

---

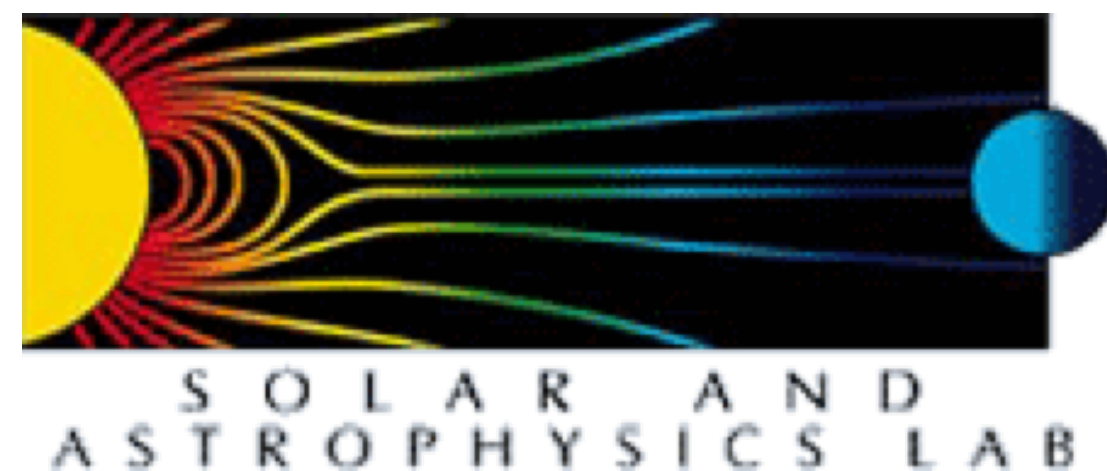
# Evolucija magnetnog polja na mirnom Suncu

