

Franco Vazza (Jacobs University Bremen)

*f.vazza@jacobs-university.de oppure vazza@ira.inaf.it*

~

Oggi: - *Modelli di accelerazione*

*“macroscopici” per Relitti Radio;*

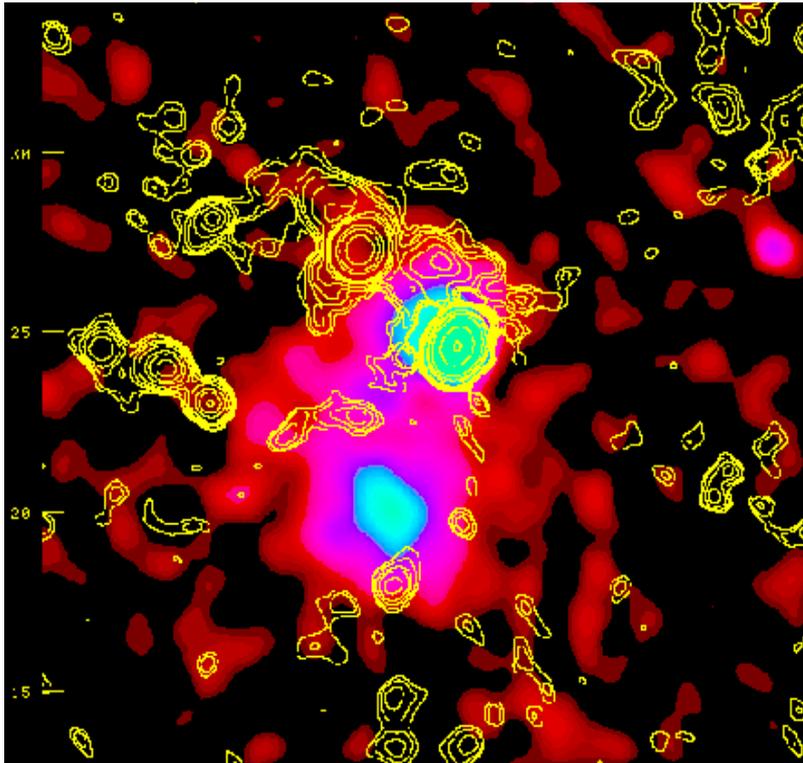
*- Accenno alle simulazioni numeriche.*

~

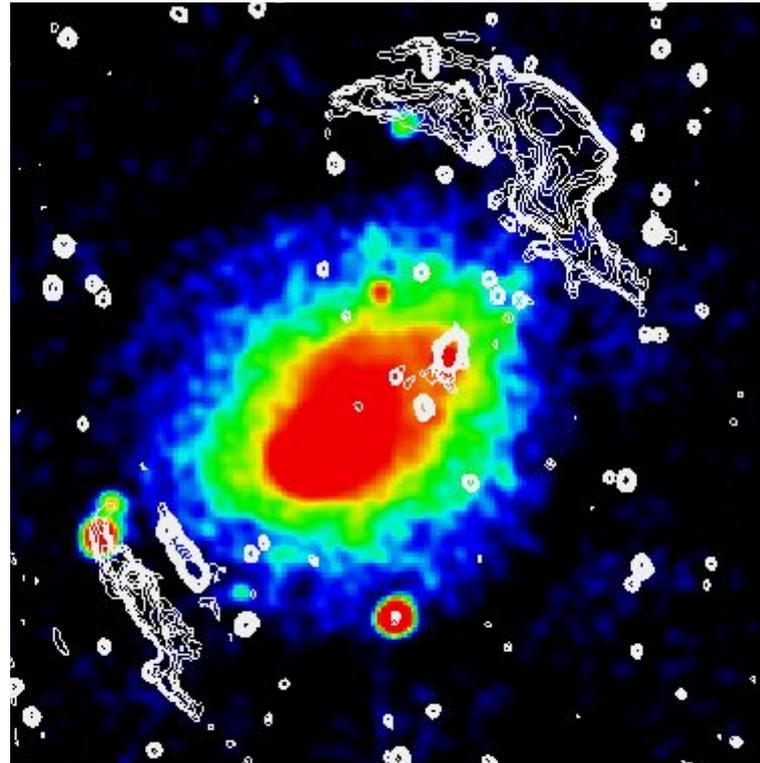
*Slides qui:*

*[http://www.ira.inaf.it/~vazza/lezioni\\_bologna/  
vazza\\_L3\\_slides.pdf](http://www.ira.inaf.it/~vazza/lezioni_bologna/vazza_L3_slides.pdf)*

**Relitto**

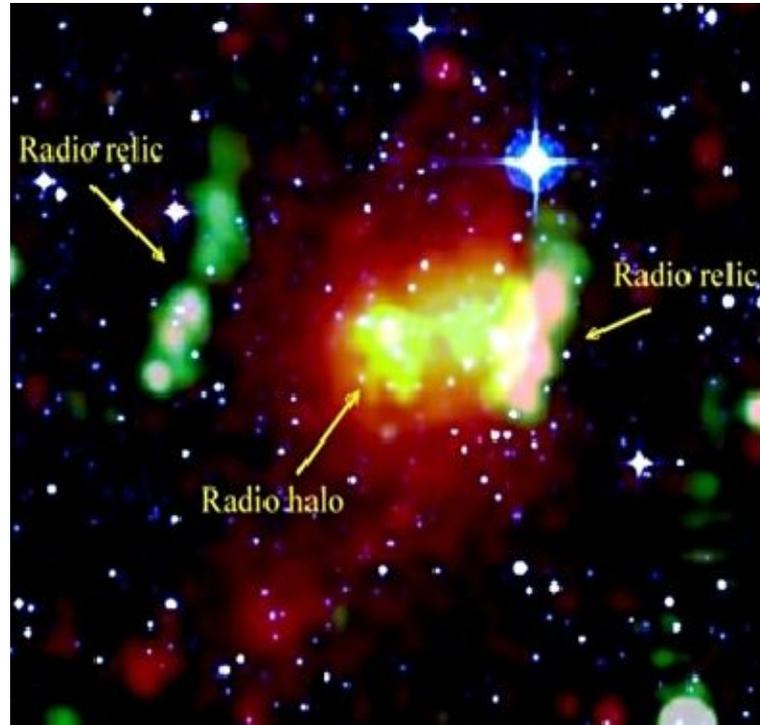
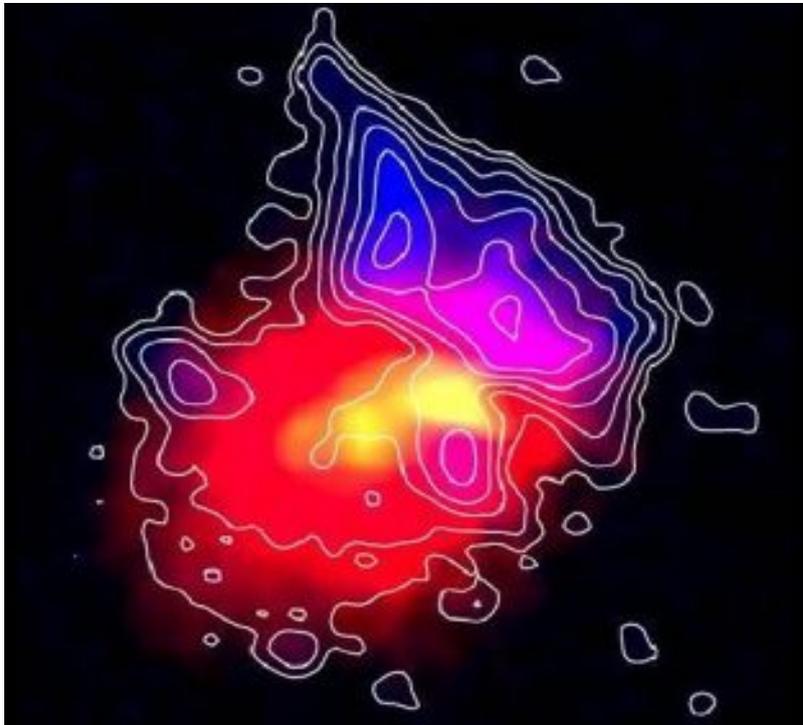


