

Franco Vazza (Jacobs University Bremen)

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

~

Oggi: -Fermi II da turbolenza;

-modelli di accelerazione “macroscopici” per
aloni [teoria/osservazioni, pochi conti]

~

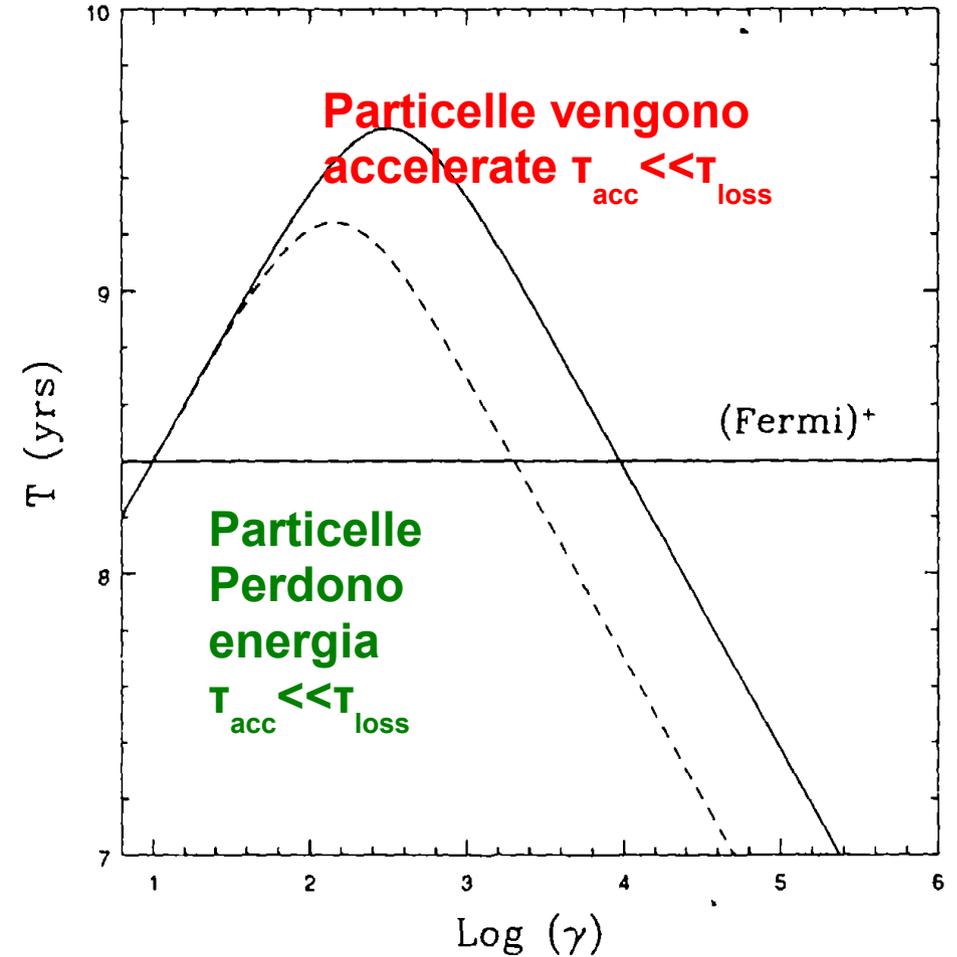
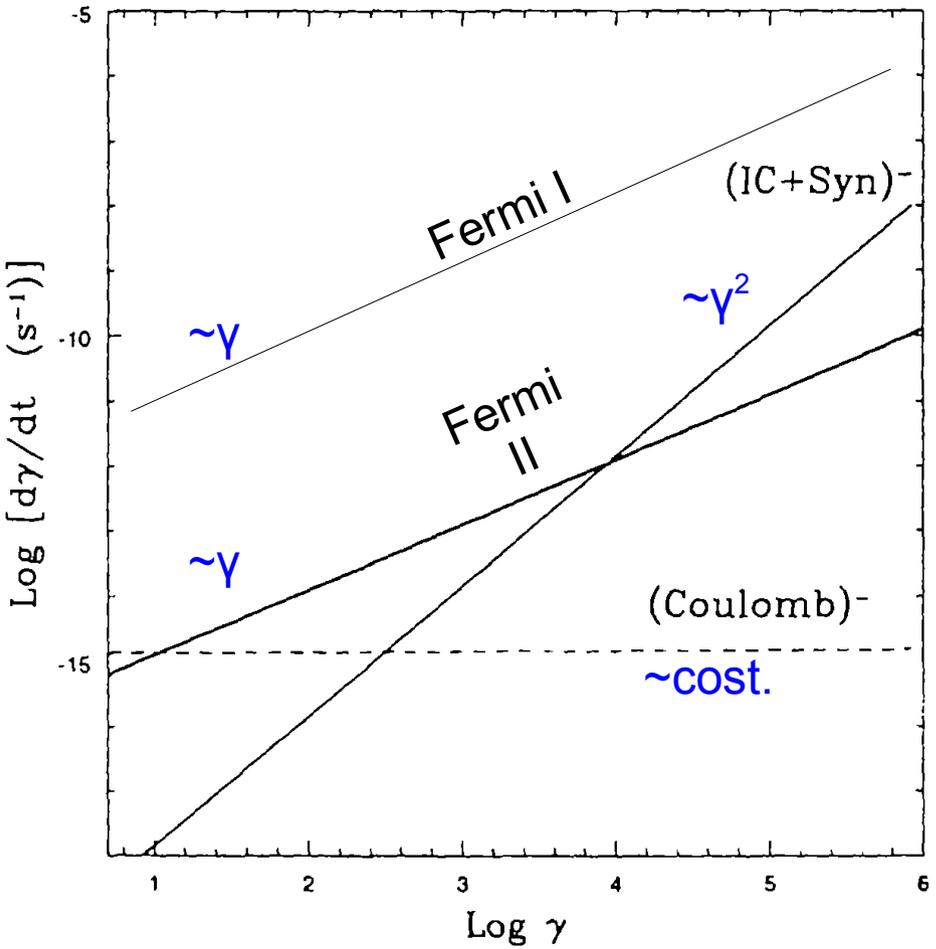
Slides qui:

[http://www.ira.inaf.it/~vazza/lezioni_bologna/
vazza_L2_slides.pdf](http://www.ira.inaf.it/~vazza/lezioni_bologna/vazza_L2_slides.pdf)

Tasso di accelerazione
in funzione del γ particelle

$$T_{loss} \sim \gamma / (d\gamma/dt)_{loss}$$

$$T_{acc} \sim \gamma / (d\gamma/dt)_{acc}$$



Per ICM turbolento, gli elettroni con $100 < \gamma < 10^4$ vengono accelerati più velocemente di quanto non perdano energia per radiazione/Coulomb losses

Stochastic Particle Acceleration

Brunetti +al. 2004, Brunetti & Blasi 2005, Brunetti & Lazarian 2007...

Esiste un set di equazioni che permette di seguire evoluzione dello spettro di particelle in ICM turbolento

Electrons/Positrons

$$\frac{\partial N_e(p, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial p} \left(N_e(p, t) \left[\left(\frac{dp}{dt} \right)_{rad} + \left(\frac{dp}{dt} \right)_i - \frac{2}{p} D_{pp} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial p} \left(D_{pp} \frac{\partial N_e(p, t)}{\partial p} \right) + Q_e(p, t)$$

D_p : momentum diffusion

Protons

$$\frac{\partial N_p(p, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial p} \left(N_p(p, t) \left[\left(\frac{dp}{dt} \right)_i - \frac{2}{p} D_{pp} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial p} \left(D_{pp} \frac{\partial N_p(p, t)}{\partial p} \right) + Q_p(p, t)$$

Q_e : "new" particles in the system

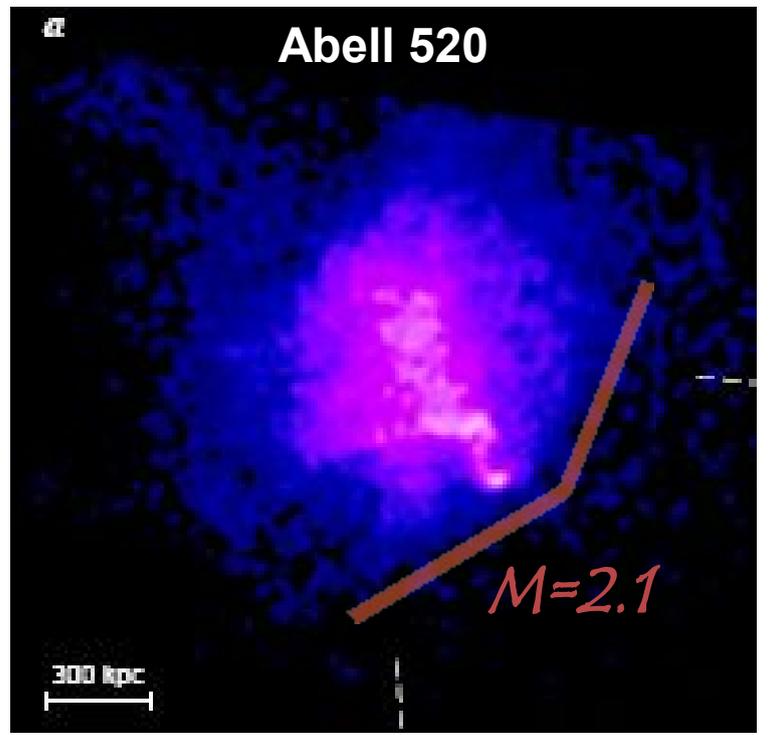
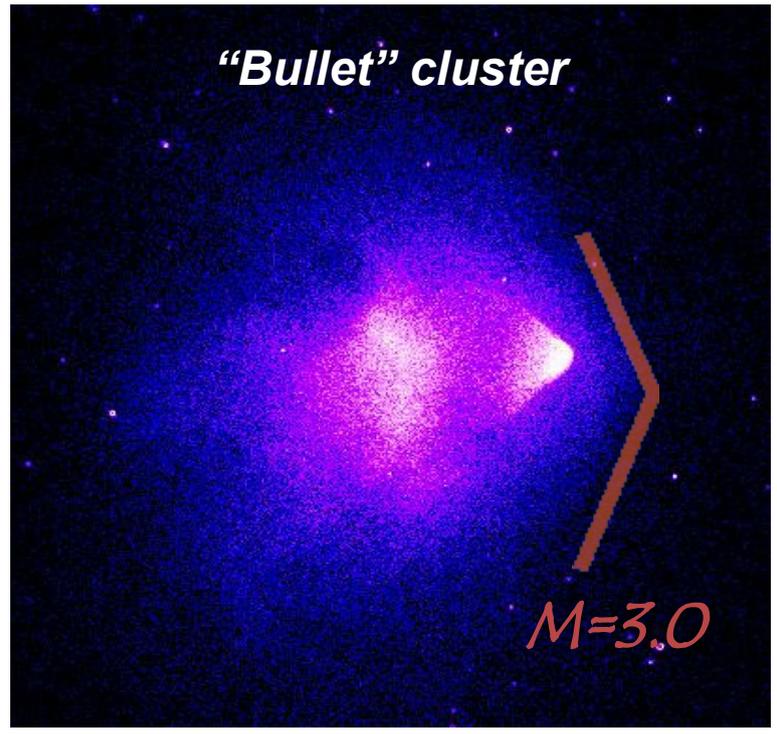
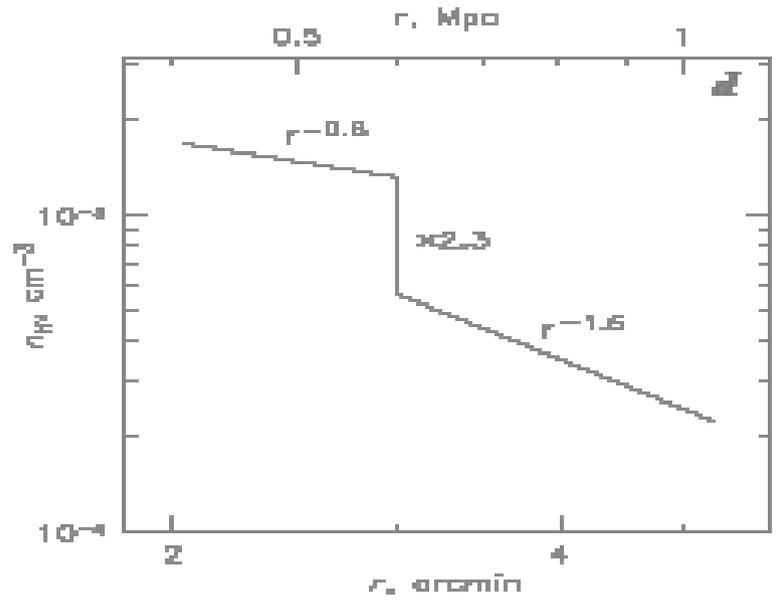
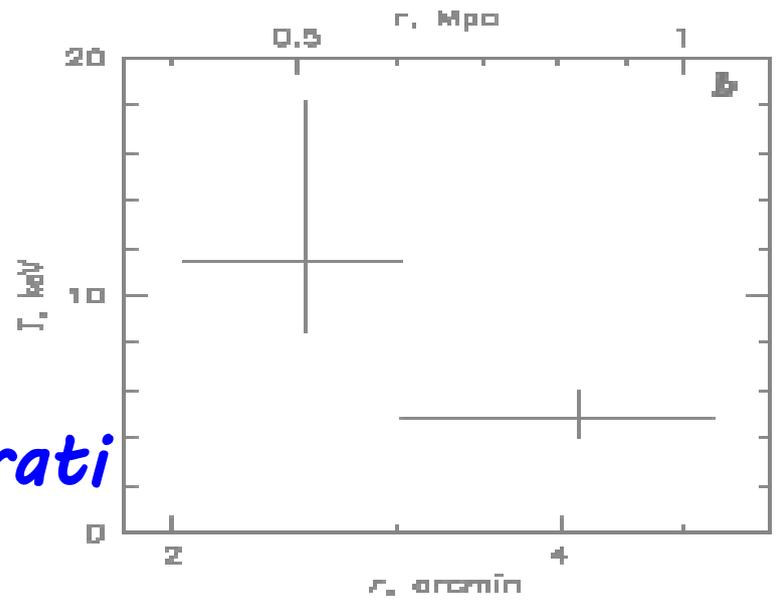
Waves

$$\frac{\partial \mathcal{W}(k, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial k} \left(k^2 D_{kk} \frac{\partial}{\partial k} \left(\frac{\mathcal{W}(k, t)}{k^2} \right) \right) - \sum_i \Gamma_i(k, t) \mathcal{W}(k, t) + I(k, t)$$

