

「あすか」が見つけた電波ローブからのX線放射

田代 信

<東京大学 大学院理学系研究科物理学 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1>*
e-mail: tashiro@phys.s.u-tokyo.ac.jp

X線天文衛星「あすか」は、1993年の打ち上げ以来、その優れた撮像分光性能によって数々の成果をあげてきた。ここで紹介する電波ローブからのX線の発見も、その特徴を十分に発揮した成果の一つである。「あすか」の観測から、X線は、ローブ中の相対論的電子がマイクロ波背景放射を逆コンプトン散乱することによって作り出されていることが明らかになった。電波で観測されるシンクロトロン放射と比較することによって、これまでわからなかった、ローブ中の電子と磁場のエネルギーバランスやそれらの分布などが、明らかにされつつある。ここでは「あすか」のもたらした成果と、最近の展開を紹介する。

1. 活動銀河核と電波ローブ

活動銀河核——それは多くの銀河の中心に座し、太陽系かせいぜい恒星間距離ほどにすぎないコンパクトな領域から、銀河系全体の恒星に匹敵するエネルギーを絞り出す、驚異的な効率をもつ天体である。エネルギーを生み出すエンジンは、太陽の100万倍から1億倍の質量をもつ巨大ブラックホールだ。この宇宙でも最大規模のブラックホールの重力場によって、最大で地球1個に相当する質量が1秒毎に事象の地平のむこうに運び去られていく。その流れの中で解放される重力エネルギーが活動銀河核のエネルギー源となっている。

落ち込んでいく物質あるいはその近傍が輝いているだけではない。ものによっては、宇宙ジェットとよばれる巨大な線形加速器を備えている。ジェットは、活動銀河核を中心に対称にのびる電波で輝く二本の糸として観測される。糸の太さは1光日から大きくとも数光年、長さは中心核を宿す銀河のサイズをはるかに超え数十万光年にまでおよぶ。繊細かつ大規模な構造である。しかも、ジェ

ット中のプラズマは、光速にちかい速度で、銀河核から両側に吹き出している。速度制限は相対論のみ。一方通行で、終点までは何十万年もかかる壮大な宇宙の「光速道路」である。

銀河間空間をわたるこのスーパーハイウェイにも終点があり、そこには電波ローブと呼ばれる風船状の巨大な電波源が付随することがある。ローブ(lobe)とは耳たぶのことである。活動銀河核を中心に両側に耳のように、差し渡し数万光年もひろがってみえる。ローブを可視光でみることはできないが、電波でみると、銀河系外でもっとも明るい広がった電波源になる。この電波源からX線が出ていることを発見したところから、ここで紹介する我々の研究が始まった。

2. 電波ローブからのX線の発見

1994年、我々は、X線天文衛星「あすか」を使って、「ろ座A」あるいはNGC1316と呼ばれる電波銀河の電波ローブから、X線が出ていることを発見した¹⁾。ほぼ同時期に米国のFeigelson博士のグループもヨーロッパのX線天文衛星ROSATをつ

*9月1日より埼玉大学理学部物理学教室 〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255

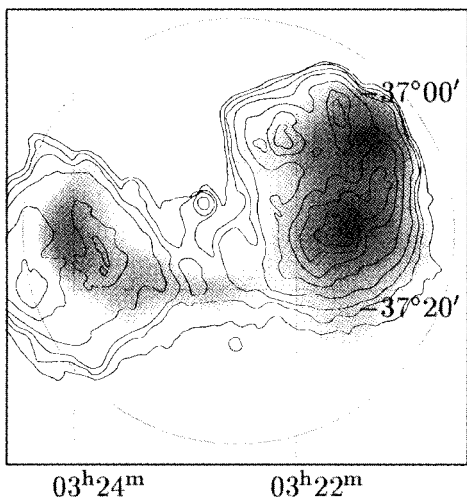


図1 ろ座 A の「あすか」搭載の X 線反射鏡 (XRT) と撮像型ガス蛍光比例計数管 (GIS) による画像 (濃淡) に, Ekers et al. (1983)³⁾ による 1.4 GHz 干渉計画像 (青等高線) を重ね合わせたもの。電波ローブに付随した広がった X 線源があるのがわかる。中心の銀河からの X 線放射は、マスクして取り除いている。Kaneda et al. (1995) の結果による¹⁾。

