修士論文

X線観測による電波銀河 Cygnus Aのジェット活動の研究

埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程 物理機能専攻物理学コース

06MP109 **矢治裕一**

指導教官:田代信

平成 20 年 2 月 26 日

概 要

電波銀河は活動銀河核 (AGN)の一種であり、その名の通り電波で明るい天体である。その中心核 から噴出するジェットに附随する電波ローブは、ジェット中の電子や磁場によって中心核から銀河 間空間に輸送された巨大なエネルギー貯蔵庫である。電波ローブ中の電子や磁場のエネルギーは ジェットの活動の歴史を探る重要な指標であり、またジェットと周辺の銀河団ガスとの相互作用を 探る上でも重要な情報である。電波ローブは、強いシンクロトロン電波源として知られるが、最 近の X 線観測の発展により、X 線源でもあることが明らかになった。これは、シンクロトロン電 子が宇宙マイクロ波背景放射(CMB)、母銀河からの赤外線光子、あるいは電波ローブ自身からの 電波光子を逆コンプトン (IC) 散乱することで放出されると考えられている。種光子を特定した上 で、この電波とX線の強度を比較すれば、電子と磁場のエネルギー密度 ue と um を正確に解きほ ぐすことが出来る。したがって電波ローブのX線観測は、ジェットの活動を探る非常に有効なプ ローブとなる。本研究でとりあげる Cygnus A は、電波で非常に明るく有名な FR II 型の電波銀 河であり、典型的な電波ローブ構造を持つ。これまで様々な観測が行なわれており、ジェット研究 の恰好の観測対象となってきた。一方で、Cygnus A は銀河団の中心に存在することから、周辺 の熱的ガスからの放射が強く、これまで電波ローブからの逆コンプトン X 線を検出することは困 難であった。そこで空間分解能にすぐれた X 線天文衛星 Chandra によるの長時間の観測データを 解析した。その結果、Cygnus A の電波ローブからの非熱的な X 線放射を銀河団ガス起源の熱的 X線放射から分離することにはじめて成功した。その東ローブのスペクトルは、エネルギー指数 0.66のベキ型のスペクトルで非常によく再現でき、1 keV でのフラックス密度は 94 nJy と求める ことが出来た。エネルギー指数が、電波の指数と非常によく一致していることから、逆コンプト ンX線と考えてよい。散乱される種光子の評価の結果、他の銀河団ガスの希薄な領域に位置する 電波銀河の電波ローブとは異り、電波ローブ自体からの電波光子の方が有力で、シンクロトロンセ ルフコンプトン過程のX線放射である可能性が高いことがわかった。この結果から見積もられた ローブ内のエネルギー密度は高く、周辺の銀河団ガスを押しのけるほどであることが示唆された。

目 次

第1章	序論	6
第2章	電波銀河	7
2.1	活動銀河核 (Active Galactic Nucleus:AGN)	7
	2.1.1 セイファート 銀河	8
	2.1.2 クェーサー	8
	2.1.3 ブレーザー (BL Lac 天体)	9
	2.1.4 電波銀河	9
2.2	電波銀河の特徴	10
	2.2.1 ジェット	10
	2.2.2 ホットスポット	10
	2.2.3 電波ローブ	10
2.3	電波ローブの放射過程とエネルギー...............................	12
	2.3.1 シンクロトロン 放射	12
	2.3.2 逆コンプトン放射	13
	2.3.3 観測値からローブの物理量	16
2.4	銀河団中の電波ロープ	19
	2.4.1 銀河団ガスの X 線観測	19
	2.4.2 銀河団ガスの圧力とローブ内の総エネルギー密度	19
2.5	電波銀河 Cygnus A	20
	2.5.1 電波ローブ	20
	2.5.2 銀河団ガス	20
笛ヶ咅	Y 娘王文衛星 Chandra	91
カリ早 91		41 91
0.1 2.0	$\operatorname{High} \operatorname{Pagolution} \operatorname{Mirror} \operatorname{Aggombly}(\operatorname{HDMA})$	21 99
0.2	11gn Resolution Millor Assembly(IIRMA)	22
	3.2.1 月劝曲復	∠ວ <u>າ</u> 2
9 9	Advanced CCD Imaging Spectrometer(ACIS)	20 25
J.J	Advanced CCD maging Spectrometer(ACIS)	$\frac{20}{97}$
	3.3.1 秋山床埕	21
	3.3.2 里」 如平 C F 知 山 慎 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	21 20
	3.3.3 王间刀 肝能	20
	3.3.4 エイルイーカ解記	29 20
	3.3.3 ハタククノウノドのノレナ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	29 20
94	3.3.0 インノアノレード	อ ∪ จา
0.4		32 39
	3.4.1 FIIS $J = J$	3∆ วา
	$\mathbf{J}_{4,4} = \mathbf{H}_{1} \mathbf{J} \mathbf{J} \mathbf{J} = \mathbf{U}_{1} \mathbf{U}$	32

第4章	電波 Cyguns A の Chandra 衛星による	
	X 線観測と解析結果	33
4.1	X 線観測	33
4.2	データセレクション	33
4.3	X 線画像	34
	4.3.1 ハードネスレイシオの空間分布	34
4.4	解析結果:電波ローブ	36
	4.4.1 積分領域	36
	4.4.2 ローブ領域とローブ周辺領域の X 線スペクトル	36
	4.4.3 ローブからの X 線スペクトル	39
		00
笠を守		40
第5章	議論	42
第5章 5.1	議論 X 線スペクトルの解釈	42 42
第5章 5.1 5.2	議論 X 線スペクトルの解釈	42 42 42
第5章 5.1 5.2 5.3	議論 X 線スペクトルの解釈	42 42 42 42
第5章 5.1 5.2 5.3 5.4	議論 X 線スペクトルの解釈 多波長スペクトル 種光子 電波ロープ内の電子、磁場エネルギー密度	42 42 42 44 46
第5章 5.1 5.2 5.3 5.4	議論 X 線スペクトルの解釈 多波長スペクトル 種光子 電波ローブ内の電子、磁場エネルギー密度 5.4.1 SSC コードによる多波長スペクトルフィット	42 42 42 44 46 46
第5章 5.1 5.2 5.3 5.4	議論 X 線スペクトルの解釈 多波長スペクトル 種光子 電波ロープ内の電子、磁場エネルギー密度 5.4.1 SSC コードによる多波長スペクトルフィット 5.4.2 CMB を種光子とする逆コンプトンX線	42 42 42 44 46 46 47
第5章 5.1 5.2 5.3 5.4	議論 X 線スペクトルの解釈 多波長スペクトル 種光子 電波ロープ内の電子、磁場エネルギー密度 5.4.1 SSC コードによる多波長スペクトルフィット 5.4.2 CMB を種光子とする逆コンプトンX線 5.4.3 電波ローブ内のエネルギーと周辺の熱的ガスの圧力	42 42 42 44 46 46 46 47 49

第6章 まとめ

図目次

2.1	AGN の統一モデル	7
2.2	セイファート 2 型銀河、Circinus 座銀河 (c)NASA	8
2.3	(左)1 型のスペクトル、(右)2 型のスペクトル	8
2.4	ブレーザー天体 Mrk421 の X 線帯域のライトカーブ (Kataoka et al. 2001)	9
2.5	ブレーザー天体 Mrk421 の強度変動にともなった多波長スペクトル (Takahashi et	
	al. 2000)	9
2.6	左:FRI 型電波銀河 Hydra A(G. B. Taylor et al. 1990)、右:FRII 型電波銀河	
	Cygnus A(R.A.Perley et al. 1984)の電波画像。	9
2.7	電波銀河 $\mathrm{M87}$ の電波、可視光、X 線で観測されたジェットの画像。 $(\mathrm{c})\mathrm{NASA}$	10
2.8	左:Fornax A の電波画像 (Fomalont et al 1989)、右:カラースケールは X 線強度	
	をカラースケール、、電波強度を等高線で示した (Tashiro et al 2001)。	11
2.9	これまで知られている電波ローブの磁場、電子のエネルギー密度のプロット	11
2.10	無次元関数 $F(x)$ 。ここで $x = \nu/\nu_c$ 。	13
2.11	逆コンプトン散乱のジオメトリー。左が観測者系。右が電子の静止系。 	14
2.12	CMB のエネルギー密度 u_CMB と中心核からの赤外線光子のエネルギー密度 u_IR の	
	比較。赤方偏移 $z = 0$ としてある。	17
2.13	(左) 電子の $N_0 = 0.1$ 、 $p = 2.5 \gamma_{min} = 10^2$ 、 $\gamma_{max} = 10^5 R = 10^{22}$ cm における	
	磁場 B を $1,10,100\mu$ G 変化させたものである。(右) 電子の $B=10\mu$ G、 $p=2.5$	
	$\gamma_{min}=10^2$ 、 $\gamma_{max}=10^5\;R=10^{22}{ m cm}$ における電子の規格定数 N_0 を $1,0.1,0.01$ 変	
	化させたものである。	18
2.14	上:銀河団の模式図。下:可視光で観測された Coma 銀河団	19
2.15	MS0735.6+7421 の電波画像 (左上) と X 線画像 (左下)(B.McNamara et al 2005)。	19
2.16	電波銀河 Cygnus A の 5GHz の電波画像。	20
3.1	(左) Chandra 衛星の全体像。(右) Crab 天体の ROSAT 衛星、 Chandra 衛星で撮像	
		21
3.2	HRMA の構造図	22
3.3		22
3.4	(左)On-axis における HRMA の有効面積と入射エネルギーの関係。(右)Off-axis に	
	おける HRMA の有効面積と入射角度の関係。 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
3.5	On-axis における中心からの半径と encircled energy との関係	24
3.6	ACIS の構造図	25
3.7	ACISの模式図	25
3.8	(左) 量子効果効果 (右)FI 型 CCD と BI 型 CCD の有効面積	27
3.9	PG1634-706 天体の 1keV における encircled enegy function。	28
3.10	aimpoint を ACIS-I、ACIS-S としたときの off-axis における 1.49keV の encircled	
	energy が 0.5 になる半径の等高線。	28

3.11	(左) 打ち上げ前の ACIS のエネルギ-分解能。(右)ACIS-I3 と ACIS-S3 のピクセル	
	位置に依存したエネルギー分解能	29
3.12	観測 ID1190 のバックグラウンドのライトカーブ	30
3.13	観測 ID1226 のバックグラウンドの静穏時、フレア中のスペクトル	30
3.14	イベントグレード値の配置図とX線のイベントパターン。	31
41	Cygnus A の <i>Chandra</i> 衛星による観測から得られた X 線画像。	33
4.2	celldetect による領域	34
4.3	バックグラウンド領域のライトカーブ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	34
4.4	Cygnus A の 0.7-7keV の X 線画像	35
4.5	Cygnus A の 0.7-7keV の X 線画像	35
4.6	ローブ、ローブ周辺に対する BGD 領域	36
4.7	ローブ周辺のスペクトル	37
4.8	左の図は東西の積分領域。真中、右の図は内側、外側のスペクトル。	38
4.9	sou、bgd、sigのスペクトル	39
4.10	sou、bgd、sig の鉄ライン	40
4.11	コントアーマップ...............................	41
5.1	330MHz、1.3GHz、1.7GHz、5GHzの電波画像。白い円はフラックス密度を求めた	
0.1	領域。	42
5.2	多波長スペクトル	43
5.3	中心核からロープまでの距離	44
5.4	Cygnus AのCMB、AGNからの赤外線光子、電波ローブからのシンクロトロン電	
	。〕 波光子のエネルギー密度	45
5.5	(右) 積分領域 (白丸) を示した 5GHz の電波画像。(左)Carilli et al. 1991 から電波	
	ローブのピーク振動数の空間分布を示したマップ。画像の色彩はピーク振動数を示	
	し、凡例として上のカラーバーはピーク振動数の指標である。ピーク振動数 3、4、	
	5、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、70GHzの等高線が示されている。	46
5.6	上が東ローブ、下が西ローブの多波長スペクトル。それぞれのバンドのデータ点と	
	SSC 計算コードのスペクトルを示した。青緑のスペクトルは $\gamma_{min}=10^2$ でのスペ	
	クトル。赤のスペクトルは電子のエネルギー密度から計算した CMB が種光子であ	
	るときの逆コンプトン X 線。	48
5.7	これまで観測で求められたローブの電子、磁場のエネルギー密度と本論文で求めた	
	Cygnus A のローブの電子、磁場のエネルギー密度を示した。3 本の斜線は電子の	
	エネルギー密度と磁場のエネルギー密度の比を表わし、それぞれ上から $u_e/u_m=$	
	1,10,100 を表わしている。データ点の色はローブのサイズで大まかに分けられて	
	พร	49

表目次

2.1	AGN の伝統的分類	7
2.2	Cygnus A の諸元	20
3.1	HRMA の特徴	23
3.2	ACIS の特徴	26
3.3	ACIS と ASCA のイベントグレード	31
4.1	観測データの概要	33
4.2	各観測での有効観測時間...................................	34
4.3	ローブ、ロープ周辺の銀河団ガスの温度、重元素量の太陽組成比、フラックス	37
4.4	ローブ周辺の銀河団ガスの温度、重元素量の太陽組成比、フラックス	38
4.5	ローブ領域、バックグラウンド、ローブの 0.7 -7 keV の $\mathrm{Counts}~\mathrm{sec}^{-1}$	39
4.6	sou、bgd、sigの鉄ライン	40
4.7	PL モデルのベストフィット値	40
4.8	鉄ライン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	41
5.1	電波観測の諸元	42
5.2	東西ローブの電波、X線のフラックス密度とスペクトル指数	43
5.3	光子のエネルギー密度	44
5.4	電波ローブの半径、輝度、シンクロトロン電波のエネルギー密度........	45
5.5	ローブの物理量	47

第1章 序論

活動銀河核は、宇宙の高エネルギー現象の代表的な現場であり、中心核の巨大ブラックホール に周辺の物質が降着し重力エネルギーを解放することで、宇宙空間に膨大なエネルギーを放出し ている。このエネルギーの放出過程の1つに中心核から双方に噴出している細く絞られたプラズ マ流のジェットが知られている。ジェットの終端には電波ローブと呼ばれるものを形成し、活動銀 河核からジェットにより放出された電子や磁場を含む巨大なエネルギーの吹き溜まりである。電波 ローブ中の電子や磁場のエネルギーはジェット活動を探る重要な指標であり、またジェットと銀河 間物質との相互作用を探る上でも重要な情報である。

電波ローブはその名の通り電波源として知られ、これまで多くの電波観測されてきた。電波ロー ブの電波は偏光観測などから電子と磁場から生成されるシンクロトロン放射によって生成されて いる。さらに近年のX線観測の発展により電波ローブは逆コンプトンX線源であることもわかっ ている。この逆コンプトンX線の種光子を同定し、電波強度と比較することで電波ローブ内の電 子と磁場エネルギーを正確に求めることができる。これまでに30天体ほどの電波ローブからX線 が検出され、電波ローブ内のエネルギーが正確に求められている。しかしこの電波ローブからX線 なん、孤立した電波ローブ内のエネルギーを求めることはできても、銀河間物質との相互作 用を探るまでは到らなかった。もし周辺に熱的なX線放射しているガスが豊富に存在している空 間に位置する電波ローブからのX線を検出することができれば、銀河間物質との相互作用を探る ことができ、同士に詳細なジェットの持つ圧力などの情報を得ることができる。

本論文では電波ローブを持ち、熱的なX線放射しているガスが豊富に存在している銀河団中心 に位置している電波銀河 Cygnus Aのについて、*Chandra*衛星の観測データ、過去の*VLA*の電波 の観測データを用いて、Cygnus Aのジェット活動を探る重要な指標である電波ローブ内の電子、 磁場のエネルギー密度の評価を行なった。

2章では本論文の研究対象である電波銀河について、活動銀河核の観測的分類から電波銀河の 位置づけを述べ、電波銀河の観測的特徴と電波ローブの放射機構、エネルギーの算出方法を述べ る。また電波銀河 Cygnus A の過去の電波、X 線の観測を紹介し、観測事実について述べる。3章 では本論文で解析したデータの観測衛星 *Chandra* のミッション、検出器について述べる。4章で は *Chandra* の観測データの解析結果を詳細に記述し、5章でこの解析結果から Cygnus A の電波 ローブの放射過程、電波ローブ内の電子、磁場のエネルギー密度を議論する。6章で本論文の結論 をまとめる。

第2章 電波銀河

2.1 活動銀河核 (Active Galactic Nucleus:AGN)

多数存在する銀河の中には中心領域が異常に明るい銀河がある。この明るさは銀河全体の明る さと同等、またはそれ以上である。このような銀河を活動銀河と呼び、その活動源となっている 中心核を活動銀河核という。活動銀河核の正体は太陽質量の10⁶⁻⁸倍の巨大ブラックホールであ り、これに周辺の物質が落ち込むときに解放する重力エネルギーが電磁放射していると考えられ ている。このような活動銀河核の主な観測的特徴は、コンパクトな放射領域、電波からガンマ線 までの広帯域放射スペクトル、輝線、時間変動が上げられる。

以下に表 2.1 に AGN の観測からの伝統的分類、観測特徴から現在考えられている AGN の統一 モデルを図 2.1 に示し、次項でそれらの特徴を述べる。

AGN のタイプ	赤方偏移 z	$L_X[\text{erg s}^{-1}]$	母銀河。	空間密度 $[h^3 \text{Gpc}^{-3}]^b$	輝線幅。
電波の弱い AGN					
Syfert1 型銀河	< 0.1	10^{42-44}	\mathbf{S}	4×10^4	広+狭
Syfert2 型銀河	< 0.1	10^{42-44}	\mathbf{S}	1×10^5	狭
RQ,QSO	>0.1	10^{44-47}	$^{\mathrm{E,S}}$	100	広
電波の強い AGN					
電波銀河	< 0.3	10^{43-45}	Ε	3×10^3	広/狭
ブレーザー	< 0.3	10^{43-45}	Ε	3×10^2	輝線なし
RL,QSO	>0.1	10^{44-48}	$^{\mathrm{E,S}}$	3	広

