

Η θέρμανση του Στέμματος:

Ιστορική αναδρομή:

Σε παρατήρηση έκλειψης του 1869 (Harkness & Young) με φασματογράφο παρατηρήθηκε φασματική γραμμή εκπομπής στα πράσινα μήκη κύματος 5303\AA η οποία δεν αντιστοιχούσε σε γνωστό στοιχείο, για αυτό και ονομάστηκε Κορώνιο. Τα χρόνια εκείνα έγινε κατανοητό πως το στέμμα αποτελεί ατμόσφαιρα του Ήλιου και όχι της Σελήνης καθώς ο J. Janssen, σε έκλειψη του 1871 ανακάλυψε την F-corona μετρώντας το φάσμα του Fraunhofer στο φάσμα του στέμματος.

Επίσης το 1930, με στεμματογράφο μετρά το εύρος της γραμμής του 'Κορώνις αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 600000K . Αυτή η ένδειξη της θερμοκρασίας του στέμματος (μαζί με άλλες, το μέγεθος των στεμματικών δομών $\sim 500000\text{km}$ αντιστοιχούν σε υδροστατική ατμόσφαιρα $1\ 000\ 000\text{K}$) αγνοήθηκε.



12th December 1871
(From Lord LINDSAY'S Photographs)

Πρώιμες εξηγήσεις της θέρμανσης του στέμματος 1940-1970

Συσσώρευση μέσο-πλανητικού υλικού στο στέμμα

V. Vand 1943 Nature

Μετατροπή βαρυτικής ενέργειας σε θερμότητα. Η πηγή θερμότητας είναι εκτός του Ήλιου.

Επίσης άλλη προσπάθεια χρήσης της βαρύτητας. Συσσώρευση μεσο-αστρικού υλικού στο στέμμα (ο ηλιακός άνεμος δεν επιτρέπει αυτή τη συσσώρευση...). Bondi, Hoyle, Lyttleton 1947

Οι κυριότερες προτάσεις όμως προέρχονται από την πηγή ενέργειας του Ήλιου που είναι η φωτόσφαιρα.

Οι κινήσεις της κοκκίασης στην φωτόσφαιρα δημιουργούν ακουστικά κύματα. Αυτά διαδίδονται σε ύψος και συναντούν πλάσμα μικρότερης πυκνότητας και γίνονται κρουστικά κύματα.

Σύμφωνα με τον Schwarzschild Martin 1948 αυτά τα κύματα αν διαδοθούν έως το στέμμα μπορούν να το θερμάνουν.

Ο Biermann (1948) πρότεινε ένα παρόμοιο μηχανισμό για την θέρμανση της χρωμόσφαιρας.

Ο Schwarzschild πρότεινε 3 κριτήρια για τον μηχανισμό θέρμανσης:

- 1) Ισχύς της πηγής: Πρέπει πηγή να έχει αρκετή ροή ενέργειας.
- 2) Η ενέργεια αυτή πρέπει να μπορεί να μεταφερθεί στο στέμμα
- 3) Το πιο δύσκολο: Πρέπει η ενέργεια να μπορεί να μετατραπεί από μηχανική/ηλεκτρική/μαγνητική σε θερμότητα.

Τα ακουστικά κύματα όμως δεν μπορούν να φτάσουν έως το στέμμα. Η απότομη μεταβολή θερμοκρασίας και πυκνότητας στην μεταβατική περιοχή λειτουργεί σαν ανακλαστική επιφάνεια. Συνεπώς δεν μπορούν να διαδοθούν στο στέμμα. Η ενέργεια που μεταφέρεται με τα ακουστικά κύματα είναι 2 τάξεις μεγέθους μικρότερη από την θέρμανση του στέμματος.

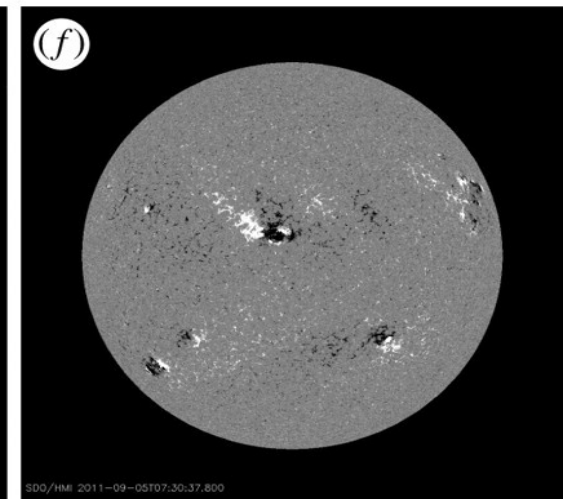
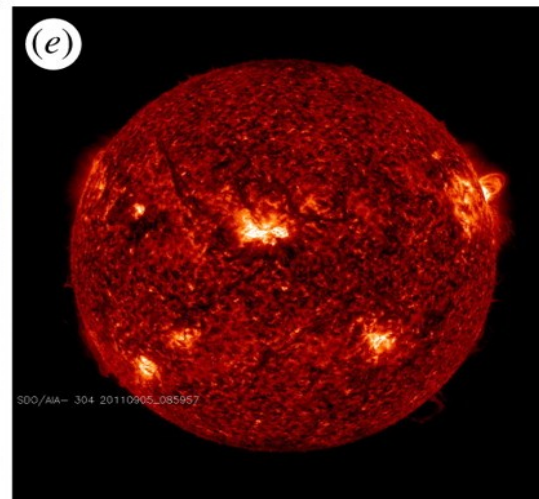
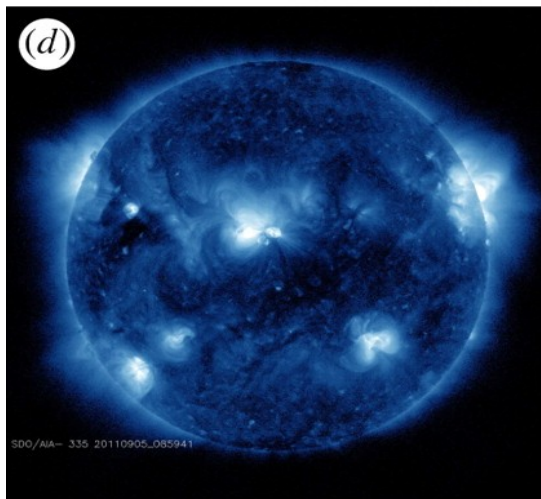
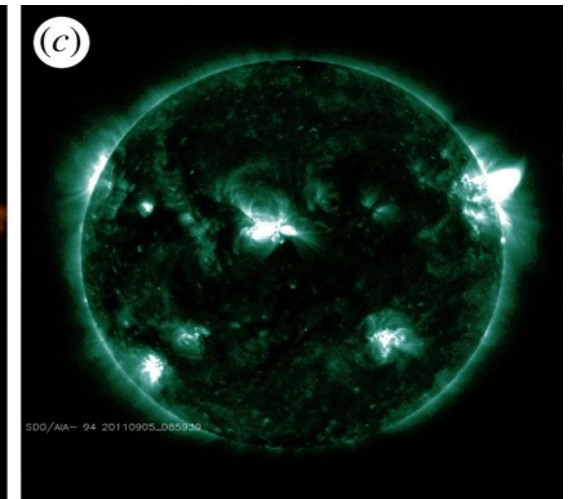
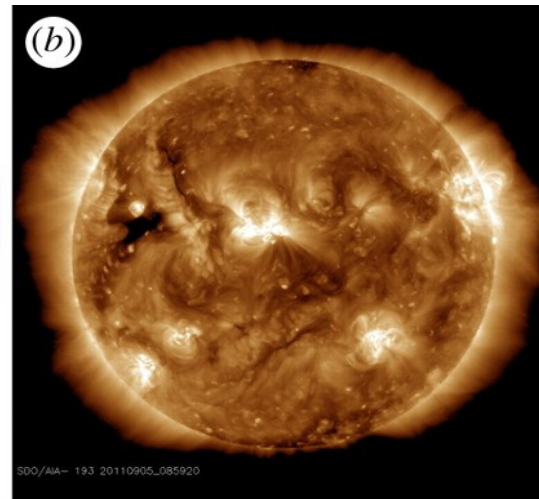
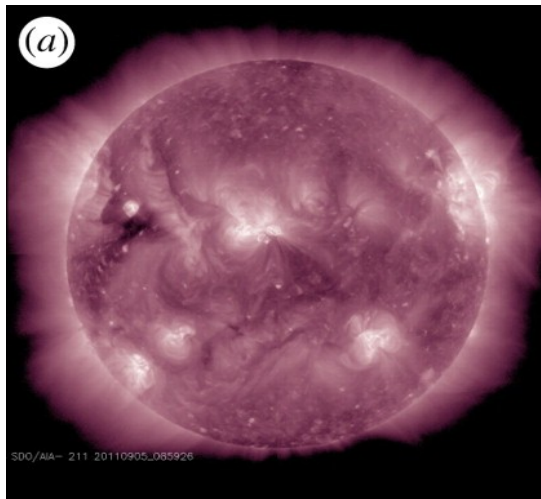
Όμως υπάρχει μια σχέση μεταξύ θέρμανσης και μαγνητικού πεδίου. Το στέμμα είναι λαμπρό (αποβάλλει θερμότητα με ακτινοβολία) στα σημεία που είναι ισχυρό το μαγνητικό πεδίο. Συνεπώς ο μηχανισμός θέρμανσης θα πρέπει να περιλαμβάνει το μαγνητικό πεδίο.