Seminar Katedre za astronomiju, Beograd, April 2022

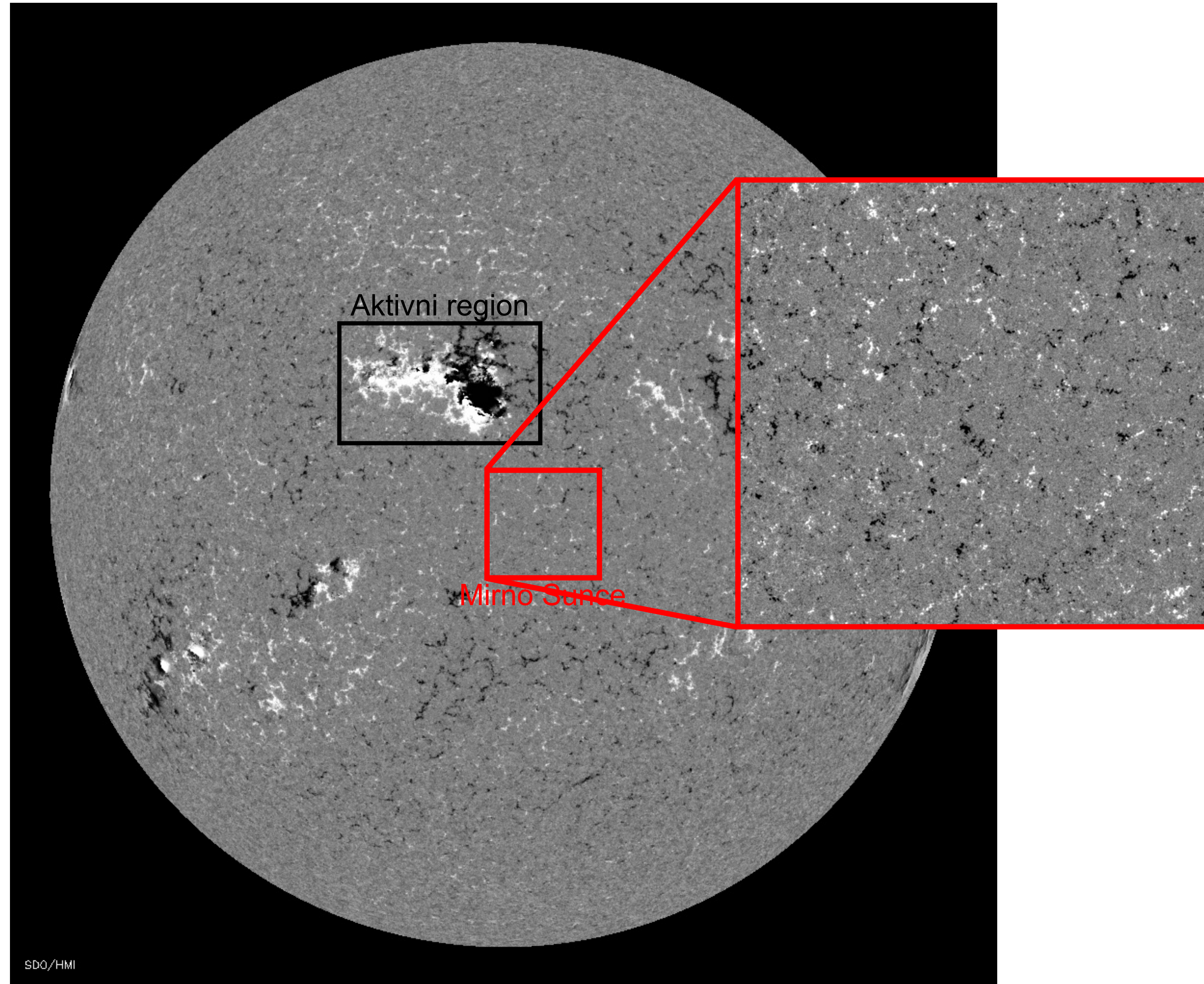
---

Milan Gošić

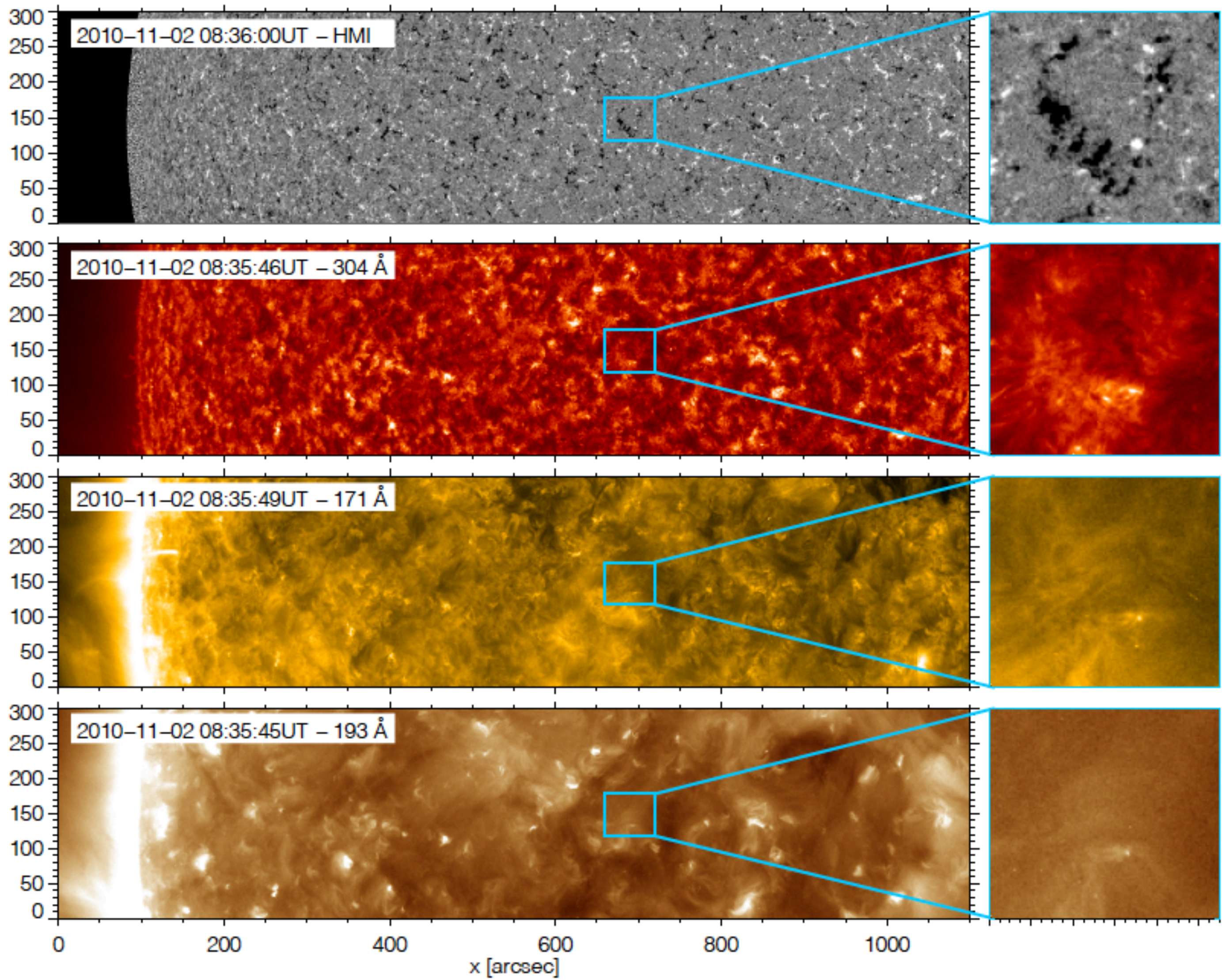
---

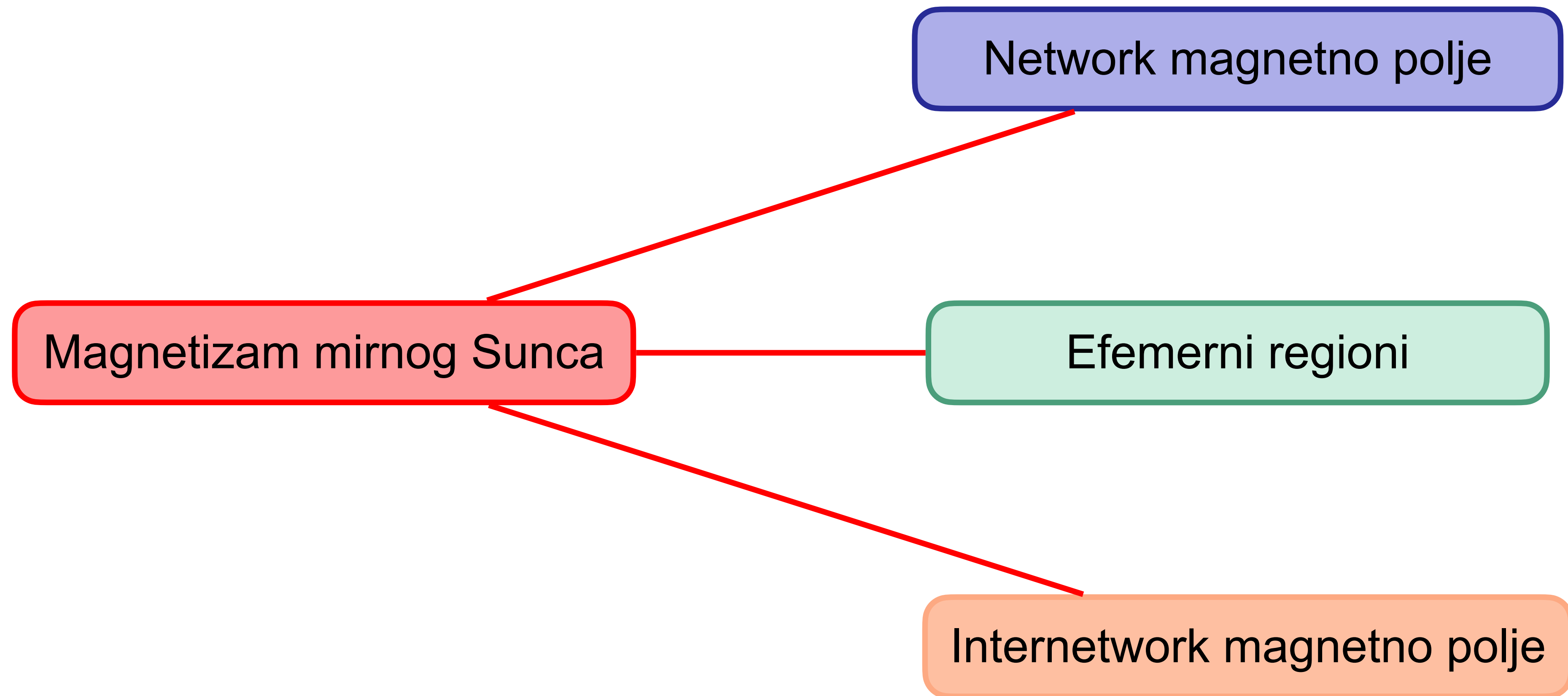


# Mirno Sunce



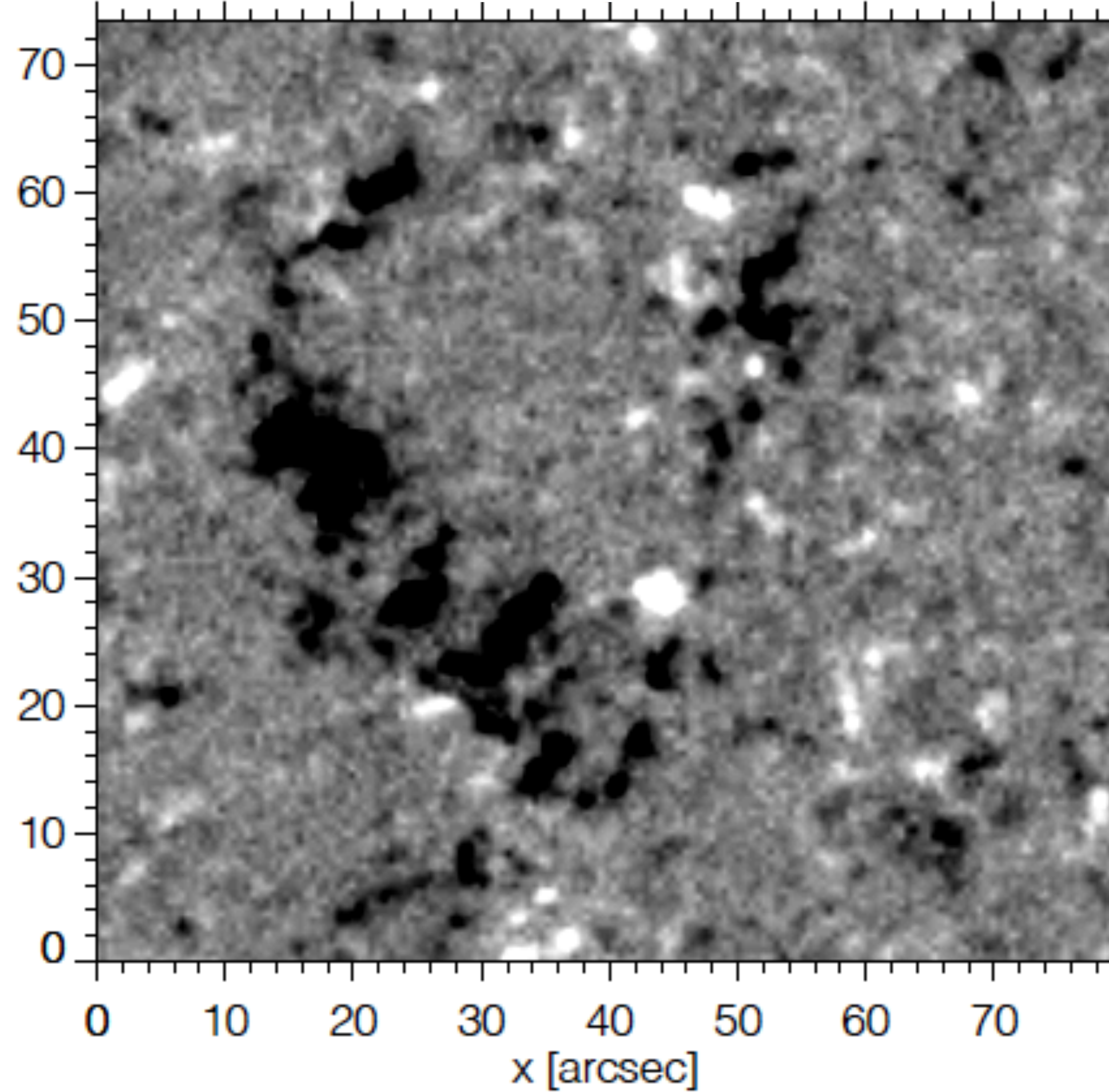
## Tipična supergranula na mirnom Suncu



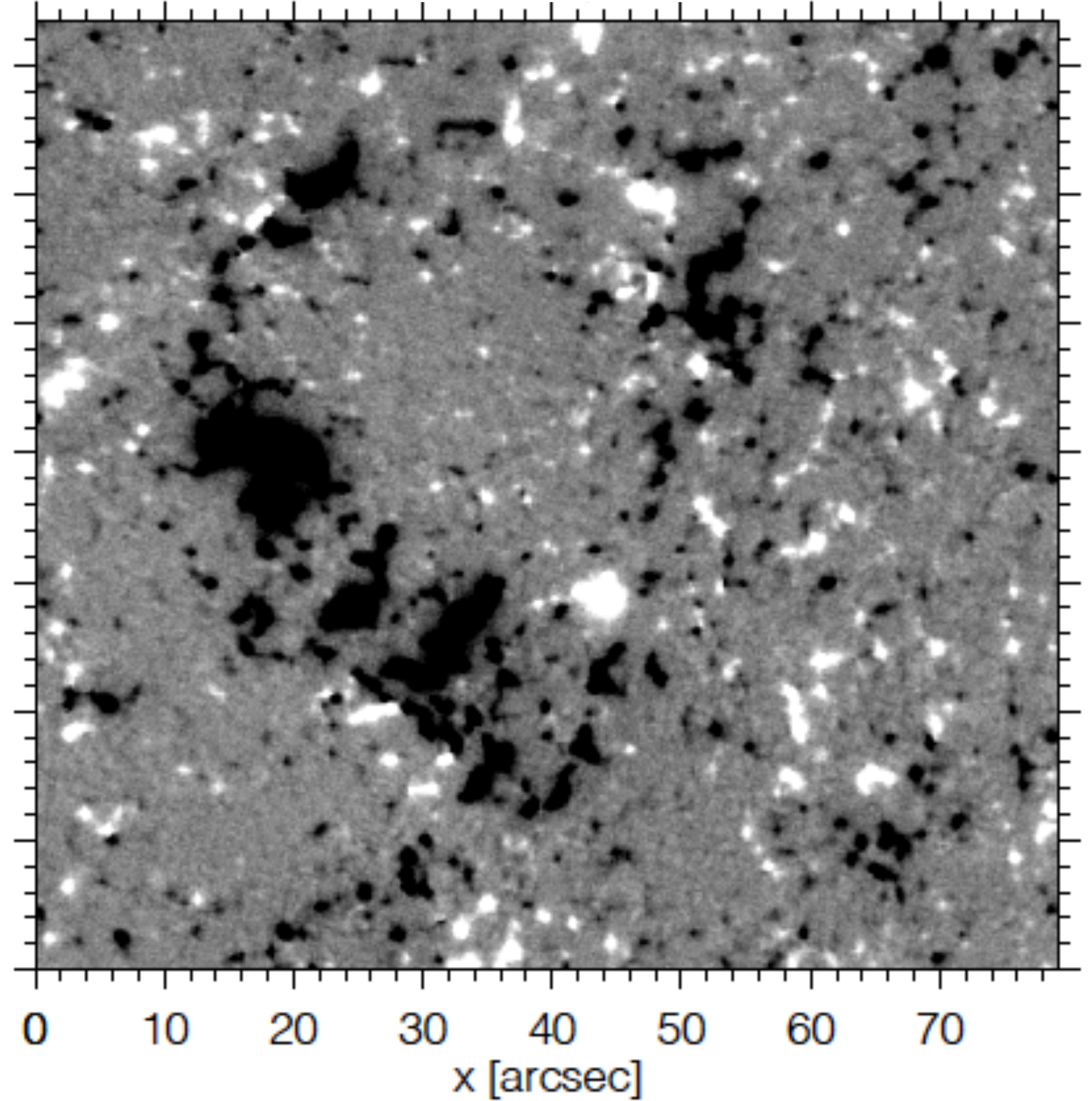


# Mirno Sunce

SDO/HMI 720s



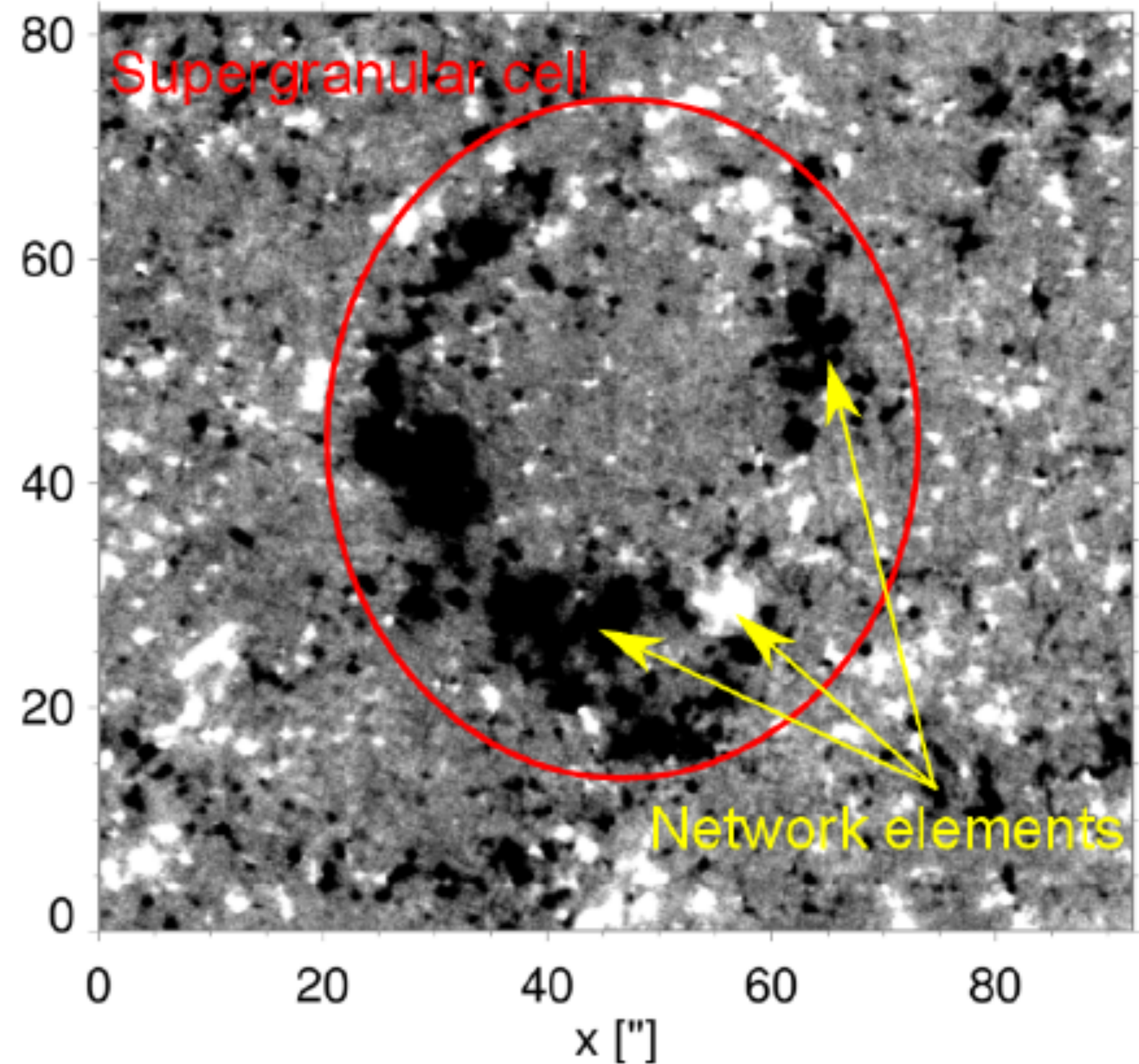
Hinode/NFI



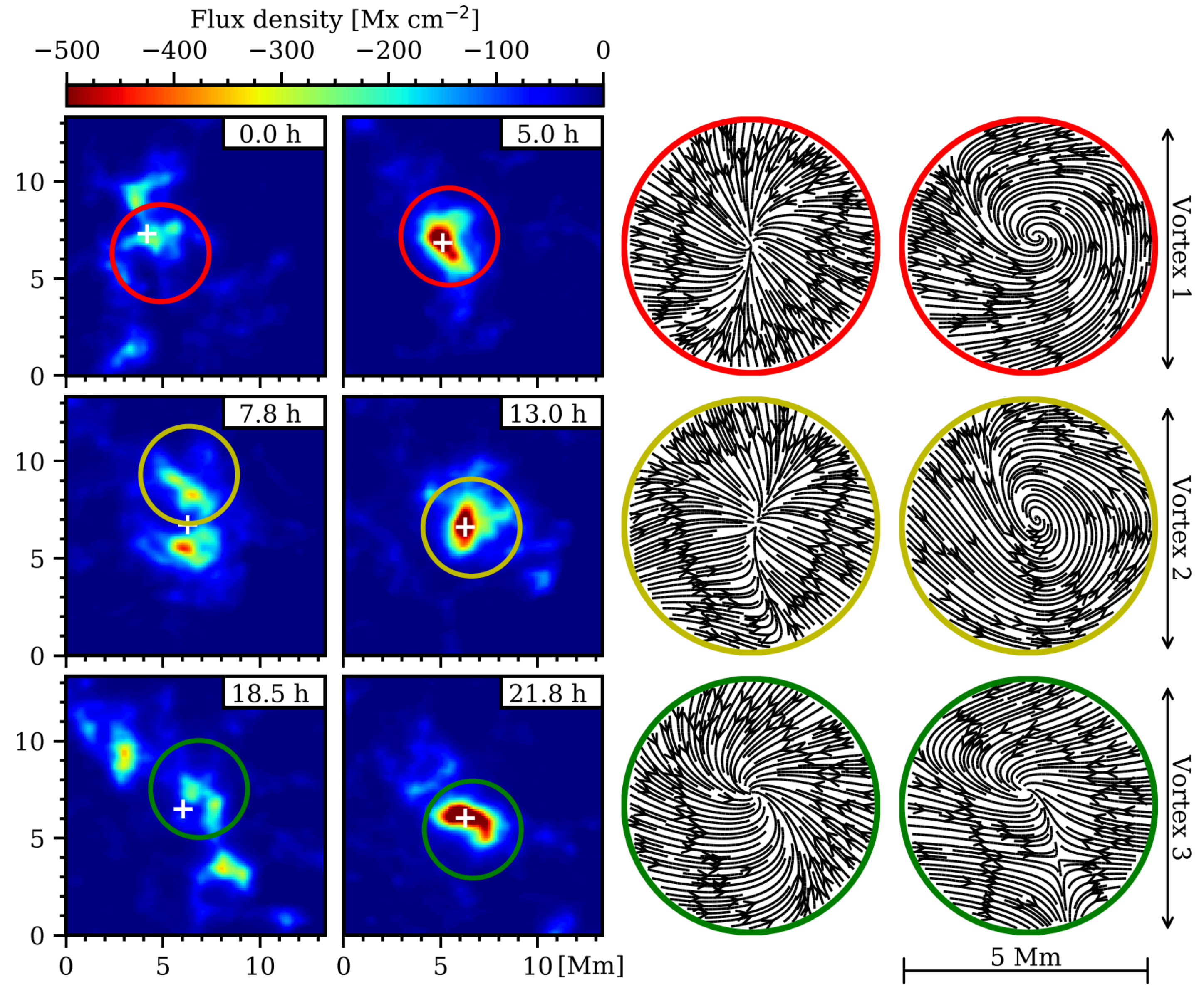
"Internetwork" magnetna polja su praktično nevidljiva na SDO/HMI magnetogramima.

# Network magnetna polja

- Nalaze se na granicama supergranularnih ćelija (Leighton et al. 1962)
- U formi su cevi/tuba magnetnog fluksa sa jačinom magnetnog polja preko 1 kG (e. g. Martínez González et al. 2012)
- Uzimajući u obzir celu površinu Sunca, ukupan apsolutni flux je  $10^{23}$ - $10^{24}$  Mx, što je uporedivo sa ukupnim fluksom u aktivnim regionima (Schrijver & Harvey 1994, Hagenaar et al. 1998)



# Network magnetna polja

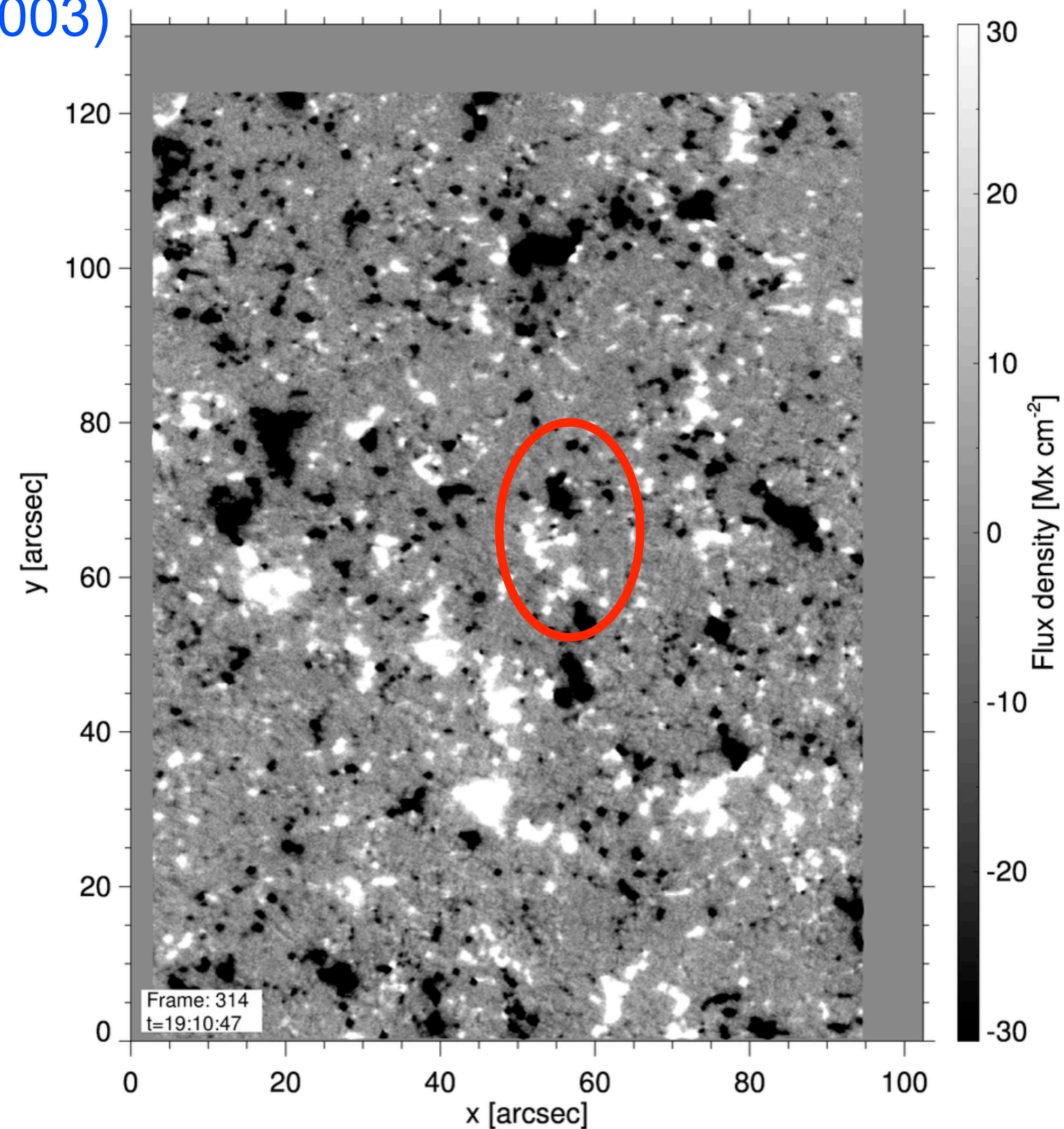
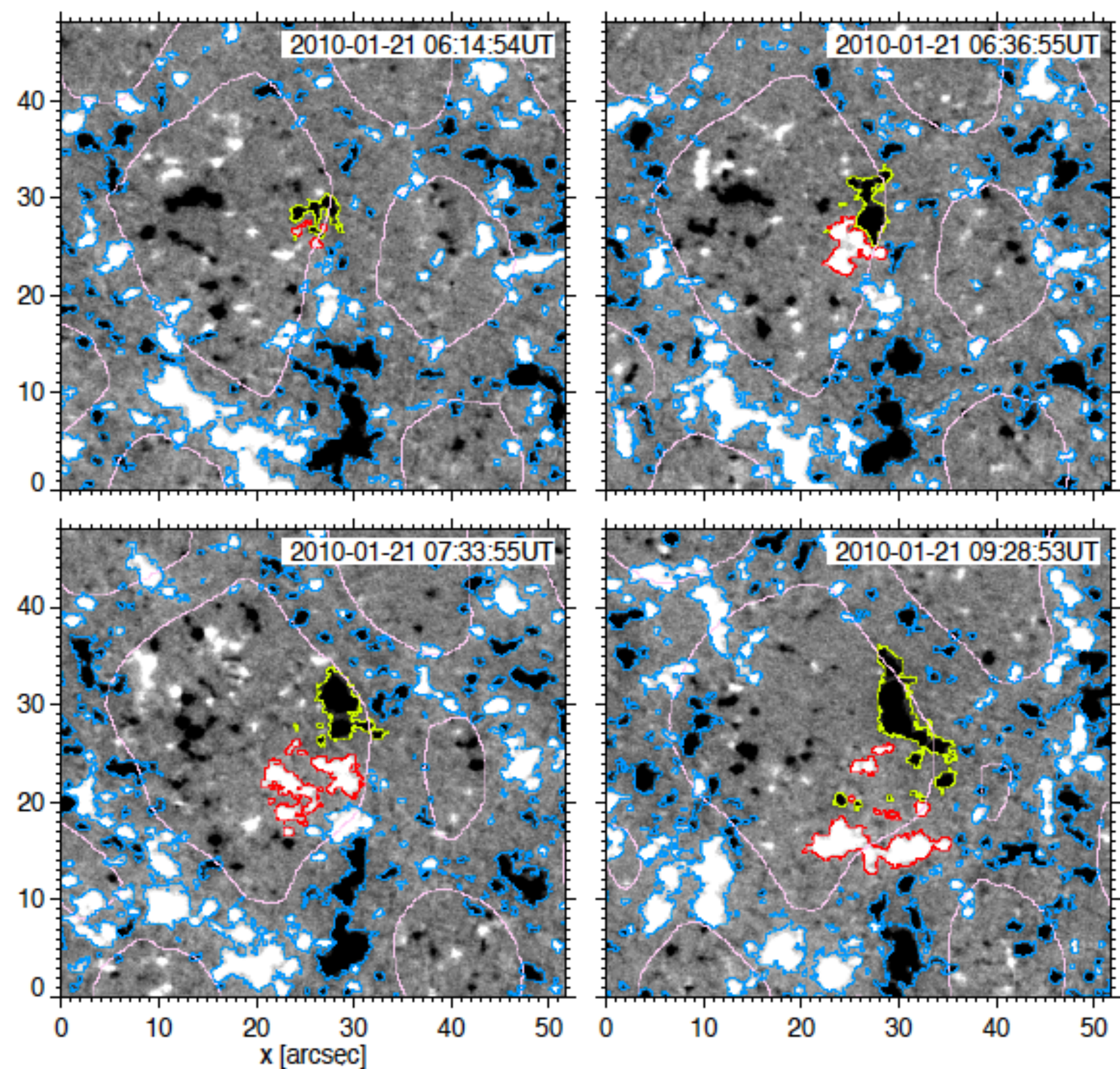


- Magnetni fluks je koncentrisan i evakuisan vrtlozima. Kada vrtlozi nestanu, magnetni elementi oslabe i fragmentuju se.
- Fotosferski magnetni vrtlozi mogu predstavljati efikasan mehanizam za kanalisanje energije iz donjih u više slojeve atmosfere.

(Requerey et al. 2018)

# Efemerni regioni

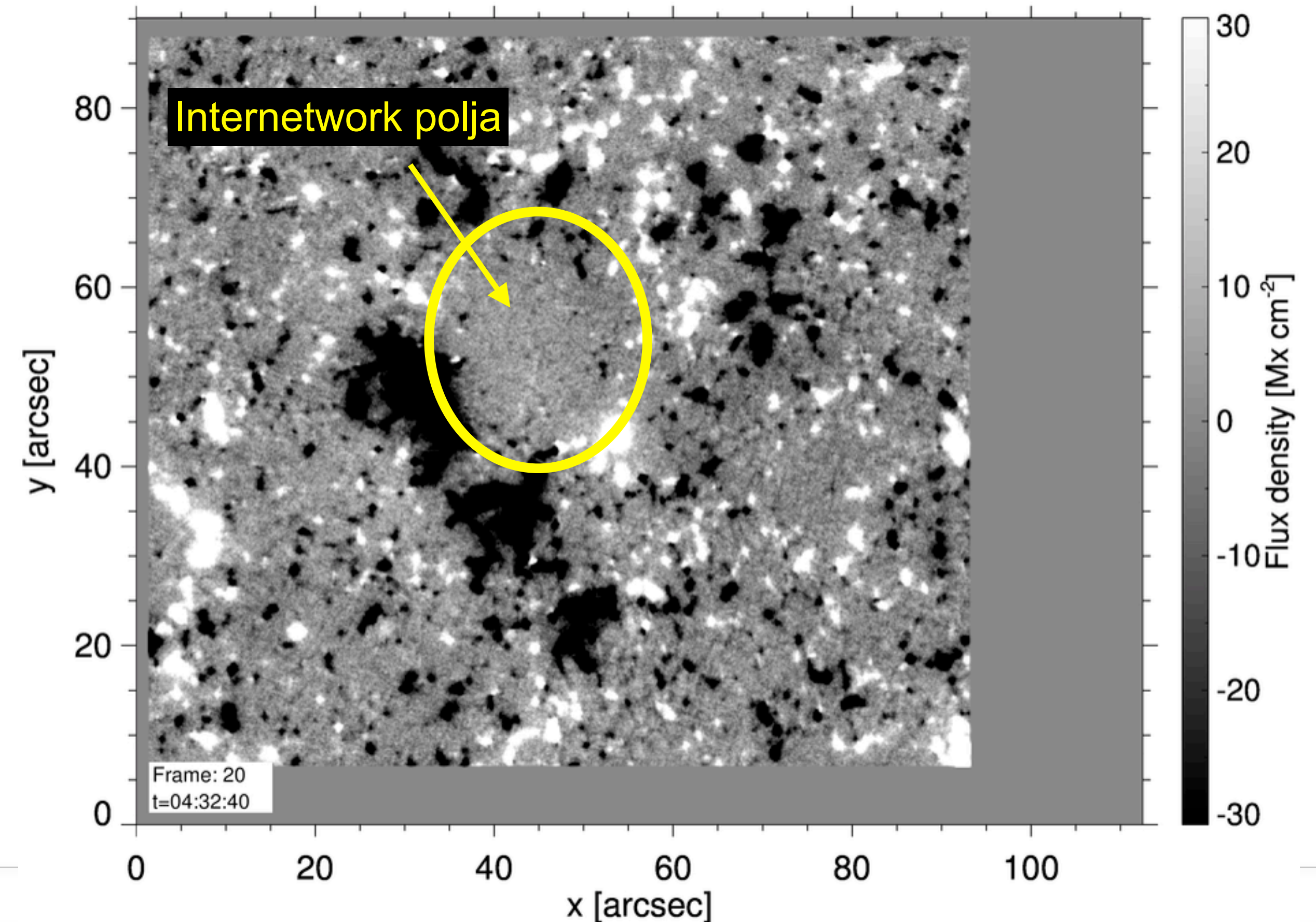
- Bipolarne magnetne strukture (Harvey & Martin 1973)
- Životni vek je 3-4 sata (Hagenaar 2001)
- Količina ukupnog fluksa je  $10^{18}$ - $5 \times 10^{19}$  Mx (Hagenaar et al. 2003)