Γ =dissipazione con particelle termiche

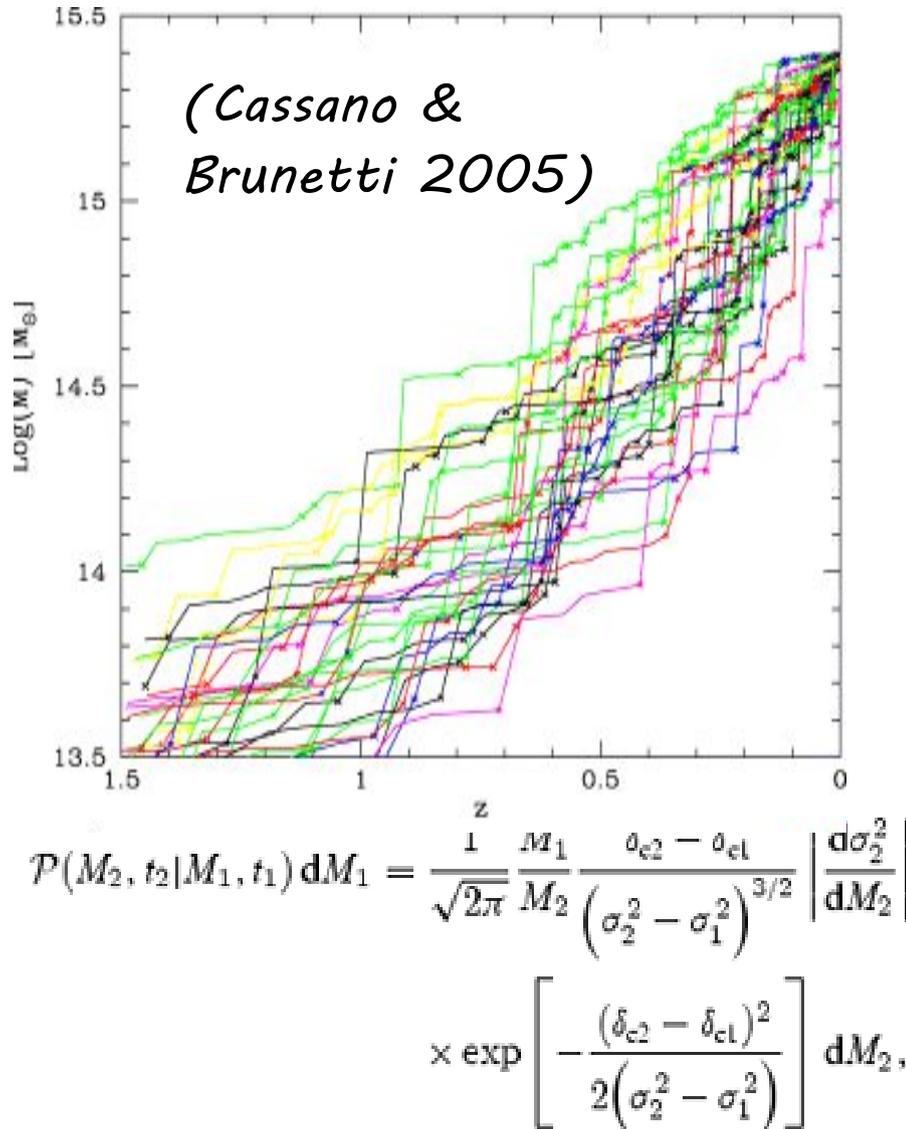
Radio aloni: *shock?*

Shock misurati
(circa 10)
sono deboli
 $M < 3$



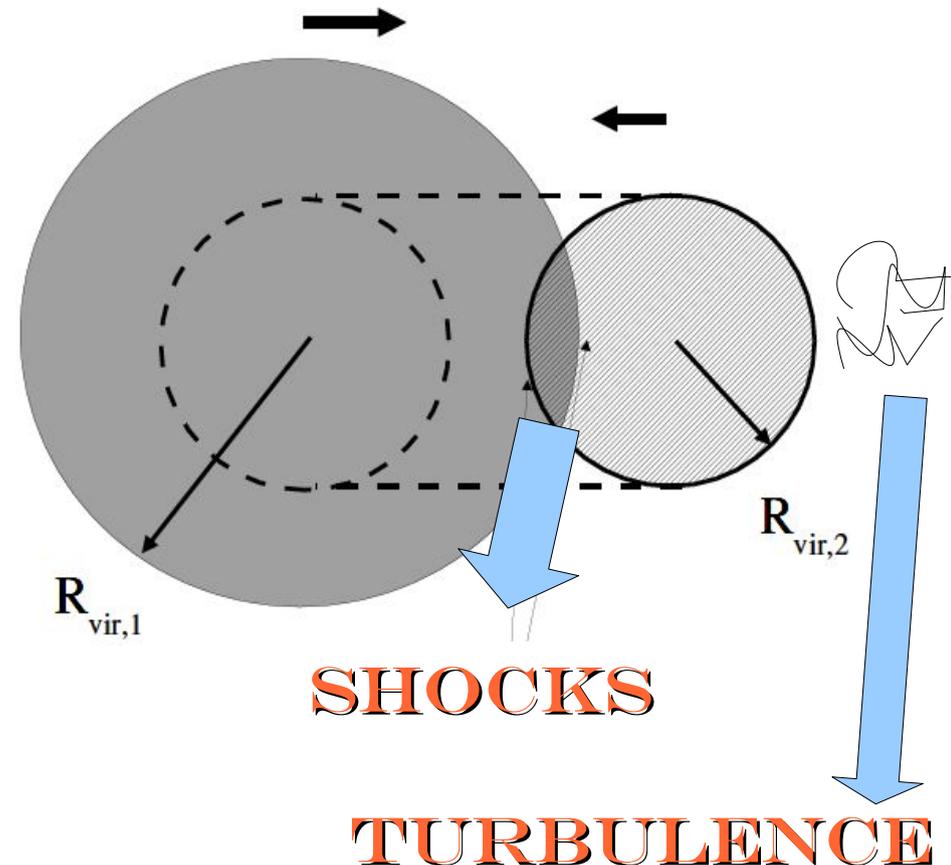
Shocks riproducono spettri osservati?

Storia dell' accrestimento di massa per aloni



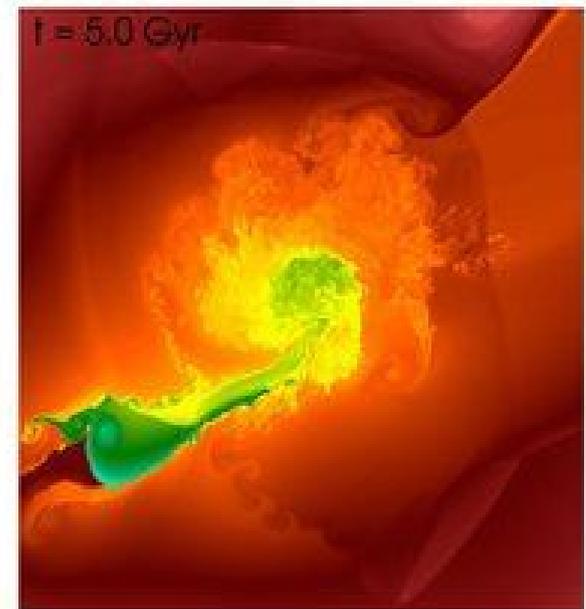
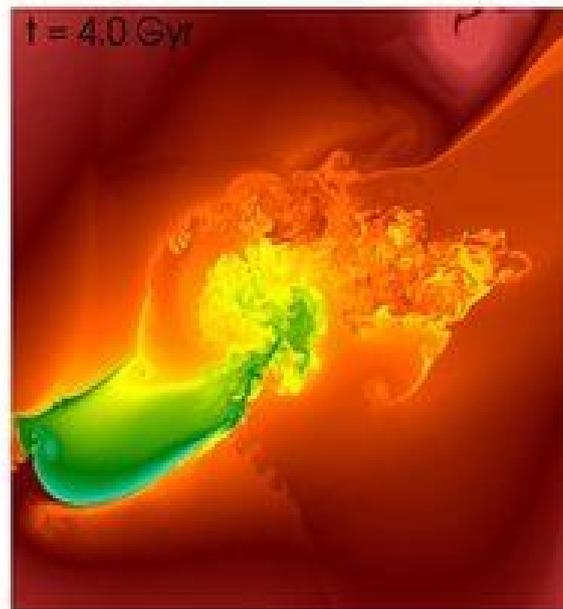
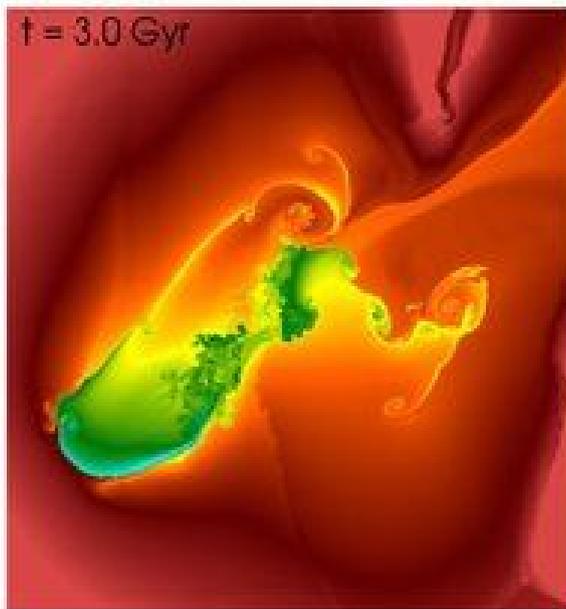
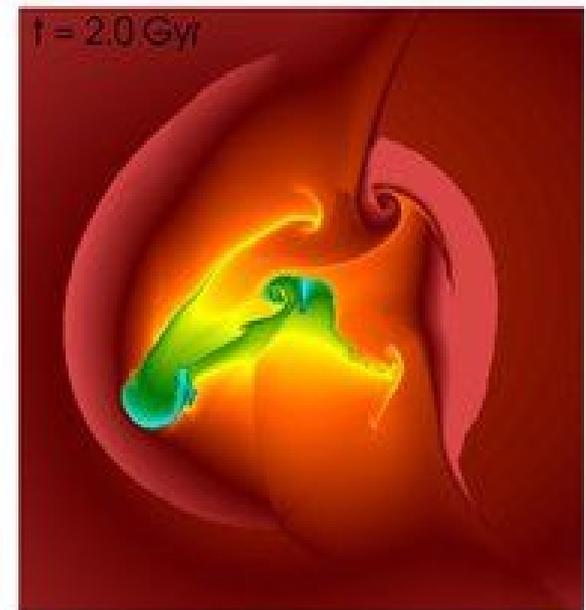
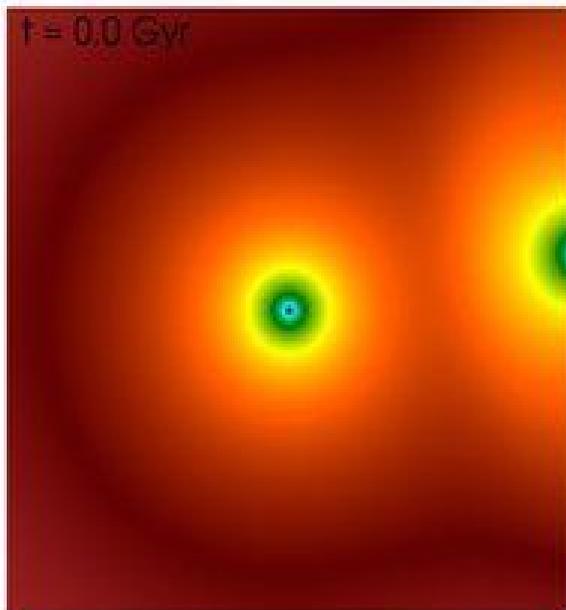
Velocità di collisione tra ammassi

$$v_i \simeq \left[2G \frac{(M_{\max} + M_{\min})}{R_{\max}} \left(1 - \frac{1}{\eta_{\text{vir}}} \right) \right]^{1/2}$$



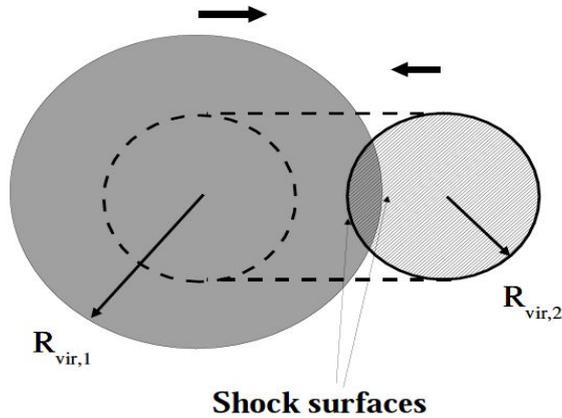
Tasso di merger - Lacey & Cole 1993

Oggi vediamo una trattazione semi-analitica del problema...



...ma solo le simulazioni possono darci una visione completa (→ martedì)

Gabici & Blasi 2003 ApJ

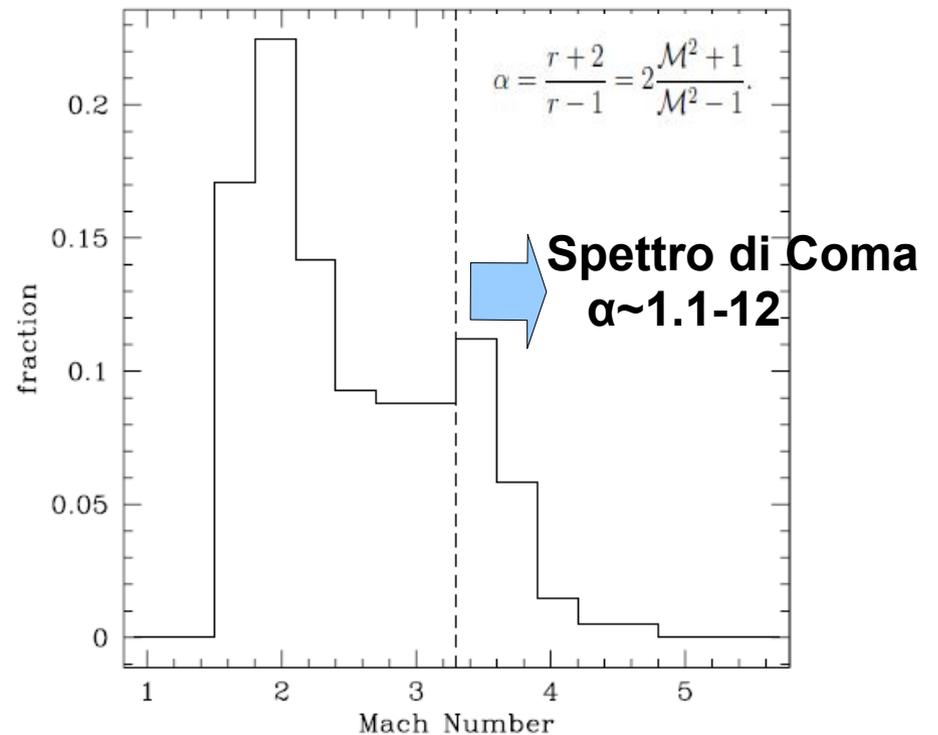
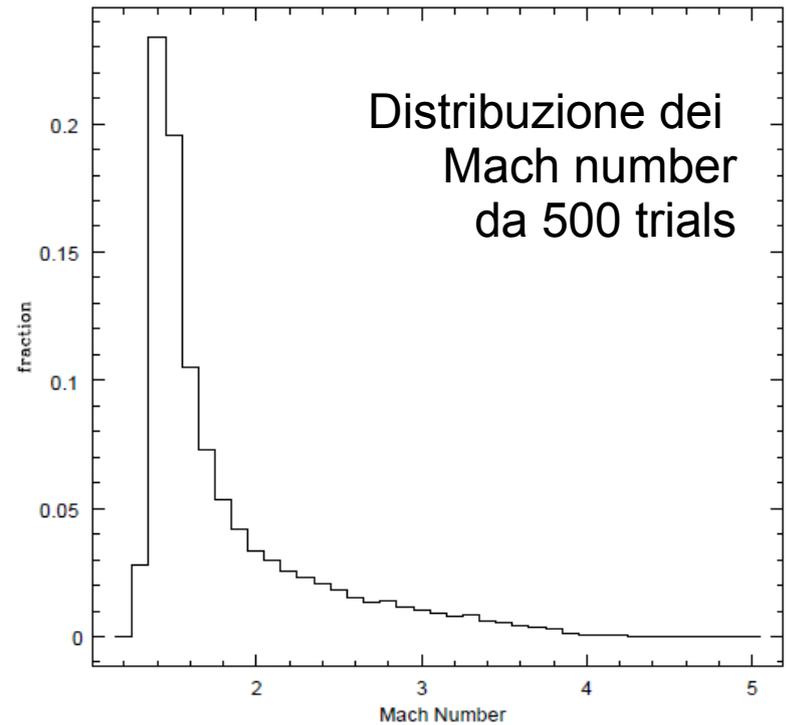