Αυτό έγινε κατανοητό την δεκαετία του 1980 με την ανάλυση των εικόνων του στέμματος στις ακτίνες X με τον δορυφόρο Skylab.

Fe XIV 211Å 2.E6 K

Fe XII 193Å 1.E6 K

Fe XVIII 94Å 6.E6K



Fe XVI 335Å 2.5E6 K

He II 304Å 5.E4K

Magnetogram 5.7E3K

Parnell &
De Moorten 2012
Phil. Trans.
RAS

Οι παρατηρήσεις μας λένε πως στο στέμμα χρειάζεται θέρμανση της τάξης του

3.E5 – 1.E7 erg/cm²/s για να εξηγηθούν οι παρατηρήσεις.

Η χρωμόσφαιρα αν και πιο ψυχρή από το στέμμα απαιτεί θέρμανσης **6.E5 – 2.E7 erg/cm²/s** για να θερμανθεί.

Οι εκφράσεις θέρμανσης θεωρούνται ως ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (της φωτόσφαιρας) που απαιτείται.

Ποια είναι η θέρμανση του στέμματος και πως μπορούμε να αποσπάσουμε ενέργεια από το μαγνητικό πεδίο.

Τα θεωρητικά μοντέλα θέρμανσης του στέμματος βασίζονται σε ηλεκτρικά ρεύματα χάρη στα οποία η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα με τον μηχανισμό Joule.

Χωρίζονται σε αυτά που χρησιμοποιούν εναλλασσόμενα ρεύματα (κύματα) κα συνεχή ρεύματα AC και DC

Η πηγή ενέργειας είναι οι κινήσεις της κοκκίασης στην φωτόσφαιρα.

Όταν η χρονική κλίμακα των διαταραχών της φωτόσφαιρας είναι όση χρειάζεται ένα κύμα Alfvén να διανύσει ένα βρόχο, θα προκληθεί διάδοση κυμάτων.

π.χ. $L = 10000 \text{ km}$, $V_A = 500 \text{ km/s}$ $\rightarrow t = L/V_A = 0.05 \text{ sec}$

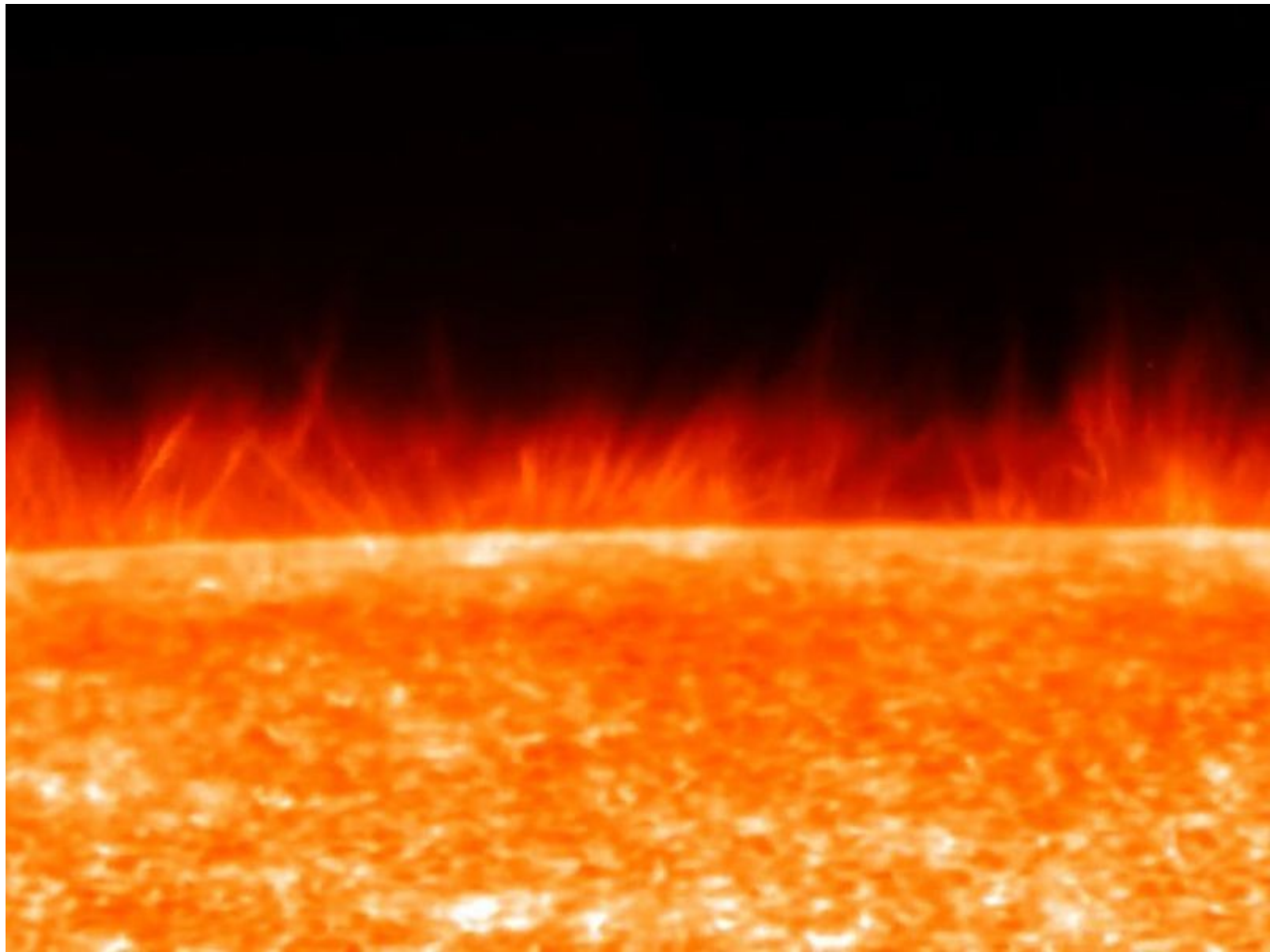
Για μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες της διαταραχής θα προκληθεί διαταραχή του πλάσματος με παραγωγή συνεχούς ρεύματος.

Στον πίνακα υπάρχουν χρήσιμες αριθμητικές ποσότητες. Οι αριθμητικές τιμές της θέρμανσης που απαιτούνται για να διατηρηθεί η χρωμόσφαιρα και το στέμμα.

Η τιμή του Lundquist είναι πολύ μεγάλη για τις κλίμακες που μπορούμε να παρατηρήσουμε. Οι κλίμακες μήκους όπου η διάχυση αρχίζει να έχει σημασία (και όπου η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μπορεί να γίνει θερμότητα) είναι αυτές όπου το S είναι της τάξης της μονάδας.

Οι τιμές της ενέργειας κυμάτων και κινητικής ενέργειας της φωτόσφαιρας είναι υπέρ αρκετές για να θερμάνουν στέμμα και χρωμόσφαιρα.

Quantities	values	units
quiet chromosphere	4×10^6	erg/cm ² /s
active chromosphere	2×10^7	erg/cm ² /s
quiet Corona	3×10^5	erg/cm ² /s
active corona	10^7	erg/cm ² /s
magnetic diffusivity	$\eta \simeq 10^9 T^{-1.5}$	m ² /s
η (corona)	1	m ² /s
length scale and	$L \simeq 10^6$	m
Alfvén velocity(corona)	$V_A \simeq 1000$	m/s
Lundquist number		
$S = Lv_A/\eta$	10^8	
photospheric wave		
flux	several $\times 10^7$	erg/cm ² /s
granule kinetic		
energy	$\simeq 10^{12}$	erg/cm ² /s