オマ 2 1・ AUIN (1)1万欲じいか笑	表 2	.1:	AGN	の伝	統的	分類
-------------------------	-----	-----	-----	----	----	----

 a S:渦巻銀河、E:楕円銀河 b $h=H_0(50)$ kms $^{-1}Mpc^{-1}$ c 広:幅の広い輝線、狭:幅の狭い輝線



図 2.1: AGN の統一モデル

2.1.1 セイファート銀河

セイファート銀河は、1940年代に天文学者 Carl Keenan Seyfert により発見された活動銀河で ある。特徴は通常の銀河で観測される吸収線より幅が広い輝線をもつことである。比較的近傍に 存在している活動銀河核の多数がセイファート銀河である。

セイファート銀河は観測される可視光スペクトルより1型と2型の2種類に分類される。スペクトルに幅の広い輝線、狭い H_{α} 輝線の両方を含むものが1型、狭い輝線のみ含むものが2型である(図2.3)。このような輝線はAGNの周りに存在しているガスから放射されている。輝線の幅は放射している物質の速度分散に比例しているので、AGNの近傍には大きな速度分散をもち、幅の広い輝線を放射する領域(Broad Line Region:BLR)と比較的AGNから離れた幅の狭い輝線を放射する領域(Narrow line region:NLR)の二種類の散乱体の領域が存在していると考えられている。1型、2型の分類は、現在の有力なAGN統一モデルでは、中心領域を取り囲んでいる分子雲トーラスによるものだと考えられている(図2.1右)。観測者の視線に対してトーラスが正対している場合、幅の広い輝線と狭い輝線が観測され、1型と分類される。トーラスを横から見る視線ではトーラスにより広い輝線が吸収され、狭い輝線のみ観測され2型と分類される。



図 2.2: セイファート 2 型銀河、 Circinus 座銀河 (c)NASA



図 2.3: (左)1型のスペクトル、(右)2型のスペクトル

2.1.2 クェーサー

1963年に Maarten Schmidt は大きな赤方偏移を示し、遠方でありながら、銀河系内の星のよう 明るい天体を発見した。このような天体をクェーサーと呼んでいる。クェーサーと比べて近傍に 存在する Seyfert 銀河との性質の類似から AGN の一種と考えられている。

クェーサーは AGN の中で最も明るい天体であり、その放射スペクトルには広い輝線が含まれている。また観測されているクェーサーの 5–10%のクェーサーは強い電波を放射しており、しばしば偏光を示すことから、シンクロトロン放射と考えられている。このようにクェーサーは電波強度で分類され、それぞれを RL QSO(Radio Loud QSO)、RQ QSO(Radio Loud QSO) と呼んでいる。さらに RL QSO は数 GHz での α (スペクトル指数) によりさらに分類され、 $\alpha > 0.5$ のクェーサーを SSRQ(Steep Spectrum Radio-Loudquasar)、 $\alpha < 0.5$ のクェーサーを FSRQ(Flat Spectrum Radio-Loudquasar)と呼ぶ。

一般に RL QSO の母銀河は楕円銀河であり、RQ QSO の母銀河は楕円銀河や渦巻銀河である。 またクェーサーの母銀河の約半数が銀河間相互作用による変形を受けており、銀河の衝突や合体 が銀河中心領域の活動性に強い影響を及ぼしていることを示唆している。 2.1.3 ブレーザー (BL Lac 天体)

ブレーザーの典型の BL Lac(とかげ座 BL 星) は最初変光星と思われていたが、後に強い電波源 であることが確認された。それから次々と同じ性質の天体が発見され、その総称が BL Lac 天体と なった。BL Lac 天体と似た性質を持つ変動の激しい RL QSO と総称してブレーザー天体と呼ば れることが多い。ブレーザーの特徴はスペクトルに輝線が存在しないこと、強い電波源、高い偏 光性を持つこと、電波 ~ ガンマ線にわたる多波長で強度が激しく変動することなどである (図 2.4、 2.5)。このような特徴は観測者の視線がジェット軸と小さな角度をなしているためと説明される。 すなわち輝線、吸収線が存在しないのも相対論的ジェットによるビーミングのためジェットからの 放射が支配的になるためである。



図 2.4: ブレーザー天体 Mrk421 の X 線帯域 のライトカーブ (Kataoka et al. 2001)



図 2.5: ブレーザー天体 Mrk421 の強度変動にとも なった多波長スペクトル (Takahashi et al. 2000)

2.1.4 電波銀河

電波銀河は AGN の中でも特に強力な電波を放射している。その母銀河は楕円銀河である。電 波銀河には放射スペクトルに輝線幅の広いもの (Broad Line Radio Galaxy :BLRG) と狭いもの (Narrow Line Radio Galaxy:NLRG) がある。観測では中心核から細く搾られたプラズマ流である ジェットや、その先端に銀河間成分との衝突現場であるホットスポット、またジェットにより運搬 されたエネルギーの吹き溜まりである電波ローブが確認されている (図 2.6)。さらに電波銀河は FRI、FRII 型電波銀河の二つに分類される。図 2.6 に示すように、中心核以外の明るい領域が内 側か外側で分類される。次節ではこの電波銀河の特徴について述べる。



図 2.6: 左: FRI 型電波銀河 Hydra A(G. B. Taylor et al. 1990)、右: FRII 型電波銀河 Cygnus A(R.A.Perley et al. 1984) の電波画像。

2.2 電波銀河の特徴

2.2.1 ジェット

ジェットは中心核から双方に噴き出している細く絞られたプラズマ流である。中心核の巨大ブ ラックホールに降着する物質の一部のエネルギーがジェットとして解放されていると考えられてい る。しかし、ジェットの生成機構、加速機構、収縮問題などは詳細に解明されていない。ジェット は粒子の加速現場、中心核から運搬しているエネルギーの痕跡を探るプローブとして注目を集め ている。

ジェットの観測は可視光観測で M87 の光学ジェットが初めて発見された。後に電波観測により 電波ローブが観測され、VLA により中心核と電波ローブを結ぶ電波ジェットが観測された。また 最近では X 線観測でもジェットが発見されている。図 2.7 に代表的な天体 M87 の観測されたジェッ トを示す。また観測されたジェット中には明るい点 (ノット:図 2.7) が確認されている。このノッ トの位置変化の観測で見かけの速度が光速を超える「超光速運動」が多数発見された。これはノッ トが相対論的速度で視線方向に移動することを原因とする、相対論的ビームで説明されている。



図 2.7: 電波銀河 M87 の電波、可視光、X 線で観測されたジェットの画像。(c)NASA

2.2.2 ホットスポット

FRII 型電波銀河においてジェットの終端、電波ローブの縁で見られるホットスポットはジェットと周辺物質の衝突現場である。ジェットの進行速度は相対論的速度であるが、ホットスポットはその 1/10 ~ 1/100 程度の速度になる。この衝突現場であるホットスポットでは強い衝撃波を生成し、ジェットの物質の加熱現場や粒子の加速現場となっている。加速された非熱的分布の粒子は電波ローブや宇宙空間に散布される。このようなホットスポットは高エネルギー宇宙線の生成現場としても注目されている。

2.2.3 電波ローブ

電波ローブは電波源として知られ、図 2.6 で示したように、中心核から噴き出しているジェット の先端で形成しているものである。また電波ローブはジェットにより運搬されたエネルギーの吹き 溜まりであり、そのスケールは数百 kpc と、銀河 (数十 kpc)のスケールをはるかに越える。

電波ローブからの電波は、電波ローブ内の相対論的電子と磁場の相互作用による、シンクロトロン電波であることが明らかになっている。また最近のX線天文衛星の発展により、電波ローブは電波ローブ内のシンクロトロン電子による逆コンプトンX線源でもあることがわかった。X線

天文衛星 ROSAT、ASCA による電波銀河 Fornax A の電波ローブからの X 線検出を筆頭に (図 2.8)、これまで 30 天体以上の電波ローブからの X 線観測が報告されている。種光子はほとんどの 天体は宇宙マイクロ背景放射 (CMB) で説明されている。一部の天体では、中心核と電波ローブが 比較的近い場合、つまりジェットを吹き始めて間もないような若い電波ローブは中心核からの赤外 光子が種光子となる。また電波ローブが電波で非情に明るい場合は電波ローブからの電波光子が 種光子となることも考えられ、電波ローブからの X 線はシンクロトロンセルフコンプトン (SSC) 過程と呼ばれる放射過程となる。



図 2.8: 左: Fornax A の電波画像 (Fomalont et al 1989)、右: カラースケールは X 線強度をカラー スケール、、電波強度を等高線で示した (Tashiro et al 2001)。

このような電波ローブの電波、X 線強度は、電波ローブ内の磁場のエネルギー密度 (u_m) 、電子のエネルギー (u_e) 密度を正確に求める重要な手掛りである。シンクロトロン強度 (f_{SR}) は電子のエネルギー密度と磁場のエネルギー密度の積にに比例する。また逆コンプトン放射の強度 (f_{IC}) は電子のエネルギー密度と種光子のエネルギー密度 (u_{ph}) の積に比例している。したがってこれらの関係から電波ローブ内の電子、磁場のエネルギー密度が求められる。これまでに求められた電波ローブの電子、磁場のエネルギー密度は電子のエネルギー密度が卓越 $(u_e/u_m \sim 1 - 100)$ していることがわかっている (2.9)。このような電波ローブ内のエネルギーはジェット活動の解明の重要な手掛りとなる。



図 2.9: これまで知られている電波ローブの磁場、電子のエネルギー密度のプロット

2.3 電波ローブの放射過程とエネルギー

2.3.1 シンクロトロン放射

磁場中を運動する電子は磁場により加速を受け、電磁放射をする。電子が非相対な速度である ときはサイクロトロン放射、相対論的な速度であるときはシンクロトロン放射を行なう。サイク ロトロン放射は電子の円運動に対応した単色スペクトルだが、シンクロトロン放射は連続スペク トルである。

単一の電子からの放射

磁場 B 中を運動しているローレンツ因子 γ の単一の電子が放射する単位時間あたり、単位振動 数あたりのエネルギーは

$$P_{\rm SR}(\nu,\gamma) = \frac{\sqrt{3}e^2\beta^2 B\sin\phi}{mc^2} F\left(\frac{\nu}{\nu_c}\right) \tag{2.1}$$

ここで e は電子の素電荷量、 β は電子の速度を光速 c で規格化した量、 ϕ は電子の運動方向と磁場のなす角のピッチ角、m は電子の質量である。F(x) は無次元化された変型ベッセル関数であり、以下の式で表わされる。

$$F(x) = x \int_{x}^{\infty} K_{\frac{3}{5}}(\xi) d\xi$$
 (2.2)

これは図 2.10 に示すように、x = 0.29 でピークを持つ関数である。また ν_c は以下の式で与えられる。

$$\nu_c = \frac{3\gamma^2 eB \sin\phi}{4\pi mc} \tag{2.3}$$

したがって、ローレンツ因子 γ の単一の電子からのエネルギースペクトルのピーク振動数は、

$$\nu_p = 0.29\nu_c = 120 \left(\frac{\gamma}{10^4}\right)^2 \left(\frac{B}{1\mu G}\right) \sin\phi \quad \text{MHz}$$
(2.4)

式 (2.1) を全振動数で積分することにより、ローレンツ因子 γ の単一の電子からの単位時間に放出 する全エネルギーは

$$P_{\rm SR}(\gamma) = \frac{4}{3}\sigma_T c\gamma^2 \beta^2 u_m \tag{2.5}$$

ここで $\sigma_T = 8\pi e^4/3m^2c^4$ はトムソン散乱断面積、 $u_m = B^2/8\pi$ は磁場のエネルギー密度。このように $P_{\rm SR}$ は磁場のエネルギー密度 u_m と電子の γ^2 に比例している。電子がシンクロトロン放射により半分のエネルギーを失う時間は、

$$T_{\rm SR} = \frac{3mc}{4\sigma_T u_m} \gamma^{-1} \tag{2.6}$$

べき型関数分布の電子からの放射

次にべき型関数分布をもつ電子からのシンクロトロン放射のエネルギースペクトルを考える。電 子の数密度の分布関数は以下のように表わせる。

$$N(\gamma)d\gamma = N_0\gamma^{-p}d\gamma \tag{2.7}$$



図 2.10: 無次元関数 F(x)。ここで $x = \nu/\nu_{co}$

pはスペクトル指数である。したがって、このような分布をもつ電子からのエネルギースペクトルは $P_{SR}(\nu, \gamma)$ と $N(\gamma)$ の積を γ で積分することで得られる。

$$P_{\rm SR}(\nu) = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} P_{\rm SR}(\nu,\gamma) N(\gamma) d\gamma$$

= $\frac{\sqrt{3}BN_0 \sin \phi}{2mc^2} \left(\frac{4\pi mc}{3eB\sin \phi}\right)^{-(p-1)/2} \int_{x_1}^{x_2} F(x) x^{\frac{p-3}{2}} dx$ (2.8)

ここで $x = \nu/\nu_c$ のように変数変換をしている。また広帯域を考えるときは $x_0 \sim 0, x_1 \sim \infty$ と近 似ができ、以下のように求められる。

$$P_{\rm SR}(\nu) = \frac{\sqrt{3}e^3 N_0 B \sin\phi}{mc^2(p+1)} \Gamma\left(\frac{p}{4} + \frac{19}{12}\right) \Gamma\left(\frac{p}{4} - \frac{1}{12}\right) \left(\frac{2\pi mc}{3eB\sin\phi}\nu\right)^{-(p-1)/2}$$
(2.9)

ここで以下の式を使った。

$$\int_0^\infty x^\mu F(x) dx = \frac{2^{\mu+1}}{\mu+2} \Gamma\left(\frac{\mu}{2} + \frac{7}{3}\right) \Gamma\left(\frac{\mu}{2} + \frac{2}{3}\right)$$
(2.10)

以上からスペクトル指数 p のべき型分布をもつ電子からのシンクロトロン放射のエネルギースペクトル指数は以下のように与えられる。

$$\alpha_{\rm SR} = \frac{p-1}{2} \tag{2.11}$$

2.3.2 逆コンプトン放射

静止している電子が低エネルギー $(h\nu << mc^2)$ の光子に散乱される現象はトムソン散乱である。散乱前後の入射光子のエネルギーを ϵ 、 ϵ_1 とすると、入射光子から電子へのエネルギーの移動が無視でき $(\epsilon \sim \epsilon_1)$ 、散乱角を θ とすると微分散乱断面積は

$$\frac{d\sigma_T}{d\omega} = \frac{1}{2}r_0^2(1+\cos^2\theta)$$
$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3}r_0^2$$
(2.12)



観測者系:K

電子の静止系:K'

ここで $r_0 = e^2/mc^2$ で古典電子半径である。また入射光子が X 線やガンマ線などのような高エネルギーを持つ場合は入射光子が電子にエネルギーに与え、光子のエネルギーが減少し、以下のような関係式が導かれる。

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon}{1 + \frac{\epsilon}{mc^2}(1 - \cos\theta)} \tag{2.13}$$

このように高エネルギー光子 ($h\nu >> mc^2$) のときは微分散乱断面積は、量子効果のため Klein-Nishina 方程式で以下のように与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\omega} = \frac{r_0^2}{2} \frac{\epsilon_1^2}{\epsilon} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_1} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon} - \sin^2 \theta \right)$$
(2.14)

電子が運動しているときもコンプトン散乱はおこり、この電子が相対論的速度で運動している場合には光子にエネルギーを与える逆コンプトン散乱がおきる。図 2.11 に逆コンプトン散乱のジオ メトリーを示した。それぞれ観測者系、電子の静止系 (プライム付き) で表わしている。散乱前後 の光子のエネルギーを ϵ、 ϵ1、入射角を θ としている。ローレンツ変換から以下の式が得られる。

$$\epsilon' = \epsilon \gamma (1 - \beta \cos \theta)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon'_1 \gamma (1 - \beta \cos \theta'_1)$$
(2.15)

式 2.13、2.15 から以下の近似式が得られる。

$$\epsilon_1' \sim \epsilon' \left[1 - \frac{\epsilon'}{mc^2} (1 - \cos \Theta) \right]$$

$$\cos \Theta = \cos \theta_1' \cos \theta' + \sin \theta' \sin \theta_1' \cos(\phi' - \phi_1')$$
(2.16)

ここで ϕ' 、 ϕ'_1 はそれぞれ電子の静止系での入射光子、散乱光子の方位角を表わしている。 $\gamma^2 - 1 >> h\nu/mc^2$ の相対論的な電子の場合、観測者系、電子の静止系それぞれの入射光子のエネルギーと電子の静止系での散乱光子のエネルギーは近似的に

$$\epsilon : \epsilon' : \epsilon'_1 = 1 : \gamma : \gamma^2 \tag{2.17}$$

図 2.11: 逆コンプトン散乱のジオメトリー。左が観測者系。右が電子の静止系。

と表わされる。これより散乱光子のエネルギーは入射光子のエネルギーの γ^2 倍になることがわかる。

次に逆コンプトン散乱放射のエネルギースペクトルを求めるため、まず散乱により電子が失う エネルギーを求める。静止系における散乱後の電子の単位時間あたりのエネルギーは

$$\frac{dE'}{dt'} = c\sigma_T \int \epsilon'_1 n'(\epsilon') d\epsilon'$$
(2.18)

ここで $nd\epsilon \ge dE/dt$ がローレンツ不変量であることを考慮すると、

$$\frac{dE}{dt} = c\sigma_T \int \epsilon'_1 n'(\epsilon') d\epsilon'
= c\sigma_T \gamma^2 \int (1 - \beta^2 \cos \theta) \epsilon n(\epsilon) d\epsilon
= c\sigma_T \gamma^2 (1 + \frac{1}{3}\beta^2) U_{\rm ph}$$
(2.19)

ここで、

$$U_{\rm ph} = \int \epsilon n(\epsilon) d\epsilon \tag{2.20}$$

は種光子のエネルギー密度である。したがって逆コンプトン散乱により電子から光子に移動した エネルギーは

$$P_{\rm IC} = \frac{dE}{dt} - c\sigma_T U_{\rm ph} = \frac{4}{3}\sigma_T c\gamma^2 \beta^2 U_{\rm ph}$$
(2.21)

