN’ と呼んで区別することがある。例えば、Fig.2 の 1 型 Seyfert 銀河・広輝線電波銀河 (Broad Line Radio Galaxy, BLRG)・Quasar は 1 型 AGN であり、2 型 Seyfert 銀河・狭輝線電波銀河 (Narrow Line Radio Galaxy, NLRG) は 2 型 AGN である。

AGN の構造 (後述) を考慮すると、Fig.2 の輝線の軸は AGN と観測者の見込み角の違いを反映していると解釈できる。Fig.2 に括弧 () 付きで示した AGN は輝線が弱いので、輝線の軸 (NEL only or NEL+BEL) には含まれないが、見込み角の違いを考慮して付け加えてある。

また、その他の略語は以下のとおり。

RQQ/RLQ: RQ-/RL-Quasar,

LINER: Low Ionization Nuclear Emission Line Region,

ULIRG: Ultra Luminous Infra-Red Galaxy.

4. Observational evidence for unification

4. では、AGN の構造を理解する上で重要な観測結果を紹介する。

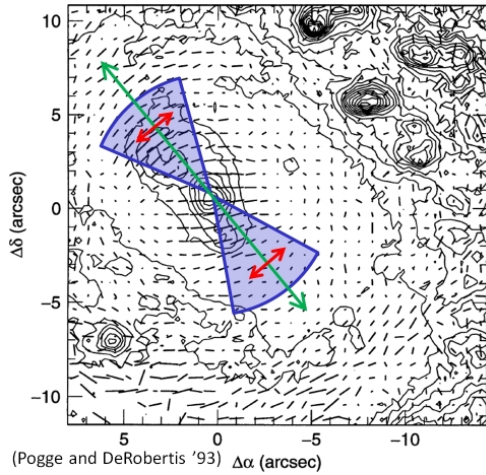


Fig. 3. 銀河スケールのカラーコントラストと偏光ベクトルの向き

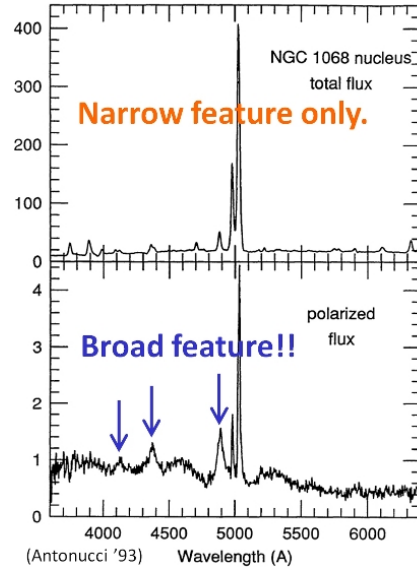


Fig. 4. 無偏光のスペクトル (上) と偏光成分のスペクトル (下)

Fig.3 は、2 型 Seyfert 銀河 NGC 1068 のカラーコントラストと可視光輝線の偏光ベクトルの向きを重ねて図示している。座標値 (0, 0) あたりが中心核の位置である。そこから“青い”領域が緑色の軸の方向に広がっており、偏光ベクトルの向き (赤の矢印) はその軸に直交している。NGC 1068 は RQ-AGN だが、RL-AGN の場合、緑色の軸の方向と電波ジェットの方法は一致する。

Fig.4 は、NGC 1068 の可視光スペクトルである。無偏光スペクトルには狭輝線 ($[OIII] \lambda\lambda 4959, 5007$) しか見られないのに対し、偏光成分には狭輝線と広輝線 ($H\beta, H\gamma, H\delta$) の両方が見られる。