# Internetwork fields

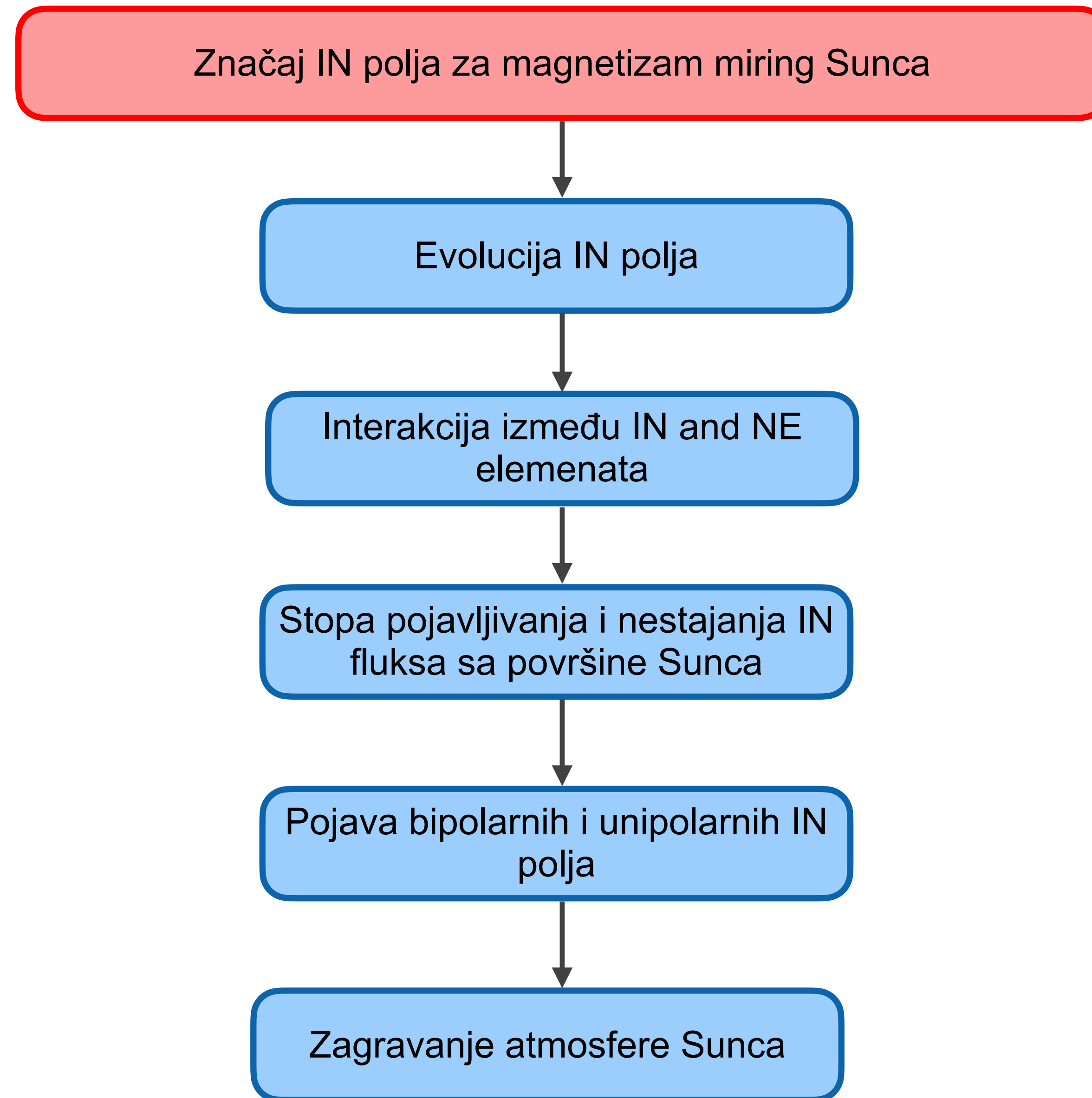
- Nalaze se unutar supergranula (Leighton et al. 1962)
- Na površini Sunca ostaju kao koherentne strukture po samo nekoliko minuta (Zhou et al 2013)
- Tipična veličina internetwork elemenata je 1 arcsec (Livingston and Harvey 1975; Zirin 1985, 1987, Wang 1988, Wang et al. 1995, Zhou et al. 2010)
- Pojedinačno, internetwork elementi nose ukupan magnetni fluks od oko  $10^{16}$  -  $10^{18}$  Mx (Livingston and Harvey 1975; Zirin 1985, Wang et al. 1995, Zhou et al. 2010)



## Zašto proučavamo ove oblasti?

Do 50% fluksa mirnog Sunca je u formi IN elemenata ([Wang et al. 1995](#))

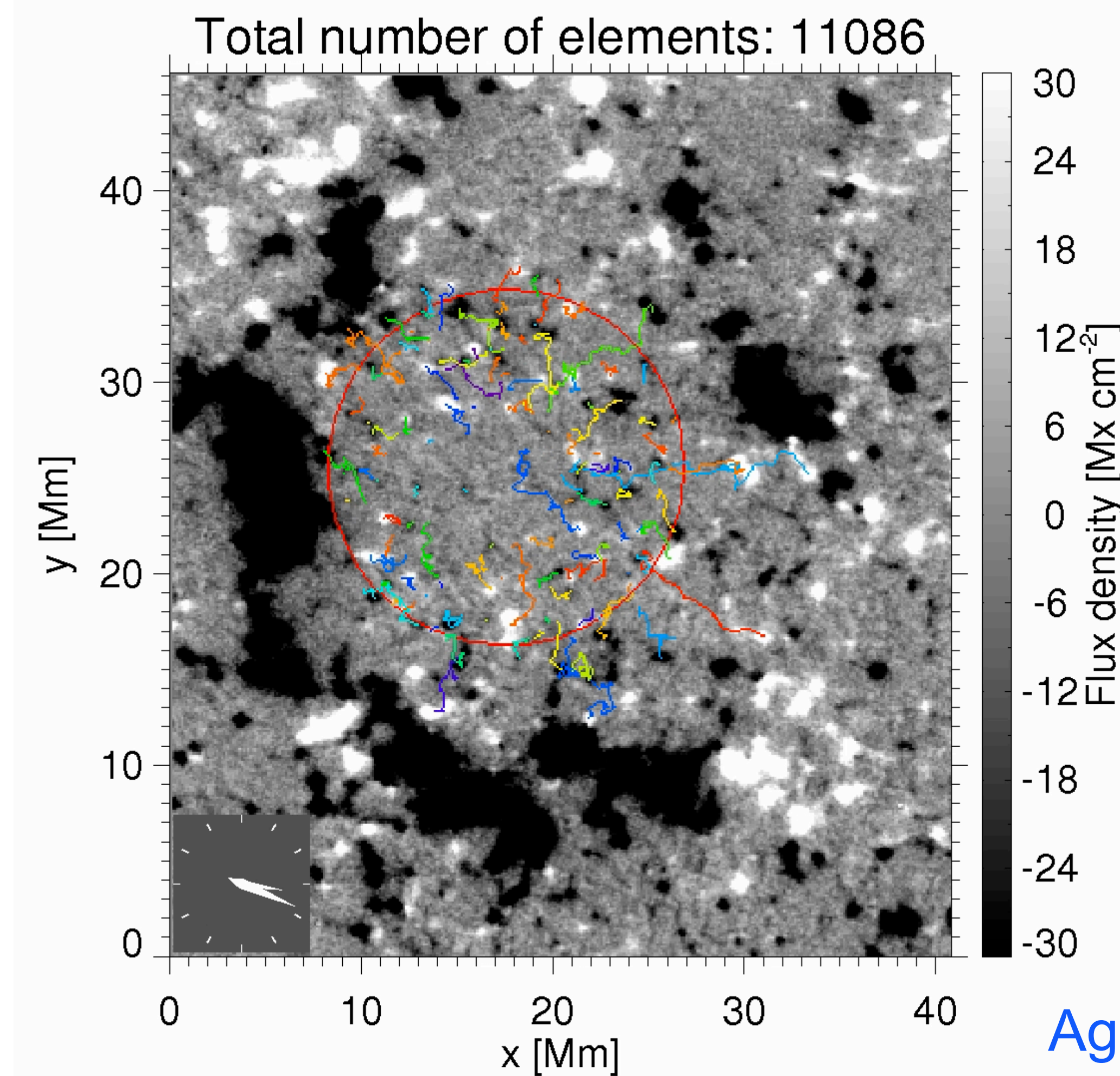
Internetwork polja su važna jer se pojavljuju svuda na Suncu i samo relativno mali deo bi bio dovoljan da nadomesti gubitke energije u spoljašnjoj atmosferi Sunca. ([Trujillo Bueno et al. 2004](#))



Prostorno-vremenska evolucija IN polja

# Evolucija internetwork magnetnih polja

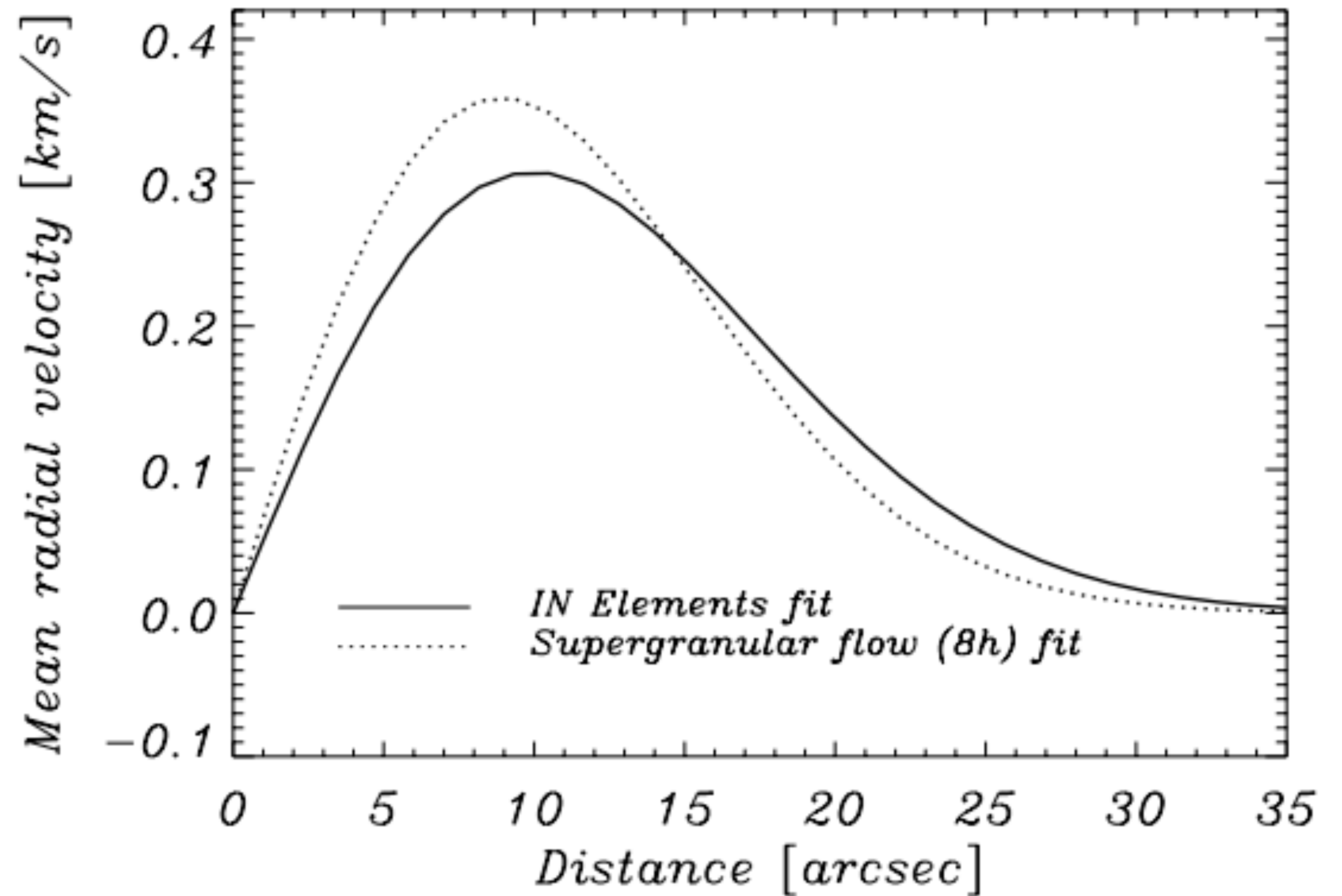
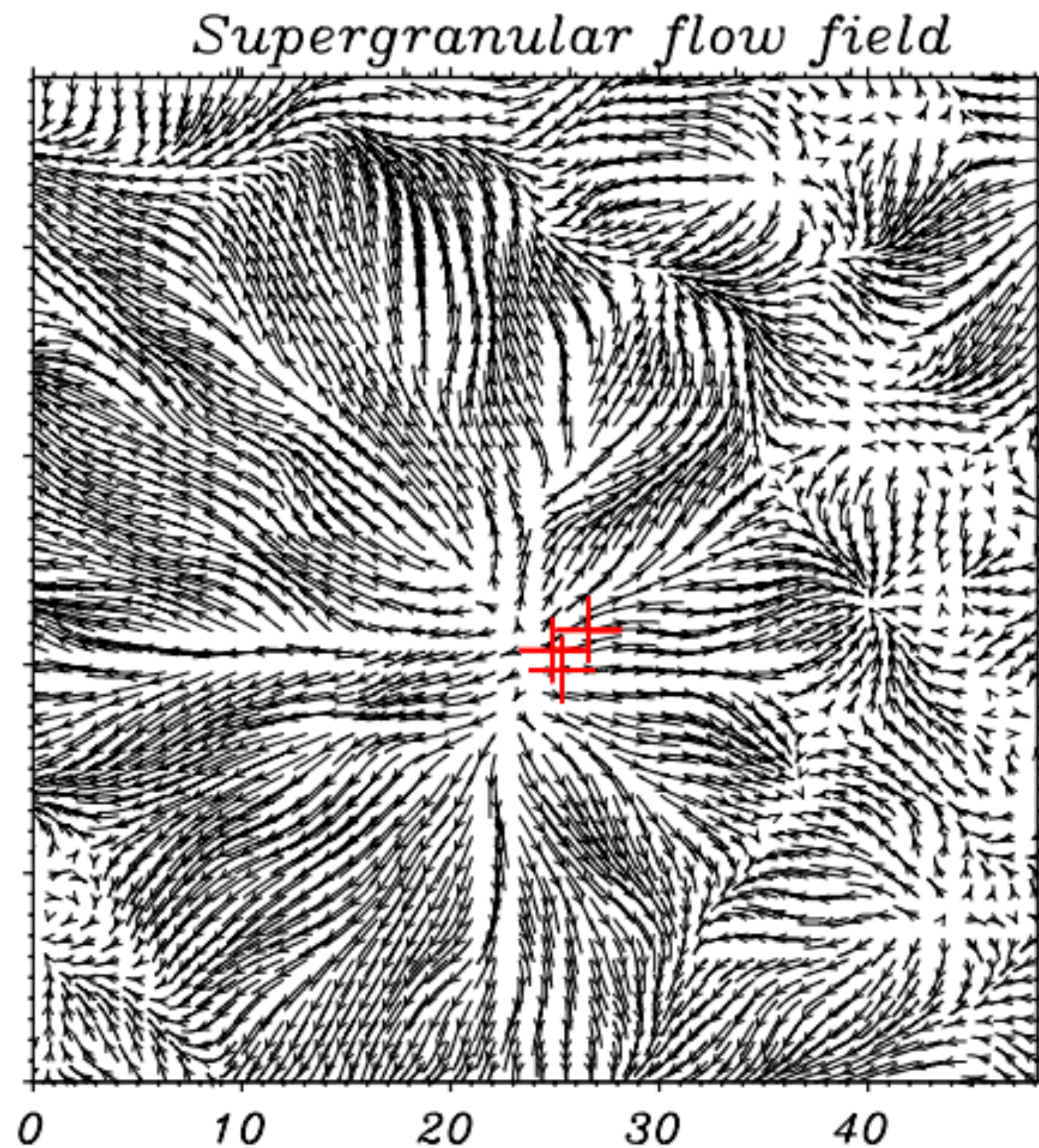
- Kretanje magnetnih elemenata je rezultat superdifuznog kretanja (nasumičnog pomeranje centra mase magnetnih elemenata), granularne advekcije na kratkim vremenskim skalama i advekcije supergranulacijom na dugim vremenskim skalama (Abramenko et al. 2011, Manso Sainz et al. 2011, Chitta et al. 2012, Giannattasio et al. 2014ab, Jafarzadeh et al. 2014, Agrawal et al. 2018, Giannattasio et al. 2019)



Agrawal et al. 2018

# Evolucija internetwork magnetnih polja

- Internetwork elementi se transportuju ka network-u supergranularnim i granularnim konvektivnim kretanjima



Orozco Suárez et al. (2012)

Interakcija IN i NE magnetnih elemenata

# Interakcija internetwork elemenata

- Ranije se verovalo, na osnovu SoHO/MDI posmatranja, da su efemerni regioni glavni izvor fluksa za NE elemente ([Hagenaar et al. 2003, 2008](#))
- Efemerni regioni mogu u potpunosti da zamene NE fluks za 40 sati ([Schrijver et al. 2003, 2008](#))

Problem: MDI ne vidi internetwork polja

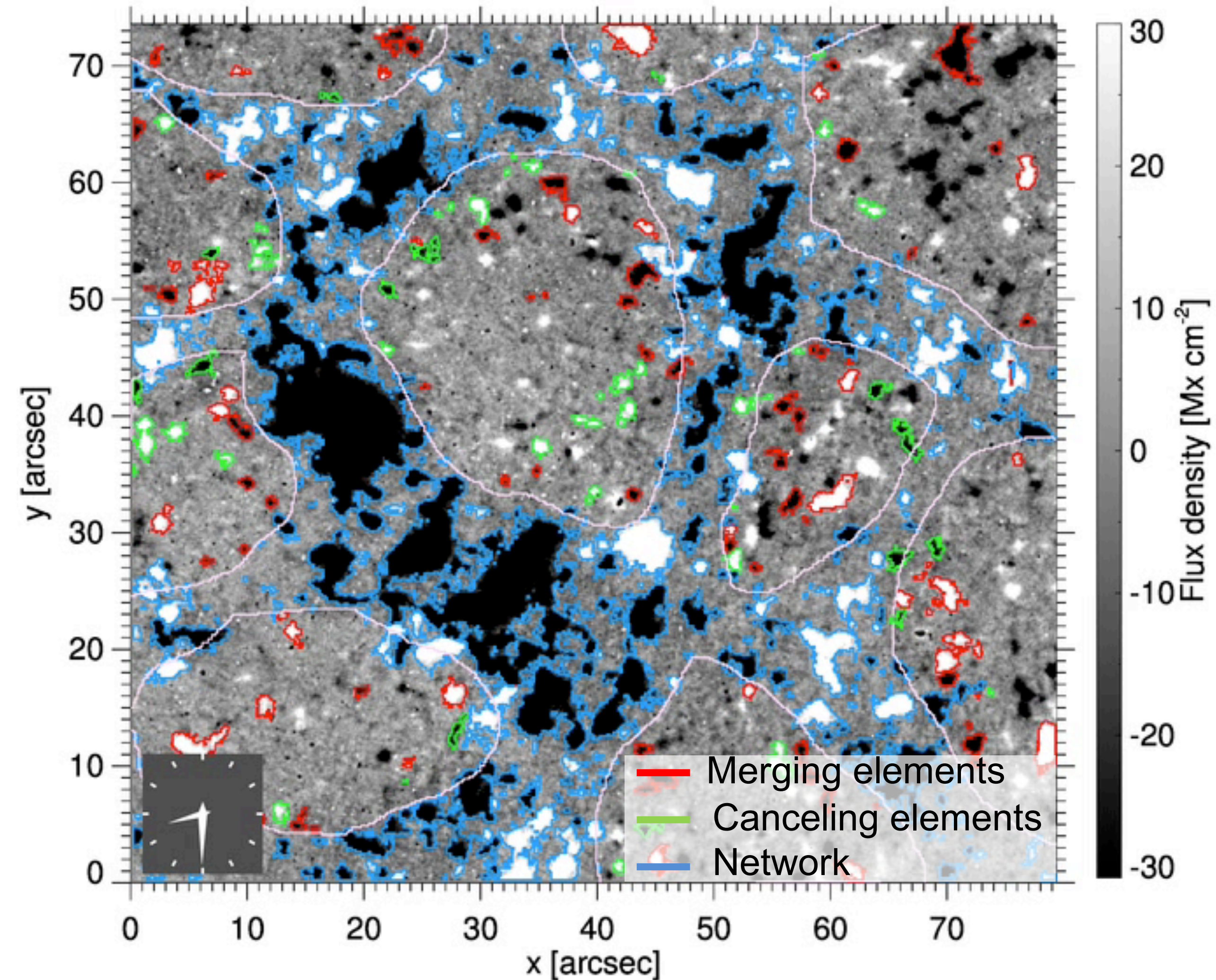
- Interakcija izmedju IN i NE polja bi trebalo da bude moguća na skalama koje nisu dostupne MDI-u ([Lamb et al. 2008](#))
- Hinode/NFI je mogao da posmatra Sunce neprekidno jedan do dva dana sa osetljivošću od samo 4G/pixel.