Per ogni merger:

V_i , sound speed \rightarrow Mach

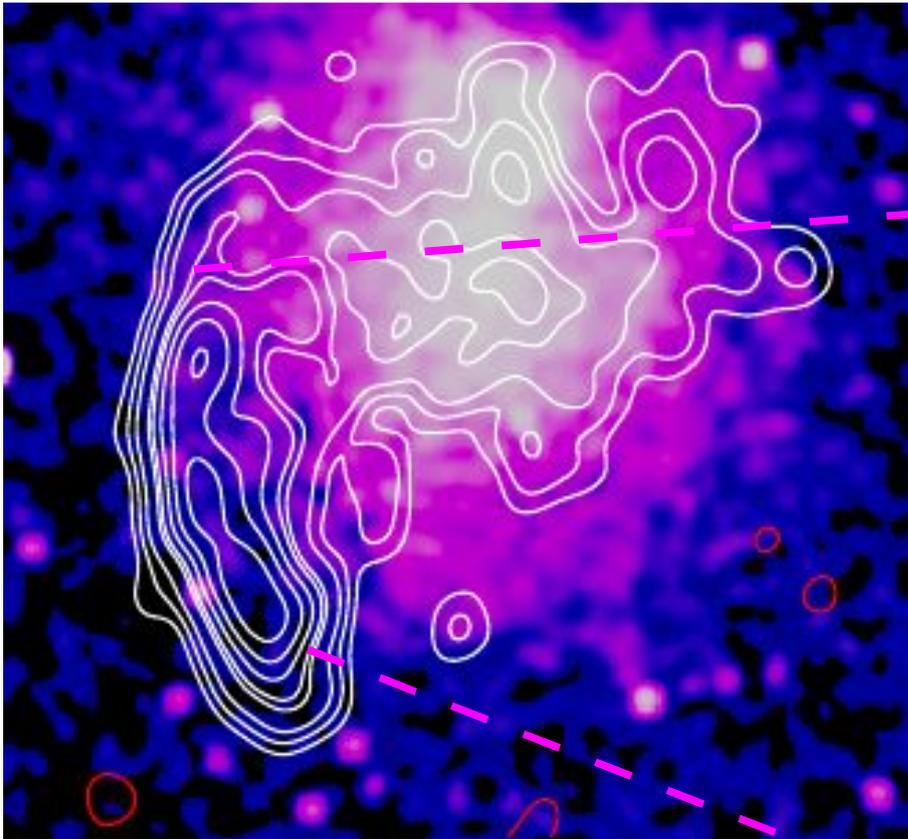
Simulazione di accelerazione e ri-accelerazione da shock in merger binary semianalitici.
 \rightarrow merger tra aloni virializzati produce $\langle M \rangle \sim 1.5$

Solo 5% merger produce spettri compatibili con Coma
(anziché ~30%)

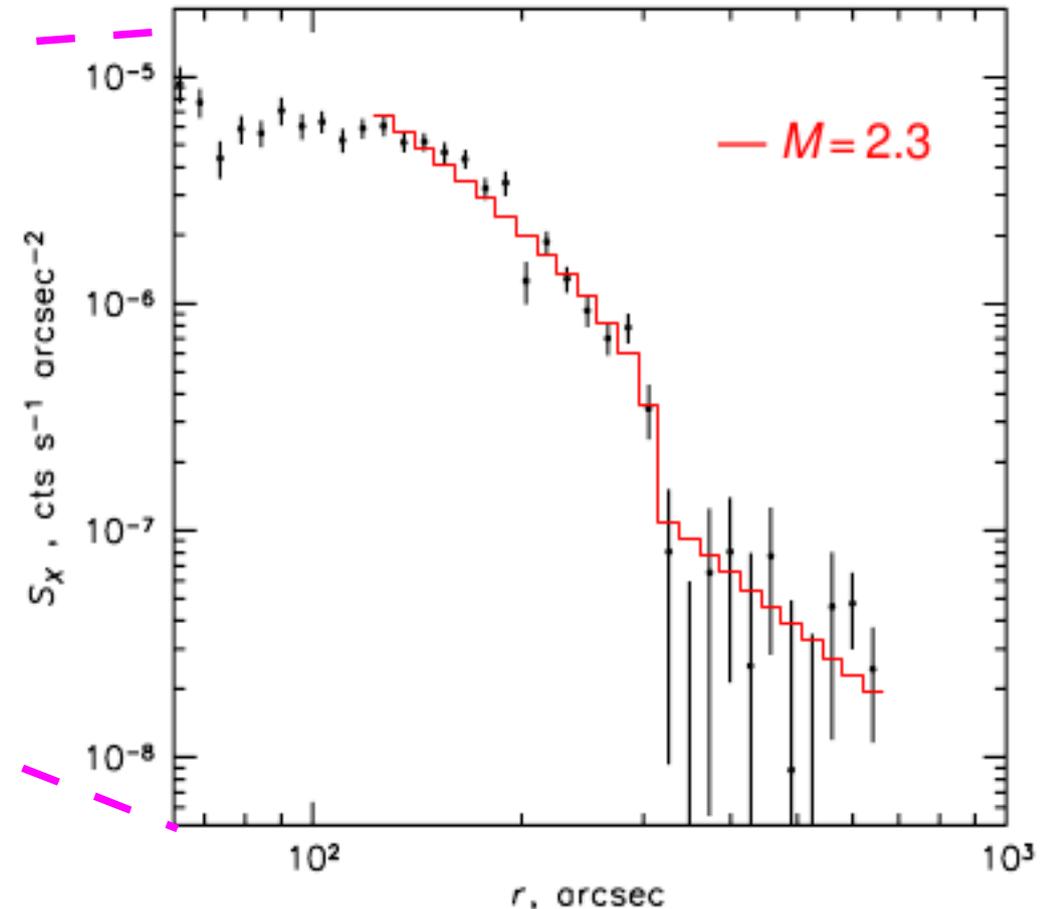


Correlazioni tra emissione radio e emissione X del ICM: Shocks?

relitto e shock
nell'ammasso Abell 521



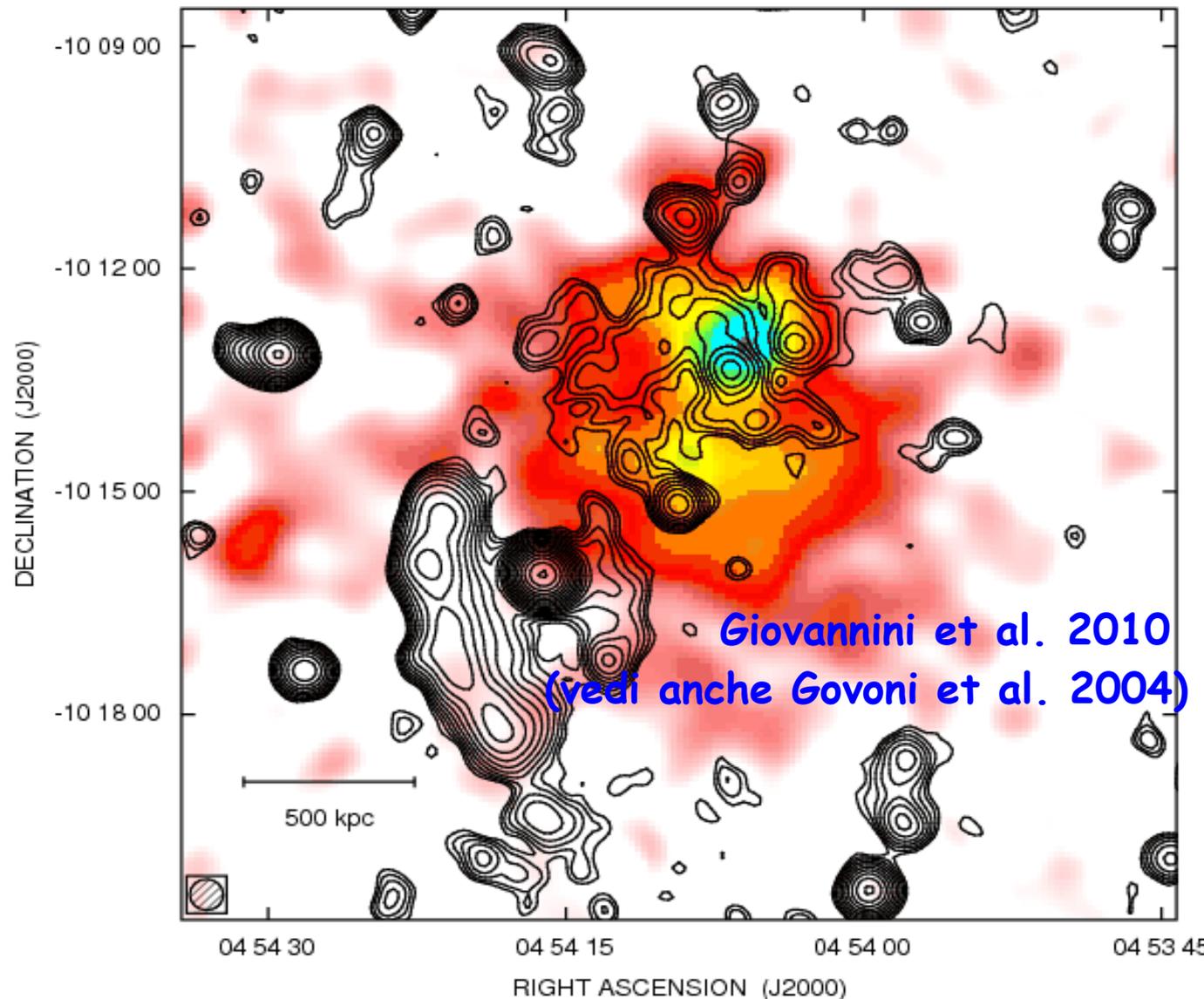
Giacintucci et al. 2007
Macario et al. 2010



Relitto /shock
ed alone nello
stesso cluster,
ma non
spazialmente
connessi a
tutte le
frequenze
(i.e. 1.4GHz)

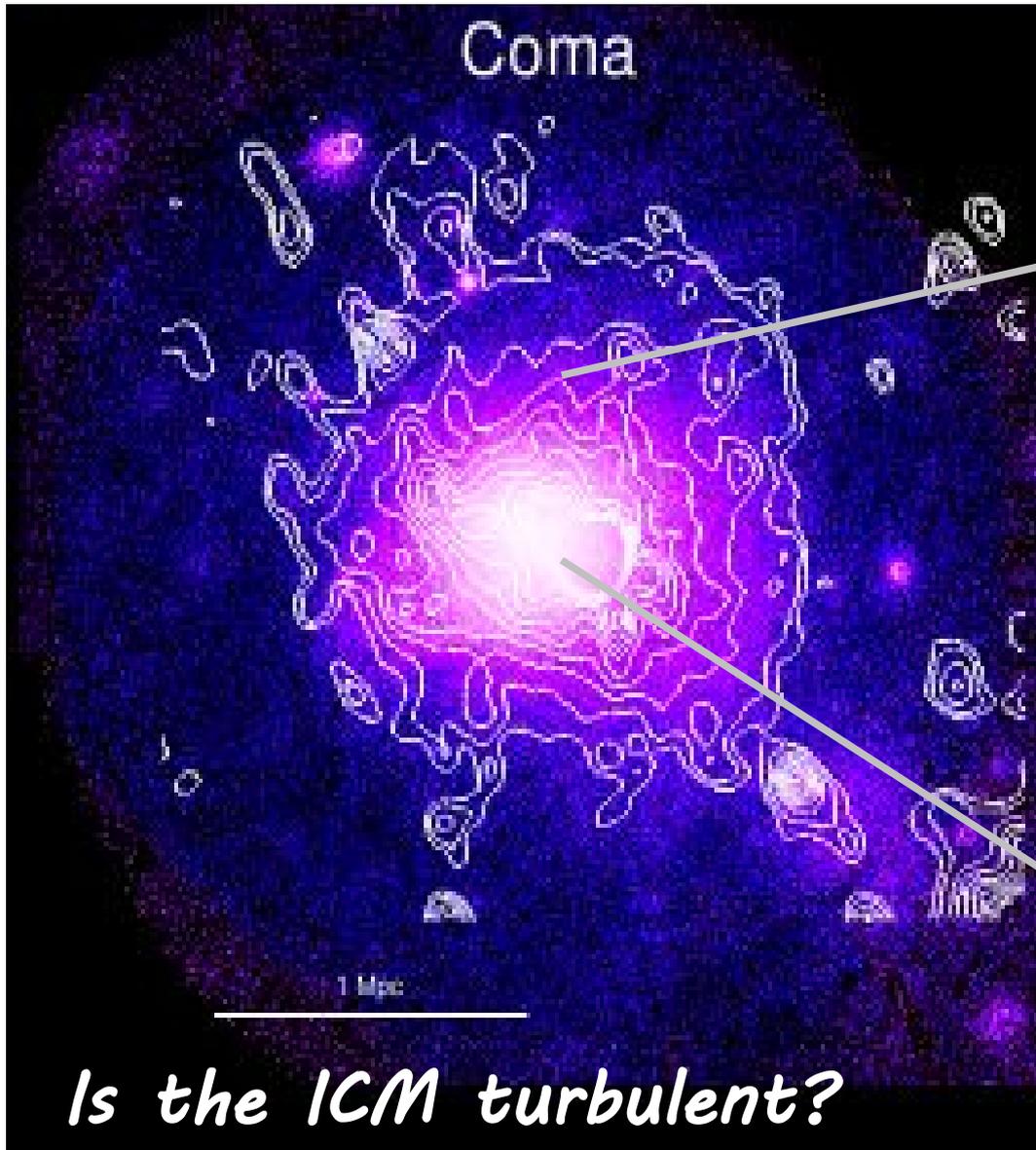
• È vero che shock
sono osservati in
molti sistemi con
Alone Radio
MA

