

# 電波ローブからの X 線

## —宇宙ジェットのエネルギーを測る—

田代 信

〈埼玉大学理学部物理学科 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255〉

e-mail: tashiro@phy.saitama-u.ac.jp

磯部 直樹

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 ISS 科学プロジェクト室

〒305-8505 つくば市千現 2-1-1 筑波宇宙センター〉

e-mail: isobe.naoki@jaxa.jp

最近の撮像 X 線観測衛星によって、活動銀河核ジェットや電波ローブからの X 線観測が盛んに行われるようになりました。規模の大きなジェットやローブからの X 線は、マイクロ波背景放射の逆コンプトン散乱によってつくられていると考えられていますが、これを電波干渉計などの観測結果とあわせると、電子や磁場のエネルギーを正確に決定することができます。90 年代以降の観測結果をまとめると、活動銀河核から電波ローブに大量のエネルギーが電子などの粒子によって運ばれていることが明らかになってきました。

### 1. 宇宙ジェット・電波ローブ

多くの銀河の中心には、巨大なブラックホールが鎮座していると考えられます。その質量はしばしば、太陽の 100 万倍から 1 億倍にも達し、もし周囲にガスや恒星などの物質が豊富にあれば、それらを貪欲に飲み込む「活動銀河核」として姿を現します。物質をプラズマ化し、重力エネルギーを電磁波として解放させるのです。その光度は銀河全体の恒星の光度の総和にも匹敵し、クエーサーなど百億光年のかなたからも見える明るい天体となるのです。活動銀河核は、しかし、電磁波を放出するだけではありません。しばしば飲み込むはずのプラズマを、ほぼ光速で打ち出す加速器としても働くことが分かっています。このジェットと呼ばれる加速器は、数十万光年にわたって延びる、銀河よりも巨大な構造物になることがあり

ます。巨大ブラックホール近傍を始発駅とし、数十万年にわたって銀河間空間を旅したプラズマ流が流れ込む到着駅が「電波ローブ」です。「ローブ」というのは耳たぶのことです。銀河の両脇に、耳たぶのように広がる構造です。ジェット流に沿って流れてきたプラズマが、衝撃波を経験し、渦巻くプラズマの嵐となって広がっている構造です。プラズマの嵐は、銀河間空間の微弱な磁場によって少しずつ冷却され、そのエネルギーをシンクロトロン放射として宇宙に放出します。その様子は、川のせせらぎと滝壺の轟音にたとえられるでしょうか。川は、ところどころある石にあたってせせらぎを奏でますが、その流れの大部分は音もなくとうとうと流れていきます。ところが、いったんそれが大瀑布となって滝壺に流れ込むときには、耳を聳する大きな音をたてます。その音を聞くとき、水の流れの持つエネルギーをようや

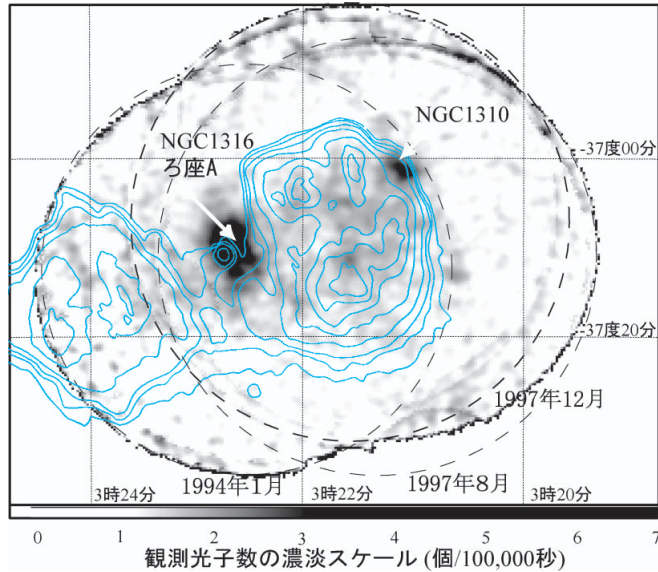


図1 ろ座Aの「あすか」による画像(黒の濃淡)<sup>5)</sup>とEkersら(1983)<sup>8)</sup>による1.4 GHz電波干渉計FSTによる画像(青の等高線)を重ね合わせた。電波ローブに付随した広がったX線源がある。

