

～ICRR Seminar 2002年7月23日～

電波銀河のジェット終端ローブにおける Energeticsの逆コンプトンX線による診断

東京大学理学系研究科博士課程卒業

宇宙開発事業団 MAXI開発チーム

宇宙開発特別研究員

磯部 直樹

牧島一夫(東大理),田代信(埼大理),

金田英宏,伊予本直子(宇宙研),

東大、埼大の大学院生

宇宙ジェット

☆ **活動銀河核**、コンパクト星、
原始性などから噴出

☆ 細く絞られた、
超高速の プラズマ流
~1°, 光速 c , 100 kpc

☆ 粒子加速の現場

駆動収束機構、プラズマ組成

宇宙天体物理学の大きな謎

磁場と粒子で構成

エネルギー密度が重要

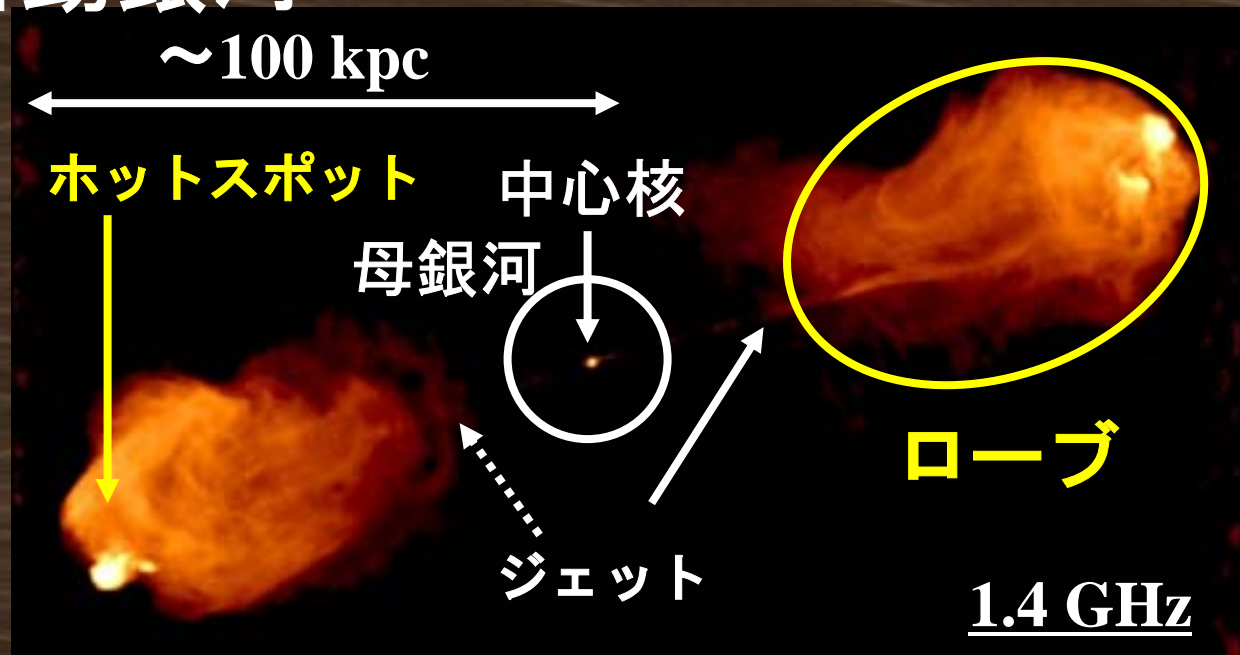
磁場: u_m

電子: u_e

ジェットを持つ活動銀河

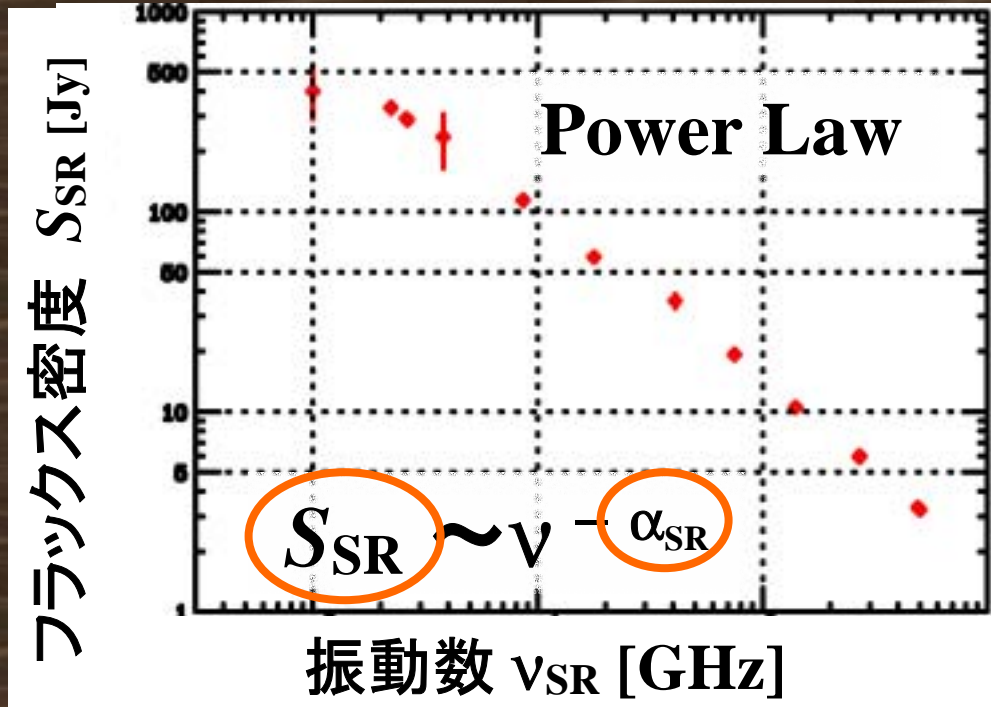
➤ 正面から観測する
ブレイザー

➤ 横から観測する
電波銀河

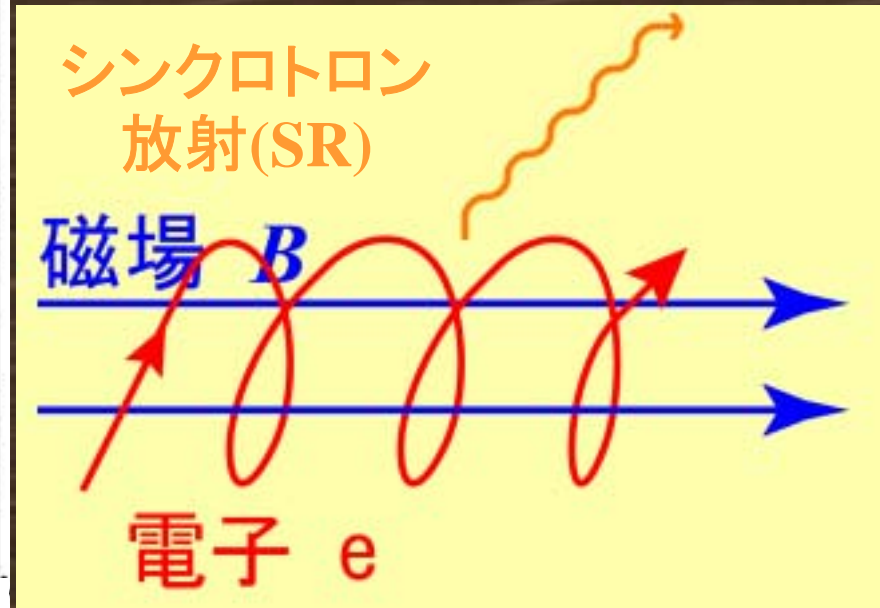


電波観測からわかる情報

典型的なローブのスペクトル



一般に、強い直線偏光



SR放射の観測量と物理量

- 振動数 $\nu_{SR} \propto \gamma_e^2 B$
- 強度 $S_{SR} \propto \frac{u_e u_m}{\nu}$
- 指数 $\alpha_{SR} = 2p + 1$

独立には決まらない

エネルギー等分配を仮定

$$u_e = u_m = 10^{-13} \text{ erg cm}^{-3}$$

$$B = 1 - 10 \mu\text{G}$$

$$\gamma_e = 10^{3-5}$$

従来は

物理的根拠はない

X線観測からわかる情報

SR電子による逆コンプトン(IC)散乱 \rightarrow X線、 γ 線

IC散乱の種となるソフトな光子

典型的な振動数

ν_{soft}

エネルギー密度

u_{soft}

とすれば

IC X線の観測量と物理量

振動数 $\nu_{\text{IC}} \propto \gamma_e^2 \nu_{\text{soft}}$

強度 $S_{\text{IC}} \propto u_e u_{\text{soft}}$

指数 $\alpha_{\text{IC}} = 2p + 1$

SR電波の観測量と物理量

振動数 $\nu_{\text{SR}} \propto \gamma_e^2 B$

強度 $S_{\text{SR}} \propto u_e u_m$

指数 $\alpha_{\text{SR}} = 2p + 1$

u_{soft} がわかれば、 u_e と u_m が独立に計算できる

➤ ローブ : 宇宙マイクロ波背景放射 1 keV $\Leftrightarrow \gamma_e = 1000$

$$u_{\text{CMB}} = 4.1 \times 10^{-13} (1+z)^4 \text{ erg cm}^{-3}$$

➤ ホットスポット(Blazar) : SR光子(いわゆる SSC)

これまでのX線観測で何かわかった

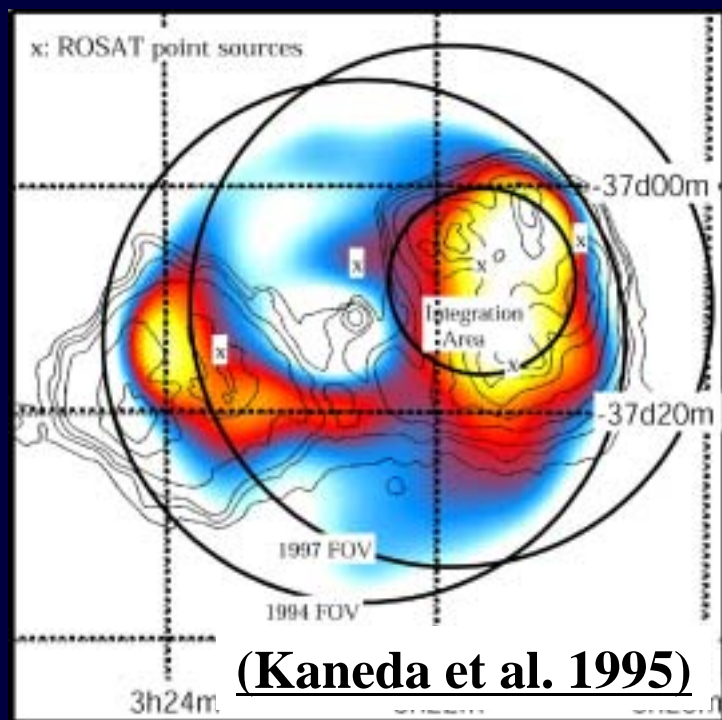
か？

ローブからのIC X線は

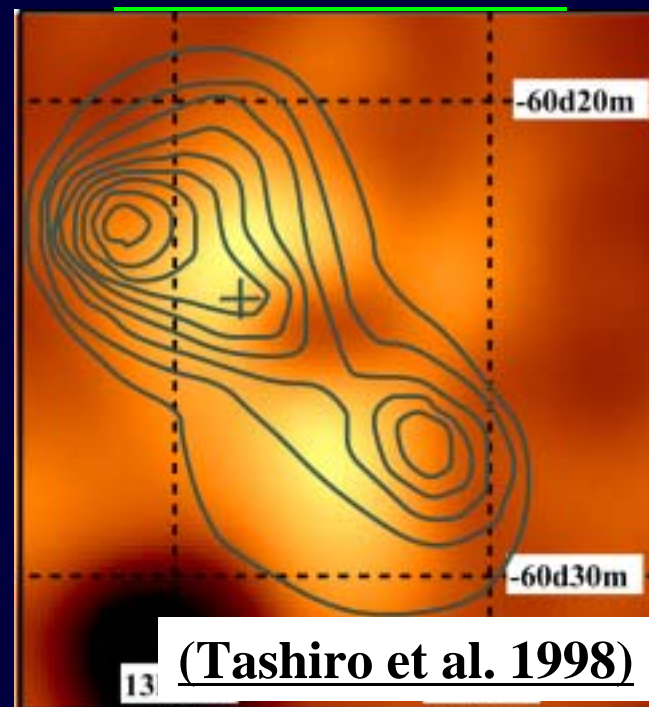
- 広がった表面輝度の小さい放射
- ハードなPower Law スペクトル
- 明るい中心核が混入する