**Relitti  
Doppi**

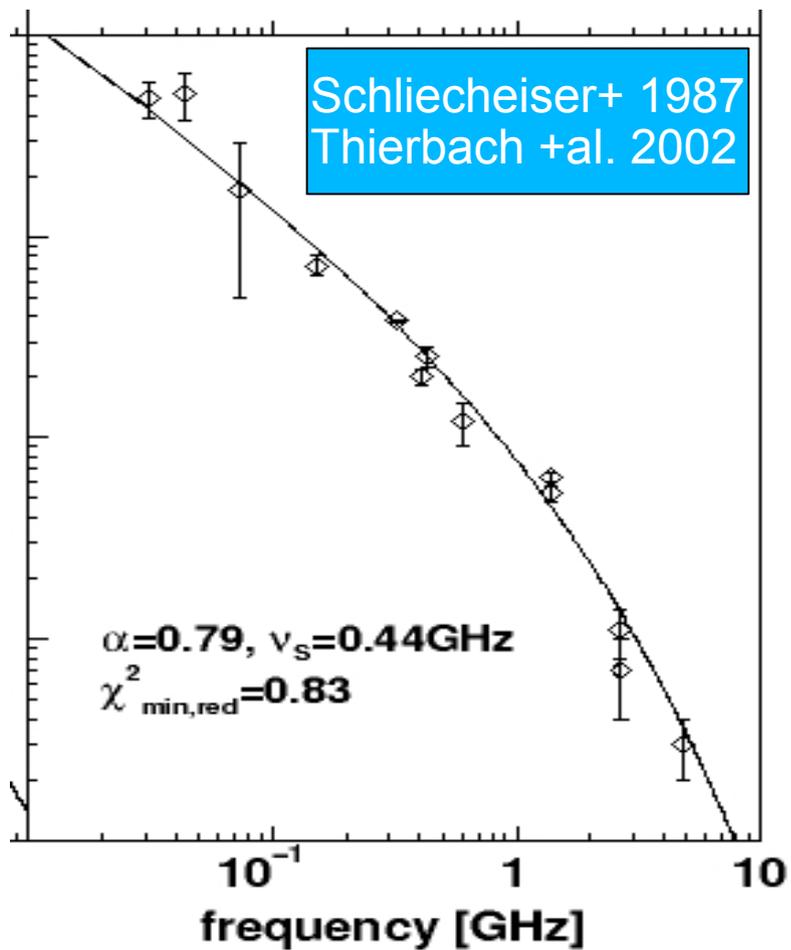


**Relitti  
Doppi  
+  
Alone**

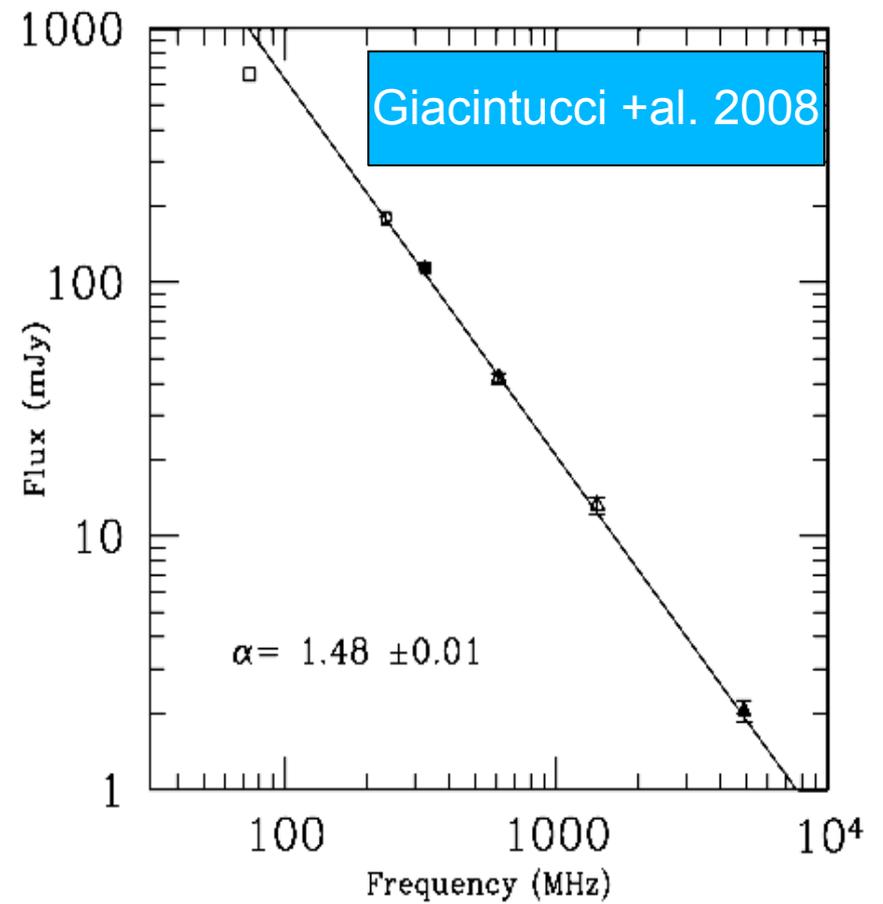
**Relitto  
+ alone**



## Radio alone di Coma

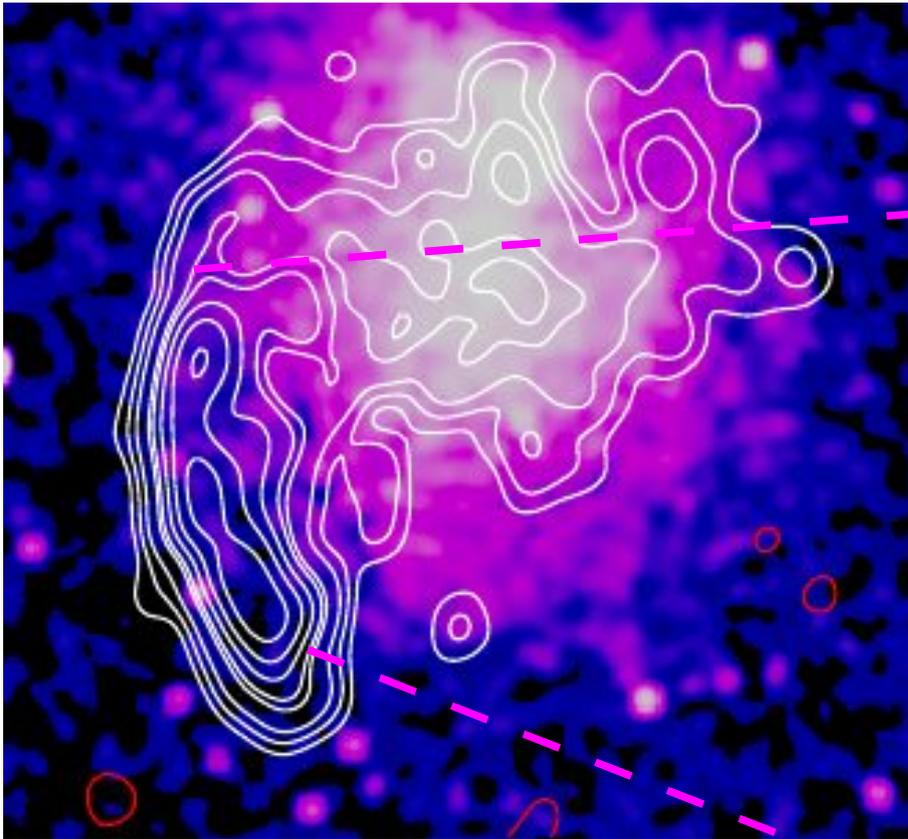


## Radio relic di A521

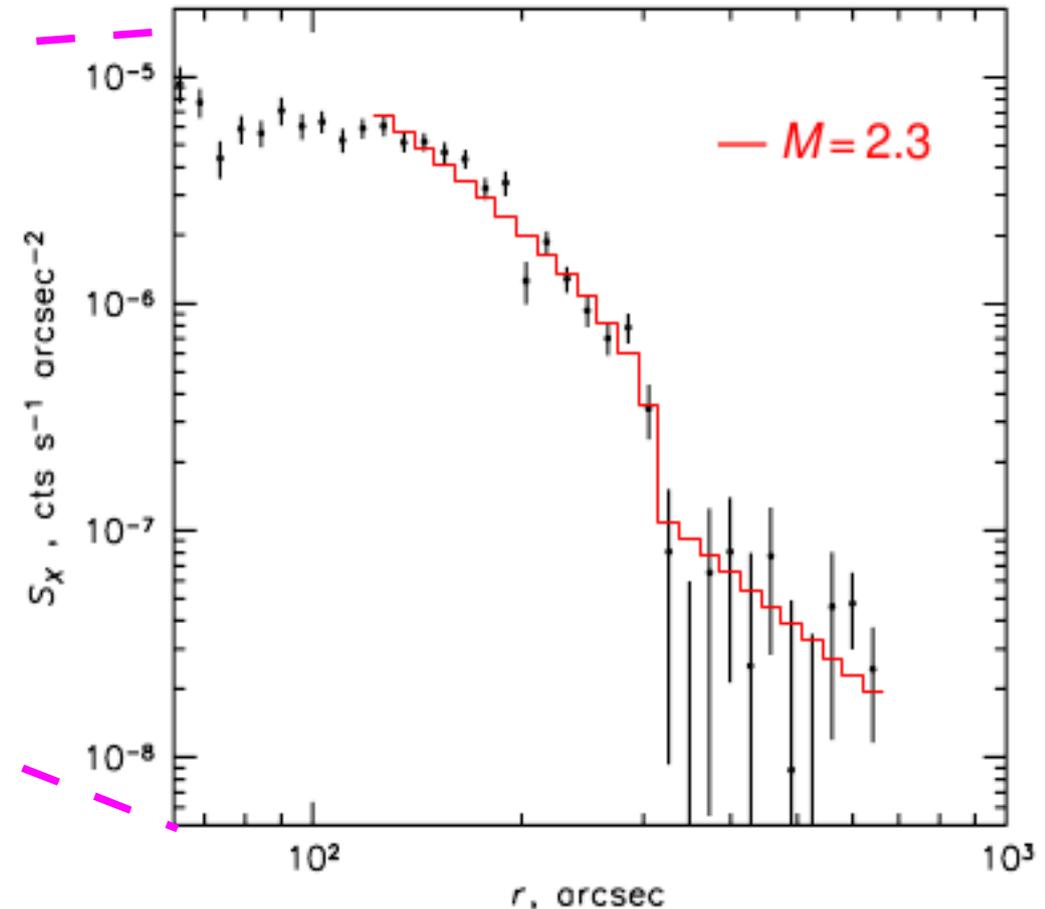


# Correlazioni tra emissione radio e emissione X del ICM: Shocks?

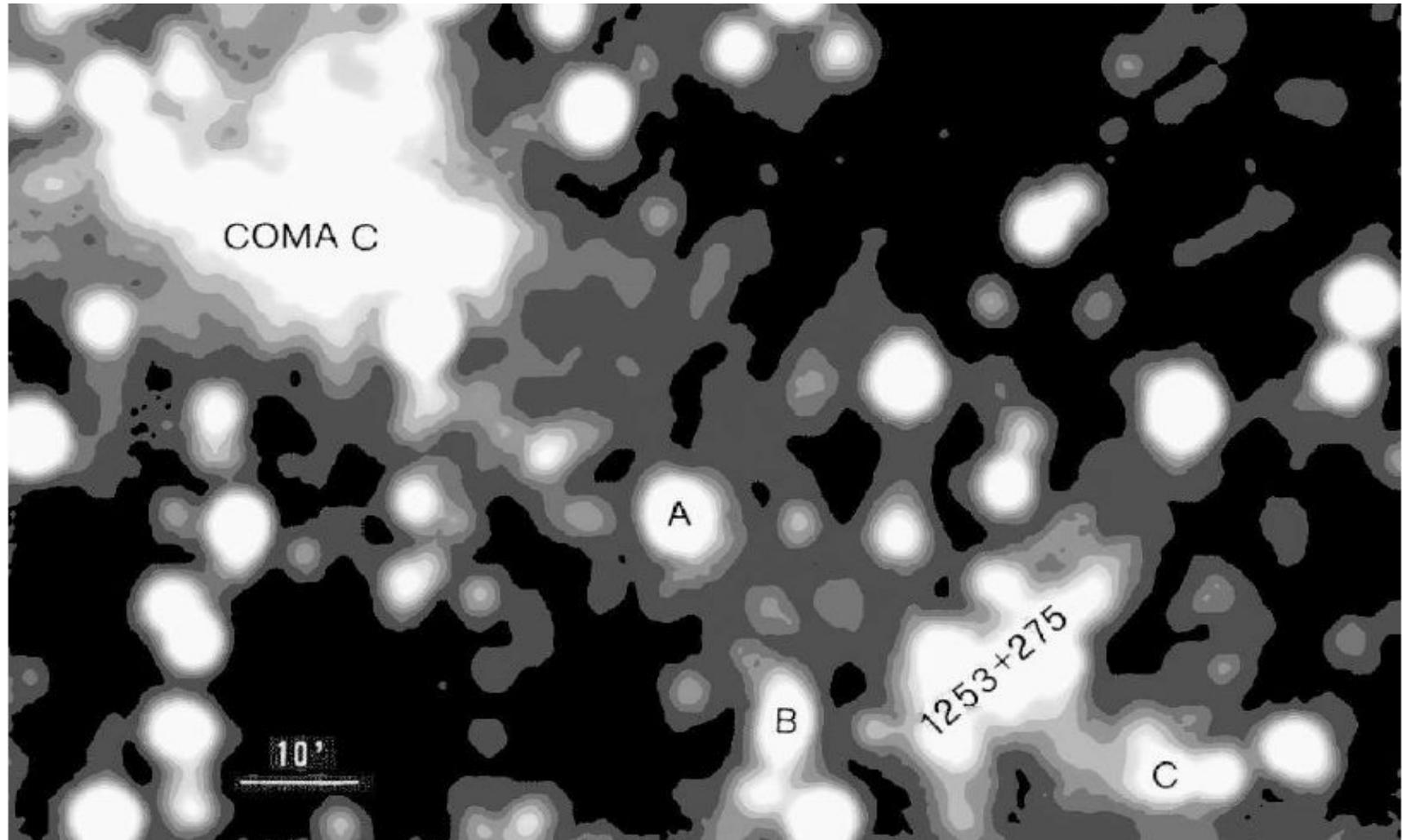
relitto e shock  
nell'ammasso Abell 521



Giacintucci et al. 2007  
Macario et al. 2010



*Modello di riferimento per relitti a spettro “power-law” e doppi: → accelerazione da shock,  
Ensslin et al. 1997 RELIC in COMA*



**Fig. 1.** Westerbork Synthesis Radio Telescope map at 327 MHz of the Coma cluster from Giovannini et al. (1991). The central halo source Coma C and the cluster relic 1253+275 are identified. Capital letters indicate some extended Coma cluster galaxies, as following: A = NGC 4839, B = NGC 4827, C = NGC 4789. 10' corresponds to 400 kpc  $h_{50}^{-1}$ .

Modello di riferimento per relitti a spettro "power-law" e doppi:

→ accelerazione da shock, Ensslin et al. 1997

Per il relitto di COMA:

$$I(\nu) \sim \nu^{-\alpha} ; \alpha \approx 1.18$$

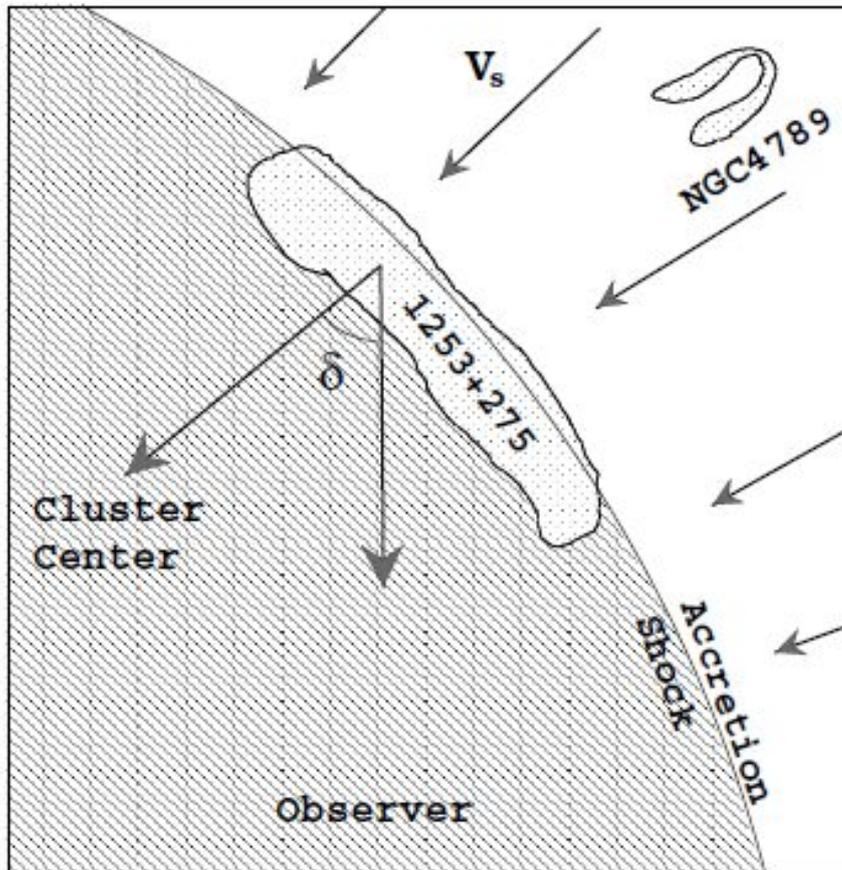
Ensslin et al assumono:

- uno shock di accrescimento con  $M \sim 10$  (compressione  $\rho_2/\rho_1 \sim 3.2$ )
- $V \sim 1400$  km/s a  $R \sim 4.2$  Mpc
- 1% di energia accelerata in elettroni relativistici
- Campo magnetico  $B \sim 1 \mu\text{G}$

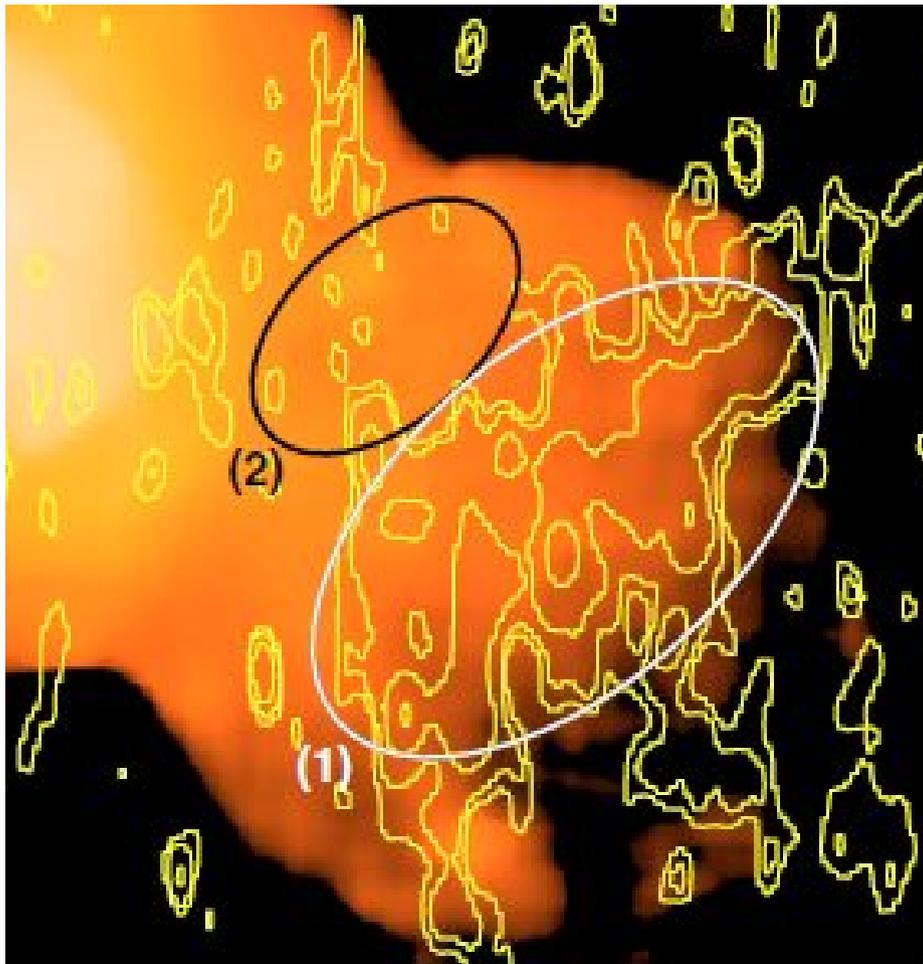
Spiegano:

- Polarizzazione
- Spettro
- Morfologia

TUTTAVIA:



*Feretti & Neumann 2006 non trovano shock  
Con  $M > 2$ , da immagini XMM-Newton.*



Mappa di temperatura  
da XMM-Newton (Feretti & Neumann 2006)

Spiegazioni:

- RELITTO NON E' DOVUTO A SHOCK DI ACCRESCIMENTO, MA A MERGER-SHOCK
- ACCELERAZIONE DA  $M \sim 2$  ACCELERA MOLTI ELETTRONI (TEORICAMENTE MOLTO DIFFICILE DA SPIEGARE)
- RI-ACCELERAZIONE DA SHOCK DI ELETTRONI PRECEDENTEMENTE INIETTATI.

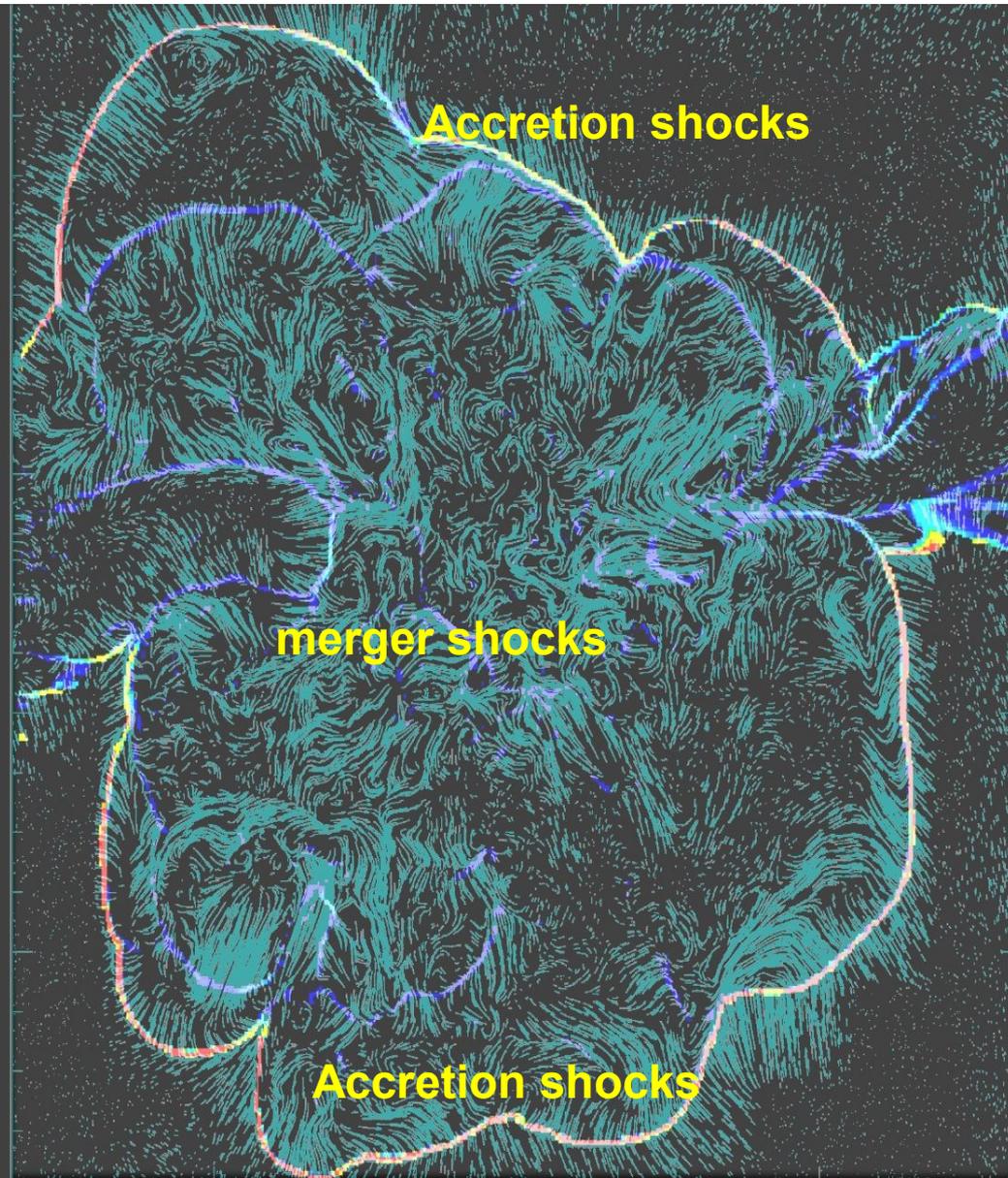
# DUE TIPI DI SHOCKS NEGLI AMMASSI DI GALASSIE:

TEMPERATURA

SHOCKS

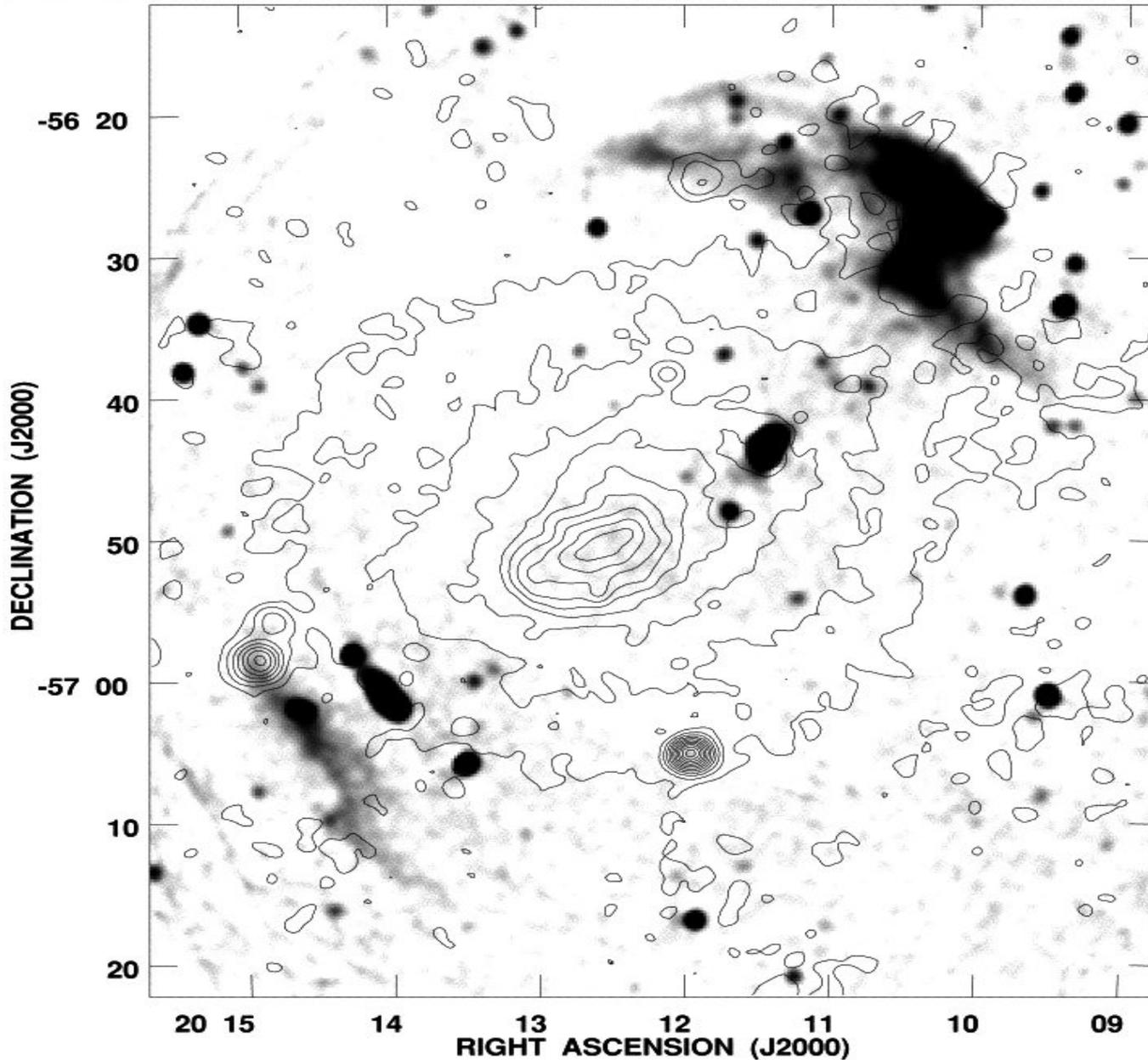
- SHOCK ESTERNI O DI ACCRESCIMENTO:  $M > 10$ , MOLTO SIMMETRICI, IN REGIONI POCO DENSE

