活動銀河核の大規模ジェット：X 線で探る構造とダイナミクス

片　岡　　淳
〈東京工業大学大学院理工学研究科　〒152–8551 東京都目黒区大岡山 2–12–1〉
e-mail: kataoka@phys.titech.ac.jp

近年のチャンドラ衛星の観測により，X 線で明るい活動銀河核ジェットが続々と発見されている．その多くは“ありふれた”電波銀河に属し，当初予測されていたよりも，何桁も明るい X 線強度をもっている．これら X 線ジェットの正体を考察し，ホットスポットや電波ローブなど，電波銀河の構造形成にまで理解を広げるのが本稿の目的である．

1.　はじめに―宇宙船から見た星景色―

このたびは名誉な賞を賜わりまして，誠にありがとうございます．本稿では受賞の対象となった研究成果をゼロから解説するべきですが，ブレーザー天体については 2002 年 8 月号に詳細記事を書かせていただきました．ここでは，前回の記事で軽く流してしまった後半部分，特に大規模スケールジェットの形成とダイナミクスについて，われわれの苦悩を交えながら最近の進展をご紹介したいと思います．

まず本稿を読んでいただくにあたり，「星虹 (starbow)」と呼ばれる現象を説明いたします．SF 愛好家ならずとも，言葉だけは耳にしたことがあるかもしれません．たとえば横尾武夫（編）の「新・宇宙を解く」[1] から抜粋すると「宇宙船が光速に近い速度で運動しているときには，日常からは想像もつかない現象が起こる．まず光行差のため見かけの位置が宇宙船の進行方向へ集中する．さらに，ドップラー偏移のため星のスペクトルがずれて「色」が変化し，進行方向を中心としたリング状の虹のようなものが見える」とあります．何とも夢のある話ではないでしょうか！ この現象に興味をもったのは学部 3 年生のときで，とき同じくして「計算機実習」なる授業を受けていました．最後に自分でテーマを考えてプログラミングする宿題があり，私は迷わず「星虹」を選びました．文章を読むだけでは実感がわかなかったし，何より簡単で，視覚的にもインパクトのある図が得られそうな予感がしたのです．

それでは，宿題の結果を見てみましょう．宇宙船は北極星に向かって運動するものとします．図 1 の左から，宇宙船が完全に静止してる場合，光速の 95% で運動している場合，99.9% で運動している場合の星景色です．星の分布が，しだいに進行方向に集中していく様子がお分かりかと思います．星の見かけの方向が偏る現象を光行差とよびます．宇宙船が止まっているときに前方 θ_0 の方向に見えた天体が，運動時に θ の方向に見えたとすると，$\cos\theta = (\beta + \cos\theta_0)/(1 + \beta\cos\theta_0)$ の関係が成り立ちます．ここで β は，宇宙船の速度 V を光速 c で割った量です．たとえば宇宙船が準光速で運動している場合は $\beta \sim 1$ であり，$\cos\theta \sim 1$ となります．つまり，すべての星は進行方向に集中してみえるはずです．同時に，星の色（周波数）