「あすか」の登場で、
初めて検出が
可能になった

Fornax A



Centaurus B



ほぼ当分配 : $u_e \sim u_m$

電子優勢 : $u_e \sim 6 u_m$

何故「あすか」はローブからIC X線を検出できたか？

ローブからのIC X線は

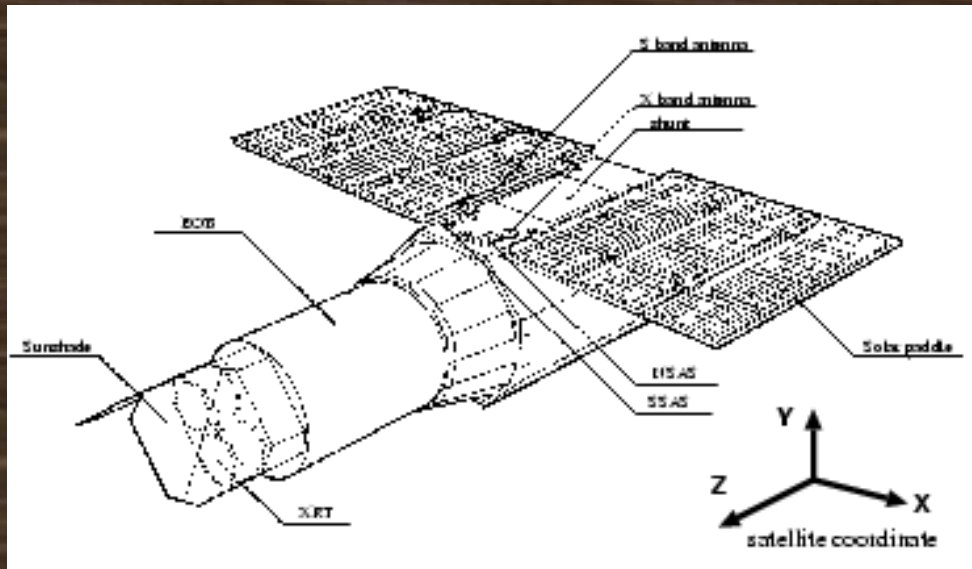
- 広がった放射
 - 表面輝度が小さい
 - 硬X線までのびる
- Power Law スペクトル
- 明るい中心核が混入する



- 広いエネルギー帯域 ○ 0.7 – 10keV
- 大きな有効面積 ○
- 低バックグラウンド ◎
- 広い視野 ○ 直径50分角
- 空間分解能 △ 3分角
- エネルギー分解能 ○ 8% (5.9keV)

「あすか」衛星

GIS 検出器



10 keVまでの撮像を世界で始めて可能に

「あすか」では、あと何ができるのか？

系統的にローブからIC X線を検出する必要がある。

IC X線の検出は「あすか」でも困難 ← 角分解能がちょっと悪い

ホットスポットは不可能

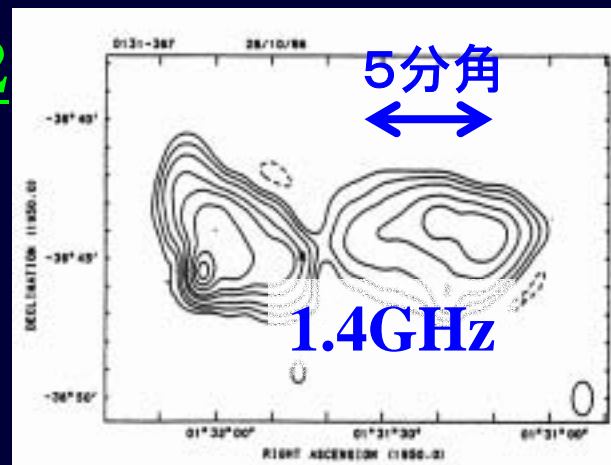
- ✓ローブの大きさ > 5分角
- ✓ローブが電波で明るい
- ✓中心角が暗い、または吸収を受けて暗く見える。
- ✓銀河団中にない。

公開データを調査

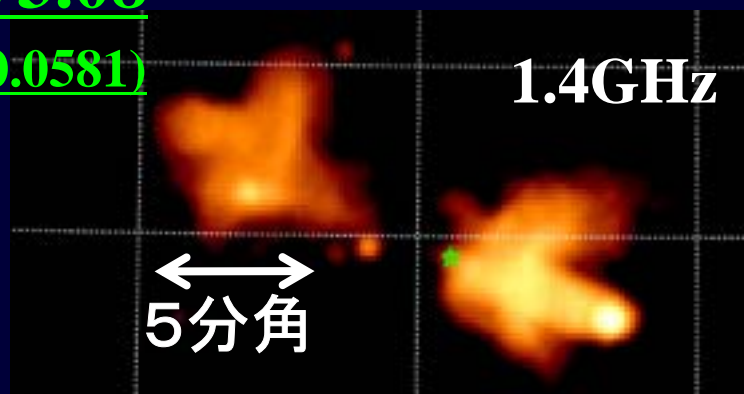
約30個の電波銀河
しかし
該当するものはない

観測提案

NGC 612
($z = 0.0298$)

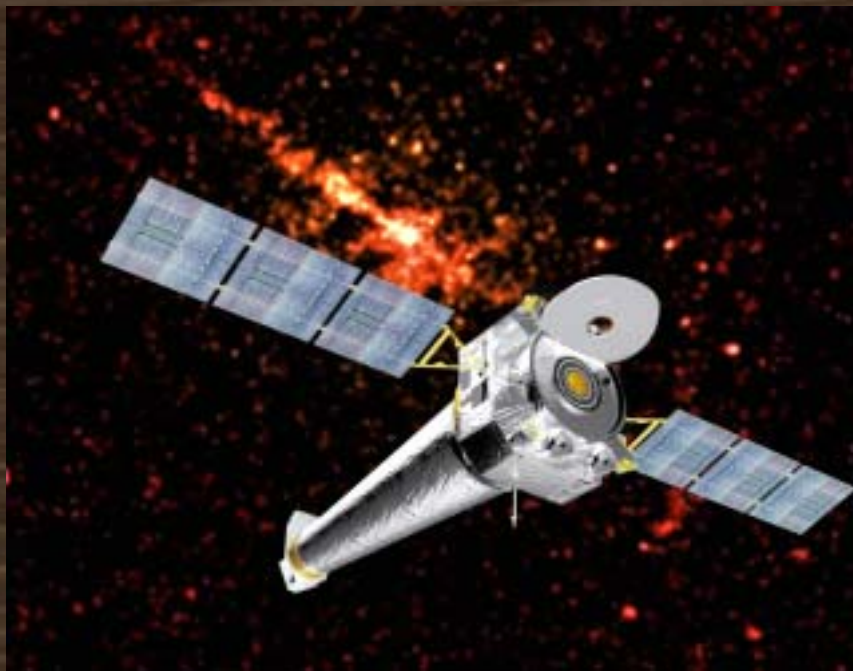


4C 73.08
($z = 0.0581$)



新世紀のX線観測衛星

Chandra 衛星



1999年7月23日打ち上げ
優れた**角分解能**
やや有効面積小
2天体の観測提案が採択

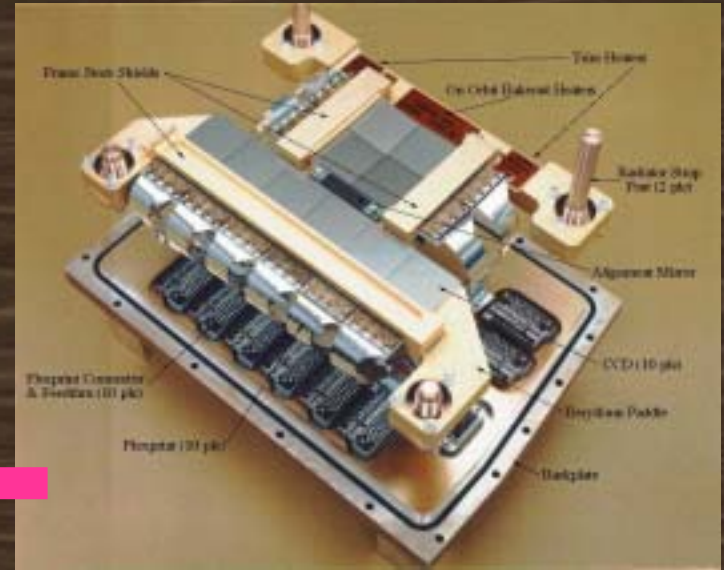
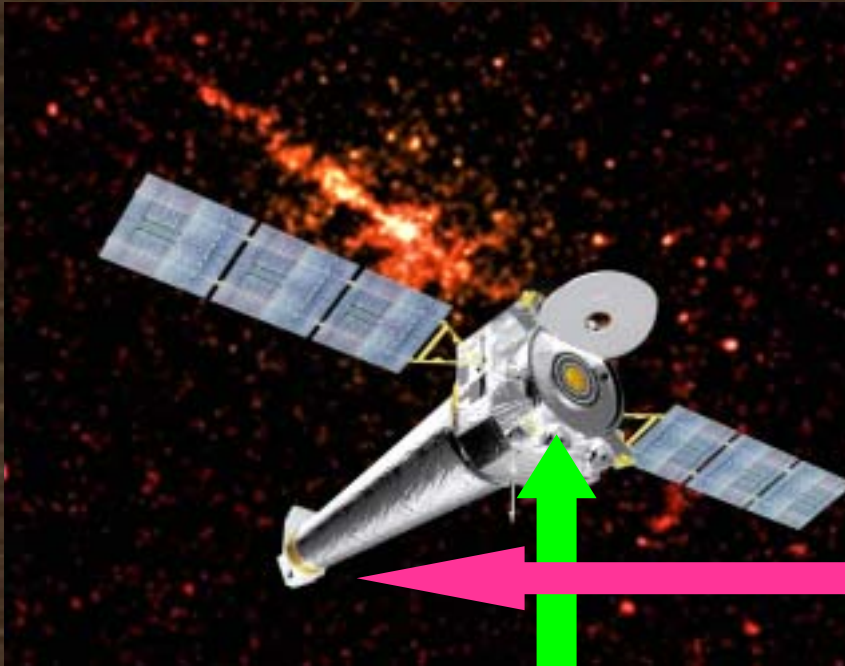
*XMM-Newton*衛星



