

Osservazioni di Flares Solari con ALMA

Corrado Trigilio INAF-Osservatorio Astrofisico di Catania

Buemi C.S.¹, Leto P.¹, Romano P.¹, Umana G.¹, Zuccarello F.²
¹INAF-OACT, ²UniCT

Flares solari

Fenomeni più energetici dell'atmosfera solare

Rilascio di energia tramite riconnessione magnetica

Importanza per riscaldamento coronale, CME, interazione con mezzo interplanetario, space weather...

Si manifestano:

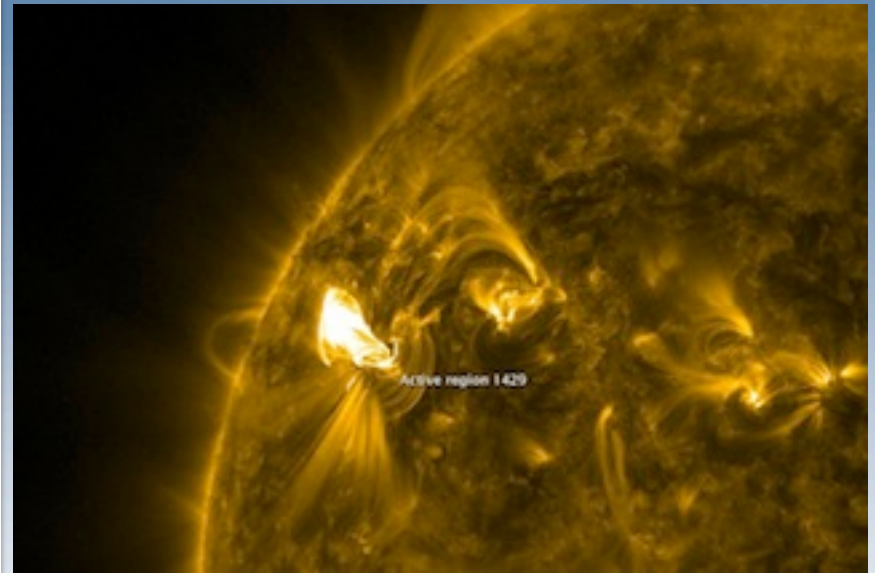
- nella corona, sopra le regioni attive, interessando tutti gli strati atmosferici
- soprattutto nei periodi di massimo di attività

Visibili in tutte le bande dello spettro EM (diversi processi fisici)

A volte associati a Coronal Mass Ejections

Energie: $10^{23} - 10^{32}$ erg

Flare classe X5.4 Del 7 Marzo 2012 -- SDO



Lo spettro ad alta energia

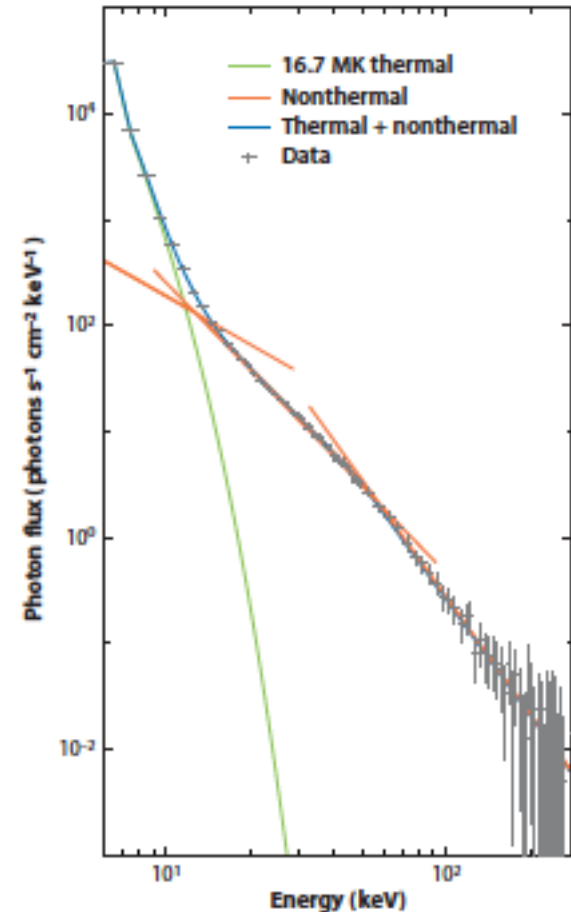
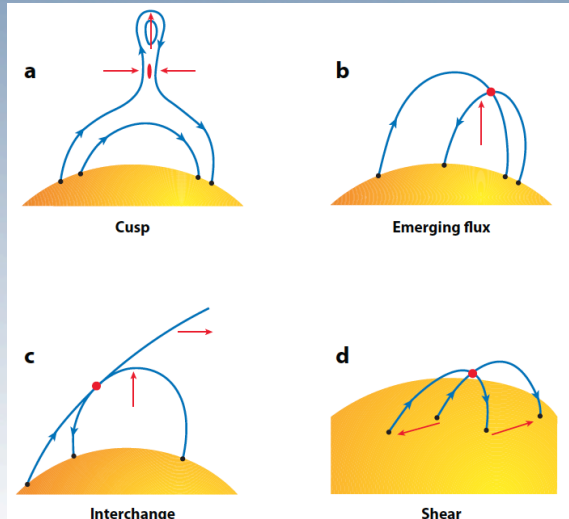
Soft X-ray termico associato al loops

Hard X-ray non termico localizzato ai piedi del loop e sopra il loop

Elettroni non termici + B \rightarrow radio (girosincrotrone)

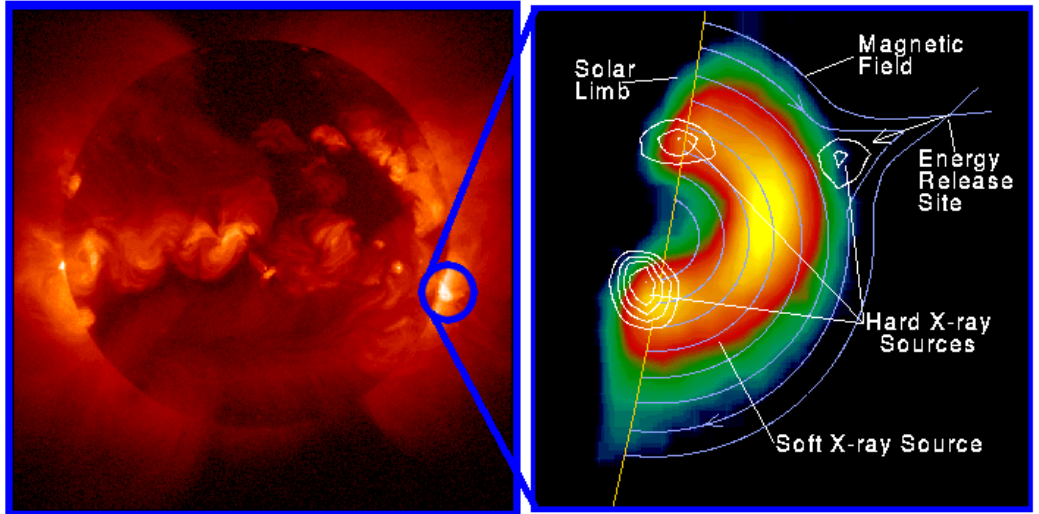
RHESSI: bremsstrahlung durante fase impulsiva

