

Studio dei lobi in banda X della radiogalassia Pictor A

Giulia Migliori

Dipartimento di Astronomia, Università di Bologna
INAF / IASF - Bologna

Paola Grandi, Giorgio Palumbo

INAF/IASF –Bologna, Università' di Bologna

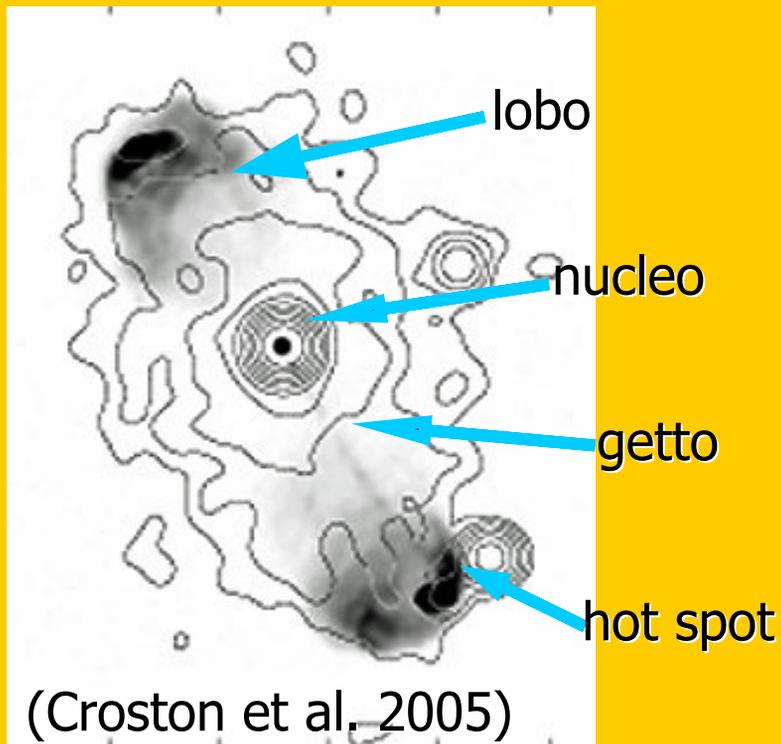
&

C. Stanghellini, G. Brunetti

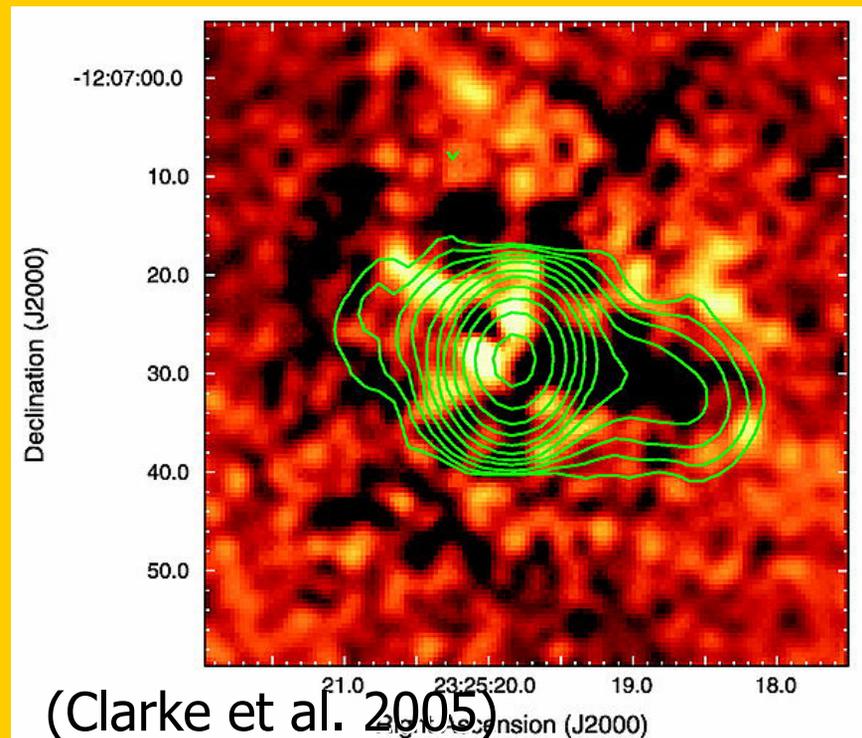
INAF/IRA - Bologna

Chandra & XMM-Newton: le nuove possibilità

- Studi X spazialmente risolti degli AGN radio loud:



- Studi sui cluster: cooling flows & radio bubbles:

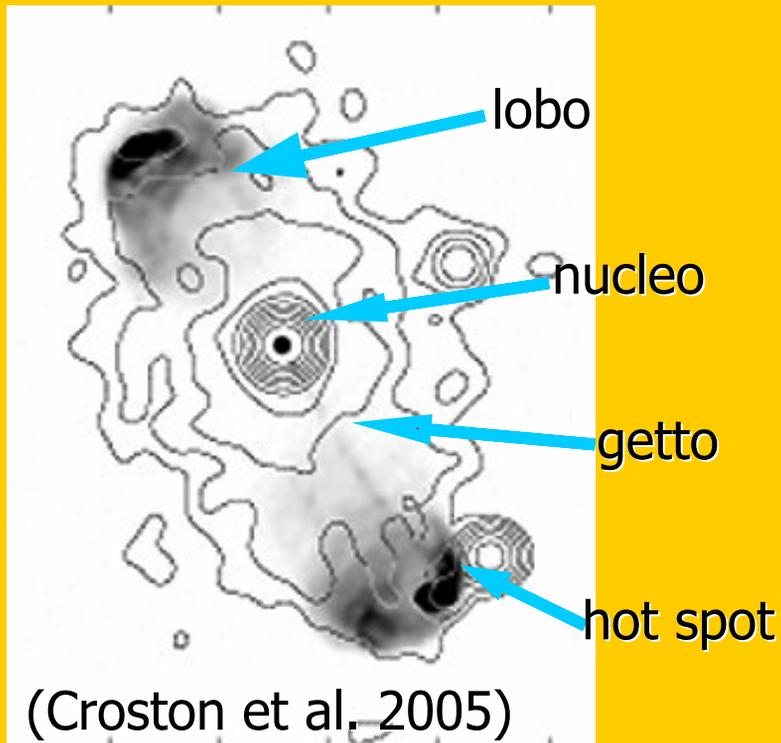


AGN radio-loud: i progressi con Chandra e XMM-Newton

- Studi X spazialmente risolti degli AGN radio loud:



La figura standard (De Young 2002):



- Il jet relativistico viene decelerato nella hot spot.
- Parte dell'energia viene convertita in elettroni relativistici e parte in campo magnetico.
- Il plasma shockato muove indietro (backflow) e, con espansione quasi adiabatica, forma i lobi.

Il ruolo dei lobi

Modello semplice ma...fisica ancora poco chiara!

Alcuni dei problemi aperti:

- dinamica jet di larga scala
- processi nelle hot spot
- distribuzione delle particelle nei lobi



L'importanza dei lobi: dall'energetica dei lobi otteniamo informazioni sull'energia integrata incanalata dal nucleo attivo nel jet.

Il modello standard per radio galassie FR II

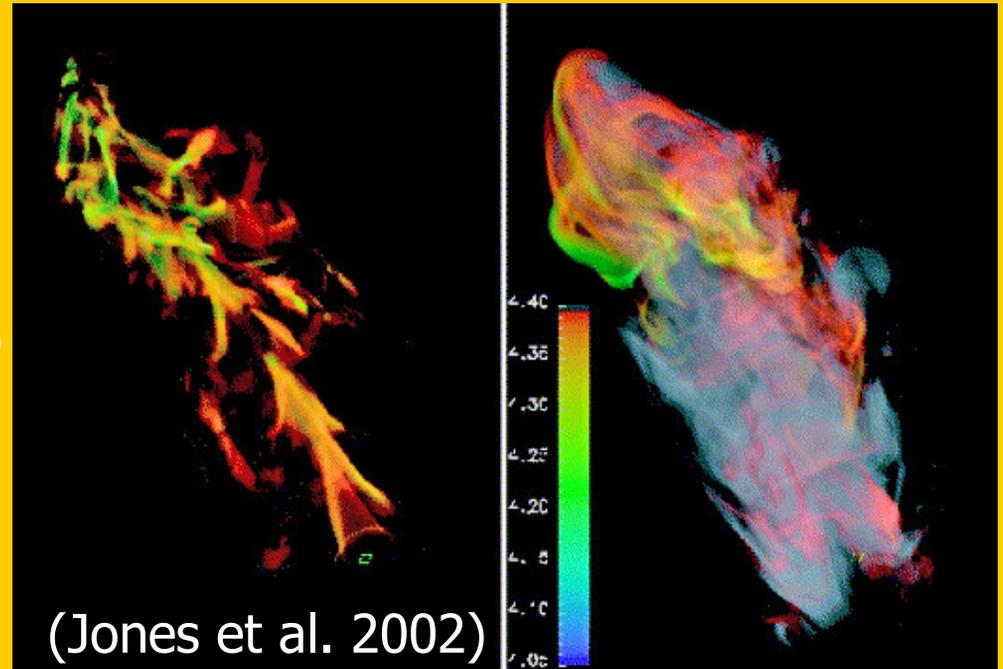
- Il jet relativistico viene decelerato nella hot spot.
- Parte dell'energia viene convertita in elettroni relativistici e parte in campo magnetico.
- Il plasma shockato muove indietro (backflow) e, con espansione quasi adiabatica, forma i lobi.