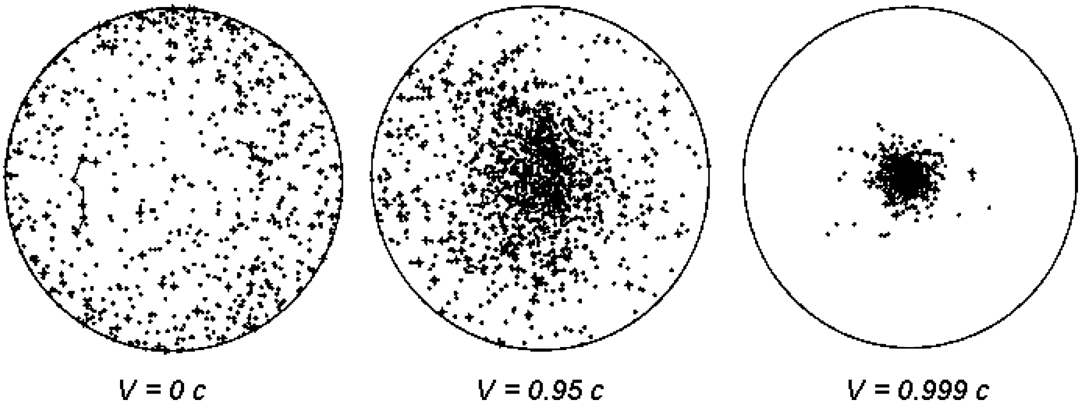

図1　宇宙船から見た星景色．左から，静止している場合，光速の 95%, 99.9% で運動している場合．宇宙船の進行方向（視野中心）は天の北極．

は δ 倍だけ青くなります．この δ をビーミング因子とよび，正確には $\delta=(1-\beta^2)^{1/2}/(1-\beta\cos\theta_0)$ で表されます．したがって，図1では中心の星ほど青く，外側の星ほど赤く輝いて見えることになります．

2.　活動銀河核ジェットへの応用

なぜ，こんな SF まがいのお話をするのか，不思議に思う方も多いかと思います．実はこの現象，活動銀河核ジェットからの放射を考えるうえで，重要な物理を含んでいるのです．ちょっと復習すると，活動銀河核では約1割のものが電波で激しい活動性を示し，そのほとんどにジェットと呼ばれる「噴き出し」が見られます．ジェットは銀河中心にあるブラックホール近傍から細いノズルのように噴き出していると考えられ，長いものでは1メガパーセク（われわれの銀河系サイズのざっと100倍！）といった遠方にまで，その膨大なエネルギーを運んでいるのです．電波の観測では，ジェット内部のスポット（“ノット”と呼ばれる）が見かけ上，光速を超えて運動する現象が観測され，ジェットは光速に近い速さで噴出していると考えられています．

ここで，宇宙船をジェットに置き換えてみましょう．ジェットに乗っている人から見ると，進行方向の星は強くビーミングして見えています．逆に，ジェットを外から観測する人，特に，ジェットの真向かいに位置する人には，放射が強められた“青い”ジェットが，自分に突進してくるように見えるはずです．観測されるジェットの明るさ（放射輝度 L）は，時間 t と立体角 Ω, 周波数 ν をもちいて $L\propto\nu t^{-1}\Omega^{-1}$ と表されます．したがって，ビーミングによる増光は $(L/L_0)\propto\delta^4$, つまり，$\delta=10$ の方向からジェットをみている人は，本来の明るさの 10,000 倍に強められた放射を見ることになります．ジェットと観測者の視線方向が一致する状況はめったに起こりませんが，ブレーザーと呼ばれる特殊な活動銀河核は，この条件が満たされる希な種族です[2]．一方で，ジェットはもつけれども観測者の視線方向とずれているものは電波銀河と呼ばれます．電波銀河はジェットを斜め横から見ているため，画像でも非常に大きく，美しいジェットの姿を楽しむことができます[3]．