- SHOCK DA MERGER O INTERNI:  $M < 5$ , CONNESSI A COLLISIONI DI AMMASSI, AVVENGONO IN ZONE CALDE E DENSE



# *Double radio relics in A3667*

*Rottgoering et al. 1997*



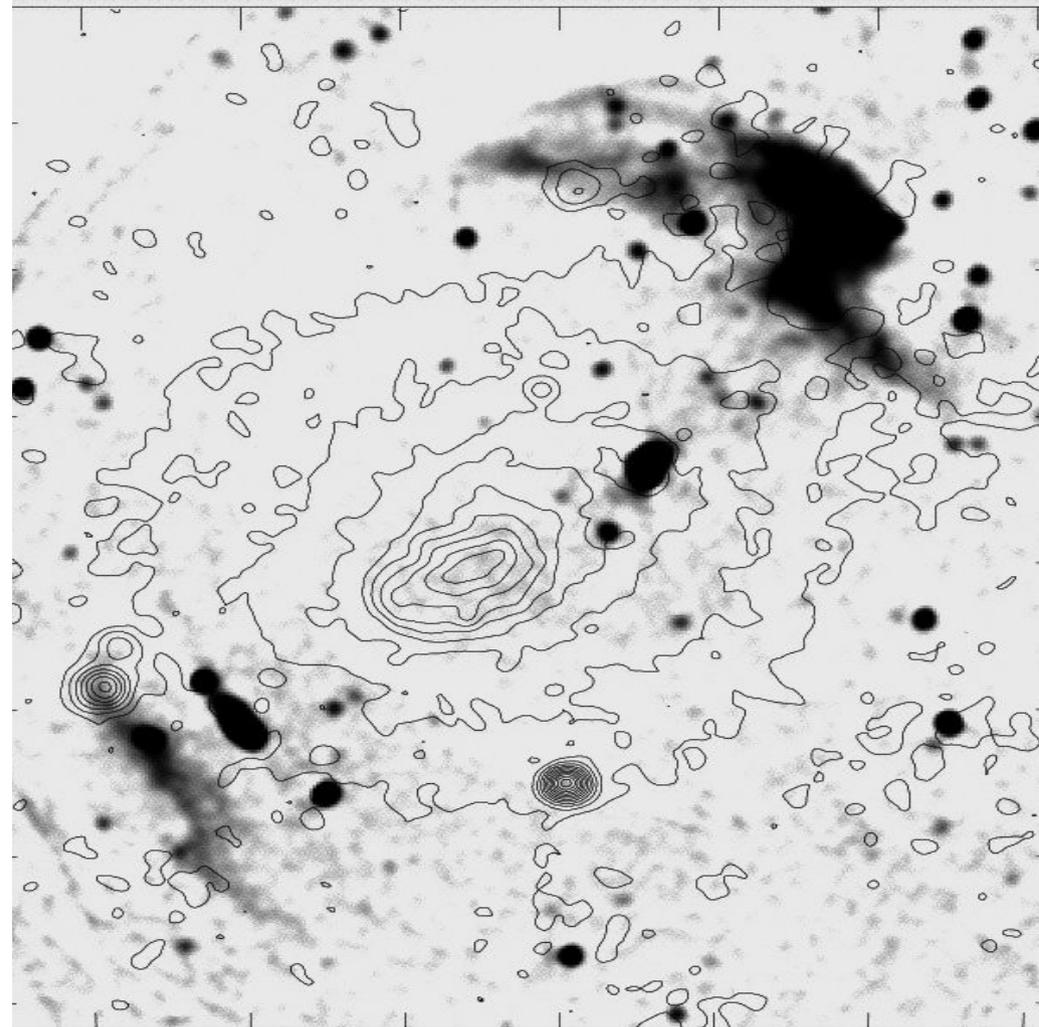
Contorni: X-ray da  
ROSAT

Colori: radio a  
20cm con ATCA

## *Indicazioni di un merger su grande scala*

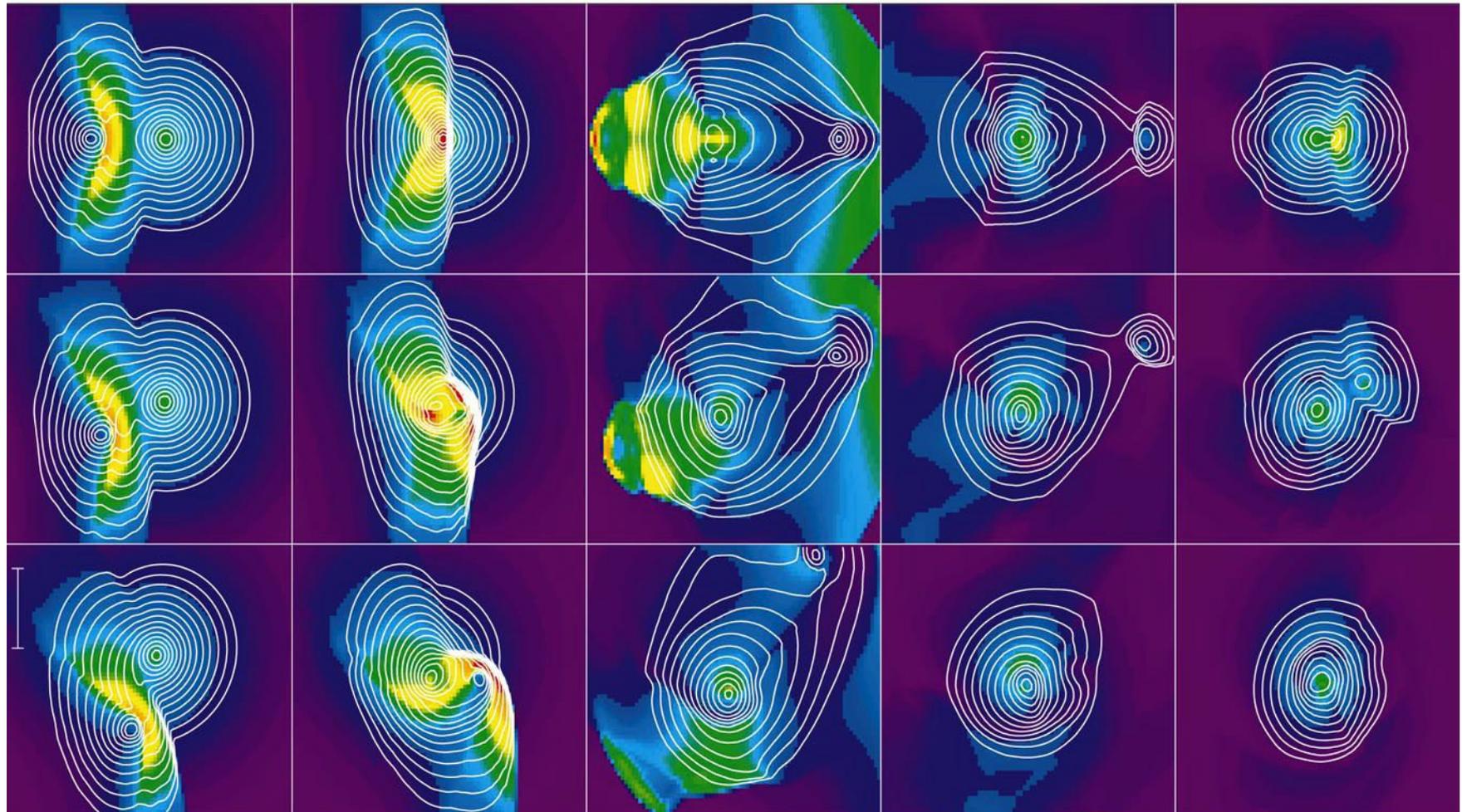


Contorni: isodense da 423 galassie  
Proust et al. 1988



Rottgoering et al. 1997

*Studio parametrico di merger binari con  
simulazioni idealizzate: Ricker & Sarazin 2001*



-0.5 Gyr

0

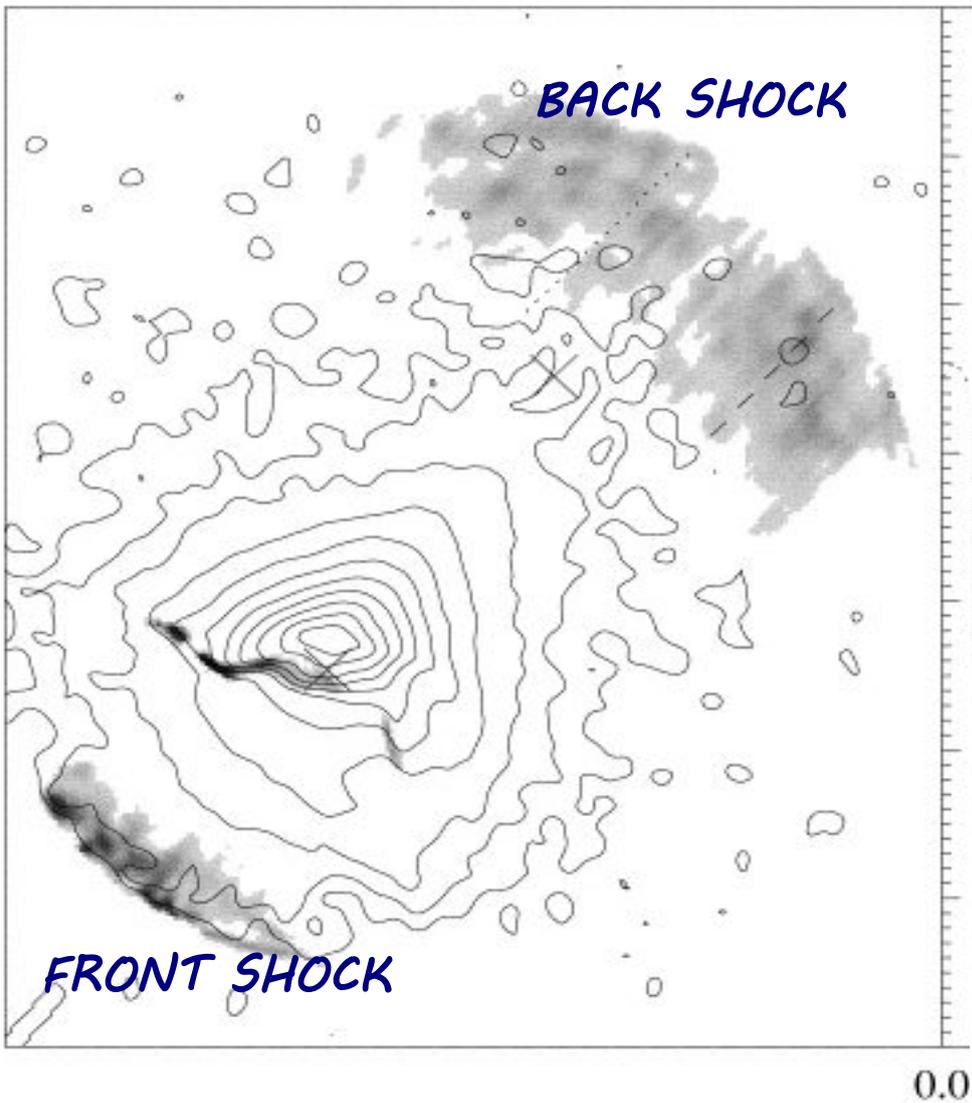
+1 Gyr

+2 Gyr

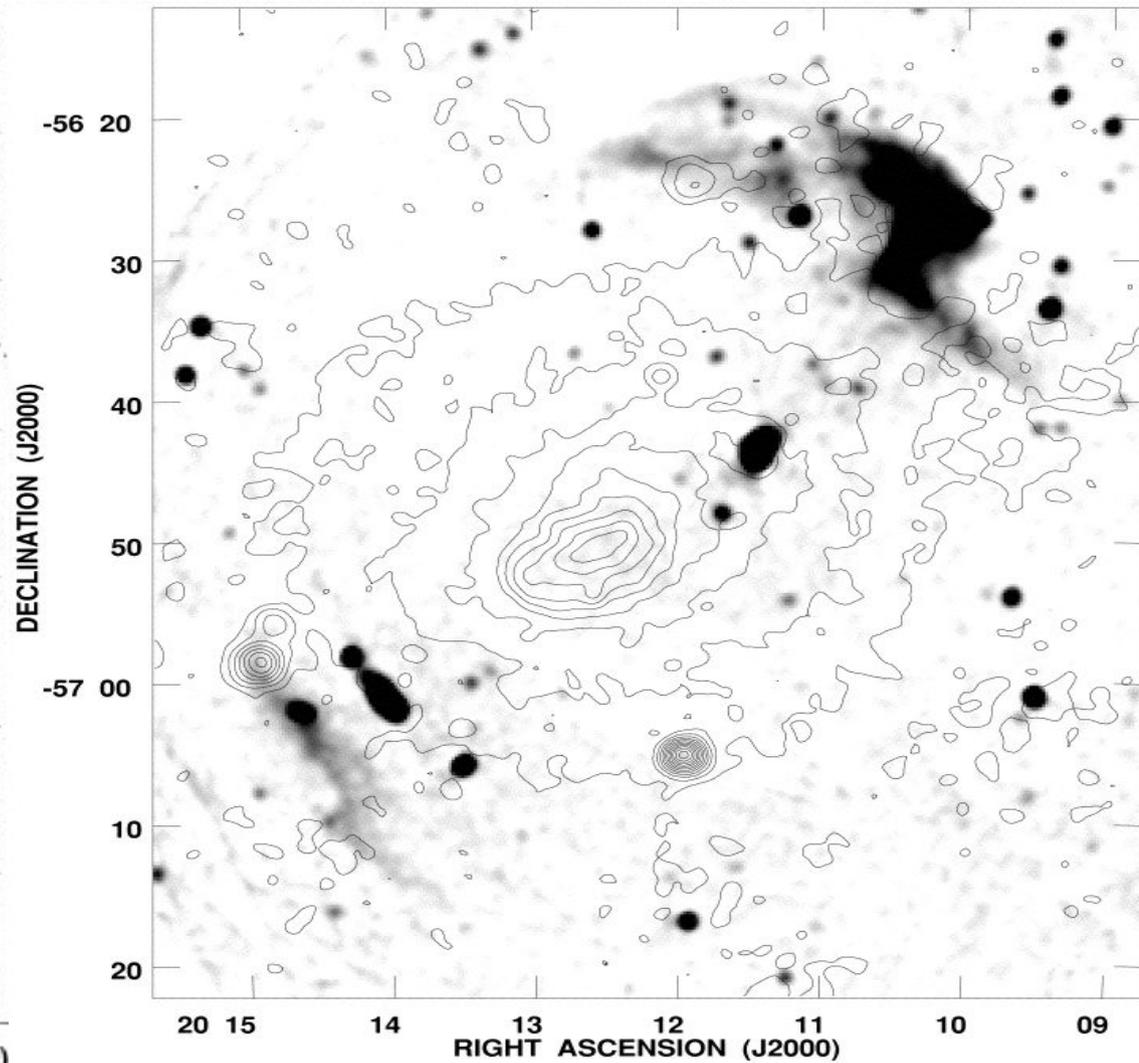
+3.5 Gyr

[Vedi video](#)