Doprinos IN polja NE strukturama

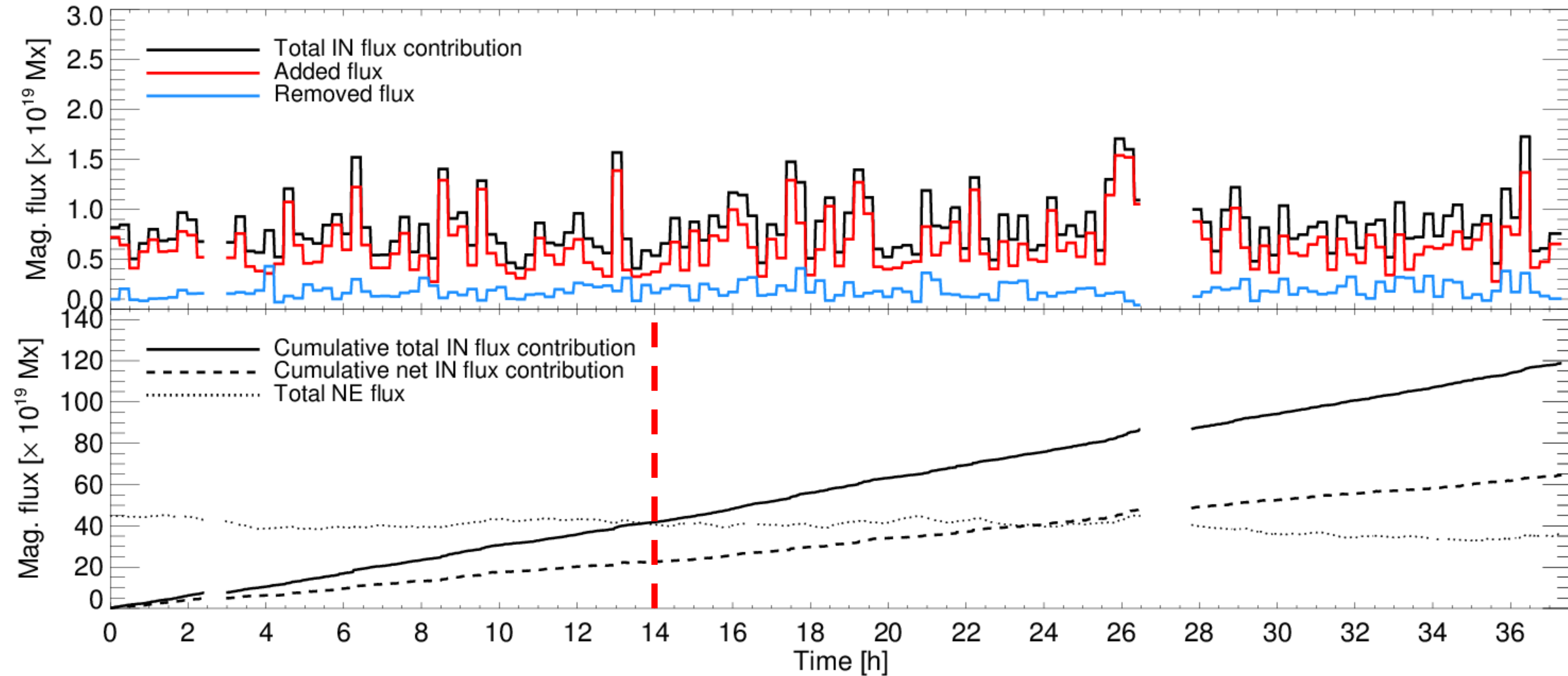


# Interakcija internetwork elemenata

- Internetwork elementi doprinose NE fluksu kroz dva procesa:
  - spajanjem sa NE elementima: fluks je dodat NE-u
  - potiranjem sa NE elementima: fluks je uklonjen iz NE-a



# Interakcija internetwork elemenata



- IN elementi doprinose sa  $1.6 \times 10^{24}$  Mx day<sup>-1</sup> NE elementima (na celoj površini Sunca)
- IN regioni mogu da obezbede dovoljnu količinu fluksa za održavanje NE elemenata za samo **~14 sati**.

Promena paradigme: IN elementi su glavni izvor fluksa za NE, i generalno na mirnom Suncu

Pojavljivanje/nestajanje IN polja na/sa  
površine Sunca

# Pojavljivanje i nestajanje internetwork elemenata

- Internetwork elementi se pojavljuju na površini Sunca:

in-situ

- Internetwork elementi nestaju:

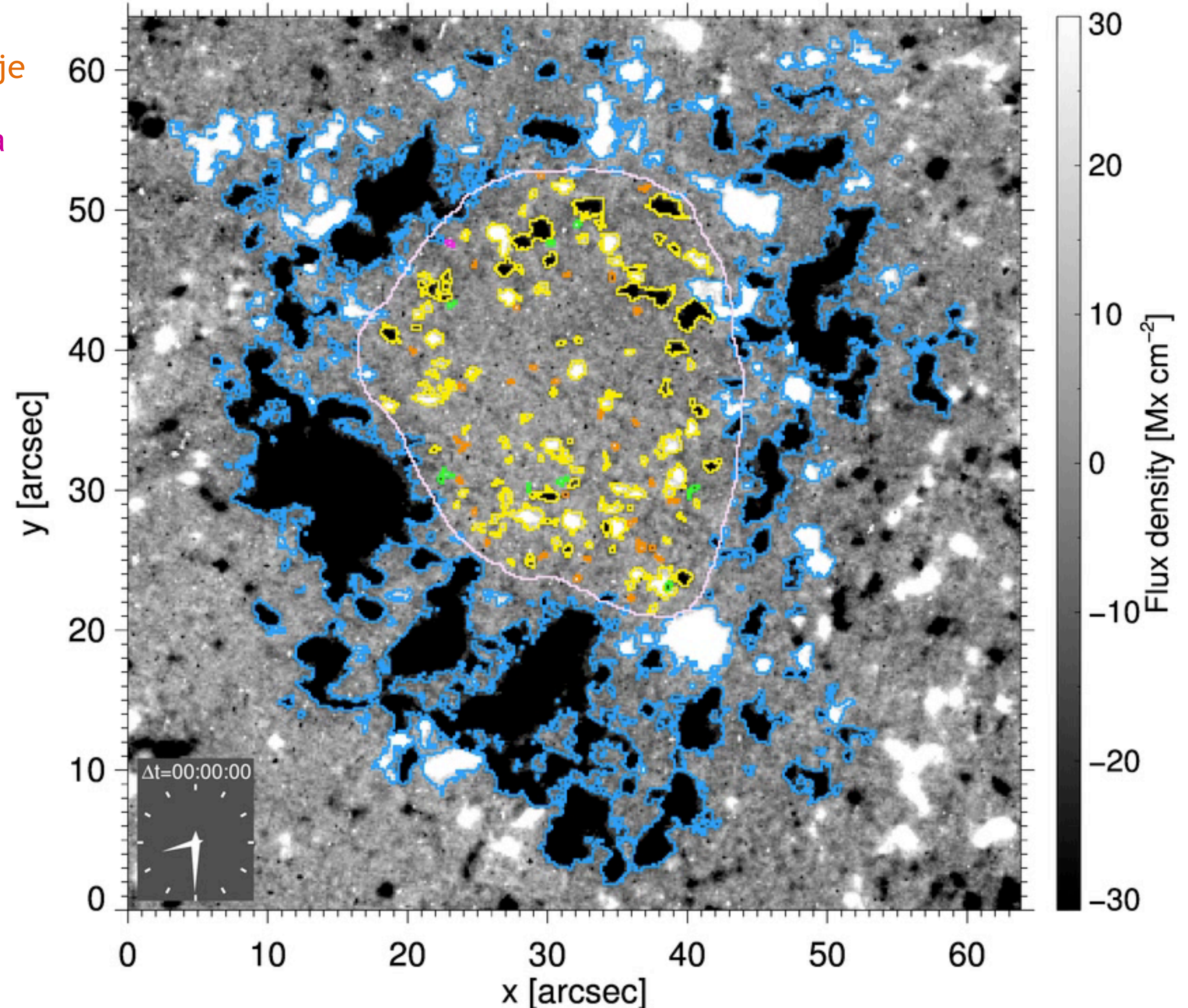
iščezavanjem

potiranjem

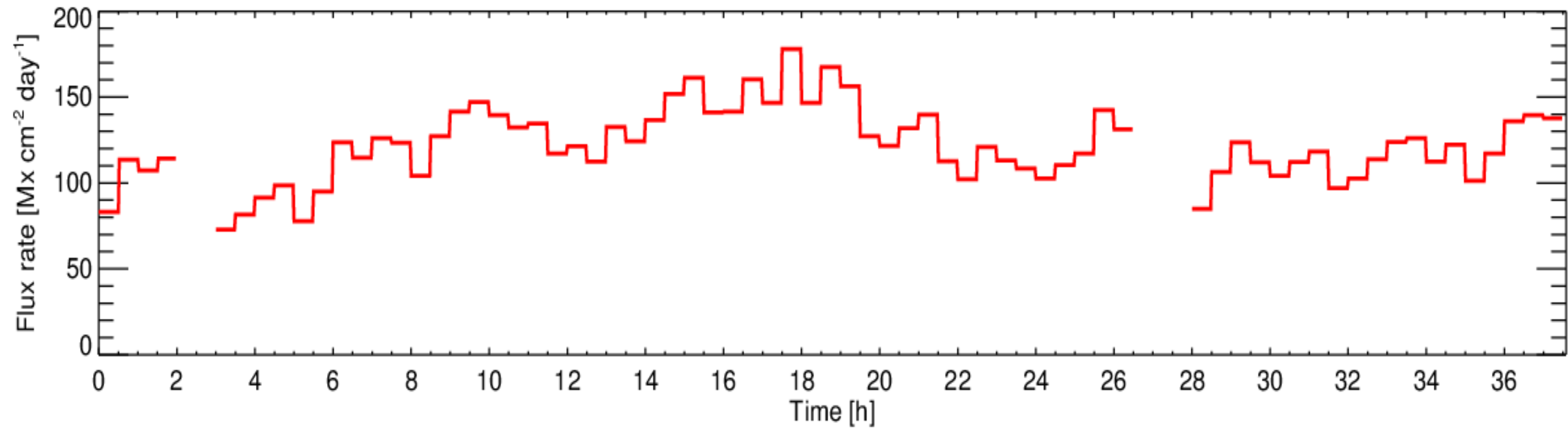
transferom fluksa u NE regione

# Pojavljivanje i nestajanje internetwork elemenata

- In-situ pojavljivanje
- In-situ nestajanje/iščezavanje
- Potiranje
- Interakcija sa NE elementima

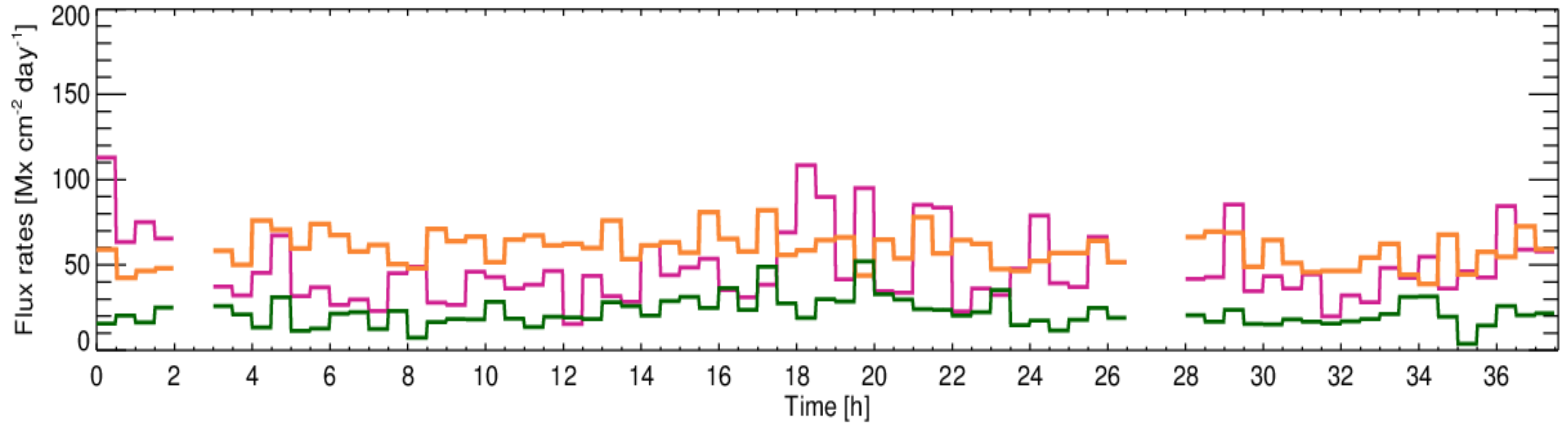


# Pojavljivanje i nestajanje internetwork elemenata



- In-situ pojavljivanje se odigrava stopom od  $120 \pm 3 \text{ Mx cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$
- Stopa pojavljivanja fluksa u aktivnim regionima je  $1 \text{ Mx cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (Thornton & Parnell 2010).

# Pojavljivanje i nestajanje internetwork elemenata



- Stopa iščezavanja:  $53 \pm 7 \text{ Mx cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$
- Stopa potiranja:  $23 \pm 3 \text{ Mx cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$
- Transfer fluksa u NE regione:  $50 \pm 3 \text{ Mx cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$



# Pojavljivanje i nestajanje internetwork elemenata

- Stope pojavljivanja i nestajanja IN fluksa su u balansu.

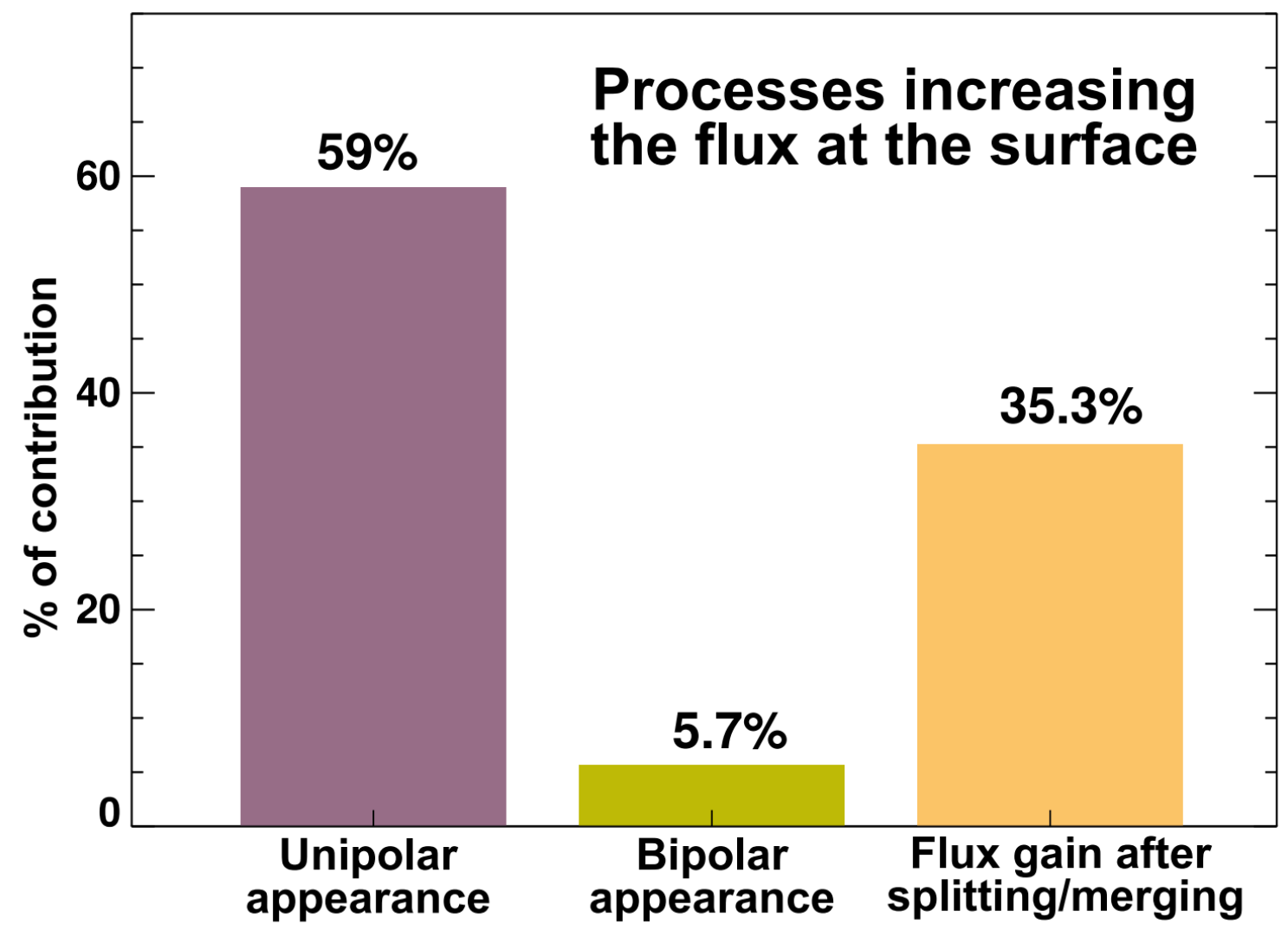
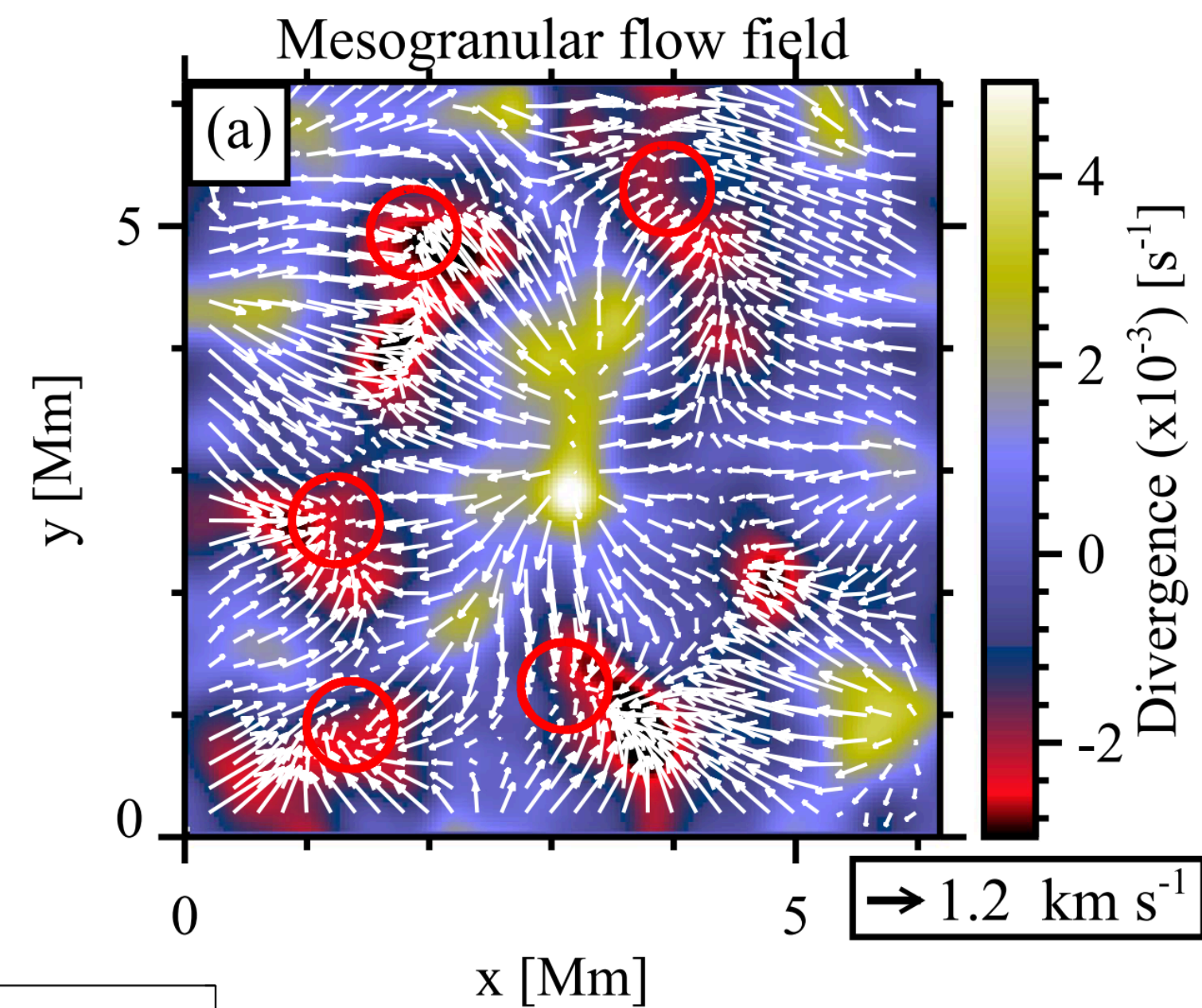
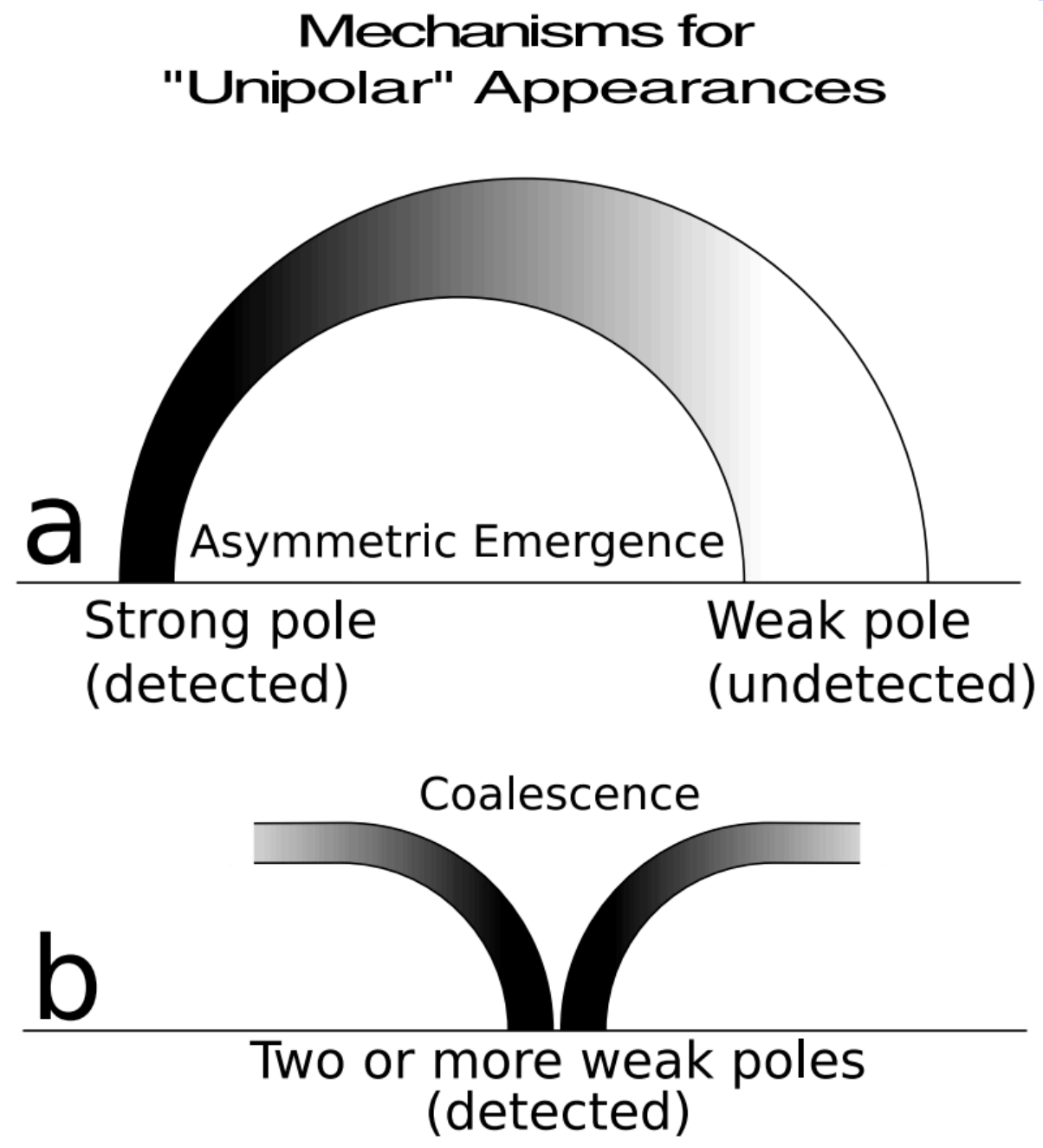
	Set 1	Set 2	Prosek
Pojavljivanje			
In-situ	117	122	120 ± 3
Nestajanje			
Išcezavanje	46	59	53 ± 3
Potiranje	20	25	23 ± 3
Transfer fluksa	53	47	50 ± 3
Ukupno	119	131	125 ± 6