3.　「X 線で明るい」ジェットの正体

3.1　大規模ジェットの構造形成

活動銀河のジェットほど，身近に観測されていながらよく分かっていない現象も珍しいかと思います．そもそも，いかにしてジェットが形成され

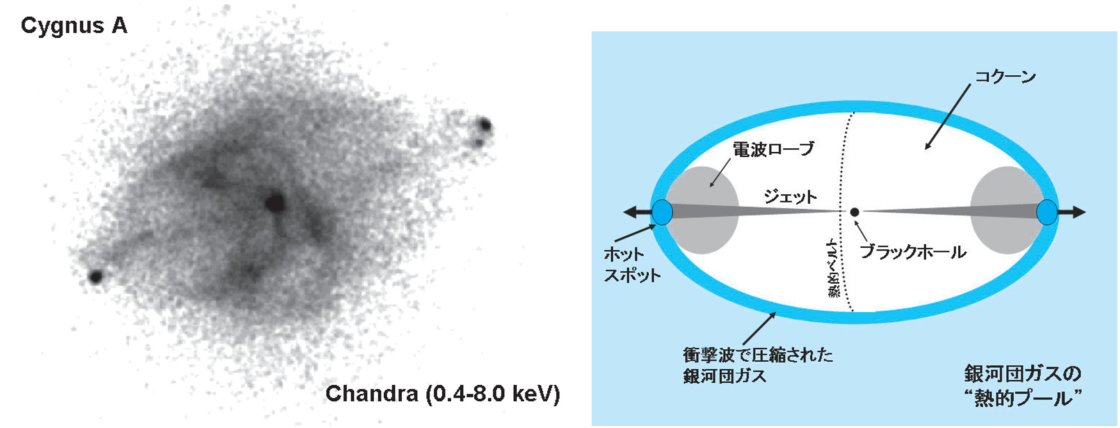

図2 （左） チャンドラ衛星で得られた，電波銀河 Cyguus A の X 線画像．（右）電波銀河のジェット周辺における構造形成．

るのか，いまだ謎に包まれています．おそらくは，磁場が重要な役目を担っていることは疑いがないのですが[4)–6)]，理論モデルと観測との直接比較にはまだ時間がかかりそうな印象です．さらに，ジェットを構成している粒子の詳細も，よく分からないのです．電波や X 線，ガンマ線で放射が観測されるからには，高エネルギーまで加速された電子がいるはずです．一方で，電子のペアとなる正の電荷をもった粒子は，陽電子かもしれないし，陽子かもしれない．通常の宇宙プラズマを考えると，陽子のようなバリオンのほうが自然な気もしますが，厄介なことに陽子は重いので，電子ほど気軽に光を出してくれません．つまり，たとえいたとしても観測で見つけるのは非常に困難です．ファラデー回転を用いた観測より，一部の活動銀河ジェットについては電子・陽電子プラズマが支配的とする示唆も得られていますが[7)]，一般論にまで拡張するのは少しジャンプがあるかもしれません．

分からない尽くめのジェットですが，生まれ故郷の銀河すら飛び出し，何もない宇宙空間を“行き着くところ”まで走り続けます．たとえば銀河団のガスが非常に濃いところでは，その圧力に負けてジェットは急に減速し，「ホットスポット」と呼ばれる明るい衝撃波構造を作ります．ホットスポットから流れ出たプラズマは，「電波ローブ」と呼ばれる広がった構造を形成します．ジェットを起源とする，これら一連の“非熱的な”プラズマはコクーン（「繭」という意味）と呼ばれる特殊なカプセルを作り，銀河団からの熱プラズマを押し退けつつ，しだいに膨張していくと考えられます．図2（左）は，Cygnus A と呼ばれる電波銀河の X 線画像で，これに対応する概念図を右に示します．これほどきれいにコクーンが見られる電波銀河は極めて希ですが，多くの電波銀河で似たような構造形成が行われると考えられています．

3.2　電波・X 線の系統解析

電波ローブのように広がった構造の解明については，日本の X 線天文衛星 ASCA が先駆的な仕事をしました[8)]．一方で，優れた撮像能力をもつチャンドラ衛星の活躍により，さらにコンパクトな放射領域，つまりジェット内部のノットやホットスポットなど，今まで隠されていた構造が次々と見つかりました[9)–12)]．X 線でジェットが一つ発見されるたびに短い論文が一つ出るという状況が数年続いたのですが，自分自身の仕事を振り返っても「木を見て森を見ず」，悪くいえば「論文稼ぎ」という感が否めません．ふと数えてみると，