く実感できます。同じようにジェット中では、わずかな速度差による衝撃波(内部衝撃波)や、局所的な磁場による外部衝撃波によって、流れているエネルギーのごく一部が電磁放射に変換されます。流れているプラズマの運動エネルギーの大部分は、終点のローブ構造にまで温存され、そこで一気に解放されていると考えられます。実際に、最近のジェットの電波、可視光、X線の多波長の撮像分光観測から、場合によっては、ジェットの運動エネルギーが、電磁波で観測されるエネルギーを数桁上回っているのではないかと推定されています<sup>1), 2)</sup>。しかし、活動銀河核のつくりだすジェット流の運ぶエネルギーの全貌を知るには、ジェットだけでなく、すべてのエネルギーが解放される終着駅である、電波ローブにも注目する必要があります。

## 2. X線で輝く電波ローブ

X線天文衛星「あすか」は、日本初の、撮像観測ができるX線観測衛星でした。焦点面に低雑音のガス蛍光比例計数管と世界初のX線CCDカメラ

を装備し、輝度の低い広がった多くのX線源を発見してきました。電波ローブからのX線の見え方もその代表例です。図1は、ろ座AあるいはNGC1316という銀河を、電波干渉計FST(Fleurs Synthesis Telescope)と日本のX線天文衛星「あすか」で観測した画像です<sup>3)~5)</sup>。等高線で示した電波画像で東西に二つ並んだ風船のような構造が見えます。これが「耳たぶ」すなわち電波ローブです。黒の濃淡で表したのがX線の画像です。

この観測結果については、以前にも天文月報でも報告しましたので、詳細についてはそちらを参照してください<sup>4)</sup>。ここでは基本的なことだけ振り返っておきます。ローブからの電波放射は、ローレンツ因子にして10,000から100,000という相対論的なエネルギーを持つ電子が、ナノテスラ(nT: 典型的な地磁気の3万分の1程度)にも満たないごくわずかな磁場によって減速されることによってつくられるシンクロトロン放射です。一方のX線放射は、同じ相対論的な電子が、電磁波—具体的には宇宙を満たしているマイクロ波背景放射光子—を散乱することによってつくられま

す。この散乱は逆コンプトン散乱と呼ばれます。この過程によって光子は電子からエネルギーを受け取り、よりエネルギーの高いX線やガンマ線光子となるのです。シンクロトン放射と逆コンプトン散乱は、同じ電子をエネルギー源とするのですから、競合することになります。背景放射光子の密度は、ローブが存在する銀河の地球からの距離—すなわちその銀河が光を発したときの宇宙の年齢—のみによって定まりますから、あとはローブがある場所の磁場が強ければシンクロトン放射が卓越するし、弱ければ逆コンプトンX線が卓越することになります。もう少し正確に言うと、X線強度はローレンツ因子1,000程度のローブ中の相対論的電子の数に比例し、電波強度は電子と磁場のエネルギー密度の積に比例することになります。この両者の放射強度をそれぞれ測定し、比較することで、電波ローブの中に蓄えられた電子と磁場のエネルギーを測定することができます<sup>6)</sup>。最初に逆コンプトンX線が発見されたろ座Aの場合、全体として両者はほぼ同じであるとされました<sup>3)</sup>。両者がほぼ平衡状態にあるというこの結果は、「穏当な」結果であり、さほど驚くにはあたらないと考えていました。ところが「あすか」で次に観測したケンタウルス座Bという別の電波ローブ天体では、明らかに電子のエネルギーが磁場のエネルギーを上回っていたのです<sup>7)</sup>。これは電波ローブが、完全に緩和した「穏やか」な系ではないこと、すなわちエネルギーの流れが存在するダイナミックなシステムであることを示唆する結果でした。次なる興味は、活動銀河核から終端の電波ローブまで、どれほどのエネルギーがどのような形で流れ込んでいるか、エネルギーの流れを空間的に把握することです。最初の天体であるろ座Aの西のローブについて、「あすか」での詳細な観測が行われ、ローブの内側では電子のエネルギーが卓越していることが分かりました<sup>4)</sup>。次に電子が渦巻くローブの入り口から周縁に至る空間分解された情報が重要になりま