と求められる。これは電子が毎秒に失うエネルギーでもある。電子と光子が等方分布であると仮 定すると、逆コンプトン散乱の放射係数は以下の式で与えられる。

$$j(\epsilon_1) = \frac{3N\sigma_T F_0}{4\gamma^2 \epsilon_0} f(x)$$

$$x \equiv \frac{\epsilon_1}{4\gamma^2 \epsilon_0}$$
(2.22)

ここで F_0 は単位面積、単位立体角、単位体積のエネルギー ϵ の光子の数である。ここで f(x) は $\gamma >> 1$ のとき以下のように近似できる。

$$f(x) = 2x \ln x + x + 1 - 2x^2 \quad (0 < x < 1)$$
(2.23)

電子の分布関数のべき型関数のとき、逆コンプトン散乱のスペクトルは以下のように計算できる。

$$P_{\rm IC} = 4\pi\epsilon j(\epsilon_1)$$

$$= \frac{3}{4}c\sigma_T N_0 \int d\epsilon \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} d\gamma \gamma^{(-p-2)} f\left(\frac{\epsilon_1}{4\gamma^2\epsilon}\right)$$

$$= 3\sigma_T c N_0 2^{(-p-1)/2} \int d\epsilon \epsilon^{(p-1)/2} v(\epsilon) \int_{x_1}^{x_2} dx x^{(p-1)/2} f(x) \qquad (2.24)$$

また逆コンプトン散乱のエネルギー指数は

$$\alpha_{\rm IC} = \frac{p-1}{2} \tag{2.25}$$

これはシンクロトン放射のエネルギースペクトル指数と同じである。

2.3.3 観測値からローブの物理量

べき型分布の電子からのシンクロトロンスペクトルの式 (2.10) から伝統的な等分配則 $u_m = u_e$ を仮定し電子、磁場のエネルギー密度を求める方法がある。 u_e は以下の式で与えられる。

$$u_{\rm e} = mc^2 \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \gamma N(\gamma) d\gamma \tag{2.26}$$

等分配を仮定すると、シンクロトロン電波の観測スペクトルから磁場は以下の式で与えられる (Miley et al.1980)。

$$B_{\rm ME} = 5.69 \times 10^{-5} \left[\frac{1+k}{f} (1+z)^{3+\alpha_{\rm SR}} \frac{1}{\theta_{\rm x} \theta_{\rm y} s \sin^{3/2} \psi} \frac{S_{\rm SR}}{\nu_{\rm SR}^{-\alpha_{\rm SR}}} \frac{\nu_2^{-\alpha_{\rm SR}+1/2} - \nu_1^{-\alpha_{\rm SR}+1/2}}{-\alpha_{\rm SR} + \frac{1}{2}} \right]^{2/7} (2.27)$$

zは天体の赤方偏移、 $\theta_x \geq \theta_y$ は直交方向の角直径 (arcsec)、fは filling 因子、kは電子と重粒子のエネルギーの比、sは天体の直径 (kpc)、 $\nu_1 \geq \nu_2$ は観測された振動数の上限と下限 (GHz)、 S_{SR} は ν_{SR} でのフラックス密度 (Jy= 10^{-23} erg cm⁻² s⁻¹)、 ψ は磁場と観測視線のなす角である。

シンクロトロン電波と逆コンプトン X 線の観測値を比較して求める方法は、種光子別で以下に 述べる。考えられる種光子は3つあげられ、宇宙マイクロ背景放射 (CMB) と AGN からの赤外線 光子、電波ローブ自体からの電波光子である。

宇宙マイクロ背景放射: CMB

CMBを種光子とする逆コンプトンX線はHarris & Grindlay (1979) で紹介されている。CMB($\nu_{\text{CMB}} = 1.6 \times 10^{11}(1+z)$ Hz)のエネルギー密度は正確に知られていて、以下の式で与えられる。

$$u_{\rm CMB} = 4.1 \times 10^{-13} (1+z)^4 \rm erg \ s^{-1}$$
(2.28)

また、エネルギー ϵ の光子が相対論的電子によってエネルギー $\epsilon_{\rm IC}$ に散乱されたときに以下の関係がある。

$$\epsilon_{\rm IC} = \frac{4}{3} \gamma^2 \epsilon \tag{2.29}$$

この関係式から種光子が CMB のとき、散乱光子の振動数 ν_{IC} 、エネルギー ϵ_{IC} は以下のように書ける。

$$\nu_{\rm IC} = 2.11 \times 10^{17} \left(\frac{\gamma}{10^3}\right)^2 \text{Hz}$$
 (2.30)

$$\epsilon_{\rm IC} = 8.73 \times 10^{-1} \left(\frac{\gamma}{10^3}\right)^2 \text{keV}$$
(2.31)

このように $\gamma = 10^3$ の電子が CMB を散乱すると、 $\sim 1 \text{keV}$ の逆コンプトン X 線になる。 電子のスペクトルとシンクロトロン電波のスペクトルの関係は以下のように書ける。

$$N(\gamma_{\rm SR}) = \frac{4\pi D^2 m c^2 C(\alpha) (1+z)^{\frac{1}{2}}}{V} \frac{S_{\rm SR}}{(\nu_{\rm SR} B)^{\frac{1}{2}}}$$
(2.32)

ここで、V は電波ローブの体積、D は赤方偏移 z における輝度距離、 S_{SR} は γ_{SR} の電子からの ν_{SR} でのフラックス密度である。 $C(\alpha)$ はエネルギースペクトルの指数 α の関数である。 $0.5 < \alpha < 2.0$ で 17%のエラーで $C(\alpha) \sim 1.15 \times 10^{31}$ である。また電子のスペクトルと逆コンプトン X 線のスペ クトルの関係は以下のように書ける。

$$N(\gamma_{\rm IC}) = 2.25 \times 10^{49} \frac{4\pi D^2 mc^2}{G(\alpha)V(1+z)^2} \frac{S_{\rm IC}}{\nu_{\rm IC}^{\frac{1}{2}}}$$
(2.33)

ここで S_{IC} は γ_{IC} の相対論電子により散乱された ν_{IC} でのフラックス密度である。 $G(\alpha)$ はエネル ギースペクトルの指数 α の関数である。

式 (2.26) を使い式 (2.32) と (2.33) を比較することにより、磁場 B を求めることができる。

$$B^{\alpha+1} = \frac{(5.05 \times 10^4)^{\alpha} C(\alpha) G(\alpha) (1+z)^{\alpha+3}}{1.00 \times 10^{47}} \frac{S_{\rm SR} \nu_{\rm SR}^{\alpha}}{S_{\rm IC} \nu_{\rm IC}^{\alpha}}$$
(2.34)

また式 (2.33) により、電子のエネルギー密度 ue が計算される。

$$u_e = mc^2 \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \gamma N(\gamma) d\gamma \tag{2.35}$$

$$= 3.06 \times 10^5 \frac{4\pi D^2 (1.07 \times 10^3)^{2\alpha+1}}{G(\alpha)V(1+z)^2} \frac{1}{1-2\alpha} S_{\rm IC} \left(\frac{\epsilon_{\rm IC}}{1\,{\rm keV}}\right) \left(\gamma_2^{1-2\alpha} - \gamma_1^{1-2\alpha}\right)$$
(2.36)

活動銀河から赤外線光子

Brunetti et al. (1997) や Brunetti(2000) で議論されているように電波ローブが中心核に近い場合、また中心核が明るいとき、中心核である活動銀河からの赤外線光子が支配的になり種光子が活動銀河から赤外線光子になると考えられる。これまで数例、電波ローブから、活動銀河からの赤外線光子を種光子とした逆コンプトン X 線の報告がある。

図 2.12 に CMB のエネルギー密度 u_{CMB} と中心核からの赤外線光子のエネルギー密度 u_{IR} の比較を示した。中心核からの赤外線光子のエネルギー密度は中心核からの距離の関数で表わしてある。さらに赤外線の輝度が $L_{IR} = 10^{45}, 10^{46} \text{erg s}^{-1}$ の2つを示してある。 u_{IR} は中心核からの距離 r^{-2} に比例し減少してる。これよりローブの場所により u_{IR} が異るので、Brunetti(2000) は非等方的逆コンプトン散乱と呼んでいる。



図 2.12: CMB のエネルギー密度 u_{CMB} と中心核からの赤外線光子のエネルギー密度 u_{IR} の比較。 赤方偏移 z = 0 としてある。

シンクロトロン自己コンプトン過程

シンクロトロン自己コンプトン過程はシンクロトン光子がシンクロトロン電子に散乱される現象である。このような放射過程はホットスポットやブレーザー天体で見られる。本論文で使用した SSC 計算コード (東工大、片岡氏作成。付録 A 参考)のモデルは球体の放射領域に電子磁場が均一に分布している "One-zone Homogeneous SSC Model" である。

観測者から $d_{\rm L}$ 離れた一般的な光源からのフラックス $F(\nu)$ は、放射係数 j_{ν} と吸収係数 α_{nu} から 以下のように与えられる。

$$F(\nu) = \frac{1}{4\pi d_{\rm L}^2} \int d^3 \vec{r} \left[4\pi j_{\nu} \exp\left(-\int \alpha_{\nu}(\vec{r}) ds'\right) \right]$$
(2.37)

シンクロトロン放射の場合、放射係数 j_{ν} と吸収係数 α_{ν} は

$$j_{\nu} = c_2 B \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} d\gamma N_e(\gamma) F(\frac{\nu}{4\pi m_e c^2})$$
(2.38)

$$\alpha_{\nu} = -\frac{c_3 B}{\nu} \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} d\gamma \gamma^2 \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[\frac{N_e(\gamma)}{\gamma^2} \right] F(\frac{\nu}{4\pi m_e c^2})$$
(2.39)

今、放射領域の空間分布が一様と仮定しているので、放射係数 j_{ν} と吸収係数 α_{ν} が \vec{r} に依存しない。このとき、シンクロトロン輝度 $L_{\rm SR}(\nu)$ は、

$$L_{\rm SR}(\nu) = 4\pi R^2 \frac{j_{\nu}}{\alpha_{\nu}} \left(1 - \frac{2}{\tau_{\nu}^2} [1 - e^{-\tau_{\nu}} (\tau_{\nu} + 1)] \right)$$
(2.40)

ここで $\tau_{\nu} = 2\alpha R$ は視線方向に対する光学的厚さである。このシンクロトロン輝度から、逆コンプトン散乱の式 (2.24) を用いると、SCC 放射は

$$L_{\rm SSC}(\nu) = 4\pi R^2 \frac{j_{\nu}^{\rm SSC}}{\alpha_{\nu}^{\rm SSC}} \left(1 - \frac{2}{\tau_{\nu}^{\rm SSC^2}} [1 - e^{-\tau_{\nu}^{\rm SSC}} (\tau_{\nu}^{\rm SSC} + 1)] \right)$$
(2.41)

ここで j_{ν}^{SSC} 、 α_{nu}^{SSC} は逆コンプトン放射の放射係数、吸収係数である。 τ_{ν}^{SSC} はコンプトン放射で は小さいので、式 (2.41) は

$$L_{\rm SSC} \approx \frac{16}{3} \pi^2 R^3 j_{\nu}^{\rm SSC} \tag{2.42}$$

図 2.13 に SSC 計算コードによるスペクトルを示す。SSC コードの入力値は電子の分布関数の規格定数 N_0 、べき p 電子の最小、最高ローレンツ因子 γ_{min} 、 γ_{max} 、放射領域の半径 R、磁場 B である。図 2.13 の左は電子の $N_0 = 0.1$ 、 $p = 2.5 \gamma_{min} = 10^2$ 、 $\gamma_{max} = 10^5 R = 10^{22}$ cm における磁場 $B \ge 1, 10, 100 \mu$ G 変化させたものである。図 2.13 の右は電子の $B = 10 \mu$ G、 $p = 2.5 \gamma_{min} = 10^2$ 、 $\gamma_{max} = 10^5 R = 10^{22}$ cm における電子の規格定数 $N_0 \ge 1, 0.1, 0.01$ 変化させたものである。



図 2.13: (左) 電子の $N_0 = 0.1$ 、 $p = 2.5 \gamma_{min} = 10^2$ 、 $\gamma_{max} = 10^5 R = 10^{22}$ cm における磁場 $B \epsilon 1, 10, 100 \mu$ G 変化させたものである。(右) 電子の $B = 10 \mu$ G、 $p = 2.5 \gamma_{min} = 10^2$ 、 $\gamma_{max} = 10^5 R = 10^{22}$ cm における電子の規格定数 $N_0 \epsilon 1, 0.1, 0.01$ 変化させたものである。

2.4 銀河団中の電波ローブ

銀河団は数 Mpc にわたる宇宙で最大の物質の密集した重力系天体である (2.14)。銀河団は 50~1000 個程度の銀河、X 線を放射している高温なガス (銀河団ガス)、ダークマターから構成されている。典型的な銀河団の質量比は銀河が数%、X 線を放射する高温ガスが約 20%、残りがダークマターと考えられている。この説ではこのような銀河団の中心付近に存在する電波ローブについて述べる。

2.4.1 銀河団ガスのX線観測

銀河団ガスの X 線観測は 1970 年初頭に Perseus、Coma 銀河団が Uhula 衛星で観測され、中盤 には 40 個の銀河団が X 線観測された。X 線起源の熱的証拠は Perseus、Virgo、Coma 銀河団の Ariel5、OSO-8 衛星による鉄輝線の検出で確認された。X 線の輝度は 10⁴³⁻⁴⁵ erg s⁻¹ に相当する。



図 2.14:上:銀河団の模式図。下: 可視光で観測された Coma 銀河団



図 2.15: MS0735.6+7421 の電波画像 (左上) とX 線画像 (左下)(B.McNamara et al 2005)。

2.4.2 銀河団ガスの圧力とローブ内の総エネルギー密度

図 2.15 は銀河団中に存在する電波銀河 MS0735.6+7421 の電波画像 (左上) と X 線画像 (左下) で ある。電波画像から電波ローブを確認できるが、X 線画像からは銀河団ガスからの X 線が有意に 見えている。このように銀河団中の電波ローブは、ローブからの X 線より銀河団ガスからの X 線 が支配的になる。また周辺の銀河団ガスの表面輝度の 20-30%の領域が対をなしている、"Cavty" と呼ばれる構造が確認できる。。図 2.15(右) は電波画像と X 線画像を重ねた図であり、電波ロー ブは銀河団ガスを押しのけていることがわかる。

銀河団ガスの数密度 n、温度 kT の観測値から、銀河団ガスの圧力は P = nkT より計算できる。 電波ローブの体積を V とし、銀河団ガスの圧力とローブ内の非熱的粒子の圧力がつり合っている とすると、ローブ内のエネルギー E_{lobe} は $E_{\text{lobe}} = \frac{\gamma}{1-\gamma} PV$ となる。ここで γ は比熱比である。電 波ローブ内は相対論的なガスで満たされているので、 $\gamma = 4/3$ になるので、ローブ内の電子、磁 場、陽子を含む総エネルギー密度は u = 4P と書ける。このようにしてこれまで、30 天体の銀河 団中の電波ローブのエネルギーが求められている。

2.5 電波銀河 Cygnus A

電波銀河 Cygnus A は Cygnus A 銀河団に属した楕円銀河である。表 2.2 に Cygnus A の諸元 を示す。また全天で太陽、Cassiopeia A に次ぐ3番目に強い電波源である。*VLA*の電波観測によ り、銀河中心からジェットが噴出し、その終端でホットスポット、電波ローブが確認されている(図 2.16)。X 線では *Chandra* 衛星など多くの X 線天文衛星で観測されている。

表 2.2: Cygnus A の諸元								
(RA ²⁰⁰⁰ ,Dec ²⁰⁰⁰) 赤方偏移 1" サイズ ^a								
Cygnus A	(19h59m28.3s, +40d44m02s)	0.056	60kpc	$\sim 2''$				



図 2.16: 電波銀河 Cygnus A の 5GHz の電波画像。

2.5.1 電波ローブ

Cygnus A の電波ローブは VLA の電波観測から、電波スペクトルのエネルギー指数が 0.7、また ローブの位置によってシンクロトロン電波のスペクトルのピーク振動数に空間分布が見られ、ホッ トスポット付近では数十 GHz、ホットスポットと中心核の中間の領域では数 GHz、中心核付近で は数 GHz ~ 数百 MHz である。等分配側を仮定すると、電波ローブ内の磁場は 50µG。またシンク ロトロンエイジングという手法からローブの年令は 6×10⁶ 年と推定されている。電波ローブから の X 線の報告はない。

2.5.2 銀河団ガス

電波銀河 Cygnus A は Cygnus 銀河団のほぼ中心に位置し、周辺に銀河団ガスが存在している。 *Chandra* 衛星による X 線観測から、銀河団ガスからの X 線は Cygnus A から少なくても 8['] まで 広がっている。中心領域の銀河団ガスの温度は中心領域で ~ 5keV、また電波ローブが存在する領 域では"Cavity" が確認されている。

第3章 X線天文衛星 Chandra

3.1 概要

X 線天文衛星 *Chandra* は NASA の"Great Observatories" の1つで、1999年7月23日にスペースシャトル"コロンビア"によって打ち上げられた。*Chandra* 衛星は近日点10,000km、遠日点140,161km、周期64時間の楕円軌道に投入され、低バックグランドかつ55時間の連続観測を実現している。図 $3.1(\pm)$ に *Cahndra* 衛星の全体像を示す。全体の大きさは $13.8m \times 19.5m$ 、重さは4800kg である。*Chandra* 衛星の X 線望遠鏡 High Resolution Mirror Assembly(HRMA) はPoint Spred Function(PSF) の半値幅 (FWHM) が 0.5 秒角以下というこれまでにない望遠鏡である。HRMA の焦点面には2種類の検出器、Advanced CCD Imaging Spectrometer(ACIS)、High Resolution Camera(HRC) が搭載されている。これらの性能は角分解能、エネルギー分解能とともに優れ、エネルギー帯域 0.1–10keV の広帯域をカバーしている。特に角分解能は現在運用中のX 線天文衛星のなかで世界一である。図 3.1(右) に crab 天体の ROSAT 衛星で撮像された X 線画像(上)、*Chandra* 衛星で撮像された X 線画像(下)を示す。比較すると ROSAT 衛星の画像はより細かい空間構造を再現できていることがわかる。このように天体の詳細な構造の撮像観測に期待され、多数の結果を生み出している。