*Simulated double radio relics in A3667*  
*Roettiger, Bruns & Loken 1998*



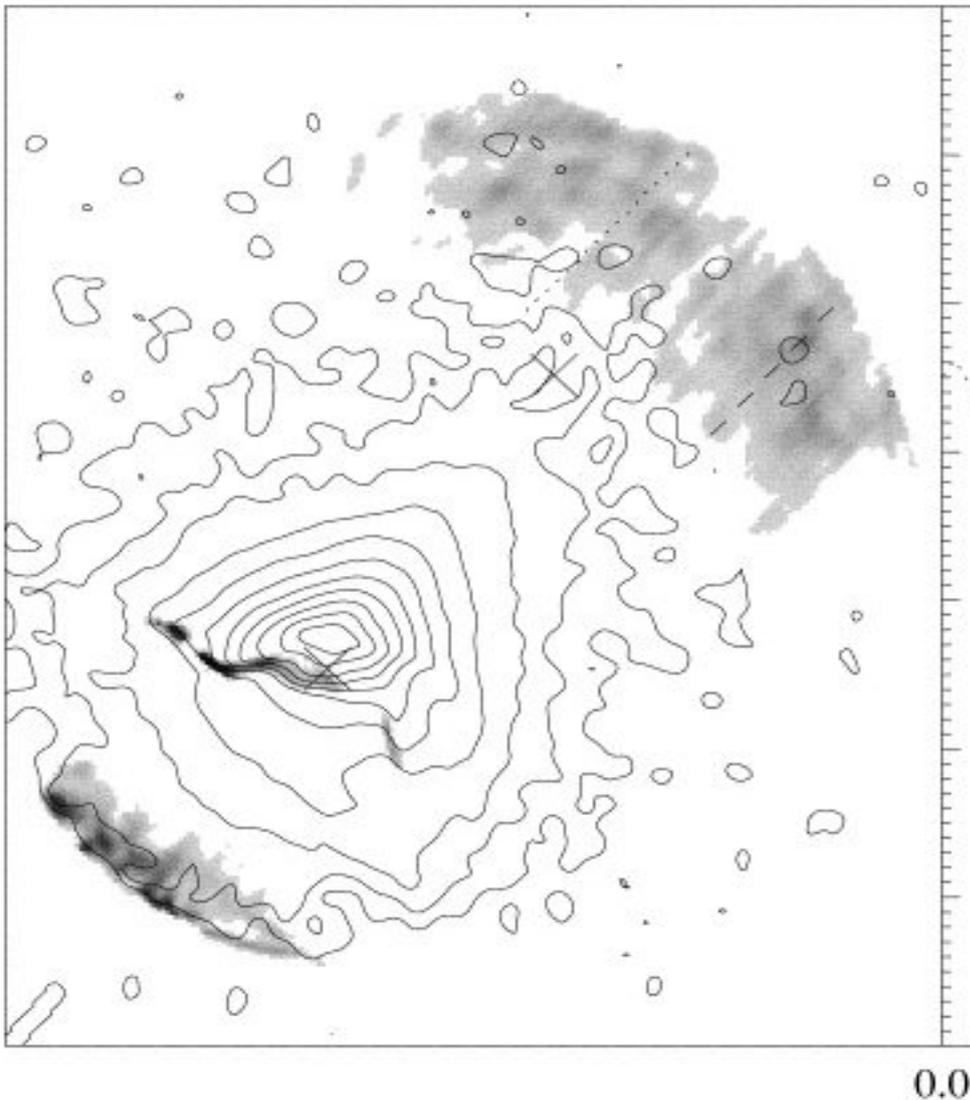
**SIMULAZIONE NUMERICA**



**OSSERVAZIONE REALE**

# *Simulated double radio relics in A3667*

*Roettiger, Burns & Loken 1998*



**SIMULAZIONE NUMERICA**

*La morfologia dell'emissione radio e lo spettro sono spiegabili con:*

- merger con rapporto di massa +20%, avvenuto 1Gyr fa;*
- velocità impatto  $\sim 2700\text{km/s}$ ;*
- campo  $B \approx 1.5\mu\text{G}$  nella regione dei relitti;*

## *Tuttavia*

- spettri dei relitti simulati troppo ripidi ( $M$  troppo basso?)*

## *Limitazioni:*

*Non viene simulata evoluzione dell'Universo su grande scala*

*Modello (avanzato) per la produzione di relitti radio da accelerazione diretta da shock - Hoeft & Bruggen 2007*

*Spettro particelle: Fermi I vs  
Perdite (sync+IC)*

$$\frac{d^2 P(\nu_{\text{obs}})}{dA d\nu} = \int_0^\infty dy \int_{E_{\text{min}}}^\infty dE n_E(E, t) P(\gamma_L, \omega_{\text{obs}}).$$

*Kernel di sincrotrone*



$$\frac{dP(\nu_{\text{obs}})}{d\nu} = 6.4 \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1} \frac{A}{\text{Mpc}^2} \frac{n_e}{10^{-4} \text{ cm}^{-3}} \frac{\xi_e}{0.05} \left( \frac{\nu_{\text{obs}}}{1.4 \text{ GHz}} \right)^{-s/2} \times \left( \frac{T_d}{7 \text{ keV}} \right)^{3/2} \frac{(B/\mu\text{G})^{1+(s/2)}}{(B_{\text{CMB}}/\mu\text{G})^2 + (B/\mu\text{G})^2} \Psi(\mathcal{M}).$$

# Modello (avanzato) per la produzione di relitti radio da accelerazione diretta da shock - Hoeft & Bruggen 2007

Spettro particelle: Fermi I vs Perdite (sync+IC)

$$\frac{d^2 P(\nu_{\text{obs}})}{dA d\nu} = \int_0^\infty dy \int_{E_{\text{min}}}^\infty dE n_E(E, t) P(\gamma_L, \omega_{\text{obs}})$$

Kernel di sincrotrone

$$\frac{dP(\nu_{\text{obs}})}{d\nu} = 6.4 \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1} \left[ \frac{A}{\text{Mpc}^2} \right] \left[ \frac{n_e}{10^{-4} \text{ cm}^{-3}} \right] \left[ \frac{\xi_e}{0.05} \right] \left( \frac{\nu_{\text{obs}}}{1.4 \text{ GHz}} \right)^{-s/2}$$

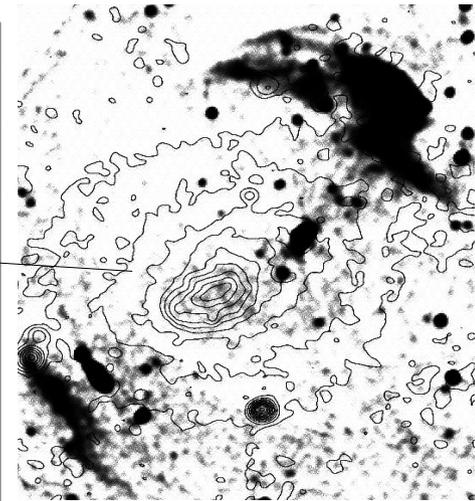
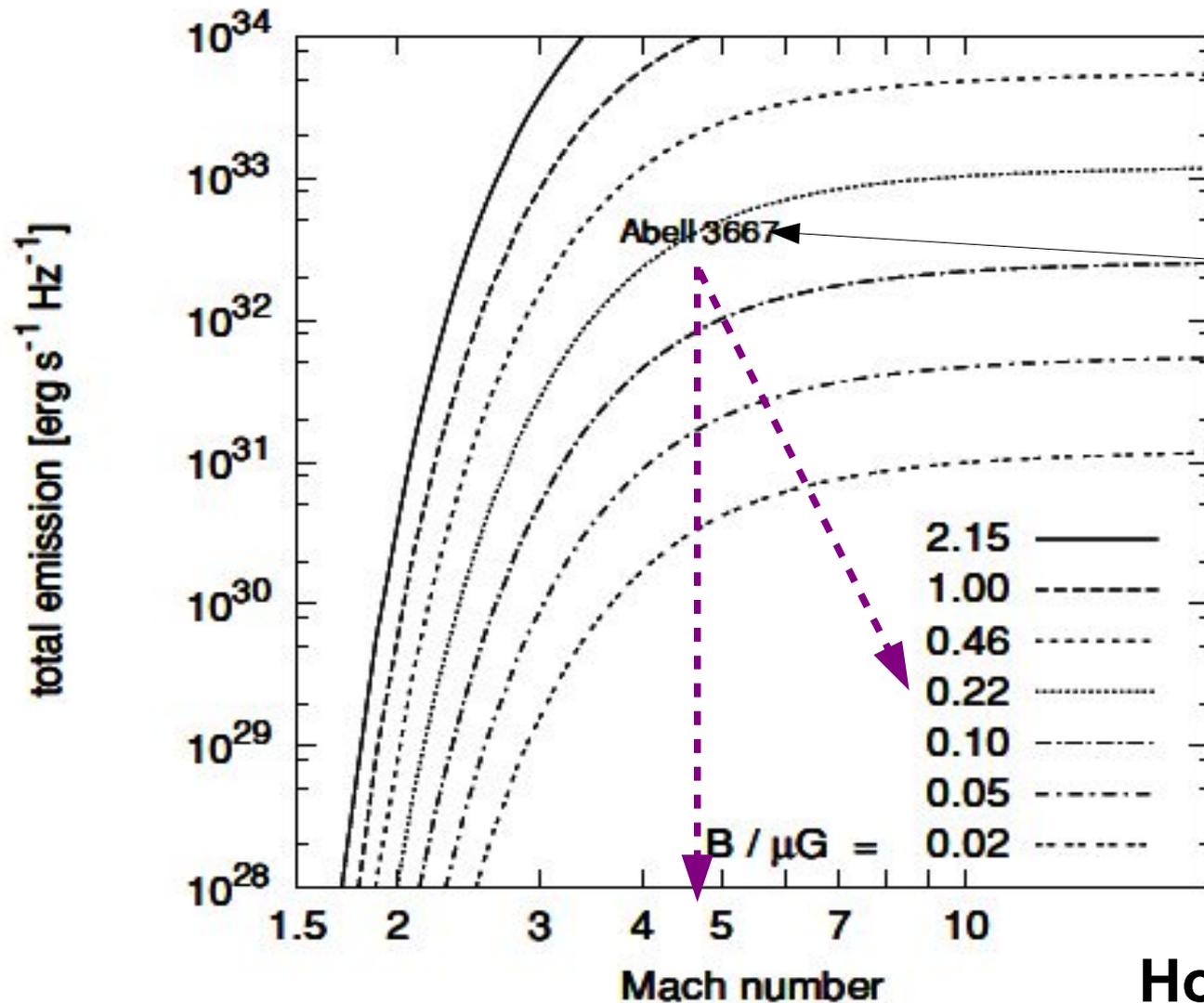
Superficie Shock     densità gas     fraz.energia prot./elett.     Indice spettrale Da Mach number

$$\times \left( \frac{T_d}{7 \text{ keV}} \right)^{3/2} \left[ \frac{(B/\mu\text{G})^{1+(s/2)}}{(B_{\text{CMB}}/\mu\text{G})^2 + (B/\mu\text{G})^2} \right] \Psi(\mathcal{M})$$