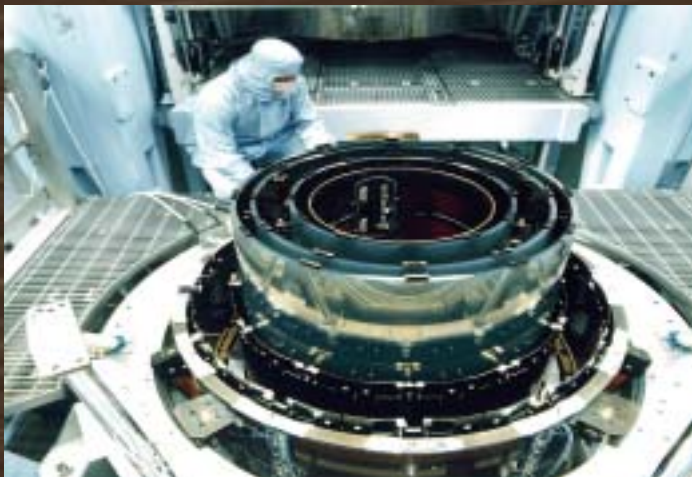
1999年12月10日打ち上げ
巨大な**有効面積**
BGDが高く変動
4天体の観測提案が採択

Chandra衛星

CCDカメラ ACIS



X線望遠鏡 HRMA



- エネルギー帯域
- 有効面積
- バックグラウンド
- 視野
- 空間分解能
- エネルギー分解能

○ 0.3 – 7 keV

△ 「あすか」の数分の1

△ 「あすか」より一桁高い

○ 8 x 8 arcmin² (1CCD)

◎ ~ 0.5 arcsec

○ ~ 150 eV

➡ 小さな電波銀河のローブや
ホットスポットから
ICX線が検出できる

Chandra衛星による観測天体

ローブからIC X線
の検出を目的に



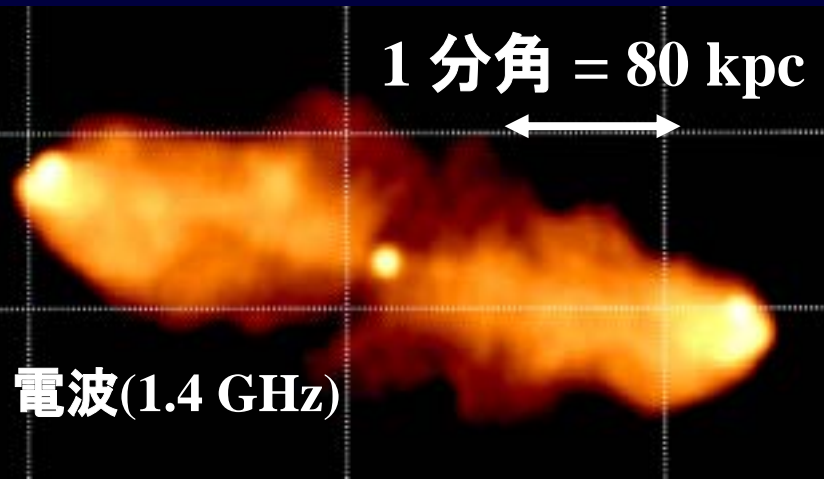
「あすか」とほぼ同じ条件
小さな電波銀河を調査

観測提案(Cycle 2)

3C 452 ($z = 0.0811$)

1分角 = 80 kpc

電波(1.4 GHz)



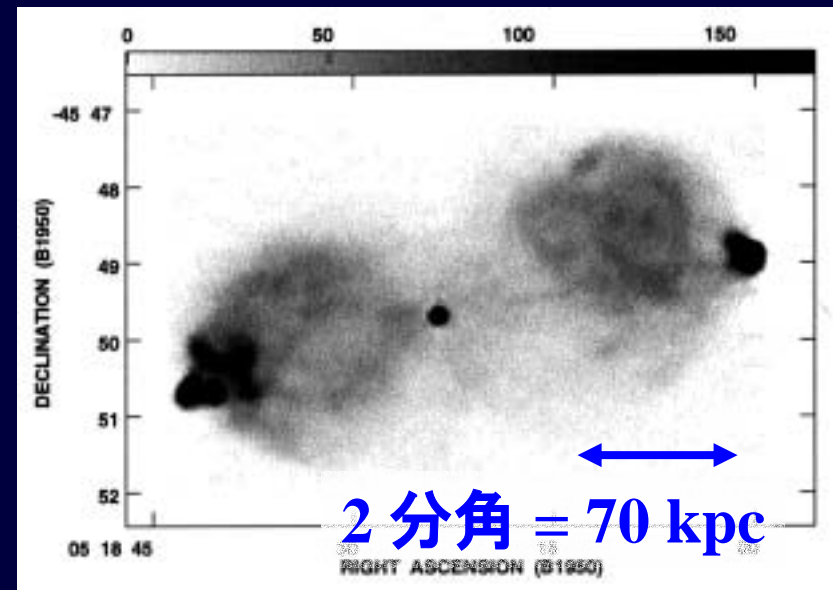
80 ksecにわたる観測

3C 427.1 ($z = 0.572$)

CMB密度のより濃い環境

公開データを調査

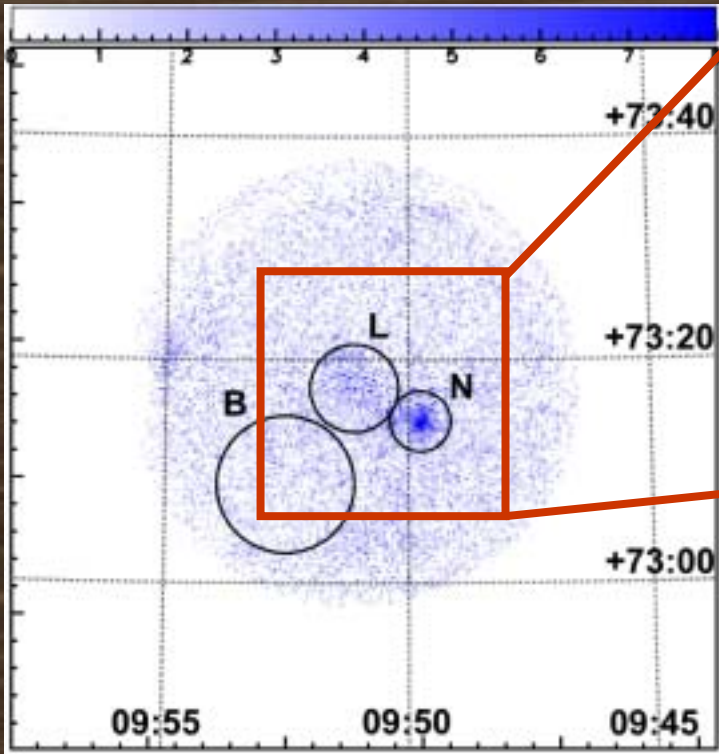
Pictor A ($z = 0.0350$)



Jet,ホットスポットなどが
すでに検出(Wilson et al. 2001)

「あすか」による結果～4C 73.08～

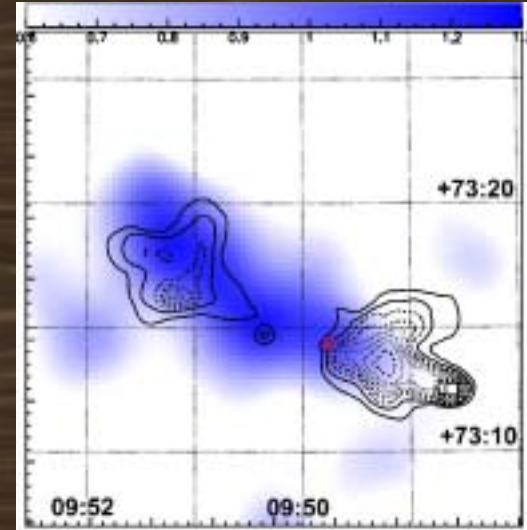
0.7 – 10 keVのGIS画像



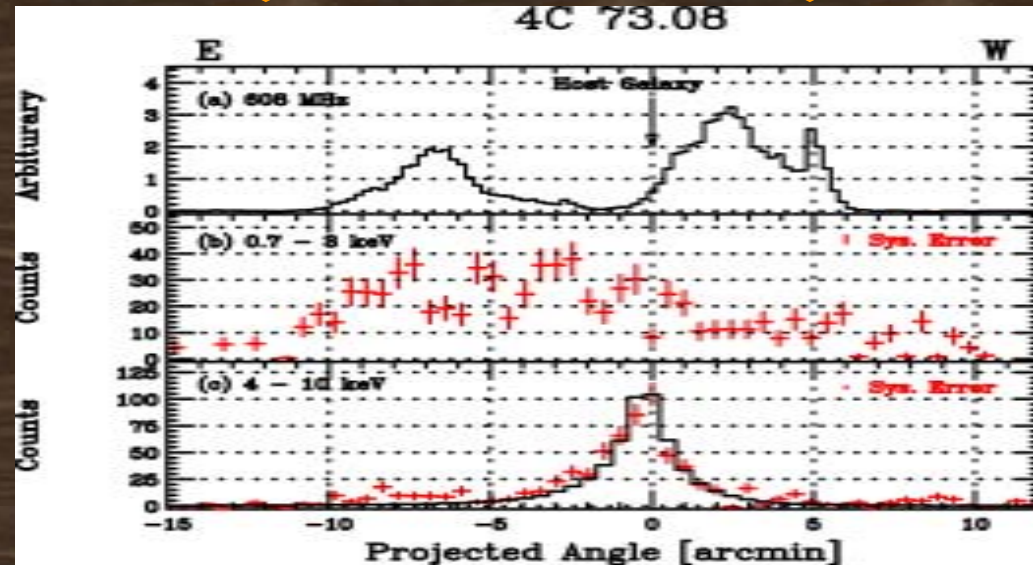
Hard (3–10 keV)



Soft (0.7–3 keV)