Riconnessione e Accelerazione particelle

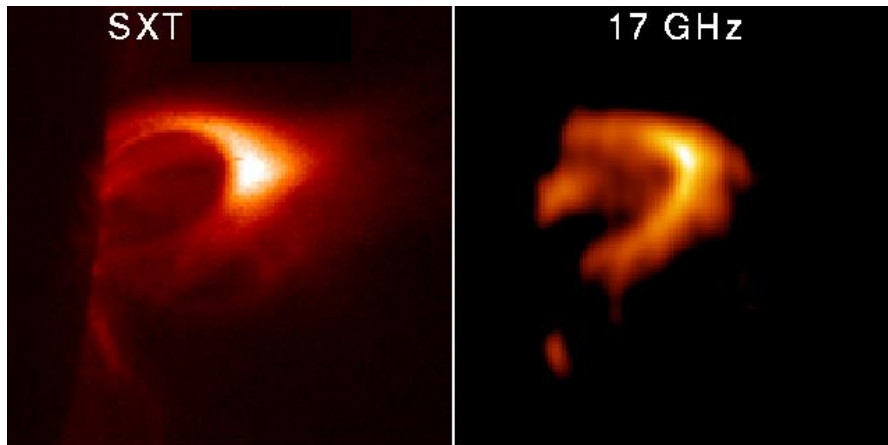


Grigis & Benz (2004)

Hard X-ray osservati alle basi del loop e al top



Yohkoh X-ray Image of a Solar Flare, Combined Image in Soft X-rays (left) and Soft X-rays with Hard X-ray Contours (right). Jan 13, 1992.



Correlazione Soft-X (Yohkoh) - Radio (NoRH)
1993-3-16 flare. Strutture simili
(Hanaoka, Y. 1994)

Soft X-ray e giosincrotrone
(centimetrico) associate ai loop

$$L_{SXR} / L_{RADIO} \approx 10^{15.5 \pm 0.5} \text{ Hz}$$

Effetto Neupert

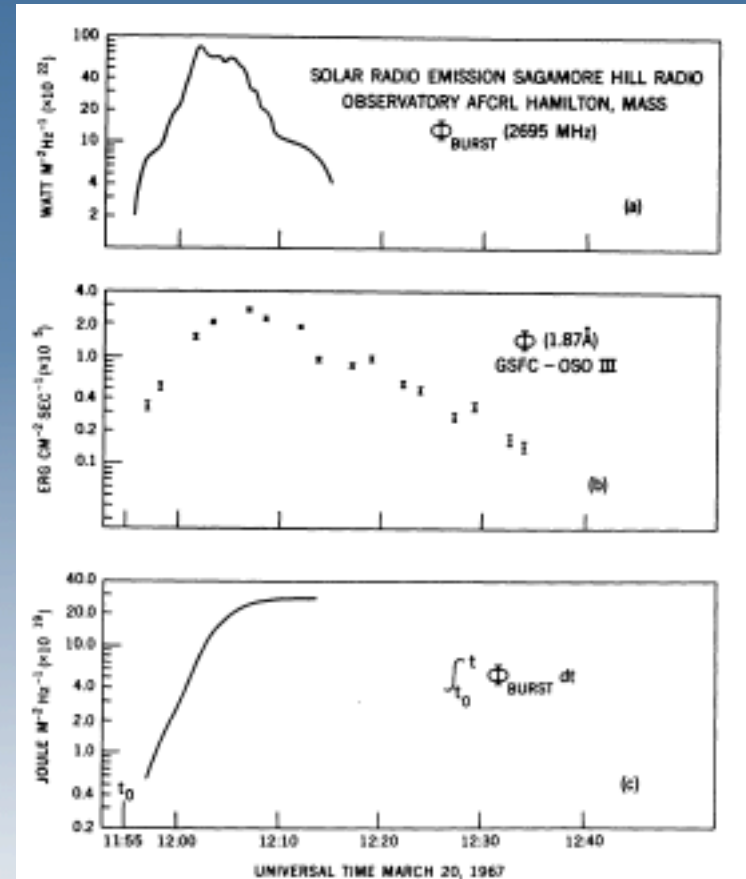
Soft X-ray in ritardo rispetto al radio e all'Hard X-ray

Soft X-ray dovuto alla termalizzazione degli elettroni non termici

$$f_{SXR}(t) \propto \int f_{RADIO}(t) dt$$

Scenario:

- 1) Accelerazione particelle $N(E) \propto E^{-\delta}$ dovuta a riconnessione magnetica (radio, HXR Bremsstrahlung non termico)
- 2) Termalizzazione col plasma locale, riscaldamento (SXR Bremsstrahlung termico)



Neupert (1968)

Effetto Neupert

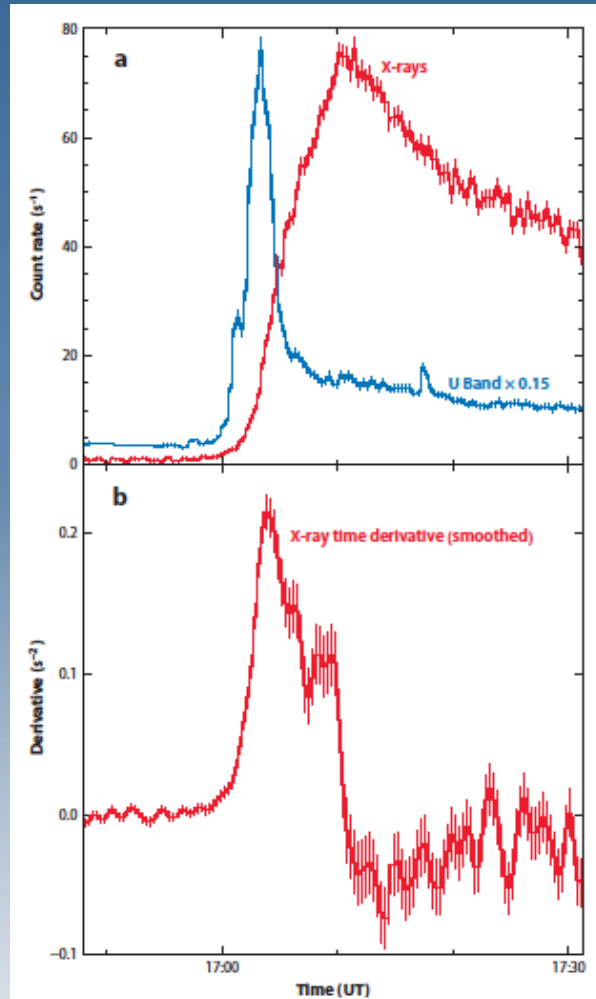
Soft X-ray in ritardo rispetto al radio e all'Hard X-ray