す。そこに登場したのが、空間分解に優れた二つの大型X線天文衛星チャンドラ (Chandra) とニュートン (XMM-Newton) です。

### 3. チャンドラ衛星とニュートン衛星が明らかにした電波ローブの様子

チャンドラ衛星とニュートン衛星は、1999年に相次いで打ち上げられました。二つのX線天文衛星は、優れた空間分解能で、より遠方の電波ローブをX線で撮像分光し、この研究に大きな威力を発揮すると期待されました。その中の代表例として、3C 452 という電波銀河の観測で得られたX線の画像を図2に示します<sup>9)</sup>。この図を見ると、青の等高線で示した電波ローブの内側をすっぽりと埋め尽くすように、黒で示したX線源が広がっている様子がよく分かります。この天体は、見かけの大きさが4分角程度しかありません。「あすか」にとっては分解できるぎりぎりのサイズですが、空間分解能つまり「視力」の良いチャンドラ衛星ならば、電波と異なる輝度分布まで明らかにすることができました。得られたX線のスペクトルを詳しく分析したところ、電波を出している電子が、宇宙マイクロ波背景放射を逆コンプトン散乱したX線であることがはっきりと分かりました。そこで、ろ座Aやケンタウルス座Bの場合と同じように、ローブ中の電子と磁場のエネルギーを求めてみると、何と電子のエネルギーが磁場のエネルギーの30倍という、驚くべき状態になっていることが分かったのです。もはや「穏やか」な系とはほど遠いものです。さらに、この観測で分かったもう一つの重要な点はX線輝度分布です。ローブ中のX線の分布を調べたところ、ほぼ一様にローブを満たす、楕円球の形をした放射体で表現できることが分かりました。すでに述べたように、X線は電子は宇宙マイクロ波背景放射を逆コンプトン散乱して放射されていますから、これはローブ中で電子がほぼ一様に分布していることを示しています。かたや電波の分

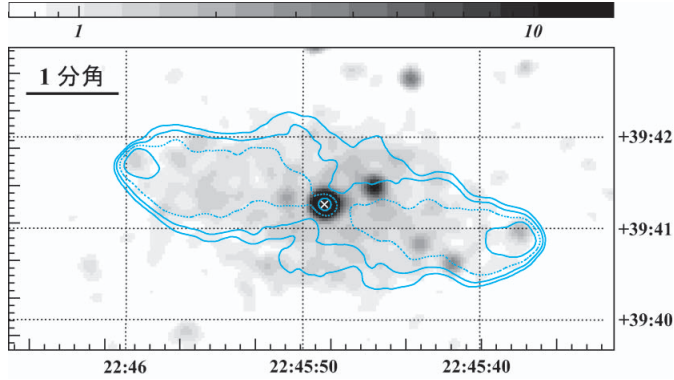


図 2 チャンドラ衛星によって得られた電波銀河 3C 452 の X 線画像（黒の濃淡）に、電波干渉計 VLA による 1.4 GHz の電波画像を青の等高線で重ね合わせた。銀河の中心の位置を白い×印で示してある。また、図の左上に 1 分角の大きさを実線で示した。電波ローブの中を埋め尽くすように、ぼんやりと広がった X 線が検出されている（電波画像は Laing, “An atlas of DRAGNs” <http://www.jb.man.ac.uk/atras/> による）。

布は、ローブの周辺に向けて明るくなっています。電波は磁場と電子によるシンクロトロン放射です。電子の分布は X 線の分布から一様と分かったのですが、これはもう一つの成分である磁場が、ローブの周辺に向けて強まるような分布をしていることを表しています。より詳しくいうと、ローブの中心付近では、電子のエネルギーが磁場のエネルギーをはるかにしのいでいるにもかかわらず、周辺部では両者はほぼ平衡に近いような状態になっていることが分かりました。これは、「あすか」衛星によるろ座 A の西のローブや、ケンタウルス座 B の観測でも示唆されていた傾向と一致します<sup>4), 5), 7)</sup>。