Pojavljivanje bipolarnih i unipolarnih IN  
magnetnih struktura

# Bipolarna i unipolarna internetwork magnetna polja

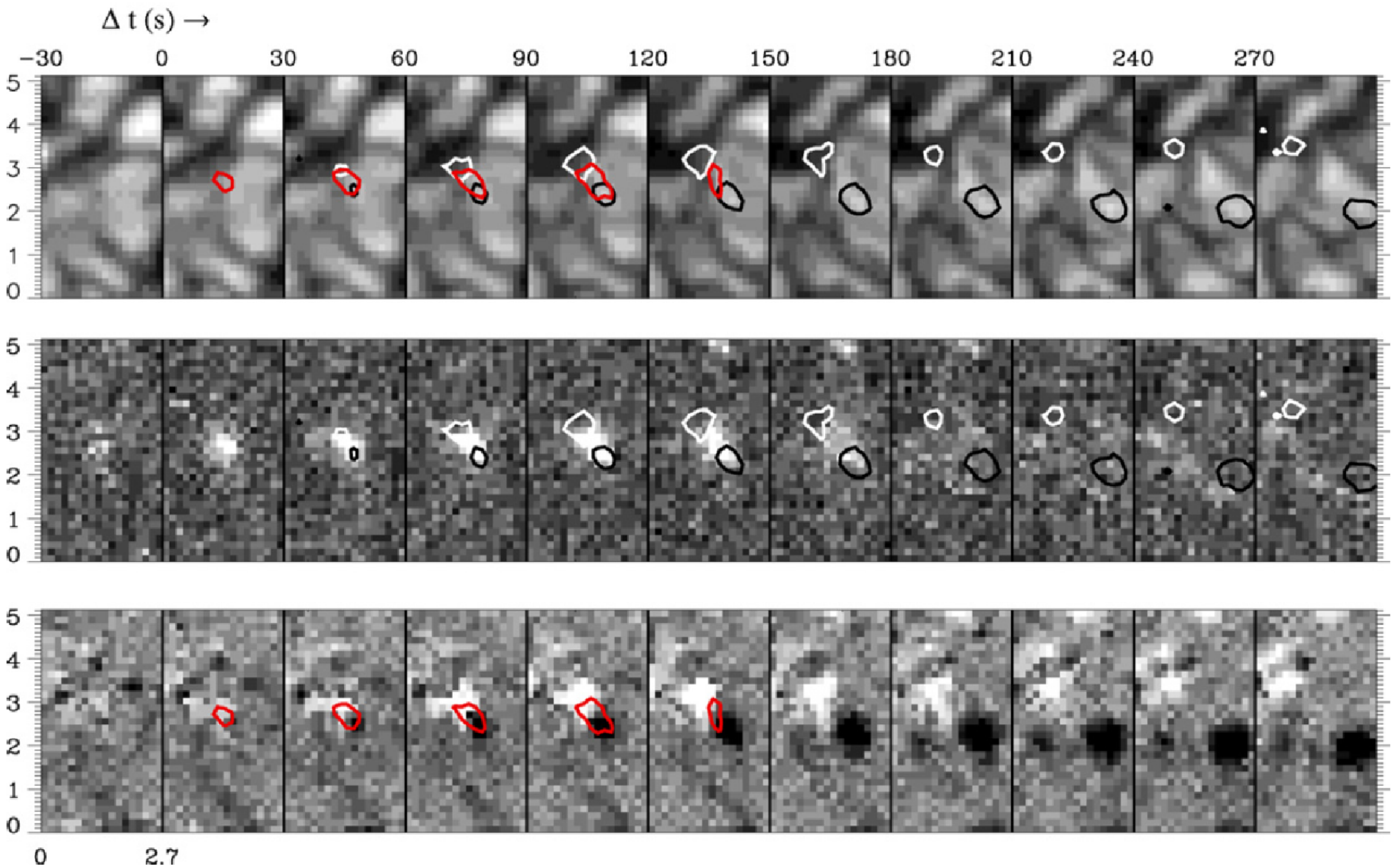
Lamb et al. 2008

Requerey et al. 2017



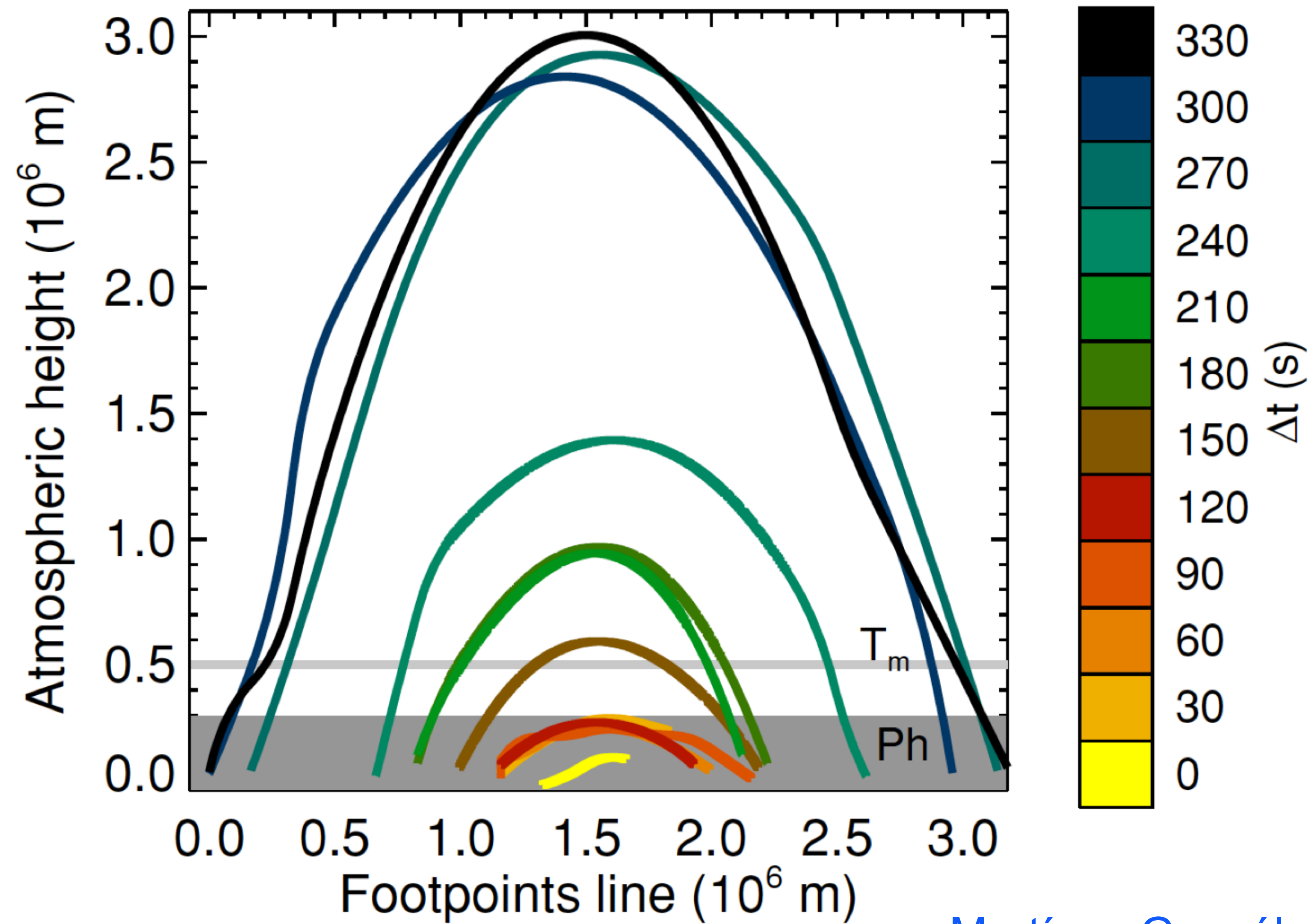
Smitha et al. 2017  
Anusha et al 2017

# Bipolarna i unipolarna internetwork magnetna polja



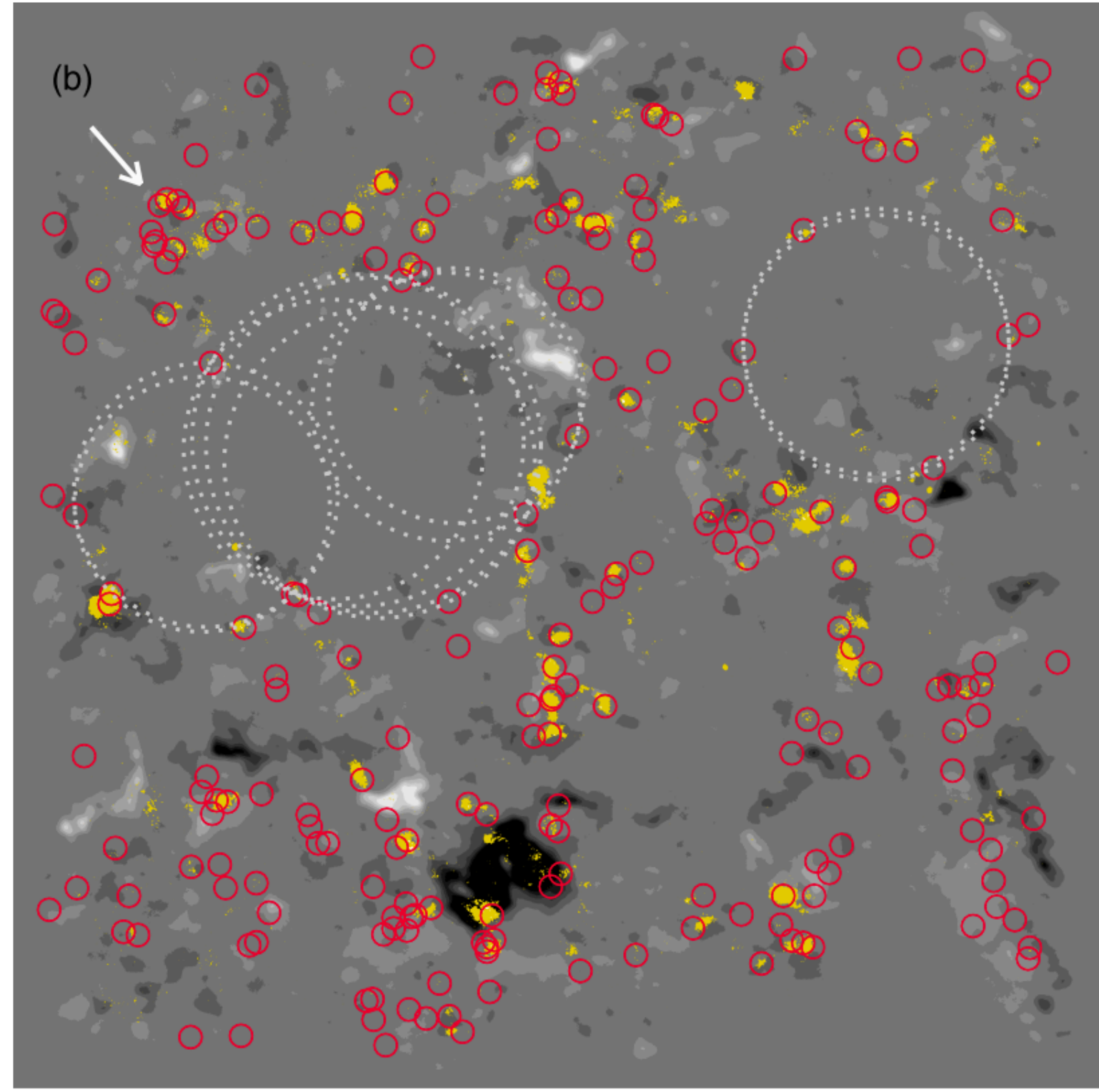
Martínez González & Bellot Rubio 2009

# Bipolarna i unipolarna internetwork magnetna polja

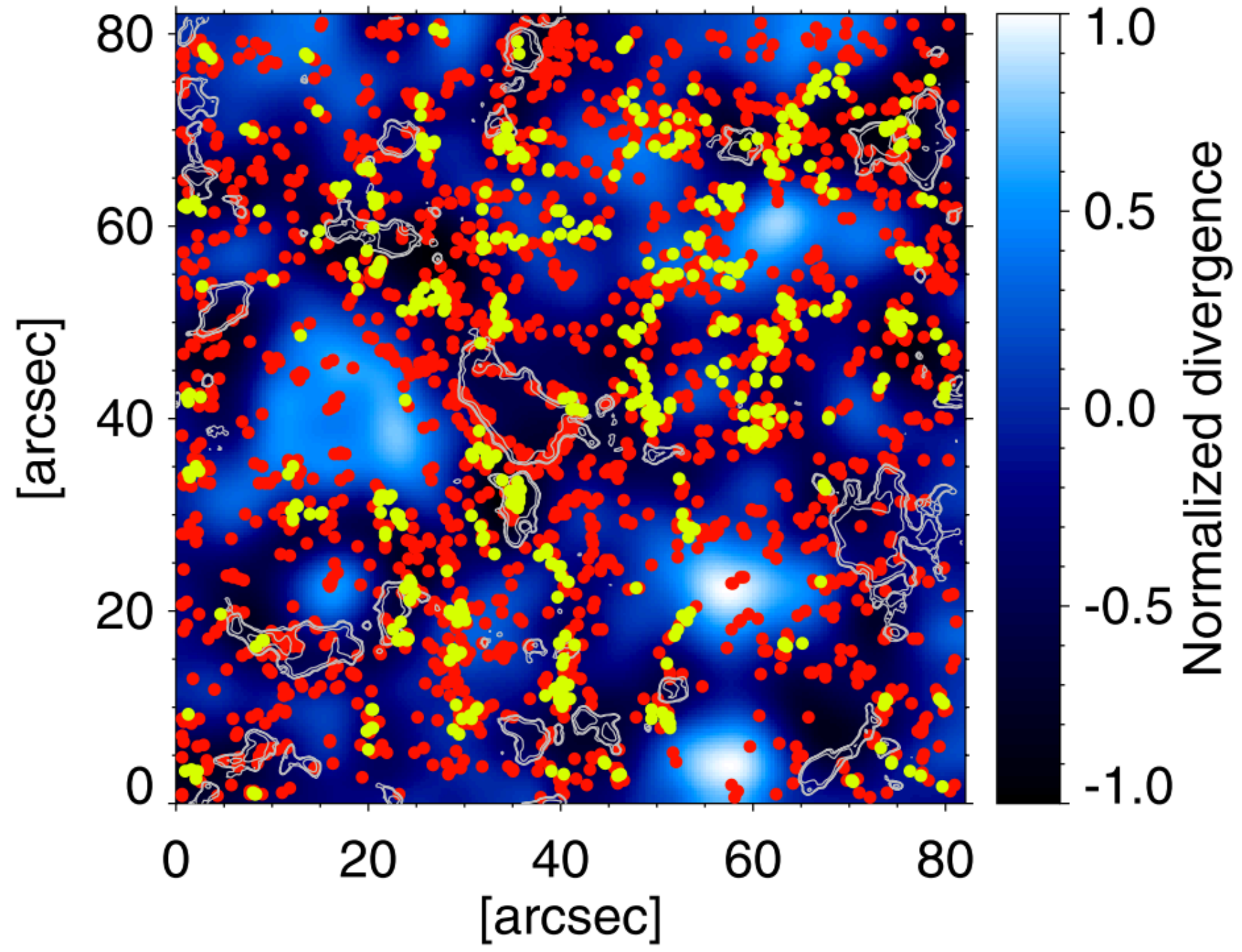


Martínez González et al. 2010

# Bipolarna i unipolarna internetwork magnetna polja

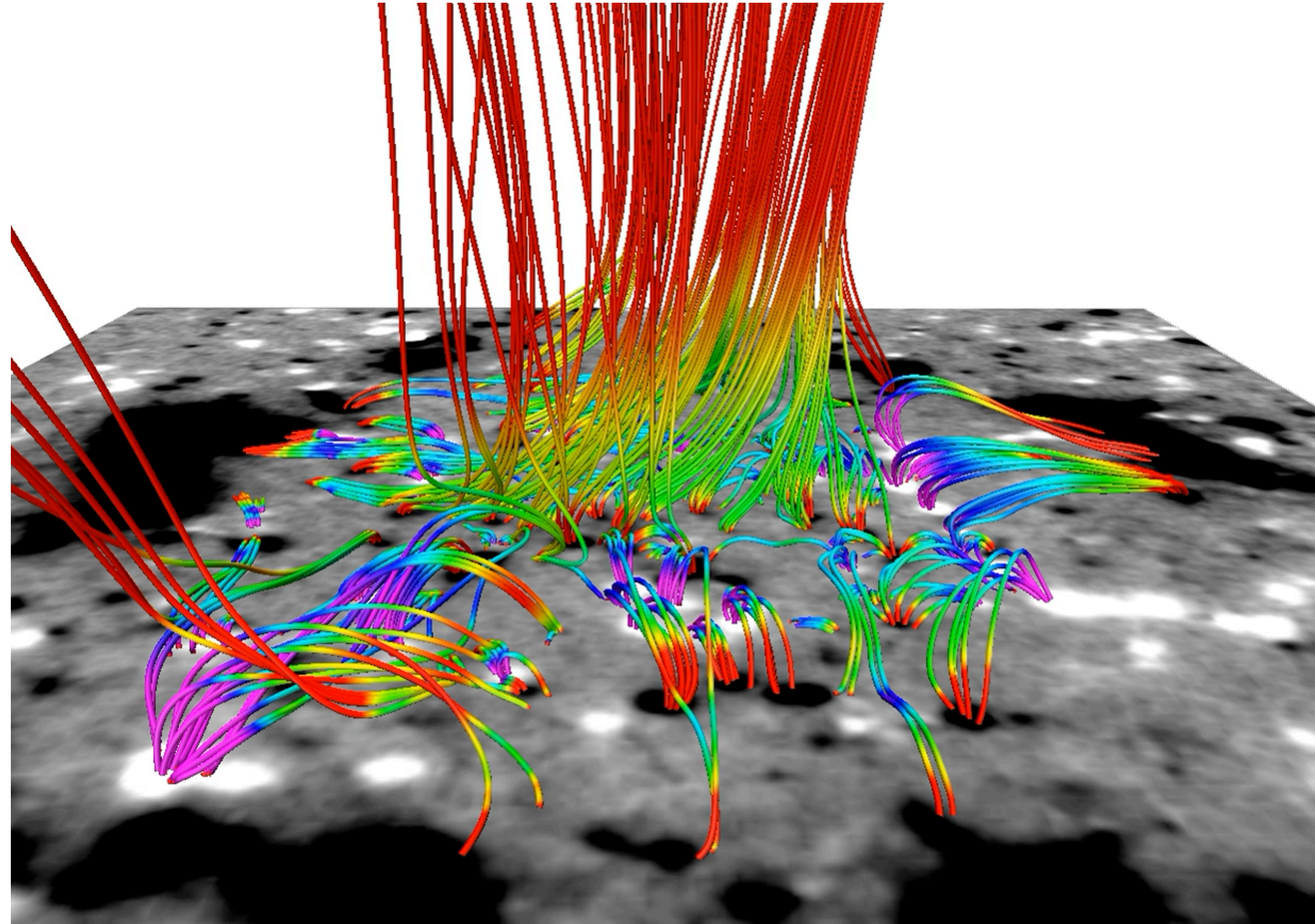


Martínez González et al. 2012



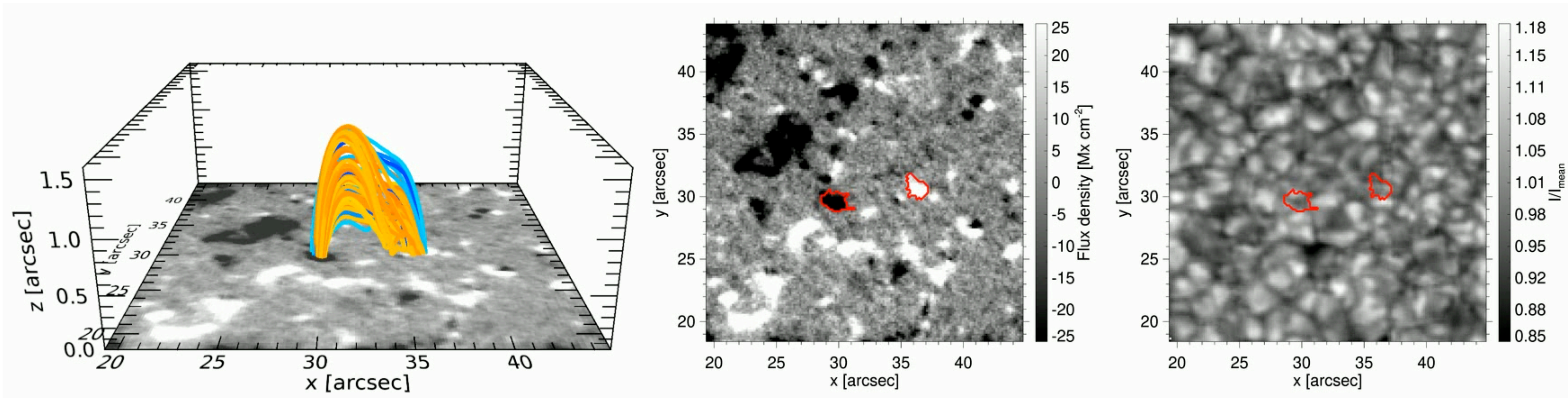
Stangalini 2014

# Bipolarna i unipolarna internetwork magnetna polja



- Magnetni bipoli se pojavljuju manje-više uniformno unutar supergranula stopom od  $68 \text{ Mx cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ . Nova polja su verovatno formirana ispod površine Sunca, i doprinose 55% ukupne stope pojavljivanja fluksa.