Soft X-ray dovuto alla termalizzazione degli elettroni non termici

$$f_{RADIO}(t) \propto \frac{df_{SXR}(t)}{dt}$$

Scenario:

- 1) Accelerazione particelle $N(E) \propto E^{-\delta}$ dovuta a riconnessione magnetica (radio, HXR Bremsstrahlung non termico)
- 2) Termalizzazione col plasma locale, riscaldamento (SXR Bremsstrahlung termico)

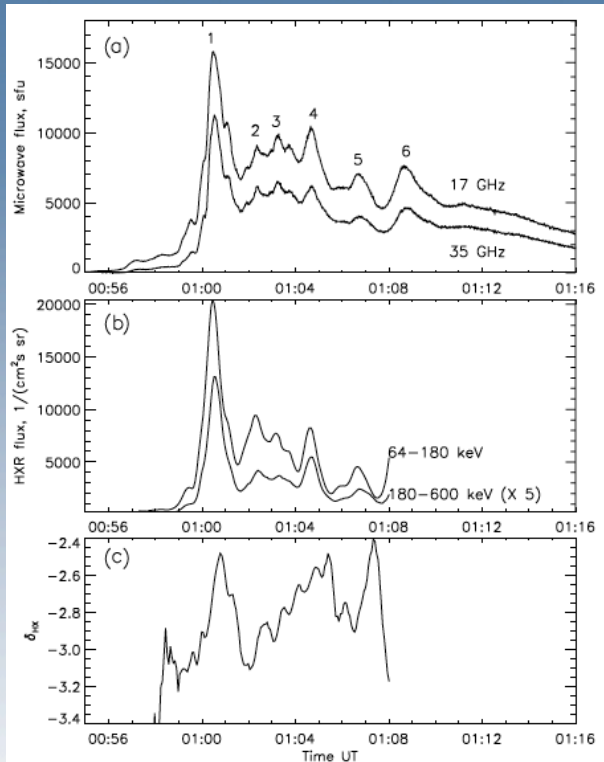


Anche in altre stelle (Prox Cen)
Guedel et al (2002)

Flare del 24 Agosto 2002

Classe X3.1 Singolo loop al bordo del disco
 Inizio: top-loop + footpoints
 Decadimento: loop

Diversi episodi di accelerazione



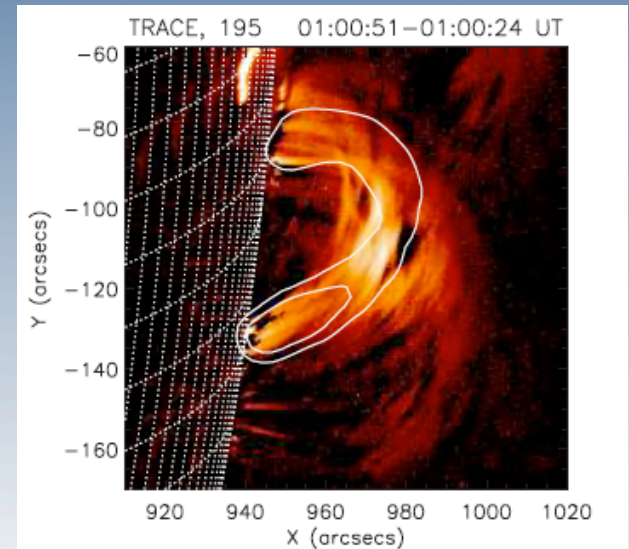
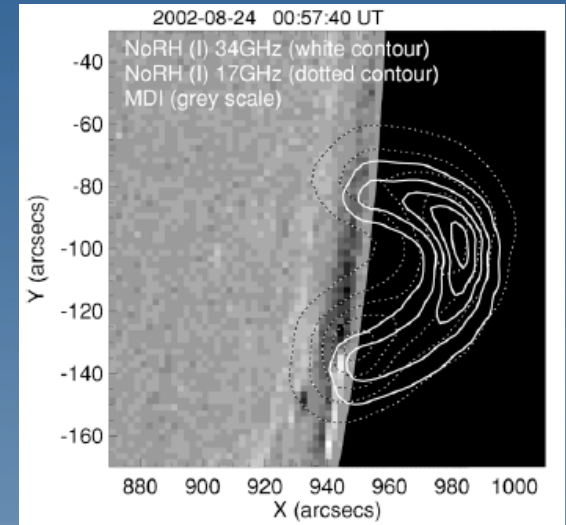
Temperature di
brillanza:

$$T_B \approx 10^8 - 10^9 \text{ K}$$

Densità maggiori al
loop top.

Indice spettrale

$$-1 < \alpha < 1 \quad S_\nu \propto \nu^\alpha$$



Emissione radio: Modello evolutivo

Trigilio et al 2012 (in prep)

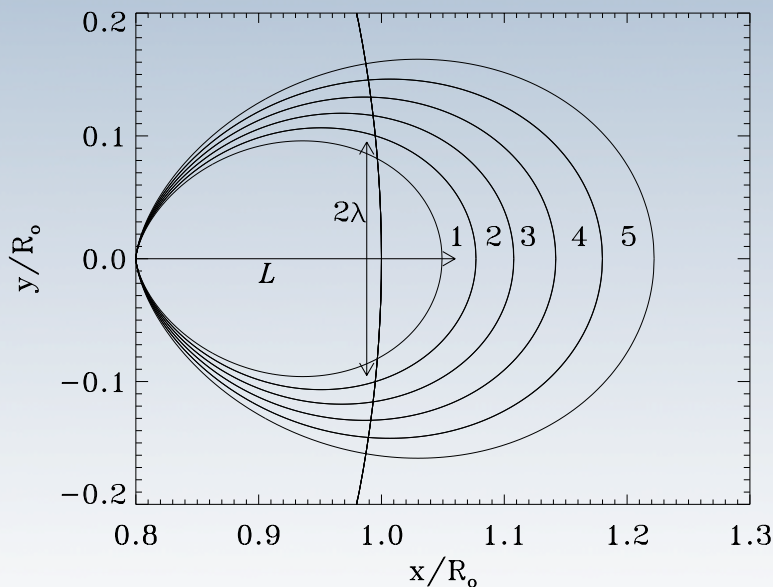
Serie di loops dipolari
Accelerazione al top del loop
Propagazione nel loop, densità costante per magnetic mirroring