• La connessione spaziale shock/alone è molto incerta,
spesso c'è discontinuità in brillantezza → ~~modello SHOCKS~~



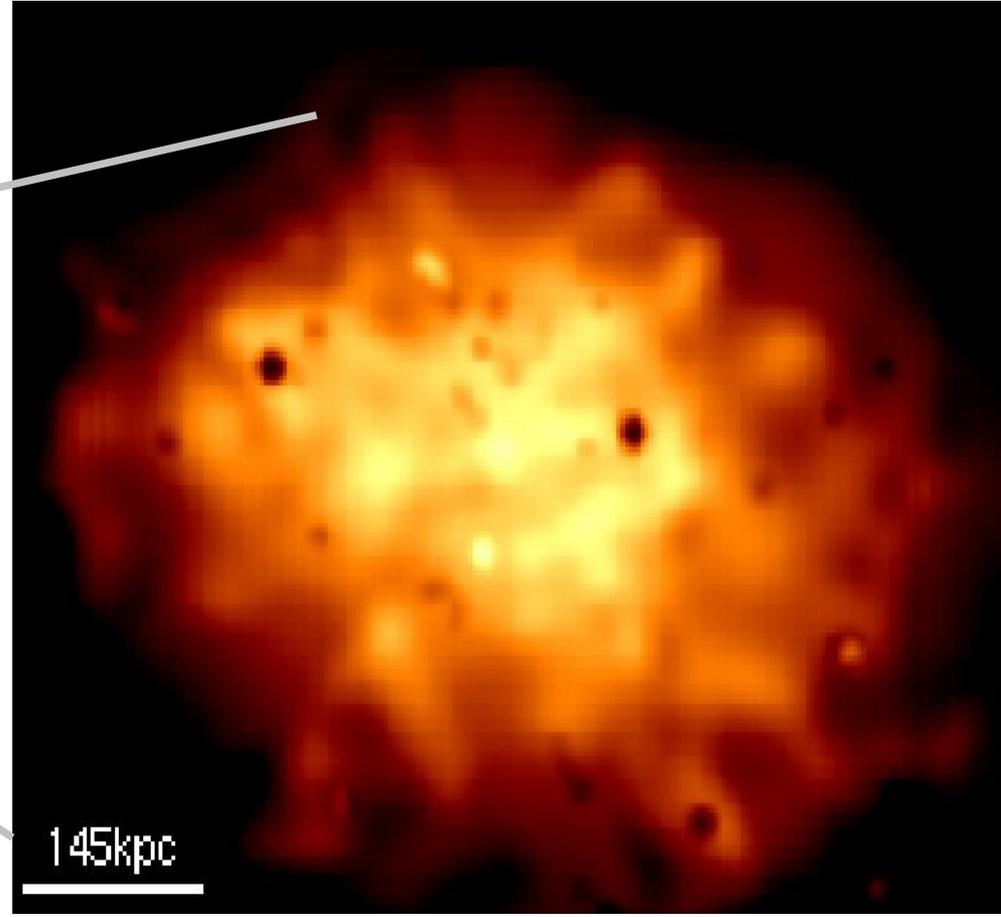
Radio aloni: *turbulenza?*

Projected pressure fluctuations in Coma (XMM)



Is the ICM turbulent?

Brown et al. 2011



Schuecker et al. 2004

$$(\sigma_v^2)^{1/2} \sim 0.4 c_s$$

Turbulent re-acceleration model

(Schlickeiser+1987; Brunetti +2001; Cassano & Brunetti 2005)

- Idea base:
- 1) MERGERS producono turbolenza nell'ICM, in modo intermittente (~ 1 Gyr)
 - 2) turbolenza produce spettro di onde MHD
 - 3) onde MHD accelerano particelle (e^- & p^+) tramite vari processi di tipo Fermi II

- Conseguenze:
- 1) spettro curvo (Fermi II vs perdite)
 - 2) profilo "piatto"
 - 3) collegamento con merger
 - 4) intermittenza merger/non merger

Turbulent re-acceleration model

(Schlickeiser+1987; Brunetti +2001; Cassano & Brunetti 2005)

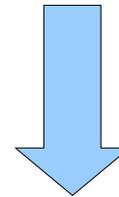
Energia turbolenta iniettata

$$\frac{E_t}{\tau_{\text{cross}} \times V_H} \approx \frac{\bar{\rho}_{\text{max},s}}{R_{\text{max}}} v_i^3 \left(\frac{V_i}{V_H} \right).$$



Spettro di onde MHD

$$\int_{k_{\text{min}}}^{k_{\text{max}}} I_0 k^{-\alpha} dk = \eta_t \frac{E_t}{\tau_{\text{cross}} \times V_H}$$



Accelerazione

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\text{acc}}^{\text{sys}} = 2 \frac{D_{\text{PP}}}{p}$$



$$D_{\text{PP}}(p, t) \approx 4.45 \pi^2 \frac{v_M^2}{c} \frac{p^2}{B^2} \int_{k_{\text{min}}}^{k_{\text{max}}} k W_k^B(t) dk.$$

Evoluzione spettrale delle onde MHD

$$\frac{\partial W_k(t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial k} \left(D_{kk} \frac{\partial W_k(t)}{\partial k} \right) - \sum_{i=1}^n \Gamma^i(k) W_k(t) + I_k(t).$$

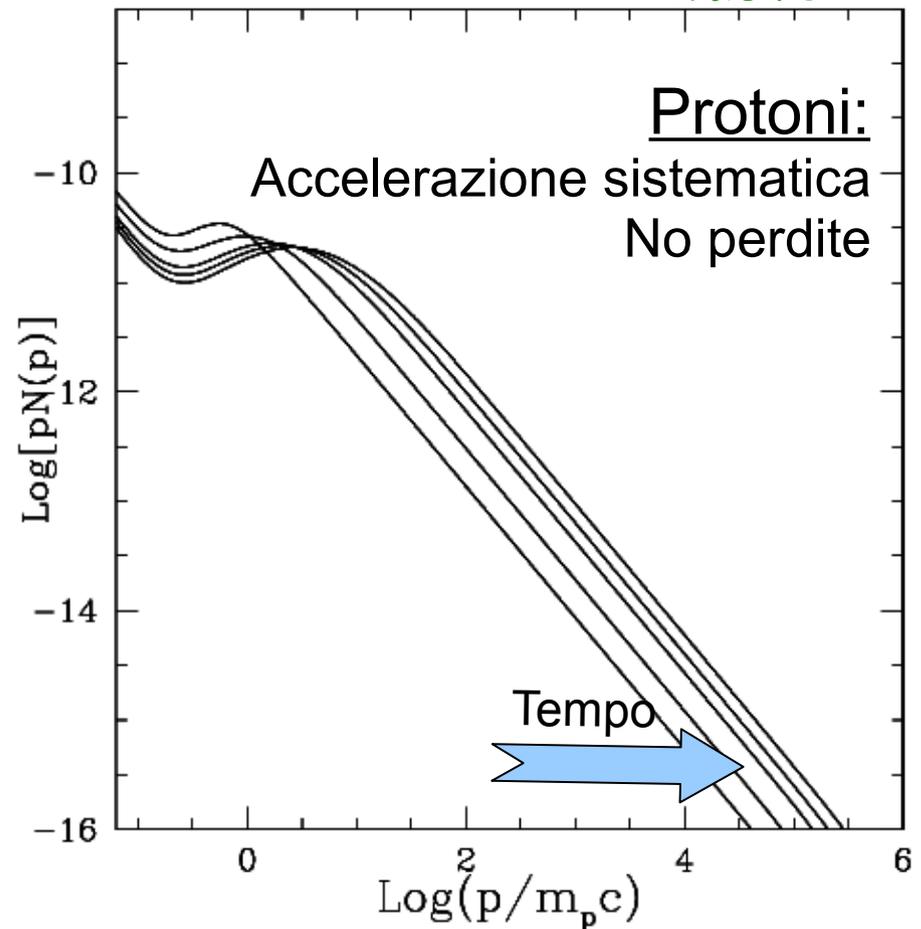
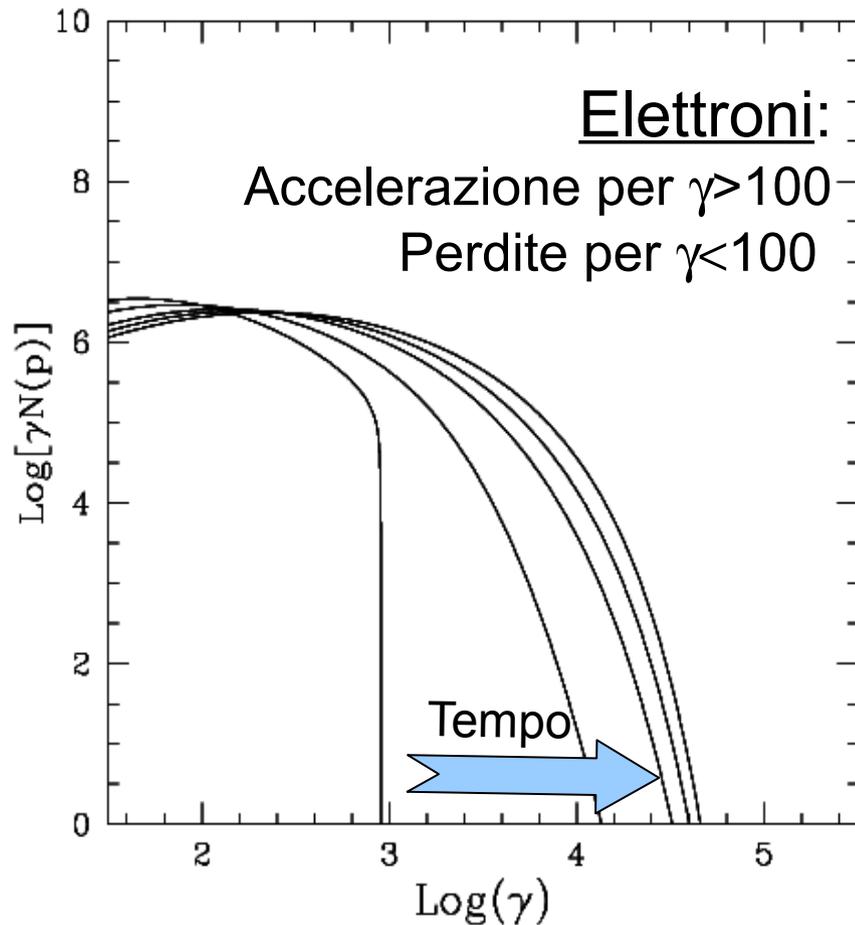
D_{kk} =diffusione onde
 Γ =dissipazione termica
 $I(t)$ =iniezione onde

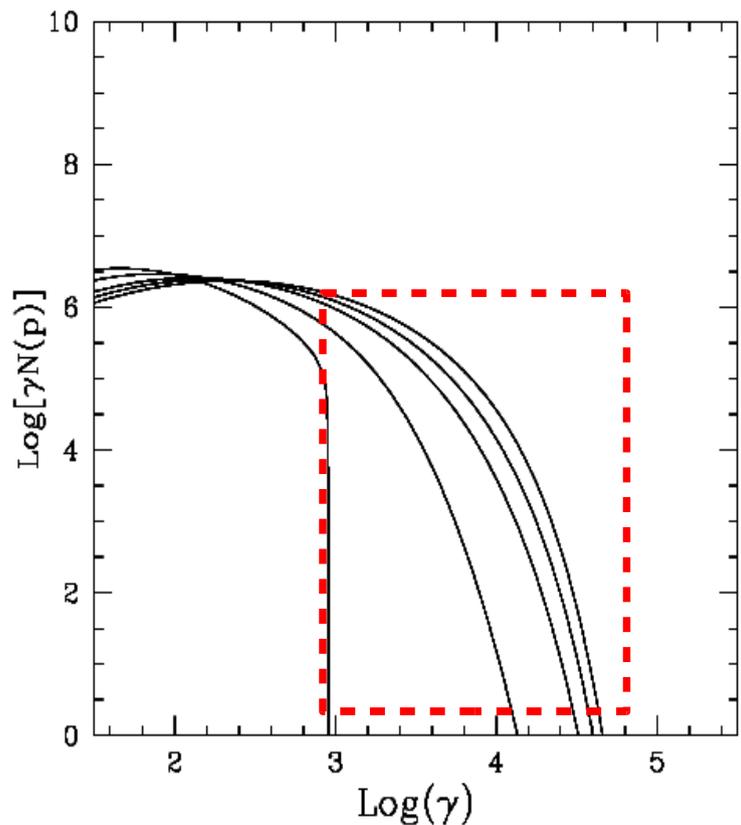
v_m = velocità Alfvén + velocità ioni

$k_{\text{min}} \sim \pi/r_s$ $k_{\text{max}} \sim$ proton Larmor radius

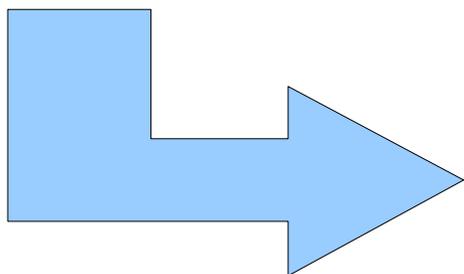
Fokker-Planck: evoluzione dello spettro di elettroni

$$\frac{\partial N_e(p, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial p} \left(N_e(p, t) \left[\underbrace{\left(\frac{dp}{dt} \right)_{rad} + \left(\frac{dp}{dt} \right)_i}_{\text{perdite}} - \frac{2}{p} D_{pp} \right] \right) + \underbrace{\frac{\partial}{\partial p} \left(D_{pp} \frac{\partial N_e(p, t)}{\partial p} \right)}_{\text{accelerazione}} + \underbrace{Q_e(p, t)}_{\text{Particelle "nuove"}}$$