図 3.1: (左) *Chandra* 衛星の全体像。(右) Crab 天体の ROSAT 衛星、*Chandra* 衛星で撮像された X 線画像。

3.2 High Resolution Mirror Assembly(HRMA)

Chandra に搭載されている HRMA は図 3.2 に示すように、反射鏡、前-中-後にあるアパーチャー プレート、内側と外側のシリンダー、温度調整器などから構成されている。反射鏡は 4 層の同心 円薄膜の Wolter Type-I mirror で構成されている。4 層の反射鏡は外側から、ID=1,3,4,6 と名付 けられ、その直径はおよそ 0.65m から 1.23m の範囲にある。前方の反射鏡は回転放物面、後方は 回転双曲面の形状をしており、入射 X 線を 2 回反射させてから焦点に集光する仕組みになってい る??。全ての反射鏡は表面の研摩された Zerodur glass で製造され、表面にイリジウムを蒸着され ている。表 3.1 に HRMA の特徴を示す。X 線望遠鏡としては過去に例を見ない程に優れた性能を 持ち、~10keV までの帯域で有効である。



図 3.2: HRMA の構造図



図 3.3: HRMA の模式図

Optics	Wolter Type-I mirror
Mirror coatings	Iridium
Nominal coating thickness	330
Mirror outer $diameter(1,3,4,6)$	$1.23{,}0.99{,}0.87{,}0.65{\rm m}$
Mirror lengths	84cm
Total length(pre-collimator to post-collimator)	$276\mathrm{cm}$
Unobscured clear aperture	$1145 \ \mathrm{cm}^2$
HRMA mass	1484kg
Focal length	$10.070\ {\pm}0.003{\rm m}$
Plate scale	$48.82\pm0.02\mu\mathrm{m}\ \mathrm{arcsec}^{-1}$
PSF FWHM(with detector)	0.5arcsec
Effective area:	
$@0.25 \mathrm{keV}$	$800 \mathrm{cm}^2$
$@5.0 \mathrm{keV}$	$400 \mathrm{cm}^2$
$@8.0 \mathrm{keV}$	$100 \mathrm{cm}^2$
Ghost-free field of view	30arcmin dia

表 3.1: HRMA の特徴

3.2.1 有効面積

HRMA の有効面積は 1145cm² である。しかし有効面積は入射角度だけでなく、入射 X 線のエ ネルギーに依存している。図 3.4(左) は On-axis での HRMA の有効面積の入射エネルギーの依存 性を示した図である。この有効面積は ACIS、HRC 検出器の量子効果をそれぞれ掛けたものであ る。実際の有効面積は入射エネルギーに強く依存していることがわかる。2keV 付近の構造は反射 鏡の面イリジウムの M-edge によるものである。また図 3.4(右) は off-axis における HRMA の有 効面積と入射角度の関数である。有効面積は反射鏡 4 層全てを平均化しており、各エネルギーの on-axis での値を規格化して表示している。入射エネルギーが大きくなるほど、 vignetting 効果に よる有効面積の減少が強く、見られることがわかる。

3.2.2 Point Spread Function

HRMAのPoint Spread Function(PSF)は、有効面積と同様にに入射エネルギーと入射角度に 依存する。これは入射 X 線のエネルギーが高いほど乱反射が大きくなる。また4層の反射鏡の光 行差と焦点面がそれぞれ異る、という理由による。HRMのPSFを表わすには encircled energy fraction(EEF)という関数が役に立つ。これはイメージ中心からある半径の円内のエネルギーフ ラックスを積分した値である。図 3.5 に点源 on-axis 入射時における EEF をイメージ中心から半径 の関数としてエネルギー毎で示した。入射 X 線のエネルギーに依存した EEF の減少が見られる。



図 3.4: (左)On-axis における HRMA の有効面積と入射エネルギーの関係。(右)Off-axis における HRMA の有効面積と入射角度の関係。



図 3.5: On-axis における中心からの半径と encircled energy との関係

3.3 Advanced CCD Imaging Spectrometer(ACIS)

Chandra 衛星に搭載されている Advanced CCD Imaging Spectrometer(ACIS) は 10 枚の CCD から構成されている。図 3.6 に ACIS の構造図、図 3.7 に ACIS の模式図を示す。ACIS は 2 × 2 の 正方配列した ACIS-I と 1 × 6 の直列配列した ACIS-S からなる。ACIS-I はイメージングに用いら れ、ACIS-S はイメージングとグレーティングの両方で用いられる。10 枚の CCD のうち ACIS-S1 と ACIS-S3 の 2 枚は背面照射 (BI) 型で、残りの 8 枚は前面照射 (FI) 型となっている。BI 型は構造の特徴より FI 型より低エネルギーに検出感度が高い。観測では telemetry の制限より最大で 6 枚までの CCD の観測が可能である。ACIS の特徴を表 3.2 に示す。



図 3.6: ACIS の構造図

ACIS FLIGHT FOCAL PLANE



図 3.7: ACIS の模式図

Focal plane arrays: I-array

S-array

CCD format Pixel size Array size

On-axis effective Area (integrated over the PSF to 99% encircled energy) Quantum efficiency (frontside illumination) Quantum efficiency (backside illumination) Charge transfer inefficiency(parallel) Charge transfer inefficiency(serial)

System noise Max readout-rate per channel Number of parallel signal channels Pulse-height encoding Event threshold

Split threshold Max internal data-rate Output data-rate Minimum row readout time Nominal frame time Allowable frame times Frame transfer time Point-source sensitivity Detector operating temperature

4 CCDs placed to lie tangent to the focal surface 6 CCDs in a linear array tangent to the grating Rowland circle 1024 by 1024 pixels 24.0 microns $(0.4920 \pm 0.0001 \text{ arcsec})$ 16.9 by 16.9 arcmin ACIS-I 8.3 by 50.6 arcmin ACIS-S $110 \,\mathrm{cm}^2 @ 0.5 \,\mathrm{keV} \,\mathrm{(FI)}$ $600 \,\mathrm{cm}^2 @ 1.5 \,\mathrm{keV} \,\mathrm{(FI)}$ $40 \,\mathrm{cm}^2 @ 8.0 \,\mathrm{keV}$ (FI) > 80% between 3.0 and 5.0 keV > 30% between 0.8 and 8.0 keV > 80% between 0.8 and 6.5 keV > 30% between 0.3 and 8.0 keV FI : $\sim 2 \times 10^{-4}$; BI : $\sim 2 \times 10^{-5}$ S3(BI): $\sim 7 \times 10^{-5}$; S1(BI): $\sim 1.5 \times 10^{-4}$; FI: unmeasurable $<\sim 2$ electrons (rms) per pixel $\sim 100 \text{ kpix/sec}$ 4 nodes per CCD 12 bits/pixel FI: 38 ADU ($\sim 140 \text{ eV}$) BI : 20 ADU (\sim 70 eV) 13 ADU6.4 Mbs (100 kbs $\times 4 \times 16$) 24 kb per sec 2.8 ms3.2 sec (full frame) 0.2 to 10.0 s 40 μ sec (per row) $4 \times 10^{-15} \mathrm{ergs} \, \mathrm{cm}^{-2} \, \mathrm{s}^{-1}$ in $10^4 \, \mathrm{s}$ (0.4-6.0 keV)-90 to $-120^{\circ}C$

3.3.1 検出原理

CCD(Charged Coupled Device)は1970年代開発された撮像素子で、ASCA衛星にX線分光撮 像素子として初めて搭載されてから、X線天文衛星で広く用いられている。CCDは金属(Metal) による電極、酸化物(Oxide)による絶縁体、半導体(Semiconducter)で構成されている。半導体に はシリコン(Si)が用いられている。表面の電極はゲート構造をしており、これが1pixelの大きさ である。電極に電圧をかけることによって電極下に空乏層が生じ、シリコンのギャップエネルギー により高いエネルギーのX線が入射するとそこで光電吸収を起こす。光電吸収により電子正孔対 をつくり、光電子はさらに周りのシリコンを電離させ、入射X線のエネルギーに比例した電子雲 を空乏層に形成する。この電子雲は各列ごとに隣り合うピクセルに電化転送し、読みだされる。

3.3.2 量子効率と有効面積

CCD の有効面積を決定する量子効率は入射 X 線が空乏層内で光電吸収される割り合いに依存している。図 3.8(左)に ACIS-CCD の可視光遮断フィルターの透過率を含む量子効率を示す。FI型 CCD は空乏層が厚いため高エネルギーで量子効率が良い。*Chandra*-ACIS は *ASCA*-SIS の CCD の空乏層より 2 倍厚く高エネルギー X 線の検出効率が向上している。FI型 CCD の 4keV 以上での量子効率の減少は CCD の row number に依存して 5-15%の減少がある。それでも BI型 CCD に比べ量子効率が良い。BI型 CCD は FI型 CCD と比べ低エネルギー X 線の量子効率が良い。これは BI型 CCD は背面から X 線を入射させるので複雑な電極層吸収の影響を減少させ、低エネルギーの量子効率が良くなっている。図 3.8(右)に HRMA の有効面積と組み合わせた ACIS-CCD の 有効面積を示す。



図 3.8: (左) 量子効果効果 (右)FI型 CCD と BI型 CCD の有効面積

3.3.3 空間分解能

ACIS の空間分解能は HRMA には依存せず、CCD のピクセルのサイズ (24.0mum~0.492 arcsec) に依存する。1.49keV では 4 ピクセル (2.0arcsec) 以内、6.4keV では 5 ピクセル (2.5arcsec) 以内、 に encircled energy の 90%が入る。図 3.9 に ACIS で観測された PG1634-706 天体の 1keV におけ る encircled energy function の半径分布を示す。図 3.10 は aimpoint を ACIS-I、ACIS-S としたと きの off-axis における 1.49keV の encircled energy が 0.5 になる半径の等高線である。点線は 0.5 秒角、破線が 1.0 秒角であり実線の等高線の間隔は 1 秒角である。off-axis では encircled energy が 0.5 になる半径が大きくなる。



図 3.9: PG1634-706 天体の 1keV における encircled enegy function。



図 3.10: aimpoint を ACIS-I、ACIS-S としたときの off-axis における 1.49keV の encircled energy が 0.5 になる半径の等高線。

3.3.4 エネルギー分解能

CCD 検出器である X 線を検出したとき、出力波形は幅を持つ。この幅は入射 X 線の光電効果 による電子個数の統計的ゆらぎ、熱的ノイズ、読みだしの際の回路系ノイズを含んだものである。 ここで ACIS の動作温度は-120 °に設定されてるため熱的ノイズは無視できる。電子個数の統計的 ゆらぎを σ_N 、回路系ノイズを σ_τ とするとエネルギ-分解能は半値幅 (FWHM) をもちいて以下の ように表わされる。

$$\frac{\Delta E}{E}(FWHM) = 2.35 \times \frac{\sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_\tau^2}}{E} \simeq 2.35 \times \frac{\sigma_N}{E} \qquad (\sigma_N >> \sigma_\tau)$$
(3.1)

入射 X 線のエネルギ-を E とすると、光電効果で生じた電子の数 (N_E) は、

$$N_E = \frac{E}{W}$$
 $(W \sim 3.71 \text{eV/e}^-)$ (3.2)

となる。ここで W は-120 °のシリコンの平均イオン化エネルギーである (Canali et al. 1972)。式 (3.2) より σ_N は以下のように書くことが出来る。

$$\sigma_N^2 = F \times N_E = F \times \frac{E}{W} \tag{3.3}$$

ここで F はファノ因子でありシリコン結晶では F=0.135 となる。したがってエネルギー分解能式 (3.1) は以下のよに書ける。

$$\frac{\Delta E}{E}(FWHM) = 2.35 \times \sqrt{\frac{0.499 \times 10^{-3} keV}{E}}$$
(3.4)

図 3.11 に打ち上げ前の ACIS のエネルギー分解能を示す。FI 型 CCD はほぼ理論的な限界値に達 している。



図 3.11: (左) 打ち上げ前の ACIS のエネルギ-分解能。(右)ACIS-I3 と ACIS-S3 のピクセル位置に 依存したエネルギー分解能

3.3.5 バックグラウンドのフレア

軌道上での ACIS-CCD のバックグラウンドは、全天で一様な X 線 CXB(Cosimic X-ray Background)、宇宙線の荷電粒子や ACIS 自体の放射化によるバックグラウンド NXB (Non X-ray Background)、また非常に明るい天体観測時のトレーリングで生じるバックグラウンドの 3 つがある。 ACIS ではバックグラウンドのカウントレイトが突然上昇する現象があり、これをフレアと呼ん でいる。詳細な原因はハーバード大学スミソニアン天文台の CXC(Chandra X-ray Center)が調 査中だが、一般的に宇宙線である低エネルギーの荷電粒子によるものだと考えられている。例と して図 3.12 に別の観測 ID=1190 のバックグラウンドのライトカーブを示す。上二つのパネルが ACIS-S3(BI)、下二つのパネルが ACIS-I1(FI) である。これからわかるように突発的にバックグラ ウンドのカウントレイトが上昇していることがそれぞれの検出器で見てわかる。さらに図 3.13 に また別の観測 ID=1226 のカウントレイトが静穏時とフレア時のスペクトルを示した。図中の下の スペクトルが静穏時のスペクトル、上のスペクトルがフレア中である。それぞれのスペクトルを 比較すると、大分異ることがわかる。したがって、正確にデータを解析するには、このバックグ ラウンドのフレアの時間帯を除く必要がある。



図 3.12: 観測 ID1190 のバックグラウン 図 3.13: 観測 ID1226 のバックグラウンドの静穏時、フレア中の ドのライトカーブ スペクトル

3.3.6 イベントグレード

イベントグレードは CCD で検出したイベントの判別法である。イベントとしては正規の X 線、 バックグラウンドである荷電粒子があるが、X 線イベントはほぼ1ピクセルのみで反応するのに対 し、荷電粒子は複数のピクセルで反応する性質がある。この性質を利用し、CCD でイベントが検 出されたとき、最大波高値を示した1ピクセルとその周囲 3x3 のピクセルの検出パターンから判 別するものである。検出パターンは図 3.14 に示すように、最高波高値を示したピクセルを0とし、 その周辺のピクセルを2 の巾乗の値で定義し、3x3 のピクセルのうち閾値を超えたピクセルを0とし、 その周辺のピクセルを2 の巾乗の値で定義し、3x3 のピクセルのうち閾値を超えたピクセルの値 を足しあわせることで0~255 までのグレードに分けられる。*ASCA* の SIS においても検出パター ンで0~7 のグレードに分けられる。表 3.3 に ACIS と ASCA のグレードの対応を示す。グレード 0 は1ピクセルで反応したイベントであり、グレード2、3、4 は隣接するピクセルに電荷が漏れこ んで二つのピクセルで反応したイベントを示している。グレード6 は反応した隣接するピクセル が三つか四つのときに分けられる。グレード1、5 電荷の漏れからは考えにくい検出パターンであ り、これらはバックグラウンドとして判別され除去される。以上のようにグレード0、2、3、4、6 のグレードが X 線と判別される。



図 3.14: イベントグレード値の配置図とX線のイベントパターン。

 \mathbf{b}

表 3.3: ACIS と ASCA のイベントクレード						
ACIS Grade	ASCA Grade	Description				
0	0	Single pixel events				
$64 \ 65 \ 68 \ 69$	2	Vertical Split Up				
$2 \ 34 \ 130 \ 162$	2	Vertical Split Down				
$16\ 17\ 48\ 49$	4	Horizontal Split Right				
$8\ 12\ 136\ 140$	3	Horizontal Split Left				
$72\ 76\ 104\ 108$	6	"L" & Quad, upper left				
$10\ 11\ 138\ 139$	6	"L" & Quad, down left				
$18\ 22\ 50\ 54$	6	"L" & Quad, down right				
$80 \ 81 \ 208 \ 209$	6	"L" & Quad, up right				
$1\ 4\ 5\ 32\ 128$	1	Diagonal Split				
$33 \ 36 \ 37 \ 129$	1					
$132\ 133\ 160\ 161$	1					
164 165	1					
$3\ 6\ 9\ 20\ 40$	5	"L"-shaped split with corners				
$96\ 144\ 192\ 13\ 21$	5					
$35 \ 38 \ 44 \ 52 \ 53$	5					
$97\ 100\ 101\ 131$	5					
$134\ 137\ 141\ 145$	5					
$163\ 166\ 168\ 172$	5					
$176\ 177\ 193\ 196$	5					
197	5					
24	7	3-pixel horizonal split				
66	7	3-pixel vertical split				
255	7	All pixels				
All other grades	7					

 $\Lambda CTC + \Lambda CC \Lambda \sigma A \sim \gamma + H$ Ľ

3.4 観測データと解析方法

3.4.1 FITS データ

衛星で観測されたデータは FITS(The Flexible Image Transport System) と呼ばれるデータ形 式で保存される。FITS 形式は様々なコラム毎の値を Row 詰めしたテーブルに、そのデータの説 明として、コラムの意味などの情報の値を記述したヘッダがついたファイルである。FITS 形式で は画像上の天体の位置や明るさ、温度といった物理量を保存することができる。衛星から出力され るデータには、このような観測データ以外に衛星の姿勢などの周辺の情報のデータも保存される。 このようなデータは Harvard-Smithonian Center for Astrophisics(CFA) にある Chandra X-ray Center(CXC) で管理されている。

3.4.2 解析ソフト CIAO、XSPEC

Chandra 衛星の観測データの解析には CXC が開発した解析パッケージ CIAO を使用する。CIAO は FITS 形式のデータに保存された光子情報から解析の目的に沿ったデータファイルを作成することができる。データファイルとしては、画像ファイルや、ライトカーブ、スペクトルファイルなどがある。このように CIAO でスペクトルファイルを作成し、スペクトルのモデル解析などを行なう。スペクトル解析には X 線スペクトロスコピーで広く用いられている XSPEC などで解析表示できる。今回の解析は CIAO ver3.4、XSPEC ver11.3.2 を使用した。