Perdite di energia: radiative e collisionali

$$N(E) \propto E^{-\delta}$$

$$0.05 < E < 25 \text{ MeV}$$

$$\frac{dE}{dt} = aB^2 E^2 + bN_{th}$$



Pitch angle θ_{top} elettroni isotropi al top

Intensificazione di $B \rightarrow$ magnetic mirroring
Propagazione fino a profondità tale che

$$B_{max} = \frac{B_{top}}{\sin^2 \theta_{top}}$$

Perdite di energia diverse in funzione di θ_{top}

Loop campionato in sezioni $\Delta B/B \approx 0.1$

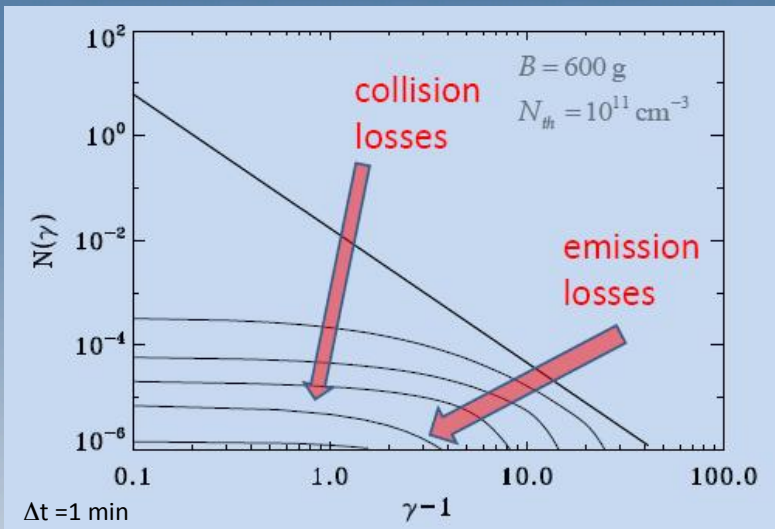
In ogni sezione viene "costruita" $N(E)$ come somma delle varie popolazioni di elettroni

Perdite di energia: radiative e collisionali

$$\frac{dE}{dt} = aB^2 E^2 + bN_{th}$$

Effetti maggiori nella bassa corona (alto B , alto N_{th})

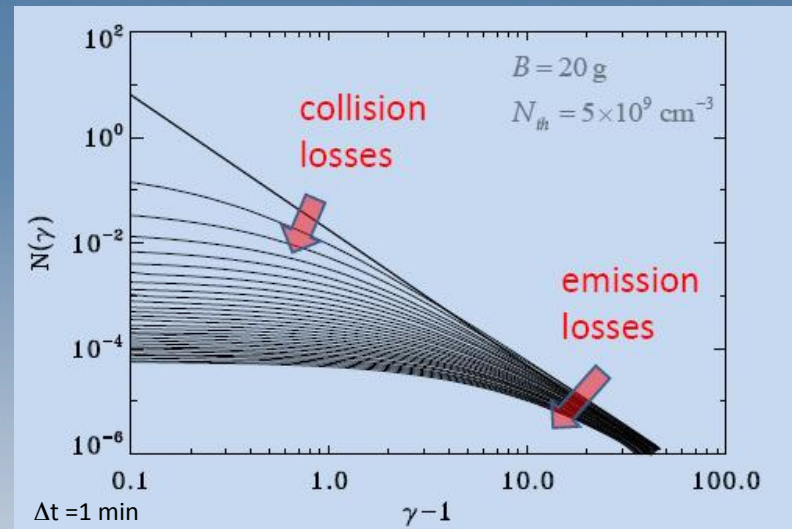
Bassa corona



Spettro "piatto" a basse $E \rightarrow \alpha > 0$
 Rapido decadimento alte E
 Tagli alte freq, ma B alto \rightarrow emissione alte ν

Alte freq radio associate fase accelerazione

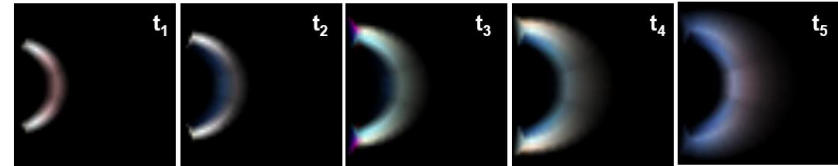
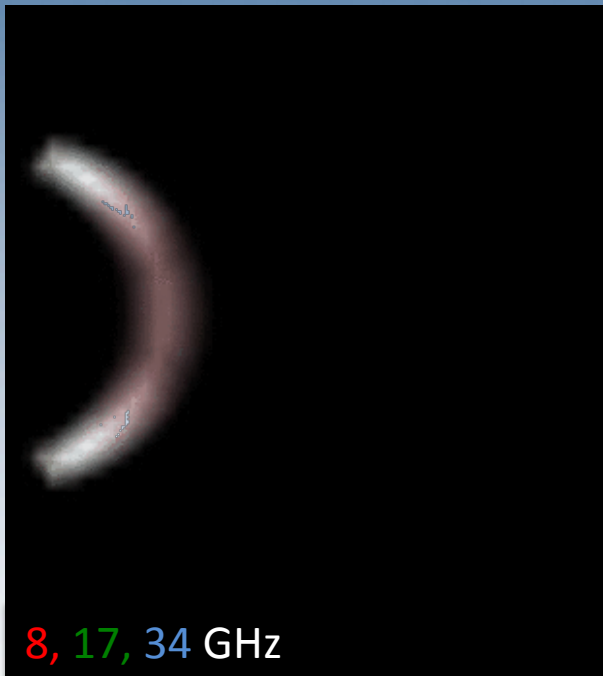
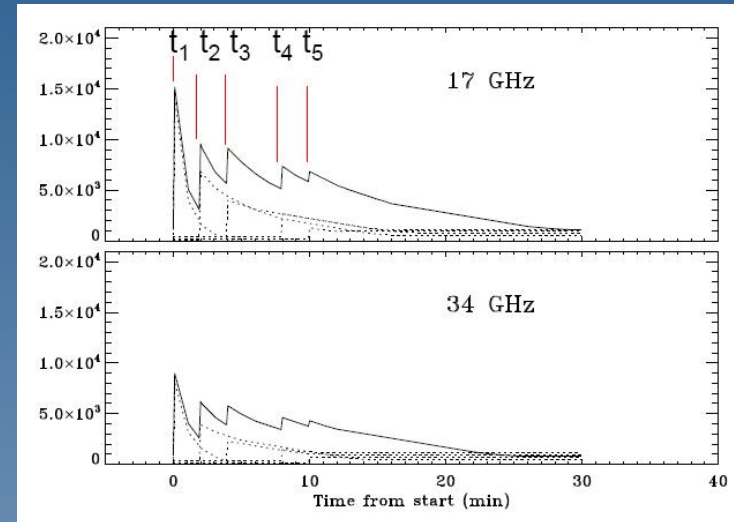
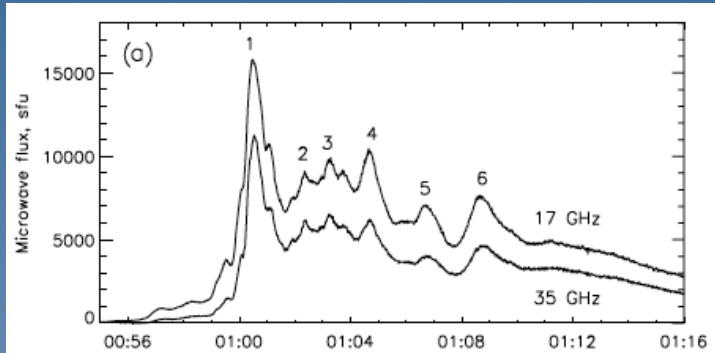
Top del loop