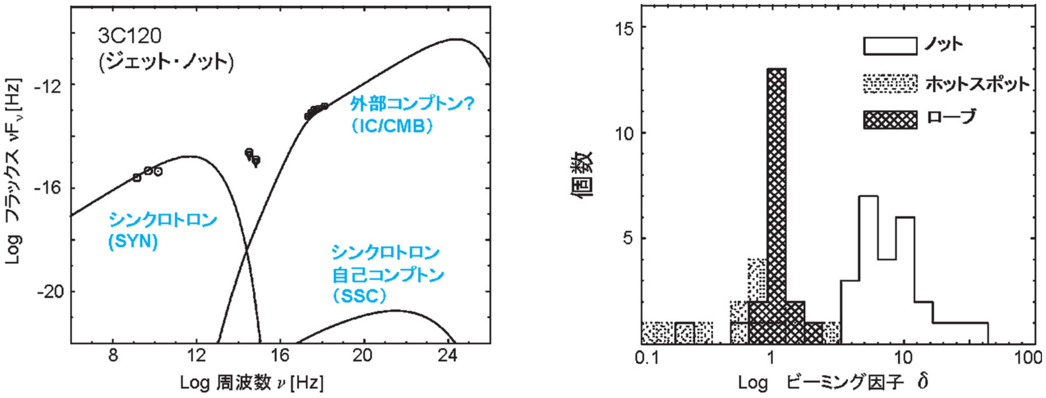

図3 (左) 3C 120のノットで得られた多波長スペクトル. 実線は$\delta=30$を仮定したモデル. (右)「X線＝逆コンプトン」説を仮定した場合, スペクトルを説明するのに必要なビーミング因子の分布.

チャンドラ衛星が打ち上がってから現在まで, 40以上の「X線ジェット天体」が観測され, まるで動物園のような状態です. これだけ役者がそろったのだから, 自分なりに整理して系統的な理解を加えたいと思うようになりました.

とはいえ観測屋ですから, 難しい理論には深入りしたくない. 万人が頷けるような, 単純で明解なアプローチを心がけました. やったことは極めて単純で, ノット・ホットスポット・ローブの構造ごとに, 電波 (5 GHz) とX線 (1 keV) の強度, およびスペクトルの「完全な」コレクションを作ります. わずか四つの観測量だけを頼りに, X線の放射機構を推定するのです. まず電波のスペクトルから, 電子と磁場のエネルギー密度が等しいと仮定し, X線フラックスの「期待値」を求めます. 等分配の仮定は, 電子と磁場が十分相互作用して, エネルギー的に落ち着いシステムでは成り立ちますが, ジェットで成り立つ保証はありません. 当然,「期待値」と「観測値」にはずれが生じますから, この差を何かで埋め合わせる必要があります. 一つは, もちろん等分配の仮定を諦めること, そしてもう一つは相対論的ビーミング (ビーミング因子δ) の補正を入れることです[13].

たとえば3C 120と呼ばれる電波銀河について, ジェットの多波長スペクトルを見てみましょう (図3 (左)). 電波に比べてX線が著しく明るく, 特異なスペクトルをしています[14]. 多くのジェット天体では, 電波はシンクロトロン放射, X線は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を電子が逆コンプトン散乱で叩きあげたものと考えられていますが[15], この天体の場合, X線の予想強度と観測値は悲しいほどに合いません. 仮に等分配からのずれで説明しようとすると, 電子のエネルギー密度は磁場より1億倍以上も強いことになり, 明らかに不自然です. また, ジェットの運んでくるパワーが, クェーサーと呼ばれる“最も明るい”活動銀河核を凌駕することになり, この意味でもオカシイ. それならば, ビーミング因子で補正したらどうであろうか?—すると, うまくいきました!. $\delta=30$を仮定すると, スペクトルは見事に再現されます (図3 (左) の実線). これくらいのビーミング因子なら, ブレーザー天体でも (やや大きめとはいえ) 他に類例があります[16].