かって、この電波ローブから、X 線を検出することに成功しており、奇しくも同時期に独立した観測で確認されることになった²⁾。

ROSAT は空間分解能に優れているので、X 線源が蝟集した点源の集まりではなく、ローブ³⁾に沿った広がりをもっていることを明らかにすることができた。

これに対して「あすか」は、硬 X 線に優れた感度を活かし、ローブ中に広がった X 線源を検出しただけでなく (図 1)、それが高エネルギーまでのびるべき関数型の非熱的 X 線放射を行っていることを見いだした。図 2 に後で述べる 1997 年の追観測の結果も含めた西のローブの X 線スペクトルを示す。天体の周囲を取りまく熱的な放射や混入点源を卓越して、8 キロ電子ボルトをこえる高エネルギーまでのびる「硬い」X 線成分がはっきりとみえる。この硬い成分は光子指数にして 1.74 ± 0.26 のべき型のスペクトルを示し、やはりべき型 (光子指数

1.9 ± 0.2) のシンクロトロン電波スペクトルと誤差の範囲で同じ傾きを示している⁴⁾。

電波で明るいとはいえ、可視光ではまったく観測できない電波ローブが、なぜ、さらに波長が短い X 線で検出できたのだろうか。そしてなぜ、電波と同じかたちのスペクトルをもっているのだろうか。

3. 電波ローブ中からの放射機構

3.1 シンクロトロン電波

ローブは幾百の千年期を超えて銀河間空間を旅し続けてきたジェット of 終点である。銀河間光道路をおり制動がかかるときには、盛大なエネルギー放出を伴う。急激に減速されたプラズマ流は、乱流となり、ジェットという細い川筋からあふれ出して広がっていく。もともと光速に近い速度をもったプラズマである。それが、100 万年の単位で延々とあふれ出してくることを思えば、ローブ中プラズマのエネルギーの総量がまさに「天文学的」なものになることは想像に難くない⁵⁾。このプラズマ中の電子が減速されるときに、電磁波 (光子) が放出される。たとえば、このプラズマに含まれる電子が、数百ピコテスラという地球上の 10 万分の 1 程度のわずかな磁場に進路が曲げられるだけで、全体としては 10^{31}W 以上の強力なシンクロトロン電波源となる。これが「輝く耳たぶ」—電波ローブの正体である。

3.2 X 線逆コンプトン散乱

シンクロトロン電波を出している電子は、光速に近い速度でランダムに運動している。この高エネルギー電子が、宇宙に遍在するマイクロ波背景放射光子とぶつかると、こんどは光子にエネルギーを与え、マイクロ波光子を X 線やガンマ線といった高エネルギー光子に変換する。このような電子から光子へのエネルギーの受け渡しを「逆コンプトン散乱」という。