L'importanza dei lobi: dall'energetica dei lobi otteniamo informazioni sull'energia integrata incanalata dal nucleo attivo nel jet.

Il modello standard per radio galassie FR II

- Il jet relativistico viene decelerato nella hot spot.
- Parte dell'energia viene convertita in elettroni relativistici e parte in campo magnetico.
- Il plasma shockato muove indietro (backflow) e, con espansione quasi adiabatica, forma i lobi.



L'importanza dei lobi: dall'energetica dei lobi otteniamo informazioni sull'energia integrata incanalata dal nucleo attivo nel jet.

I lobi: l'emissione X

Possibili origini emissione X estesa



misura diretta del campo magnetico e del contenuto in particelle.

Campi magnetici e particelle:

Dalla teoria:

- ✓ campi magnetici con il metodo di Compton inverso:

$$B_{IC} \propto \frac{F_{\sin}}{F_{IC}}$$

- ✓ Indipendentemente: k_e (densità particelle)

$$L_{\sin} = V k_e C_{\sin} B^{\frac{p+1}{2}} \nu^{\frac{-(p-1)}{2}}$$

- ✓ Conseguentemente: $\frac{\omega_B}{\omega_{e+p}} = \frac{\omega_{e+p}}{\omega_B}$
(densità energetiche B, e+p)

I lobi: l'emissione X

Possibili cause dell'emissione X:

principalmente:

- Compton inverso degli e^- di sincrotrone sui fotoni della CMB (emissione non termica): da cui..

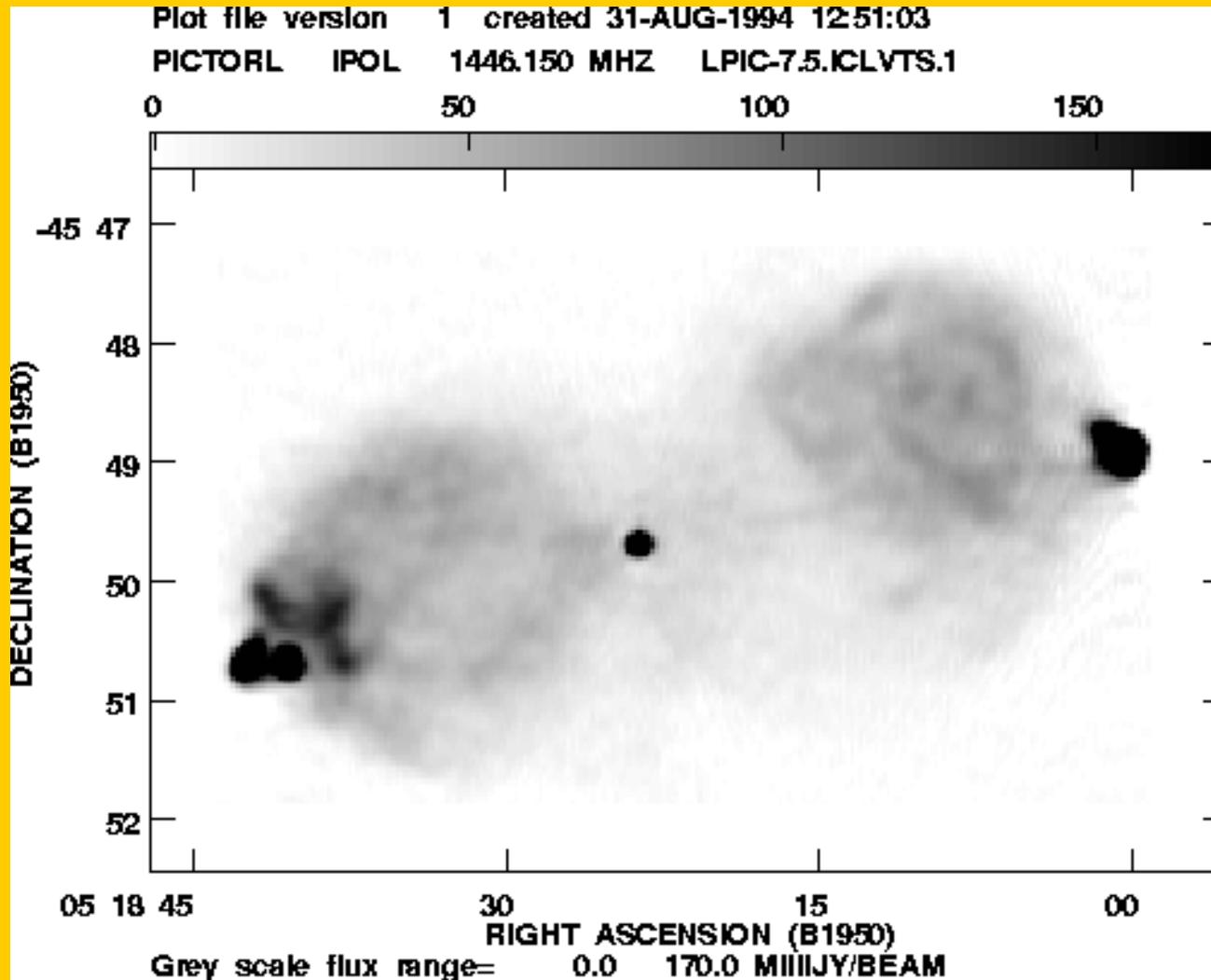


..misura diretta del campo magnetico e del contenuto in particelle.

ma anche:

- gas esterno shockato nell'espansione dei lobi (emissione termica)

Il caso di Pictor A



Pictor A :

- $z=0.035$
- FR II
- BLRG
- Osservazioni radio (Perley et al. 1997)

Importanza osservazioni X spazialmente risolte

Due fondamentali processi di emissione nei lobi:

- ✓ Sincrotrone: responsabile dell'emissione radio:

$$L_{\text{sin}} = V k_e C_{\text{sin}} B^{\frac{p+1}{2}} \nu^{\frac{p-1}{2}}$$

- ✓ Compton inverso:

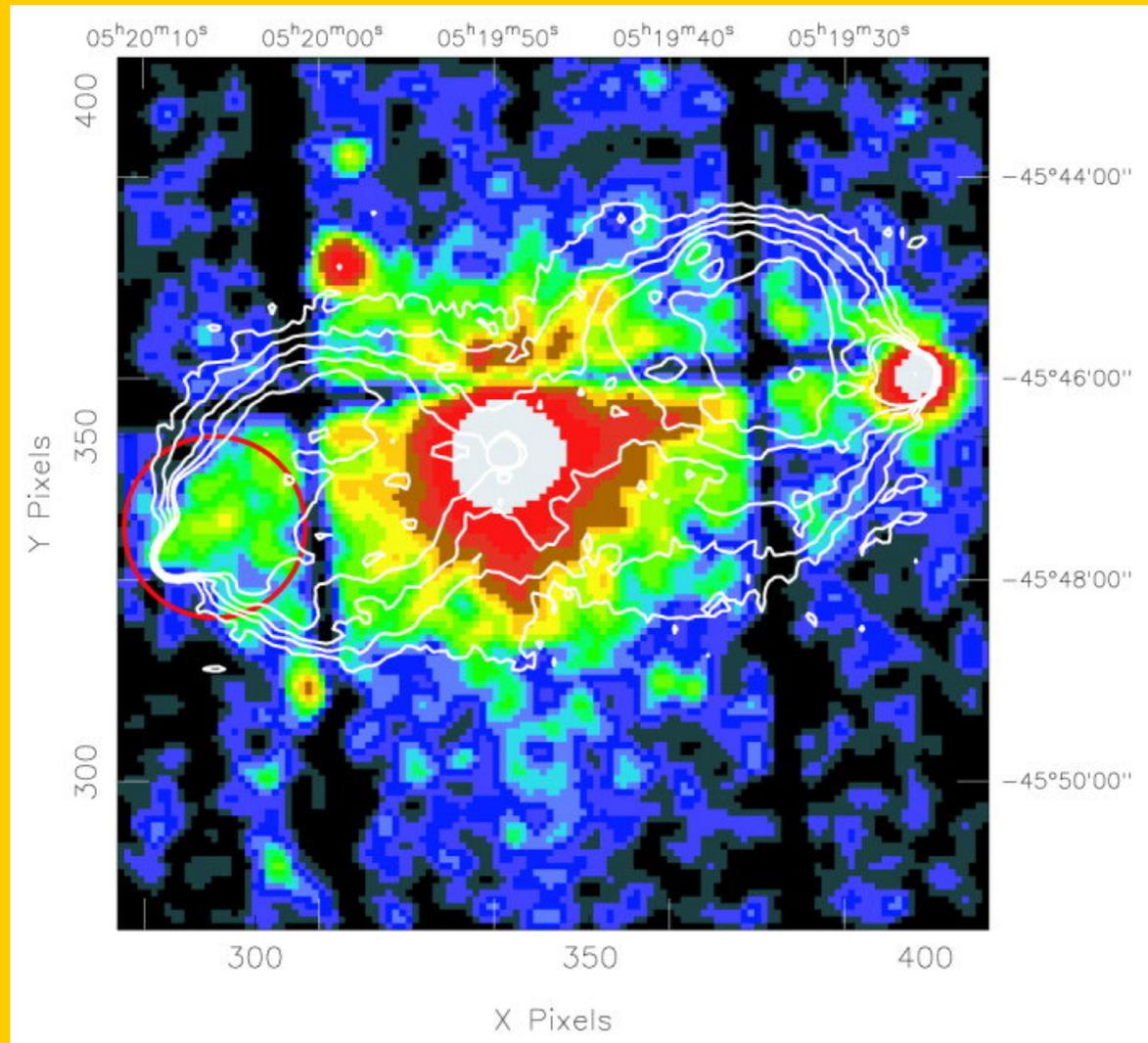
1. SSC
2. IC CMB
3. IC QSO

Pictor A: l'osservazione XMM-Newton del Marzo 2001:

Scoperta emissione X estesa (Grandi et al. 2003)

Studio del lobo est due i quesiti aperti:

1. termico vs non termico
2. Possibile violazione dell'equipartizione



Modello non termico favorito ($\alpha_X \sim \alpha_{\text{radio}}$)



Il processo responsabile dell'emissione X
è IC sui fotoni della CMB

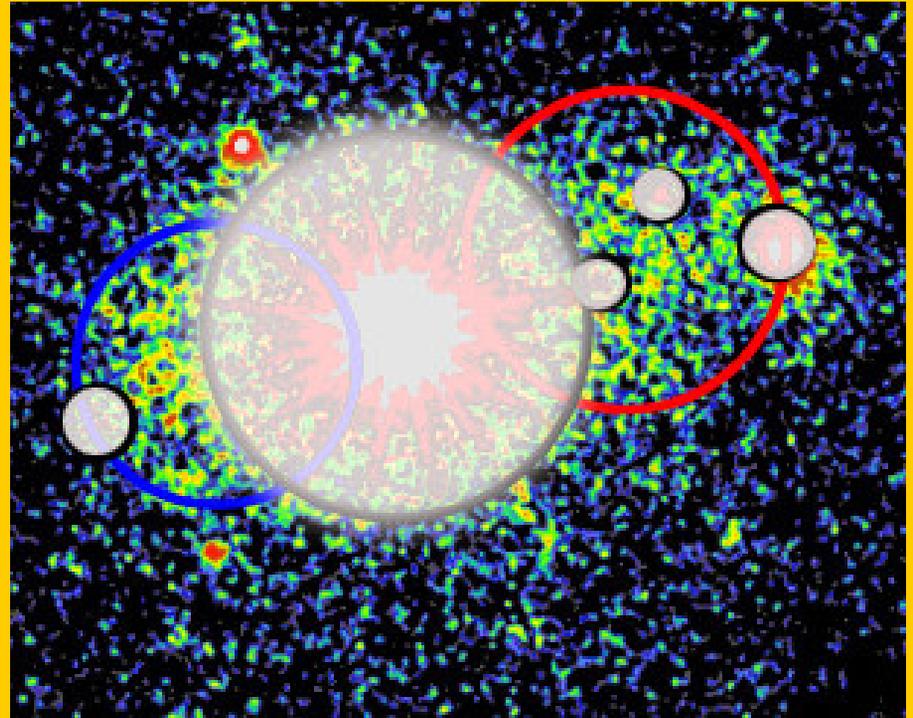


Il calcolo del campo magnetico utilizzando il
metodo di Compton inverso ha rivelato una
violazione delle condizioni di equipartizione

Pictor A:
osservazione XMM-Newton 14 Gennaio 2005

Puntamento ottimale
per l'osservazione dei
lobi:

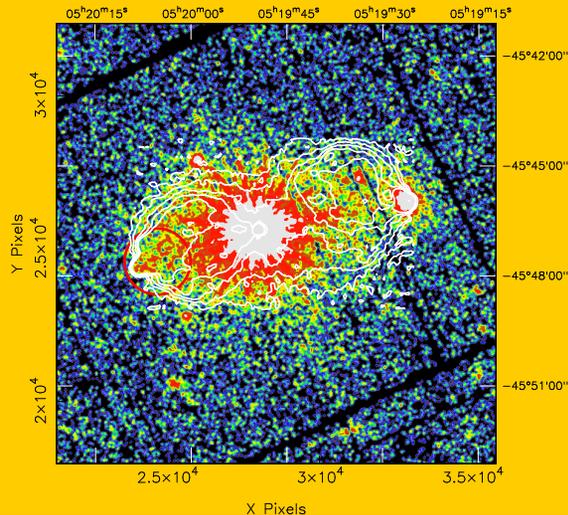
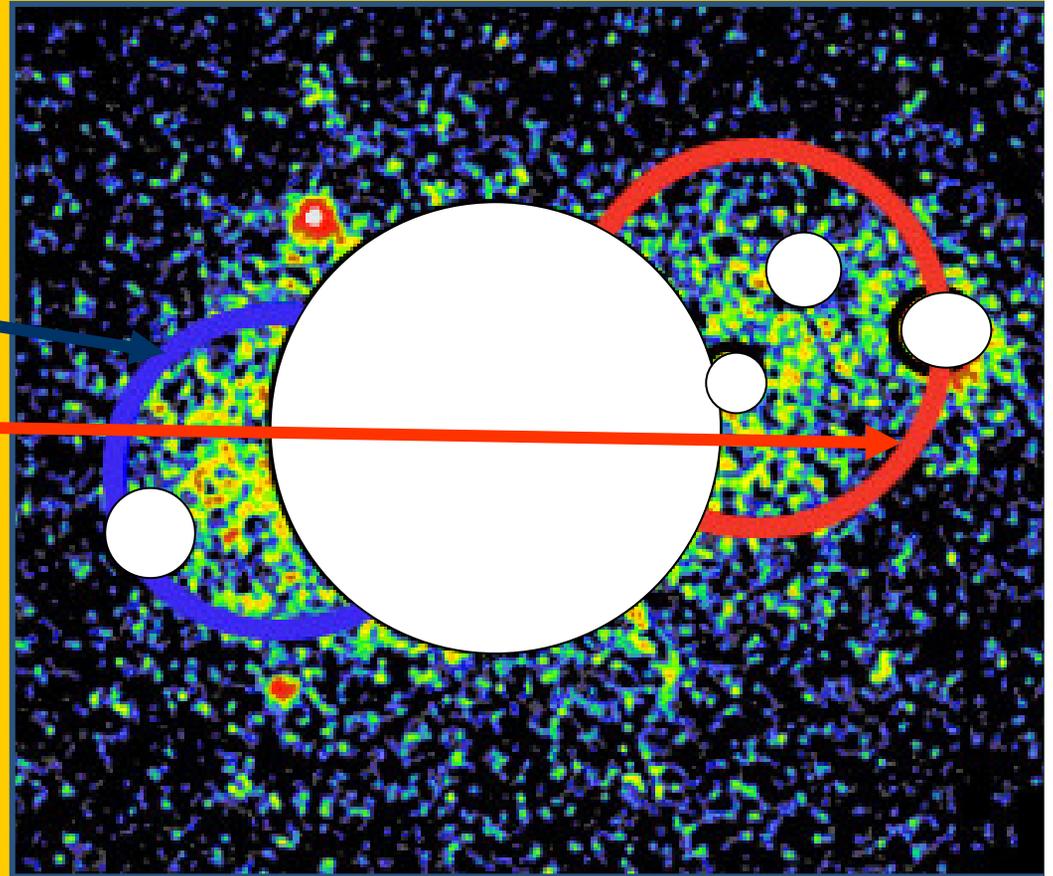
- ✓ Durata= 50 ks
- ✓ Centramento ottimale
- ✓ MOS1 e pn in regime di Full Window



Pictor A: l'osservazione XMM-Newton 14 Gennaio 2005

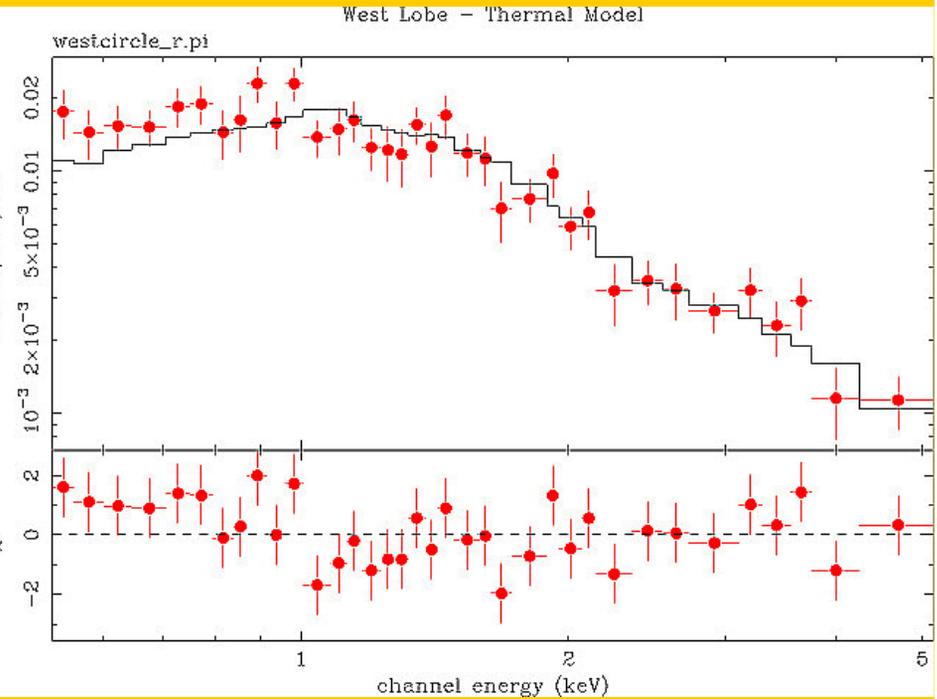
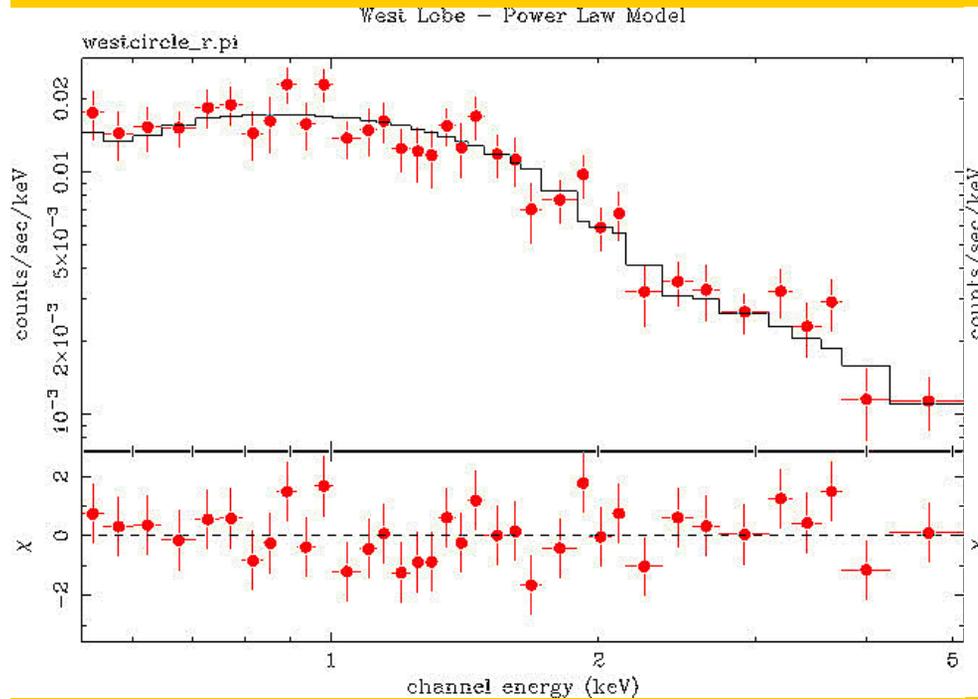
Selezione regioni di studio:

- Lobo est (regione E)
- Lobo ovest (regione W)



→ Ottima coincidenza spaziale emissione radio-X

Spettri X: Lobo ovest



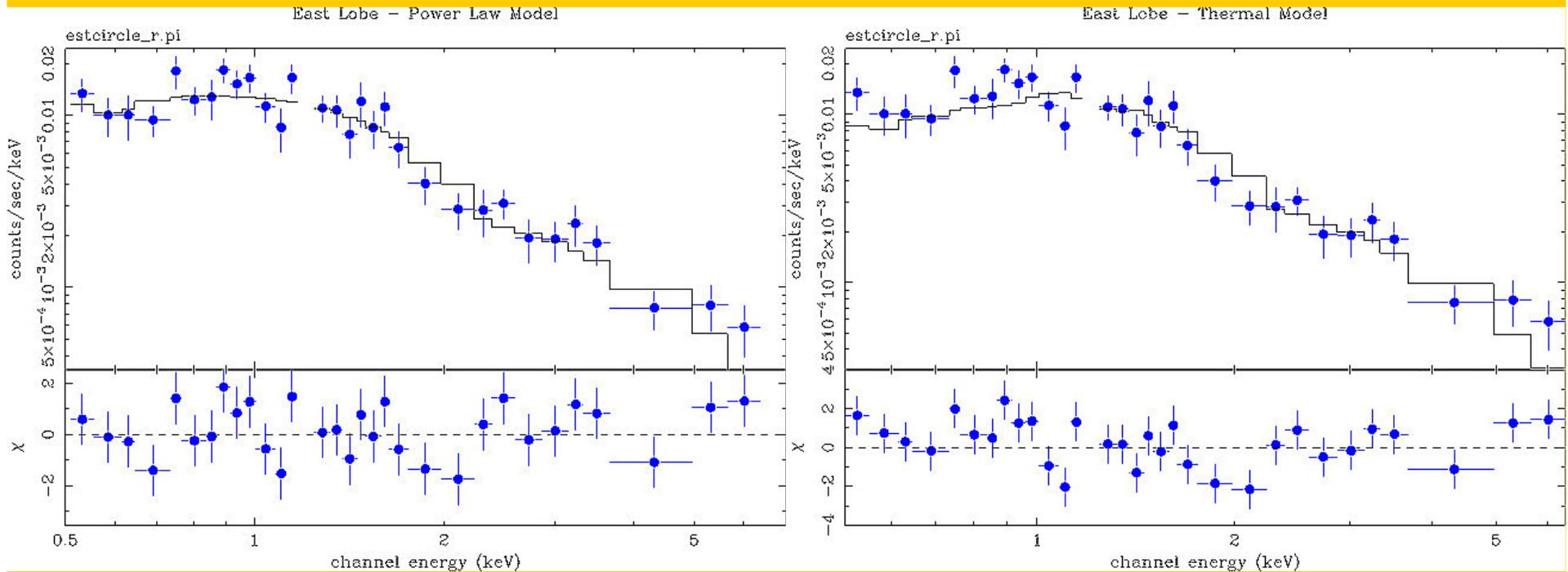
Legge di potenza:

- $\alpha_x = 0.7 \pm 0.2$
- $F_{2-10\text{keV}} = (2.1 \pm 0.2) * 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $F_{0.5-2\text{keV}} = (1.2 \pm 0.1) * 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $\chi^2/\text{d.o.f.} = 29/38$

Modello termico:

- $kT = 5 \pm 2 \text{ keV}$
- $F_{2-10\text{keV}} = (2.0 \pm 0.2) * 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $F_{0.5-2\text{keV}} = (1.2 \pm 0.1) * 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $\chi^2/\text{d.o.f.} = 39/38$

Lobo est: termico vs non termico



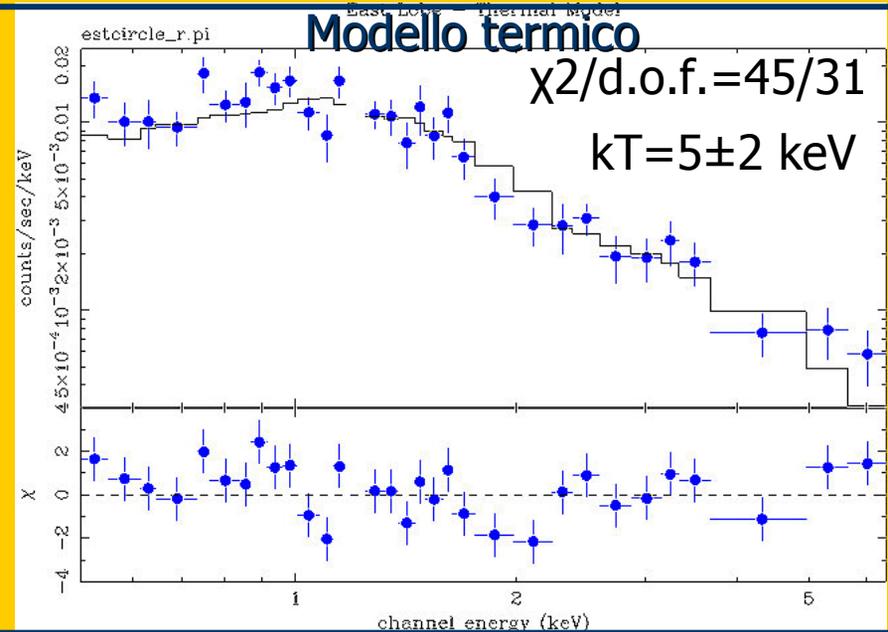
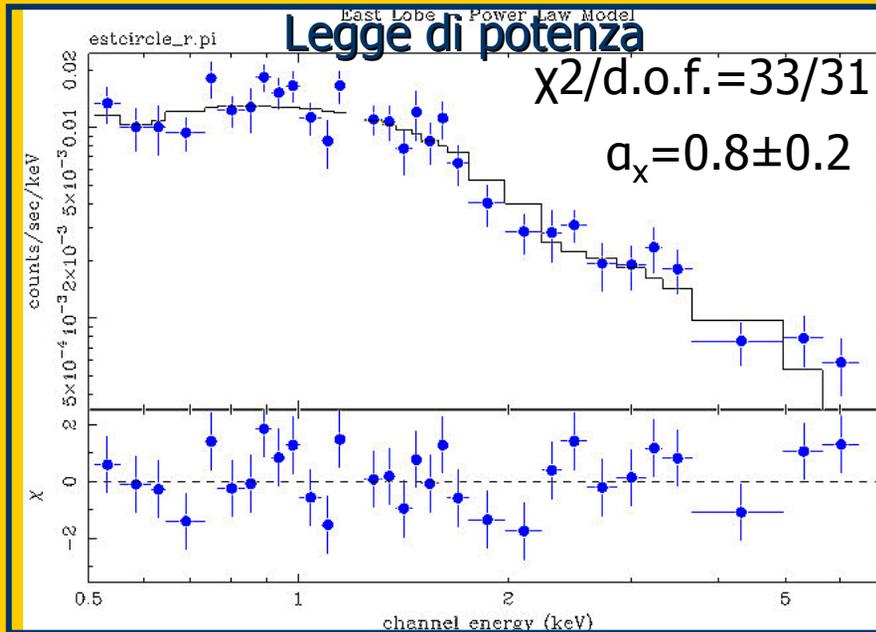
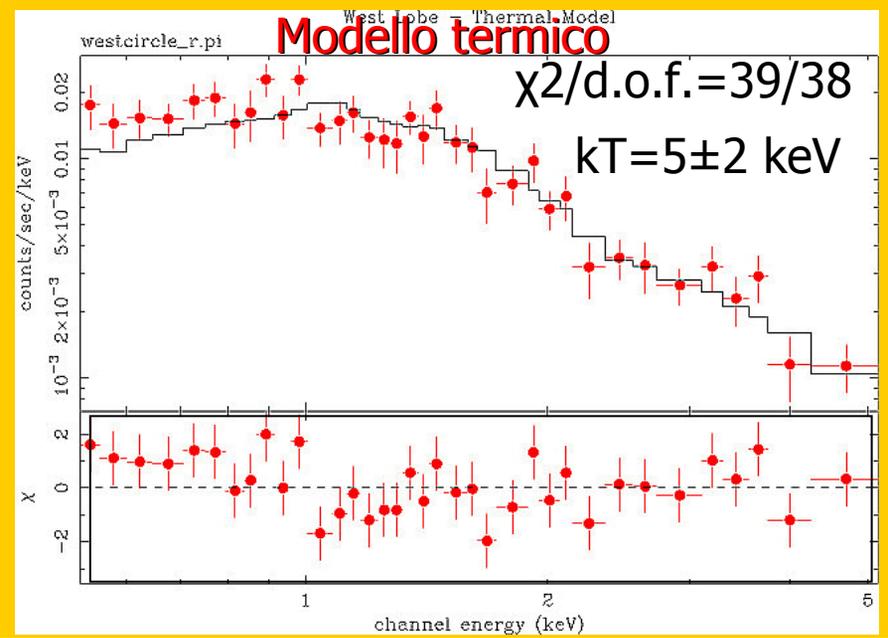
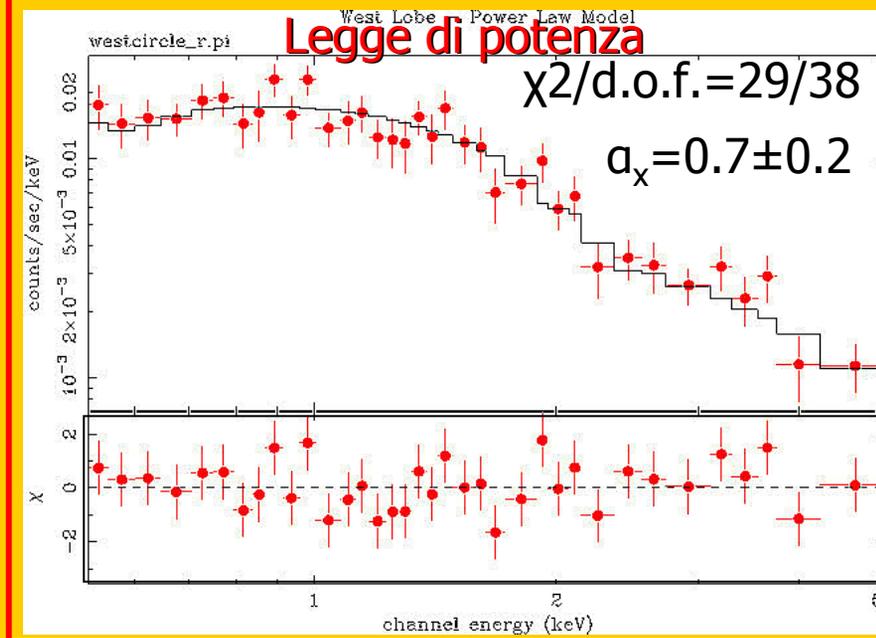
Legge di potenza:

- $\alpha_x = 0.8 \pm 0.2$
- $F_{2-10\text{keV}} = (1.4 \pm 0.1) * 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $F_{0.5-2\text{keV}} = (0.9 \pm 0.1) * 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $\chi^2/\text{d.o.f.} = 33/31$

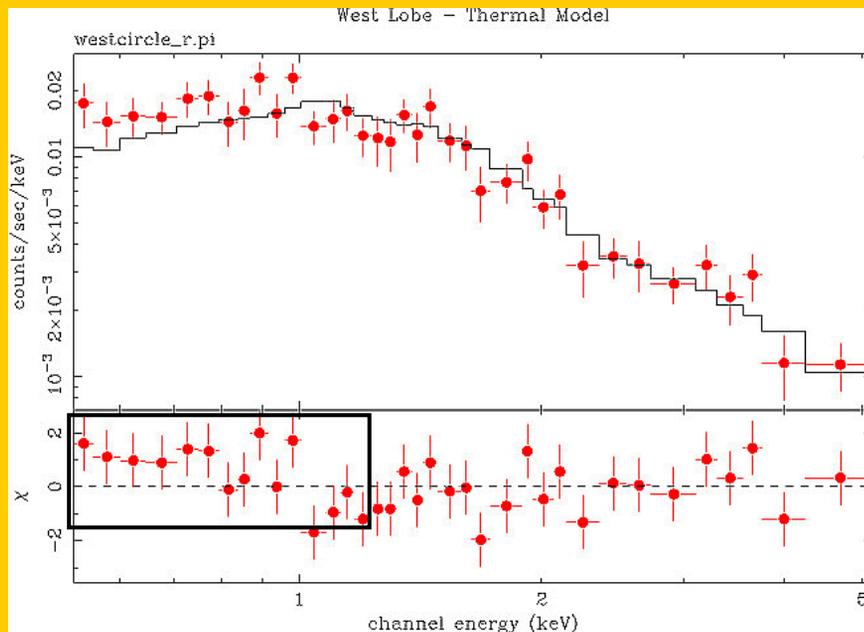
Modello termico:

- $kT = 5 \pm 2 \text{ keV}$
- $F_{2-10\text{keV}} = (1.4 \pm 0.1) * 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $F_{0.5-2\text{keV}} = (0.8 \pm 0.1) * 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $\chi^2/\text{d.o.f.} = 45/31$

Lobi ovest e est: termico vs non termico



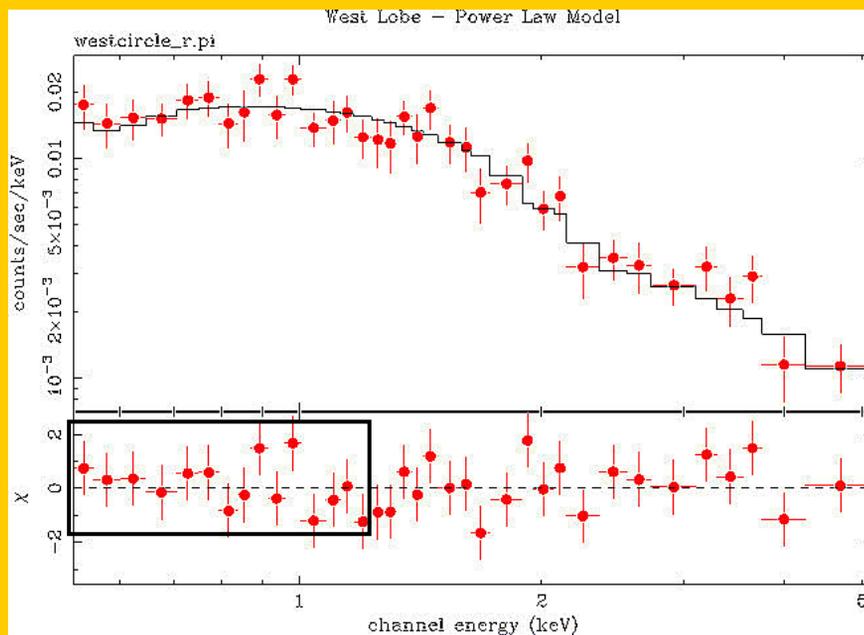
Lobi ovest e est: termico vs non termico



Modello termico

$$\chi^2/\text{d.o.f.} = 39/38$$

$$kT = 5 \pm 2 \text{ keV}$$



Legge di potenza

$$\chi^2/\text{d.o.f.} = 29/38$$

$$\alpha_{\text{x-ray}} = 0.7 \pm 0.2$$

in accordo con

$$\langle \alpha_{\text{radio}} \rangle = 0.8$$

Risultati dell'analisi dei dati X: Lobo W e Lobo E

→ Legge di potenza preferita rispetto al modello termico

→ L'aggiunta di un modello termico alla legge di potenza non è statisticamente richiesta

F_{KT} nella banda fra 0.5-2 keV consistente con 0.

$$F_{PL}/F_{KT} > 7$$

→ Indici spettrali e $F_{PL}/Area$ consistenti :

	Lobo est	Lobo ovest
α_x	0.8 ± 0.2	0.7 ± 0.2
$F_{PL}/Area$	$5.8 \pm 0.5_{(10^{-18})}$ erg cm ⁻² s ⁻¹ arcsec ⁻²	$6.8 \pm 0.8_{(10^{-18})}$ erg cm ⁻² s ⁻¹ arcsec ⁻²

Energetica dei due lobi

- I due lobi, regioni E e W, presentano condizioni fisiche simili: grandezze consistenti entro le incertezze statistiche