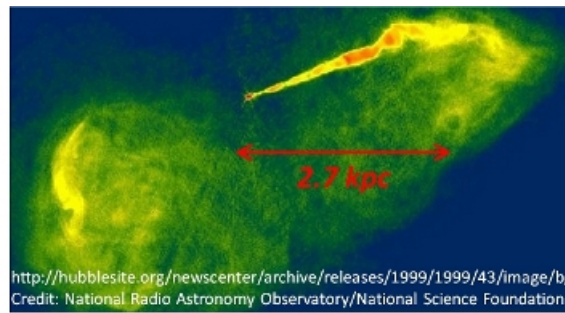


Fig. 5. 電波銀河のジェット

RL-AGN は、中心部からジェットを吹き出しており、ジェット内部の相対論的電子がシンクロトロン放射を出すため、電波で明るく観測される。この電波放射は、ジェットが相対論的な速度で運動しているために、ジェットの進行方向に対して相対論的にビーミングされる。すると、ジェットを pole-on で見ると、edge-on で見ると、見かけ上の (= 観測される) 性質が大きく変化する。

5. Unified scheme

5. では、AGN 種族の観測的な性質をふまえ、AGN の構造 (= AGN の統一モデル) を紹介する。

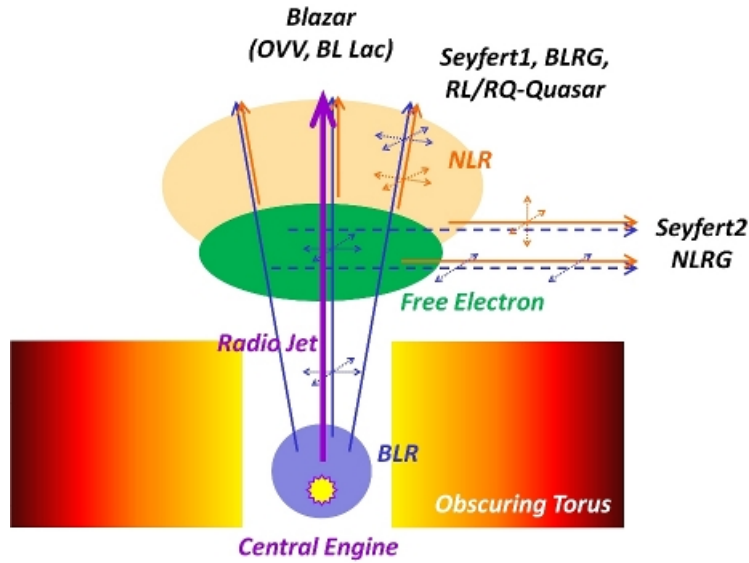


Fig. 6. AGN の統一モデル

Fig.6 は、AGN の典型的な内部構造を表している。中心で明るく輝く central engine によって周囲のガスが光電離され、広輝線領域 (Broad Line Region, BLR) を形成し、それを光学的・幾何学的に厚いトーラス状のダスト・ガス (obscuring torus) が非等方的に被っている。central engine からの放射は、トーラスの開口方向にのみ抜けることができる。開口方向に抜けた放射によって、トーラスの空間スケール以上の領域にまで狭輝線領域 (Narrow Line Region, NLR) が形成される。また、図のような自由電子の配置を仮定することで、4. で紹介した観測結果を矛盾なく説明することが出来る (後述)。電波ジェットの様子はトーラスの開口方向を向いており、典型的な空間スケールは $r \sim 10 - 100$ kpc である。(各々の構造の空間スケールは、Fig.1 を参照)

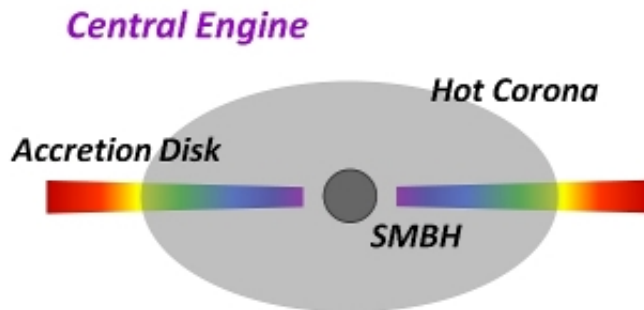


Fig. 7. central engine の模式図

Fig.7 では、物質が SMBH へ落下する過程で降着円盤を形成し、それを hot corona が被っていることを表している。ここに図示したのは、質量降着率がそこそこ (= Eddington 降着率よりやや