第4章 電波 Cyguns Aの Chandra 衛星による X線観測と解析結果

4.1 X線観測

Cygnus A の *Chandra* 衛星による観測の概要を表 4.1 に示した。2000 年 5 月に低エネルギーで 感度のよい ACIS-S3 で観測され、2005 年の 9 月に ACIS-I3、2 月に ACIS-I1 で 7 回の観測が行な われた。計約 236ks の観測時間である。これらの観測の諸元を表 4.1 にまとめる。図 4.1 に観測 ID=5831 の観測で得られた X 線画像を示す。この観測には CCD=I0,I1,I2,I3,S2 が使用され、電 波銀河 Cygnus A は CCD=I1 上で観測された。

観測 ID	検出器	観測日時	観測時間 [s]
360	ACIS-S3	2000.5.21	35160
6252	ACIS-I3	2005.9.7	30050
6225	ACIS-I1	2005.2.15	24630
5831	ACIS-I1	2005.2.16	51770
6226	ACIS-I1	2005.2.19	24150
6250	ACIS-I1	2005.2.21	7050
5830	ACIS-I1	2005.2.22	23760
6229	ACIS-I1	2005.2.23	23050
6228	ACIS-I1	2005.2.25	16250

表 4.1: 観測データの概要



図 4.1: Cygnus A の *Chandra* 衛星による観 測から得られた X 線画像。

4.2 データセレクション

Chandra 衛星のデータを解析する前にデータセレクションを行なった。4章の3節で述べたよう に ACIS 検出器では突発的にバックグラウンドのカウトレイトが上昇する現象があり、正確にデー タ解析を行なうにはこの時間帯を除かなければならないそこで Cygnus A の観測の中から ID=5831 の観測データを取りあげる。最初に図 4.2 に示すように、CIAO のツール celldetect コマンドによ リ、点源らしき領域 (カウントレイトが高い領域)と電波銀河のまわりの領域を決定した。これら の変動する可能性のある X 線源領域を除いたライトカーブを図 4.3 に示す。このライトカーブか ら、この観測ではバックグラウンド領域の異常なカウントレートの上昇がないことが確認できた。 同様に他の 8 回の観測データ (ID=360,6252,6225,6226,6250,5830,6229,6228) に対してもいずれも 「フレア」が含まれていないことを確認した。結果として得られた有効観測時間を表 4.2 に示す。

Lightcurve for: lc.fits



図 4.2: celldetect による領域



図 4.3: バックグラウンド領域のライトカーブ

衣 4.2: 合観測 Cの有効観測 时间										
観測 ID	360	6252	6225	5831	6226	6250	5830	6229	6228	合計
観測時間 (ks)	34.0	29.6	23.7	51.0	25.2	7.0	23.3	23.4	15.9	233

ᄫᇷᆒᆓᆥᆂᅘᇷᇷᄱᆘᆂᄜ

4.3 X 線画像

図 4.5(左) は *Chandra* 衛星の観測による Cygnus A の X 線画像である。9 回の観測データの画像 を重ねたもので、積分時間は 230ks、採用したエネルギーバンドは 0.7-7keV である。画像の色彩 は輝度を表わし、凡例として下のカラーバーにピクセルごとの光子数を対数スケールで示してい る。画像の中心の点源は Cygnus A の中心核であり、東西の点源はホットスポット、さらに中心核 から東側のホットスポットまで伸びているジェットが確認される。ホットスポット間の差し渡しの 離角は 2 分角でこれは約 120kpc にあたる。また中心核付近に広がった X 線源は Smith et al(2002) により、 $kT \sim 4 - 6 keV$ の熱的プラズマからの放射で説明されており、銀河団ガスからの X 線と 考えられている。したがって、Cygnus A は銀河団ガスに埋もれた電波銀河であることがわかる。 図 4.5(右) は X 線画像に 5GHz の電波強度の等高線 (黄色)を重ねたものである。電波、X 線を比 較すると、中心核、ホットスポットは両者で対応していることがわかる。一方、X 線で確認され たジェット成分は電波では確認できない。また等高線が示す電波ロープを避けるように銀河団ガス が広がっており、"Cavity" を形成しているのがわかる (§2.4.2)。

4.3.1 ハードネスレイシオの空間分布

軟 X 線、硬 X 線の空間分布を探るため、図 4.5(右) にイメージ上に示したそれぞれの白色の帯の領 域を矢印の軸に対して、軟 X 線、硬 X 線それぞれの輝度分布を X 軸に投影し、それらの比をとるこ とで、ハードネスレイシオのプロファイルを求めた。まず CCD=I1(ID=5831,6225,6226,6250,5830,6229,6228)、I3(ID=6252)の画像を重ねた。ここで、CCD=S3 は CCD=I1,I3 と低エネルギー、高 エネルギーで感度が異るので I1I3 のデータに重ねることは適していないので除いた。この I1、I3 の画像から軟 X 線 0.7-5keV と硬 X 線 5-7keV のイメージを作成した。ローブ軸(1)ではジェット 領域は除いた。ID=5831のデータの画像上で銀河団ガスからの X 線を含まない領域の 1pixel あた



図 4.4: (右)Cygnus A の 0.7-7keV の X 線画像。(左) 右の X 線画像に 5GHz バンドの電波強度の 等高線を重ねた。中心核、ホットスポットは X 線、電波で対応している。

リのカウント数を観測時時間で規格化し差し引くことでバックグラウンドを評価し、除いた。図 4.3.1(上)より、中心核のX線は硬いX線、ホットスポットのX線は軟らかいX線であることが わかる。これはYoung et al(2002)、Wilson et al(2000)の結果と一致している。さらにローブ領 域は中心核付近の領域よりX線が硬いX線であることを示している。一方ローブの外側は統計不 足のため、エラーが大きく評価が望めない。図4.3.1(下)のローブ軸と垂直方向では東側はローブ に対して非対称であり、西側はと周辺の銀河団ガスからのX線よりやや軟らかいX線であること を示している。これよりローブ領域のX線は中心核付近の銀河団ガスからのX線より硬いX線を 示し、ローブ領域のX線には銀河団ガス以外の起源のX線が含まれている可能性がある。しかし ローブ周辺の銀河団ガスには温度構造が見られ、スペクトル解析から詳細に評価する必要がある。



図 4.5: 図 4.3.1 に示した領域に対するハードネスのプロファイル。

4.4 解析結果:電波ローブ

図 4.3.1のハードネスレイシオのプロファイルではローブ領域の X 線が銀河団ガスからの X 線以 外の X 線を含んでいることを示唆していた。この領域は §2.5の Cygnus A の電波画像の電波ロー ブと重なっており §2.2.3 で述べたようにシンクロトロン電子による逆コンプトン X 線源である可 能性が高い。そこで、ローブからの非熱的な X 線を探るため、ローブ領域とその周辺に対して X 線解析を行なった。

4.4.1 積分領域

スペクトル解析のための積分領域は、図 4.6(左) に示すように、電波強度の等高線を参考にして 半径 0.25 の円の領域とした。ただし西ローブは中心に近い領域は銀河団ガスに目立つ構造がみ られたためこの部分を除く。またホットスポット、ジェットの放射領域は除いた。比較のためにと るローブ周辺の領域はローブを囲むような領域とした。ただし中心核側の領域は銀河団ガスによ る表面輝度に勾配が見えてるために除いた。

それぞれの積分領域に対してスペクトル解析をする前に、それらの領域に含まれる Non X-ray Background(NXB)、Cosmic X-ray Background(CXB)、を除く必要がある。例として観測ID=5831 を取りあげる。図 4.6(右) に示すように同じ CCD チップ上でありながら遠く離れていて、銀河団 ガスからの X 線を含まない領域をこれらの NXB、CXB を評価するバックグラウンド領域とした。 同様に他の 8 個の観測データ (ID=360,6252,6225,6226,6250,5830,6229,6228) もこのような領域を バックグラウンド領域をとした。



図 4.6: (左) ローブ、ローブ周辺の積分領域。(右)BGD の積分領域

4.4.2 ローブ領域とローブ周辺領域の X 線スペクトル

まず図 4.6 で示した「ローブ領域」と「ローブ周辺領域」のそれぞれついてスペクトル解析を行なった。上記したバックグラウンドの領域のスペクトルを差し引いて得られた東西の「ローブ」、「ローブ周辺領域」のスペクトルを図 4.7(上パネル)に示した。CCD ごとのスペクトルを色分けしてある。ACIS-I1(ID=6225,5831,6226,6250,5830,6229,6228)のスペクトルは黒、ACIS-I3(ID=6252)のスペクトルは赤、ACIS-S3(ID=360)のスペクトルは緑である。スペクトルは銀河団ガスからのX線放射を想定し重元素を含む希薄な熱的プラズマガスモデル、"MEKAL"(Mewe et al.1985)にガス吸収のモデル (wabs)を掛けたものを考えた。ここで、光電吸収を行なうガスの水素柱密度はこの方向の実測値 $N_{\rm H} = 3.5 \times 10^{21}$ atm cm⁻²(Dickey & Lockman 1990)に固定して、モデルフィッ

トを行なった。結果を表 4.3 に示した。ローブ周辺のフラックスについてはローブ領域の面積で規 格化した。



図 4.7: (上) 東ローブ (左)、ローブ周辺 (右) のスペクトル。(下) 西ローブ (左)、ローブ周辺 (右) のスペクトル。黒が I1、赤が I3、緑が S3 のデータ。

	領域	温度 [keV]	重元素比	Flux 0.7-7keV [erg s ⁻¹ cm ⁻²]	$\chi^2/d.o.f$
東	ローブ	$6.7{\pm}0.3$	$0.53{\pm}0.09$	$(8.4\pm0.2)\times10^{-13}$	430/427
	周辺	$5.6{\pm}0.3$	$0.64{\pm}0.12$	$(4.0\pm0.2)\times10^{-13}$	497/509
西	ローブ	$7.6^{+0.8}_{-0.5}$	$0.37{\pm}0.13$	$(4.4 \pm 0.2) \times 10^{-13}$	446/414
	周辺	$8.5{\pm}0.9$	$0.49{\pm}0.17$	$(2.5\pm0.1){\times}10^{-13}$	426/403

-表 4.3: ローブ、ローブ周辺の銀河団ガスの温度、重元素量の太陽組成比、フラックス

結果、それぞれのスペクトルは銀河団ガスモデルで統計誤差の範囲内でよく再現できた。しかし、「ローブ」、「ローブ周辺」の残差(図 4.7)を比較すると、「ローブ領域」の残差がかすかに下 に凸で弓なりを示している。

またに全体的に東側と西側の結果を比較すると、温度は西側が東側に比べて高温である。重元 素比は東側が西側に比べ少ない値を示している。また、フラックスは東側が西側より2倍ほど明 るい。したがって Cygnus A のロープ方向の銀河団ガスの密度、温度構造の空間分布は東西で非 対称に見える。

次に「ローブ領域」と「ローブ周辺」の結果を比較すると、温度は東西ともに温度差が見られる。重元素比は東西とも「ローブ領域」のほうが小さい値を示している。フラックスも東西ともに値に「ローブ領域」の方が大きい。これらの結果より、「ローブ」領域は銀河団ガス成分以外のより硬い X 線放射が混ざっている可能性が示唆される。

ローブ、ローブ周辺領域の解析結果に見られた傾向は (「ローブ」にかかわらず) 銀河団ガスの 大局的な構造によるものかもしれない。そこで、確認のため図 4.8(左) に示すような、ローブの内 側、外側の領域について同様な銀河団ガスモデルによるモデル解析を行なった。それぞれのスペクトルを図4.8(右)、ベストフィット値を表4.4に示す。フラックスは前回同様にローブ領域の面積で規格化した。結果として、先ほどのローブ周辺の領域の結果と大体同じようなな結果を得た。詳細に評価すると、温度はローブの内側、外側の領域、先ほどの領域では少し内側から外側へ温度減少の勾配が見られる。しかしエラーを考慮するとさほど差はない。また、重元素比もローブ周辺の領域同士での差は見られなかった。このことから、「ローブ領域」のフラックスだけが周辺に比べ有意に大きく、また重元素比が小さいことが確認出来た。



図 4.8: 左の図は東西の積分領域。真中、右の図は内側、外側のスペクトル。

表 4.4: ローブ周辺の銀河団ガスの温度、	重元素量の太陽組成比、	フラックス
------------------------	-------------	-------

		温度 [keV]	重元素比	Flux 0.7-7keV [erg s ^{-1} cm ^{-2}]	$\chi^2/d.o.f$
東	内側	$6.3 {\pm} 0.4$	$0.64{\pm}0.13$	$(4.7^{+0.1}_{-0.2}) \times 10^{-13}$	532/501
	外側	$5.4{\pm}0.3$	$0.63{\pm}0.12$	$(3.7^{+0.2}_{-0.1}) \times 10^{-13}$	457/512
西	内側	$9.2^{+1.2}_{-0.9}$	$0.53_{-0.20}^{+0.22}$	$(2.8^{+0.3}_{-0.1}) \times 10^{-13}$	401/360
	外側	$8.0^{+0.8}_{-0.7}$	$0.58{\pm}0.18$	$(2.5 \pm 0.1) \times 10^{-13}$	382/405

4.4.3 ローブからの X 線スペクトル

これまでの解析からローブ領域のX線スペクトルは周辺の領域のX線スペクトルと若干異り、 銀河団ガスからのX線とは別のX線が含まれている可能性を示唆していた。一般に電波ローブは 電波源だけでなくX線源でもある(§2.2.3)。すなわちローブ領域には電波ローブからの非熱的な X線が含まれていて、奥行方向の前後に存在する銀河団ガスからのX線と重なって観測されてい るのではないかと考えれる。そこでローブからの非熱的なX線と前後のガスからの熱的なX線の 分離をする解析を行なった。解析の方法は、ローブ領域のX線に含まれる銀河団ガスからのX線 を除くため、周辺の銀河団ガスからのX線を差し引く。すなわち「ローブ」からのX線を取りだ すため、ローブ領域のスペクトルから周辺領域をバックグラウンドとして差し引く。バックグラ ウンドの領域として、ローブに近い領域、またローブからのコンタミを避けるためローブから少 し離れた領域(図4.6)を採用した。

ここで ACIS-I1(ID=6225,5831,6226,6250,5830,6229,6228)のデータを取りあげる。図 4.9 に積 分領域の面積補正した東西の「ローブ領域」(黒)、「ローブ周辺領域」(赤)、「ローブ」(緑) スペク トルを示す。「ローブ」スペクトルは重ならないよう 1/5 倍し見やすく表示した。電波ローブ中で は銀河団ガスが押しのけられている可能性が高い。しかし銀河団全体の大きさからみるとローブ の分の奥行は 30kpc/840kpc と無視できるので、差し引く時には見かけの面積についての補正の みを行なった。「ローブ領域」(黒)、「ローブ周辺領域」(赤)のスペクトルには銀河団ガスからの X 線の特徴である鉄輝線が 6.4keV 付近にはっきりと確認できるが、差し引いた結果の「ローブ」ス ペクトルからは、確認できない。これはローブ領域に含まれる銀河団ガスからの X 線成分を、ほ ぼ正しく差し引けたことを示している。表 4.5 にそれぞれの 0.7-7keV のカウントレイトを示した。 こられから「ローブ」スペクトルの統計的な有意度はそれぞれ 52、 30σ と統計がよいことがわか る。よって鉄輝線が確認できないのは統計不足によるものではない。さらに図 4.8 に示すローブ周 辺の領域をバックグラウンドとして差し引き、同様に鉄輝線が消える傾向を確認した。



図 4.9: 左が東側、右が西側のスペクトル。ローブ領域が黒、バックグラウンドが赤、ローブが緑のスペクトルで示した。ローブのスペクトルは見やすいように 1/5 倍して表示してある。

$\overline{\mathbf{A}}$ 4.5: ローノ領域、バッククラリント、ローノの 0.7-7keV の Counts sec	表 <u>4.5: ローブ領域、バックグラウンド、ローブの 0.7-7keV の C</u>	$ts sec^{-1}$
--	--	---------------

	ローブ領域	バックグラウンド	ローブ
東	$(8.22 \pm 0.07) \times 10^{-2}$	$(4.07 \pm 0.04) \times 10^{-2}$	$(4.15\pm0.08) \times 10^{-2}$
西	$(4.33 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	$(2.51\pm0.03) \times 10^{-2}$	$(1.82 \pm 0.06) \times 10^{-2}$

鉄輝線の等価幅の評価

さらに詳細に銀河団ガス成分が差し引けたことを評価するため、「ローブ領域」、「バックグラウ ンド」、「ローブ」のスペクトルの鉄輝線に注目した。評価方法は、輝線付近のエネルギーバンド、 5-8keV のスペクトルに対し、連続成分 (ここでは Power-Law) とガウシアンの二つ足したモデル でフィッティングし、鉄輝線の等価幅を求めて、比較する。結果を図4.10、表4.6に示した。



図 4.10: 左がローブ領域(黒)、バックグラウンド(赤)のスペクトル。右がローブのスペクトル。

(1 .0. µ	() / / / / / /		
	ローブ領域	バックグラウンド	ローブ
等価幅	402^{+219}_{-197}	656^{+323}_{-351}	162^{+360}_{-162}

ローブ領域 ローブの鉄ラインの等価幅 バックグラウンド

モデルフィット

これまでの結果より、ローブ領域からバックグラウンドを差し引いて得られたスペクトルは、輝 線を示さず、銀河団ガス成分ではなく非熱的な起源をもつローブからの X 線である可能性を示し ていた。そこで非熱的放射をモデルによって評価する。