<https://www.youtube.com/watch?v=aeXzGXKjm0Y>

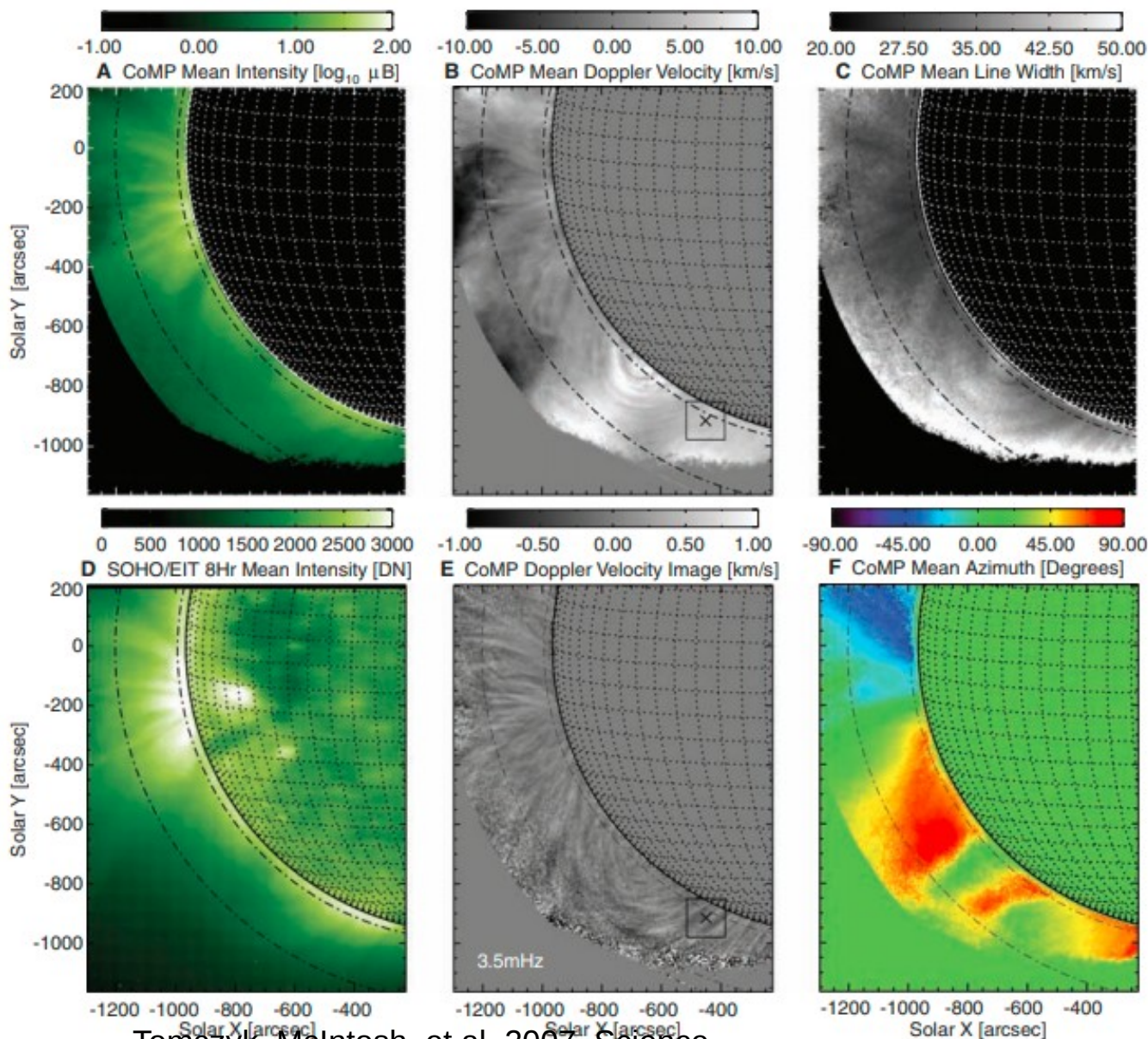
Εικόνα και ταινία από νηματίδια (spicules) της χρωμόσφαιρας τα οποία ταλαντώνονται. Αυτά τα κύματα θα μπορούσαν κατά την διάδοσή τους στο στέμμα να εξηγήσουν την θέρμανση.

Τα ασυμπιεστα εγκάρσια κύματα Alfvén είναι τα μόνα που μπορούν να διασχίσουν την μεταβατική ζώνη χωρίς να ανακλαστούν. Όμως η παρατήρησή τους είναι δύσκολη. Δεν προκαλούν μεταβολή στην ένταση της ακτινοβολίας μπορούν να παρατηρηθούν μόνο σαν μετατόπιση Doppler.

Εδω έχουμε παρατηρήσεις στην φασματική γραμμή Fe XIII 10747Å (υπέρυθρο). Εδω έχει μετρηθεί και η πόλωση του φωτός. Παρατηρήθηκαν κύματα Alfvén τα οποία διαδίδονται κατά μήκος βρόχων.

Η ροή ενέργειας των κυμάτων: $W = \rho v^2 V_A = 10 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ (v : το μέγιστο ταχύτητας του κύματος, ρ : πυκνότητα) δεν είναι αρκετή.

Fig. 1. From left to right, top to bottom, the CoMP observations of time-averaged intensity (A), Doppler velocity (B), line width (C), 3.5-mHz filtered Doppler velocity snapshot (E), and POS azimuth (F). In addition, we show the SOHO/EIT 19.5-nm image averaged over the same time (D). DN, data number (the unit of brightness). (B) and (E) include the location (X) and surrounding square region used in the example of the travel-time analysis. Dot-dashed lines representing distances of 5 and 25% of R_{sun} (above the limb) that are used as limits to our analysis are indicated.



Downloaded from ascelibrary.org by user on 01/11/2017

Τοπολογική Διάχυση

Κινήσεις στη
φωτόσφαιρα



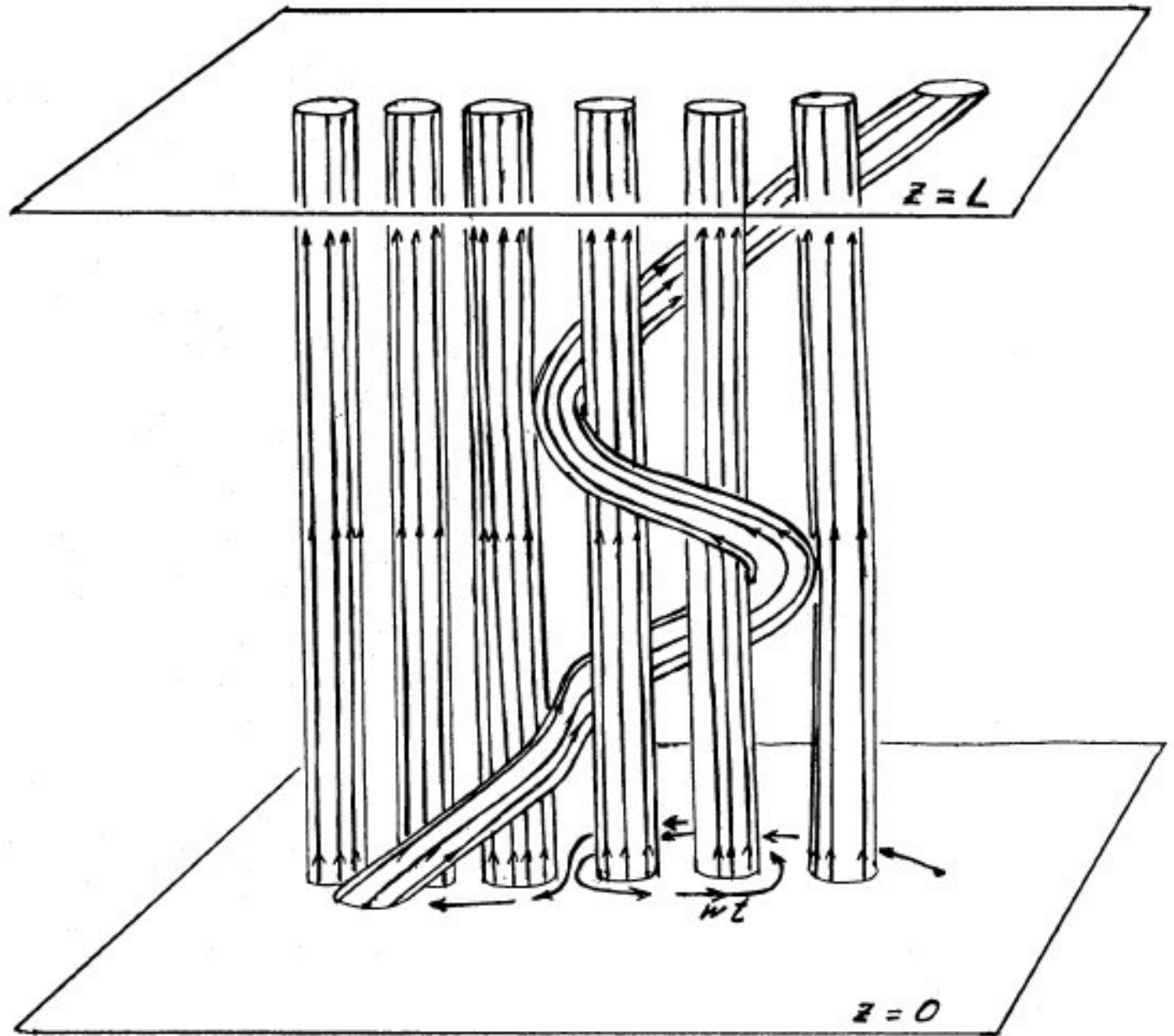
Διαταραχή
μαγνητικών
βρόχων



Φύλλα ρεύματος



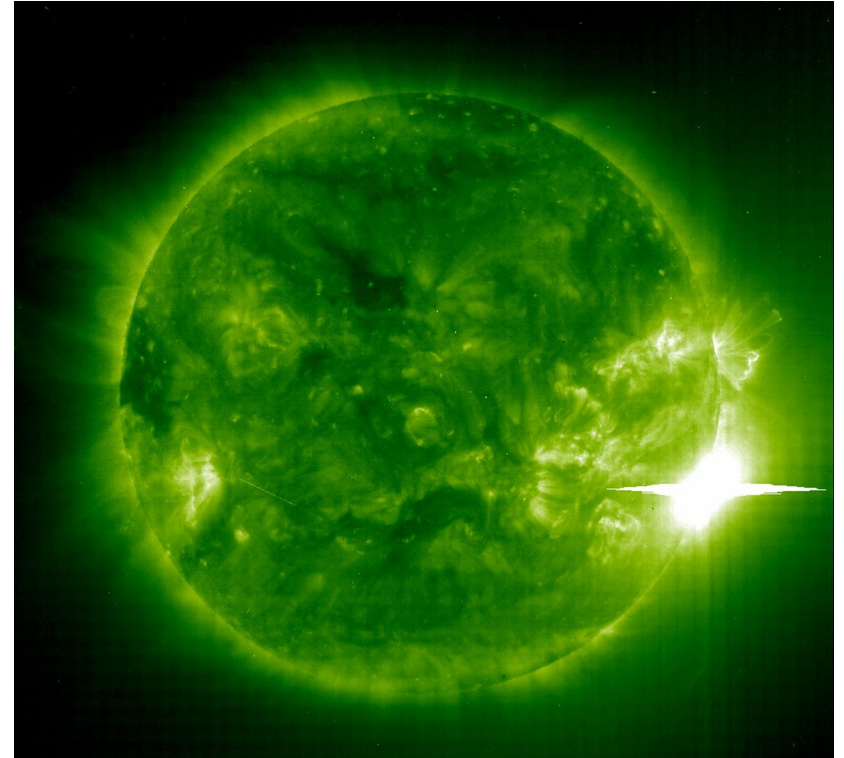
Θέρμανση λόγω
έκλυσης μαγνητικής
ενέργειας.