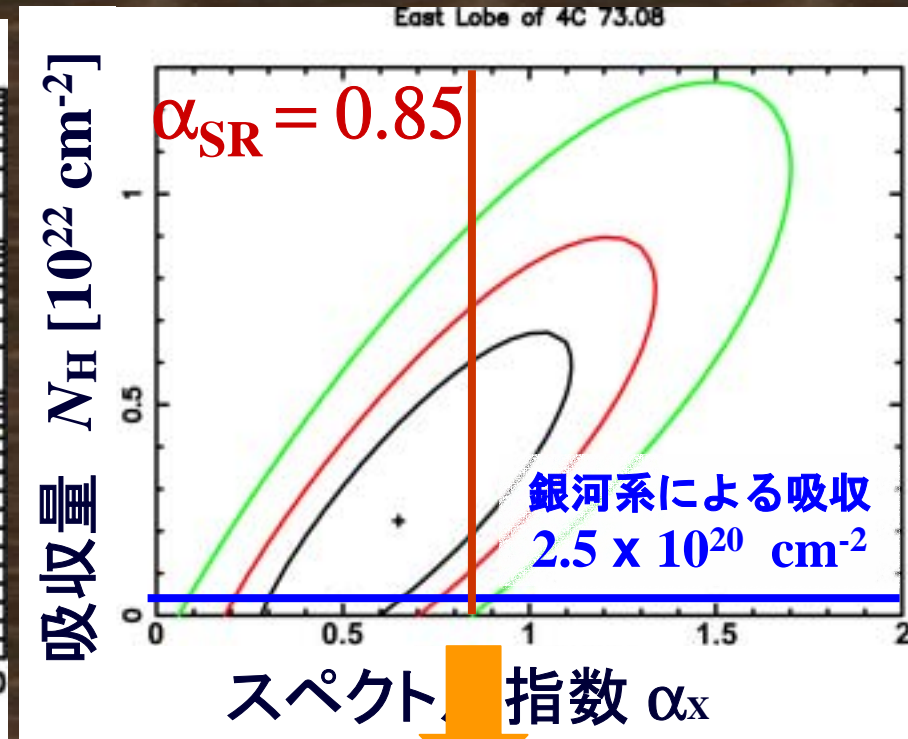
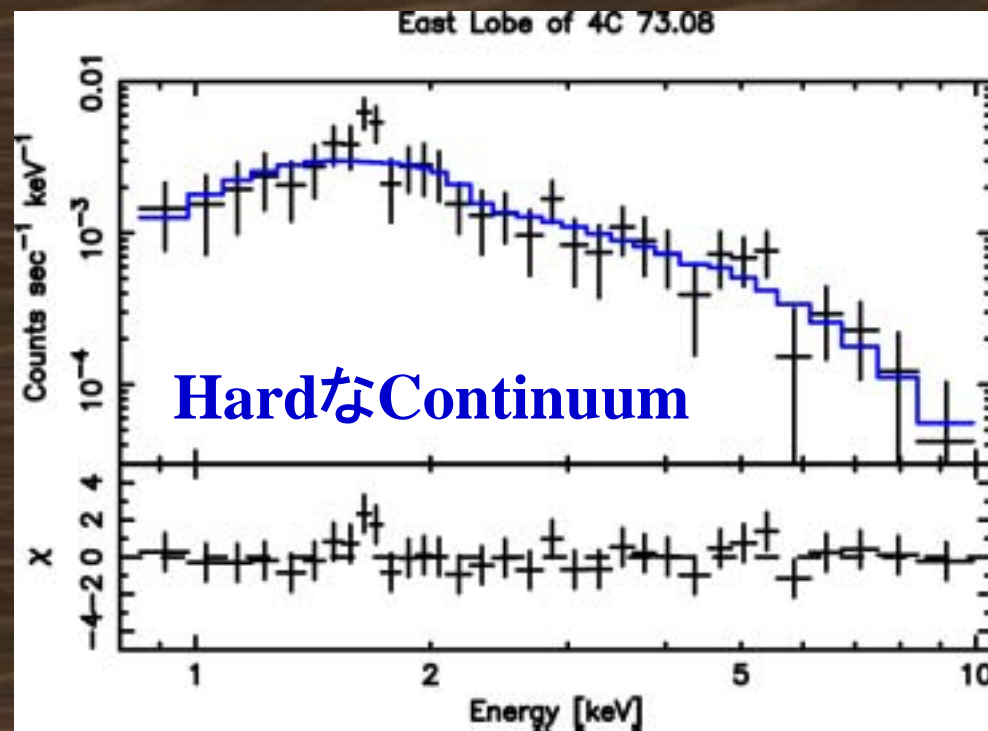
投影



ローブから
広がったX線を検出

「あすか」による結果～4C 73.08～

東ローブのスペクトル



~~熱的制動放射とすると~~

~~$kT > 6$ keV~~

~~$p_e \sim 1 \times 10^{-11}$ dyne cm⁻²~~

Power Lawとすると

$S_X(1 \text{ keV}) = 55^{+45}_{-21}$ nJy

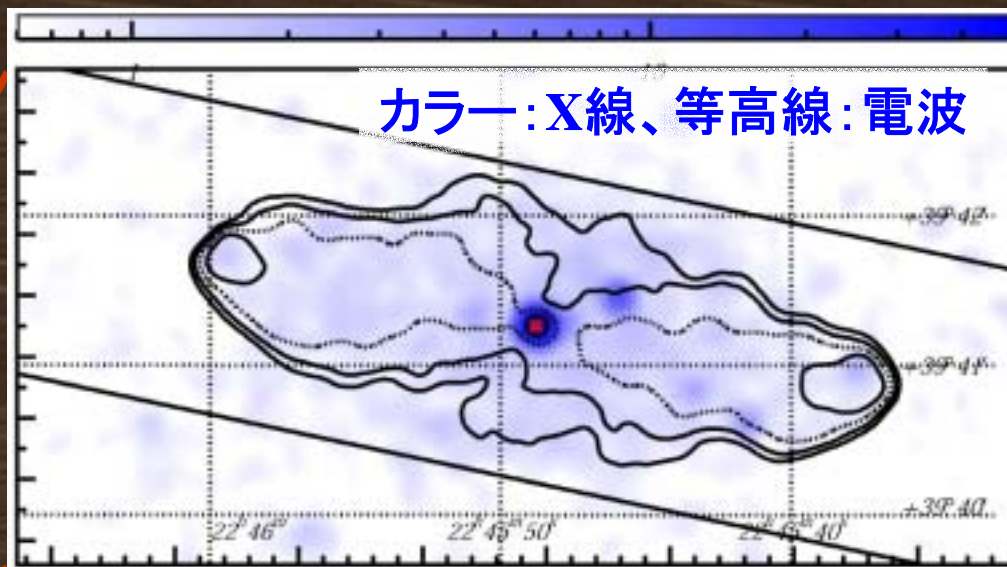
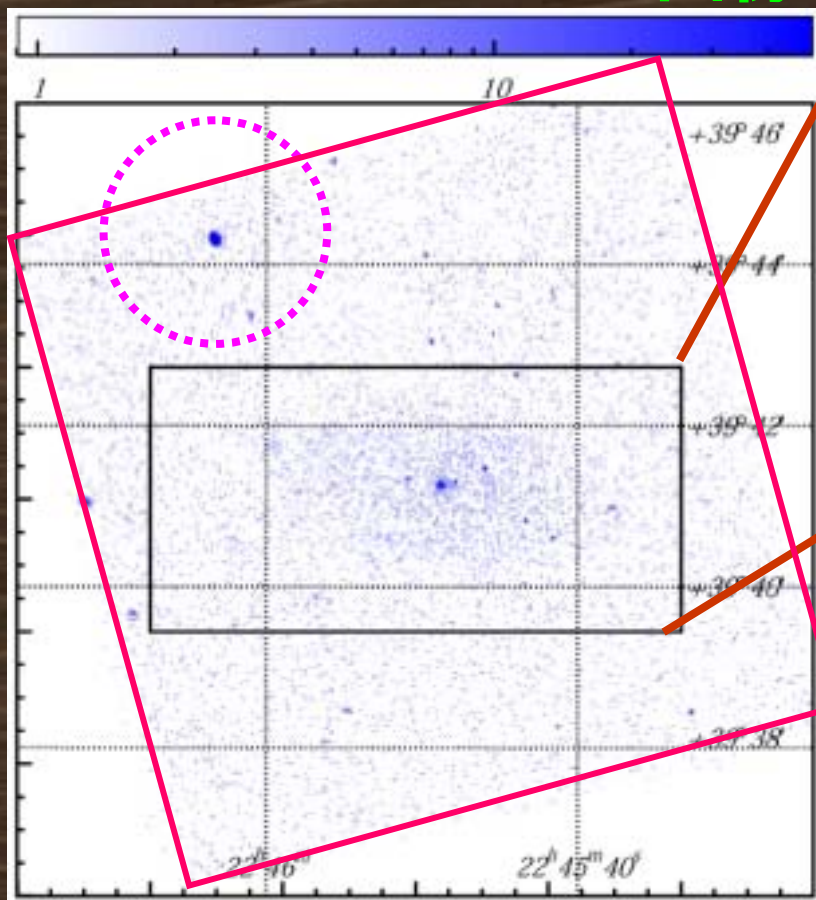
$\alpha_X = 0.65^{+0.5}_{-0.4}$