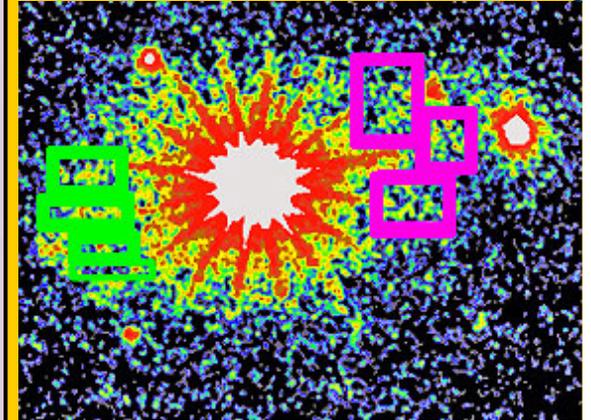
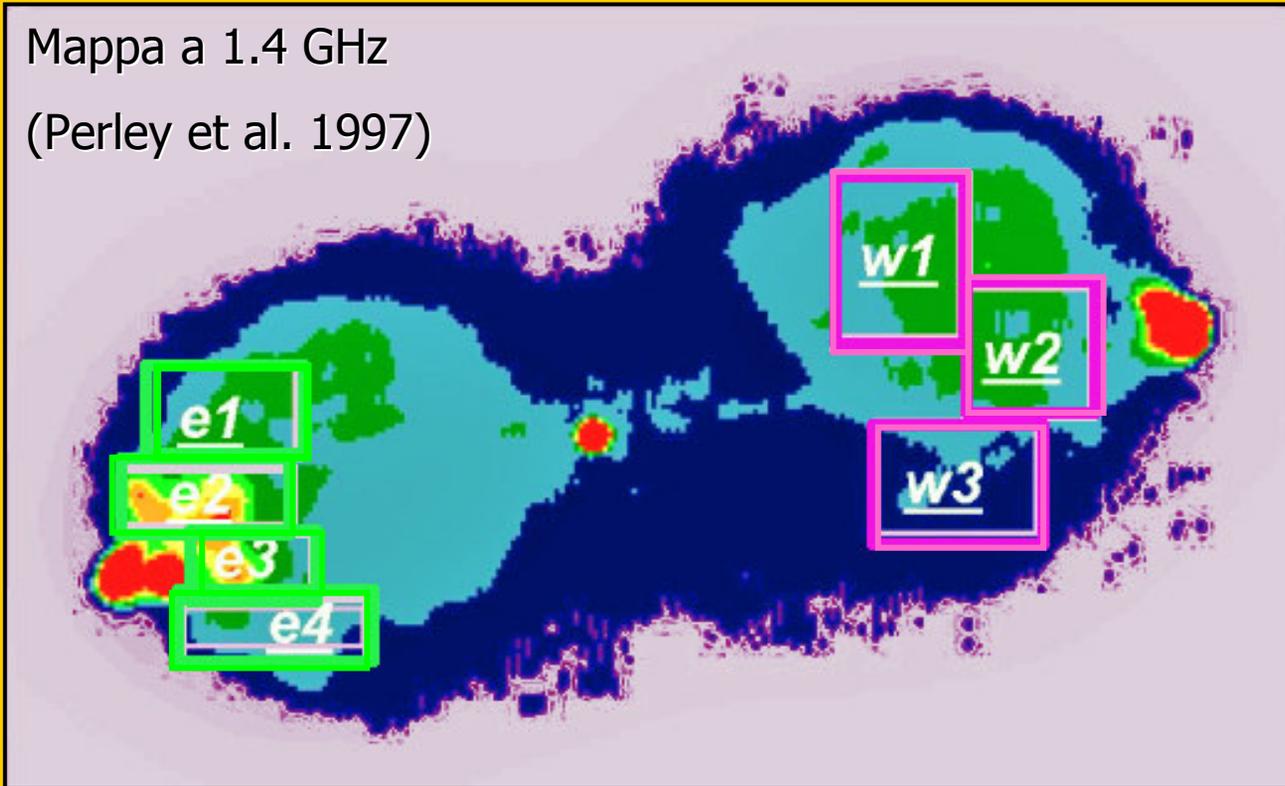
	Lobo ovest	Lobo est
B_{IC} (μG)	2.9 ± 0.2	3.1 ± 0.2
k_e (10^{-5} cm^{-3})	6.5 ± 0.8	8 ± 1
ω_{e+p}/ω_B	50 ± 10	56 ± 10



L'energetica dei lobi sembra essere dominata dall'energia delle particelle

Studio spazialmente risolto dei due lobi

Mappa a 1.4 GHz
(Perley et al. 1997)



Analisi spettrale delle sottoregioni:

- Legge di potenza (α_x libero)
- Legge di potenza ($\alpha_x=0.8$)

Analisi spettrale X spazialmente risolta:

Sulla base della precedente analisi i modelli testati sono stati:

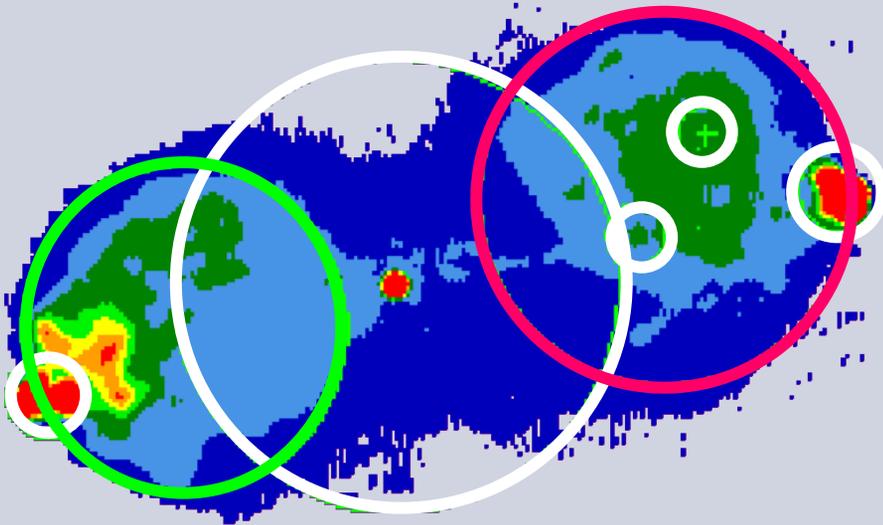
- Legge di potenza con Γ libero:
 - bassa statistica: numero di conteggi/regione ≤ 216

Risultato: valori di Γ consistenti con quelli trovati per le regioni W ed E.



- Legge di potenza con Γ fissato: $\Gamma=1.8$

Flussi Radio



- Calcolo dei flussi radio (imstat, tvstat in AIPS) :
- Lobo est $F_{1.4\text{GHz}} = 11.43 \text{ Jy}$
- Lobo ovest $F_{1.4\text{GHz}} = 13.66 \text{ Jy}$
- Nelle sottoregioni considerate (e1..e4, w1...w3) i flussi radio variano da 1.5 Jy a 3.3 Jy

Campi magnetici:

Dalla teoria:

✓ campi magnetici con il metodo di Compton inverso:

◦ B_{IC} classico (Feigelson et al. 1995) $B_{IC/class}$

◦ B_{IC} rivisitato (Brunetti et al. 1997) $B_{IC/riv}$

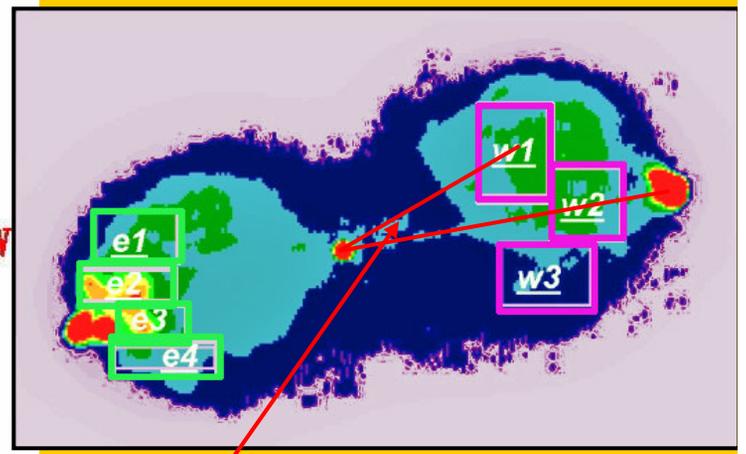
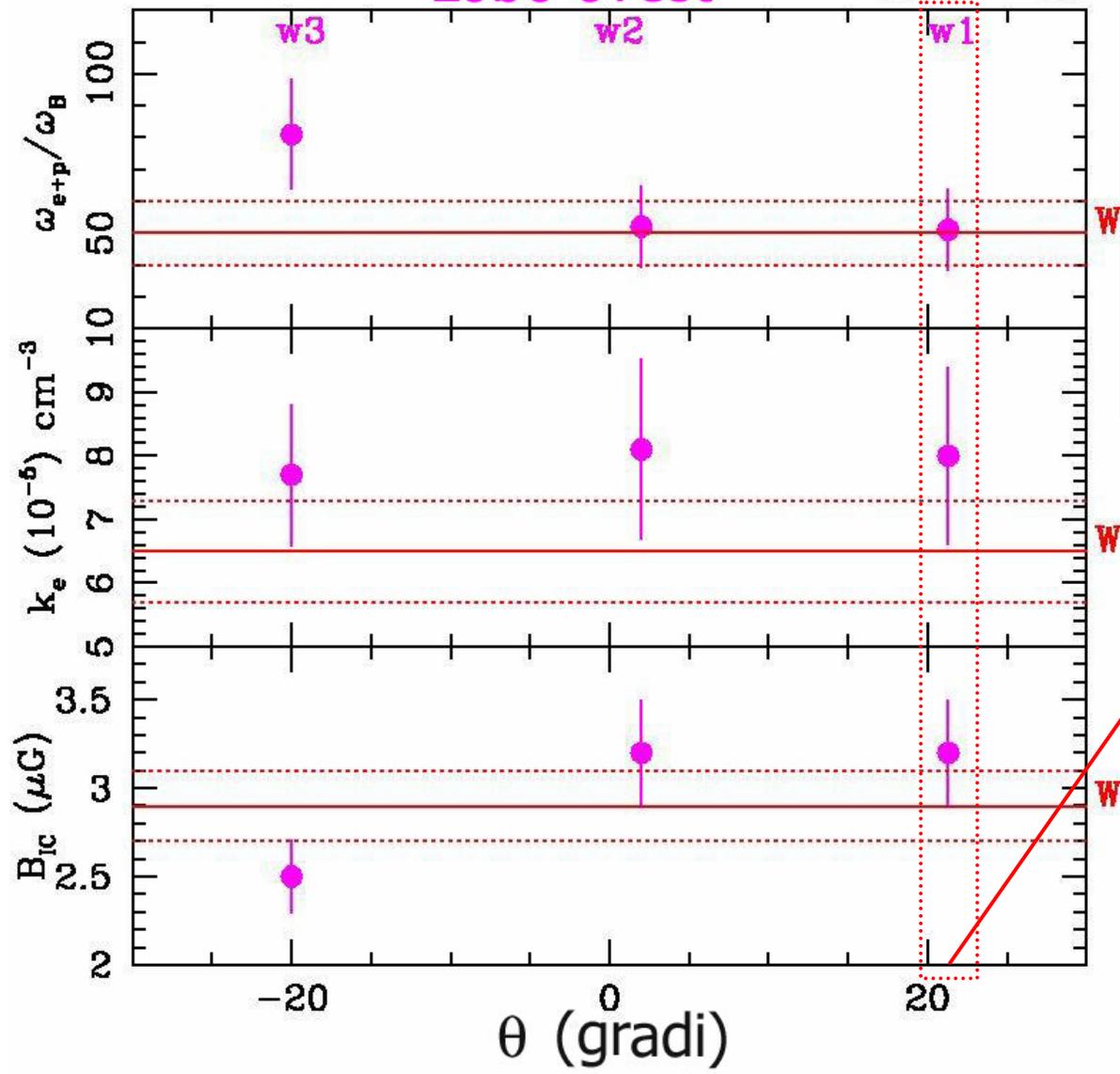
✓ Indipendentemente: k_e (densità particelle)