銀河系規模より小さな天体では、可視光や赤外

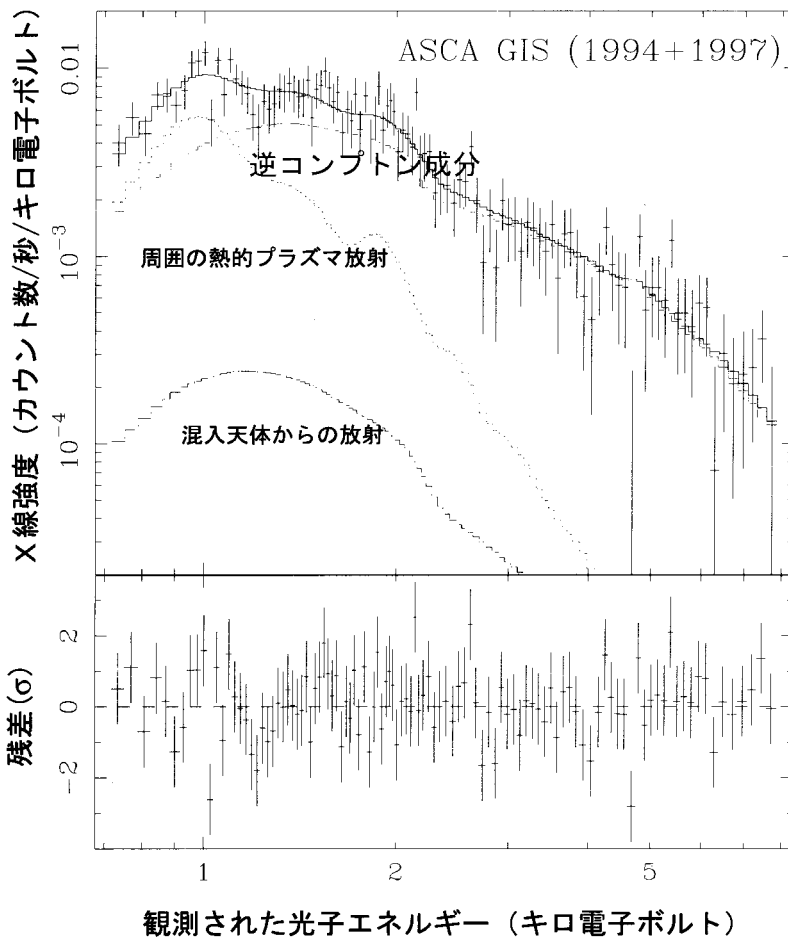


図2 ろ座Aの電波ローブからのX線スペクトル。1997年の追観測の結果を加えてTashiro et al. (2000)が西ローブから得たものを示す(5.1節参照)。電波銀河周辺を覆う熱的プラズマと混入点源からの放射に、ひろがった「硬い」スペクトル(青色)が見られる。この硬い成分は、べき型で良く再現された⁴⁾。

線など天体自身から光が卓越しており、マイクロ波背景放射の逆コンプトン散乱は問題にならない。しかし、電波ローブの場合は、全体としてならば強力な電波源ではあるものの、放射のエネルギー密度にするとごくわずかになる。このような希薄な銀河間空間においては、むしろ、マイクロ波背景放射(エネルギー密度 $4.1 \times 10^{-14} \text{Jm}^{-3}$)やナノテスラに満たない磁場(エネルギー密度 10^{-14}Jm^{-3})が、電子のエネルギーを電磁波に変える主な役割をはたすことになる。

そして逆コンプトン散乱光には散乱する電子のスペクトルが、結果として生成される高エネルギー光子のスペクトルに反映されるという重要な性質

がある。「あすか」が観測した「ろ座A」ローブのX線スペクトルは、シンクロトロン電波とおなじかたちをしており、このことと、他のさまざまな証拠から、X線が逆コンプトン散乱で作られたと結論できるのである。

3.3 力関係が決める放射の競合

ここまでで、登場人物は、電子と磁場とマイクロ波背景放射であることが分かった。電子からみて、ぶつかる(散乱する)相手が磁場なのか背景放射光子なのかによって、放射される電磁波の波長が異なる。磁場のエネルギー密度が高ければ、磁場と相互作用しやすく多くのシンクロトロン電

波を放射するが、磁場が弱く背景放射が優勢となれば、逆コンプトン X 線を多く作り出すことになる。

マイクロ波背景放射のエネルギー密度は、天体が輝いている時代—そのときの宇宙のサイズで決まっている。観測する側からいえば、天体の赤方偏移から宇宙膨張を仮定すれば簡単に推定できる。ということは逆に、逆コンプトン X 線の光度と放射体（ローブ）の体積がわかれば、電子のエネルギー密度が測定できることになる。

一方、磁場の強度は、シンクロトロン電波強度と X 線との強度比から求まる。というより、この強度比がそのまま背景放射光子と磁場のエネルギー密度比になっているのである。観測される強度比にしかよらないので、天体までの距離の不定性にすら影響されないで決定できる強みがある。

このようにしてシンクロトロン電波と逆コンプトン X 線の両方を測定することで、電波ローブを支配する電子と磁場のエネルギー分布を正確に測定することが可能となった。実は、このような電子と磁場の測定方法は、70 年代から提案されていた⁶⁾。しかし、表面輝度の低い逆コンプトン X 線の測定が必要なため、実現までには、「あすか」や ROSAT といった高感度の X 線撮像望遠鏡の登場を待たなければならなかったのである。

4. 逆コンプトン X 線検出の意義

4.1 「ろ座 A」電波源のローブ

ろ座 A の場合は、ローブ全体から、1 キロ電子ボルトでの X 線強度 (flux density) にして $2.0 \times 10^{33} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ の X 線放射が観測された。