差し引いて得られた X 線に、ローブからの非熱的な X 線と、銀河団ガスからの X 線の引き残り があることを想定して、モデルは非熱的な、Power-Law(PL)モデルと、前回の解析と同様な熱的 な、"MEKAL"モデルの二種類のモデルを足したものを考えた。"MEKAL"モデルのパラメタとし て、温度と重元素比は周辺の銀河団ガスの値 (表 4.3) に固定し、ノーマリゼーション $(=\frac{10^{-14}}{4\pi(1+z)^2} \times$ エミッションメジャー)だけをフリーパラメタとしてフィットを行なった。モデルフィットの結果、 東のローブスペクトルは"MEKAL"モデルは有限な値を持たず、PLモデルが支配的になった。西 のローブスペクトルは "MEKAL" モデルは有限な値を持つ結果となったが、PL モデルが支配的 になった。表 4.7 に PL のベストフィット値を示す。

	表 4.7: PL モテルのヘストノイット値						
	$\Gamma_{\rm X}$	S_X @1keV [nJy]	Flux 0.7-7keV[erg cm ^{-2} s ^{-1}]	$\chi^2/d.o.f$			
東	1.66 ± 0.05	70^{+4}_{-19}	4.3×10^{-13}	108/121			
西	$1.70^{+8.30}_{-0.10}$	28^{+3}_{-24}	$(1.9\pm0.1)\times10^{-13}$	97/92			

PL のべき、フラックス密度と"MEKAL"のノーマリゼーションとの相関を見積もるためにコ ンフィデンス コントアーを求めた。図 4.11 に示す。結果より東側の 1keV のフラックス密度の下 限値は 90%エラーから約 40nJy となり、これはローブスペクトルの最低、約 57%は非熱的な X 線 であることを示している。さらに、べきに関しては"MEKAL"の成分には大して依存しないこと がわかった。西側は統計不足のため 1keV のフラックス密度は下限値がほぼ0 になり、べきも決ま らなかった。



図 4.11: "MEKAL" の成分に対する PL の値のフィット結果の信頼度マップ。上が東、下が西。左 が明るさ、右がべき。黒が 68%、赤が 90%、緑が 99%エラーの等高線を示している。

これまでの結果をまとめると、ローブ領域のX線からバックグラウンドとした周辺領域のX線 を差し引いて得られたローブスペクトルには鉄輝線が確認できず、バックグラウンドの領域をずら したときも同様な傾向が見られた。これよりローブ領域のX線から銀河団ガスからのX線が正し く差し引けたことを示していた。PL+"MEKAL"のモデル解析より東側ではシグナル成分の少な くとも約57%、40nJyは非熱的成分であることがわかった。西側に関しては統計が足りず、引き 残りの評価まで達することが出来なかった。そこで西側に関しては東側の傾向に従うとして、ベ きのエラーは3%エラー、フラックス密度は最低、約57%が非熱的成分として16nJyと考えた。表 4.8 に最終的な結論を示す。

表 4.8:	PL の	下限値を含	む結果

	$\Gamma_{\rm X}$	$S_X[nJy]$
東	1.66 ± 0.05	70^{+4}_{-30}
西	1.70 ± 0.05	28^{+3}_{-12}

第5章 議論

5.1 X線スペクトルの解釈

ローブ領域からの X 線には銀河団ガスからの X 線に加え、非熱的な X 線が含まれていることが わかった。ローブ領域には銀河団ガスと電波ローブが存在していると考えられているが、この領 域の非熱的な X 線源は電波ローブ以外には考えにくい。

5.2 多波長スペクトル

ローブからの X 線のフラックス密度と比較する電波バンドは、本論文では 330MHz、1.3GHz、 1.7GHz、5GHz の4つのバンドの観測データを使用した (JAXA の浅田氏、国立天文台の永井氏、 早稲田大学の小山氏から提供)。それぞれの電波データの観測の諸元を表 5.1 にまとめる。正確に 比較するため、図 5.1 に示すような X 線解析と同様な領域の電波のフラックス密度を求めた。東 ローブの X 線解析で除いたジェット領域は、電波画像から確認できないので除かず含めた。また 西ローブの X 線解析で除いた中心核に近い領域は、電波では除かず円の領域として考えた。

表	5.1:	電波観測	の諸元
---	------	------	-----

周波数	観測周波数	観測周波数帯	観測日	望遠鏡	観測配列
330 MHz	332.902 MHz	$2.49023 \mathrm{~MHz}$	1991.8.25	VLA	A+B 配列
$1.3~\mathrm{GHz}$	$1.345~\mathrm{GHz}$	$6.250 \mathrm{~MHz}$	1986.12.1, 1987.8.18	VLA	C 配列,A 配列
$1.7~\mathrm{GHz}$	$1.70399~\mathrm{GHz}$	$3.125 \mathrm{~MHz}$	1986.12.1, 1987.8.18	VLA	C 配列,A 配列
$5~\mathrm{GHz}$	$4.985~\mathrm{GHz}$	$50 \mathrm{~MHz}$	1991.6.10	VLA	AD 配列



図 5.1: 330MHz、1.3GHz、1.7GHz、5GHz の電波画像。白い円はフラックス密度を求めた領域。

表 5.2 にそれぞれのバンドの電波、X 線のフラックス密度とスペクトル指数を示す。電波のスペクトル指数は Calliri et al. (1991) で報告されている値を示した。東ローブの X 線フラックス密度はジェットの放射領域を除いていたので、ローブが空間的に一様に X 線で輝いていると仮定し、面積補正を行なった。西ローブの X 線フラックス密度も、中心核付近の除いたので同様に面積補正を行なった。それぞれの面積補正した値は、円の領域の面積は東西 $\pi(0.25'')^2$ であり、東のジェット領域の面積は 0.53'' × 0.09''、西に除いた領域は $\pi(0.25'')^2/4$ である。これらから X 線のフラックス密度は東西、1.34、1.33 倍の補正を行なった。これらの値から求めた多波長スペクトルを図5.2 に示した。X 線成分のスペクトルの指数は電波のそれと同じだが、電波スペクトルの延長上になく1つのスペクトル成分では説明できないことがわかる。電波成分は偏光観測などから、シンクロトロン放射であることが知られている。一般に同じべき型の分布関数をもつ電子がつくるシンクロトン放射と逆コンプトン放射のスペクトル指数は同じである(§2.3)。したがって X 線の放射過程は逆コンプトン放射であると考えるのが自然である。

表 5.2: 東西ローブの電波、X 線のフラックス密度とスペクトル指数

		電波				X 線
		330 MHz	$1.3~\mathrm{GHz}$	$1.7~\mathrm{GHz}$	$5~\mathrm{GHz}$	1keV
東	α^a		$0.7\pm$	0.1^{c}		$0.66 {\pm} 0.05$
	S^b	1167 $\pm 10\%$ Jy	$611{\pm}10\%$ Jy	$446{\pm}10\%$ Jy	$114{\pm}10\%$ Jy	$94^{+5}_{-40} \text{ nJy}$
西	α^a		$0.70 {\pm} 0.05$			
	S^b	$699{\pm}10\%$ Jy	$424{\pm}10\%$ Jy	$318{\pm}10\%$ Jy	$93{\pm}10\%$ Jy	37^{+5}_{-21} nJy
	^a スペクトル指数、 ^b フラックス密度、 ^c Calliri et al. (1991) より					



図 5.2: 電波ローブの多波長スペクトル

5.3 種光子

電波ローブからのX線スペクトルは多波長スペクトルから逆コンプトンX線と考えられる。そこ で散乱される種光子について評価を行なった。考えられる種光子は宇宙マイクロ背景放射(CMB)、 活動銀河からの赤外線光子、電波ローブからのシンクロトロン電波光子の3つである。この3つ の光子のエネルギー密度を計算し、比較する。

 \mathbf{CMB}

 $CMB(1.6 \times 10^{11}(1+z)Hz)$ のエネルギー密度 u_{CMB} は以下の式で与えられている。

$$u_{\rm CMB} = 4.1 \times 10^{-13} (1+z)^4 {\rm erg s}^{-1}$$

zは赤方偏移である。電波銀河 Cygnus A の赤方偏移 zは 0.056 なので、これを代入し計算する と、 $u_{\text{CMB}} = 5.1 \times 10^{-13} \text{erg cm}^{-3}$ となる。

活動銀河からの赤外線光子

活動銀河からの赤外線光子 $(3 \times 10^{11} \sim 4.3 \times 10^{14} \text{Hz})$ のエネルギー密度 u_{IR} は以下の式で求められる。

$$u_{\rm IR} = L_{\rm IR}/4\pi cr^2 \tag{5.1}$$

ここでcは光速、rは中心核からローブの距離、 L_{IR} は輝度である。これは単位時間に放出される エネルギーを半径r、厚みcの球殻の体積で割ったものである。Cygnus A の中心核の赤外線の観 測報告はない。ここで考えた輝度は、赤外線の輝度はX 線の輝度の約 10 倍 ($L_{IR} \sim 10L_X$)と典型 的な値をもとに推定した。X 線の輝度は観測から知られている (Young et al. 2002)。距離は図 5.3 に示すように中心核から解析で考えた円の中心までとした。輝度、距離を式 (5.1) に代入し、求め た値を表 5.3 にまとめる。ただしここでは、視線方向の距離の奥行を考慮していないので実際のエ ネルギー密度はさらに小さいと推定できる。



図 5.3: 中心核からローブまでの距離

電波ローブからのシンクロトロン電波光子

領域内が一様に光っている電波ローブからのシンクロトロン電波光子のエネルギー密度を求め るときに、ここではストークスの定理より、各半径の球殻を通過する光子フラックスを、ローブ

表 5.3: 光子のエネルギー密度

	東	西
距離 $[cm]^a$	1.4×10^{23}	1.7×10^{23}
$L_{\rm X}[{\rm erg~s^{-1}}]$	$\sim 1.6 \times$	$10^{44} b$
$u_{\rm IR}[{\rm erg}~{\rm cm}^{-3}]$	1.9×10^{-14}	1.5×10^{-13}
^{<i>a</i>} 中心核からの	距離、 ^b Youn	g et al 2002

の輝度を持った点源が中心にあるとして代表させ、これをローブの体積で平均化して求めた。すなわち、

$$u_{\rm SR} = 3L_{\rm SR}/4\pi cr^2$$

ここで L_{SR} はシンクロトロン電波の輝度、c は光速、r は電波ローブの半径。電波の輝度 L_{SR} は $L_{SR} = 7 \times 10^{44} \text{erg s}^{-1}(10 \text{MHz} \sim 5000 \text{MHz}, H=70)$ と報告されている (Birzan et al. 2004)。これ は両ローブの輝度である。それぞれのローブのエネルギー密度を求めるため、330 MHz、5GHz の フラックスを参考にした。東西のローブの SR 電波のフラックス密度は 330 MHz、5GHz では 6:4 の 傾向が見られた。これを輝度 L_{SR} に対応させて東ローブの電波の L_{SR} は $L_{SR} = 4.2 \times 10^{44} \text{erg s}^{-1}$ 、 西ローブは $L_{SR} = 2.8 \times 10^{44} \text{erg s}^{-1}$ 、と考えた。電波ローブの半径は解析で考えた円の半径とし、15kpc とした。結果を表 5.4 にまとめる。

表 5.4: 電波ローブの半径、輝度、シンクロトロン電波のエネルギー密度

	半径 [cm]	$L_{\rm SR}[{\rm erg~s^{-1}}]$	$u_{\rm SR}[{\rm erg~cm^{-3}}]$
東	4.5×10^{22}	$\sim 4.2\times 10^{44}$	1.4×10^{-12}
西	4.5×10^{22}	$\sim 2.8\times 10^{44}$	1.0×10^{-12}

以上の種光子についての検討結果を図 5.4 にまとめた。ローブの位置でのエネルギー密度の関係 はそれぞれ $u_{SR} > u_{CMB} > u_{IR}$ となった。したがって、以下では散乱される種光子について活動 銀河からの赤外線光子は無視し、電波ローブからのシンクロトロン電波光子と CMB を考えるこ とにする。



図 5.4: Cygnus A の CMB、AGN からの赤外線光子、電波ローブからのシンクロトロン電波光子のエネルギー密度

5.4 電波ローブ内の電子、磁場エネルギー密度

5.4.1 SSC コードによる多波長スペクトルフィット

電波ローブからのシンクロトロン電波光子と CMB のエネルギー密度の比は $u_{SR}: u_{CMB} = 3:1$ であり、シンクロトロン自己コンプトン (SSC) 過程の X 線が支配的になっていると考えられる。 そこでまず電波ローブからの多波長スペクトルを予想される SSC スペクトルと比較して評価する。

(a) シンクロトロン電波のスペクトル : \mathbf{B} , γ_{\max}

本研究で使用した電波のデータは、詳細な電波のフラックスを求められたが、4 バンドの狭帯域 なのでシンクロトロン電波のスペクトルの詳細な形を知るには不十分である。そこでシンクロトロ ン電波のスペクトルの形については Carilli et al. 1991 の論文を参考にした。この論文では、電波 ローブからのシンクロトロン電波のスペクトルはローブの位置によってピーク振動数が異り、空間 分布が見られると報告されている。図 5.5(左)は積分領域を示した 5GHz の電波画像、図 5.5(右) は Carilli et al. 1991 の論文より電波ローブのスペクトルのピーク振動数の空間分布を示した図で ある。画像の色彩はピーク振動数を示し、凡例として上のカラーバーはピーク振動数の指標であ る。ピーク振動数 3、4、5、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、70GHz の等高線が示され ている。この図からホットスポット付近の輝度が高い領域では、ピーク振動数が高く、ホットス ポットから遠い輝度の低い領域ではピーク振動数が低いことがわかる。これはホットスポット付 近の領域はホットスポットで加速されたばかりの新鮮な電子が存在し、遠い領域ではシンクロト ロン冷却により高エネルギーの電子が減少している古い電子が存在しているためである。いま考 えている積分領域では、ピーク振動数に分布が見られるが、輝度の大きいホットスポット付近の スペクトルが支配的になると予想される。図 5.5(右)の積分領域のシンクロトロン電波はピーク振 動数を 30 ~ 50GHz にもつスペクトルとした。

ここで用いた SSC 計算コード (付録参照)の入力パラメタの磁場 *B* と電子の最大ローレンツ因 子 γ_{\max} がピークの位置を決めている。*B* が大きくすると高振動数側にシフトし、小さくすると低 振動数側にシフトする (図 2.13)。また、 γ_{\max} を大きくすると高振動数側にシフトし、小さいと低 振動数側にシフトする。したがってこの二つのパラメタを変化させ、シンクロトロン電波のスペ クトルのピークに注意し、スペクトル全体を再現する。



図 5.5: (右) 積分領域 (白丸) を示した 5GHz の電波画像。(左)Carilli et al. 1991 から電波ローブ のピーク振動数の空間分布を示したマップ。画像の色彩はピーク振動数を示し、凡例として上のカ ラーバーはピーク振動数の指標である。ピーク振動数 3、4、5、6、8、10、15、20、25、30、40、 50、60、70GHz の等高線が示されている。

(b) 放射領域の体積: V

SSC 過程の X 線の輝度は電子のエネルギー密度とシンクロトロン電波光子のエネルギー密度の 積に比例する。さらにシンクロトロン電波光子のエネルギー密度は電子のエネルギー密度と磁場 のエネルギー密度の積に比例するので、SSC 過程の X 線の輝度は電子のエネルギー密度の2 乗と 磁場のエネルギー密度の積に比例する。つまり、図 5.5 に示すような積分領域ではシンクロトロン 電波の輝度に空間分布が見られるので、SSC 過程の X 線の輝度も空間分布を持っていると考えら れる。しかし図 4.5 に示した X 線画像からはローブ領域の輝度分布は見られず、X 線解析から積 分領域の輝度分布を求めることができなかった。そこで SSC 計算コードの入力パラメタの体積 V は、ここではそのまま積分領域と一致するとして球体を考えた。

(a)、(b)をもとに SSC 計算コードで多波長スペクトルのフィットを行なった。シンクロトロン 電波のピーク振動数は 30GHz と 50GHz の 2 通りを考えた。図 5.6 に示すように電波、X 線のデー タをシンクロトロンスペクトルと、SSC スペクトルで再現することが出来た。このときのローブ の物理量を表 5.5 に示す。

表 5.5 をみると、磁場、電子のエネルギー密度ともに電波ローブで見られるの典型的な値を示している。電子の最大ローレンツ因子はシンクロトロン電波のスペクトルのピーク振動数から決定することができたが、SSC スペクトルと X 線のデータから、ピーク振動数 30GHz 以下では X 線データのスペクトルの形を再現することができないことがわかった。また電子の最小ローレンツ因子 γ_{\min} は図 5.6 の青緑色のスペクトルで示すように $\gamma_{\min} = 10^3$ 以下では X 線データのスペクトルの形を再現することはできず、また $\gamma_{\min} = 10^3$ 以上では 330MHz のデータがシンクロトロン電波のスペクトルの上に位置して再現できなので、ほぼ一意に $\gamma_{\min} = 10^3$ と決定できた。

しかし、(b) で述べたように放射領域の体積を過大評価している可能性がある。放射領域は積 分領域より小さいと考えられ、この場合はエネルギー密度を過少評価していることになる。した がって、このエネルギー密度は下限値とみなすべきである。

ローブ	${ u_{ m p}}^a$	$\gamma_{ m min} - \gamma_{ m max} \; ^b$	$B \ [\mu G]$	$u_{\rm m} \ [{\rm erg} \ {\rm cm}^{-3}]^{\ c}$	$u_{\rm e} \ [{\rm erg} \ {\rm cm}^{-3}]^d$	$u_{\rm e}/u_{\rm m}$
東	$30 \mathrm{GHz}$	$10^3-3 imes10^4$	22	1.9×10^{-11}	1.5×10^{-10}	7.8
	$50 \mathrm{GHz}$	$10^3-4 imes 10^4$	25	2.5×10^{-11}	1.3×10^{-10}	5.4
西	$30 \mathrm{GHz}$	$10^3 - 2.5 \times 10^4$	23	2.1×10^{-11}	9.4×10^{-11}	4.7
	$50 \mathrm{GHz}$	$10^{3} - 3.5 \times 10^{4}$	30	3.6×10^{-11}	6.9×10^{-11}	1.9
		\pm				