Parker 1972,1983, 1988

Παραλλαγή του μοντέλου της τοπολογικής διάχυσης είναι το μοντέλο των νανοεκλάμψεων. Δηλαδή η διάχυση στα φύλλα ρεύματος, στα διαταραγμένα μαγνητικά πεδία, γίνεται με τρόπο εκρηκτικό με εκλάμψεις. Όμως η ακτινοβολία που παράγεται σε αυτές τις εκλάμψεις είναι ασθενής και δεν μπορεί να παρατηρηθεί με τα σημερινά τηλεσκόπια. Είναι όμως τόσα πολλές οι λάμπσεις που παρατηρούμε τον μέσο όρο τους σαν την μέση ακτινοβολία του στέμματος.

Στην διπλανή εικόνα φαίνεται μια έκλαμψη σε εικόνα του AIA. Οι εκλάμψεις είναι απότομες αλλαγές λαμπρότητας σε όλη την Η/Μ ακτινοβολία του Ήλιου η οποία προκαλείται από εκρηκτική απελευθέρωση μαγνητικής ενέργειας στο στέμμα.



Φανταστείτε πως μια μαγνητική δομή με κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο $B_0=100\text{G}$ μήκους $l=10^{10}\text{cm}$ διαταράσσεται από την κίνηση φωτοσφαιρικού πλάσματος ταχύτητας $v=0.4\text{km/s}$. Η δομή θα αποκτήσει μια οριζόντια συνιστώσα B_t η οποία εκφράζεται από τον διπλανό τύπο.

$$B_t = B_0 \frac{v t}{l}$$

Η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου θα αυξάνεται με τον ρυθμό dW/dt όπως δίνεται δίπλα.

Η διπλανή ενεργειακή σχέση προέρχεται από τον Maxwell stress tensor.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{B_0 B_t}{4\pi} v = \frac{B_0^2 v^2 t}{4\pi l}$$

Αν υποθέσουμε πως η διαταραχή του μαγνητικού πεδίου γίνεται αρκετά αργά ώστε να μην απελευθερωθεί η ενέργεια. Σε μία μέρα βρίσκουμε πως $dW/dt \sim 10^7 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$

$$\tan \theta(t) \simeq \frac{v t}{l}$$

Η μαγνητική ενέργεια που συσσωρεύεται θα απελευθερωθεί όταν η τιμή της γωνίας θ κλίσης του πεδίου θα πάρει την τιμή $\sim 14^\circ$.

Μπορούμε να εκτιμήσουμε την ενέργεια που εκλύεται σε μήκος $\Delta L=1000\text{km}$ χρόνο $\tau=500\text{s}$ $l=v\tau=250\text{km}$, $B_t=25\text{G}$

$$W = \frac{l^2 \Delta L B_t^2}{8\pi} = 6 \times 10^{24} \text{ (erg)}$$

Η ενέργεια είναι της τάξης των 10^{24} erg ένα δισεκατομμυριοστό της ενέργειας μιας μεγάλης έκλαμψης (10^{33} erg).

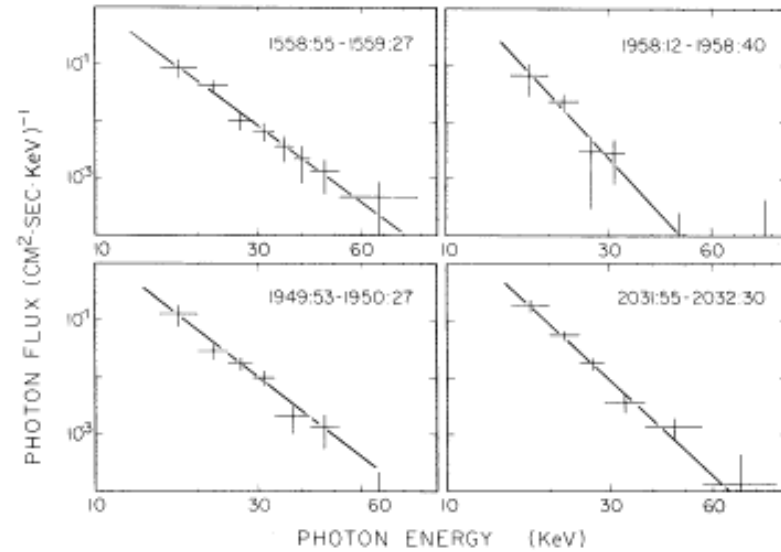
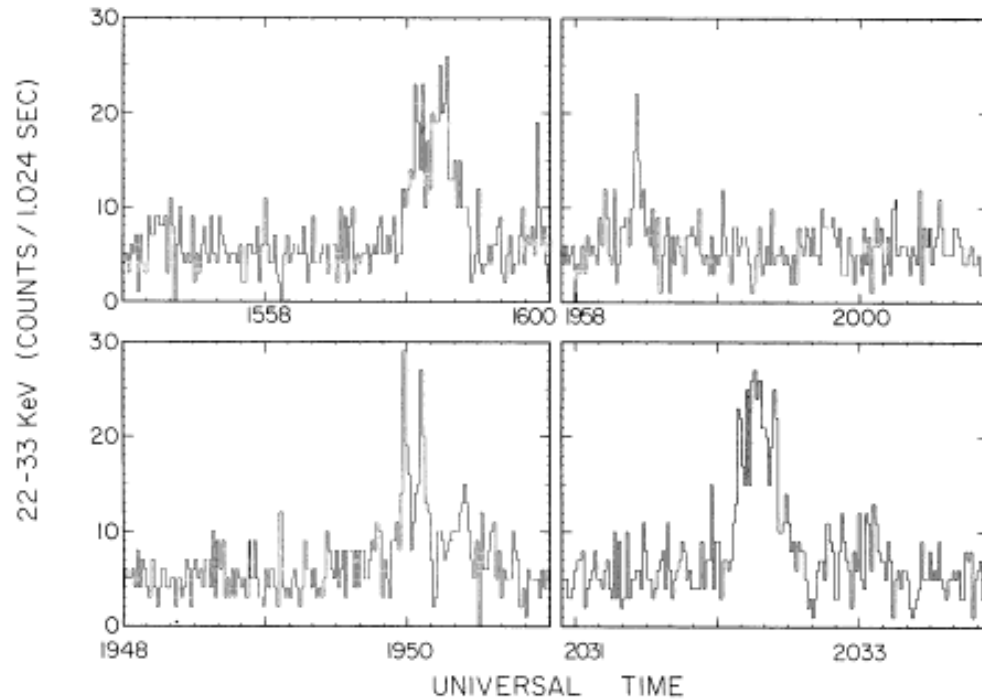
Με αυτόν τον μηχανισμό, όλες οι μαγνητικές δομές θα μπορούσαν να εκλύσουν θερμότητα.

Στην διάρκεια των εκλάμψεων αναμένουμε πλάσμα πολύ μεγάλης θερμοκρασίας ($\sim 5\text{MK}$) καθώς και ακτινοβολία X λόγω φαινομένου πέδησης από επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια.

Πρέπει να δούμε αν οι παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν πως υπάρχει πλάσμα μεγάλης θερμοκρασίας σε μικρά γεγονότα (νανοεκλάμψεις) και πως ο αριθμός τους είναι αρκετός ώστε να θερμάνουν το στέμμα.