Temperatura gas     Campo magnetico     Frequenza

Lega emissione radio a parametri dello shock osservabili

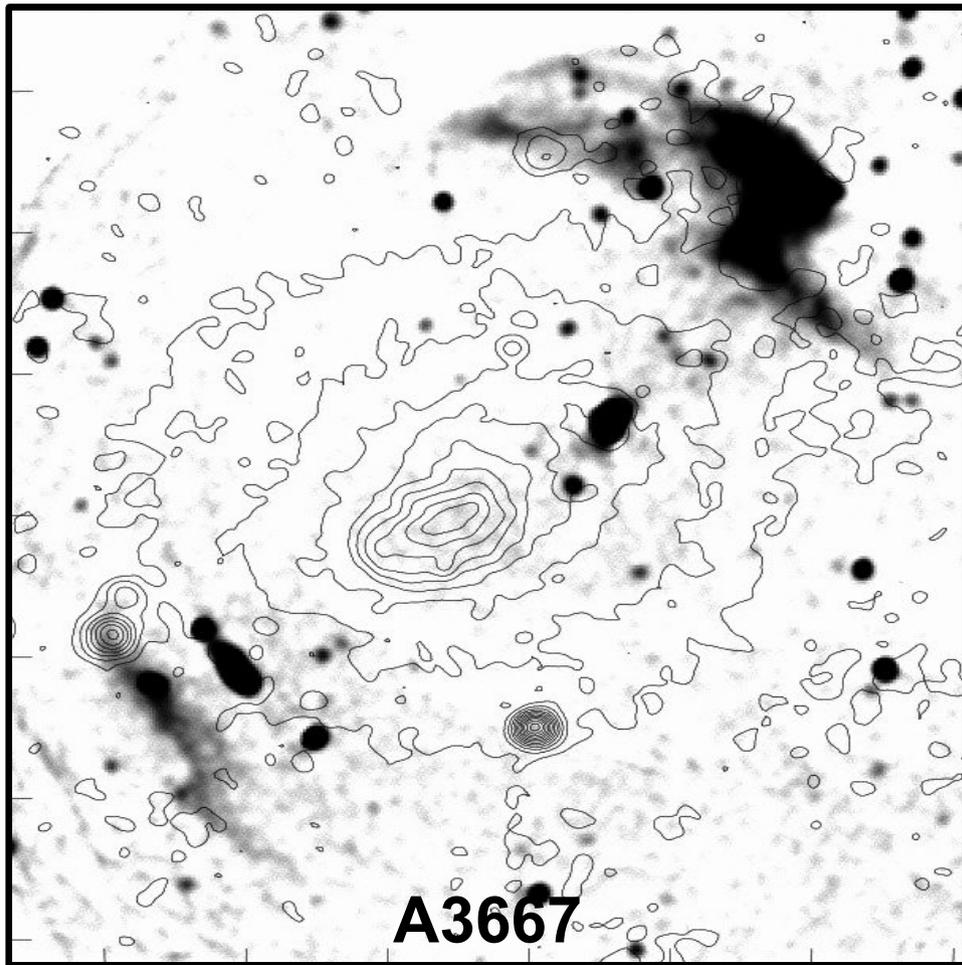
Andamento della potenza di sincrotrone a 1.4 Ghz  
 in funzione del campo  $B$  e del numero di Mach  
 (per  $T, n, v_{shock}$  ed  $A$  fissati)



Pochissima  
 emissione  
 per  $M < 3$

Hoeft & Bruggen 2007

$$\frac{dP(\nu_{\text{obs}})}{d\nu} = 6.4 \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1} \frac{A}{\text{Mpc}^2} \frac{n_e}{10^{-4} \text{ cm}^{-3}} \frac{\xi_e}{0.05} \left( \frac{\nu_{\text{obs}}}{1.4 \text{ GHz}} \right)^{-s/2} \\ \times \left( \frac{T_d}{7 \text{ keV}} \right)^{3/2} \frac{(B/\mu\text{G})^{1+(s/2)}}{(B_{\text{CMB}}/\mu\text{G})^2 + (B/\mu\text{G})^2} \Psi(\mathcal{M}).$$



*Questa formula permette di derivare i parametri dello shock, data la potenza radio, lo spettro radio, l'area del relitto e la luminosità  $X$*

$$\rightarrow \mathcal{M} \approx 4.7$$

$$\rightarrow \xi = 0.05$$

$$\rightarrow B \approx 0.2 \mu\text{G}$$

*(Hoefl & Bruggen 2007)*

**Table 1.** Observed and derived parameters for our three model relics. For all computations, we have assumed an electron density of  $n_e = 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ . LLS indicates the longest linear size of a relic. To determine the radio power of the relics, we use  $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  in order to be consistent with computations in the literature.

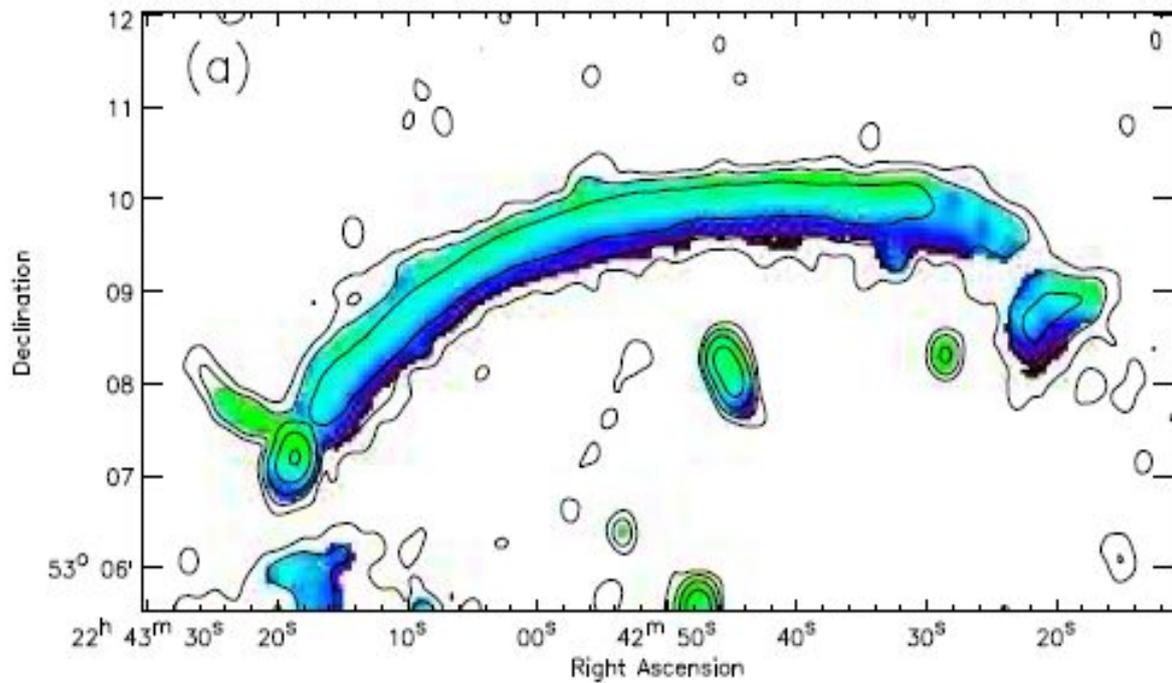
	$z$	$T$ (keV)	LLS (Mpc)	$P_{1.4}$ ( $10^{31} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$ )	$\alpha$	$M$	$B$ ( $\mu\text{G}$ )	$y_c$ (Mpc)	$\xi_B$ ( $10^{-3}$ )
Abell 115	0.1971	5	2.5	1.9	1.1	4.7	0.1	0.1	0.2
Abell 2256	0.0594	7.8	1.1	3.6	1.2	3.3	0.3	0.4	1.1
Abell 3667	0.055	8	2.0	41.0	1.1	4.7	0.2	0.3	0.5