SR電波の指数 α_{SR} と一致

ローブに付随するX線は
IC X線と考えられる

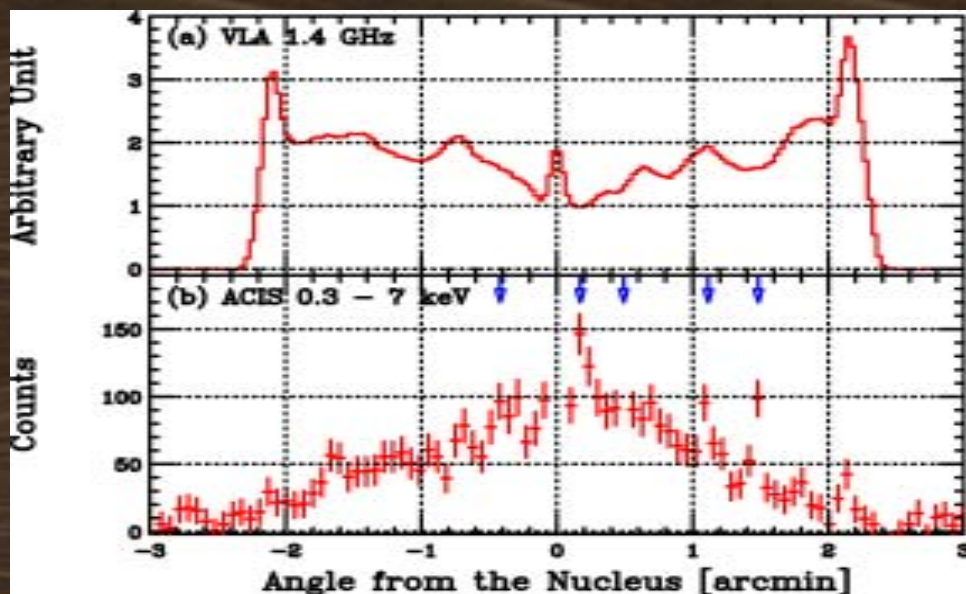
Chandraによる観測結果 ~3C 452~

0.3 - 7 keV のACIS画像



カラー: X線、等高線: 電波

投影

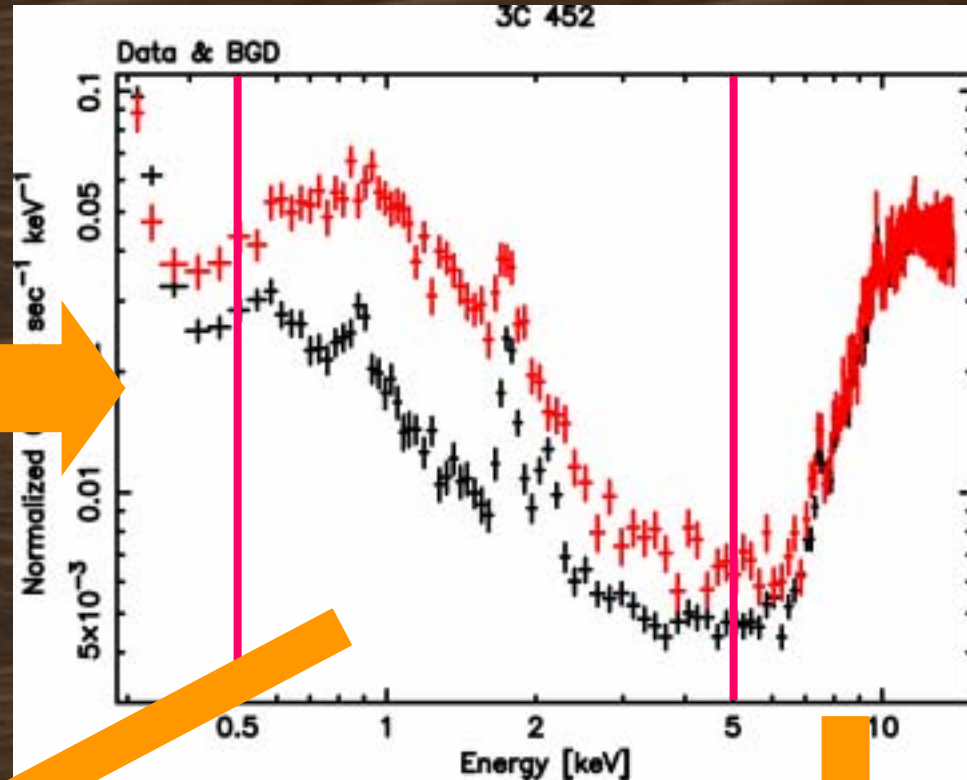
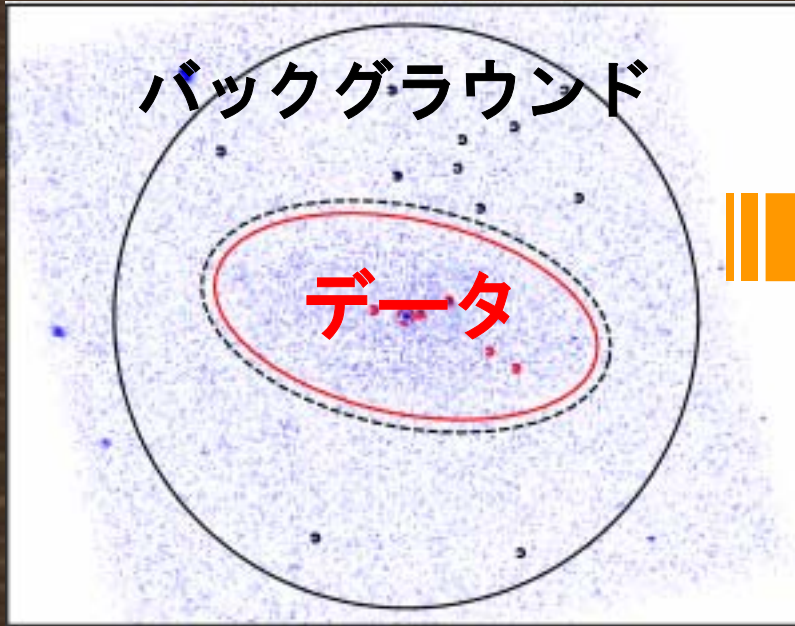


ローブから明らかに
広がったX線を検出

Chandraによる観測結果～3C 452～

注意点：バックグラウンドが高い
(系統誤差～5%)

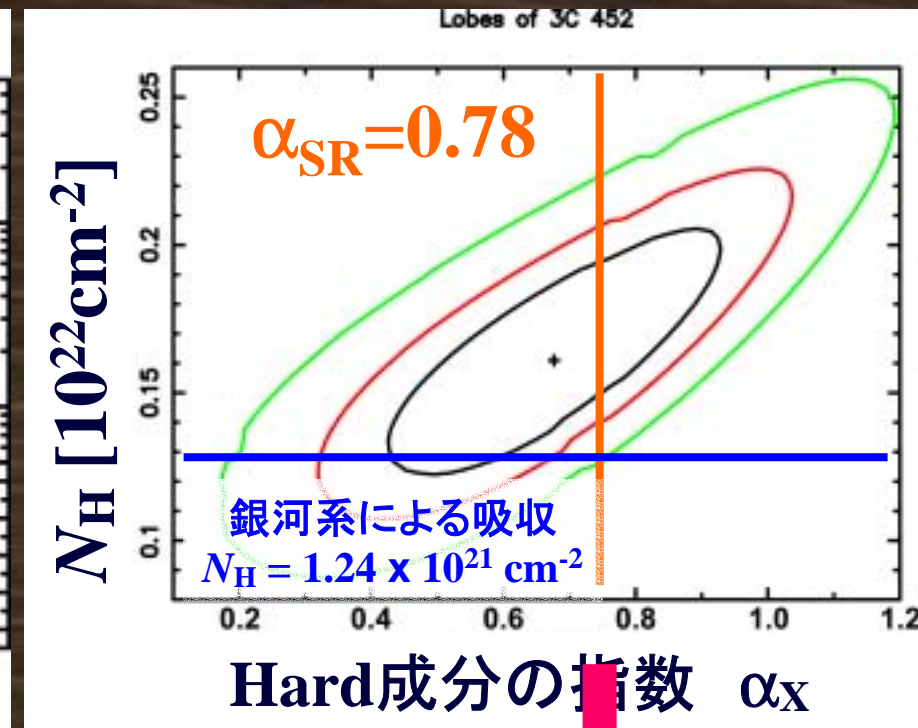
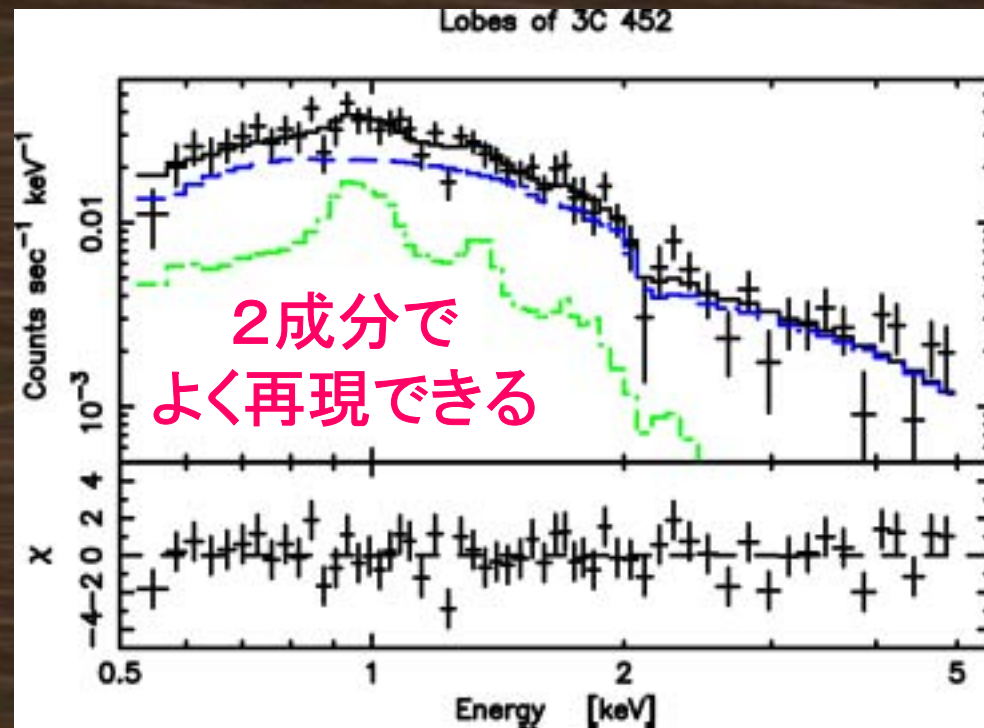
利点：点源を除去できる