Μέτρηση μικρο-εκλάμψεων στις ακτίνες X Lin et al 1984

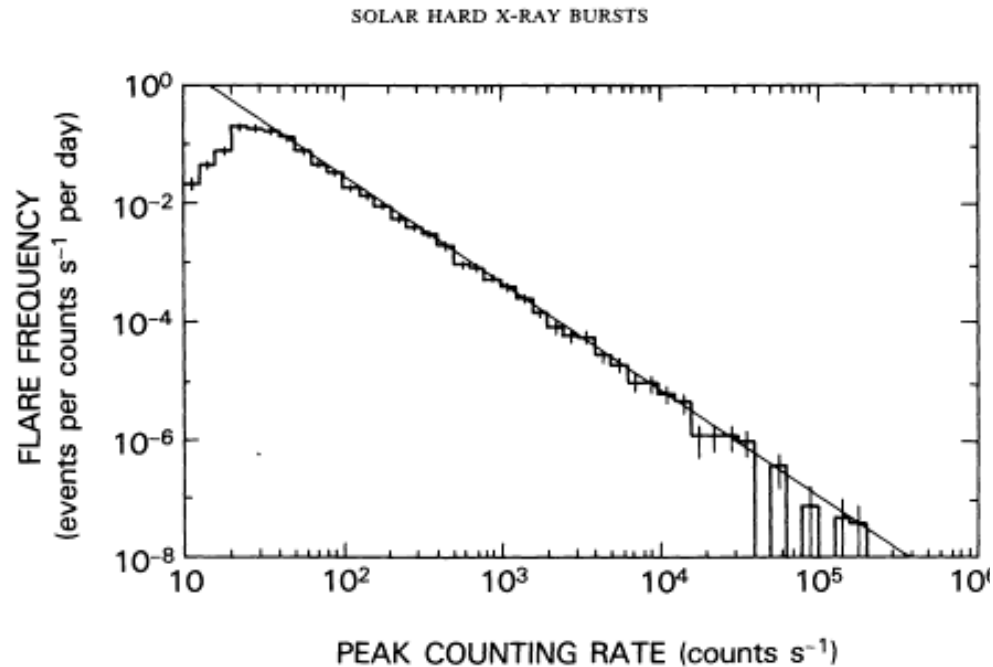
SOLAR HARD X-RAY MICROFLARES



Παλμοί ακτίνων X με διάρκεια 1-2 δευτ. και ενέργεια 1.E26 erg/παλμό στα 20keV
 Lin, Schwartz et al (1984) Η θέρμανση είναι εκρηκτική και όχι συνεχής

Οι νανοεκλάμψεις πρέπει να εκλύουν ενέργεια μη-θερμικά. Στην διπλανή εικόνα το φάσμα των ακτίνων X είναι νόμος δύναμης και όχι κατανομή Planck προέρχεται απο μη θερμικό φαινόμενο.

Είναι όμως αρκετά ώστε να θερμάνουν όλο το στέμμα;



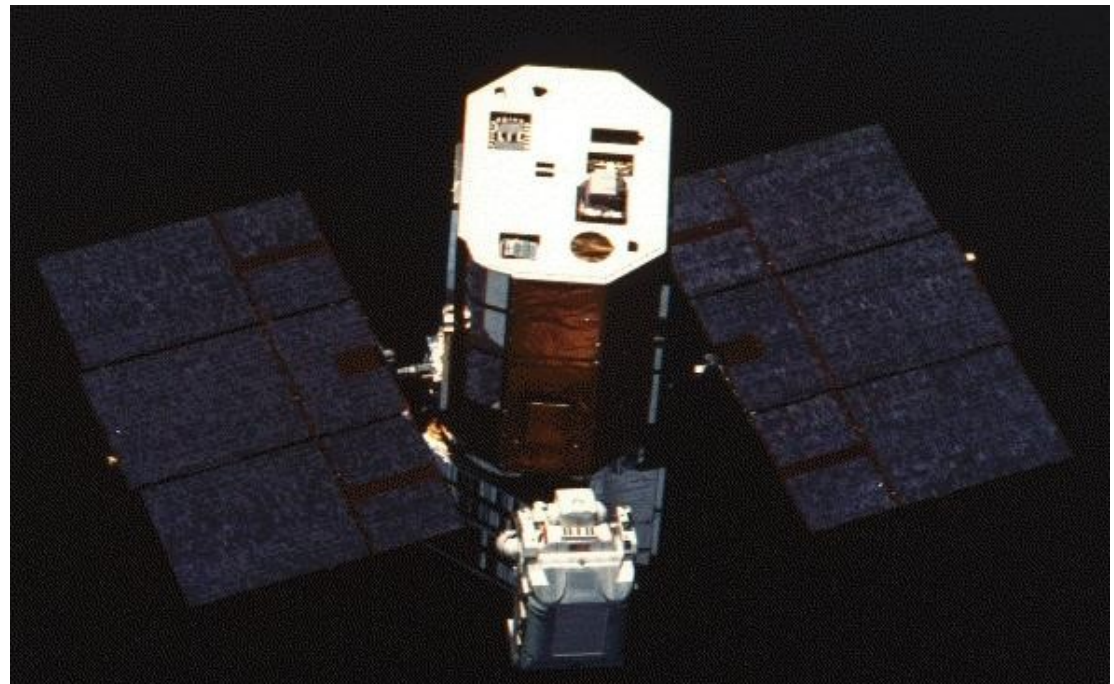
Στατιστική εκλάμψεων
σε ακτίνες X ακολουθούν

Έναν νόμο δύναμης :

$$N(W) = 110 W^{-1.8}$$

Dennis (1985) 1980-1985
7000 εκλάμψεις με HXRBS

Ο δορυφόρος SMM Solar Maximum Mission
Συνολική διάρκεια 1980-1992. Βλέπουμε πως η
Στατιστική κατανομή των εκλάμψεων ακολουθεί ένα
Νόμο δύναμης. Δεν έχει νόημα να μιλάμε για 'μέση
τιμή' των εκλάμψεων. Σε πόσο μικρές ενέργειες
εκτίνεται η κατανομή. Αν ο δείκτης της κατανομής
είναι $\alpha < -1$ τα μικρά γεγονότα μπορούν να θερμάνουν
το στέμμα.



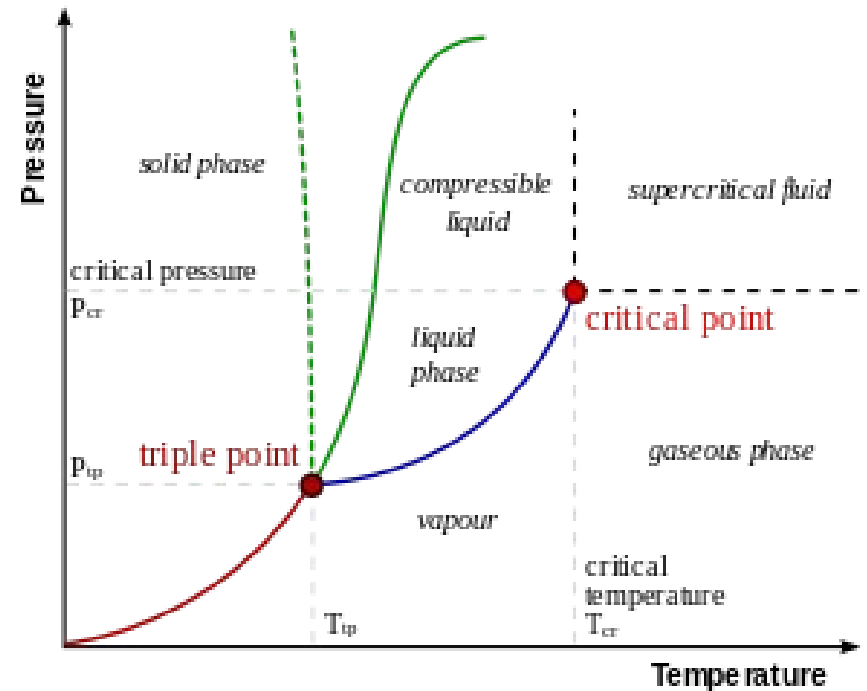
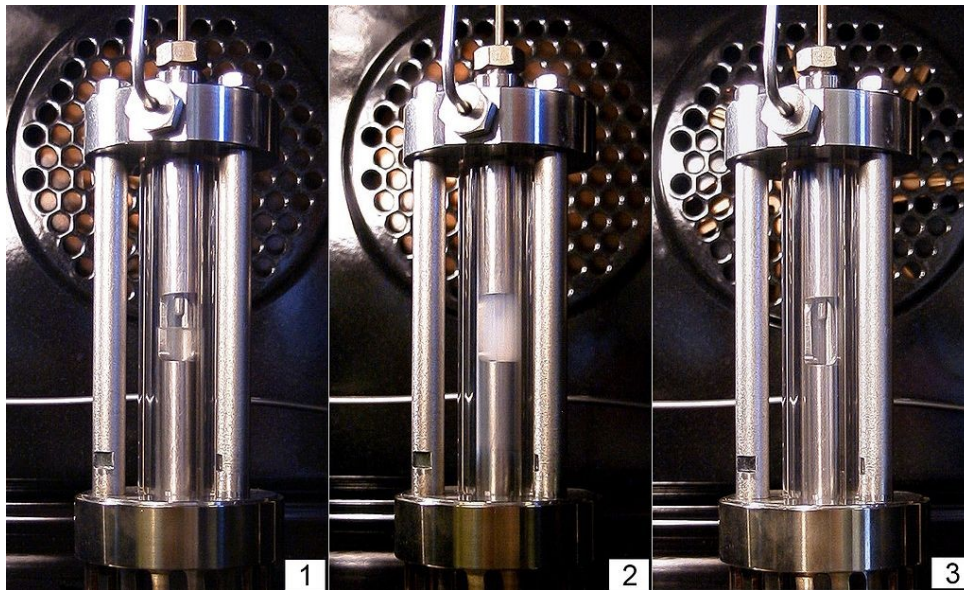
Η κρισιμότητα, έννοια της θερμοδυναμικής ισορροπίας

Ένα αέριο μπορεί να βρεθεί σε ένα κρίσιμο σημείο υγρής-αέριας φάσης

Ακολουθώντας πολύ ακριβείς τιμές πίεσης και θερμοκρασίας το αέριο μπορεί να γίνει υπερκρίσιμο.