*La maggior parte dei relitti osservati è spiegabile con*

*→ shock di  $M \approx 3-5$*

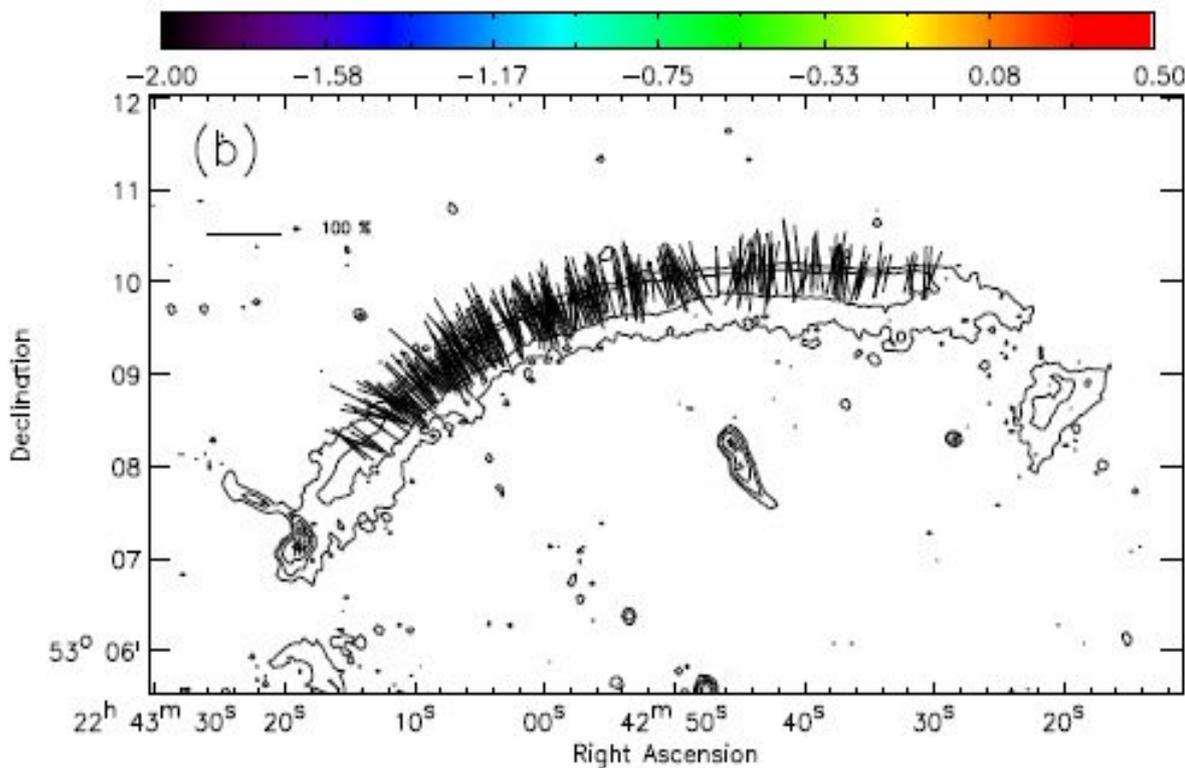
*→  $B \simeq 0.1-0.5 \mu\text{G}$*

*TUTTAVIA....*



*Osservazione recente  
(2010) del relitto  
"Salsiccia" (!)*

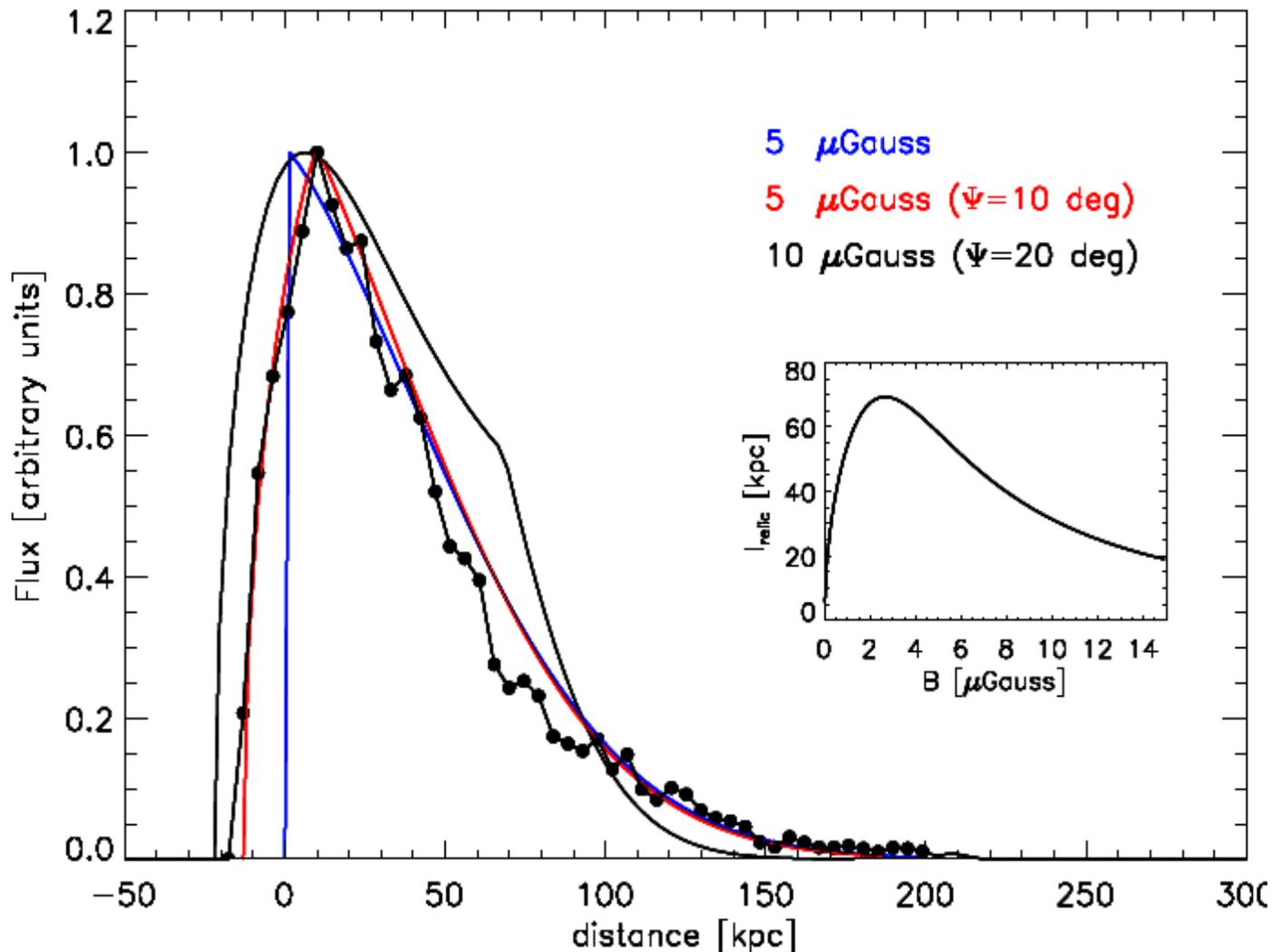
*Van Weeren et al. 2010*



*Dal profilo di emissione  
del relitto è possibile  
inferire il valore del  
campo magnetico:*

La larghezza di un relitto è data da tempo vita radiativo elettroni  $\times$  velocità post-shock

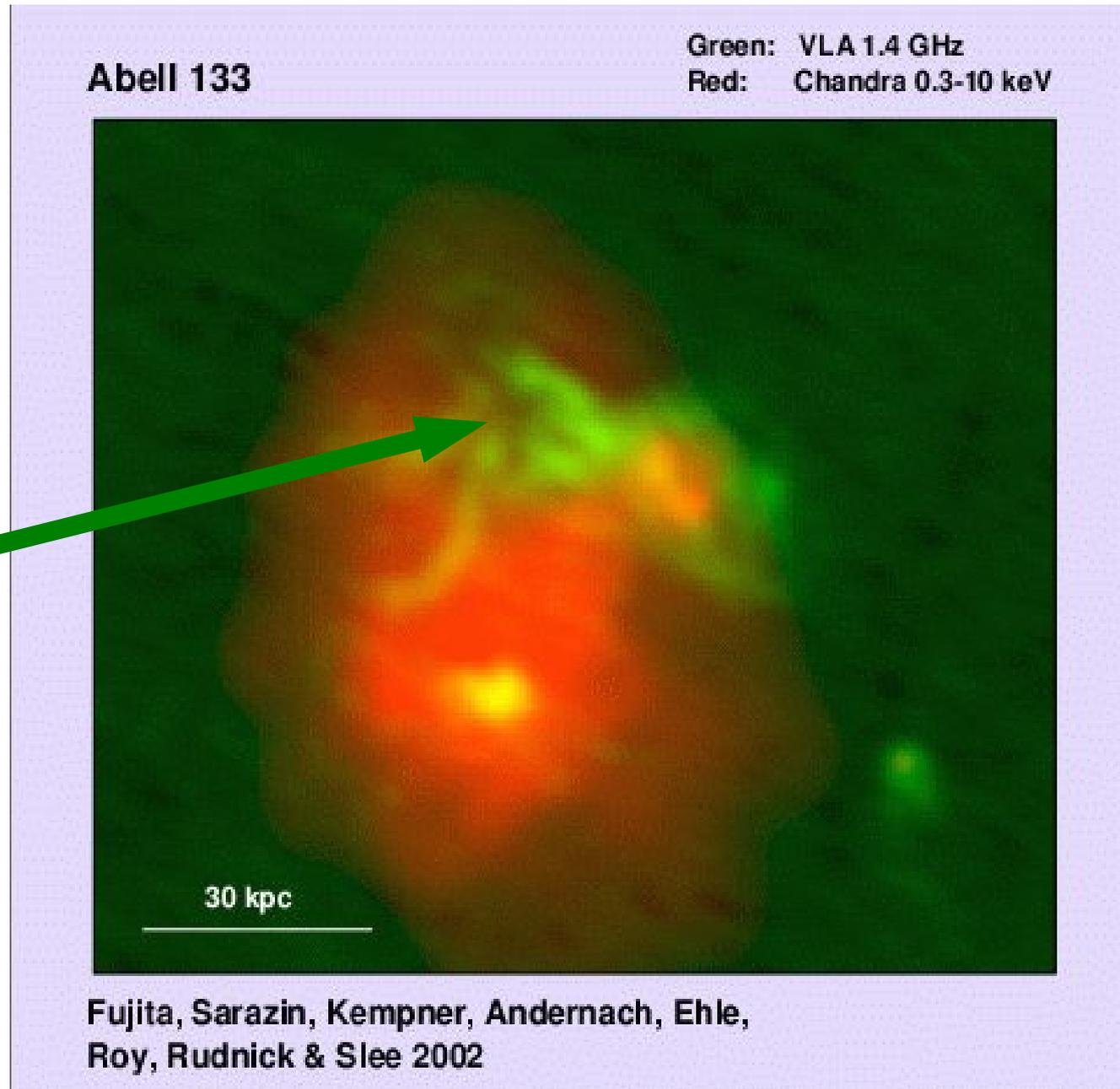
$$y_c = \frac{C_\tau v_d}{C_{\text{cool}}} \eta_c = 120 \text{ kpc} \frac{(B/\mu\text{G})^{1/2}}{(B_{\text{CMB}}/\mu\text{G})^2 + (B/\mu\text{G})^2} \left( \frac{v_{\text{obs}}}{1.4 \text{ GHz}} \right)^{s/2} \frac{v_d}{100 \text{ km s}^{-1}} \eta_c.$$



In questo relitto, lo spessore dell'emissione di sincrotrone è ben spiegata per

$$B \simeq 5 \mu\text{G}$$

# FENICI RADIO (RADIO PHOENICES)



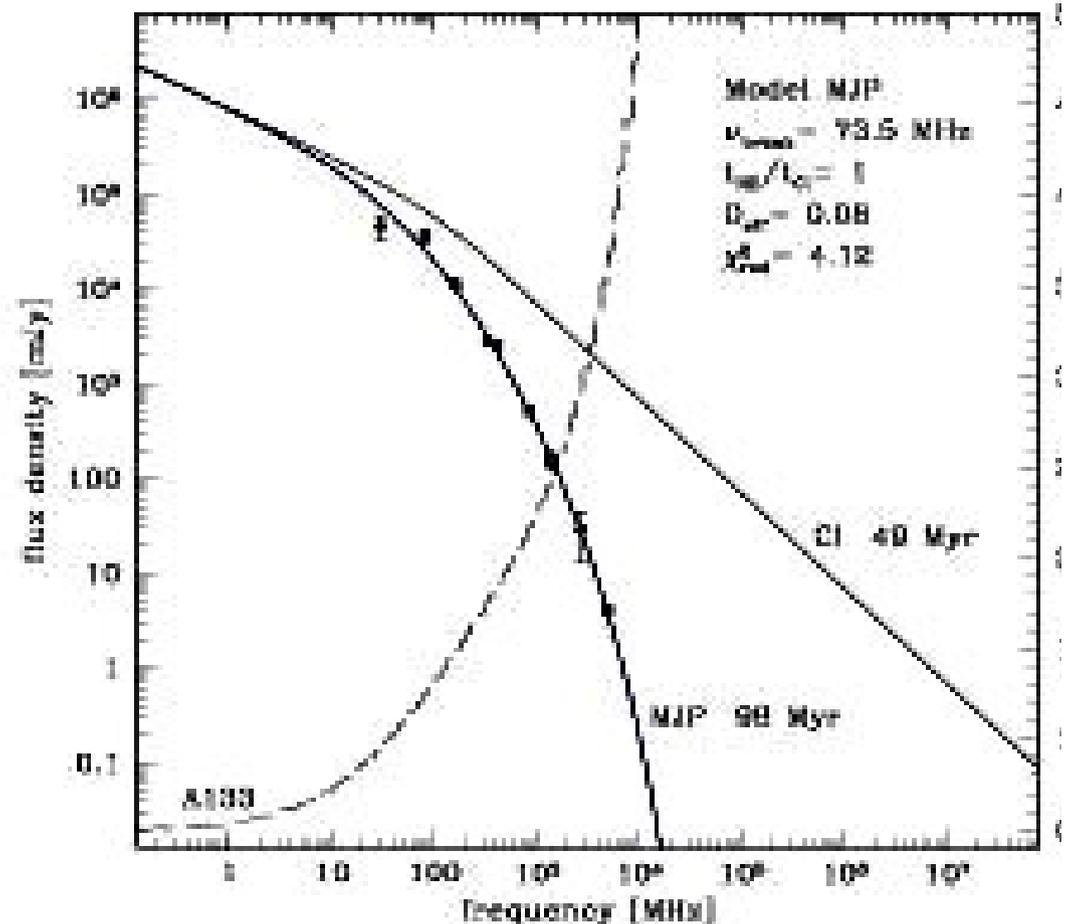
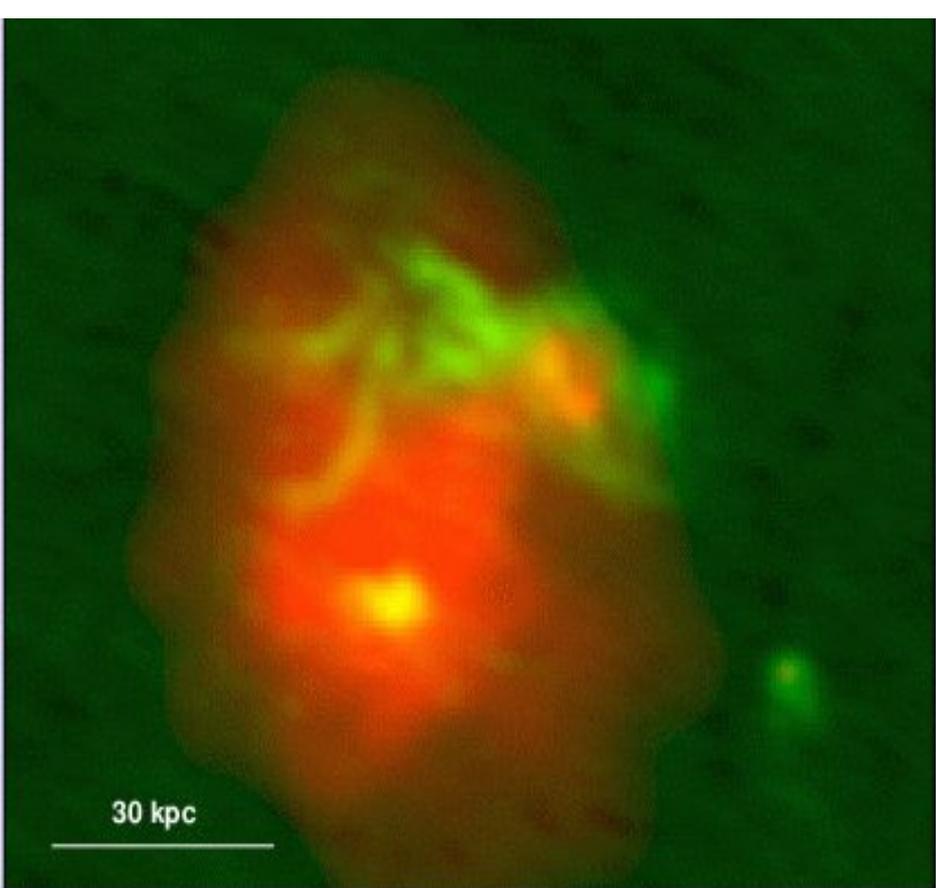
Abell 133  
 $Z=0.0566$

Relitto radio  
 $\sim 60$  kpc

# NON POWER-LAW, MA SPETTRI CURVI

$$\alpha > 2.0$$

ESEMPI: Abell 85, Abell 133...