低い程度)で、放射が効率的な‘標準円盤’(standard disk)と呼ばれる降着円盤である。この場合、質量降着がそこそこあるために光学的には厚いが、放射が効率的で(=冷却が良く効くので)円盤がしぼむため、幾何学的には薄くなる。質量降着率が低い場合には、放射が非効率的な‘RIAF’¹という降着円盤が形成されることが理論的に知られている。この場合、質量降着が少ないために光学的には薄い、放射が非効率的で(=冷却が効かないので)ガス圧で円盤が膨らむため、幾何学的には厚くなる。

標準円盤の場合、放射はおおまかには多温度の黒体放射であり、恒星からの放射に比べると色は“青い”。(6.で実際に放射が効率的なAGNのSEDと可視スペクトルを示す。また、7.以降で、放射が非効率的なAGNの活動性とその起源について述べる。)

Fig.6で説明したAGNの統一モデルをふまえて、1型/2型 Seyfert 銀河や BLRG/NLRG の性質を“統一”する。central engine と BLR をトーラスが隠しているために、トーラスを face-on で(=開口方向から)見ると central engine+BLR+NLR からの放射が届くため、1型 AGN に見える。一方、トーラスを edge-on で見ると NLR からの放射しか届かないため、2型 AGN に見える。しかし、central engine+BLR からの光子が自由電子にコンプトン散乱されると、その散乱光はわずかながら観測者に届く(ただし、NLR からの光の方が圧倒的に強いため、無偏光スペクトルで検出することは出来ない)。また、電磁波は横波なので、コンプトン散乱される際に一方の偏光成分は消えてしまい、偏光が生じる。従って、edge-on の場合でも偏光スペクトルには、1型的な広輝線が検出されている(Fig.4)。また、central engine からの放射は、銀河からの光(=様々な恒星からの放射の重ね合わせ)に比べて“青い”ため、青い領域の方向はトーラスの開口方向だと解釈できる。そして、コンプトン散乱されるときに残る偏光成分の向きが、トーラスの開口方向と直交するため(Fig.6)、青い領域の方向と偏光ベクトルの向きが直交している(Fig.3)。

¹Radiatively Inefficient Accretion Flow の略。‘ライアフ’と読む。

6. SED and optical spectrum

6. では、放射が効率的な AGN の SED と可視光スペクトルを紹介する。

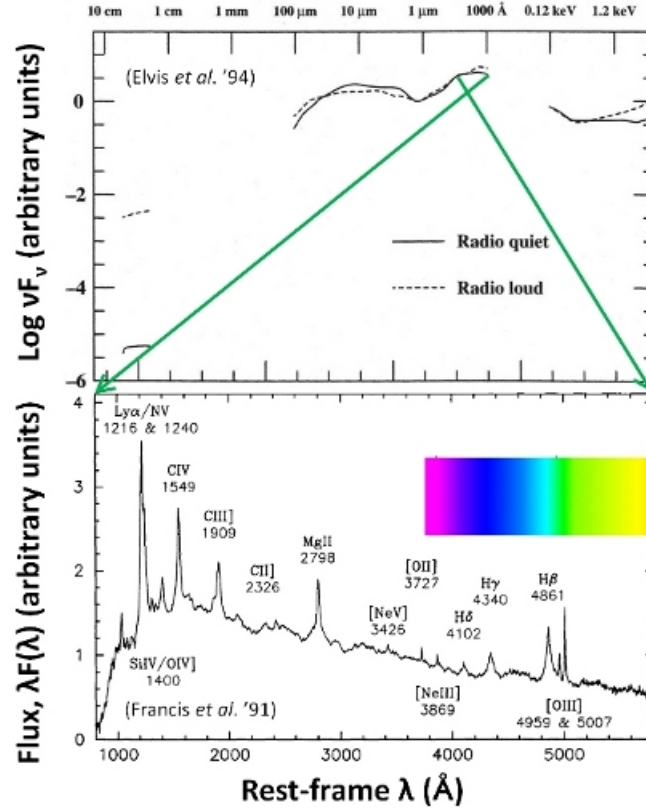


Fig. 8. Quasar の SED(上) と可視スペクトル(下)