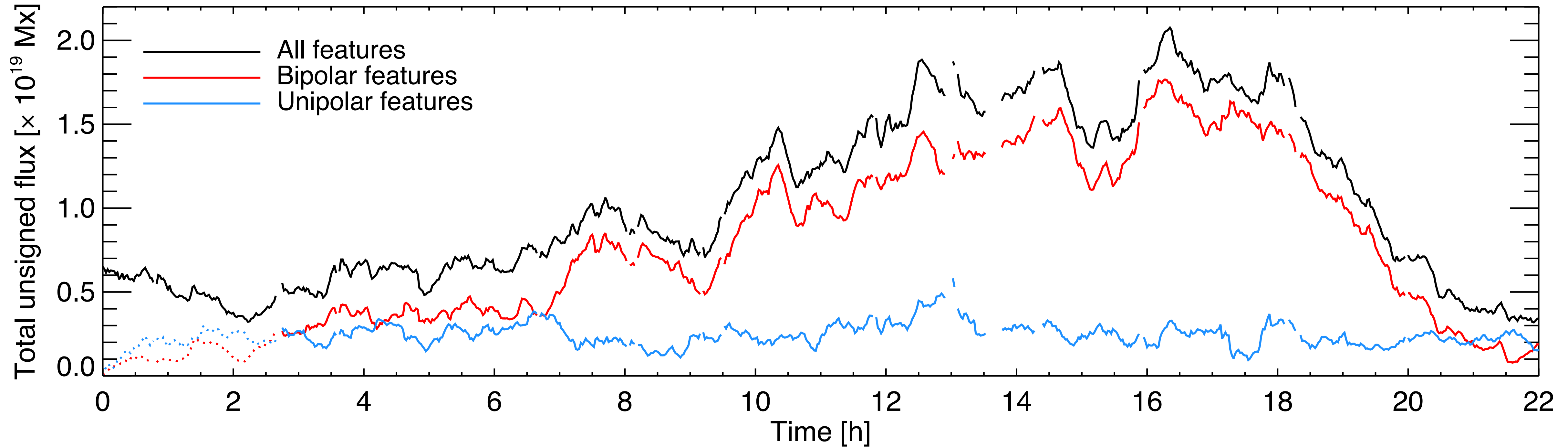
# Bipolarna i unipolarna internetwork magnetna polja



- Primer identifikovanog magnetnog bipola. Levi panel prikazuje linije magnetnog polja koje povezuju polove bipola (model dobijen metodom magnetne frikcije). Srednji panel prikazuje magnetne elemente (polove, crvene konture) u NFI magnetogramu, a desni panel odgovarajuću mapu intenziteta.



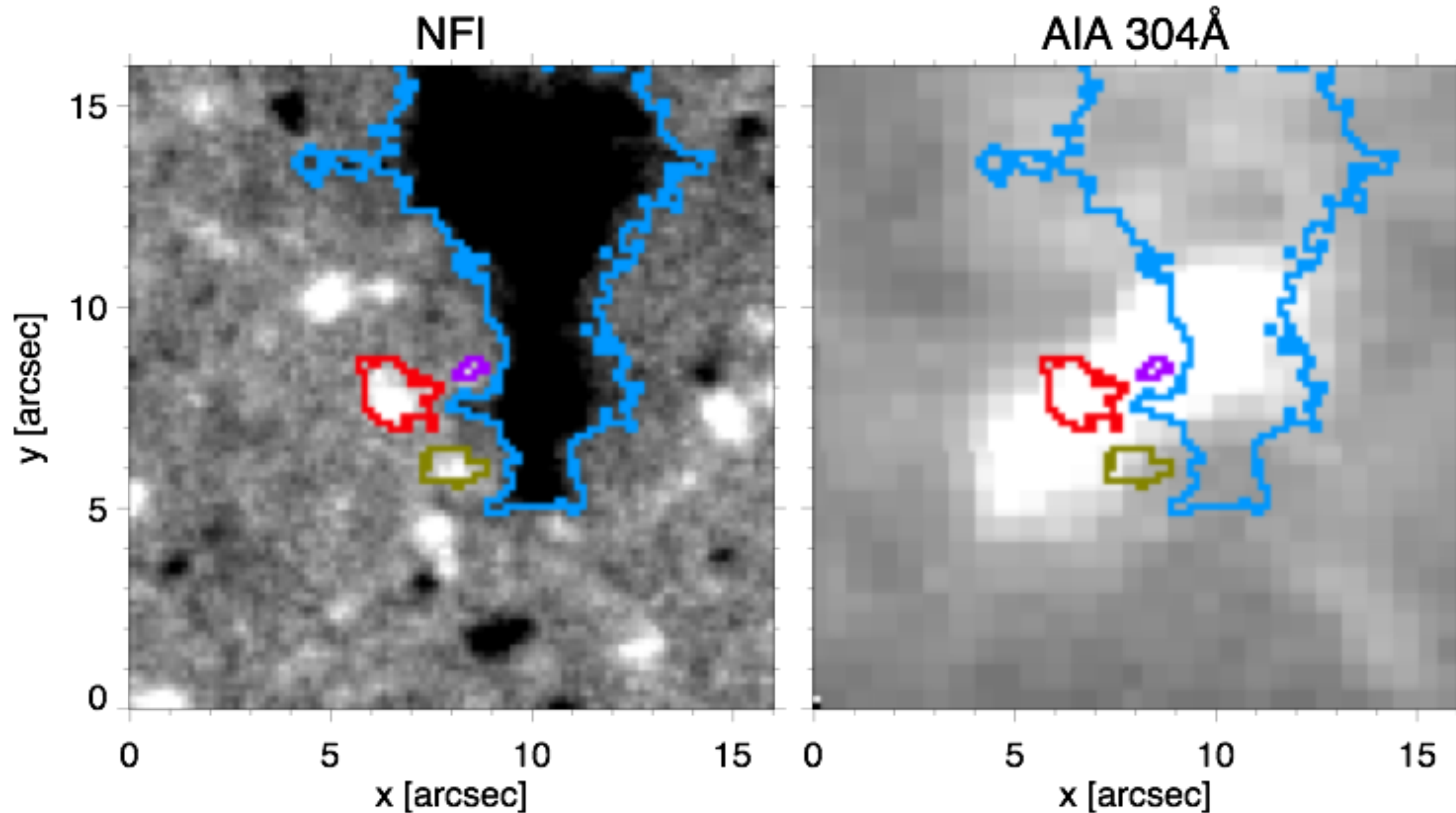
# Bipolarna i unipolarna internetwork magnetna polja



- U proseku, magnetni bipoli sadrže oko 72% ukupnog detektovanog IN fluksa. Primećeno je da ovaj udeo varira između 50% i 95% tokom vremena, a može pasti čak do 20%.

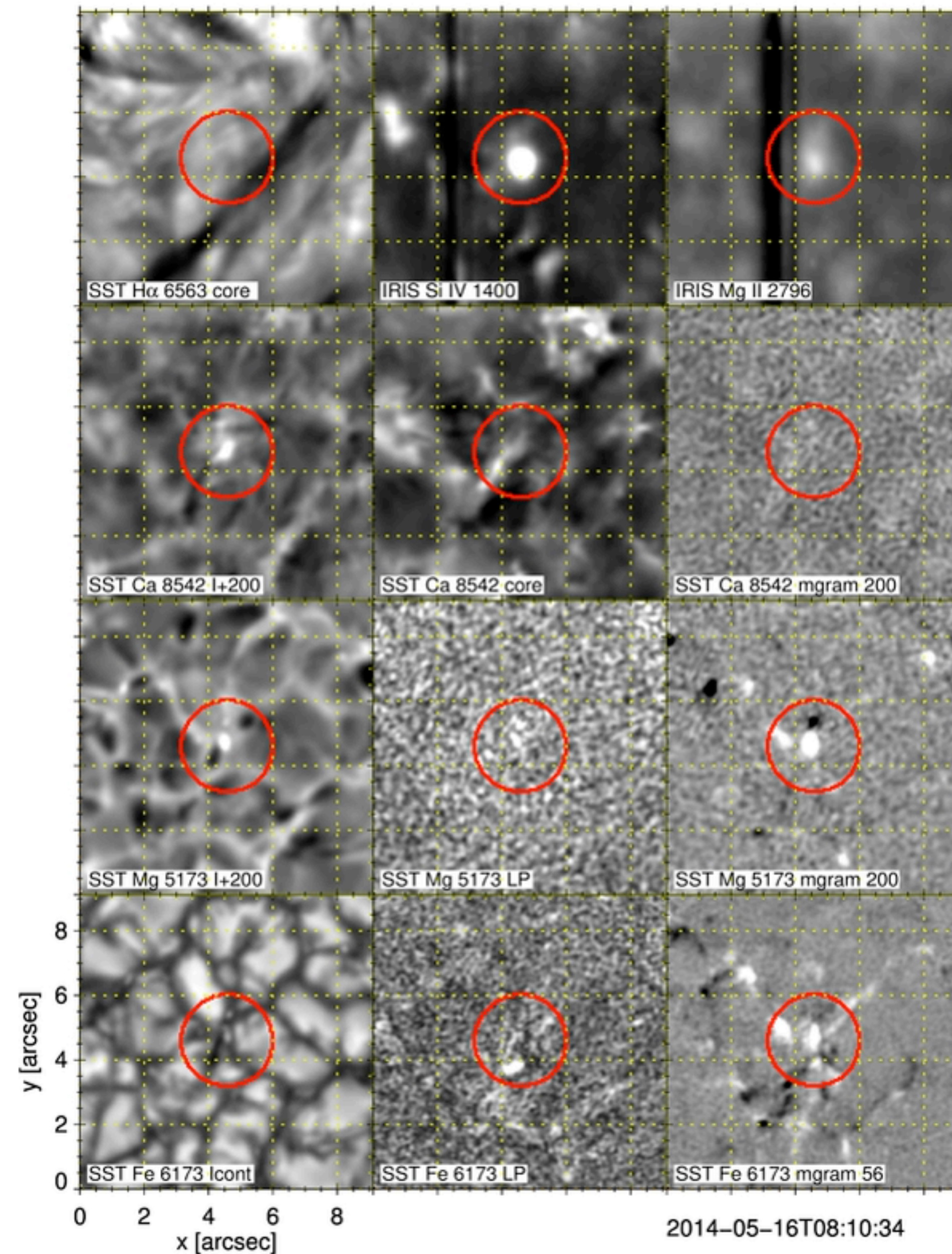
Zagrevanje Sunčeve atmosfere usled  
pojave novog IN magnetnog polja

# Zagrevanje hromosfere



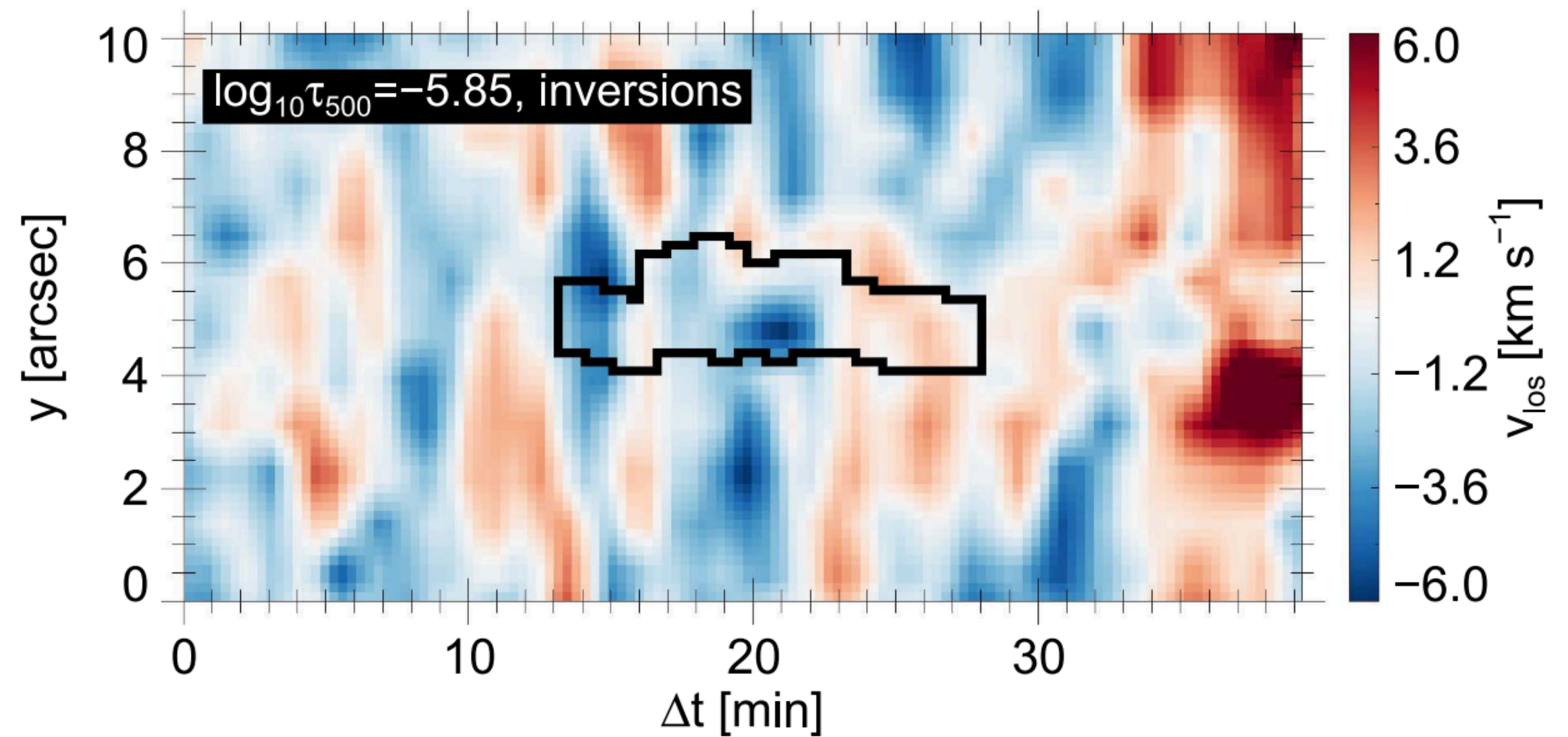
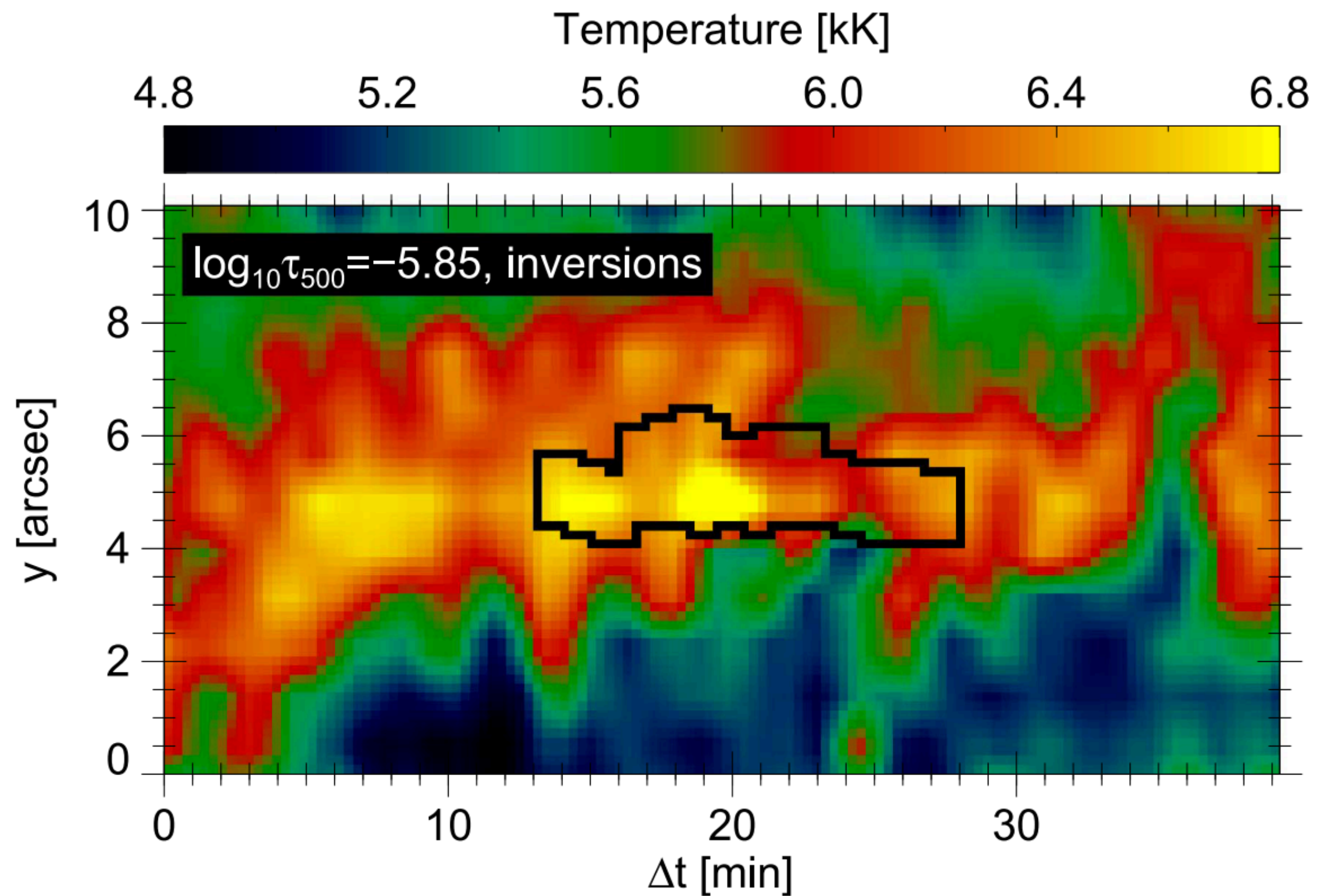
- Poništavanje IN i NE polja na granicama supergranularnih ćelija često dovodi do kratkotrajne emisije u EUV domenu (hromosfera i prelazni region).