表 5.5: ローブの物理量

^{*a*} シンクロトロン電波スペクトルのピーク振動数、^{*b*} 電子の最小、最大ローレンツ因子、 ^{*c*} 磁場のエネルギー密度、^{*d*} 電子のエネルギー密度

5.4.2 CMB を種光子とする逆コンプトン X 線

SSC 計算コードによって得られた電子のエネルギー密度から、CMB を種光子とする逆コンプトン X 線のスペクトルを求めた。図 5.6 に示す赤のスペクトルである。これより、X 線のデータ、SSC スペクトルより 1/10 あたりに位置し、CMB 逆コンプトン X 線は無視できるほど、小さいことがわかった。



図 5.6: 上が東ローブ、下が西ローブの多波長スペクトル。それぞれのバンドのデータ点と SSC 計 算コードのスペクトルを示した。青緑のスペクトルは $\gamma_{min} = 10^2$ でのスペクトル。赤のスペクト ルは電子のエネルギー密度から計算した CMB が種光子であるときの逆コンプトン X 線。

5.4.3 電波ローブ内のエネルギーと周辺の熱的ガスの圧力

以上より、ローブからの X 線は CMB の逆コンプトン X 線ではなく、SSC 過程の X 線であり、 磁場と電子のエネルギー密度の下限値を求めることが出来た。図 5.7 にこれまで観測で求められた ローブの電子、磁場のエネルギー密度と本論文で求めた Cygnus A のローブの電子、磁場のエネ ルギー密度を示した。3本の斜線は電子のエネルギー密度と磁場のエネルギー密度の比を表わし、 それぞれ上から $u_e/u_m = 1, 10, 100$ を表わしている。データ点の色はローブのサイズで大まかに 分けられている。これより、Cygnus A の電波ローブの電子、磁場のエネルギー密度はサイズ、エ ネルギー密度の比と共に典型的な値を示している。

また Smith et al. 2002 ではローブ周辺の銀河団ガスの熱的圧力は $P_{\text{Mbh}} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-3}$ と報告されている。これを青緑の破線は周辺の銀河団ガスの熱的圧力を示している。ローブ内の電子、磁場、陽子を含むエネルギー密度 u_{lobe} は 2.4.2 から、 $P_{\text{Mbh}} = u_{\text{lobe}}/4$ である。これと Cygnus A の電波ローブのエネルギー密度を比較すると、磁場のエネルギー密度は電子のエネルギー密度 より小さいので無視すると、非熱的電子の圧力は周辺の熱的圧力よりやや小さい。しかし電子のエネルギー密度は下限値なので、この熱的圧力と同等、またはそれ以上になり、これが周辺の銀河団ガスによる熱的圧力と抵抗している可能性は十分にある。



Energy Densities in Radio Lobes

図 5.7: これまで観測で求められたローブの電子、磁場のエネルギー密度と本論文で求めた Cygnus A のローブの電子、磁場のエネルギー密度を示した。3 本の斜線は電子のエネルギー密度と磁場の エネルギー密度の比を表わし、それぞれ上から $u_e/u_m = 1, 10, 100$ を表わしている。データ点の 色はローブのサイズで大まかに分けられている。

第6章 まとめ

本論文では電波銀河 Cygnus AのX線天文衛星 *Chandra*の観測データ、*VLA*電波の観測デー タを用いて電波銀河 Cygnus Aの電波ローブの電子、磁場のエネルギー密度を調べた。結論を以下に示す。

- X 線解析においてローブ領域から銀河団ガス起源以外の X 線を発見した。この X 線は非 熱的なべき関数で再現でき、東ローブは $\Gamma_X = 1.66 \pm 0.05, S_X = 70^{+4}_{-30}$ nJy、西ローブは $\Gamma_X = 1.70 \pm 0.05, S_X = 28^{+3}_{-12}$ nJy、となった。多波長スペクトルから電波ローブからの逆コ ンプトン X 線と考えられる
- ローブの位置における光子のエネルギー密度を評価したところ、電波ローブからのシンクロトロン電波光子が有力であることがわかった。ローブの多波長スペクトルをSSC計算コードで評価したところ、ローブからのX線は電波ローブからのX線ではめずらしいSSC過程のX線が支配的になっていることがわかった。
- SSC計算コードから、電波ローブ内の電子、磁場のエネルギー密度は東ローブは $u_e = 1.3 \times 10^{-10}, u_m = 2.5 \times 10^{-11}$ 、西ローブは $u_e = 6.9 \times 10^{-11}, u_m = 3.6 \times 10^{-11}$ と求めることができた。電子のエネルギー密度は下限値である。電子のエネルギー密度と周辺の銀河団ガスの熱的圧力と比較すると、やや電子の非熱的圧力が低くなるが、電子のエネルギー密度は下限値であるのでの熱的圧力と同等、またはそれ以上になり、これが周辺の銀河団ガスによる熱的圧力と抵抗している可能性は十分にある。
- これまで電波ローブ内の電子の最小ローレンツ因子の決定は観測からは求めることが出来な かった。本論文では電波のデータ、X 線のデータからローブ内の電子の最小ローレンツ因子 を $\gamma_{\min} = 10^3$ と観測的に決定することができた。
- 今後の課題は放射領域の体積の再評価から電子のエネルギー密度を求めること。また周辺の 銀河団ガスとの詳細な相互作用の調査である。

付録A SSC計算プログラム

```
/*
   Synch_SSC_mono_KN.c : One-zone homogeneous SSC program for time-evolved
#
                          multiband analysis
#
#
             : read 2 input files,
     Remark!
#
                    (1) Electron population
                    (2) Modified Bessel table : F_x_table_coarse
#
#
                  output 3 files,
#
                    (3) synchrotro population in nu_Lnu
                    (4) SSC population in nu_Lnu
#
                    (5) Energy loss for both Synchrotron and Compton scat.
#
                        K_N effect is accurately considered
#
#
     1999/1/9
#
                   version 5.2
#
#
                           ISAS
                                    Jun Kataoka
*/
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
/*definition for array*/
#define MAX
                  2000
#define MAXF
                 20000
#define MAXSTR
                  1024
#define MAXCHR
                    64
#define BIN
                   100
#define BIN2
                          /* ''bin width for SYNC'' = ''bin width for SSC'' */
                   140
/*#define TBLMAX
                   250
                          */
/*#define TBLMAX 3970
                          */
#define TBLMAX
                  1000
/*definition for floating limit*/
#define EPS
                 1.00000e-5
#define BRKLMT 1.000000e-100
/*definition for physical parameters*/
```

#define	C1	4.19898e6	
#define	C2	1.865575e-23	
#define	СЗ	1.02404e4	
#define	NEGUNIT	-1.000000	
#define	UNIT	1.000000	
#define	PI	3.141592653589793	
#define	LIGHT	2.9979e10	/* in cm */
#define	PLANCH	6.6261e-27	/* in erg*s */
#define	RESTENE	8.1871e-7	/* in erg */
#define	CORRECTION	0.7500000	<pre>/* geometrical hosei factor */</pre>
#define	HUBBLE	2.430567e-18	/* s^-1 */
#define	ELEC_RAD	2.8179e-13	/* in cm */
#define	THOMSON	6.65e-25	/* in cm^2 */

```
/*definition of sub_functions*/
void j_nu_a_nu(double, double, double, int, int, double *, double *, double *,
                                      double *, double *, double *, double *);
void spheric_sync(double, double, double, double, double *, double *, double *,
            double *, double *, double *, double *, int *, double *, double *);
void spheric_SSC(double, double, double, double, double *, double *, double *,
                      double *, double *, int, int, double *, double *, int *);
void comp_KN(double *, double *, double *, double *, int, int, int);
void integ(int, double *, double *, double *);
main(int argc, char *argv[])
{
 double mag, radius, delta, redsft;
                                             /* Input parmaters */
 float mag_f, radius_f, delta_f, redsft_f;
                                             /* Input parmaters */
  double nu_min, nu_Max;
                                              /* Input parmaters */
                                             /* Input parmaters */
 float nu_min_f, nu_Max_f;
```

double surface, b_fac; double gamma[MAX],N_gamma[MAX], gmj_up[MAX]; double x[MAXF], F_x[MAXF]; double freq[MAX], emis[MAX], abs[MAX]; double nu_sync[MAX], nuLnu_sync[MAX]; double eps0[MAX], n_eps0[MAX], eps[MAX]; double gm_dot_S[MAX], gm_dot_C[MAX]; double nu_SSC[MAX], nuLnu_SSC[MAX]; double nu_SSC[MAX], nuLnu_SSC[MAX];

int i,j,k,m,n; int sum_colum, clm_comp;

```
column1, column2;
int
      temp1[MAXSTR], temp2[MAXSTR];
char
      temp3[MAXSTR], temp4[MAXSTR];
char
      line1[MAXSTR], line2[MAXSTR];
char
      file0[MAXCHR], file1[MAXCHR], file2[MAXCHR];
char
      file3[MAXCHR], file4[MAXCHR];
char
     *fp0, *fp1, *fp2, *fp3, *fp4;
FILE
printf(''********* Input parameters for SSC calulation *******\n'');
printf(''parameters: B, R, delta, z and frequency range are required!!\n'');
printf(''\n'');
printf(''Magnetic Field (Gauss)= ? '');
scanf(''%f'',&mag_f);
mag = mag_f;
printf(''Blob Radius (cm)= ? '');
scanf(''%f'',&radius_f);
radius = radius_f;
printf(''Beaming Factor= ? '');
scanf(''%f'',&delta_f);
delta = delta_f;
printf(''Distance (redshift : z)= ? '');
scanf(''%f'',&redsft_f);
redsft = redsft_f;
printf(''Synchrotron Freq. min value (Hz) = ? '');
scanf(''%f'',&nu_min_f);
nu_min = nu_min_f;
printf(''Synchrotron Freq. Max value (Hz) = ? '');
scanf(''%f'',&nu_Max_f);
nu_Max = nu_Max_f;
printf(''-----\n'');
printf('' B = %10.5e [Gauss]\n'', mag) ;
printf('' R
             = %10.5e [cm]\n'', radius) ;
printf('' delta = %10.5e \n'', delta) ;
printf('' z = 10.5e n', redsft);
printf('' f
             = %10.5e -- %10.5e [Hz]\n'', nu_min, nu_Max) ;
printf(''-----\n'');
printf(''Open - Initial Electron population : N(gamma) - Filename?'');
```

```
scanf(''%s'',file0);
```

printf(''Open - Modified Bessel function : F(x) - Filename?'');

```
scanf(''%s'',file1);
printf('Output - nu L_synch(nu) - Filename? (Obs frame)');
scanf(''%s'',file2);
printf(''Output - nu L_SSC(nu) - Filename? (Obs frame)'');
scanf(''%s'',file3);
printf(''Output - Cooling coefficient?'');
scanf(''%s'',file4);
printf(''\n'');
printf(''\n'');
if(NULL == (fp0 = fopen(file0, ''r''))){
  printf(''\n Cannot Open File : %s \n\n'', file0);
  exit(1);
}
if(NULL == (fp1 = fopen(file1,''r''))){
  printf(''\n Cannot Open File : %s \n\n'', file1);
  exit(1);
}
if(NULL == (fp2 = fopen(file2, ''w''))){
  printf(''\n Cannot Open File : %s \n\n'', file2);
  exit(1);
}
if(NULL == (fp3 = fopen(file3, ''w''))){
  printf(''\n Cannot Open File : %s \n\n'', file3);
  exit(1);
}
if(NULL == (fp4 = fopen(file4, ''w''))){
  printf(''\n Cannot Open File : %s \n\n'', file4);
  exit(1);
}
i = 0;
while (fgets(line1, MAXSTR, fp0)!= NULL){
   if(sscanf(line1, ''%s %s'', temp1,temp2) != 2){
     printf(''format error\n'');
     exit(1);
   }
  gamma[i] = (double)atof(temp1);
  N_gamma[i] = (double)atof(temp2);
         printf(''%e,%e\n'', gamma[i],N_gamma[i]);*/
  /*
  i++;
}
column1 = (int) i;
printf(''electron column =%d\n'',column1);
```

```
fclose(fp0);
  i = 0;
 while (fgets(line2, MAXSTR, fp1)!= NULL){
     if(sscanf(line2, ''%s %s'', temp3,temp4) != 2){
        printf(''format error\n'');
        exit(1);
     }
    x[i]
           = (double)atof(temp3);
    F_x[j] = (double)atof(temp4);
     j++;
  }
  column2 = (int) j;
 printf(''Bessel column =%d\n'',column2);
 fclose(fp1);
 printf(''\n'');
/* Call emission/absorption function ..... j_nu_a_nu
                                                                  */
/*
        Input ... gamma, N_gamma, x, F_x
                                                                  */
/*
       Return ... freq, emis, abs
                                                                  */
 j_nu_a_nu(mag, nu_min, nu_Max, column1, column2, gamma, N_gamma,
                                           x, F_x, freq, emis, abs);
/* Call synchrotron function
                                           ..... spheric_sync
                                                                  */
/*
        Input ... freq, emis, abs
                                                                  */
/*
       Return ... nu_sync, nuLnu_sync, eps0, n_eps0
                                                                  */
  spheric_sync(mag, radius, delta, redsft, freq, emis, abs, nu_sync,
               nuLnu_sync, eps0, n_eps0, &sum_colum, &surface, &b_fac);
/* Call SSC function
                                           ..... spheric_SSC
                                                                  */
        Input ... gamma, N_gamma, eps0, n_eps0
/*
                                                                  */
/*
        Return ... nu_SSC, nuLnu_SSC
                                                                  */
  spheric_SSC(radius, delta, surface, redsft, gamma, N_gamma, eps0, n_eps0,
              eps, column1, sum_colum, nu_SSC, nuLnu_SSC, &clm_comp);
/* Call Compton cooling function in KN region ..... comp_KN
                                                                  */
/*
       Input ... eps_0, n_dps0, eps
                                                                  */
/*
       Return ... gm_dot_C
                                                                  */
```

```
comp_KN(gamma, eps0, n_eps0, eps, gm_dot_C, column1, sum_colum, clm_comp);
  for(k = 0; k < sum_colum; k++){
      fprintf(fp2, ''%20.15e %20.15e\n'',nu_sync[k], nuLnu_sync[k]);
  }
  for (k = sum_colum; k < BIN; k++)
      fprintf(fp2, ''%20.15e %20.15e\n'',nu_sync[k], 0.0);
  }
  for(m = 0; m < BIN2; m++){</pre>
      fprintf(fp3, ''%20.15e %20.15e\n'',nu_SSC[m], nuLnu_SSC[m]);
  }
                 = (double)gamma[column1-1]/gamma[0]; /*undefined variable*/
  gm_ratio
  gm_power
                 = (double)1.0/(column1-1.0);
  gamma[column1] = (double)gamma[column1-1]*pow(gm_ratio,gm_power);
  for(n=0; ; n <column1; n++){</pre>
                = (double)sqrt(gamma[n]*gamma[n+1]);
    gmj_up[n]
    gm_dot_S[n] = gmj_up[n] * gmj_up[n] * b_fac;
    fprintf(fp4, ''%20.15e %20.15e %20.15e\n'',gmj_up[n], gm_dot_S[n],
                                                         gm_dot_C[n]);
 }
}
void j_nu_a_nu(double mag, double nu_min, double nu_Max, int column1,
               int column2, double *gamma, double *N_gamma, double *x,
               double *F_x, double *freq, double *emis, double *abs)
{
  double ratio, index;
  double nu;
  double F_table;
  double inc[MAX];
  double bla1[MAX],bla2[MAX],d_gamma[MAX];
  double comp_jnu[MAX], comp_anu[MAX];
  double j_nu, alpha_nu;
  int
        k,p,q;
  for(k=0; k<BIN; k++){</pre>
     ratio = (double)(nu_Max/nu_min);
     index = (double)k/BIN;
            = (double)nu_min * pow(ratio,index);
     nu
```

```
for(p=0; p<(column1-1); p++){</pre>
        inc[p]
                   = (double)nu/(C1*mag*gamma[p]*gamma[p]);
        for(q=0; q<(column2-1); q++){</pre>
           if((x[q]<inc[p]) && (x[q+1]>inc[p])){
              F_table = F_x[q];
              break;
         }else if(x[TBLMAX-1]<inc[p]){</pre>
              F_{table} = 0.0;
              break;
           }
    }
      /*for emisson j_nu*/
        comp_jnu[p]
                      = (double)(N_gamma[p]*F_table);
      /*for absorption alpha_nu*/
                     = (double)N_gamma[p]/(gamma[p]*gamma[p]);
        bla1[p]
        bla1[p+1]
                     = (double)N_gamma[p+1]/(gamma[p+1]*gamma[p+1]);
                     = (double)(gamma[p+1] - gamma[p]);
        d_gamma[p]
        bla2[p]
                     = (double)(bla1[p+1] - bla1[p])/d_gamma[p];
        comp_anu[p] = (double)gamma[p]*gamma[p]*bla2[p] * F_table;
    }
     integ(column1, gamma, comp_jnu, &j_nu);
     integ(column1, gamma, comp_anu, &alpha_nu);
     freq[k]
                     = (double)nu;
                     = (double)j_nu * mag * C2;
     emis[k]
     abs[k]
                     = (double)alpha_nu * NEGUNIT * mag * C3/ (nu*nu);
                     = (double)fabs(abs[k]);
     abs[k]
     emis[k]
                     = (double)fabs(emis[k]);
  }
void spheric_sync(double mag, double radius, double delta, double redsft,
                  double *freq, double *emis, double *abs, double *obs_nu,
                  double *obs_L, double *eps0, double *n_eps0, int *sum_colum,
                  double *surface, double *b_fac)
{
  double index,index2;
  double fac1,fac2,fac3;
```