他のジェット天体についても ビーミング因子を計算してみると, 図3 (右) のような分布が得られました. 興味深いことに, ジェット内部のノット, 終点であるホットスポット, 広がった電波ローブでは, きれいな住み分けが見られます. ローブやホットスポットの多くが$\delta=1$に集中していることは, これらの構造が相対論的な速度で

運動して「いない」ことを裏づけるものであり，ジェットの終端構造であるとする解釈を支持するものです（図2（右））．しかも，電子と磁場の等分配が大筋で成り立つことは，ジェットで運ばれてきた物質が電子と陽電子であり，陽子の寄与は無視できるほど小さいことをも示唆します．一方で，ジェット内部のノットの多くは準光速で運動しているため，$\delta=10$ 付近に局在しているに違いない―とてもクリアな結論に，自分自身が酔いしれるほどでした．

3.3 本当にそれで良いのか？

できあがったばかりのドラフトを引っ下げて，ドイツ・ハイデルベルグの研究会 “High Energy Gamma-ray Astronomy 2004” に乗り込みました．10分足らずの短いトークにもかかわらず，大反響でした．「俺たちも同じことを考えていたのに先を越された……ブツブツブツ」みたいなボヤキも多く，内心“してやったり！”と思いました．さらに嬉しいできごとは，ポーランド人の研究者 Lukasz Stawarz と親密な友情を築けたことです．彼は大規模スケールジェットについて，斬新で質の高い論文を数多く出版しており，以前からその高名は知っていました．どんな大御所かと思ったら，四つも歳下のヤンチャな兄貴が出てきたのでショックを受けました．やはり世界の壁は厚い．…….

彼とは意気投合して，投稿前の論文を預けることにしました．ハイデルベルグから戻って3日もしないうちに，返事がきました．要約すると「非常に良い仕事だが，自分には結論が納得できない．電波銀河で $\delta=10$ はありえないし，それなら等分配からずれている，と考えるほうがマシ．実のところ，X線も（逆コンプトンではなく）シンクロトロン放射なのではないか？」といった内容です．純粋なほめ言葉を期待した自分には，なかなか手厳しいコメントでした．

よく考えるまでもなく，ブレーザー天体マニアの自分らしい，愚かな見落としがありました．電波銀河とブレーザーでは，観測者がジェットを見込む角度がまるで違うのです．これを理解していただくため，図4にジェットをさまざまな角度から見た場合のビーミング因子 δ をプロットしてみました．右の図は，上から光速の 94%（ジェットの並進運動がもつローレンツ因子 $\Gamma_{\rm BLK}=3$），99.5%（$\Gamma_{\rm BLK}=10$），99.9%（$\Gamma_{\rm BLK}=30$）に対応します（これより遅いジェットでは，ビーミングの効果はほとんど効きません）．一般的に，電波銀河はジェットを斜め横から見ていると考えられますので，観測者が見込む角度を 30–60° くらいと仮定しましょう．図中，影のついた範囲で，$\delta=10$ を実現することは不可能であることが分かります．ジェットが準光速の場合は，ジェットと視線方向のなす角度が小さい場合に限り大きなビーミング因子を得ることができますが（ブレーザーの状況），少し角度が外れるだけで δ は急激に下がります．それどころか 30–60° では $\delta<1$ が予想され，これは観測される放射が強められるどころか，逆に弱められてしまうを意味します．振り出しに戻る，とは，まさにこのことです．