天体の赤方偏移 ($z = 0.0059$) から背景放射の強度とローブの実サイズを、シンクロトロン放射から電子スペクトルを求め、電子のエネルギー密度を算出する。さらに、X 線とおなじ領域の電波強度 (1.4 GHz で $1.0 \times 10^{24} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} = 100 \text{ Jy}$)、との比をとることで、磁場のエネルギー密度が求められる。

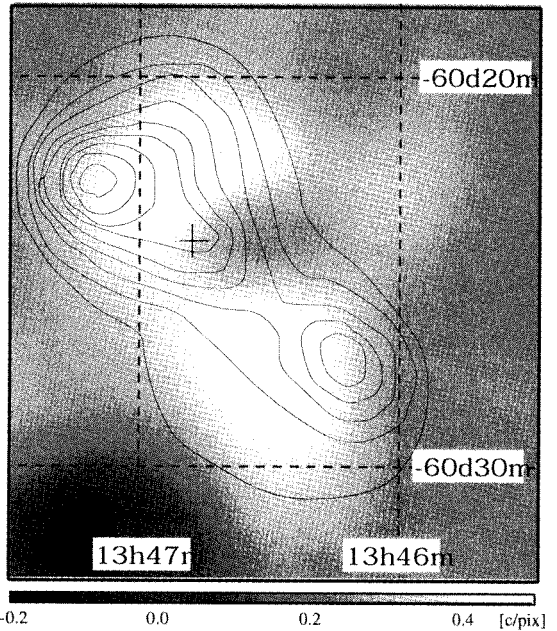


図3 ケンタウルス座 B の XRT-GIS による画像 (濃淡) に、McAdam (1991)⁸⁾ による 843 MHz 電波干渉計による画像 (青等高線) を重ねたもの。中心銀河からの X 線放射は、点源をしミュレートしたうえで取り除いてある。Tashiro et al. (1998) の結果による⁷⁾。

結果、両方の電波ローブの内部が一様であると仮定すると、電子のエネルギー密度が $(2.0 \pm 0.6) \times 10^{14} \text{ J m}^{-3}$ 、磁場のエネルギー密度が $(3.6 \pm 1.1) \times 10^{14} \text{ J m}^{-3}$ とほぼ拮抗しているようにみえることがわかった¹⁾ (これらのエネルギー密度が、背景放射のそれと近いというのも興味深い)。

このようにして我々は、「ろ座 A」ローブからの逆コンプトン X 線観測によって、電子と磁場のエネルギー配分を解くことができた。これは、これまでの電子と磁場のエネルギー平衡という前提が、初めて観測的に検証されたことになった。

4.2 二匹目、三匹目、そして四匹目の泥鰌

二匹目のどじょうとなったのが、ケンタウルス座 B (PKS 1343-601) という電波銀河であった。ローブの差し渡しは 12 分角程度とろ座 A の 1/4 程度、

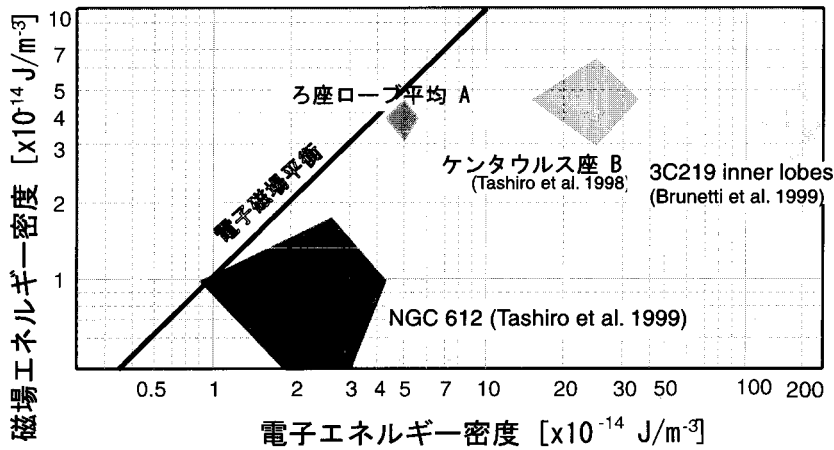


図4 マイクロ波背景放射を種光子とする電波ローブからの逆コンプトンX線の検出例から求めた電子と磁場のエネルギー密度の関係, それぞれ「ろ座A西ローブ⁴⁾」「ケンタウルス座B⁷⁾」「NGC612⁹⁾」「3C219¹⁰⁾」より. ただし, ろ座Aについては, 比較のため, 1997年の結果を含めつつも, 磁場, 電子とも一様と考えた場合を示していることに注意.