上図において、(A) $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$ あたりのコブ (bump) は、‘IR-bump’ と呼ばれ、降着円盤からの強い放射をトーラスが吸収・再放射したもので、(B) 可視域から紫外域にかけての大きなコブは、‘Big Blue Bump’ と呼ばれ、降着円盤からの放射成分だと考えられている。

下図は、Big Blue Bump 近辺のスペクトルである。ここでは、連続光と広輝線・狭輝線が見られる。連続光は降着円盤からの放射成分だと考えられており、可視域から紫外域に向かって明るくなっており、銀河の連続光と比較すると“青い” (この連続光は、‘非熱的連続光’または‘featureless continuum’ と呼ばれる)。また、広輝線・狭輝線はそれぞれ BLR・NLR から放射された輝線である。(Fig.3)。スペクトルの上に付けた虹は、おおまかな可視光の色を表している。

7. Radiatively efficient/inefficient RL-AGN

7. では、降着円盤の放射が効率的である RL-AGN と、非効率的な RL-AGN の活動性を紹介する。(Hardcastle *et al.* (2006) のレビュー)

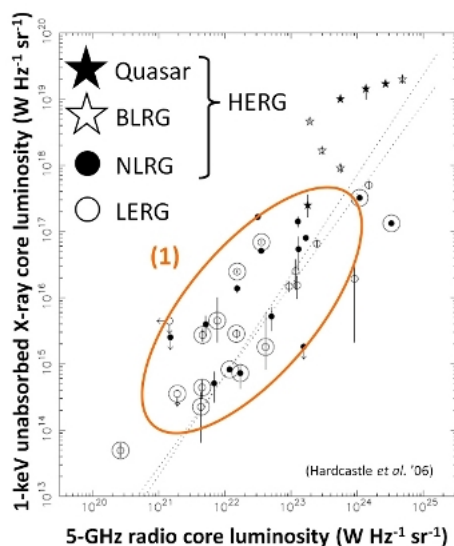


Fig. 9. 吸収を受けていない X 線成分と電波強度の相関

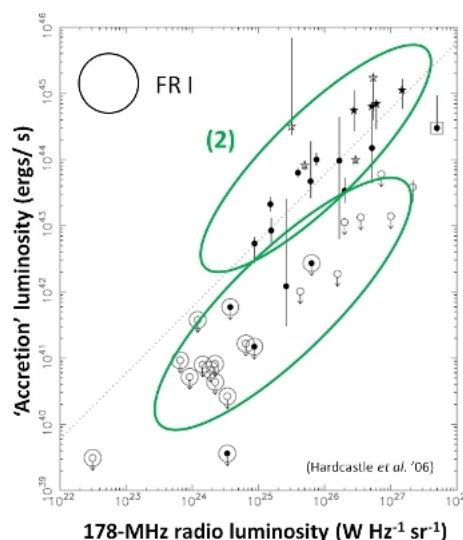


Fig. 10. 吸収を受けている X 線成分と電波強度の相関

輝線が強い RL-AGN は、降着円盤の放射が効率的で、BLR が形成されるので輝線が強いと考えられている (5)。ここでは、こういった AGN を ‘High Excitation Radio Galaxy’(HERG) と呼ぶ。一方、輝線が弱い/検出されない RL-AGN は、降着円盤の “放射” が非効率的であると考えられている。(“放射” は非効率的だが、電波では明るいので “ジェット” は効率的である。) ここでは、こういった AGN を ‘Low Excitation Radio Galaxy’(LERG) と呼ぶ。