}

```
double factor1,factor2,factor3;
double comp1,comp2,comp3,comp4,comp5;
double comp6,comp7,comp8,comp9,comp10;
double lumidis, lumi_tot;
double u_B, u_sync, u_sync2;
double z_hosei;
double bunsi, bunbo;
double L_nu[MAX], nuL_nu[MAX], ene_dens[MAX];
int i,j,k,p,q;
int colm1, colm2;
for (i=0;i<BIN; i++){</pre>
  if((0.0<emis[i]) && (emis[i]<BRKLMT)){
      break;
  }else if (emis[i] == 0.0){
      ;
  }
}
colm1 = i;
printf(''j_nu column =%d\n'',colm1);
for (j=0;j<BIN; j++){</pre>
  if((0.0<abs[j]) && (abs[j]<BRKLMT)){
    break;
  }else if (abs[j] == 0.0){
    ;
  }
}
colm2 = j;
printf(''alpha_nu column =%d\n'',colm2);
if(colm1 > colm2){
  *sum_colum = colm2;
} else {
  *sum_colum = colm1;
}
if(colm1 != colm2){
   printf(''No. of j_nu and alpha_nu are different!\n'');
   printf(''We set sum column No to %d...\n'', *sum_colum);
}
for(k=0; k<(*sum_colum); k++){</pre>
  if(abs[k] != 0.0){
               = (double)(2.0*abs[k]*radius);
     index
```

```
= (double)(4.0*PI*PI*radius*radius);
      fac1
       fac2
                 = (double)(emis[k]/abs[k]);
       if(index>EPS){
          comp1
                   = (double)exp(NEGUNIT*index);
          comp2
                    = (double)(UNIT - comp1*(index+1.0));
          comp3
                    = (double)2.0/(index*index);
          fac3
                    = (double)(UNIT - comp3*comp2);
      } else {
          comp4
                    = (double)(2.0/3.0)*index;
                    = (double)pow(index,2.0)/4.0;
          comp5
          fac3
                   = (double)comp4-comp5;
      }
          L_nu[k] = (double)fac1*fac2*fac3;
          nuL_nu[k] = (double)freq[k]*L_nu[k];
          lumidis = (double)(LIGHT*redsft/HUBBLE) * (1 + 0.25*redsft);
          *surface = (double)4.0 * PI * lumidis * lumidis;
          z hosei
                     = (double)nuL_nu[k]*pow(delta,4.0);
          bunbo
                   = (double)(*surface);
          obs_L[k] = (double)bunsi/bunbo;
    }else{ /* to avoid floating error */
          L_nu[k]
                   = 0.0;
          nuL_nu[k] = 0.0;
          z_hosei
                  = (double)(1.0 + redsft);
          obs_nu[k] = (double)freq[k]*delta/z_hosei;
          obs_L[k] = 0.0;
          lumidis = (double)(LIGHT*redsft/HUBBLE) * (1 + 0.25*redsft);
          *surface = (double)4.0 * PI * lumidis * lumidis;
   }
  }
 for(k=*sum_colum;k<BIN;k++){</pre>
          obs_nu[k] = (double)freq[k]*delta/z_hosei;
 }
     integ(*sum_colum, freq, L_nu, &lumi_tot);
    printf(''\n'');
     printf(''Total Synchrotorn Luminosity in the source frame is\n'');
    printf(''L_synch = %e (erg/s)\n'', lumi_tot);
/*
    u_sync
             = (double)lumi_tot/(4*PI*radius*radius*LIGHT); */
             = (double)mag*mag/(8.0*PI);
     u_B
```

```
= (double)4.0* u_B * THOMSON * LIGHT/(3.0 * RESTENE);
     *b fac
/* printf(''u_sync1 = %e (erg/cm^3)\n'', u_sync); */
  printf(''u_B
                  = (erg/cm^3) n'', u_B);
  printf(''b_fac
                  = %e\n'', *b_fac);
  for(p=0; p<*sum_colum; p++){</pre>
     eps0[p]
               = (double)(PLANCH * freq[p])/RESTENE;
     index2
               = (double)abs[p]*radius;
     factor1 = (double)4.0*PI;
     factor2 = (double)UNIT/(PLANCH*LIGHT*eps0[p]);
     if(index2>EPS){
        factor3
                  = (double)(UNIT - exp(NEGUNIT*index2));
     }else {
        comp7
                  = (double)index2;
                  = (double)pow(index2,2.0)/2.0;
        comp8
        comp9
                  = (double)pow(index2,3.0)/6.0;
                  = (double)pow(index2,4.0)/24.0;
        comp10
                  = (double)(comp7-comp8+comp9-comp10);
        factor3
      }
     if(abs[p] != 0.0){
        n_eps0[p] = (double)factor1*factor2*CORRECTION*
                               (emis[p]/abs[p])*factor3;
     }else{
                          /* to avoid floating error! */
        n_{eps0[p]} = 0.0;
     }
                     = (double)eps0[p] * n_eps0[p] * RESTENE;
     ene_dens[p]
  }
  integ((*sum_colum-1), eps0, ene_dens, &u_sync2);
  printf(''u_sync = %e (erg/cm<sup>3</sup>)\n'', u_sync2);
  printf(''\n'');
}
void spheric_SSC(double radius, double delta, double surface, double redsft,
                 double *gamma, double *N_gamma, double *eps0, double *n_eps0,
                 double *eps, int clm_elec, int clm_sync, double *nu_SSC,
                 double *nuLnu_SSC, int *clm_comp)
ł
  double d_gamma[MAX], d_eps0[MAX];
  double gamma_max;
```

```
double nu_SSC_rest[MAX];
```

```
double eps0_min;
double bunsi, bunbo;
double z_hosei;
double q_eps[MAX];
double j_nu_SSC[MAX], L_nu_SSC[MAX];
double nuLnu_SSC_rest[MAX];
double lumi_tot;
double lower, upper;
double factor;
double kappa, fac;
double term1,term2,term3;
double term3_u,term3_d;
double index;
double ratio;
double section;
static double sum1,sum2;
double chk_up, chk_low;
int
       p,q,r;
sum1 = 0;
sum2 = 0;
gamma_max = gamma[clm_elec-1];
eps0_min
          = eps0[0];
*clm_comp = BIN2;
for(p=0;p<*clm_comp;p++){</pre>
  for(q=0;q<clm_sync-1;q++){</pre>
      for(r=0;r<clm_elec-1;r++){
                      = (double)gamma[r+1] - gamma[r] ;
         d_gamma[r]
         d_eps0[q]
                       = (double)eps0[q+1] - eps0[q] ;
         lower
                       = (double)eps0_min ;
         upper
                       = (double)gamma_max;
        ratio
                       = (double)upper/lower;
                       = (double)(p+1)/BIN2;
         index
                       = (double)lower*pow(ratio,index);
         eps[p]
                       = (double)eps0[q];
         chk_low
                       = (double)(4.0 * gamma[r]*gamma[r]*eps0[q])
         chk_up
                                        /(1.0+4.0*eps0[q]*gamma[r]);
         if((chk_low<eps[p]) && (eps[p]<chk_up)){</pre>
                          = (double)eps[p]/(4*eps0[q]*gamma[r]
            kappa
```

```
*(gamma[r]-eps[p]));
                               (double)2.0*PI*ELEC_RAD*ELEC_RAD*LIGHT
              factor
                            =
                                        /(gamma[r]*gamma[r]*eps0[q]);
                               (double)2.0*kappa*log(kappa);
              term1
                            =
                               (double)(1.0+2.0*kappa)*(1.0-kappa);
              term2
                            =
              fac
                            =
                               (double)4.0*eps0[q]*gamma[r]*kappa;
                               (double)fac *fac *(1.0-kappa);
              term3_u
                            =
              term3 d
                               (double)2.0*(1.0+4.0*eps0[q]*gamma[r]*kappa);
                            =
              term3
                               (double)term3_u/term3_d;
                            =
              section
                            = (double)factor*(term1 + term2 + term3);
              sum1
                                sum1 + (double)N_gamma[r]*d_gamma[r]
                            =
                                                  *section*n_eps0[q]*d_eps0[q];
          } else {
            sum1 = sum1;
      }
        }
          sum2 = sum2 + sum1;
          sum1 = 0.0;
       }
       q_eps[p] = sum2;
       j_nu_SSC[p]
                        = (double)PLANCH*eps[p]*q_eps[p]/(4.0*PI);
       L_nu_SSC[p]
                        = (double)(16.0*PI*PI/3.0)*pow(radius,3.0)*j_nu_SSC[p];
                        = (double)RESTENE*eps[p]/PLANCH;
       nu_SSC_rest[p]
       nuLnu_SSC_rest[p] = (double)nu_SSC_rest[p]*L_nu_SSC[p];
       z_hosei
                        = (double)1.0 + redsft;
       nu_SSC[p]
                        = (double)nu_SSC_rest[p]*delta/z_hosei;
                        = (double)nuLnu_SSC_rest[p]*pow(delta,4.0);
       bunsi
       bunbo
                        = (double)surface;
                        = (double)bunsi/bunbo;
       nuLnu_SSC[p]
       sum2 = 0.0;
      }
     integ(BIN2, nu_SSC_rest, L_nu_SSC, &lumi_tot);
     printf(''Total SSC Luminosity in the source frame is\n'');
    printf(''L_SSC = %e (erg/s)\n '', lumi_tot);
     printf(''\n'');
void comp_KN(double *gamma, double *eps0, double *n_eps0, double *eps,
             double *gm_dot_C, int clm_elec, int clm_sync, int clm_comp)
  double gmj_up[MAX];
  double d_eps0[MAX], d_eps[MAX];
```

}

{

```
double eps0_min;
double gm_ratio, gm_power;
double factor;
double kappa, fac;
double term1,term2,term3;
double term3_u,term3_d;
double index;
double ratio:
double section;
static double sum1, sum2;
double chk_up, chk_low;
int
        p,q,r;
sum1 = 0;
sum2 = 0;
                 = (double)gamma[clm_elec-1]/gamma[0]; /*undefined variable*/
gm_ratio
                 = (double)1.0/(clm_elec-1.0);
gm_power
gamma[clm_elec] = (double)gamma[clm_elec-1]*pow(gm_ratio,gm_power);
for(p=0;p<clm_elec;p++){</pre>
   gmj_up[p] = (double)sqrt(gamma[p]*gamma[p+1]);
  for(q=0;q<clm_sync-1;q++){
      for(r=0;r<clm_comp-1;r++){</pre>
                       = (double)eps[r+1] - eps[r] ;
         d_eps[r]
                       = (double)eps0[q+1] - eps0[q];
         d_eps0[q]
         chk_low
                       = (double)eps0[q];
         chk_up
                       = (double)(4.0 * gmj_up[p]*gmj_up[p]*eps0[q])
                                        /(1.0+4.0*eps0[q]*gmj_up[p]);
         if((chk_low<eps[r]) && (eps[r]<chk_up)){</pre>
                             (double)eps[r]/(4*eps0[q]*gmj_up[p]
            kappa
                          =
                                                     *(gmj_up[p]-eps[r]));
                             (double)2.0*PI*ELEC_RAD*ELEC_RAD*LIGHT
            factor
                          =
                                     /(gmj_up[p]*gmj_up[p]*eps0[q]);
            term1
                             (double)2.0*kappa*log(kappa);
                          =
            term2
                             (double)(1.0+2.0*kappa)*(1.0-kappa);
                          =
                          = (double)4.0*eps0[q]*gmj_up[p]*kappa;
            fac
                          = (double)fac *fac *(1.0-kappa);
            term3_u
                          = (double)2.0*(1.0+4.0*eps0[q]*gmj_up[p]*kappa);
            term3_d
            term3
                          = (double)term3_u/term3_d;
                          = (double)factor*(term1 + term2 + term3);
            section
            sum1
                              sum1 + (double)section*n_eps0[q]*d_eps0[q]
                          =
                                             *eps[r]*d_eps[r];
        } else {
          sum1 = sum1;
```

```
}
    }
          sum2 = sum2 + sum1;
          sum1 = 0.0;
       }
       gm_dot_C[p] = sum2;
       sum2 = 0.0;
      }
}
void integ(int clm, double *gma, double *cmp, double *ret)
{
  double sum_K;
  double au1,au2,ad1;
  double bu1,bu2,bu3,bu4,bd1,bd2,bd3;
  double s1,s2,s3;
  double a,b,c;
  double s[MAX];
  int pare;
  int r,u;
  if ((clm%2) == 0){
    pare = (int)(clm/2 - 1);
  } else {
    pare = (int)(clm/2);
  }
  sum_K = 0.0;
  for(r=0;r<pare; r++){</pre>
      u = (int)2*r;
      bu1 = (double)(gma[u+1]*gma[u+1] - gma[u+2]*gma[u+2]);
      bu2 = (double)(cmp[u] - cmp[u+1]);
      bu3 = (double)(gma[u]*gma[u] - gma[u+1]*gma[u+1]);
      bu4 = (double)(cmp[u+1] - cmp[u+2]);
      bd1 = (double)(gma[u] - gma[u+1]);
      bd2 = (double)(gma[u+1] - gma[u+2]);
      bd3 = (double)(gma[u+2] - gma[u]);
          = (double)(bu1*bu2 -bu3*bu4)/(bd1*bd2*bd3) ;
      b
      au1 = bu2;
      au2 = bd1;
      ad1 = bu3;
        = (double)(au1-b*au2)/ad1;
      а
```

}

参考文献

- [1] Isobe, N., 2002, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo
- [2] Kataoka, J., 1999, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo
- [3] Nagai, H., 1999, Ph.D. Thesis, The Graduate University for Advanced studies (SOKENDAI)
- [4] Carilli, C.L., Preley, R.A., Dreher, J.W., Leahy, J.P., 1991, ApJ, 383, 554
- [5] Nilsson, K., Valtonen, M.J., Jones, L.R., Saslaw, W.C., Lehto, H.J., 1997, A&A, 324, 888
- [6] Dreher, J.W., Carilli, C.L., 1987, ApJ, 316, 611
- [7] Wilson, A.S., Young, A.J., Shopbell, P.L., 2000, ApJ, 544, L27
- [8] Young, A.J., Wilson, A.S., Terashima, Y., Arnaud, K.A., Smith, D.A., 2001, ApJ, 564, 176
- [9] Smith, D.A., Wilson, A.S., Arnaud, K.A., Terashima, Y., Young, A.J., 2002, ApJ, 565, 195
- [10] Packham, C., Young, S., Hough, J.H., Tadhunter, C.N., Axon, D.J., 1998, MNRS, 297, 936
- [11] Kino, M., Takahara, F., 2004, MNRS, 349, 336
- [12] Isobe, N., Makishima, K., Tashiro, M., Itoh, K., Iyomoto, N., Takahashi, I., Kaneda, H., 2006, ApJ, 645, 256
- [13] Kaneda,H., Tashiro,M., Ikebe,Y., Ishizaki,Y., Kubo,H., Makishima,K., Ohashi,T., Saito,Y., Tabara,H., Takahashi,T., 1995, ApJ 453, L13
- [14] Tashiro, M., Kaneda, H., Makishima, K., Iyomoto, N., Idesawa, E., 1998, ApJ, 499, 713
- [15] Tashiro, M., Makishima, K., Iyomoto, N., Isobe, N., Kaneda, H., 2001, ApJ, 546, L19
- [16] Isobe, N., Tashiro, M., Iyomoto, N., Suzuki, M., Murakami, M.M., Mori, M., Abe, K., 2002, ApJ 580, L111
- [17] Isobe, N., Makishima, K., Tashiro, M., Hong, S., 2005, ApJ, 632, 781
- [18] Migliori, G., Grandi, P., Palumbo, G.G.C., Brunetti, G., Stanghellini, C., 2007, ApJ, 668, 203
- [19] Kataoka, J., Leahy, J.P., Edwards, P.G., Kino, M., Takahara, F., Serino, Y., Kawai, N., Master, A.R., 2003, A&A, 410, 833
- [20] Croston, J.H., Hardcastle, M.J., Harris, D.E., Belsole, E., Birkinshaw, M., Worrall, D.M., 2005, ApJ, 626, 733
- [21] Hardcastle, M.J., Birkinshaw, M., 2002, ApJ, 581, 948

- [22] Kataoka, J., Stawarz, L., 2005, ApJ, 622, 797
- [23] Miley, G., 1980, ApJ, 18, 165
- [24] Harris, D.E., Grindlay, J.E., 1987, MNRS, 188, 25
- [25] Band, D.L., Grindlay, J.E., 1986, ApJ, 308, 576,
- [26] Band, D.L., Grindlay, J.E., 1985, ApJ, 298, 128,
- [27] CXC, http://cxc.harvard.edu/proposter/POG/html/MPOG.html
- [28] Chandra, http://chandra.harvard.edu/about
- [29] Rybichi, G.B., Lightman, A.P., "Radiative Processes in Astrophysics" (New York; Wiley)
- [30] Birzan, L., Rafferty, D.A., MxNamara, B, R., 2004, ApJ, 607, 800
- [31] Brunetti, G., Setti, G., Comastri, A., 1997, A&A, 325, 898
- [32] Brunetti,G., 2000, APh, 13, 107

謝辞

本論文を執筆するにあたり、協力してくださった多くの皆様に心より御礼申し上げます。

指導教官である田代先生には基礎物理から本論文まで幅広くご指導を頂きました。本論文では 日本語表現、論理展開など何度も何度も何度も丁寧なご指導、感謝しています。おかげで修士論 文を書き上げることが出来ました。研究では研究に対する姿勢など、特に結果に対する評価方法 についてのご指導を感謝しています。感謝だらけです。また磯部さんには解析から本論文まで丁 寧かつ親切に、浮き沈みの激しい僕を本論文の執筆の最後までご指導してくださって感謝してい ます。特に Cygnus A という天体の提示を感謝してます。この提示があったので研究に夢中にな り、楽しくなり、博士後期課程に進学することを決断できました。これからもよろしくお願い致 します。Cygnus A の電波のデータを提供してくれた、また本研究で貴重なアドバイスをくださっ た紀さん、浅田さん、永井さん、小山さんには本当に感謝してます。おかげで電波と X 線のすば らしいコラボレーションによりすばらしい結果を得ることができました。

また田代研の皆様、本当に色々とありがとうございました。浦田さん、阿部さんには PC まわ り、解析環境などで大変お世話になりました。田代研の同期である鈴木君、村瀬君、おまえらの おかげで色々な意味で楽しく、充実したスーパーな2年間が過ごせました。本当に出会えたこと に感謝してます。