# Zagrevanje hromosfere



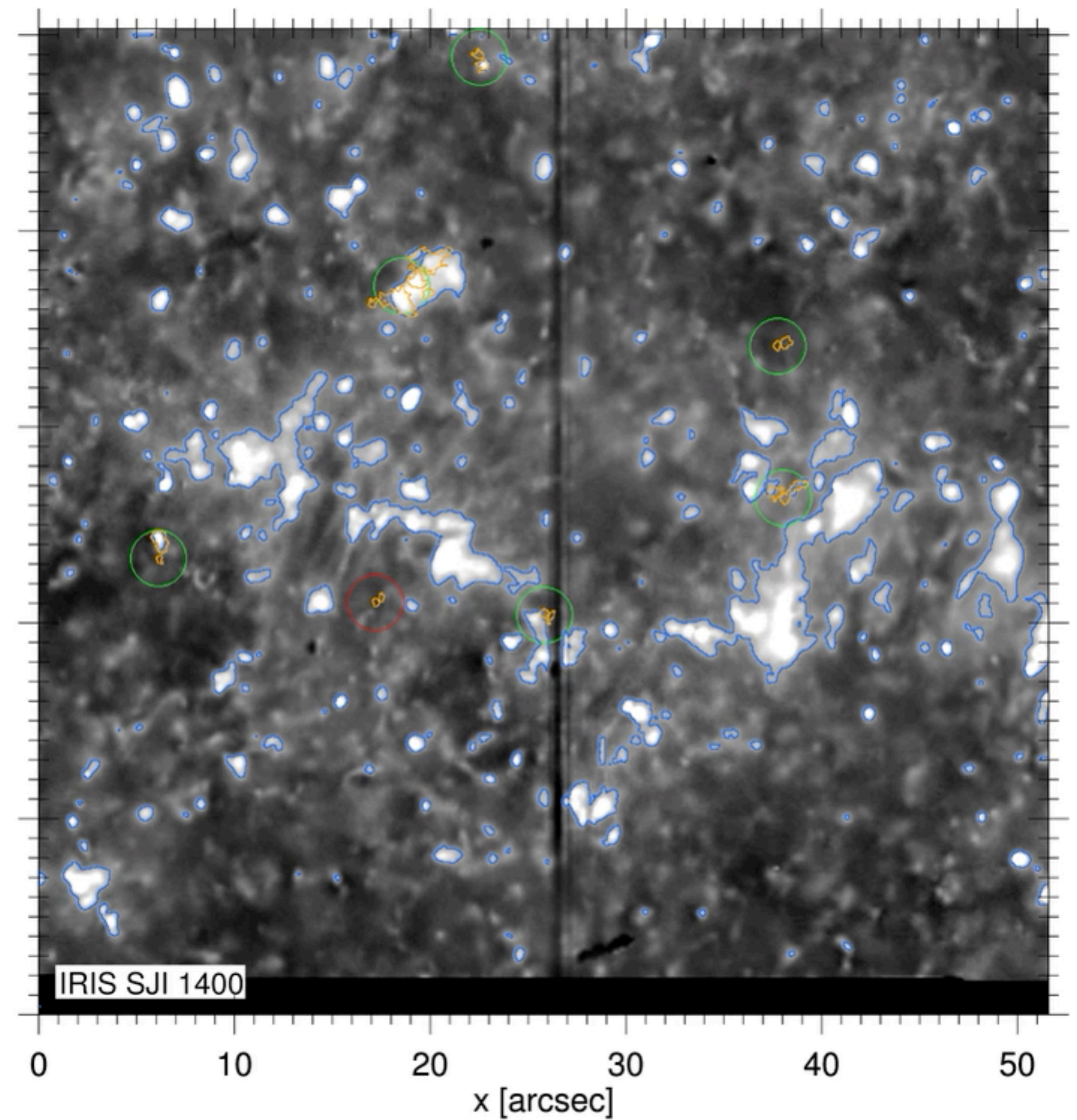
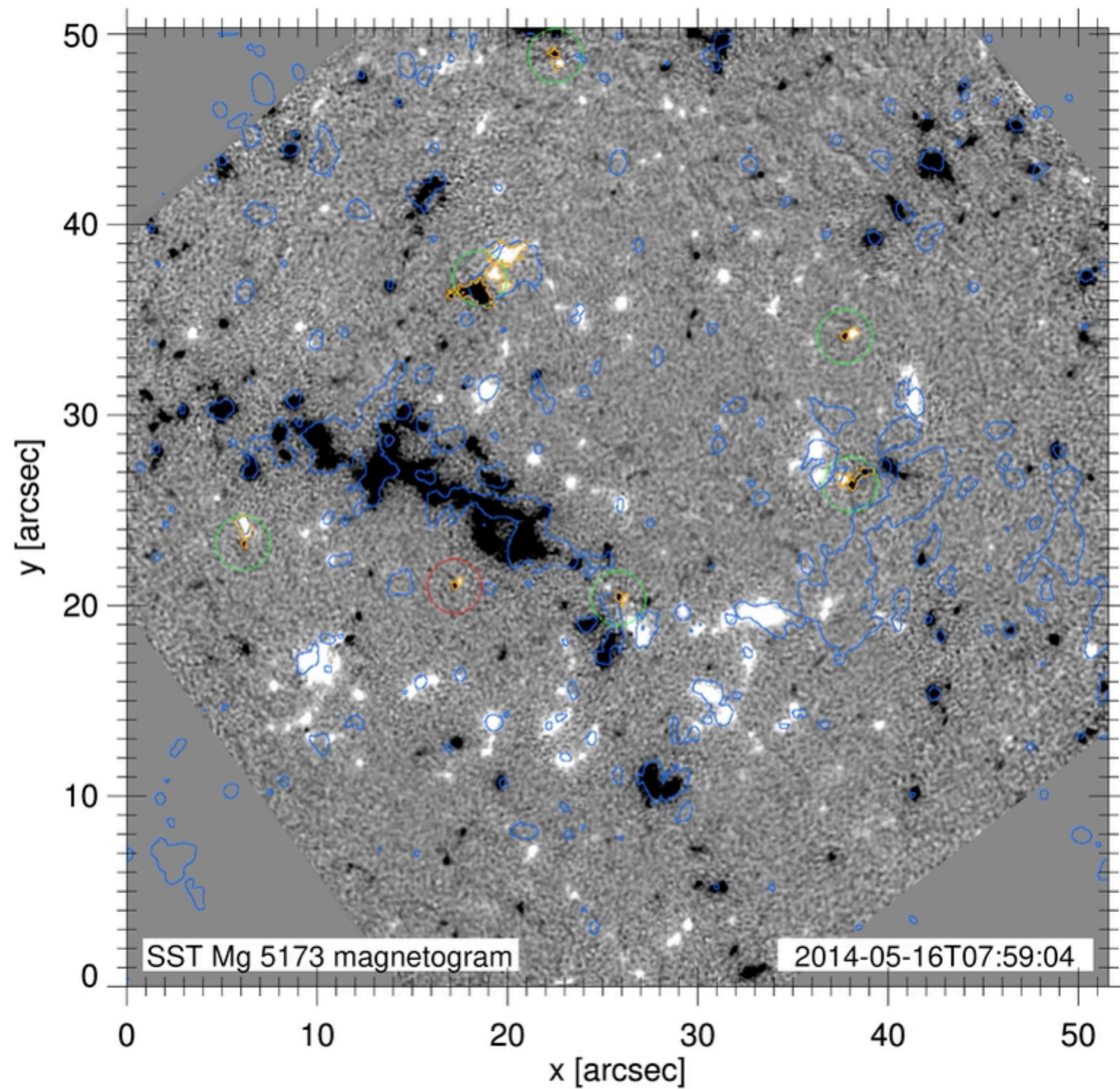
- Uticaj poništavanja IN fluksa na hromosferu, viđeno SST i IRIS posmatranjima.

# Zagrevanje hromosfere

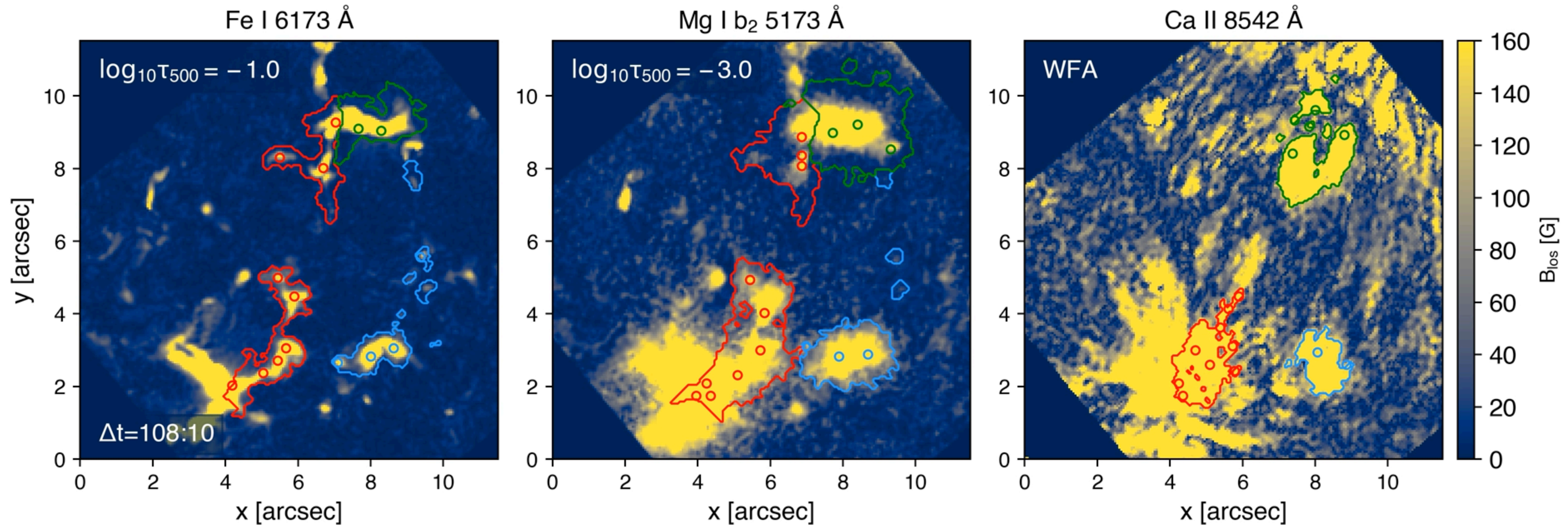


Inverzije IRIS hromosferskih podataka su izvedene korišćenjem STiC koda ([de la Cruz Rodríguez et al. 2016, 2018](#)).

# Zagrevanje hromosfere

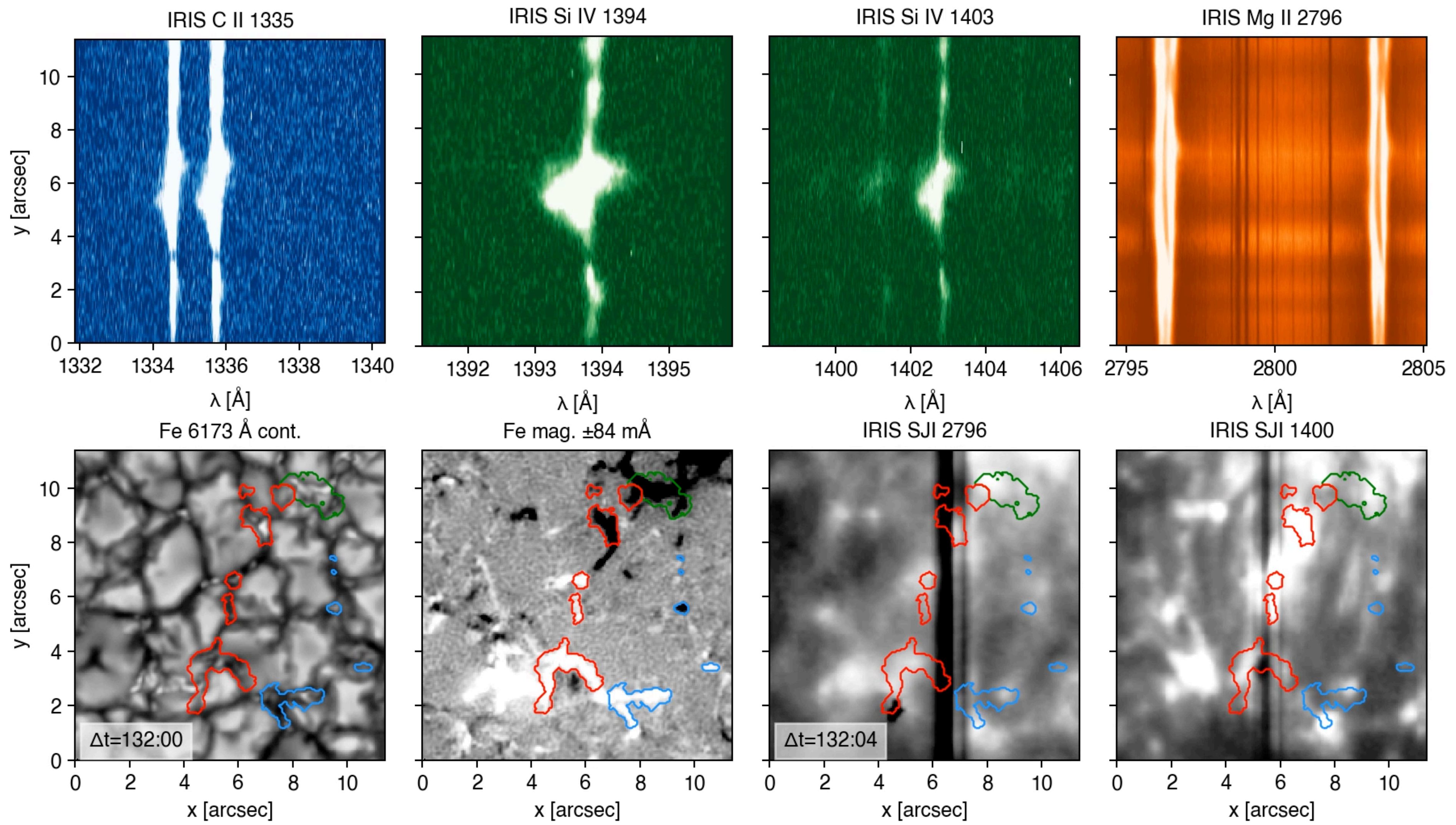


# IN magnetna polja u hromosferi



- IN magnetna polja jačine između 450 i 800 G mogu dospeti do hromosfere.

# IN magnetna polja u hromosferi

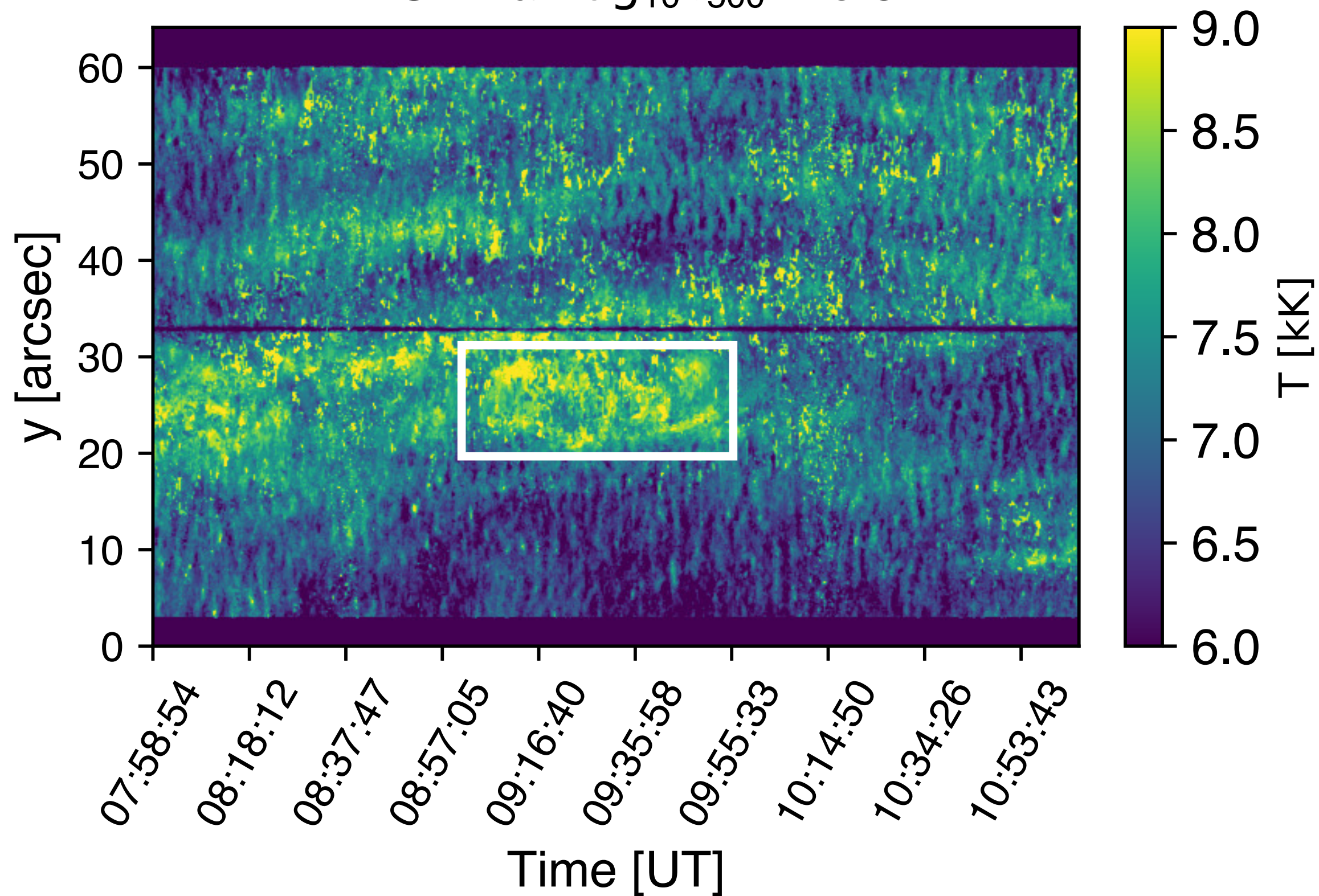


- Vremenska evolucija signala u IRIS FUV i NUV spektralnim domenima iznad novog klastera IN elemenata.