このほかにも多くの電波ローブ天体から逆コンプトン散乱 X 線が検出され、電子と磁場のエネルギーが正確に求められています<sup>10)~13)</sup>。全部を合わせると、すでに 10 個以上の電波ローブで電子と磁場のエネルギーを正確に測定できています。これらをまとめるために、さまざまな電波ローブ中での電子の全エネルギーと磁場の全エネルギーの関係を図 3 に示しました。これを見てまず明らかなことは、電子と磁場が平衡状態にあるような「穏やか」なローブはほとんどないということです。非常に驚くべきことかもしれません

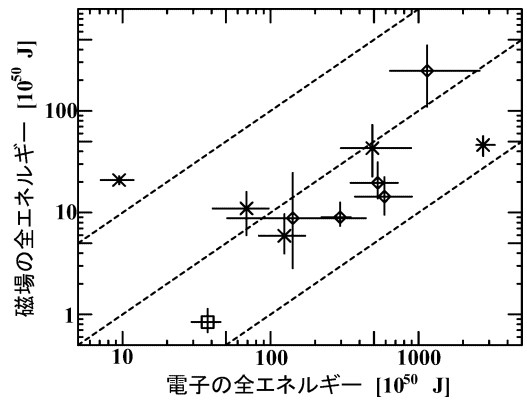


図 3 ローブ中の電子と磁場のエネルギーの関係<sup>7)~13)</sup>。電子のエネルギーは、ローレンツ因子が 1,000 から 100,000 の電子のエネルギーの総量である。「あすか」、チャンドラ、ニュートンによる結果をそれぞれ、×印、◇印、□印で示した。また、3 本の斜めの鎖線は、左上から電子のエネルギーが磁場のエネルギーの 1 倍、10 倍、100 倍になっている場合を示している。

が、ほとんどのローブでは電子のエネルギーが磁場のエネルギーの 10 倍かそれ以上になっているというのが、観測的な事実です。ただし、この計算では、電子のエネルギーはローレンツ因子にして 1,000 から 100,000 の電子に限って総量を求め

ています。すなわち、逆コンプトン散乱 X 線とシンクロトロン電波によって私たちに「見えて」おり、確実に存在する電子に限定しているのです。しかし、電子の衝撃波加速などの理論を考えると、もっとエネルギーの低い（例えば非相対論的な）領域まで、電子のエネルギーが分布している可能性が十分にあります。その場合、低エネルギーのものほどベキ関数的に電子数が増えるので、エネルギーの総和は何桁も大きくなることになることが指摘されています<sup>14), 15)</sup>。いずれにしても、ジェットが運んできた運動エネルギーのほとんどは、その終端の貯蔵庫であるローブでは電子（とそれに付随して流れていると思われる陽電子または陽子）のエネルギーとして蓄えられているのです。

#### 4. 活動中心核とローブのつながり

ローブ中の電子や磁場はジェットが供給したものであることは、すでに述べたとおりです。ということは、ローブからジェットの情報が得られるはずですが、また、ジェットは活動中心核から吹き出しているわけですから、中心核の活動とローブには何か関係があるはずですが、ここでは、それらを少し考えてみましょう。ローブ中の電子は、シンクロトロン電波や逆コンプトン散乱 X 線を放出することで、少しずつエネルギーを失っています。したがって、その放射にかかる特徴的な時間（冷却時間といいます）でローブ中の全エネルギーを平均すると、ジェットが単位時間に運んでいる運動エネルギーの量（ジェットのパワーと呼ぶことにします）が分かるはずですが、つまり、それだけのエネルギーをジェットがローブへと供給しない限り、ローブはどんどん暗くなってしまう、その形を保っておくことができないのです。こうやって求めたジェットのパワーを活動中心核の X 線の光度に対して表示したのが図 4 になります。

ジェットのパワーは、中心核の X 線光度に対

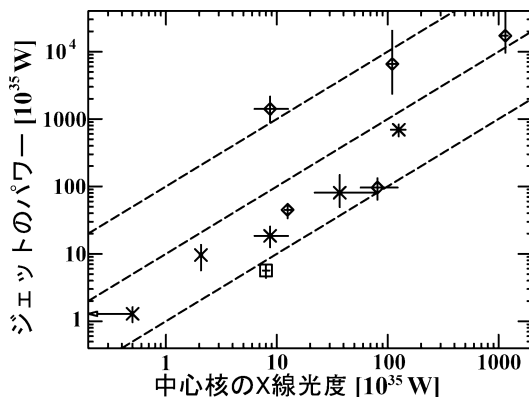


図 4 ローブにたまった全エネルギーから見積もったジェットが単位時間に運搬するエネルギーと、活動中心核の 2 から 10 キロ電子ボルトの X 線光度の関係<sup>10)</sup>。記号は図 3 と同じ。3 本の斜めの鎖線は左上から、ジェットの単位時間の運搬エネルギーが、中心核の X 線光度の 100 倍、10 倍、1 倍になっている場合を示している。