Spettro "meno piatto" a basse $E \rightarrow \alpha$ "più negativo"
 Meno rapido decadimento alte E
 Tagli alte freq, ma B alto \rightarrow emissione persistente

Calcolo coeff. Emiss. e assorb. per
girosincrotrone (Chiuderi Frago & Melozzi 1984)
per spettro elettronico arbitrario
Calcolo T_B , flussi, mappe

Modello in ottimo accordo con i dati:
• Flussi, indice spettrale, T_B e loro evoluzione



Volume totale	$V = 2 \times 10^{29} \text{ cm}^3$
Elettroni relativistici	$N_{rel} = 10^6 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$
Elettroni termici	$N_{th} = 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
Energia totale elettroni	$E_{kin} = 3 \times 10^{29} \text{ erg}$

Energia protoni non considerata

Singolo evento: decadimenti in pochi minuti

Temperature di brillantezza alle bande ALMA

Freq (Band)	t	T_B base	T_B top
100 GHz (3)	0	5×10^7	10^6
	2^m	10^6	2×10^4
230 GHz (6)	0	4×10^7	10^6
	2^m	10^6	10^3
345 GHz (7)	0	10^6	10^4
	2^m	10^5	10^2
675 GHz (9)	0	2×10^5	10^3
	2^m	10^4	10

Flares Solari con ALMA

Durante i flares c'è **emissione nel mm e sub-mm per girosincrotrone:**

- associata alla regione di accelerazione (top loop) e alla base del loop
- alta temperatura di brillanza

Possibilità di studiare:

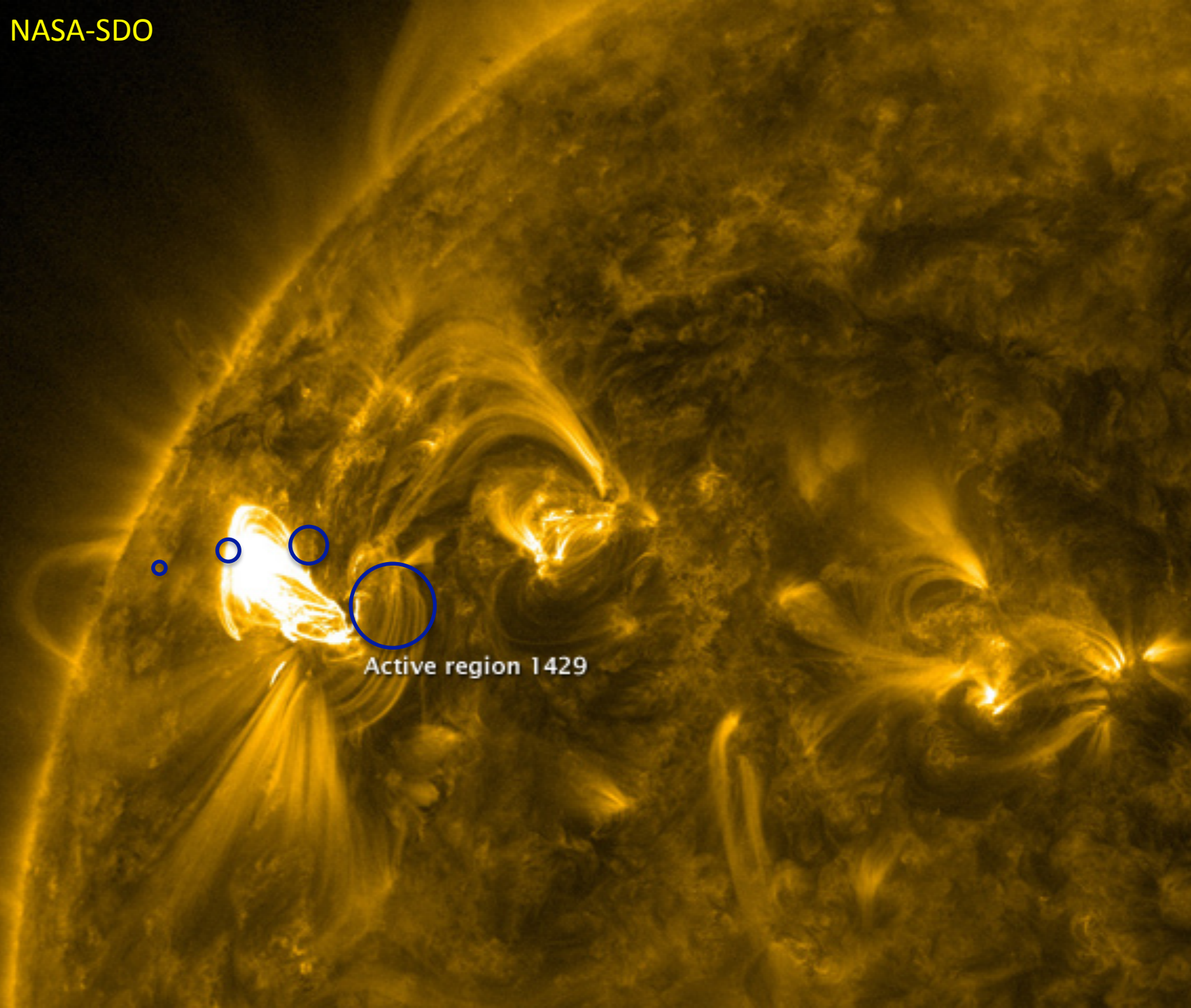
- processi di accelerazione alle alte energie
- processi di dissipazione nella bassa atmosfera

Per mezzo di:

- alta sensibilità
- alta risoluzione spaziale e temporale

Problemi e peculiarità:

- campo di vista ridotto
- necessaria rapida risposta ai flares
- Il Sole ha un suo moto, considerare anche rotazione differenziale



Active region 1429

Configurazione compatta
Baseline 18 – 125 m

Per il Sole: 1" → 725 km

Band	λ (mm)	Field of view (")	Maximum scale (")	Angular Risoluz (")
3	3	62	21	5.3
6	1.3	27	9	2.3
7	0.8	18	6	1.6
9	0.45	9	3	0.8