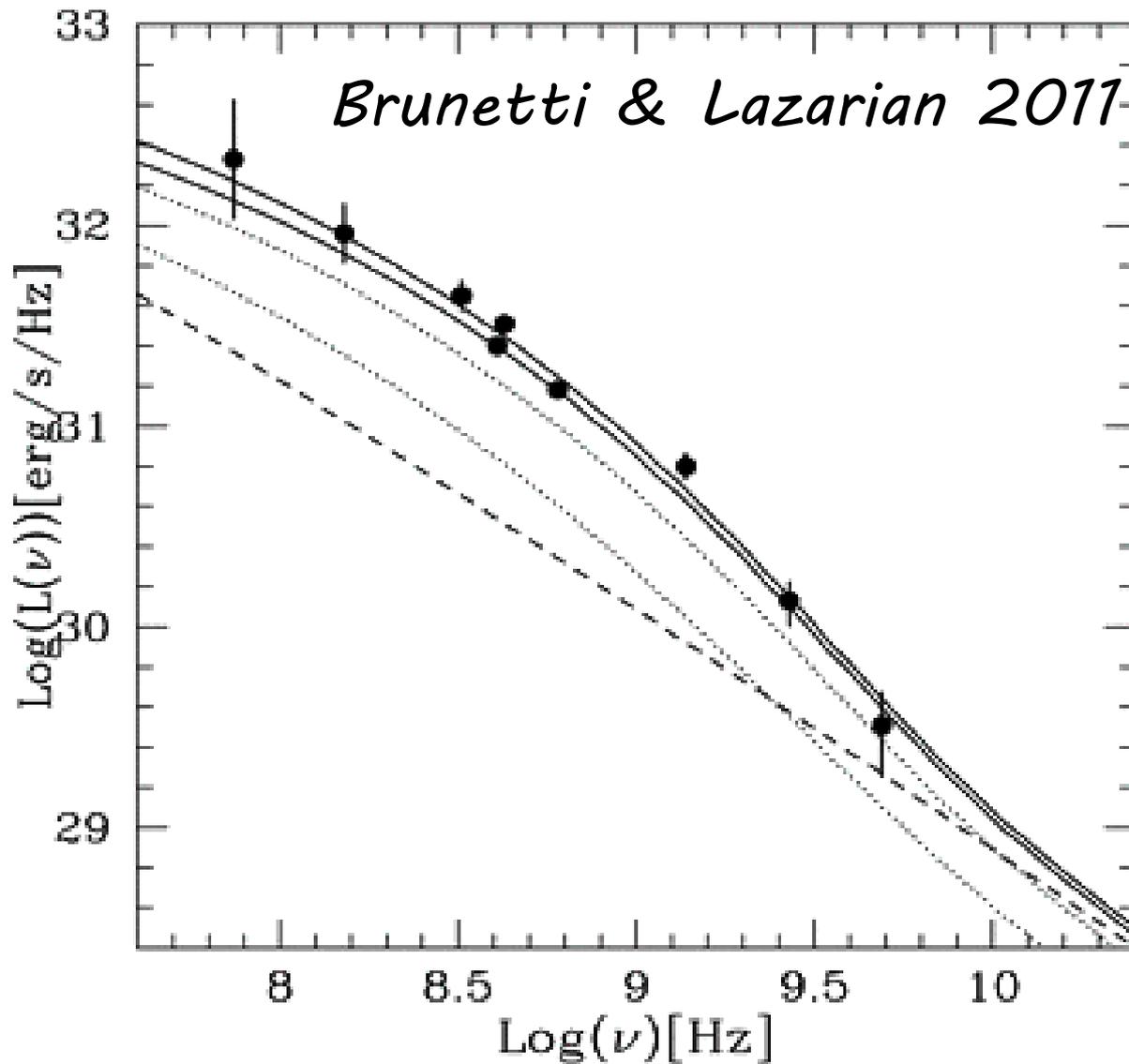


Relativistic electrons
+ magnetic field

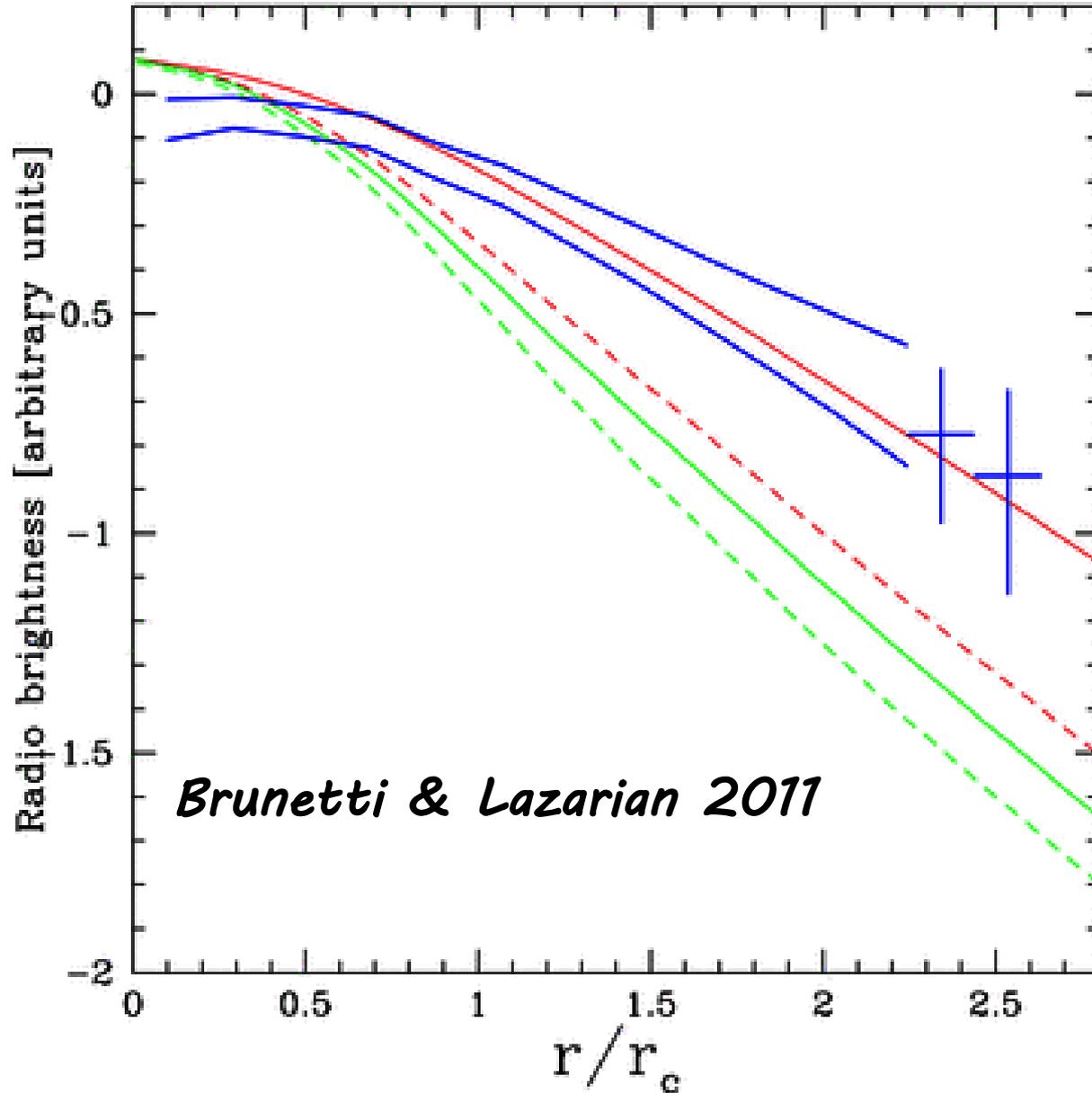


sincrotrone

Spettro di Coma (punti)
Spettro da ri-accelerazione
(per varie epoche)



*Profilo radiale dell'emissione radio
(330MHz) in Coma*

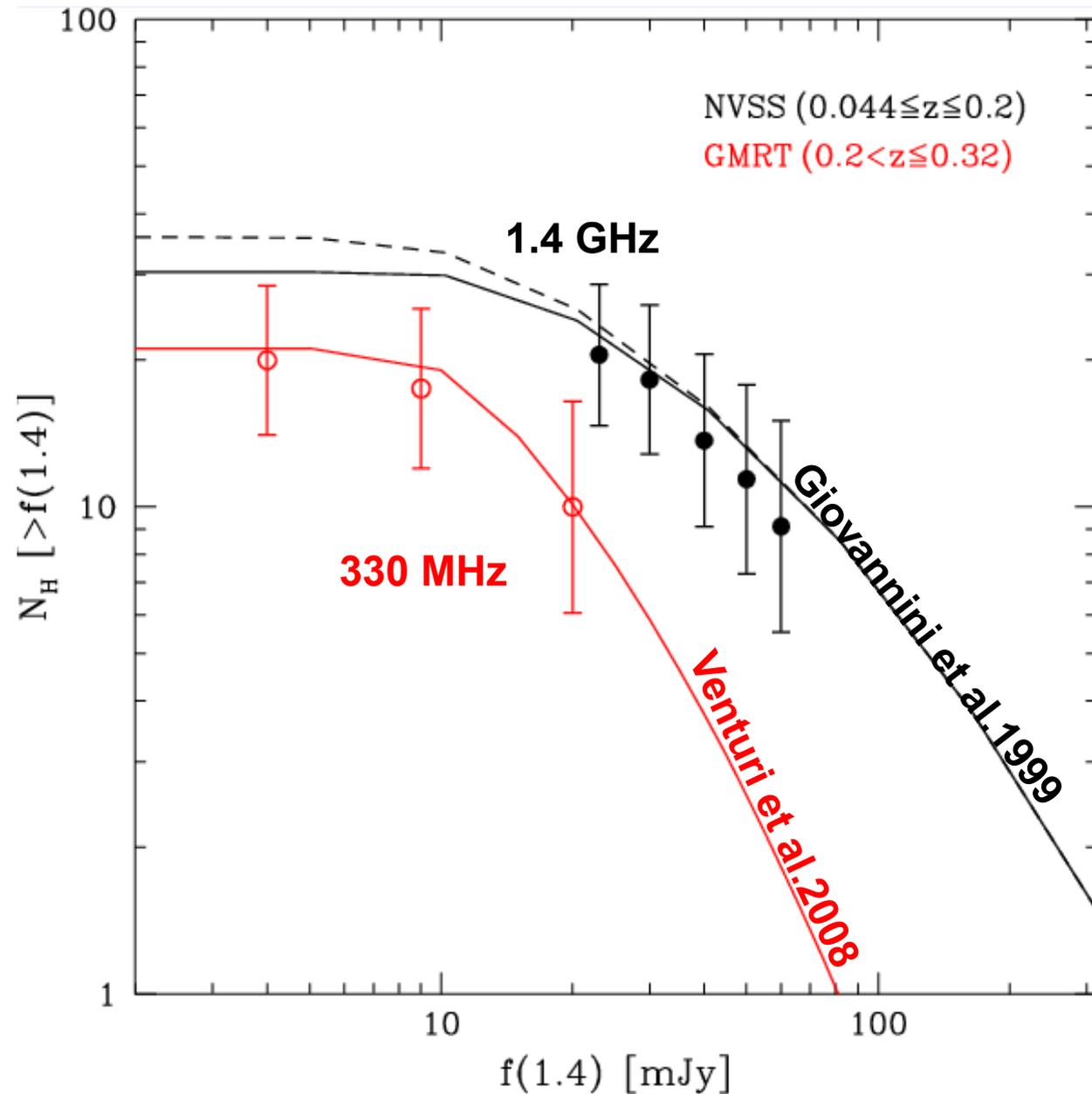


Re-acceleration model

Re-accel. + lower B field

*PROFILO OSSERVATO
(da Govoni et al. 2001)*

*Conteggi attesi di aloni radio da ri-
accelerazione (Cassano et al. 2010)*



Radio aloni: *turbulenza?*

PRO:

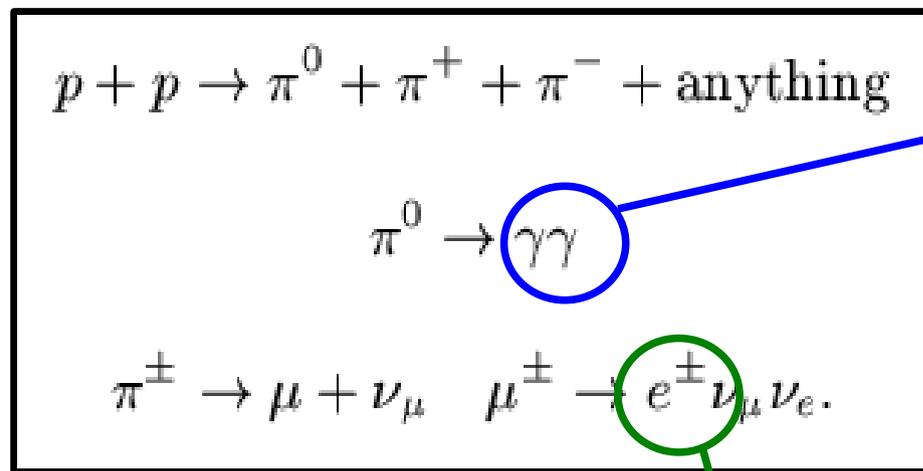
- 1) modelli collegano in modo naturale merger & aloni, intermittenza
- 2) dimensioni, profilo radiale e spettri emessi vengono riprodotti bene
- 3) necessitano di poca energia in protoni

CONTRO:

- 1) elettroni con $\gamma \sim 100$ devono essere ipotizzati a priori
- 2) molti parametri liberi
- 3) difficoltà di testare con simulazioni (vedremo giovedì)

Radio aloni: **elettroni secondari**?