して、ほぼ比例するような関係にあることがよく分かるでしょう。また、ジェットのパワーは中心核の X 線光度とほど同程度か、それよりも大きいということも重要です。電波ローブを持つような天体では、中心核からのエネルギー解放の方法として、ジェットも放射と同じ同程度の役割を担っているのです。では、図 4 のような比例関係はいったい何を意味しているのでしょうか？ 第 1 節で述べたように、活動中心核は物質を吸い込むときに解放される重力エネルギーで輝いており、X 線もその例外ではないでしょう。したがって、この比例関係はジェットという巨大な加速器もやはり、中心核が解放する重力エネルギーをエンジンにして稼働していることを示しているのです。このように、中心核から数十万年も離れたローブも、ジェットを通してしっかりと中心核とつながっており、その莫大なエネルギーが、銀河間空間へと放出されている現場となっていることを端的に示しているのです。

## 5. おわりに

90年代以降、観測器の飛躍的進歩によって、X線観測でも詳細な撮像分光が主流となりました。これによって、活動銀河核ジェットのもう一つのエネルギー放射チャンネルである逆コンプトン放射がカバーされ、電子のエネルギーと磁場を分離した観測が可能になりました。その結果、これまで假定されてきた電子と磁場の平衡が、大きく崩れていることが分かってきました。電波ローブのX線観測については、私たちのグループが先行し、磯部の博士論文<sup>10)</sup>が一つの到達点を示しています。今世紀に入ってからは、さらにジェットやホットスポットのX線観測が広まり、さまざまな場面で、この電子と磁場の非平衡が広く認められるようになってきました。この結果によって、活動銀河核から銀河間空間に供給されているエネルギーの総量は大きく改訂されることになりました。また、巨大ブラックホールと銀河間空間の架け橋であるジェットの加速機構を考えるうえでも重要な前提となっています。

### 参考文献

- 1) Sambruna R. M., et al., 2002, ApJ 571, 206
- 2) Tanihata C., et al., 2003, ApJ 584, 153
- 3) Kaneda H., et al., 1995, ApJ 453, L13
- 4) 田代 信, 2000, 天文月報 93, 487
- 5) Tashiro M., et al., 2001, ApJ 546, L19
- 6) Harris D. E., Grindlay J. E., 1979, MNRAS 188, 25

- 7) Tashiro M., et al., 1998, ApJ 499, 713
- 8) Ekers R. D., et al., 1983, A&A 127, 361
- 9) Isobe N., et al. 2002, ApJ 580, L111
- 10) 磯部直樹, 2002, 博士論文, 東京大学
- 11) Brunetti G., et al., 1999, A&A 342, 57
- 12) Brunetti G., et al., 2001, A&A 372, 755
- 13) Brunetti G., et al., 2002, A&A 381, 795
- 14) Kataoka J., et al., 2003, A&A 410, 833
- 15) Kino M., Takahara F., 2004, MNRAS 349, 336

### X-rays from Radio Lobes

—As a probe of the jet energetics—

**Makoto TASHIRO**

*Department of Physics, Saitama University,  
Sakura, Saitama 338-8570, Japan*

**Naoki ISOBE**

*ISS Science Project Office, ISAS/JAXA, Tsukuba  
Space Center, Sengen, Tsukuba 305-8505, Japan*

**Abstract:** The advent of a series of imaging X-ray observatories enable us to observe active galactic nucleus jets and radio lobes. The electron and magnetic field energies contained in the outflows are derived by measuring the CMB/inverse-Compton X-rays with the synchrotron radio flux. Through the observations in recent years, it has been shown that a large amount of energy is transferred from the nucleus to the radio lobes by the relativistic particles in jets.