0.5 – 5 keV
データ > バックグラウンド
S/N = 38 σ

10 keV 以上
(ほぼすべてがNXB)
データ ~ バックグラウンド

Chandraによる観測結果～3C 452～



Soft成分: $kT \sim 1.4$ keVのRSモデル

Hard成分

~~熱的制動放射とすると $kT > 6$ keV~~

Power Law とすると

$$\alpha_X = 0.68 \pm 0.3 \pm 0.1$$

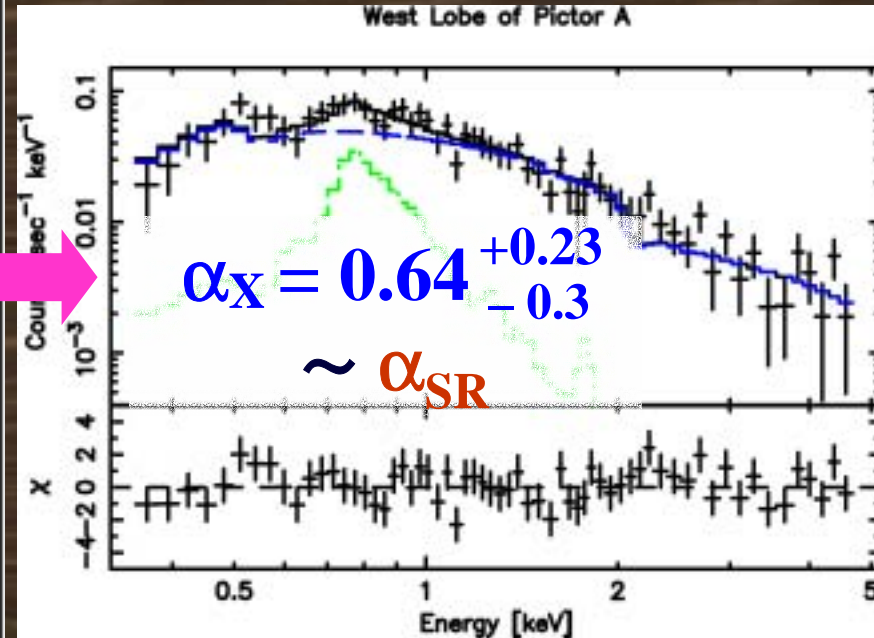
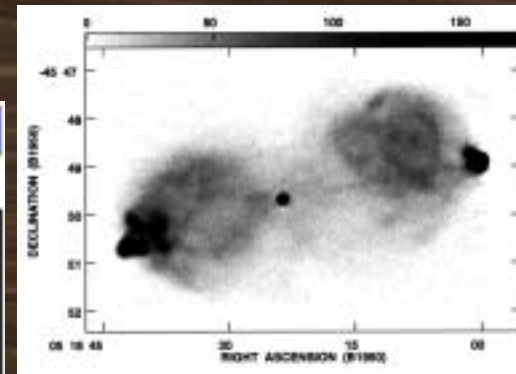
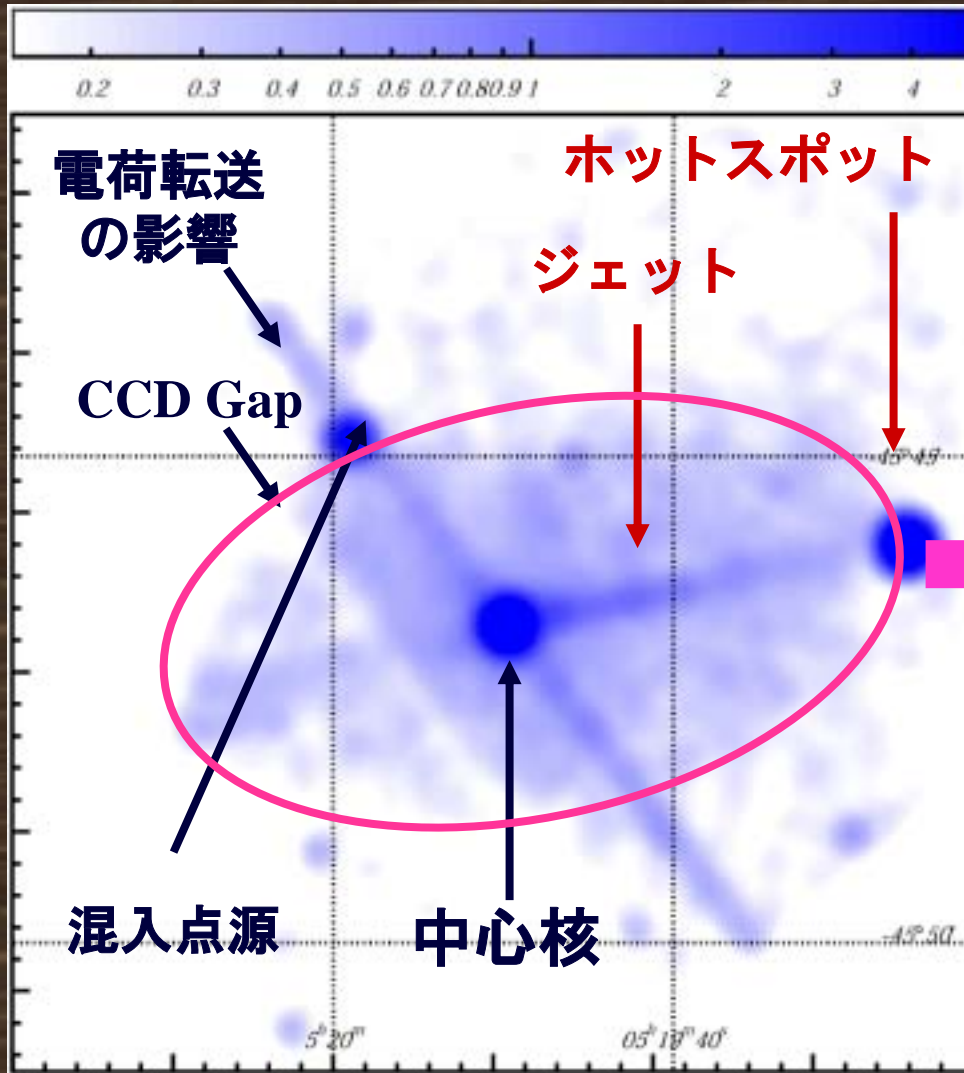
$$S_X(1\text{keV}) = 41 \pm 15 \text{ nJy}$$

SR電波の指数 α_{SR} と一致

ローブに付随したX線は
IC X線と考えられる

Chandraによる結果～Pictor A～

ACIS 画像 (0.3 – 7 keV)

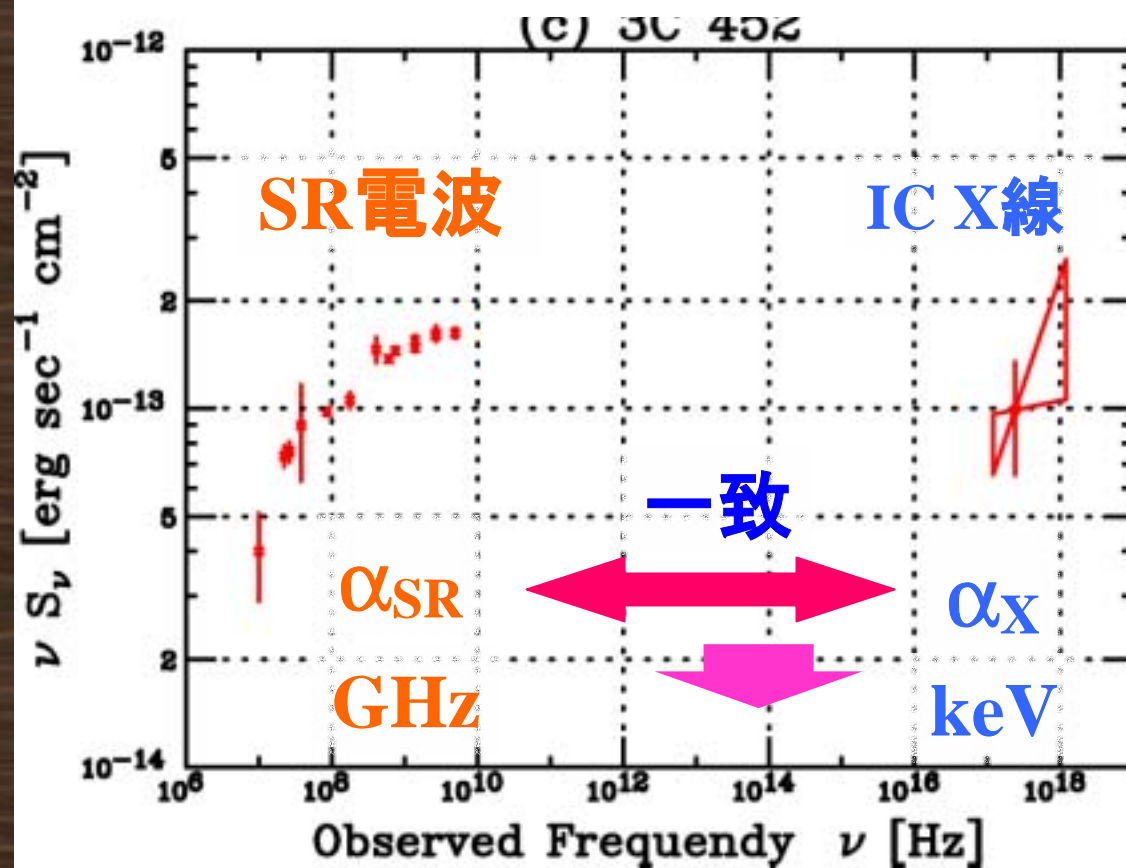


IC X線と考えられる

Wilson et al. (2001) → 広がった成分には気づいていない

他波長スペクトル

3C 452 ロープの多波長スペクトル



假定

- ✓ 電子のスペクトル Single Power Law
- ✓ 電子の指数 $p = 2\alpha_{SR} + 1$
- ✓ $\gamma_e = 10^3 \sim 10^5$
- ✓ 電子、磁場とも一様等方に分布
- ✓ 体積 V は、電波画像から

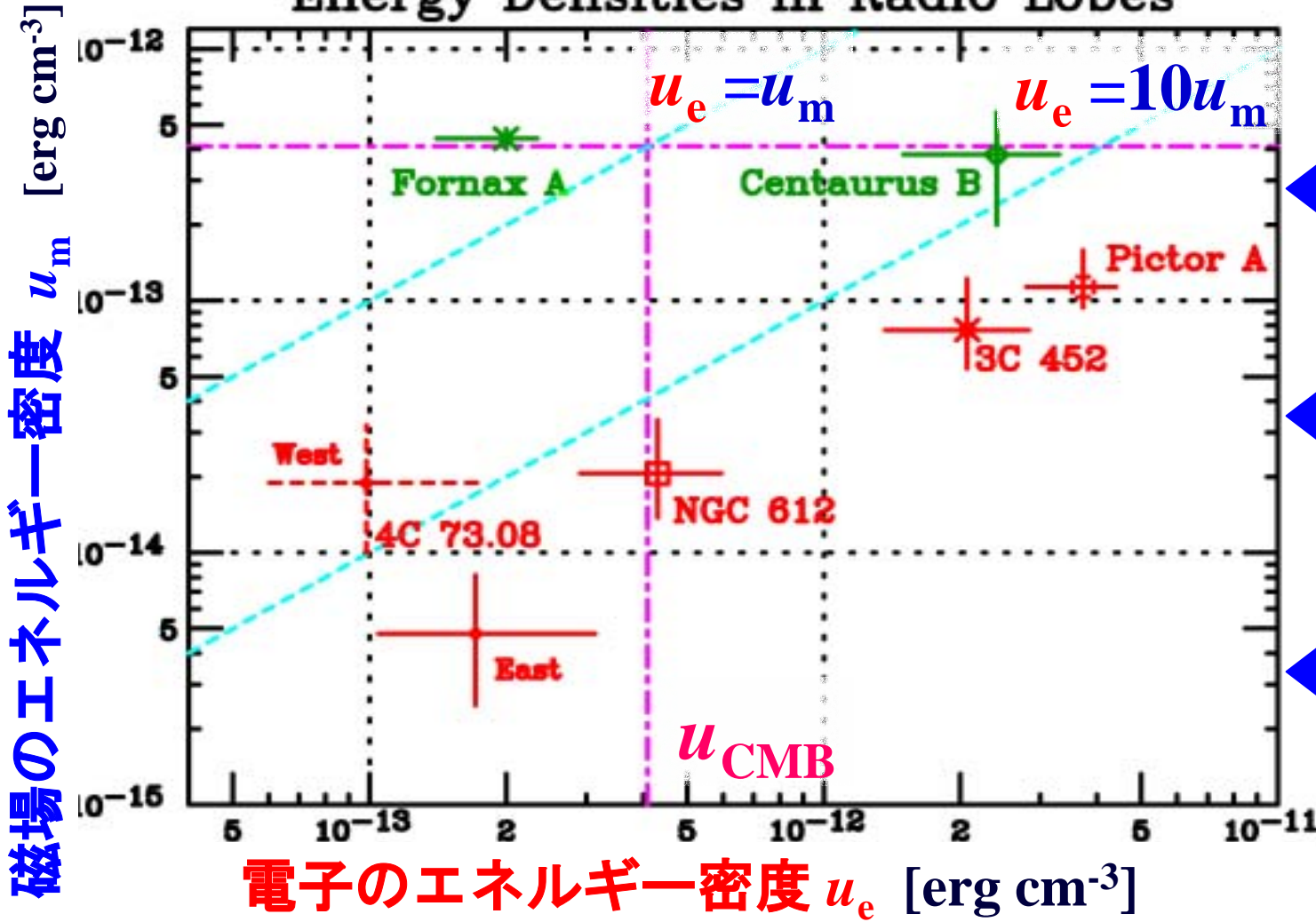
電波 $S_{SR} \propto u_e u_m V$
 X線 $S_{IC} \propto u_e u_{CMB} V$