Τότε αποκτά σιαφορετικές φυσικές ιδιότητες και οι **διαταραχές που προκαλούνται είναι ανεξάρτητες κλίμακας και η στατιστική τους ακολουθεί κατανομή νόμου δύναμης.**

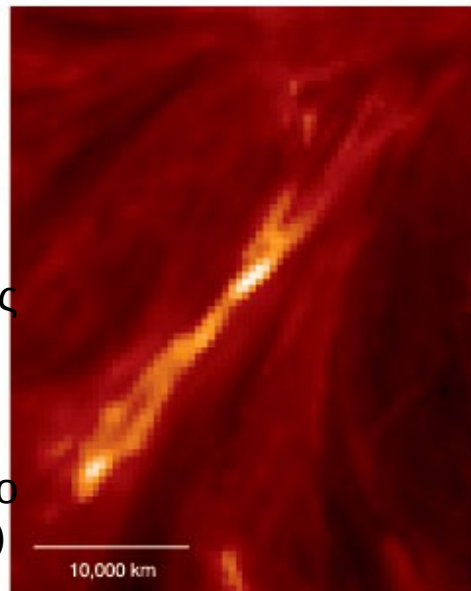
Μια θεωρητική ερμηνεία θεωρεί πως το στέμμα είναι ένα υπερκρίσιμο σύστημα και πως οδηγείται σε κρίσιμη κατάσταση αυθόρμητα, λόγω των διαταραχών για αυτό τον λόγο οι εκλάμπει ακολουθούν κατανομές νόμου δύναμης.



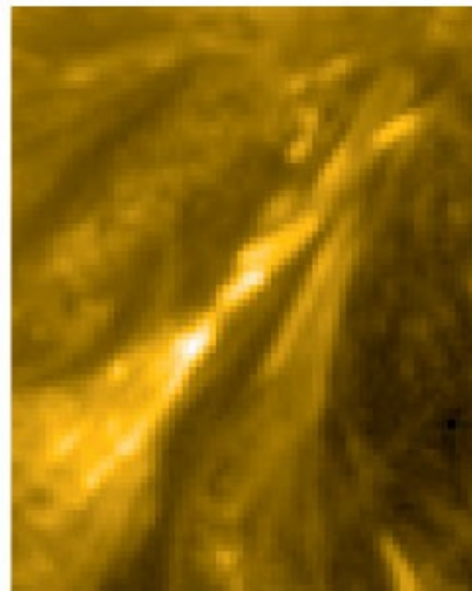
Αιθάνιο (1 υγρό/αέριο), 2 κρίσιμο 3 υπερκρίσιμο (Wikipedia λήμμα criticality)

Εικόνες από το τηλεσκόπιο Hi-C (High Resolution Coronal Imager) που πέταξε με πύραυλο το 2012. Έχει μεγάλη διακριτική ικανότητα (0.1arcsec/pixel , $1\text{arcsec}=715\text{km}$) και κατάφερε να παρατηρήσει στεμματικούς βρόχους πολύ μικρής κλίμακας να αλληλεπιδρούν. Να θυμίσουμε πως οι εικόνες του τηλεσκοπίου AIA (Atmospheric Imaging Assembly) στον δορυφόρο SDO (Solar Dynamic Observatory) έχουν διακριτική ικανότητα 0.6arcsec/pixel .