確かに，いくつかの天体ではジェットの見込む角度が小さく，ビーミングによる増光を期待できるものもあります．しかしながら，ほとんどの電波銀河には当てはまらず，先ほどの電波銀河 3C 120 も決して大きな δ を期待できない天体です．結局のところ，X線を逆コンプトン散乱で説明しようとするところに無理がある，というのが，われわれを含めた大多数の見解となってきました[17), 18)]．一方で，3C 120 のスペクトルを見ると，電波からの放射は光学波長で一度落ち込み（10^{14} Hz 付近にある，二つの上限値），X線は電波と全く別な起源で作られるようにも見えます．本当のところ，この部分は凹んでいるだけで，電波とX線は高エネルギー電子からの，同じシンクロトロン放射なのかもしれません．シンクロトロン放射は，もとの電子のスペクトルを“生き写し”にしますから，このような放射は電子の分布が滑らか

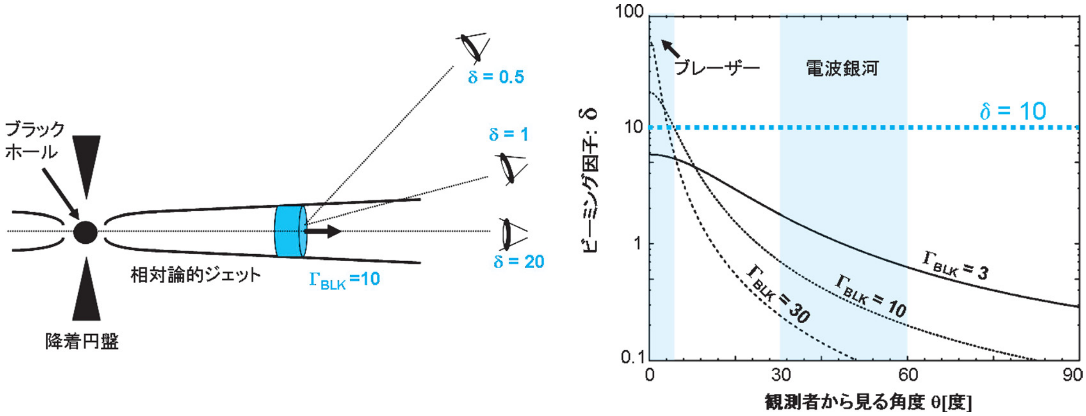

図4　(左) 準光速のジェットを見込む角度による，ビーミング因子の違い．(右) さまざまな速度のジェットに対し，期待されるビーミング因子と角度の関係．

なべき関数でなく，一番高いエネルギー付近に「こぶ」のような構造（バンプ）を伴うことを示しています．

バンプができる原因については，諸説があります．一つは，ジェット内部で加速された粒子が長い間逃げ出すことができず，結果として最大エネルギー付近にたまっていく，という解釈です[18]．一般に，電子のエネルギーが高くなるほど加速に要する時間は長くなり，一方で放射で冷却される時間は短くなります．電子が加速される上限のエネルギーは，両プロセスの釣り合いで決まります．次々と加速されても，効率良く加速領域を逃げ出すことができれば，電子分布は滑らかなべき関数に従います．一方で，逆の場合は電子がそのまま吹きだまり，最大エネルギー付近に特徴的なバンプを形成することになります．

もう一つの解釈は，非常に高いエネルギーの電子は，逆コンプトン散乱でエネルギーを失いにくいという効果に基づいています（Klein–仁科効果）．電子の静止質量を $m_e c^2$, 個々の電子がもつ内部運動のローレンツ因子を γ, 逆コンプトン散乱される種光子のエネルギーを ε とすると，$m_e c^2 < \gamma\varepsilon$ の場合はコンプトン散乱で電子が冷えにくくなります．ジェットで加速された電子の一部がKlein–仁科領域にある場合，最高エネルギーの電子は冷えないが，低いエネルギーの電子が効率的に冷える逆転現象が起こります．これもバンプを作る有力な解釈です[19]．