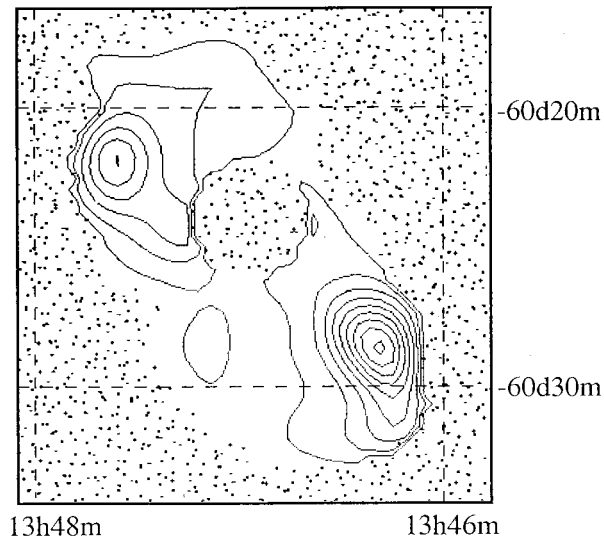


図5 ケンタウルス座Bの電波, X線観測の結果から求めた(磁場のエネルギー密度)/(電子のエネルギー密度)のマップ. 電波画像を自乗してX線画像で割り算した⁸⁾.

強度は1/2以下だが、銀河までの距離は2倍あるの
で、実際は、コンパクトで光度の大きな電波ローブ
ということになる。明るい活動銀河核も見えており、
ろ座Aにくらべ活動的な電波銀河である。

1996年、我々は「あすか」を用いてケンタウル
ス座Bのローブからも逆コンプトンX線を検出す
ることに成功した⁷⁾。図3に検出されたローブX線
画像(濃淡)とMcAdam博士による電波画像(等高
線)⁸⁾を示した。この天体の場合は、電波強度に対
するX線強度比が、ろ座Aにくらべはるかに大き
かった。電波強度は磁場と電子のエネルギーの積、
X線強度は電子の強度を反映するので、X線で明
るいということは、磁場に較べて電子のエネルギー
が大きいということを示している。詳しい計算の結
果、電波ローブ全体の平均でみて、電子のエネル
ギーが磁場のエネルギーを、少なくとも4-20倍上
回っていることが分かった。

このほか、「あすか」を使った観測によってNGC
612から我々が⁹⁾、またROSATと「あすか」を使
った観測によって3C219の電波ローブからBrunetti
博士らが¹⁰⁾マイクロ波背景放射をタネとする逆コ
ンプトンX線を検出している。これらの結果から
求められている磁場と電子のエネルギー密度を図
4にまとめてみた。いずれも電子のエネルギー密
度が磁場に比べて卓越しているというたいへん
興味深い結果が得られている。

5. 電子と磁場の空間分布の解明へ

5.1 ローブ周縁に集中する磁場

ローブ中のエネルギー非平衡にあるのならば、
ジェットからローブへの供給口から周辺の銀河間
空間に広がる周縁部にいたるまで、その比も一定
でないかもしれない。そして、もしそのような非一
様性があるのなら、一般的には、磁場の強いとこ
ろをしめす電波輝度のピークと、電子の強いとこ
ろを示すX線輝度のピークにずれが見られるだろ
う。

実際、ケンタウルスBの場合、電波画像とX線
画像の比を取ると、図5にみるように活動銀河核
から遠くなるにつれ、エネルギーの主役が、電子か
ら磁場へとうつついていき、電波ローブの終端で、
ようやく電子と磁場のエネルギーが平衡に達して
いるようにみえることがわかった⁷⁾。