Fig.9 は、吸収を受けていない X 線の成分と電波 ‘コア’ 成分の相関である。吸収を受けていない X 線成分は、pc スケールのジェットに由来すると考えられている。このプロットからは、(1) LERG と NLRG が同じ相関に乗っていることが分かる。(また、BLRG と Quasar が上にずれているが、これは統一モデルから「トーラスを face-on で見ているために、pc スケールジェット由来の成分に加えて、降着流由来の成分も吸収を受けずに見えている」と解釈できる)

Fig.10 は、吸収を受けている X 線の成分 (2-10 keV luminosity) と電波 ‘ローブ’ 成分の相関である。吸収を受けている X 線成分は、降着流に由来すると考えられている。このプロットからは、(2) HERG の方が LERG の上限²よりも 1-2 桁明るいことが分かる。

²ここで、LERG では吸収を受けた成分は検出されていないことに注意！この論文では、X 線スペクトルをフィットする際に、90%の信頼度を守る範囲内で、柱密度 $N_{\text{H}} = 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ による吸収を受けた成分を加え、これを LERG の上限値としている。LERG は NLRG とは異なり、吸収を受けた X 線成分を考慮しなくても X 線スペクトルをうまくフィットできる。そのため、降着円盤は明るい吸収の特徴を作るトーラスがないのか、トーラスはあるが降着円盤からの X 線放射が弱いのか、両方がないのかを決めるのは難しい。よって、LERG の柱密度の値は間違いかも知れないが、赤外での再放射の観測から少なくとも、 $N_{\text{H}} < 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ と分かっているのだから、LERG のプロットは少なくとも上にずれることはないが、下にずれる可能性はある。

8. Bondi accretion rate vs. radio jet power

8. では、7. で紹介した LERG と HERG における活動性の違いの起源が“降着物質・過程の違いである”とするモデルを紹介する。(Allen *et al.* (2006)、Hardcastle *et al.* (2007) のレビュー)

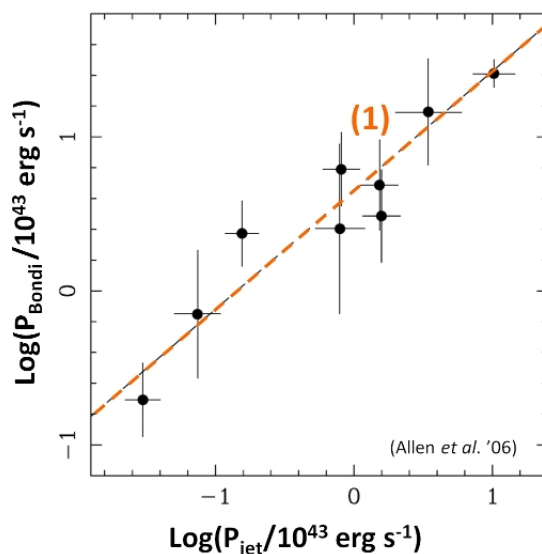


Fig. 11. Bondi 降着率とジェットパワーの相関

楕円銀河には、X線を放射している高温ガスハローが付随しており、また、電波ジェットが吹き出しているものがたくさん見られる。このような天体では、高温ガスの空洞が見られ、そこに電波ジェットが詰まっていることがある。その場合、ジェットが広がる際に、高温ガスに対して仕事をして空洞ができたと考えられる。この論文では、必ずしも高温ガスの空洞にジェットが詰まっていることを確認している訳ではないが、(1) 高温ガスが明るく、(2) それに空洞の様な構造が見られ、(3) 高温ガスの温度・電子密度が精度良く推定できた、近傍の9個の楕円銀河 (LERG) について相関を調べている。サンプルの中には電波のデータがない天体もあり、ジェットパワーについては、高温ガスの空洞に相対論的な気体が詰まっていると仮定して求めている。また、高温ガスの空洞の体積がX線画像からだけではうまく決まらない場合は、ジェットの形状から体積を見積もっている。(空洞の体積が推定できないものは、除外している)