Protoni relativistici (per esempio da shock o AGN)
collidono con protoni/nucleoni termici dell'ICM
→ **CASCATA DI REAZIONI**



FOTONI GAMMA
(TeV)

ELETTRONI + CAMPO
SECONDARI MAGNETICO

SINCROTRONE

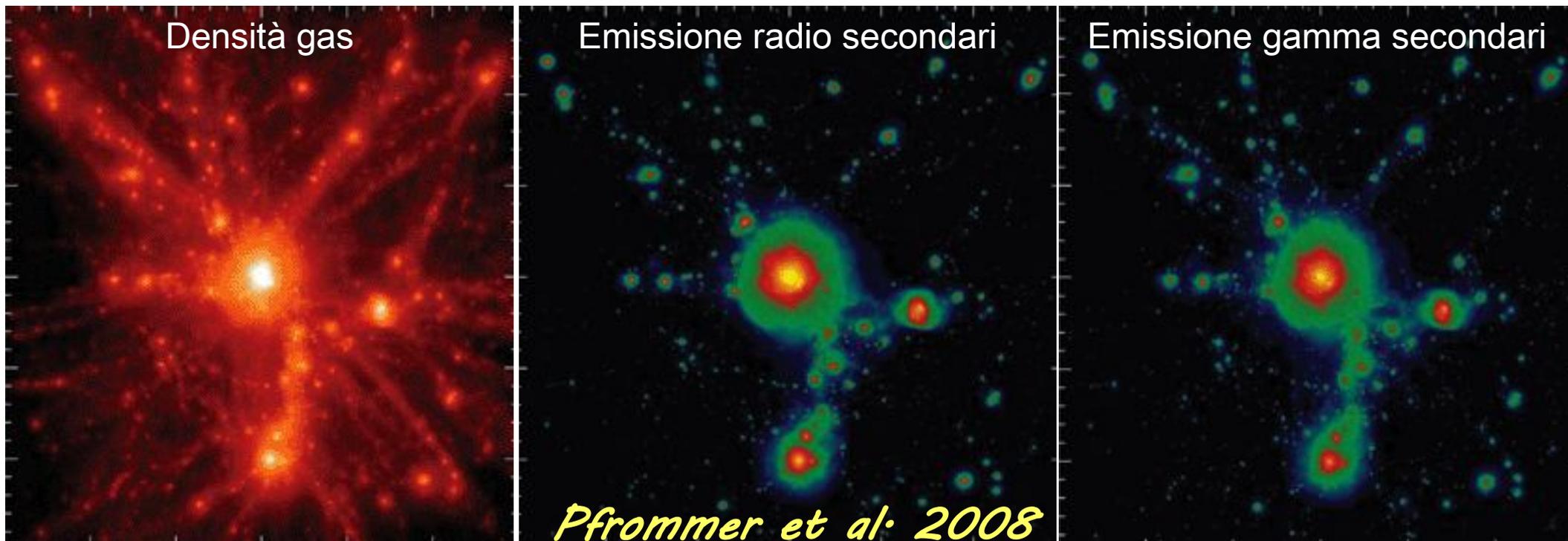
e.g. Dennison 1980
Blasi & Colafrancesco 1999
Dolag & Ensslin 2000
Pfrommer & Ensslin 2004

Radio aloni: **elettroni secondari?**

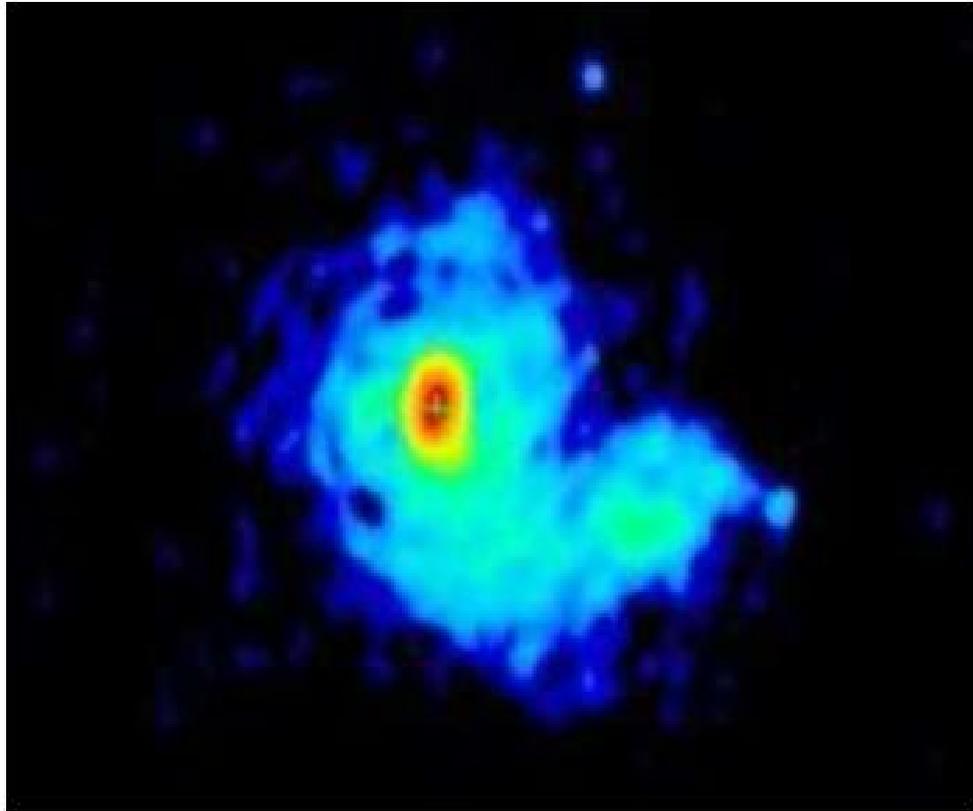
Dati dei protoni relat. Primari, la produzione di elettroni secondari dipende “solo” da profilo di densità dei cluster.

Se si conosce campo $B \rightarrow$ emissione RADIO

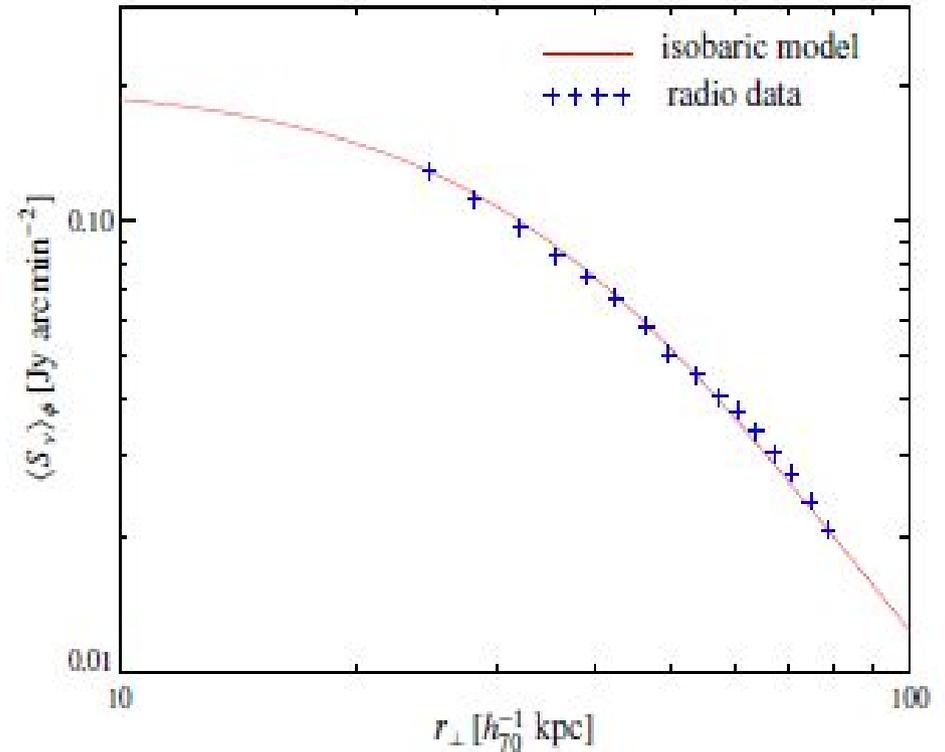
Indipendentemente da campo $B \rightarrow$ emissione GAMMA



MODELLO A SECONDARI:
riproduce profilo radiale di mini-alone in
Perseo



Pedlar et al. 1990



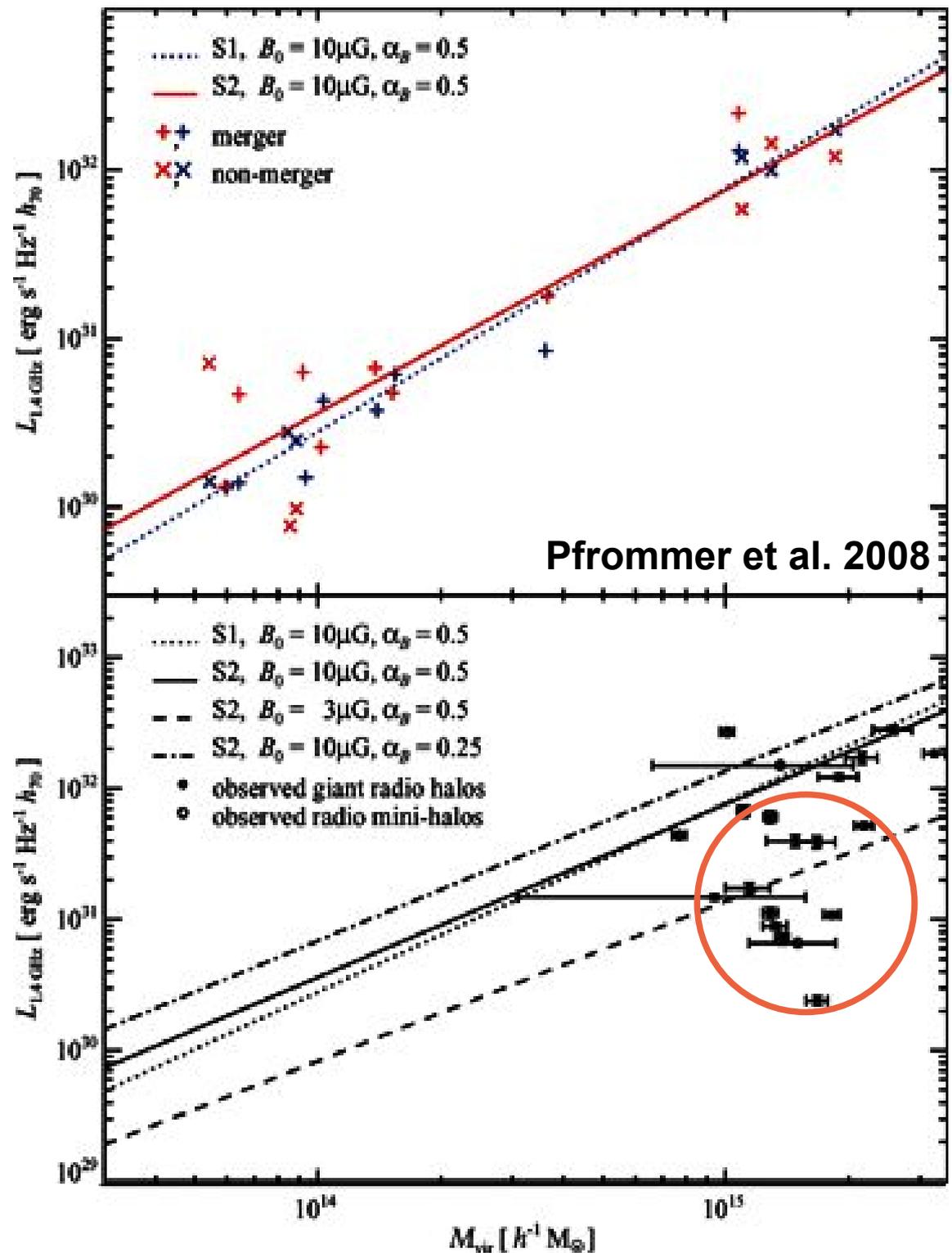
Pfrommer & Ensslin 2004

...*ma ha problemi con Aloni giganti*
(\rightarrow profili troppo ripidi)

MODELLO A SECONDARI:

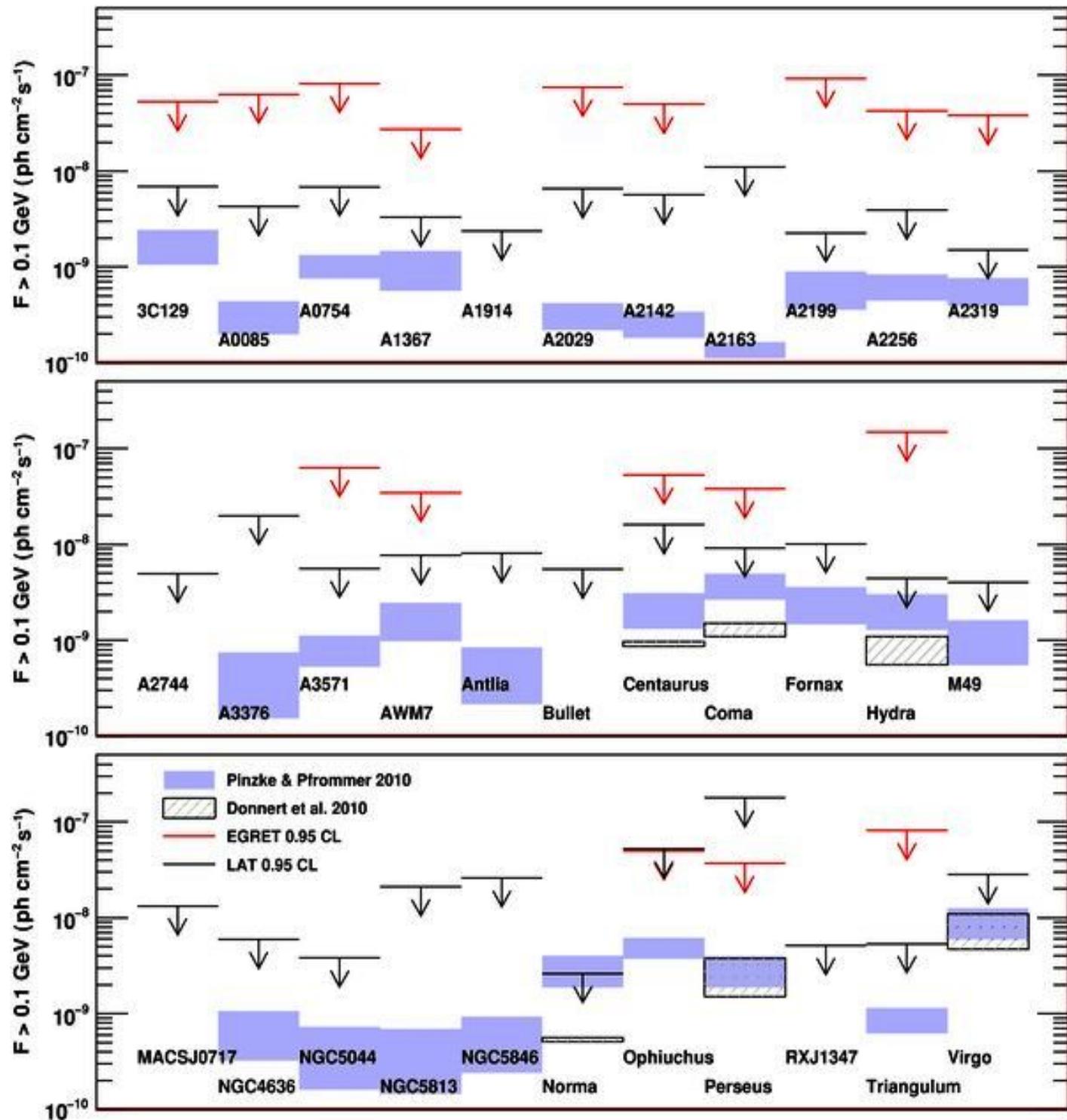
riproduce correlazioni
di emissione radio
con Massa, L_x ,
Temperatura etc...
per Aloni Giganti

...ma non è possibile
produrre ammassi
"radio quieti" (senza
alone)