しかしケンタウルス座Bの視直径では、「あすか」
衛星でようやく空間分解できる程度にすぎない。
より詳しい理解には、やはり見た目に大きなろ座
Aがよい(ケンタウルス座Bについては、より空間
分解能と感度の高いNewton衛星を利用することに
している)。そこで、我々は、ろ座Aの西のローブ
にねらいをつけ、鮮明な画像を得るために、ローブ
をあすかの視野中央に据えて計3日間にわたる長
時間露出を行った⁴⁾。

得られたX線画像をEkers博士ら³⁾によって得ら
れた電波干渉計の画像と重ねたのが図6である。
凝集しているX線の輝度分布に対し、電波では縁

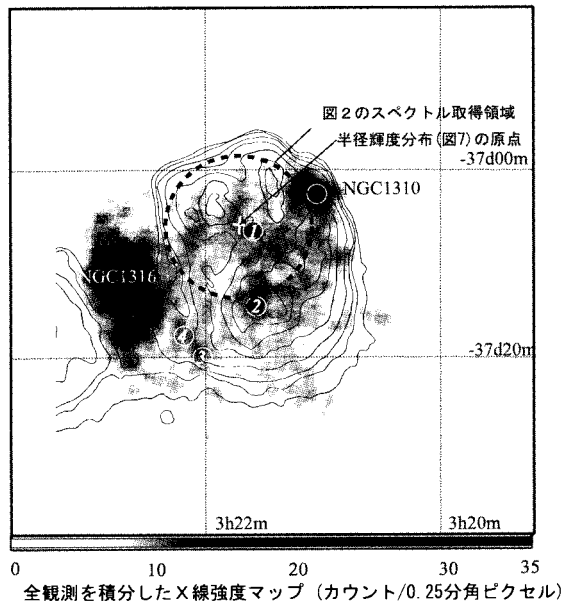


図6 ろ座A西ローブの再観測結果を含めた画像。1994年、
1997年の観測結果をあわせたX線画像(濃淡)に
Ekers et al. (1983)による1.4 GHz電波干渉計(青等
高線)を重ねた。ROSAT-PSPC(位置検出器型比例
計数管)アーカイブデータで確認した点源の位置を
白丸で示してある⁴⁾。

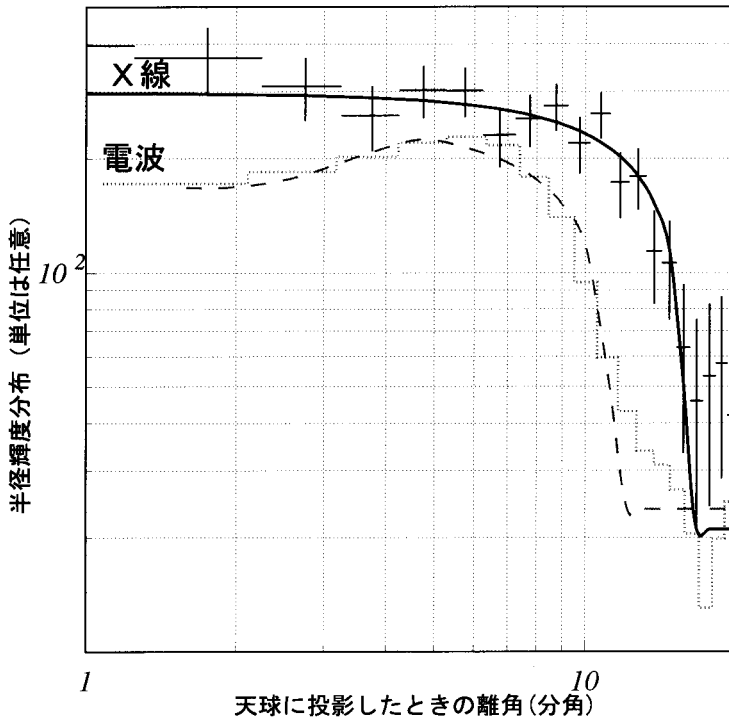


図7 ろ座西ロープのX線半径輝度分布（十字）と電波（青点線）の半径輝度分布。横軸はX線輝度ピークを中心に天球上に投影した離角、縦軸は輝度を任意の単位で示してある。それぞれの輝度分布をX線は一様球モデル（実線）と球殻モデル（青破線）でフィットした結果も示してある⁴⁾。