**TIPICAMENTE COLLOCATI IN PROSSIMITA' DI SORGENTI RADIO ATTIVE**

# → MODELLO DI ENSSLIN & GOPAL-KRISHNA 2001

## 4 FASI

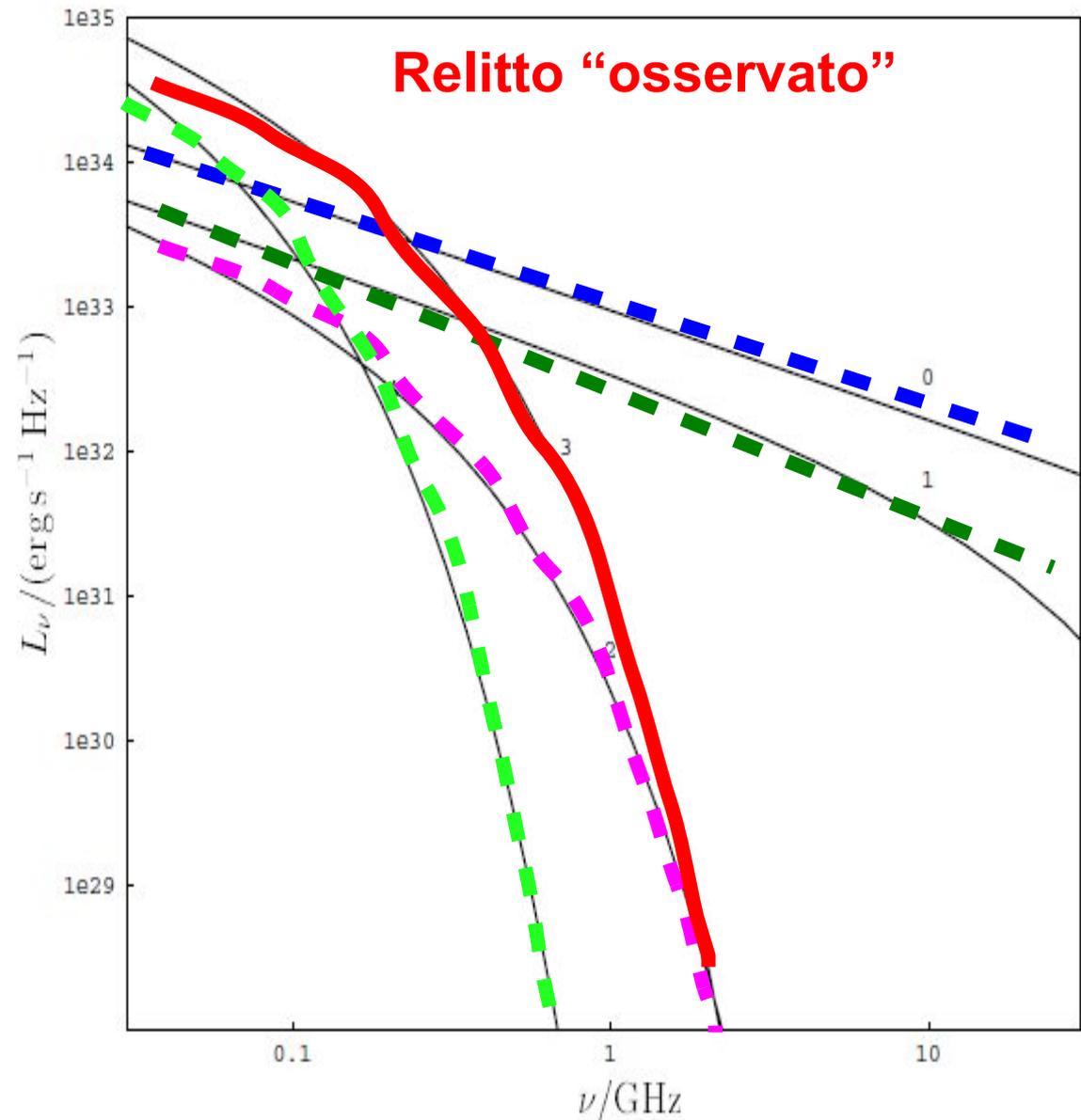
Fase 0: bolla di  $e^-$   
rilasciata da galassia

Fase 1: espansione  
adiabatica nuvola di  $e^-$

Fase 2: equilibrio con  
ICM e perdita energia  
radiativa (sync+coulomb)

Fase 3, FLASHING:  
plasma viene compresso  
adiabaticamente da shock

Fase 4: "spegimento"  
della nube



## → MODELLO DI ENSSLIN & GOPAL-KRISHNA 2001

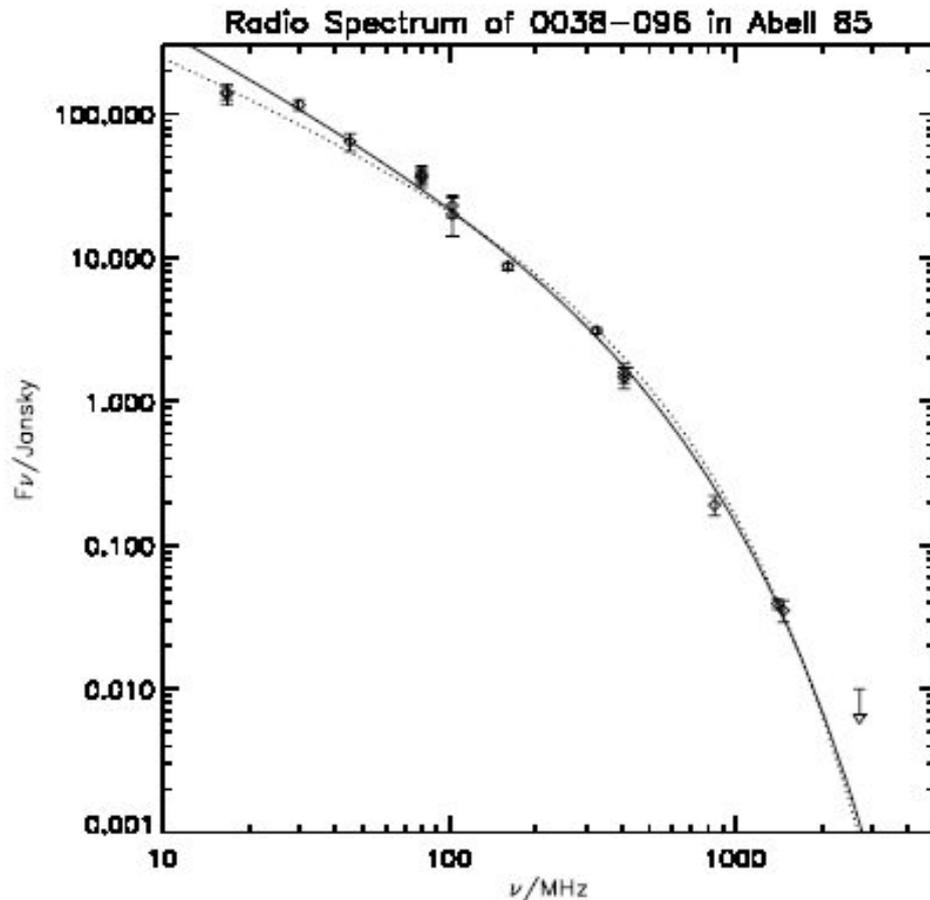


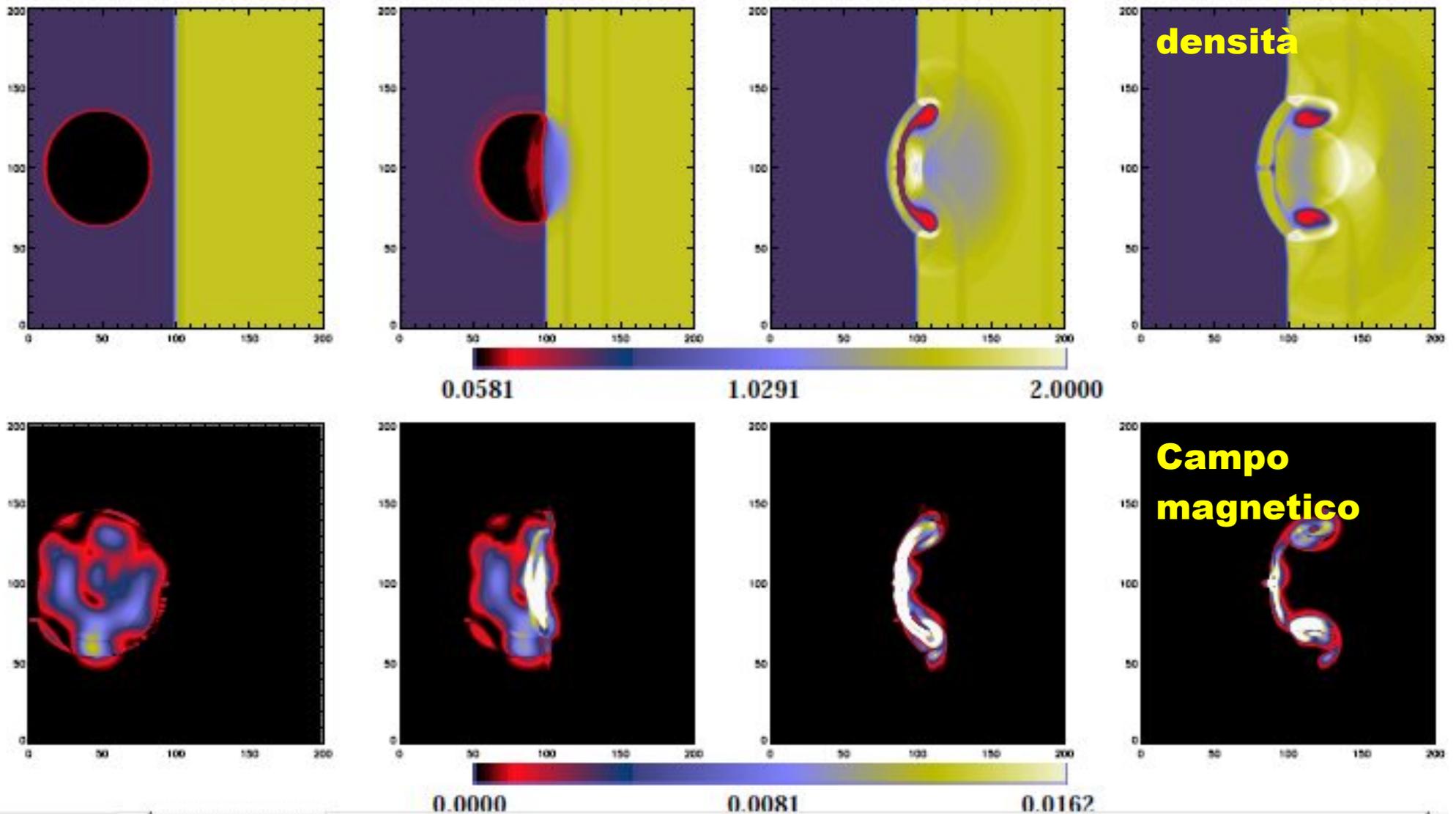
Fig. 5. Radio spectrum of the radio relic in A85. The data was compiled from the literature by Bagchi et al. (1998). The solid line is a radio spectrum resulting from the canonical form (Eq. (18)) with  $\alpha_e = 3$  and  $p_* = 11\,000 (B/\mu\text{G})^{-1/2}$ , and the dotted line one with  $\alpha_e = 2.65$  and  $p_* = 10\,000 (B/\mu\text{G})^{-1/2}$

- Spiega bene gli spettri osservati in alcuni relitti a spettro curvo

- Spiega polarizzazione del campo  $B$  di alcuni relitti

NOTA BENE: per funzionare il plasma relativistico nella “bubble” deve essere confinato rispetto a ICM

*Simulazioni numeriche di plasma relativistico  
“rivitalizzato” da shock Bruggen & Ensslin 2002;  
Hoeft et al. 2004*



# Radio relitti: **SHOCKS?**

## Relitti "a power law" e doppi:

- + Fermi I da shock spiega morfologie, spettri e statistica di relitti osservati
- campo magnetico ed efficienza di accelerazione non sono ben costretti dalla teoria

## Relitti "phoenix" (spettro curvo):

- + compressione adiabatica di "bubbles" relativistiche spiega spettro e vicinanza con galassie;
- difficoltà teorica di spiegare confinamento di gas relativistico e ICM

## Qualche referenza:

- *Hoeft & Bruggen 2007 “Radio signature of cosmological structure formation shocks”*
- *Ensslin & Gopal-Krishna 2001 “Reviving fossil radio plasma in clusters of galaxies by adiabatic compression in environmental shock waves”*