u_e と u_m

ローブでのエネルギー密度

Energy Densities in Radio Lobes



$B = 3 \mu\text{G}$

$B = 1 \mu\text{G}$

$B = 0.3 \mu\text{G}$

$u_e \gtrsim 10 u_m$

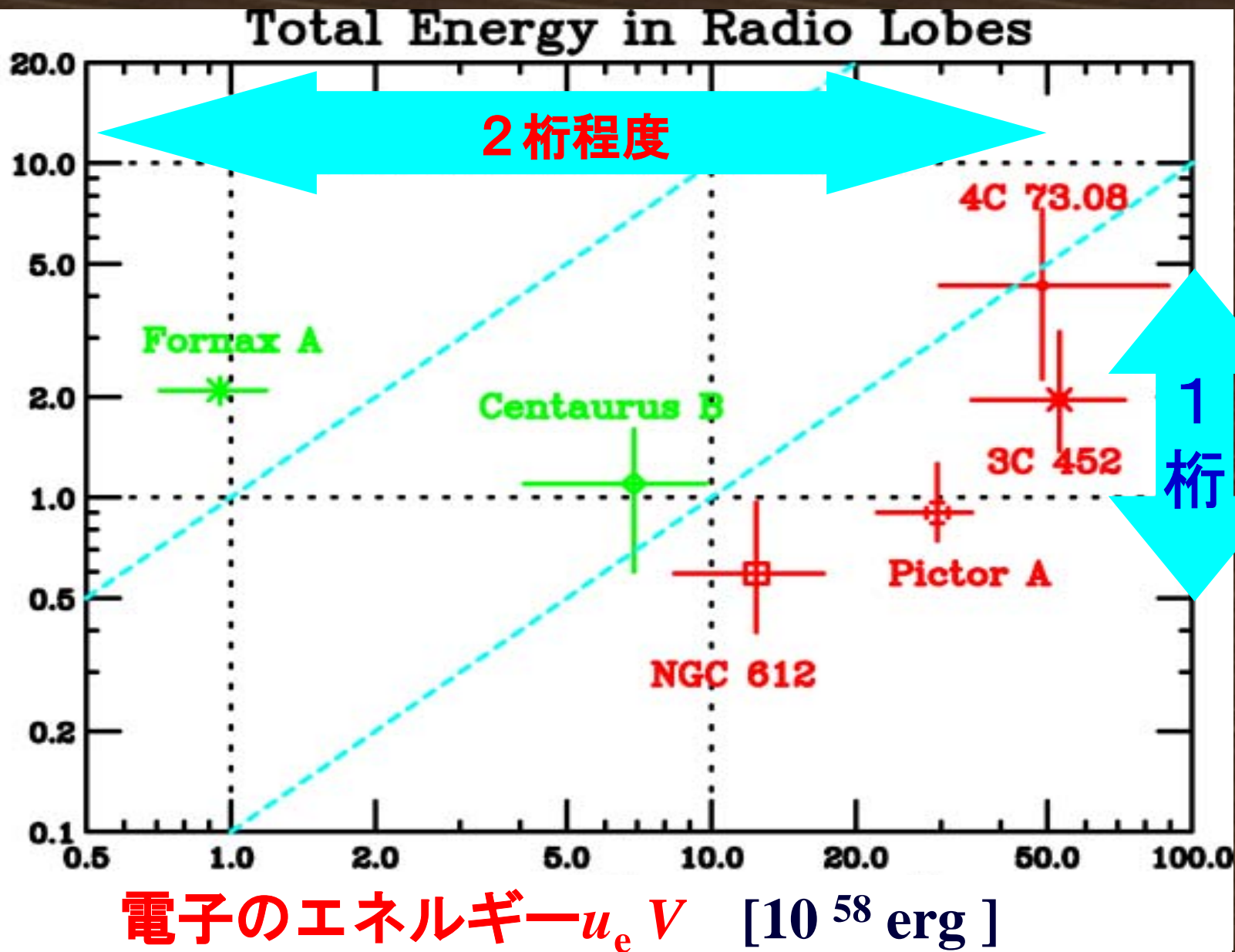
× 等分配
◎ 電子優勢

$u_{CMB} \gtrsim u_m$

電子はIC冷却
で冷えている

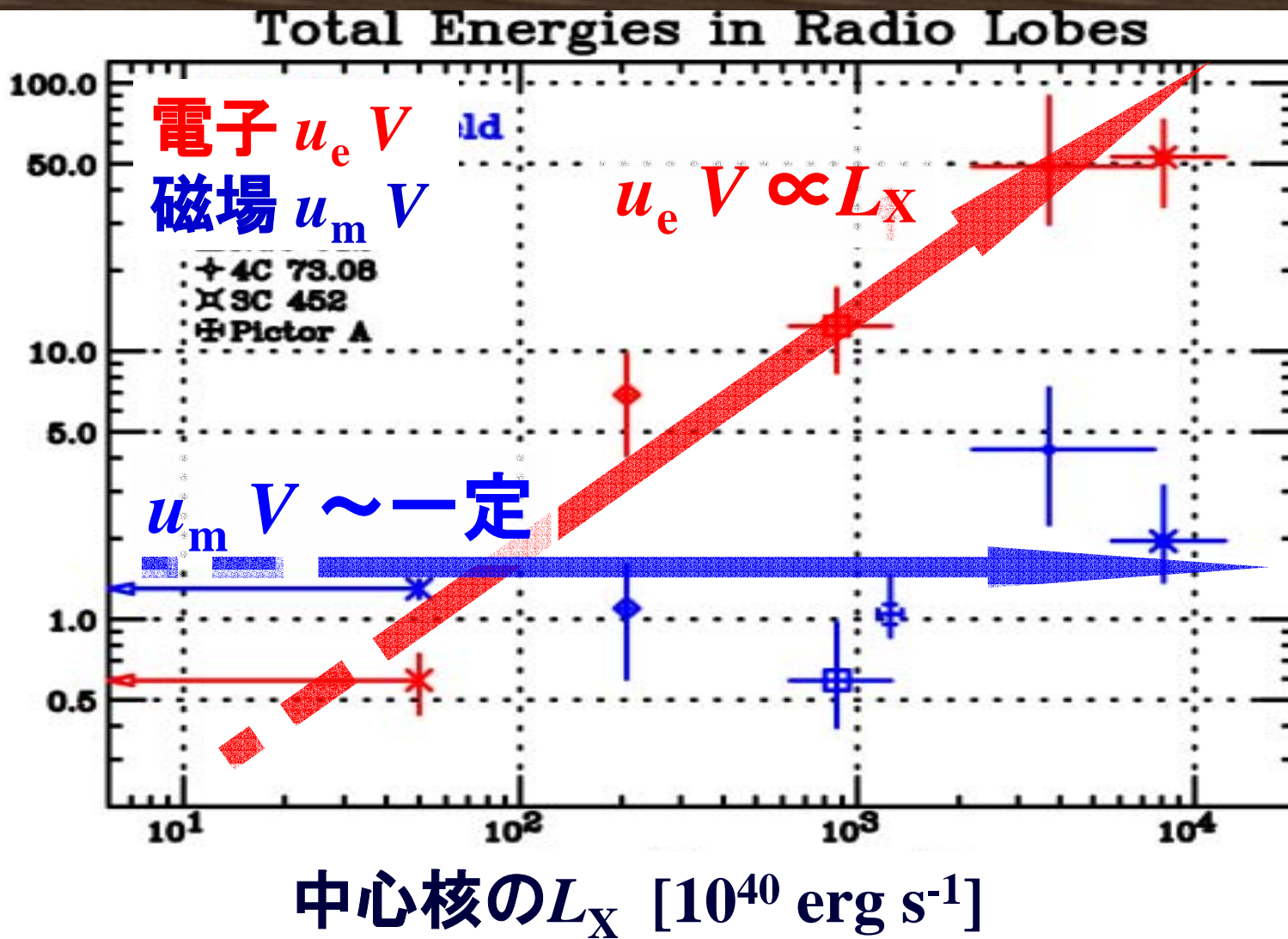
ローブでの全エネルギー

磁場のエネルギー $u_m V$ [10^{58} erg]

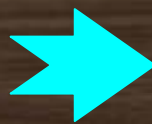


ローブのエネルギーと中心核のX線光度

ローブでの全エネルギー (10^{58} erg)



ジェットは粒子エネルギー
という形でエネルギーを運搬



ジェットの駆動には
粒子が重要？

$u_e V \propto L_X$ はなにを意味するのか？

電子はジェットが供給した

$$u_e V = \int L_{\text{jet}} dt$$

$$\sim L_{\text{jet}} T_{\text{IC}}$$

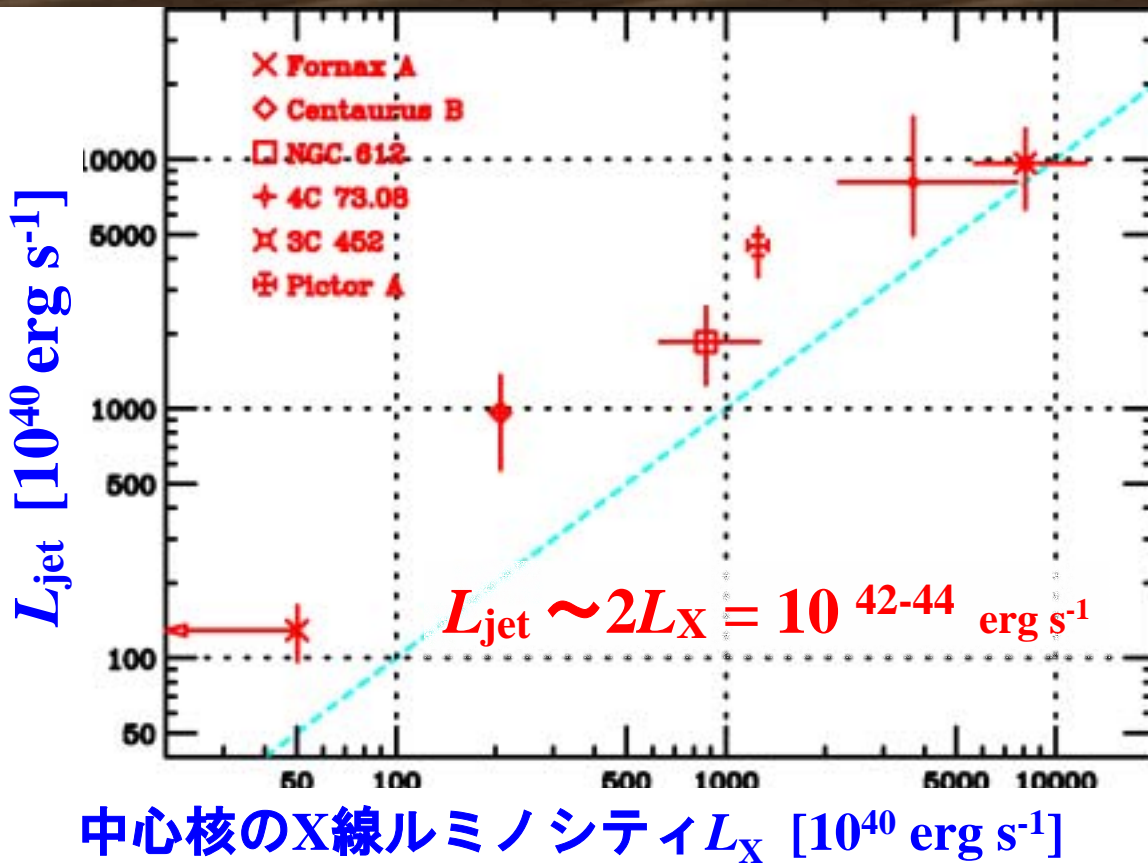
↑
ジェットの
Kinetic Power

IC冷却の時間

$$T_{\text{IC}} = \frac{3m_e c \gamma^1}{4 \sigma_T u_{\text{CMB}}}$$

$$\sim 2 \times 10^8 \text{年}$$

たぶん中心核は
質量降着で光る
 $L_X \propto$ 質量降着率



- ジェットのエネルギー源は質量降着である。
- 中心核の L_X からジェットのパワーがだいたいわかる
- 中心核の活動は T_{IC} 程度の間では、それほど変動しない