高温ガスの Bondi 降着率は、銀河中心付近における高温ガスの温度・電子密度を測定し、ブラックホール質量と合わせて、以下の式から見積もっている。電子密度から高温ガスの質量密度 ρ_A が決まり、温度から音速 c_s が決まり、ブラックホール質量 M_{BH} は、Tremaine *et al.* (2002) の M - σ 関係から求めている。また、 $\eta = 0.1$ と仮定している。

$$P_{\text{Bondi}} = \eta \dot{M}_{\text{Bondi}} c^2 = \eta c^2 \pi \rho_A G^2 M_{\text{BH}}^2 c_s^{-3}$$

近傍の楕円銀河に対しては、高角度分解能の Chandra 衛星のデータから中心付近の温度・電子密度を推定することが出来る。また、ジェットパワーは、高温ガスのハロー内で断熱指数 $\gamma = 4/3$ の相対論的な理想気体が‘等圧膨張’したと考えて、高温ガスの空洞の体積と温度・電子密度からジェットエネルギー E を決め、それを、中心の AGN から空洞の中心までの距離を音速で横切るのに要

する時間 t_{age} で割って推定している。

$$P_{\text{jet}} = \frac{E}{t_{\text{age}}} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} PV \frac{1}{t_{\text{age}}} = \frac{4PV}{t_{\text{age}}}$$