が明るく（口の欠けた）球殻状にみえる。

数字で示したいいくつかの混入天体の位置とスペクトルを、角度分解能にすぐれたROSAT衛星の画像をつかって特定したうえで取り除き、X線のロープ成分のX線の輝度ピークからの半径輝度分布をとると図7のようになった。バックグラウンド成分や観測装置によるゆがみは補正してある。分布の傾向の違いを見やすくするために、電波画像も半径輝度分布に焼き直して点線で重ね書きしてある。

これは天球面に投影した画像を半径方向にさらに投影したことになる。ここでもやはり、中心集中型のX線輝度分布と異なり、電波では周縁でいったん明るくなる様子が見て取れる。また一見すると、X線の方が広がっているかのようにも見えるが、X線望遠鏡の角度応答を考慮する必要があるので、

もとの三次元の輝度分布を仮定して、望遠鏡と検出器の応答関数を考慮したモデルフィットによって調べてみる。すると、X線は半径11分角の「一様球」、電波は内径4分角、外径11分角の「球殻」の構造をもっていることがわかった。

マイクロ波背景放射を種光子とする逆コンプトンX線の場合、その放射領域は、電子のエネルギー密度の高い領域をトレースすることになる。つまり、高エネルギー電子が球殻の内部に一樣に広がっていることを示している。一方、シンクロトロン電波は、電子と磁場のト

レーサーとなる。ところが電子が一様分布しているとすると、シンクロトロン電波の示す構造は磁場の強い領域をトレースすることになる。すなわち磁場は、プラズマの周りを取り巻くように、球殻をなしていることになる。スケールは不正確だが、両者のエネルギー分布の違いを強調した模式図を図8に示した。

5.2 空間構造の語るもの

この中抜きという形状の特徴を考慮して電子と磁場のエネルギー密度を求めなおしてみると、表1のようになった。もちろん磁場の強い球殻の内部、空洞の部分では電子エネルギーが卓越していることになる。逆に「殻」の部分では、磁場が電子を卓越しているようにみえる。

ただし電子のエネルギー分布の全域を観測できているわけではないので、厳密には下限値というこ

表1 ろ座A西ロープの磁場と電子のエネルギー密度

中心からの距離 (離角)	0—8.4万光年 (0—4分角)	8.4万光年—23万光年 (4—11分角)	23万光年以上 (>11分角)
磁場 (球殻モデル)	0	4.6 ± 0.4	0
電子 (一様球モデル)	2.0 ± 0.6	同左	0

エネルギー密度の単位は、 $10^{-14} \text{ J m}^{-3}$ 。ハッブル定数は $75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ とした。

とになる。さらに、電子にともなって存在するであろう陽子あるいは陽電子などの正電荷の粒子が、同等あるいはそれ以上のエネルギーをもっているかもしれない。そうすると、粒子と磁場のエネルギー分配は、周縁部でも平衡、もしくは粒子側の優勢ということになる可能性すらある。さらにこの観測の精度では、球殻の内部に磁場を必要としない結論が得られており、結果としてこの領域では電子が支配的であることはまちがいない。

これらの結果はロープの形成について何を物語っているのだろうか。ジェットの詳細な構造は、いかにも磁場がガイドしているようにみえる。実際、ジェットのような向きの揃った「冷たい」流れは、磁場によってガイドされているのかもしれない。しかし、ひとたびその流れが乱されると、流れは衝撃波によって「熱い」流れへと変貌をとげ、もはや磁場という堤はそれを押しとどめることができない。流出するプラズマによって押し広げられていく。しだいに磁場は、銀河間空間のプラズマや磁場によって圧縮され、ついに内圧である非熱的プラズマの圧力と拮抗するところとどまり、風船のような電波ロープを形成すると想像される。実際に観測される電波ロープは、しばしばフィラメント様の微細な構造があり、決して単純ではない。しかし、おおまかなダイナミクスとしては、このような粒子が主導するようなシナリオが描けるのかもしれない。

磁場エネルギー密度
(球殻モデル)