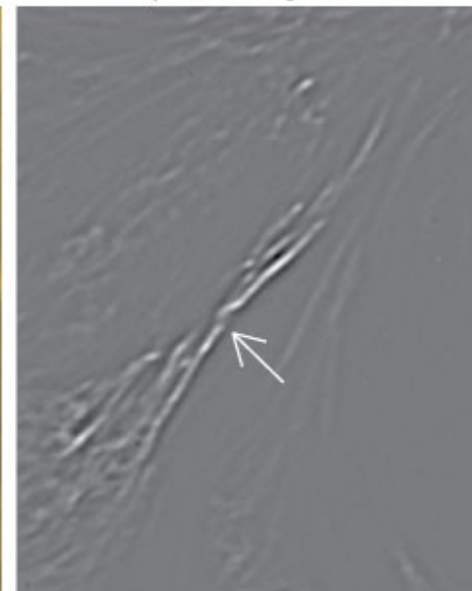
a AIA 304-Å 18:55:20



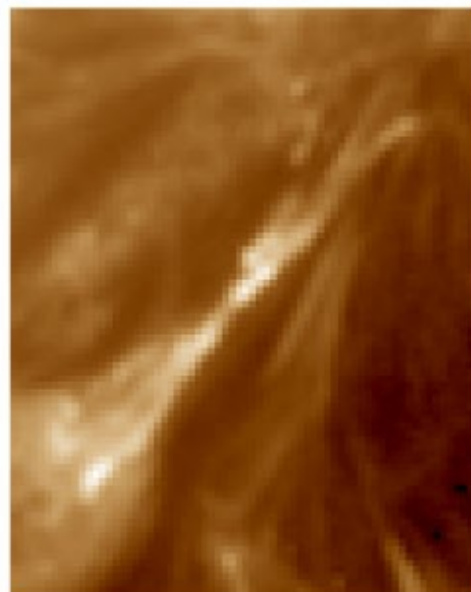
b AIA 171-Å 18:55:24



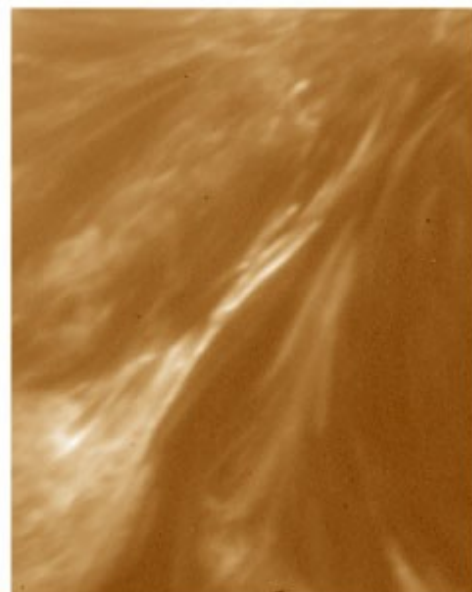
c Hi-C Unsharp Masked Image



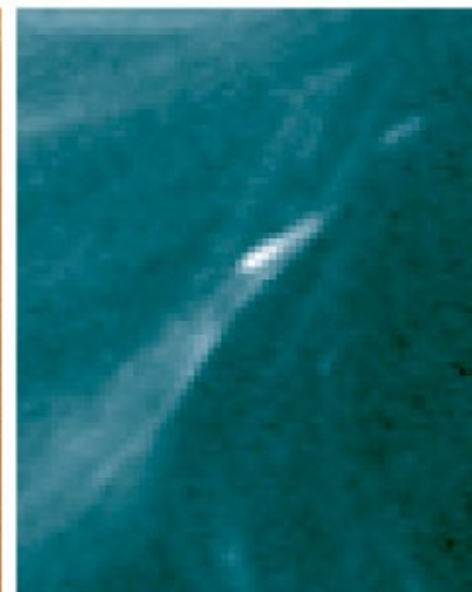
d AIA 193-Å 18:55:19



e Hi-C 193-Å 18:56:04



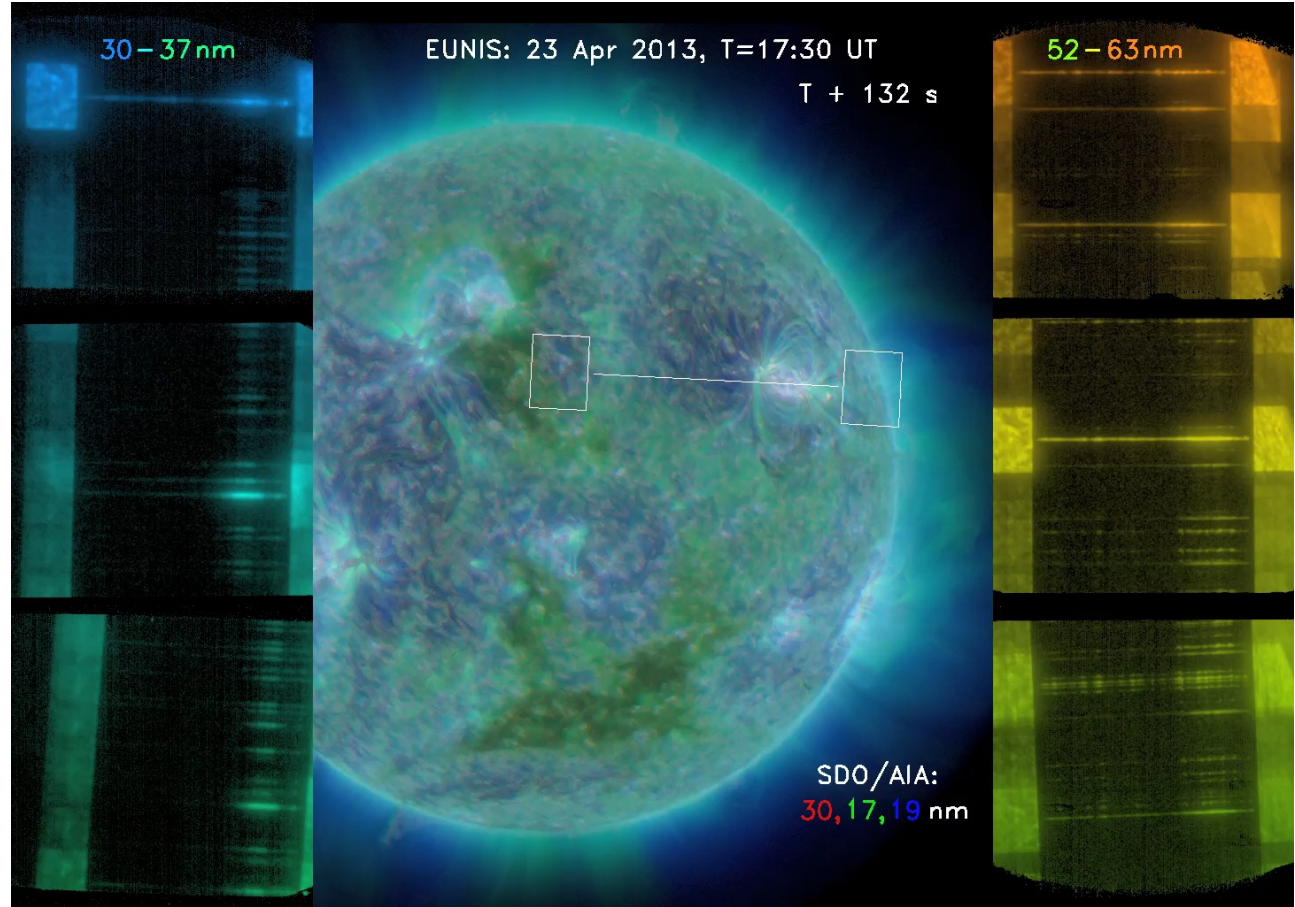
f AIA 94-Å 18:55:26

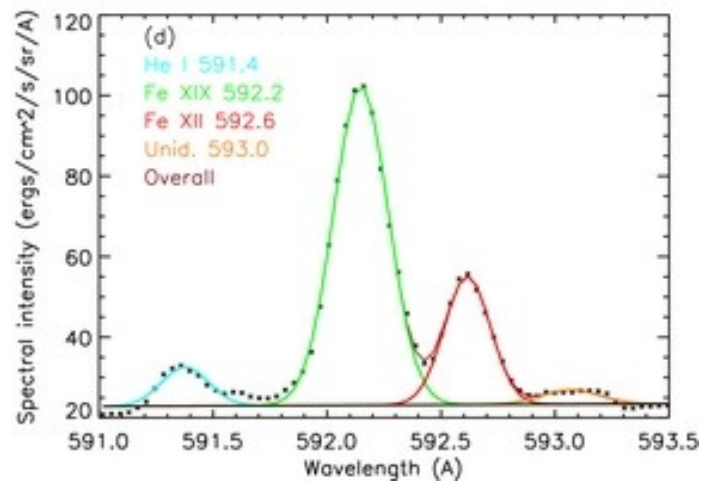
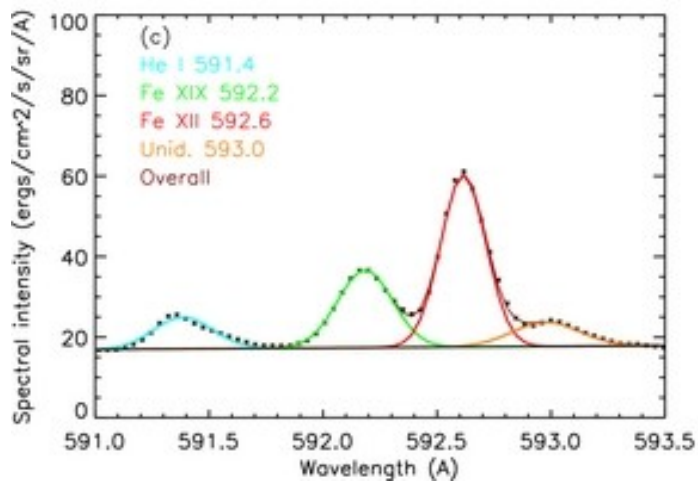
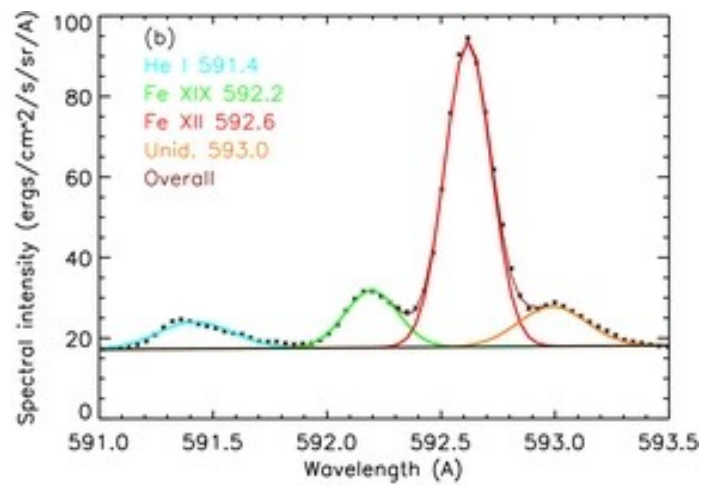
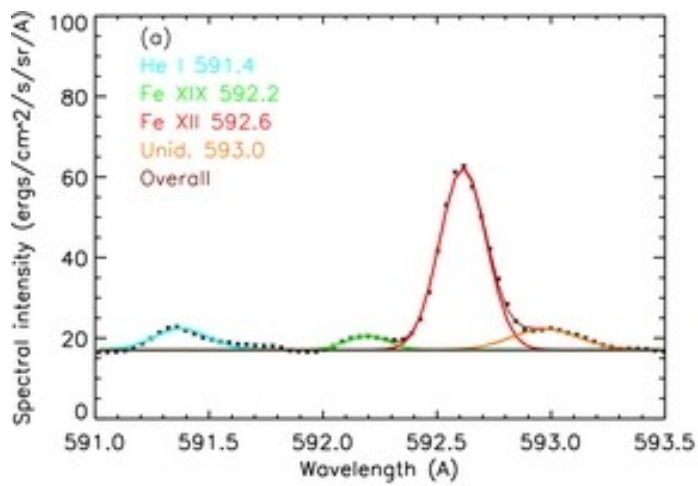


Εικόνες AIA με Hi-C 2013 διάμετρος βρόχων $\sim 1000\text{ km}$ Hi-C $dx=0.2\text{ arcsec}$ (140 km)
τύλιγμα των βρόχων γίνεται εμφανές (nature 2013)
<https://hic.msfc.nasa.gov/gallery.html>

Φασματογράφος EUNIS παρατηρεί
την $\text{Fe XIX } 592.2 \text{ \AA}$ $T= 8.9\text{MK}$
Brosius et al 2014 ApJ

Ο Φασματογράφος EUNIS παρατηρεί
την φασματική γραμμή
 $\text{Fe XIX } 592.5\text{\AA}$
σε κέντρα δράσης όταν δεν
συμβαίνουν εκλάμψεις. Η φασματική
γραμμή σχηματίζεται σε
θερμοκρασίες $8-9.E6 \text{ K}$. Η μέτρηση
αυτής της φασματικής γραμμής
δείχνει πως υπάρχει τόσο θερμό
πλάσμα παρά την απουσία
εκλάμψεων. Συνεπώς υποστηρίζει
την ύπαρξη νανοεκλάμψεων μια και
αυτές μπορούν να προκαλέσουν
τέτοιες θερμοκρασίες.