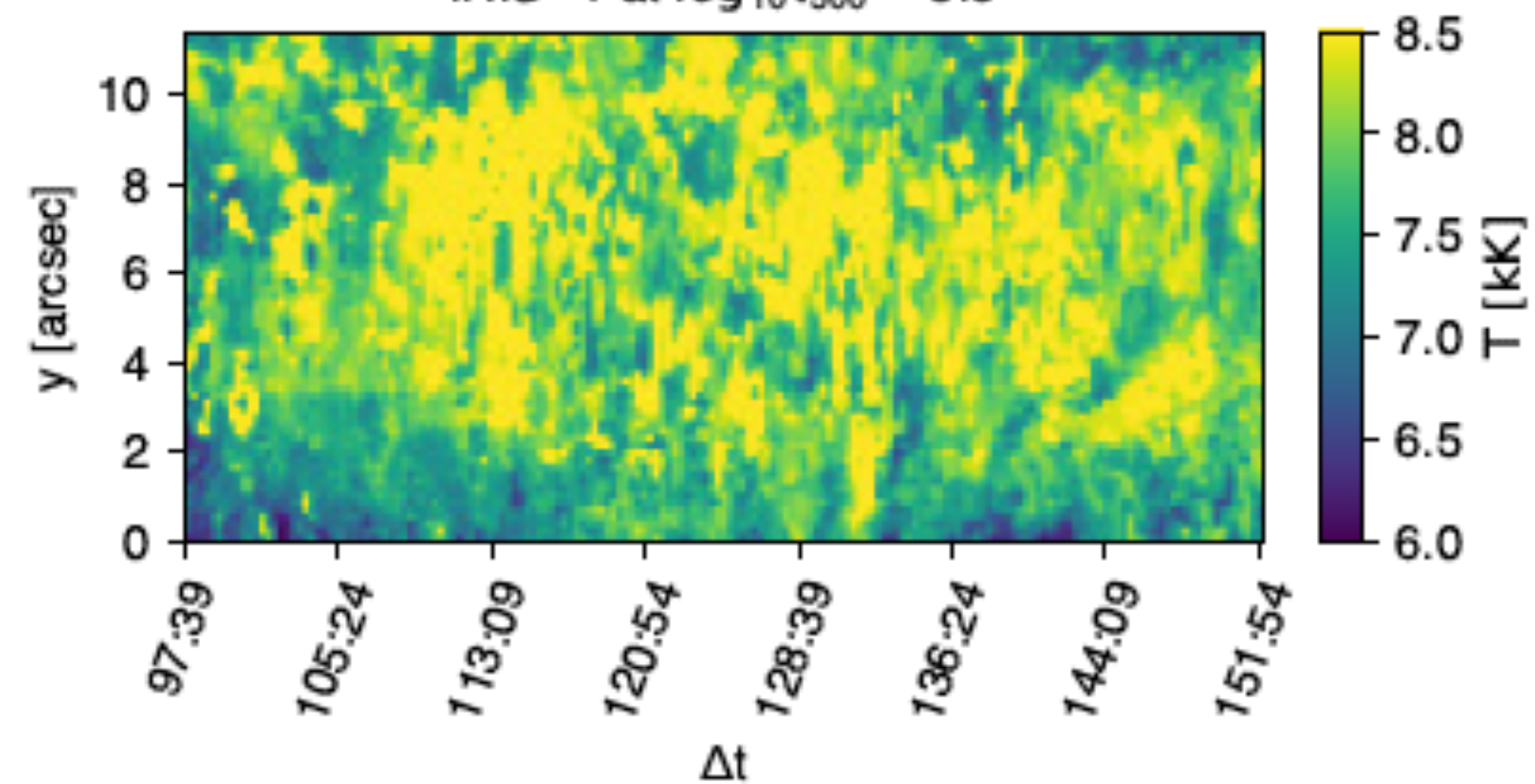


# IN magnetna polja u hromosferi

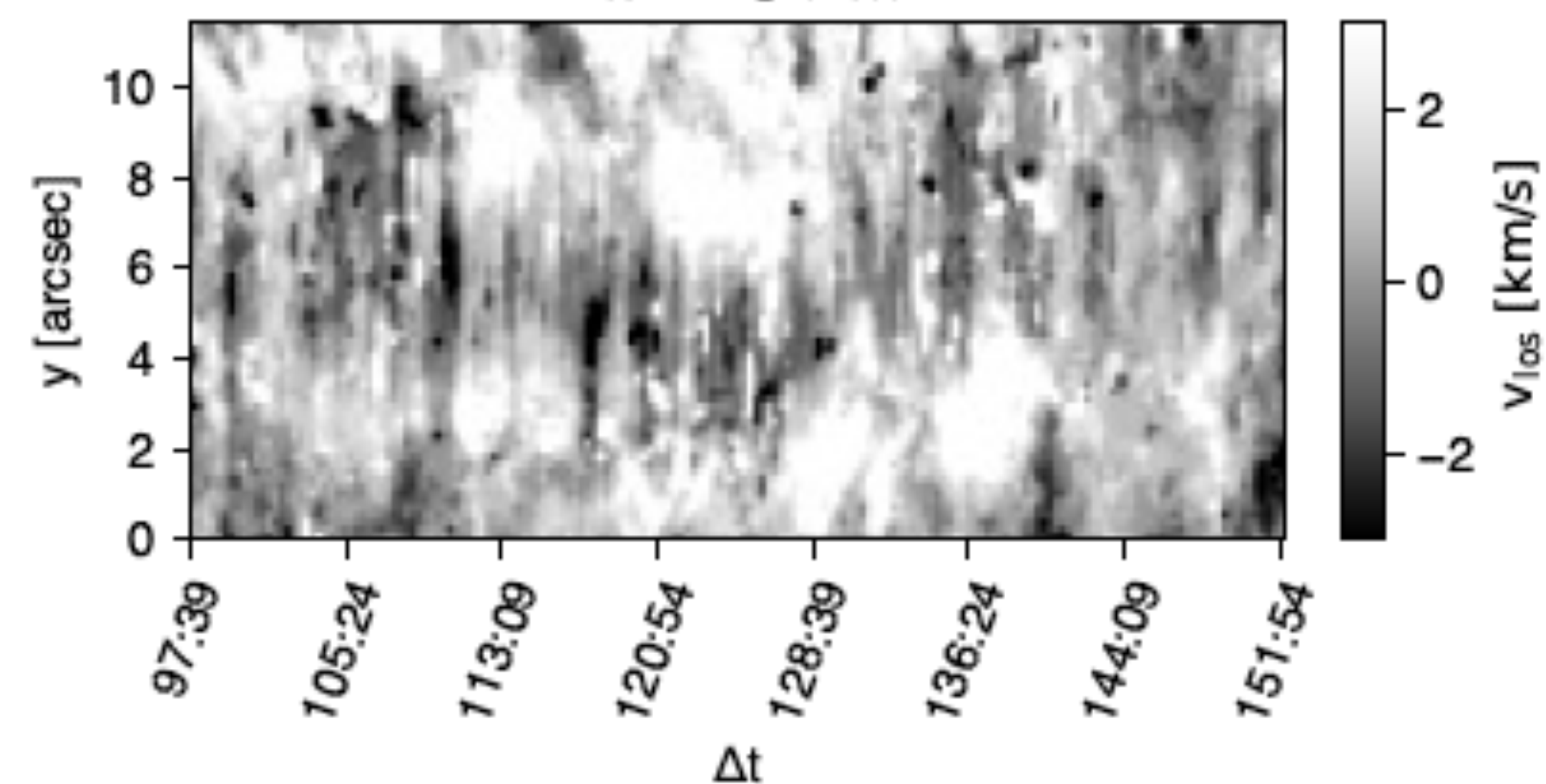
IRIS<sup>2</sup> T at  $\log_{10}\tau_{500} = -5.8$



IRIS<sup>2</sup> T at  $\log_{10}\tau_{500} = -5.8$



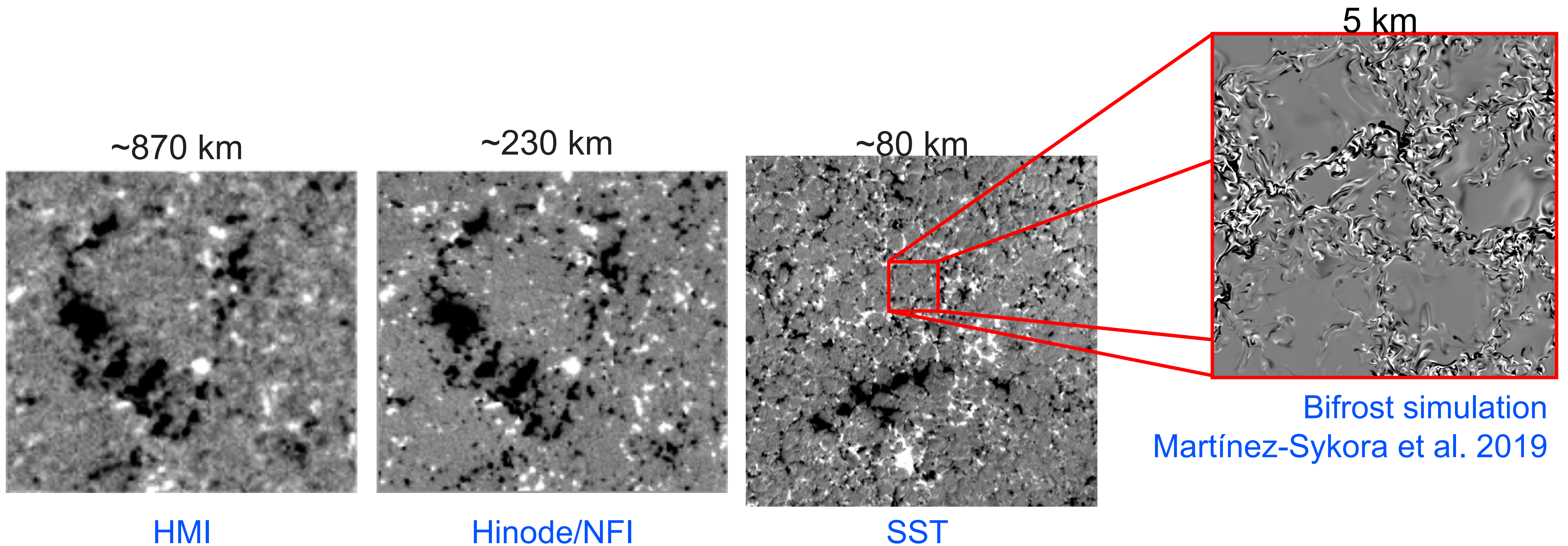
IRIS<sup>2</sup>  $v_{\text{los}}$  at  $\log_{10}\tau_{500} = -5.8$



- Mape temperature i brzine u pravcu vizure dobijene IRIS<sup>2</sup> inverzijama ([Sainz Dalda et al. 2019](#)). Najviše temperature/brzine odgovaraju oblastima novonastalog fluksa (označeno belom konturom) i NE magnetnih elementima.

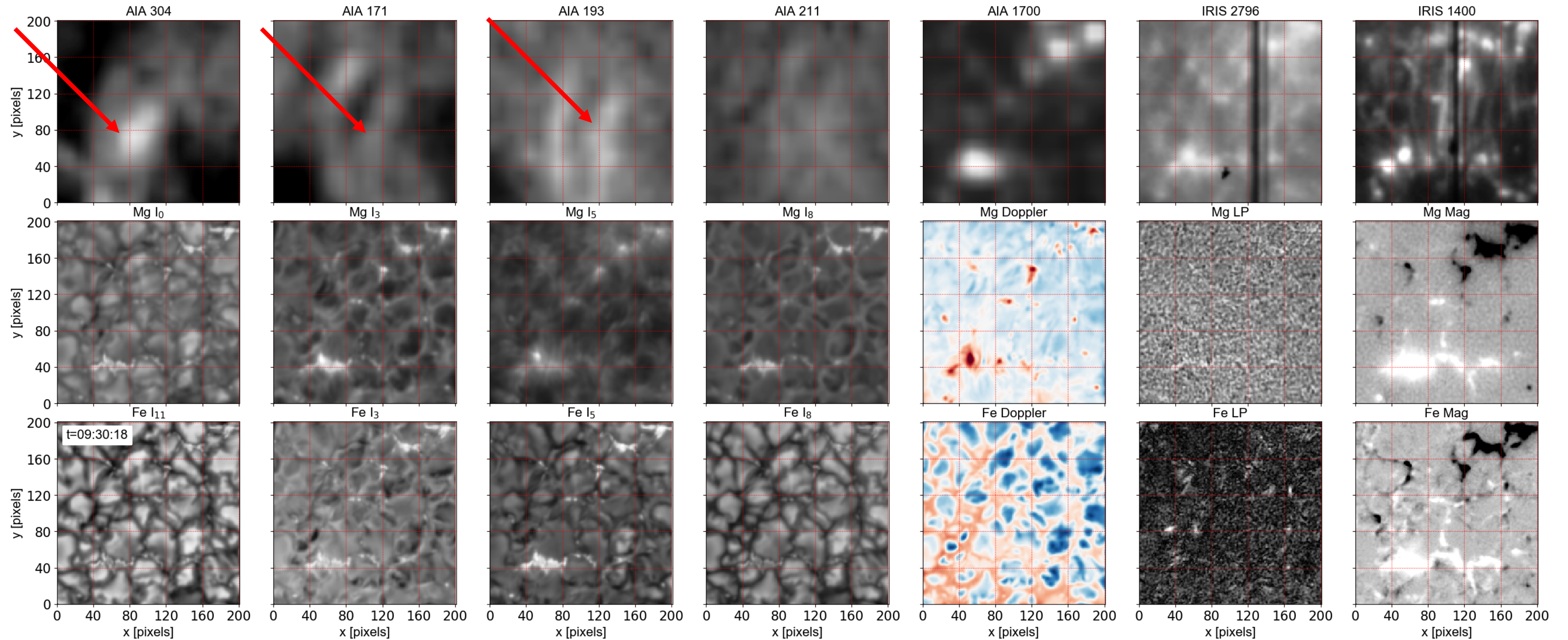
Očekivanja od solarnih teleskopa sledeće generacije

# Zahtevi za proučavanje magnetnih polja na mirnom Suncu



- **Veća prostorna rezolucija za razlučivanje magnetnih struktura na mirnom Suncu**
  - Prema simulacijama, možda će nam trebati čak i manje od ~35 km (0,05 lučnih sekundi) da razlučimo najmanje magnetne elemente.

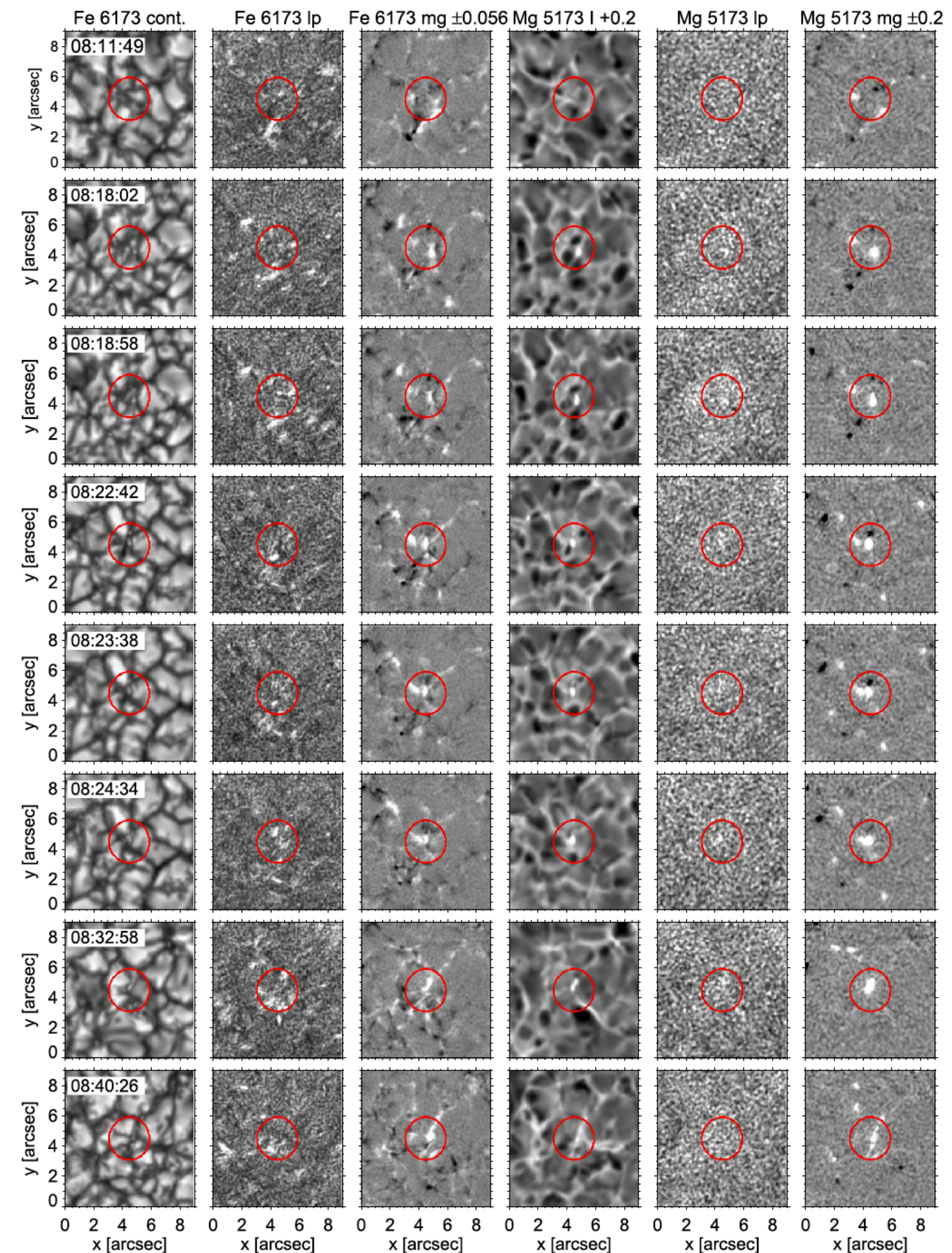
# Zahtevi za proučavanje magnetnih polja na mirnom Suncu



- **Veća prostorna rezolucija za razlučivanje magnetnih struktura na mirnom Suncu**
  - Prema simulacijama, možda će nam trebati čak i manje od ~35 km (0,05 lučnih sekundi) da razlučimo najmanje magnetne elemente.
  - Nerazlučena fina struktura magnetnih polja u višim slojevima solarne atmosfere.

# Zahtevi za proučavanje magnetnih polja na mirnom Suncu

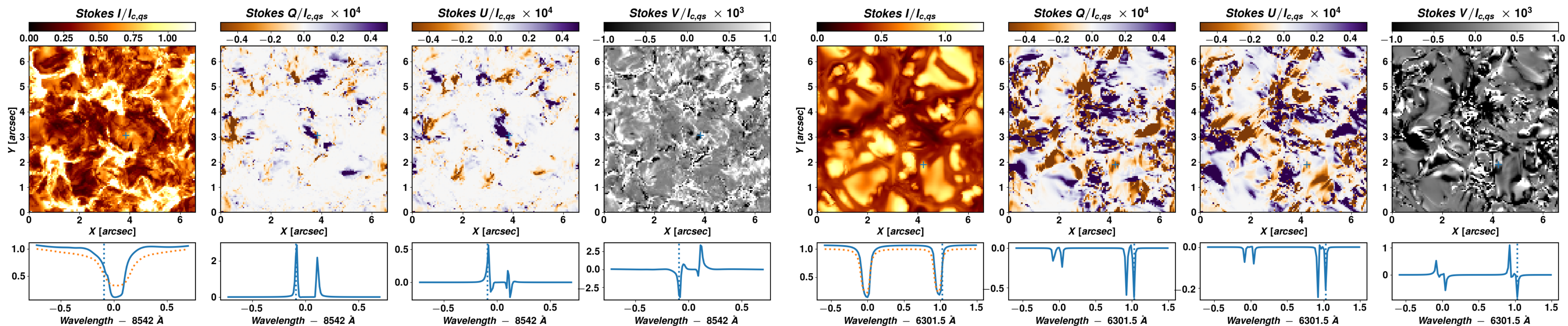
- Veća osetljivost instrumenata za precizna merenja Stoksovih parametara
  - Potreban nam je barem nivo šuma od  $10^{-4} I_c$ . Teleskopi od 4 metra mogu da postignu  $10^{-4} I_c$  pri rezoluciji od 0.1 lučnih sekundi i kadenci od 10 sekundi.



# Zahtevi za proučavanje magnetnih polja na mirnom Suncu

- Veća osetljivost instrumenata za precizna merenja Stoksovih parametara
  - Potreban nam je barem nivo šuma od  $10^{-4} I_c$ . Teleskopi od 4 metra mogu da postignu  $10^{-4} I_c$  pri rezoluciji od 0.1 lučnih sekundi i kadenci od 10 sekundi.

Sainz Dalda et al. 2019



- Snimci iz Bifrost simulacije mirnog Sunca. Paneli pokazuju sintetičke I, Q, U i V profile u linijama Ca II 854,2 nm i Fe I 630,2 nm. Narandžasta isprekidana linija je prosečan Stokes I profil. Plave linije su Stokes profili na lokaciji označenoj plavim krstićem. Paneli pokazuju da bi DKIST sa svojom rezolucijom i osetljivošću trebalo da bude u stanju da detektuje IN signale kružne i linearne polarizacije u fotosferi i hromosferi.

- Interakcija između konvektivnih kretanja i IN magnetnih elemenata može pomoći zagrevanju hromosfere
- IN poništavanja lokalno zagrevaju hromosferu kroz rekonekciju linija magnetnog polja
- Novonastala IN magnetna polja mogu da se popnu do hromosfere i prelaznog regiona, i doprinesu zagrevanju gornjih slojeva solarne atmosfere

Instrumenti sledeće generacije (MUSE, DKIST, EST,...) su neophodni za detekciju IN polja na još manjim prostorno-vremenskim skalama.