$u_m V \sim$ 一定は何を意味するか？

Jet は中心核の活動に比例した磁束 BS をローブに供給していると仮定すると... $BS \sim BV^{2/3} \propto L_X T_B$

$u_m V \propto B^{-1} V \propto L_X^{-2} V^{-1/3} T_B^2$

L_X に強く依存するはず？

ジェットは磁場を有効に供給していない？

粒子駆動？

$u_e V \propto L_X$

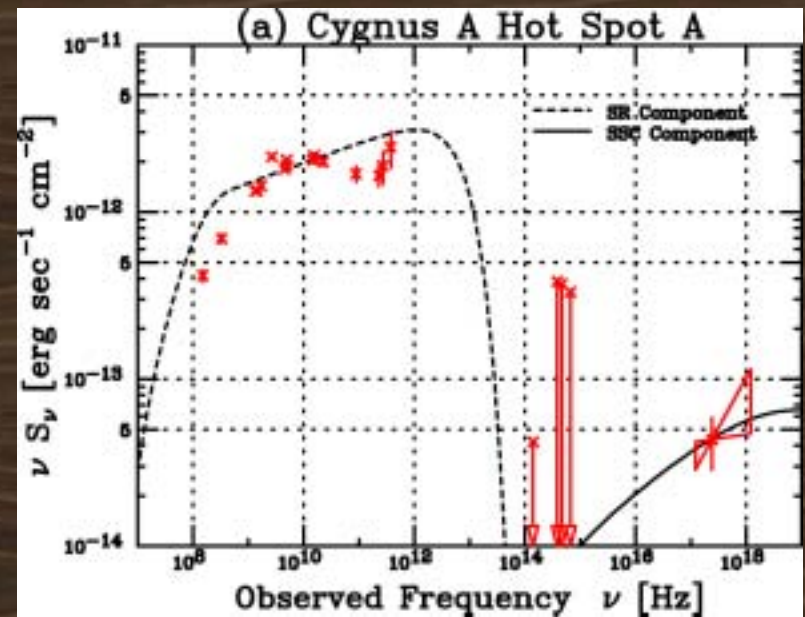
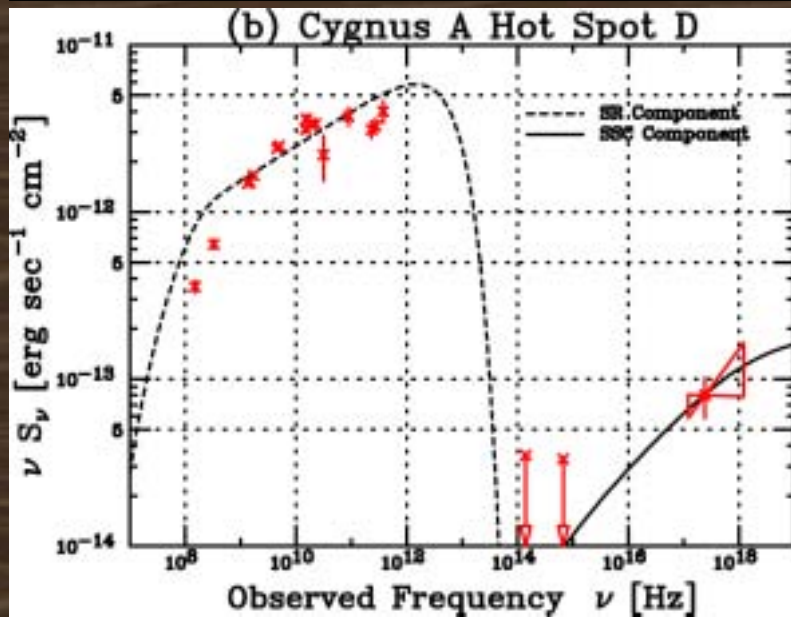
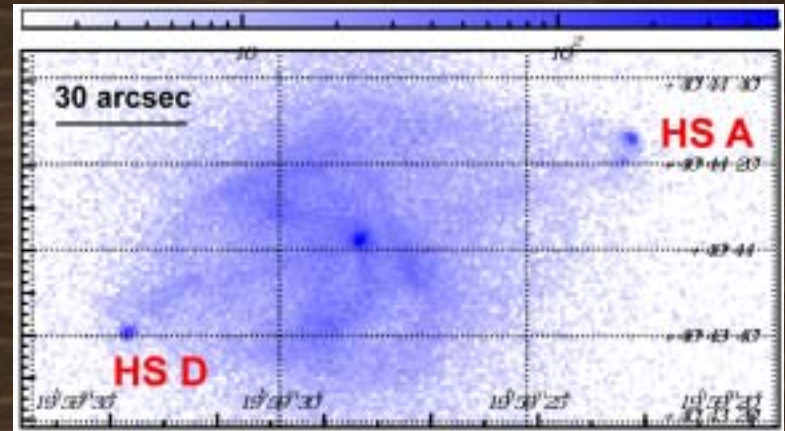
あるいは... $T_B \propto L_X^{1/6} \propto u_e^{-1} V^{-5/6}$

という時間スケールで磁場が消滅？

たとえば

ローブで **Reconnection** が盛んに起こっている??

Chandra によるホットスポットの観測結果



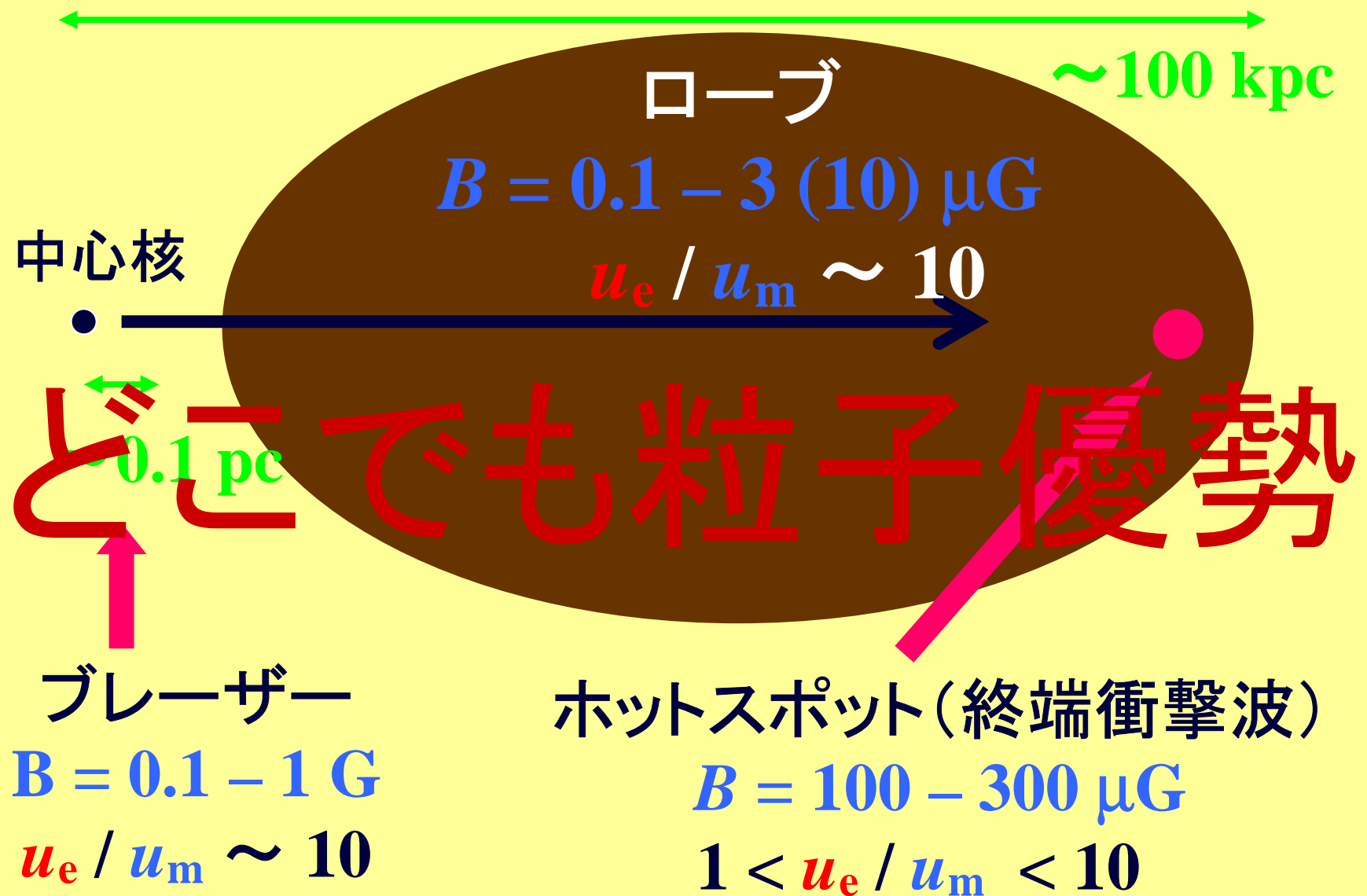
$$B = 150 \mu\text{G}$$

$$u_e / u_m = 2.1 - 4.8$$

$$B = 160 \mu\text{G}$$

$$u_e / u_m = 1.2 - 4.4$$

Jetに関連するEnergetics



まとめと結論

- 「あすか」、*Chandra*を駆使して、**IC X線**を検出することで、電波銀河のローブにおける**Energetics**を系統的に調査。

$$B = 0.1 - 3 (10) \mu\text{G}$$

$$u_e / u_m \sim 10 : \text{粒子優勢}$$

- ローブ中の**電子**の全エネルギーは中心核のX線光度に比例しているが、**磁場**の全エネルギーはほぼ一定であることを発見した。ジェットのエネルギー源が質量降着であると考えれば、**電子**エネルギーの振る舞いは自然である。

$$u_e V \propto L_X, \quad u_e V \sim \text{一定}$$

- **IC X線**と**SR電波**の表面輝度分布から、ローブ中の**電子**は比較的一様であるのに対して、**磁場**は**周囲**に向かって強まる傾向にあることが明らかになった

今後の課題

$u_e > 10 u_m$ { どうやって電子を閉じ込めるのか？
ジェットは粒子駆動なのか？

$\gamma_e < 10^3$ の電子のスペクトルはどうなっているか？
より低エネルギーのIC X線、IC可視光

粒子と磁場の 磁場のFilling 因子 f

詳しい空間分布はどうなっているか。

正電荷をもつ粒子は何か 陽子 or 陽電子

Chandra, Newton で決着をつけたい

Chandra : 3C427.1 (観測済), 3C 438 (Cycle4で採択)

Newton : Centaurus B (観測済), Fornax A, ほか2天体

ほとんどが未観測. . . 1天体をAO 2で提案中

現在、*Chandra, Newton* の公開データを探索中