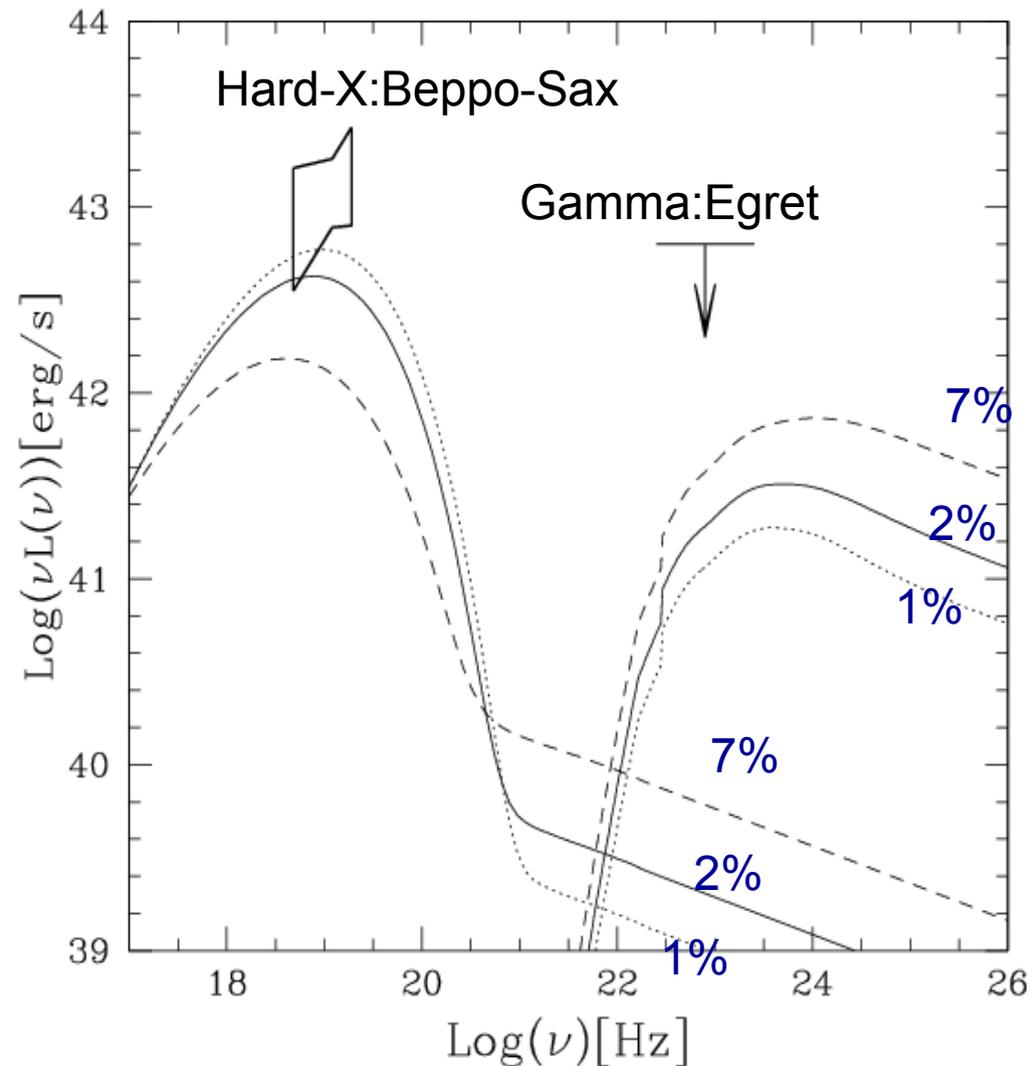
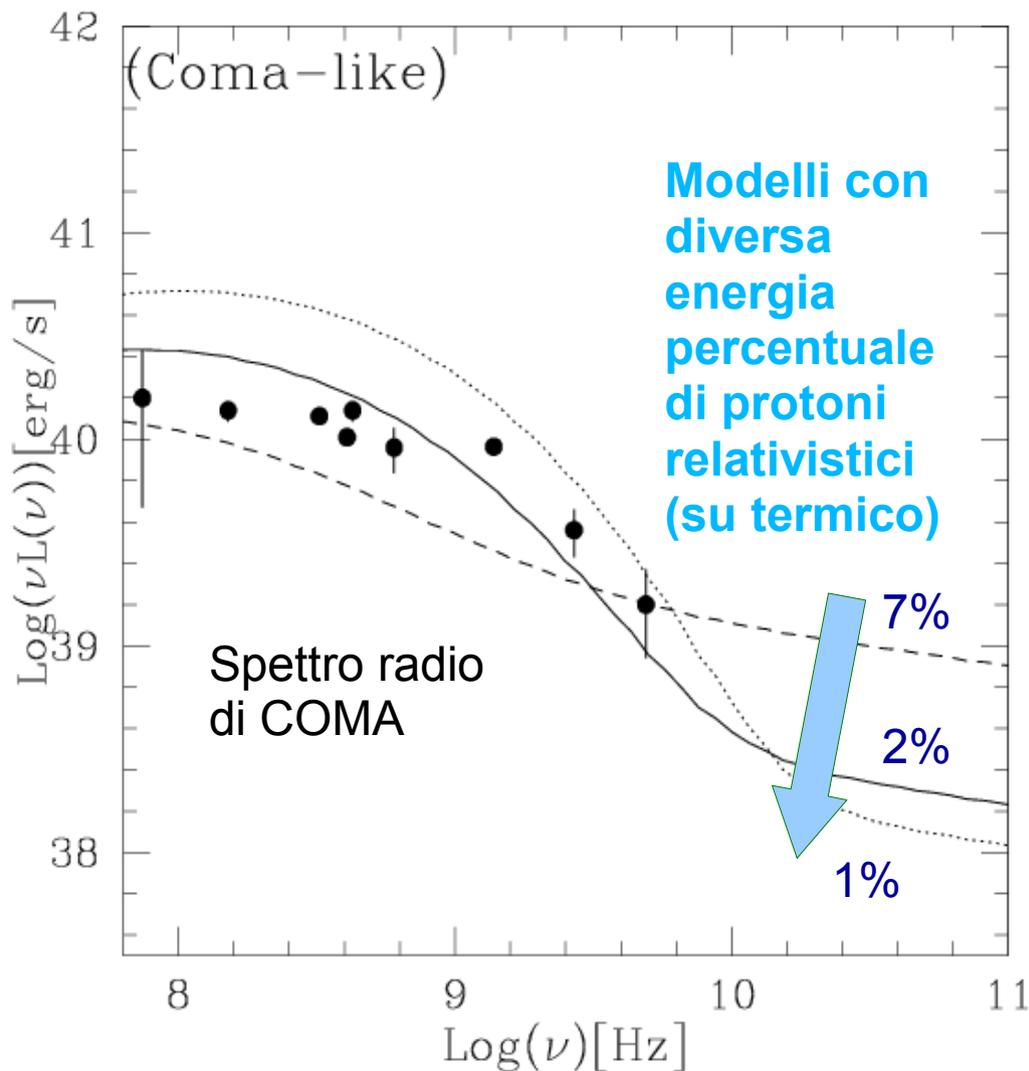
Previsioni di
 flusso Gamma
 per il futuro:
 simulazioni
 VS upper limits
 osservati

~
 Upper limits:
 Detezioni in γ
 mancate con
 • **EGRET**
 • **FERMI**
 (Ackermann et al. 2010)



Emissione broad-band da riaccelerazione (Brunetti 2008)

(Toy Model: β -profile, $B_0 \approx A n_{th}^{2/3}$, $B_0(0)=1.5\mu\text{G}$, $W_{CR} \approx f W_{th}$, $P_A \approx Q n_{th}^{5/6}$)



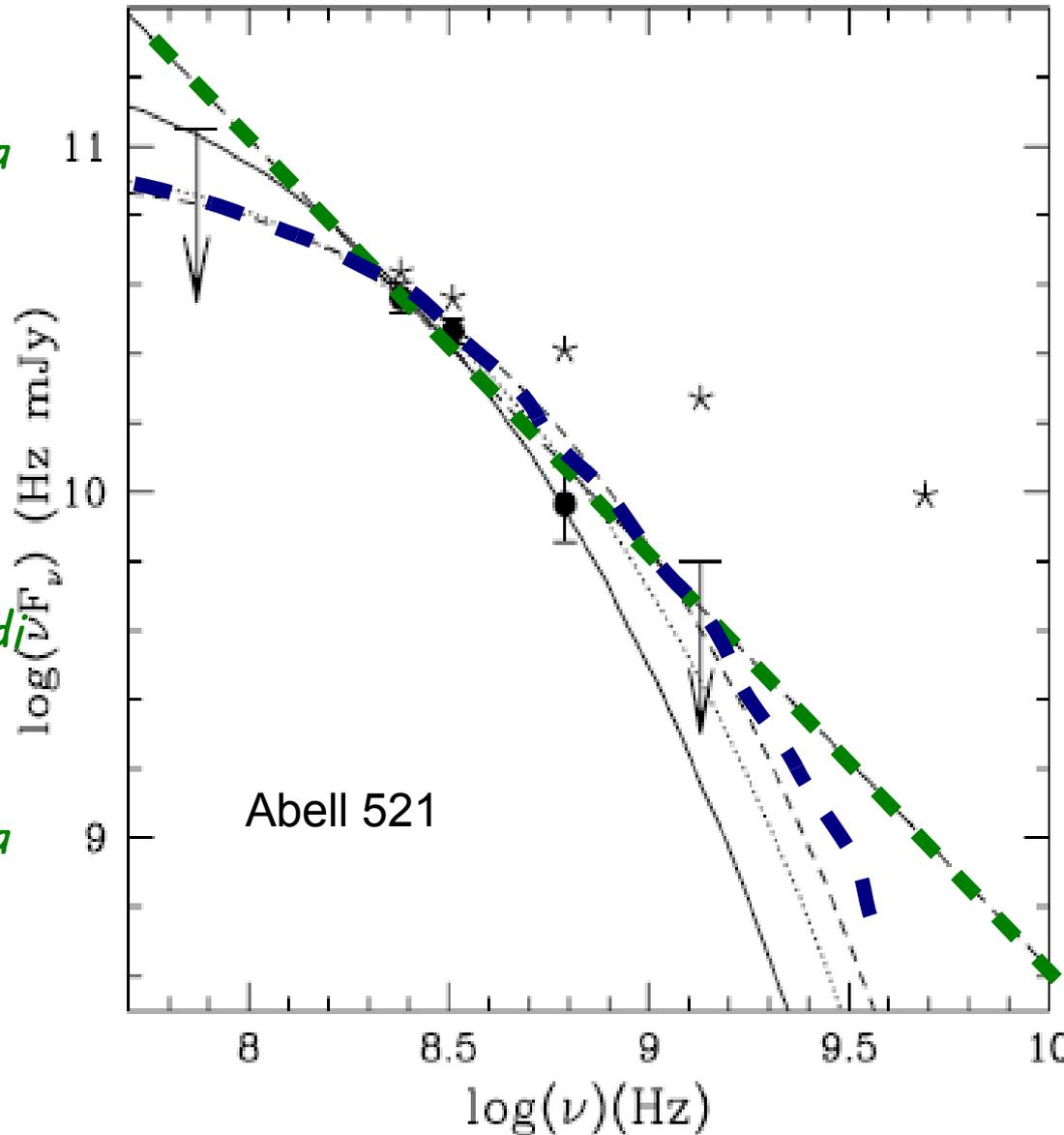
Budget Energetico da spettri radio (Brunetti et al. 2008)

Modello a secondari:

Siamo vincolati ad usare un modello a legge di potenza per spiegare i dati

→ se spettro di particelle è più ripido di $\delta > 4$, energia integrata di protoni relativ. Diventa $>$ dell'energia termica del cluster.

PROBLEMA ENERGETICO!