Fig.11 からは、(1) 高温ガスの Bondi 降着エネルギーと電波ジェットパワーに強い相関が読み取れる。

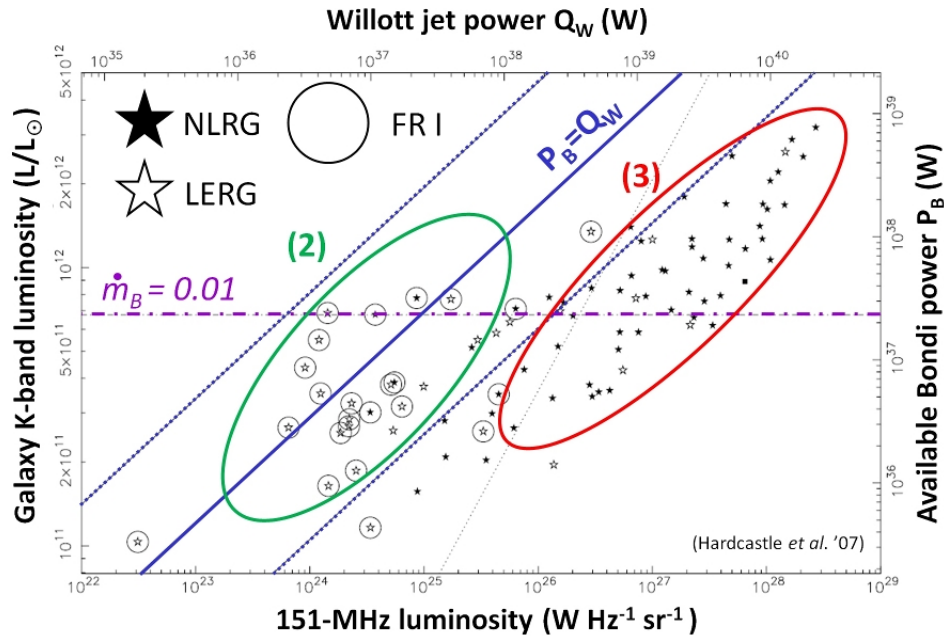


Fig. 12. Bondi 降着率とジェットパワーの相関その 2

Allen *et al.* (2006) では、Chandra 衛星の高角度分解能を生かし、高温ガスの温度・電子密度を近傍の各々の楕円銀河について推定して解析していた。しかし、Hardcastle *et al.* (2007) では、高温ガスの温度・電子密度には、近傍の FRI 型電波銀河の値を仮定してしまう代わりに、よりたくさん、より遠方 ($0.1 \leq z \leq 0.5$) の LERG、HERG (NLRG のみであり、BLRG・Quasar は除外) について解析を行っている。高温ガスの Bondi 降着率は、仮定した高温ガスの温度・電子密度、Marconi & Hunt (2003) の $M-L_K$ 関係を用いて出した M_{BH} から推定している。また、ジェットパワーは、Willott *et al.* (1999) の式を参照し、151-MHz luminosity をジェットパワー Q_W に変換することで推定している。

Fig.12 からは、(2) LERG では $P_{\text{Bondi}} \approx Q_W$ であるのに対し、(3) HERG では 2 桁程度 $P_{\text{Bondi}} < Q_W$ となっていることが読み取れる。従って、シンプルにエネルギー収支を考えると、LERG のジェットパワーは高温ガスの Bondi 降着で十分まかなえるが、HERG のジェットパワーには高温ガスの Bondi 降着 $+\alpha$ が必要であることになる。また、Bondi 降着率を Eddington 降着率で規格化した Eddington ratio \dot{m}_B が 0.01 の線をこの図に書き込むと紫色の線となる。これとプロットを比較すると、LERG における高温ガスの Bondi 降着が十分 sub-Eddington であることと、HERG は LERG よりやや降着率が高いことが分かる。降着円盤の理論的な研究から、質量降着率が十分 sub-Eddington のときには、放射が非効率的な降着流となることが知られている。この観測結果は、そういった理論的な研究結果と合致する。

$M-L_K$ 関係から M_{BH} を求める際に付く不定性のために、Bondi 降着率には ± 1 桁の不定性が付いてしまう。その不定性の幅を表すのが青い点線である。従って、青い点線の内側に多く分布している LERG は、 $P_{Bondi} \approx Q_W$ だと見なしていることに注意。また、 M_{BH} を求める際に母銀河バルジの K-band luminosity L_K を使っているため、中心核光度が卓越する 1 型 AGN(Quasar・BLRG) は除外している。

9. LERG/HERG dichotomy

9. では、7. + 8. で紹介した性質をまとめる。

	LERG	HERG
定義	可視電離輝線が弱い/ 見られない。	強い可視電離輝線が見られる。
X線 スペクトル	ジェット由来の、吸収を 受けていない成分のみ。	左+降着円盤由来の、 強い吸収を受けた成分。
降着円盤の 活動性 (accretion mode)	Eddington比がとても小 さく、放射が非効率的。 (RIAF)	Eddingtonがやや小さく、 放射が効率的。 (Standard disk)
質量供給 過程	X線を放射しているhot gasのBondi降着。	左+ α .(おそらく、cold gas の供給)。

Fig. 13. LERG と HERG の性質のまとめ

Reference, Figure credit:

(a)<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

(b)<http://hubblesite.org/gallery/album/galaxy/cluster/pr2008008b>

(c)<http://hubblesite.org/gallery/album/galaxy/spiral/pr2006010anpp/all>

(d)Tadhunter '08, Fig.3. を一部改変。

(Fig.13)Evans *et al.* arXiv:0707.2154v2(ASP Conference Series, Vol.386, 2008, Page 167)

(教科書)Peterson, B. M. 1997, AN INTRODUCTION TO active galactic nuclei (Cambridge: Cambridge University Press)

(レビューした論文)Allen, S. W., Dunn, R. J. H., Fabian, A. c., Taylor, G. B., & Reynolds, C. S. 2006, MNRAS, 372, 21

Hardcastle, M. J., Evans, D. A., & Croston, J. H. 2006, MNRAS, 370, 1893

Hardcastle, M. J., Evans, D. A., & Croston, J. H. 2007, MNRAS, 376, 1849