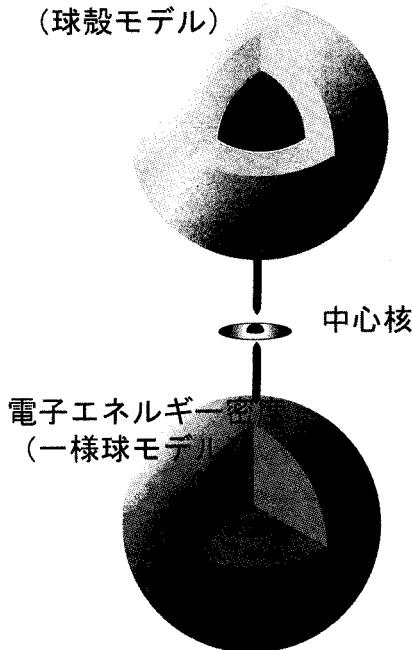


図8 ろ座Aの西ロープについて求めた、電子のエネルギー密度の一様球モデルと、磁場のエネルギー密度の球殻モデル(青色)を模式的に示した。

6. これから

これまで見てきたような、ローブの中での粒子優勢という状況は、ローブに普遍的なものなのだろうか。さらに観測を積み重ねる必要がある。また電子と磁場を別々に測る手段を得たので、これで細かい空間的な構造をみていけば電波ローブという巨大建造物をつくりだす建材と骨組みの詳細が明らかにできるだろう。特にX線観測における輝度感度と空間分解能の向上、さらに硬X線での撮像観測がこの面での飛躍をもたらすと期待される。

空間分解能の向上による観測の展開は、すでに始まっている。X線での空間分解能を0.5秒角へと飛躍的に高めたChandra衛星の登場によって、すこし別の角度から、ジェット中のホットスポットとよばれる局所的に電波の強い領域からのX線観測も成功するようになってきた。Harris博士らによれば、ここでも磁場と電子はエネルギー平衡状態にある¹¹⁾。Chandraはこのような、X線で明るい、微細な構造の研究に適した観測装置である。

また感度の高い欧州のNewton衛星は、電波ローブのような輝度の低い天体観測にむいている。「あすか」やROSATより高い空間分解能と史上類をみない高感度観測によって、ローブからのX線観測は飛躍的に進むと期待している。

しかし、なんといっても硬X線分光による1億度にも達する熱的放射との区別が重要である。特に熱的プラズマが支配する銀河団中で電波ローブの磁場とローブ中のプラズマという非熱的圧力がどのような状況におかれているか（すでにその端緒となる研究は「あすか」を用いては始めているが）、ローブの形成の起源を知る意味で興味深いところである。その意味でも、ASTRO-Eの軌道投入の失敗によって、広帯域のX線分光観測の機会が失われたことは非常に残念である。ASTRO-E実験の回復を含めさらなる硬X線分光（そして撮像）観測の進展を望んでいる。

参考文献

- 1) Kaneda H., et al., 1995, ApJ 453, L13
- 2) Feigelson E. D., et al., 1995, ApJ 449, L149
- 3) Ekers R. D., et al., 1983, A&A 127,361
- 4) Tashiro M., et al., 2000 ApJ, submitted
- 5) Iyomoto, N., et al., 1998, ApJ 503, L31
- 6) Harris D. E., & Grindlay J. E., 1979, MNRAS 188, 25
- 7) Tashiro M., et al., 1998, ApJ 499, 713
- 8) McAdam, W. B., 1991, Proc. Astron. Soc. Australia 9(2), 255
- 9) Tashiro M., et al., 2000, Adv. Space Res. 25, 751
- 10) Brunetti G., et al, 1999, A&A 342, 57
- 11) Harris D. E. et al., 2000, ApJ 530, L81

ASCA Discoveries of X-ray Emissions from Radio Lobes

TASHIRO, Makoto

Department of Physics, School of Science, the University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033

Abstract: An introduction is presented of recent ASCA discoveries of hard X-ray emissions from lobes of radio galaxies. The X-ray astronomy satellite, ASCA, has detected the hard X-rays from a fair number of radio lobes utilizing the excellent sensitivity in hard X-ray. Due to the good capability in spectroscopy, ASCA revealed the diffuse hard X-rays are produced via inverse-Comptonization of the cosmic microwave photons by the relativistic electrons in the lobes. Comparison of the newly measured inverse-Compton X-rays with the synchrotron radio from the lobes resolves energy densities and spatial distributions of electrons and magnetic fields in the lobes. Recent arguments on the energy balance and on derived magnetic field structure are also presented.