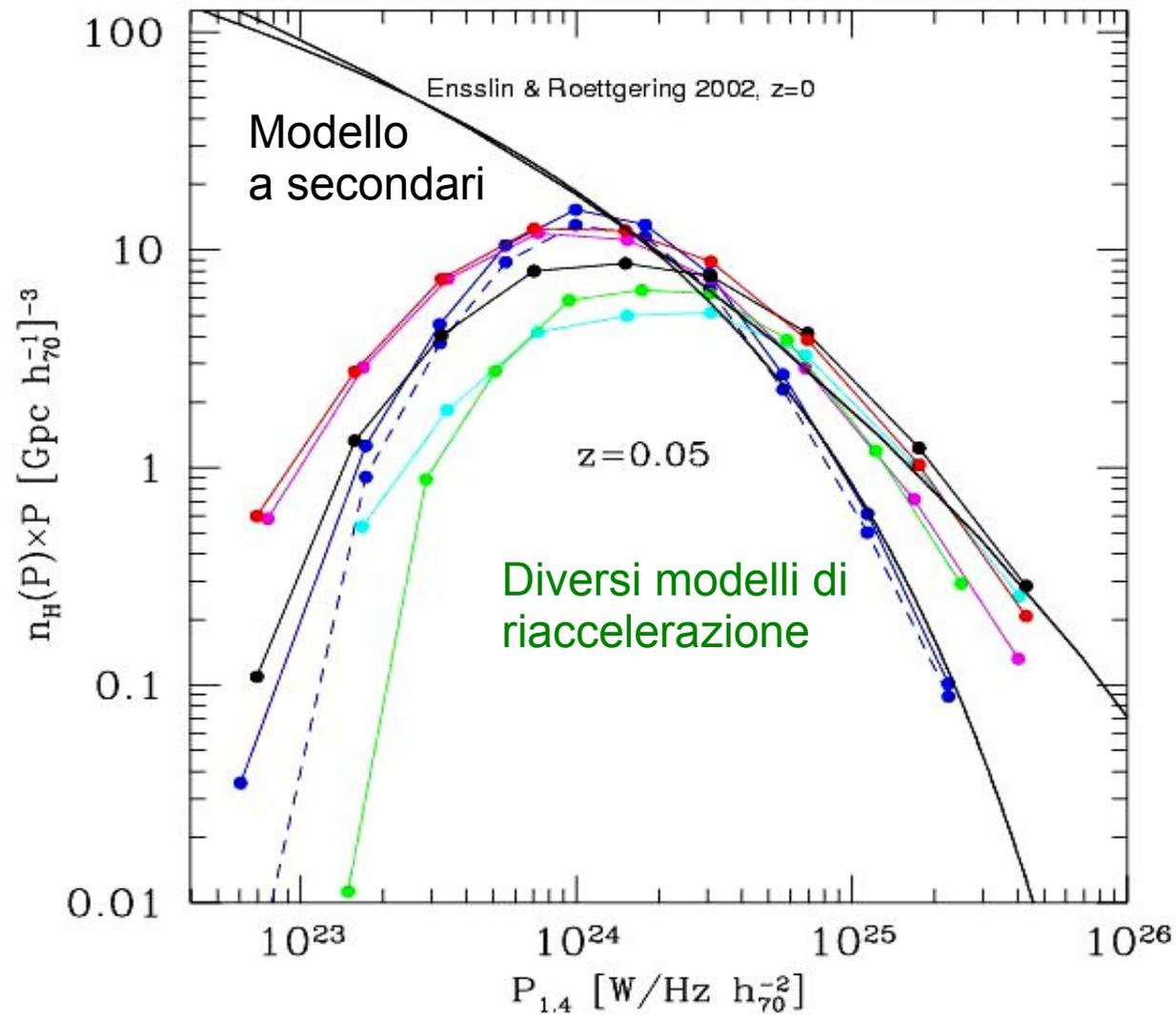
Modello a ri-accelerazione

Per una certa classe di parametri, il modello produce uno spettro curvo/ripido

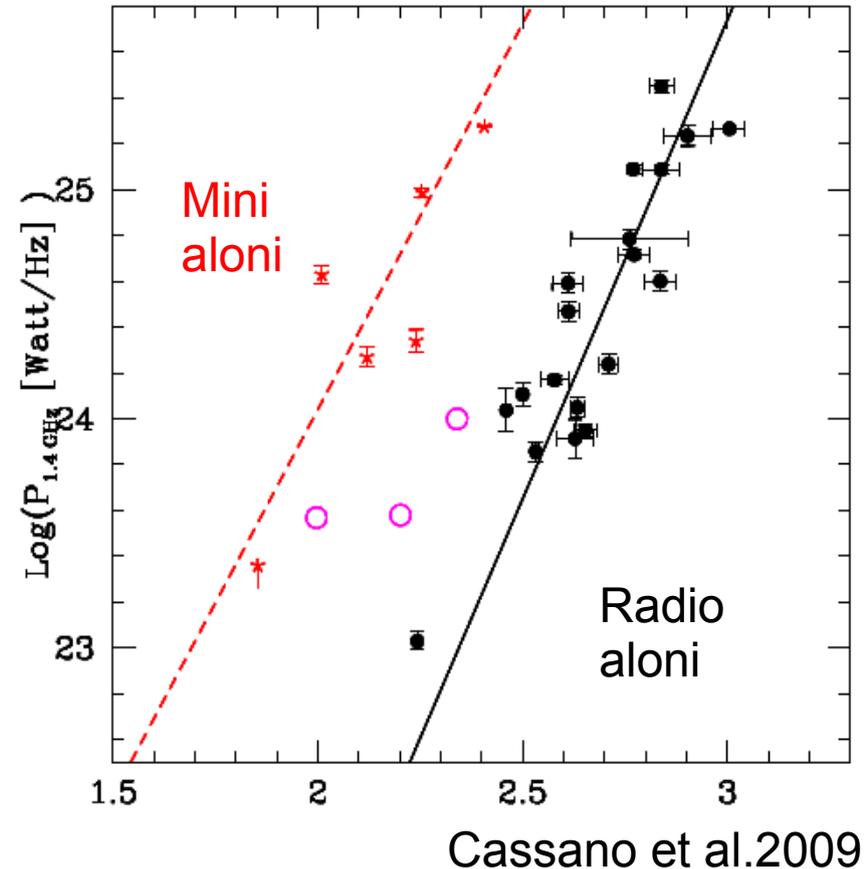
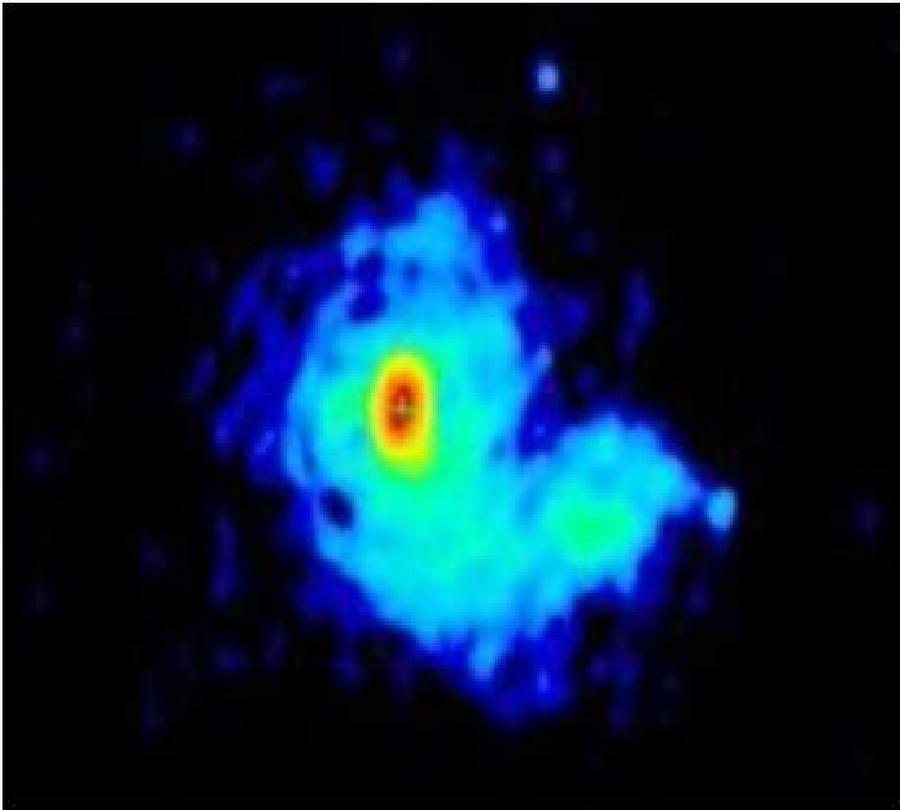
→ energia integrata di protoni relativ. ~1% energia termica cluster

ENERGIA OK!

*Il futuro: a bassa luminosità i modelli prevedono
differenti distribuzioni*



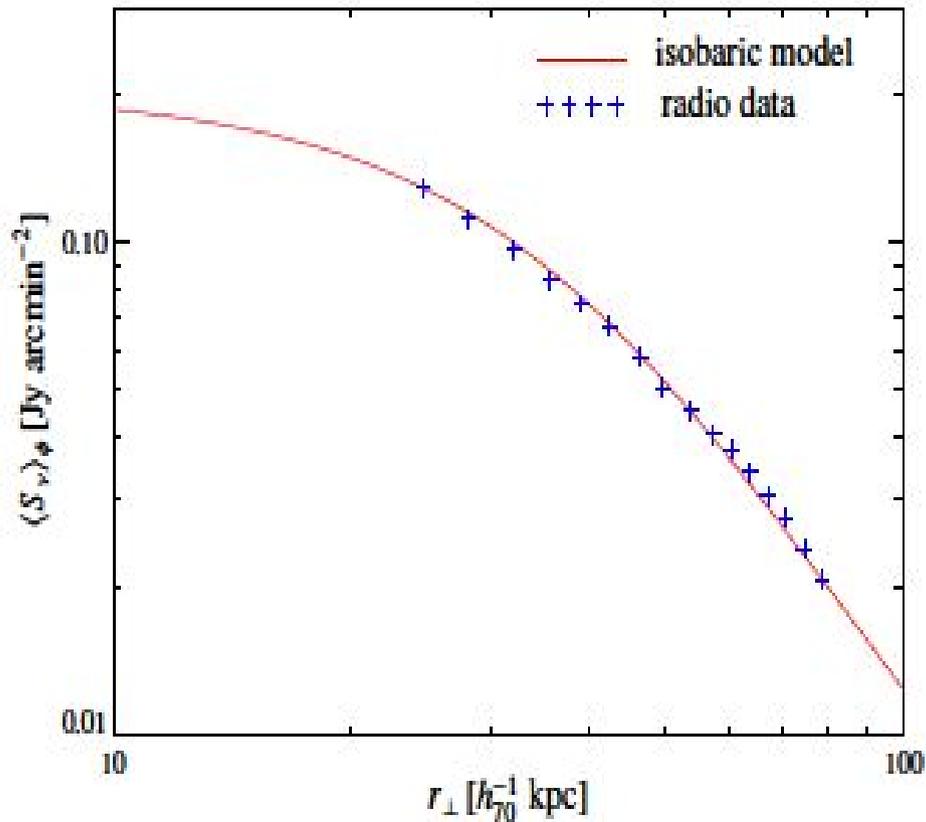
Mini-radio Aloni: un altro importante campo di battaglia per le due teorie



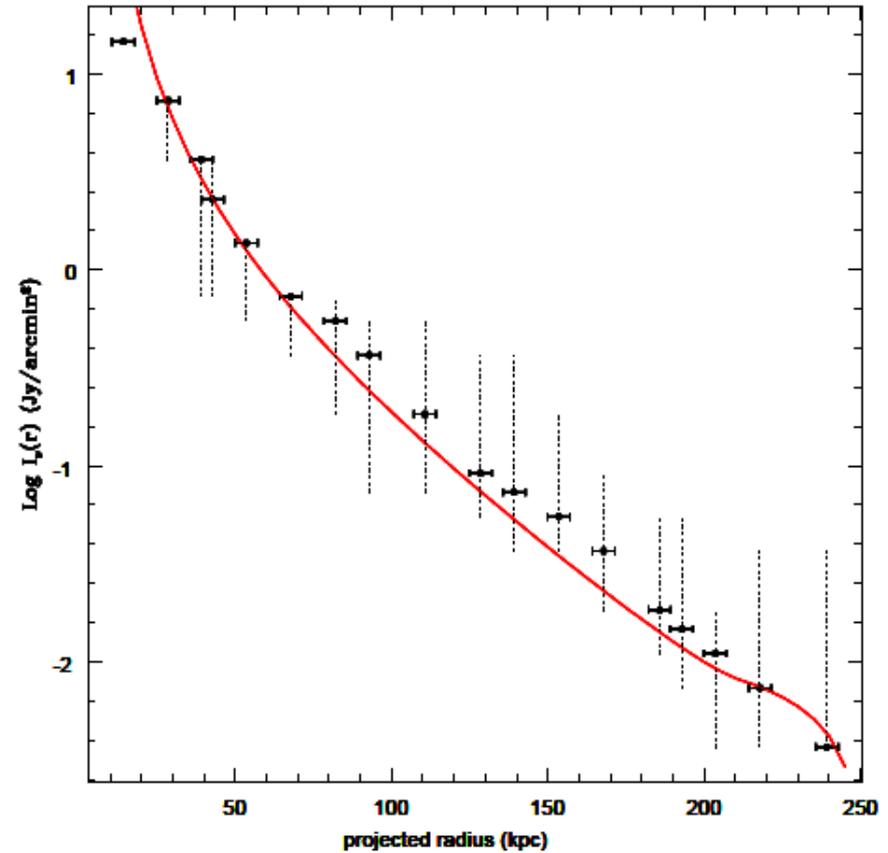
- **Modello a secondari:** e^- secondari da collisioni $p+p$, p iniettati da AGN (Pfrommer & Ensslin 2004)
- **Modello a turbolenza:** e^- riaccelerati da Fermi II, turbolenza prodotta da "cooling flow" e AGN (Gitti et al. 2002)

Profilo radiale radio per il mini-alone di Perseo

Secondari:
Pfrommer & Ensslin 2004

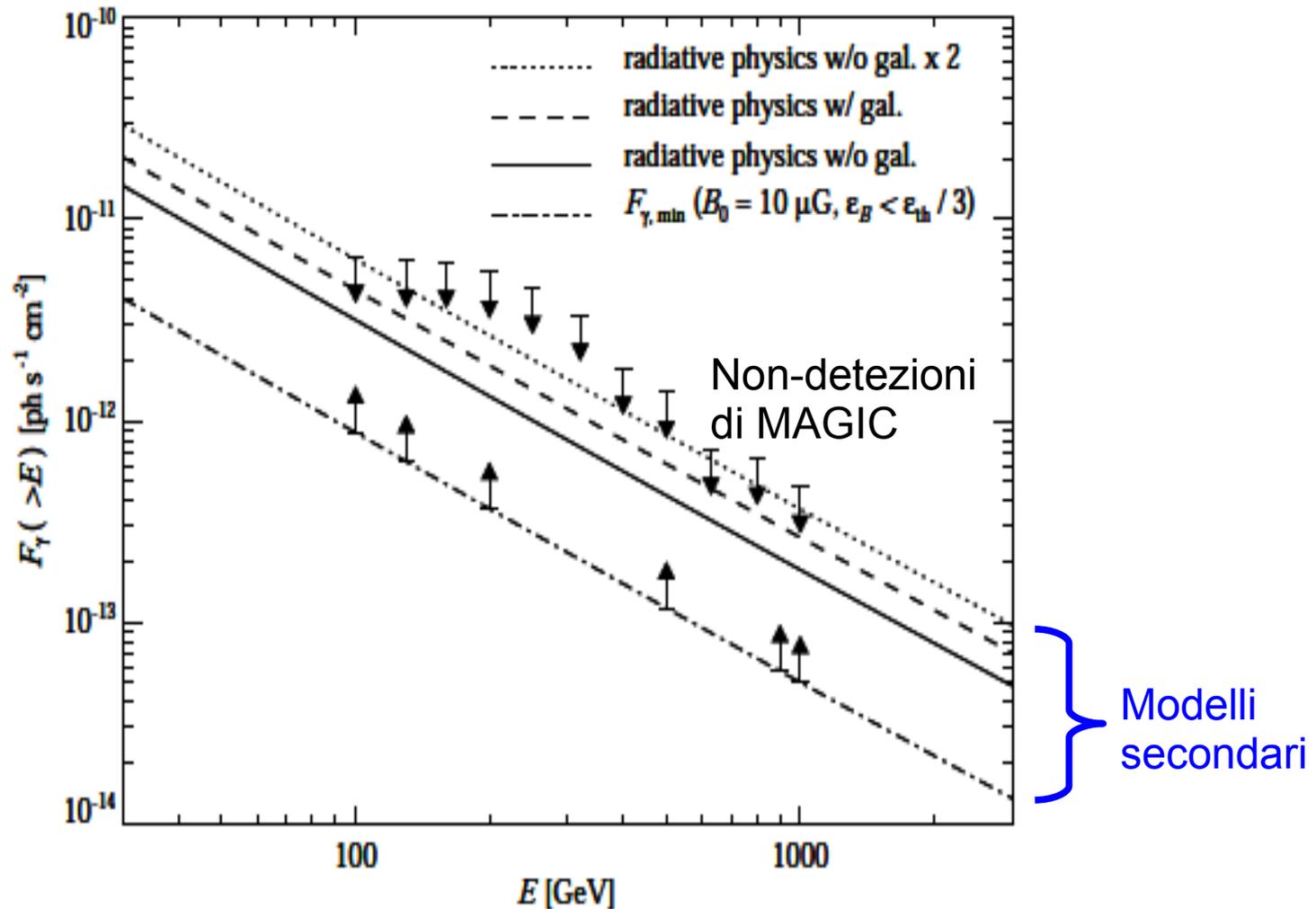


Ri-accelerazione
Gitti et al.2002



...riproducibile in entrambi i modelli

Di recente: osservazioni in γ limitano i modelli secondari ammissibili (Aleksic et al. 2009)



Radio aloni: **secondari** o **turbulenza?**

SECONDARI

- + Sono caratterizzati da pochi parametri
- + Riproducono profili radio mini-aloni
- + Scaling con L_x , T , Massa

- NO spettri radio curvi
- NO profili piatti
- NO intermittenza
- in alcuni casi Flussi gamma troppo elevati
- in alcuni casi problema energetico

Radio aloni: **secondari** o **turbolenza?**

RI-ACCELERAZIONE TURBOLENTA

- +Riproduce intermittenza (mergers)
- +Riproduce profili radio aloni/mini-aloni
- +Scaling con L_x , T , Massa
- +Riproduce spettri ripidi
- molti parametri liberi, teoria difficile da “ammazzare”
- è necessario ipotizzare la presenza di elettroni $\gamma \sim 100$ da altri meccanismi
- qualche caso “dubbio” (merger senza aloni, o aloni senza major merger)

Qualche referenza:

- *Ferrari et al. 2008 “Observations of Extended Radio Emission in Clusters”*
- *Dolag et al. 2008 “Non-Thermal Processes in Cosmological Simulations”*

Cassano 2010: “Large-scale Diffuse Radio Emission from Clusters of Galaxies and the Importance of Low Frequency Radio Observations”