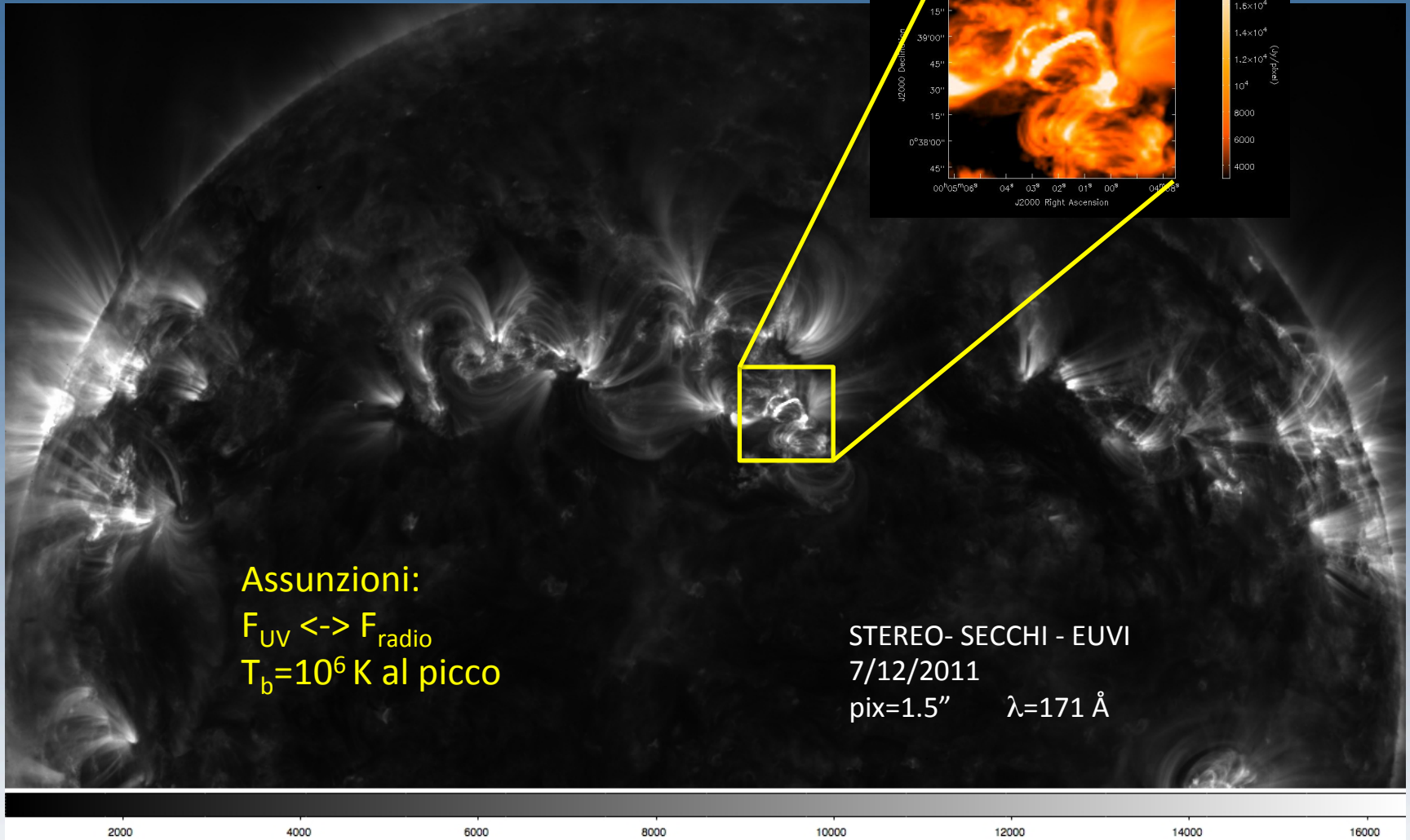
Band	λ (mm)	Field of view (km)	Maximum scale (km)	Linear Risoluz (km)
3	3	45 000	15 000	3800
6	1.3	20 000	6500	1700
7	0.8	13 000	4300	1100
9	0.45	6 500	2200	580

Configurazione estesa
Baseline 36 – 400 m

Band	λ (mm)	Field of view (")	Maximum scale (")	Angular Risoluz (")
3	3	62	10.5	1.56
6	1.3	27	4.5	0.68
7	0.8	18	3	0.45
9	0.45	9	1.5	0.23

Band	λ (mm)	Field of view (km)	Maximum scale (km)	Linear Risoluz (km)
3	3	45 000	7500	1100
6	1.3	20 000	3200	500
7	0.8	13 000	2100	330
9	0.45	6 500	1100	170

Selezione di loop coronali possibili
luoghi di flare



Simulazioni con **CASA** (simdata)

Configurazione compatta
Configurazione estesa

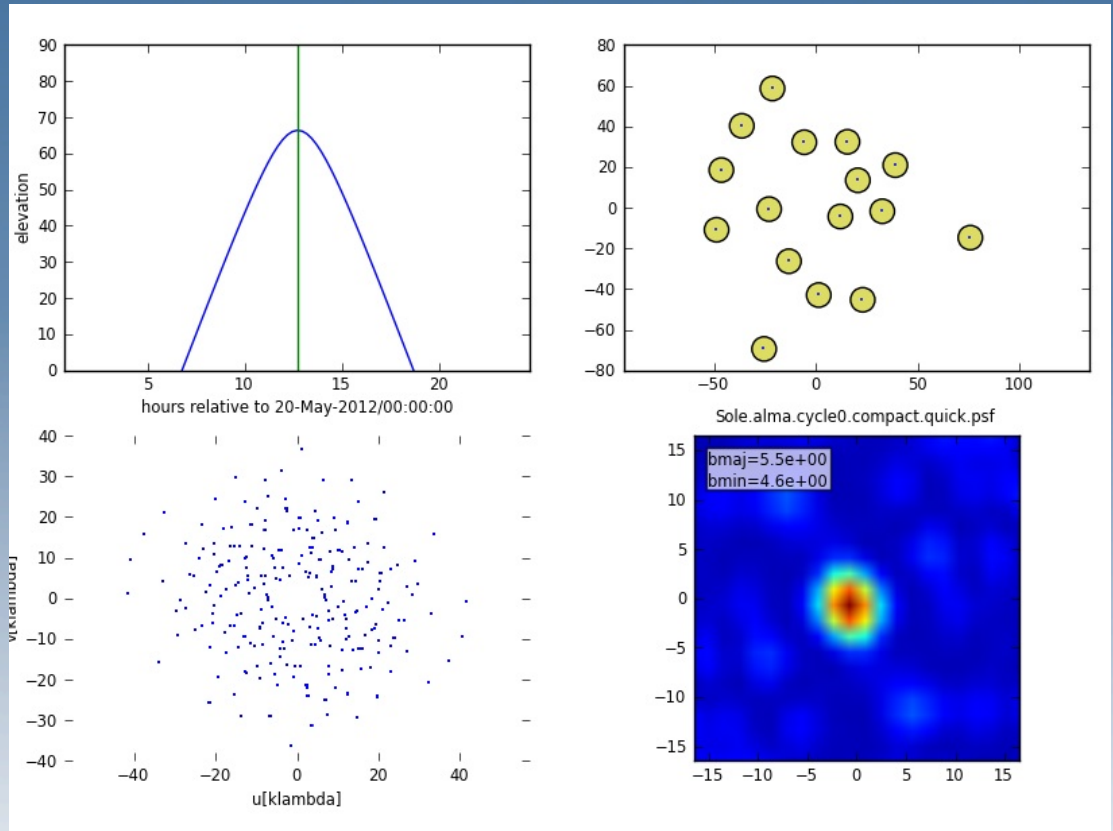
Ciclo 0

Bande 3 e 6

Necessari mosaici per
coprire tutto il campo:

Banda 3 – 25 fields

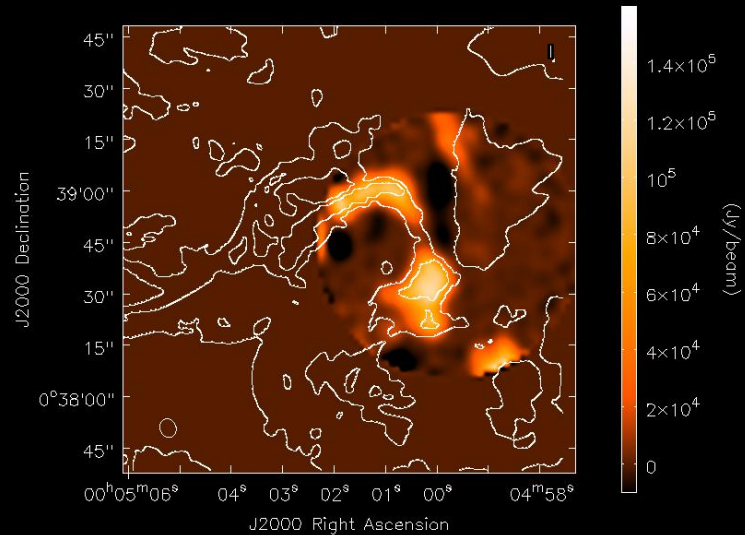
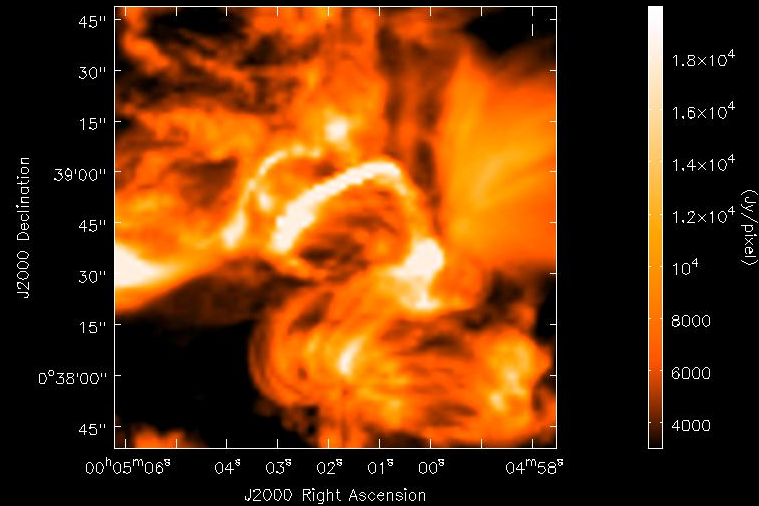
Banda 6 – 111 fields



Simulazioni con CASA
100 GHz

Compact configuration
FOV=62"
Beam=5.5"x4.6"

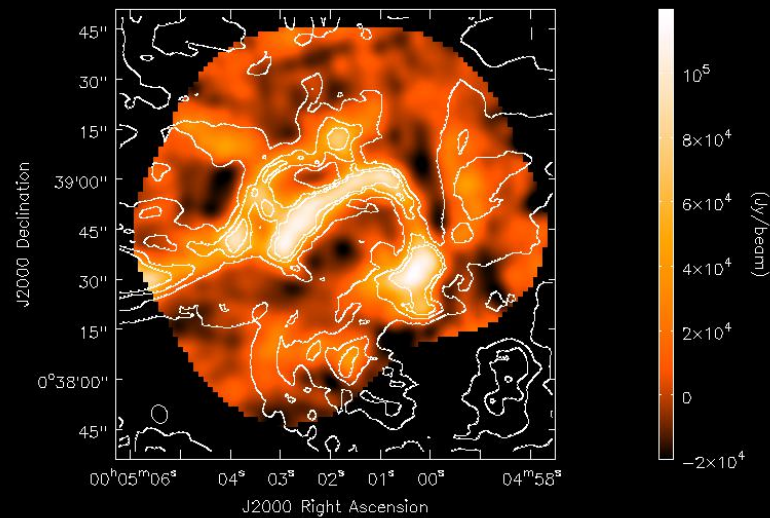
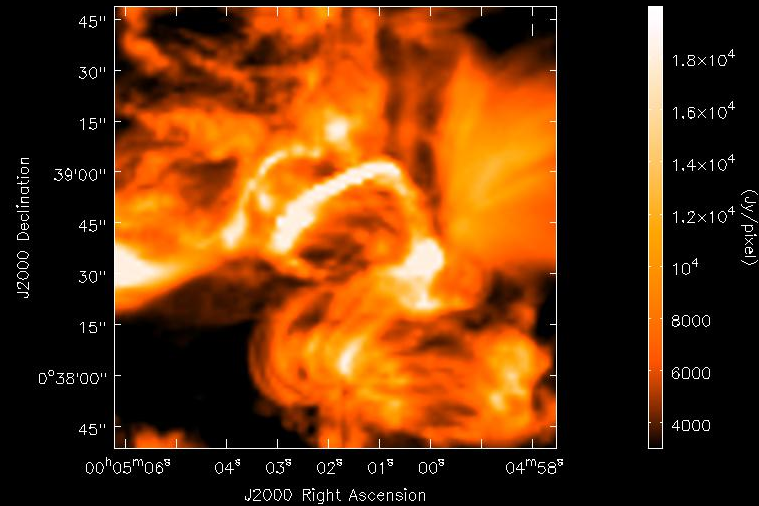
Un solo campo



Simulazioni con CASA
100 GHz

Compact configuration
FOV=62''
Beam=5.5''x4.6''