4.　今後の課題：宇宙線加速とジェットの内部構造

X線ジェットをシンクロトロン放射と考えるアイデアを二つ紹介しましたが，そのいずれもが，非常に高いエネルギーまで加速された電子の存在を必要とします．たとえば典型的に，ジェット内部の磁場の強さを 100 μG とすると，シンクロトロンで 5 keV の X 線を出す電子のエネルギーは 50 TeV にも及びます．しかも，スペクトルはさらに高いエネルギーにまで延びているのです（図3（左））．100 TeV や 1,000 TeV 以上のエネルギーをもつレプトン，あるいはバリオンが隠れていても不思議ではありません．このエネルギーにまでなると，宇宙線加速と活動銀河核の関係が，急に現実味を帯びてきます．宇宙線加速の現場として，最有力候補は超新星残骸が挙げられます．しかしながら，われわれの銀河系内の天体ではスケールが小さいため，1,000 TeV まで加速を行うことは難しく，また銀河磁場の強さでは，加速された粒子を系内にとどめることもできません．非常に高いエネルギーの粒子は，銀河系外で

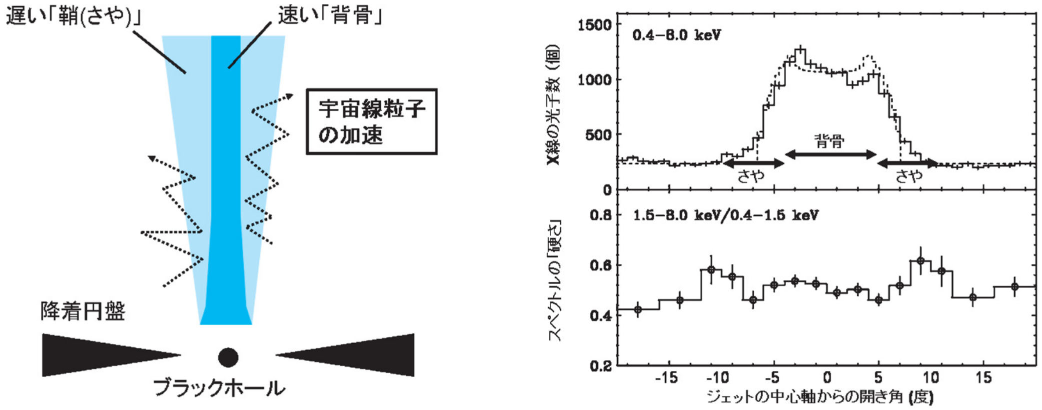

図5　（左）ジェットの二層構造と宇宙線粒子加速．（右）電波銀河 Centaurus A の X 線ジェット断面図．「背骨」と「さや」の構造，スペクトルの変化の様子がよく分かる．

加速されると考えられますが，その一つの候補として，活動銀河ジェットが挙げられるのです．

先に見たように，活動銀河ジェットはメガパーセク といった領域まで延びていて，大きな領域でゆっくりと加速を行うには最適な環境といえます．ジェットが銀河間物質と相互作用する境界（「鞘（さや）」）は，中心の「背骨」の部分よりもジェットがゆっくり運動し，非常に乱れた磁場が存在すると考えられます（図5（左））．粒子がジェットの鞘と，それを取り囲む周辺物質の間で往復運動するうちに，その速度差を反映して大きなエネルギーを得ることが可能です[20]．この領域こそ，宇宙線加速の現場であるのかもしれません．このようなジェットの二層構造は，実際いくつかの電波銀河で観測されています．ジェットを射影した断面を見ると，中心ほど暗く，縁に近付くほど明るく輝いているのです[21]．ビーミング因子の違いを考慮すると，これは自然に説明できます．たとえば，ある電波銀河についてジェットを見込む角度を 30° と仮定して図4（右）をもう一度眺めてみます．大きな速度 ($\Gamma_{\rm BLK}$) ほど，δ の値は小さくなります．つまり，ジェットの中心（背骨）ほど速く運動しているならば，その部分は暗く見え，逆にゆっくり運動しているさやの部分ほど明るく見えることになります．