✓ Conseguentemente: $\frac{\omega_B}{\omega_{e+p}}$ $\frac{\omega_{e+p}}{\omega_B}$ $\frac{\omega_{e+p}}{\omega_B}$
(densità energetiche B, e+p)

I due lobi, regioni E e W, presentano condizioni fisiche simili: grandezze consistenti entro le incertezze statistiche ($\omega_{e+p}/\omega_B=56\pm 10$ est, $\omega_{e+p}/\omega_B=50\pm 10$ ovest)

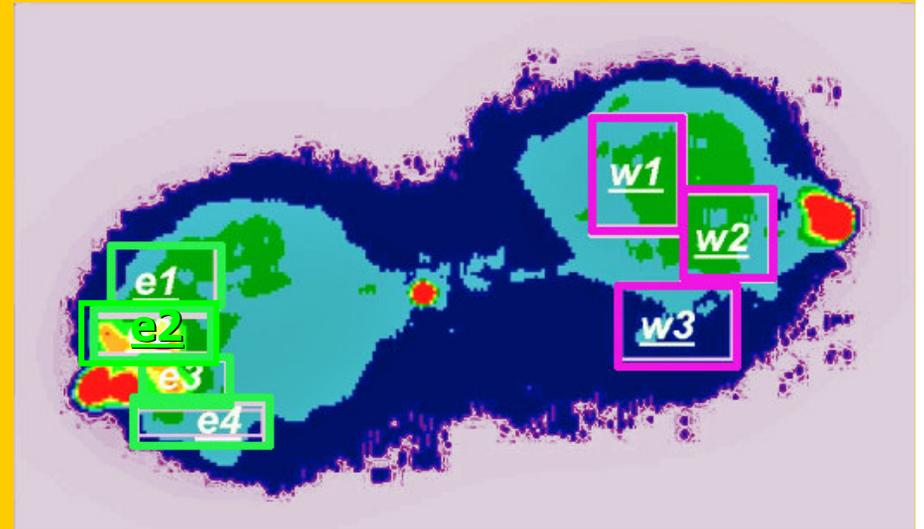
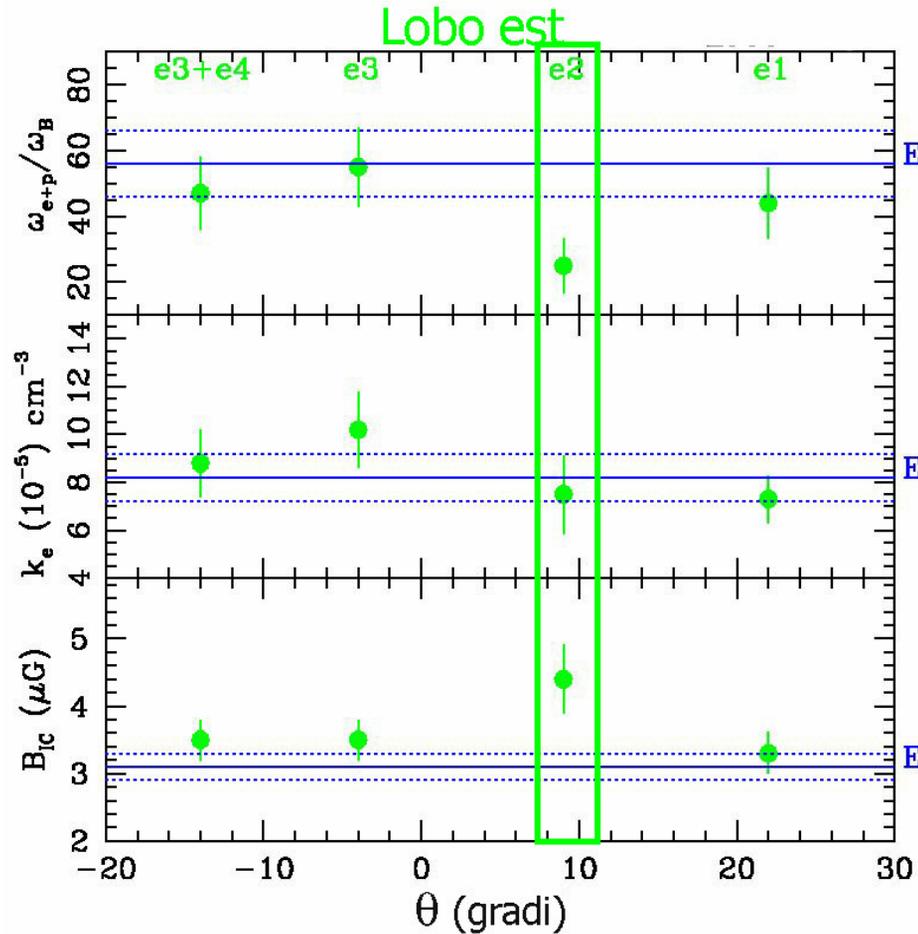
Condizioni fisiche: Lobo ovest- sottoregioni

Lobo ovest



B_{IC} , k_e , ω_{e+p}/ω_B :
nessuna
variazione
statisticamente
significativa rispetto
al valore medio
(retta **W**)

Condizioni fisiche: Lobo est- sottoregioni



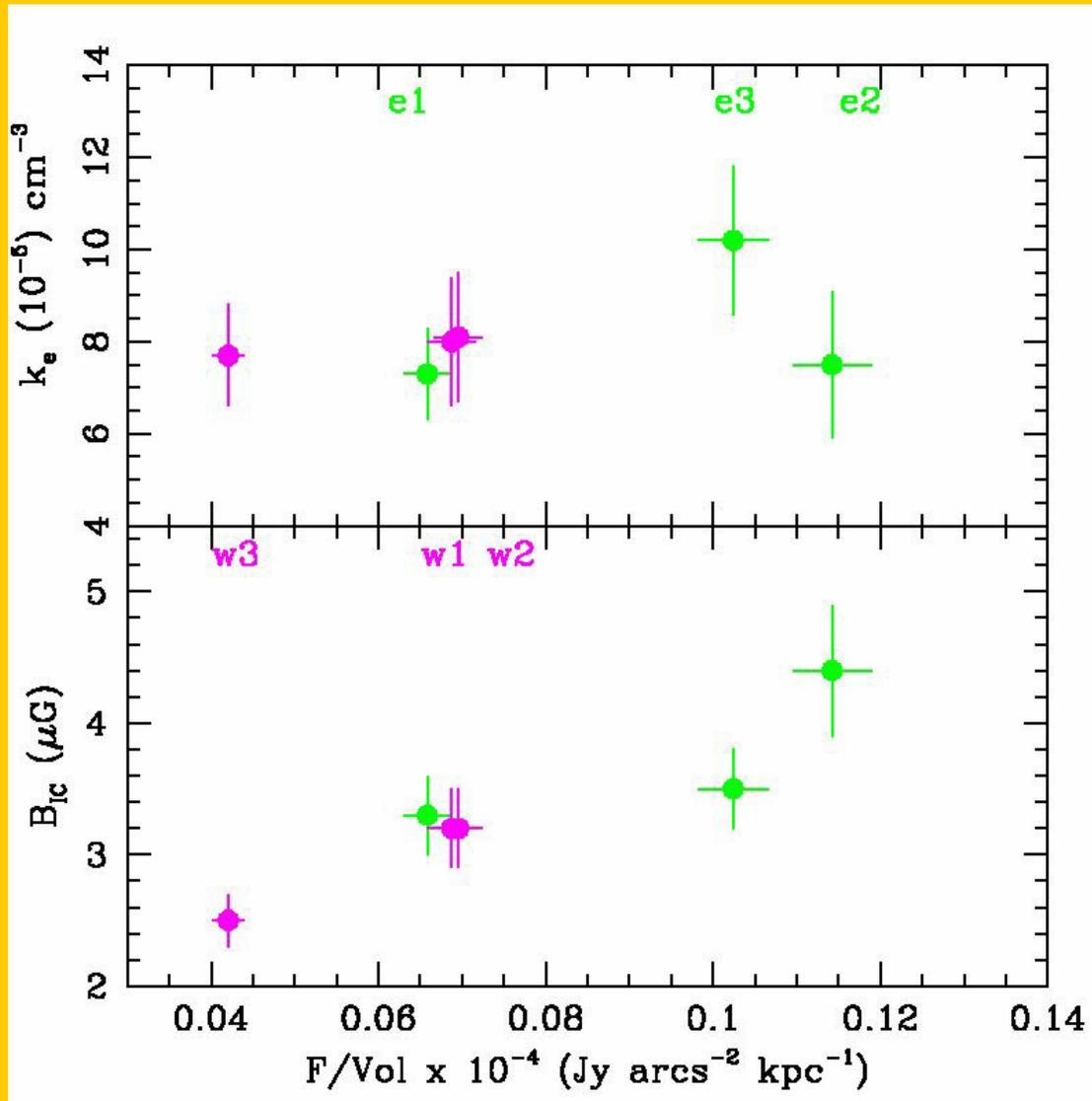
e2:

- Indicazione di un incremento di B_{IC} (2.4σ)
- nessun incremento di k_e ?



basso rapporto ω_{e+p}/ω_B (25 ± 8)

Condizioni fisiche: Lobo est ed ovest combinati



- B_{IC} varia
 $\chi^2=4.7$ $P_{\chi^2} = 3.0 \times 10^{-4}$
- B_{IC} e F_{radio} correlati
 $r=0.8$ $P_r=95\%$
- k_e e F_{radio} correlati?

Campi magnetici e particelle

Lobo est (E) Lobo ovest (W)

- B_{ic} :

- Lobo est: $B_{ic/class} = 1.8 \pm 0.1 \mu G$ $B_{IC/riv} = 3.1 \pm 0.2 \mu G$
- Lobo ovest: $B_{ic/class} = 1.6 \pm 0.1 \mu G$ $B_{IC/riv} = 2.9 \pm 0.2 \mu G$

*N.B. : I risultati ottenuti con le due formule hanno un andamento concorde

- k_e (10^{-5} cm^{-3}):

- ω_{e+p}/ω_B :

- Lobo est : $k_e = 8.2 \pm 1.0$ Lobo est : $\omega_{e+p}/\omega_B = 56 \pm 10$
- Lobo ovest: $k_e = 6.5 \pm 0.8$ Lobo ovest: $\omega_{e+p}/\omega_B = 50 \pm 10$



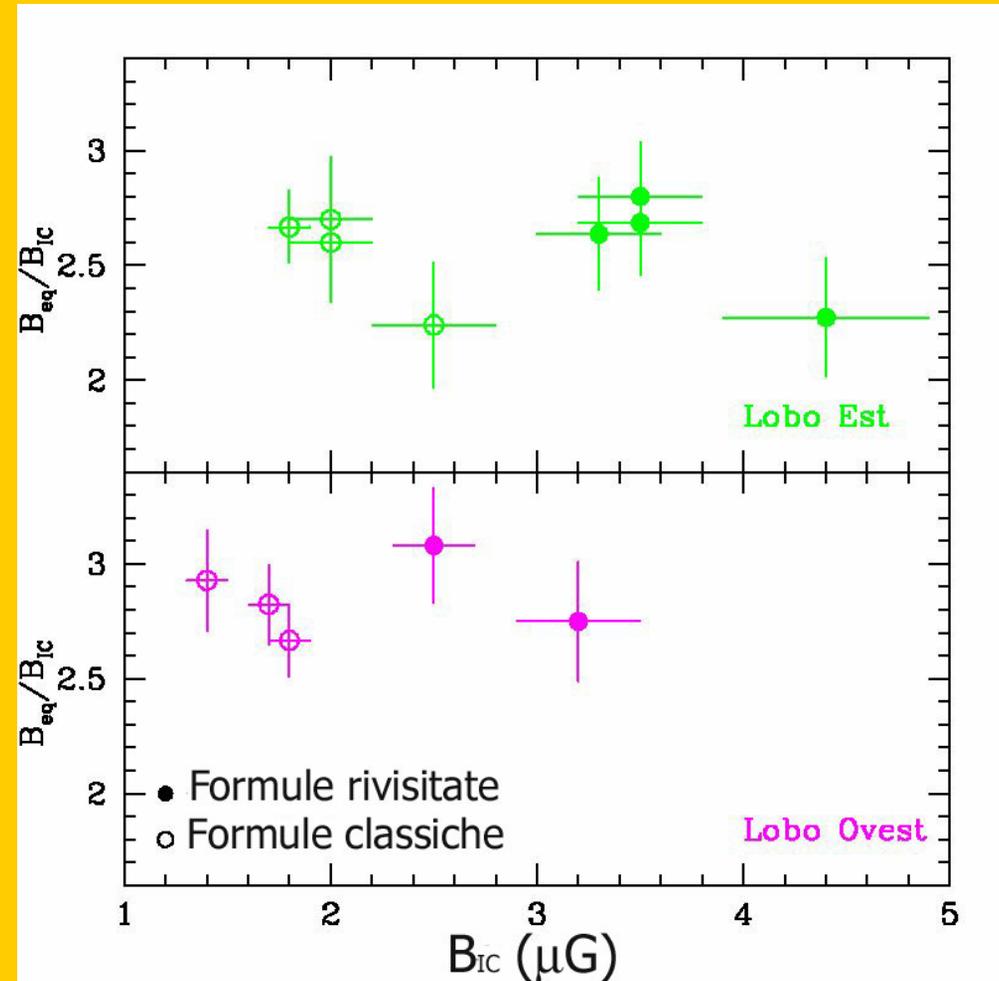
I due lobi, regioni E e W, presentano condizioni fisiche simili: grandezze consistenti entro le incertezze statistiche

Campi magnetici: Compton inverso vs. Equipartizione



$$B_{\text{eq}}/B_{\text{ic}} \sim 2.7$$

Possibile allontanamento
dall'equipartizione



Possibili cause della discrepanza fra B_{eq}/B_{IC} :

- Incertezze nella misura di B_{IC}

(principalmente)



sovrastima emissione X di IC

- Incertezze nella misura di B_{eq}



Assunzioni sui parametri



combinazione dei valori che minimizzano B_{eq} insufficiente



Non si rientra mai nell'equipartizione

Possibili cause della discrepanza fra B_{IC}/B_{eq} :

- Incertezze nella misura di B_{IC}

sovrastima
emissione X di IC

$B_{IC/class} : \varphi$

- Incertezze nella misura di B_{eq}

Assunzioni sui parametri:

■ φ

■ k

■ η

■ Y_{min}

■ s



Non si rientra mai nell'equipartizione

Conclusioni -1

Studio dell'emissione X dei lobi:

- *studio dei 2 lobi (E, W)*:

emissione X di origine non termica per IC su CMB;

condizioni fisiche simili nei due lobi;

- *studio spazialmente risolto dei 2 lobi:*

incremento di B_{IC} dietro la hot spot est;

campo magnetico correlato al flusso radio;

Conclusioni -2

-studio dei campi magnetici all'equipartizione

rapporto $B_{eq}/B_{IC} \sim 2.7$.

Possibile allontanamento dall'equipartizione.

Obbiettivi futuri:

Aspetti da approfondire:

- L'andamento delle condizioni fisiche all'interno dei lobi;
- Le connessioni jet-hot spot-lobi;
- Le conseguenze della predominanza energetica delle particelle sui meccanismi di confinamento dei lobi.

Formulario

- Sincrotrone: $L_{\text{sin}} = V k_e C_{\text{sin}} B^{\frac{p+1}{2}} v^{\frac{-(p-1)}{2}}$
- Compton inverso: $L_{\text{IC}} = V k_e C_{\text{IC}} v^{\frac{-(p-1)}{2}}$
- Campo magnetico di IC:

$$(B_{\text{IC}} \sin \vartheta)^{\alpha+1} = \frac{(5.05 \times 10^4)^{\alpha} C_H(\alpha) G(\alpha) (1+z)^{\alpha+3} F_{\text{sin}} v_{\text{sin}}^{\alpha}}{10^{47} F_{\text{IC}} v_{\text{IC}}^{\alpha}}$$

$$B_{\text{IC}} = \left[\frac{F_{\text{sin}} C_{\text{IC}} (1+z)^{\alpha+3}}{F_{\text{IC}} C_{\text{sin}}} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} \left(\frac{v_{\text{sin}}}{v_{\text{IC}}} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha+1}}$$

Formulario

- Campo magnetico (ass. di minima energia):

$$B_{eq} = 5.69 \times 10^{-5} \left(\frac{(1+k)}{\eta} (1+z)^{3+\alpha} \frac{1}{\vartheta_{xy} s \sin^{3/2} \varphi} \frac{F_{\sin} v_{oss}^{-\alpha}}{v_2^{-\alpha+1/2} - v_1^{-\alpha+1/2}} \right)^{2/7}$$

$$B_{eq} = \left[\frac{C(\alpha)(1+k)F_{\sin} v^{-\alpha} (1+z)^{3+\alpha}}{\vartheta_{xy} s} \right]^{\frac{1}{3+\alpha}} \gamma_{\min}^{\frac{1-2\alpha}{3+\alpha}}$$