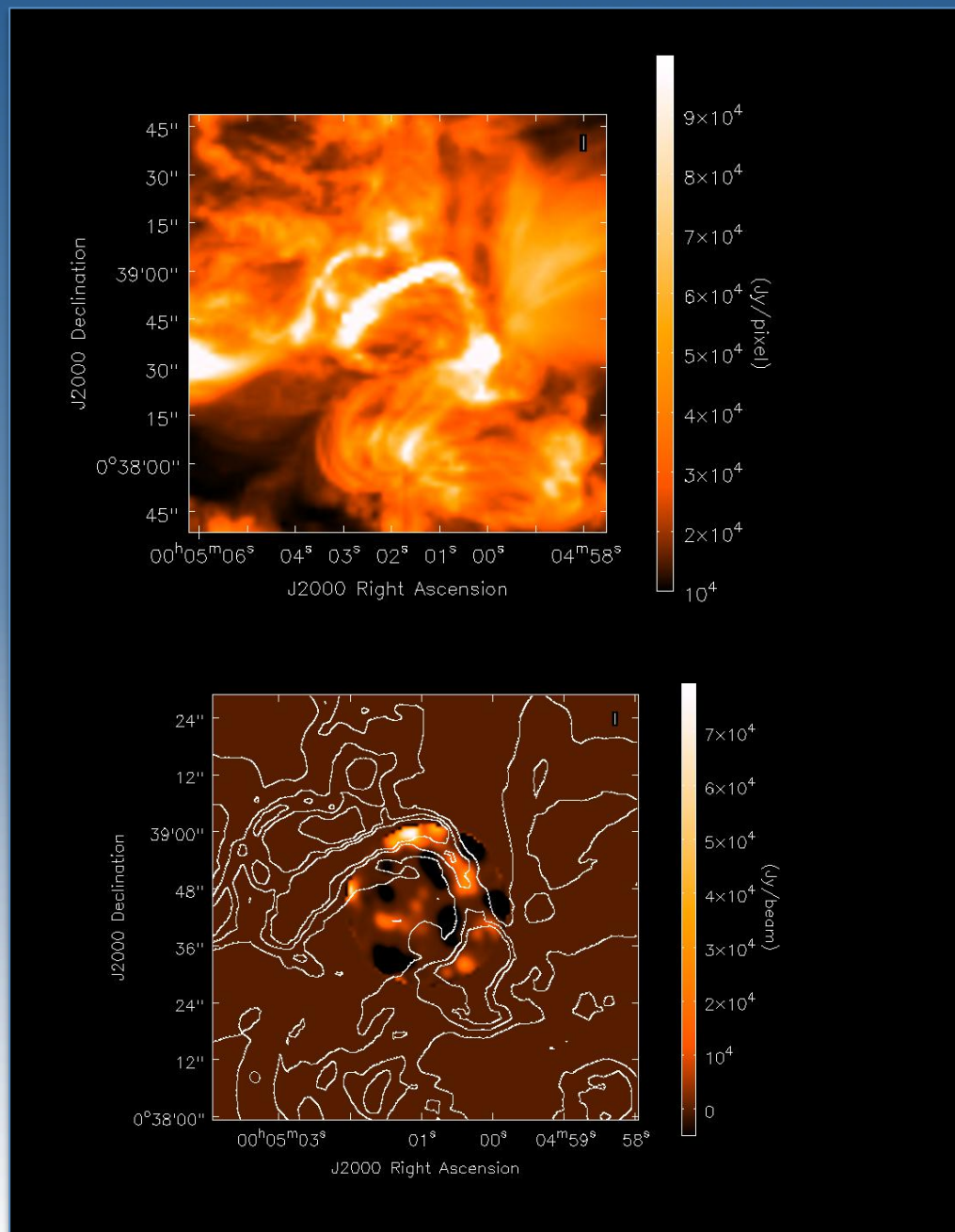
Mosaico con 6 campi



Simulazioni con CASA
230 GHz

Compact configuration
FOV=27''
Beam=3.9''x1.9''

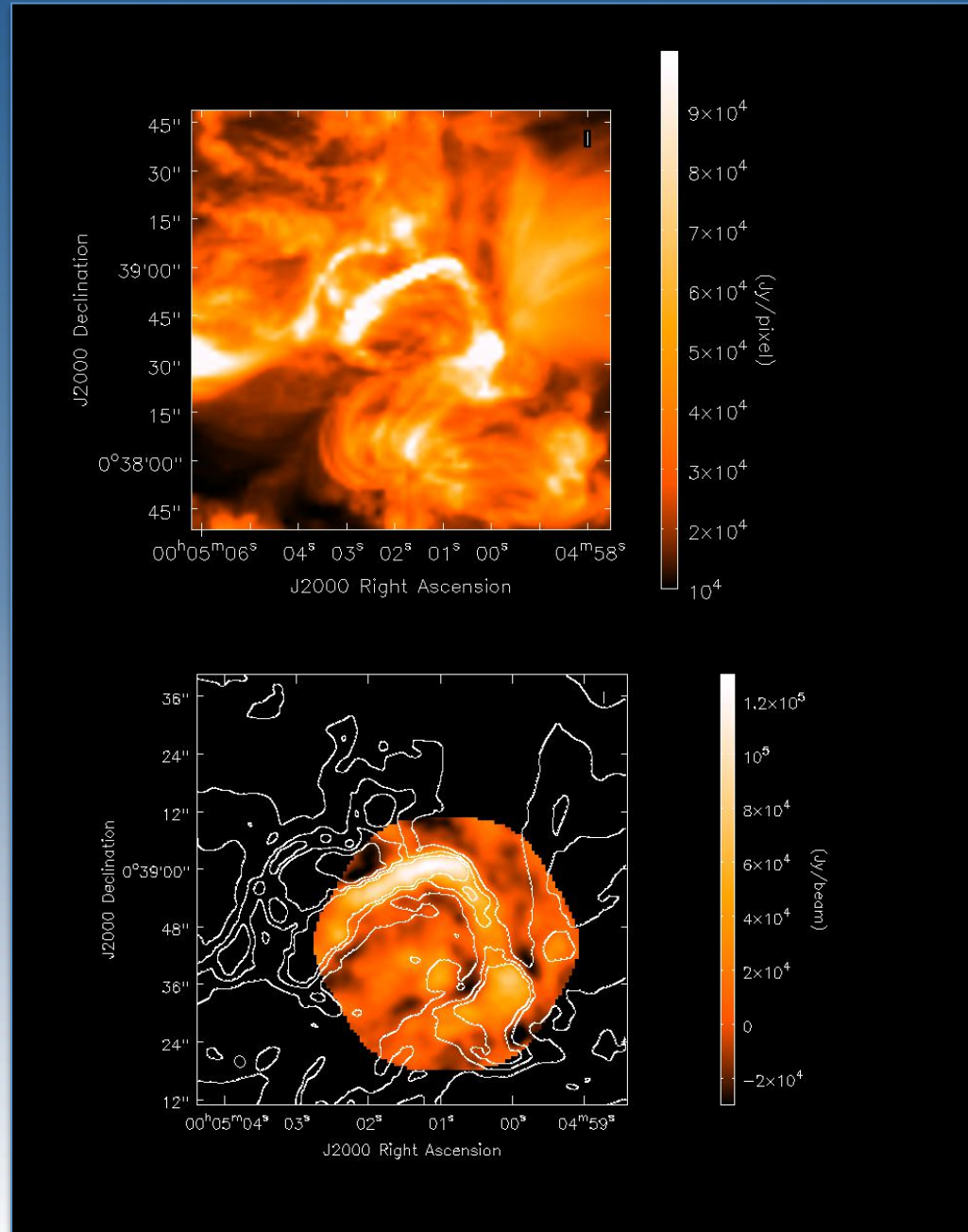
Un solo campo



Simulazioni con CASA
230 GHz

Compact configuration
FOV=27"
Beam=3.9"x1.9"

Mosaico con 7 campi



Conclusioni

Grandi potenzialità con ALMA

- T_B previste molto alte nel mm/submm
- Sensibilità e alta risoluzione spaziale
- Possibilità di t_{int} brevissimi
- Possibilità di dividere ALMA in subarray per mosaicing simultaneo