以上は電波観測に限った低エネルギーの話でしたが，ごく最近，筆者らは Centaurus A の X 線ジェットを詳細に解析し，初めてその断面構造を明らかにすることに成功しました[22]（図5（右））．ようやく「宇宙線に迫る」高エネルギー電子の空間分布が明らかになってきたのです．X 線で見た断面も二層構造を示唆しており，またたいへん興味深いことにジェットの縁の部分で非常に硬いスペクトルを示しています．さらなる研究が必要ですが，宇宙線はジェットの「さや」の，そのまた一番「へり」で加速されていることを示しているのかもしれません．

謝　辞

本研究は，筆者が大学院から現在を通じて得た，活動銀河ジェットに関する知見の総まとめです．最初は「計算機実習」の鬼教官として東大の物理学科で，また大学院5年間を通じては私の良き指導教官であった高橋忠幸先生（宇宙航空開発機構/東大理学部）に深く感謝いたします．観測屋の独りよがりに陥らないため，非常にしばしば高原文郎先生（大阪大学理学部）に議論の押売りをして，ご迷惑をおかけしました．先生方のコメントが，私自身の理解と研究を続けるための原動力となりました．また，わずか1年間でしたが，

研究の姿勢と京都生活の楽しさを教えてくださった小山勝二先生，谷森　達先生，そして京大宇宙線研究室の皆様に感謝いたします．現在の職場であり，いつも暖かく見守ってくださる東工大の皆様，とくに河合誠之先生に深く御礼申し上げます．最後に，受賞に対しまして天文学会会員の皆様に深く感謝したいと思います．

参 考 文 献

1) 横尾武夫編，1993,「新・宇宙を解く」，恒星社，第 63 節
2) 片岡　淳，高橋忠幸，谷畑千春，窪　秀利，2002, 天文月報 95, 373
3) たとえば http://www.jb.man.ac.uk/atlas/index.html
4) Blandford R. D., Payne D. G., 1982, MNRAS 199, 883
5) Shibata K., Uchida Y., 1985, PASJ 37, 31
6) Kudoh T., Shibata K., 1995, ApJ 452, L41
7) Wardle J. F. C., et al., 1998, Nature 395, 457
8) 田代　信，磯部直樹，2004, 天文月報 97, 400
9) Harris D. E., Krawczynski, H., 2002, ApJ 565, 244
10) Kataoka J., et al., 2003, A&A 399, 91
11) Kataoka J., et al., 2003, A&A 410, 833
12) Stawarz L., 2005, Chinese J. Astron. Astrophys, in press (astro-ph/0310795)
13) Kataoka J., Stawarz L., 2005, ApJ 622, 797
14) Harris D. E., et al., 1999, ApJ 518, 213
15) Tavecchio F., et al., 2000, ApJ 544, L23
16) Kataoka, J., et al., 2000, ApJ 528, 243
17) Harris D. E., et al., 2004, ApJ 615, 161
18) Stawarz L., Ostrowski M., 2002, ApJ 578, 763
19) Dermer C. D., Atoyan A. M., 2002, ApJ 568, L81
20) Ostrowski M., 2000, MNRAS 312, 579
21) Swain M. R., et al., 1998, ApJ 507, L29
22) Kataoka J., et al., 2005, ApJ, 投稿中

X-ray Probing the Dynamics and Structures of Large Scale Jets in Active Galactic Nuclei

Jun Kataoka
Department of Physics, Faculty of Science, Tokyo Institute of Technology, 2–12–1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152–8511, Japan

Abstract: Thanks to the excellent spatial resolution of the Chandra X-ray Observatory, more than 40 active galactic nuclei are known to possess X-ray counterparts of radio jets on kpc to Mpc scales. We examine a systematic comparison of jet knots, hotspots and radio lobes to trace the formation history of these extended structures. We also discuss the origin of bright X-ray emissions from a number of jet-knots, which are possibly emitted by the ultra-relativistic electrons accelerated in jet boundary layers.