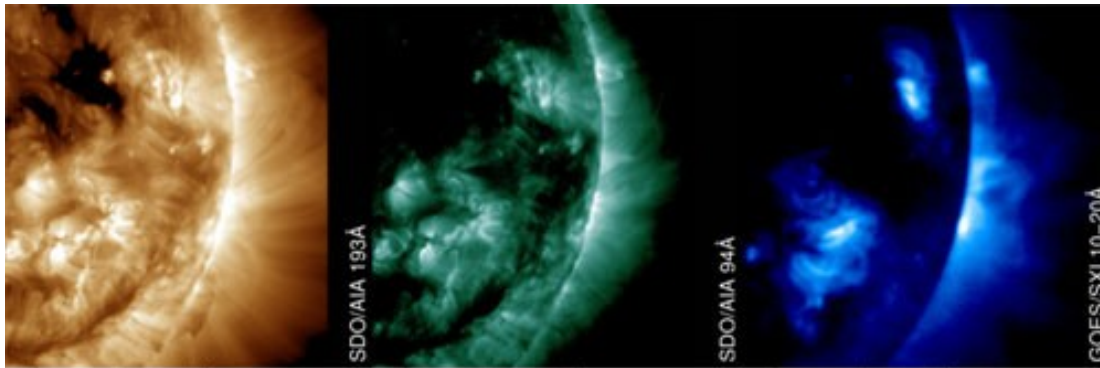




Brosius, Daw, Rabin 2014

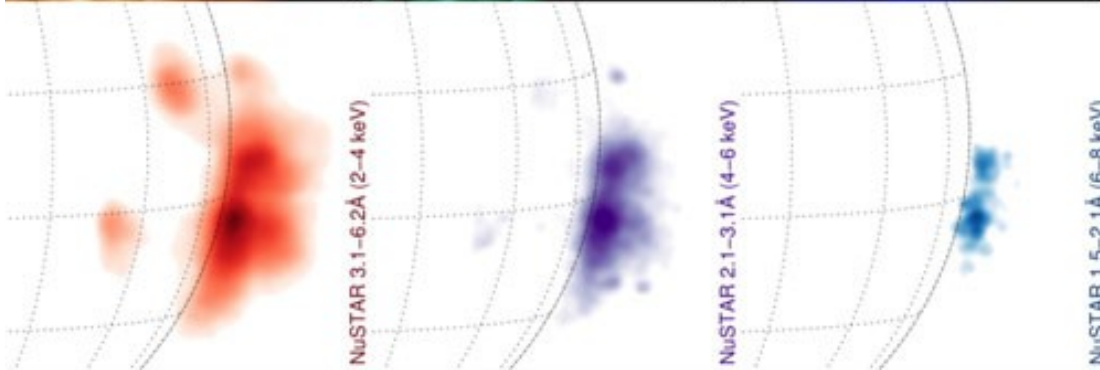
Η φασματική γραμμή Fe XIX είναι μετρήσιμη σε κέντρα δράσης σε περιοχές που δεν παρατηρούνται εκλάμψεις.

Υπάρχει λοιπόν εκεί πλάσμα θερμοκρασίας ~9 MK. Μηχανισμός θέρμανσης μικρής κλίμακας

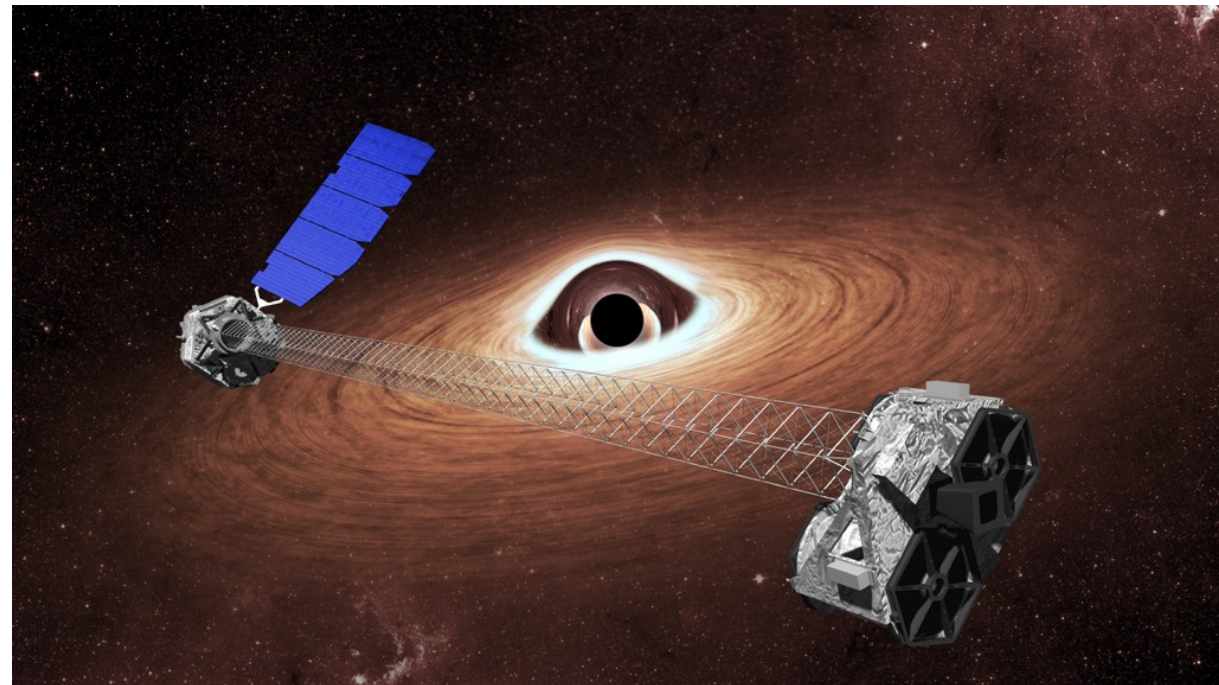


Παρατηρήσεις κέντρου δράσης
Εκτός έκλαμψης.
Δεν δείχνει μη θερμικό
φάσμα ακτίνων -X

Hannah et al 2016 ApJ

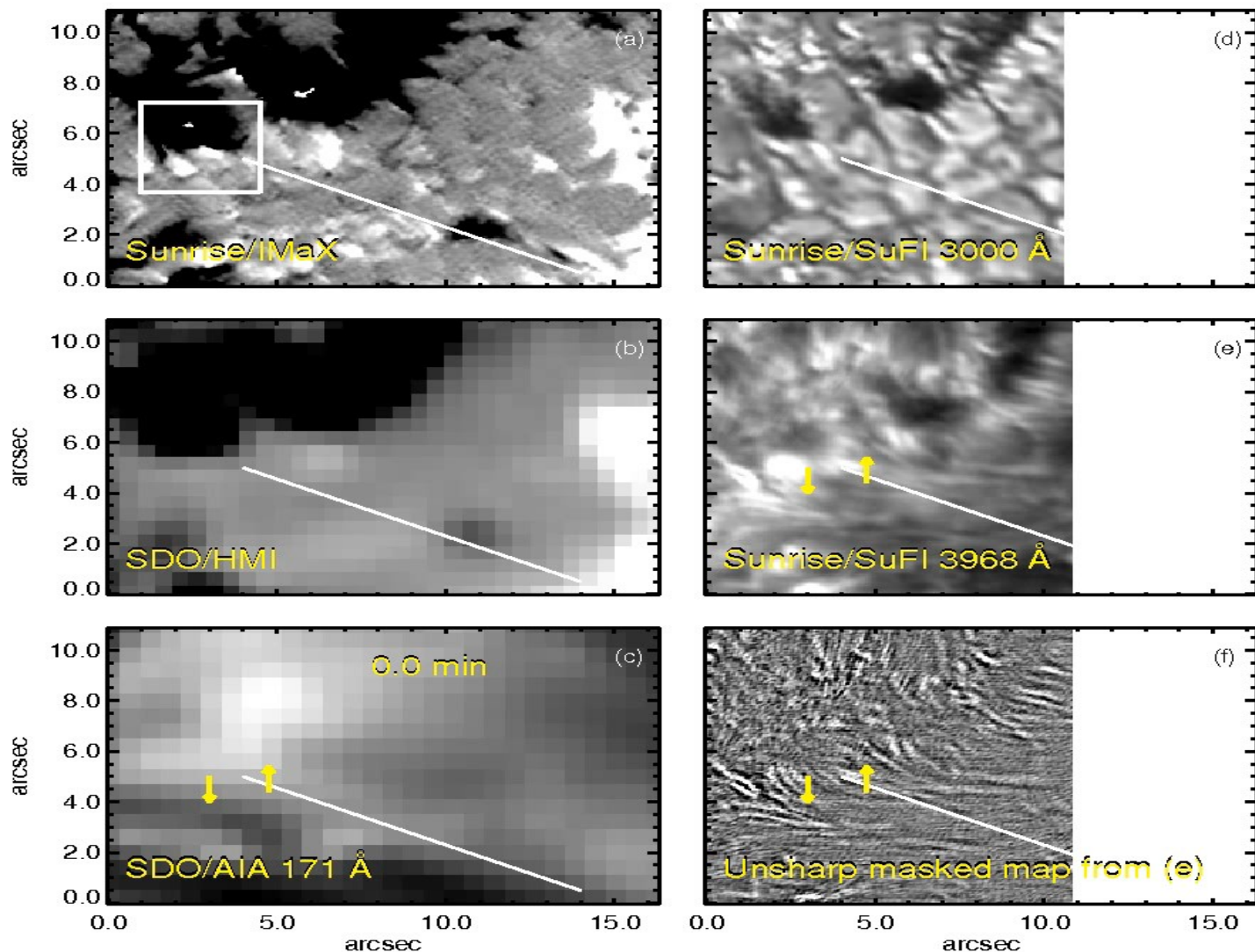


Το τηλεσκόπιο NuSTAR
Παρατηρεί φάσμα ακτίνων X
Μεταξύ 3 και 79 keV



Δεδομένα του τηλεσκοπίου SUNRISE

Το τηλεσκόπιο μπόρεσε να παρατηρήσει δομές μεγέθους 50-100 χλμ (διακριτική ικανότητα ~ 0.05arcsec/pixel). Πέταξε σε ύψος 35 χλμ με αερόστατο, και παρατηρεί στο κοντινό υπεριώδες. Τα τηλεσκόπια είναι το SuFI Sunrise Filter Imager, ImaX Imaging Magnetograph Experiment



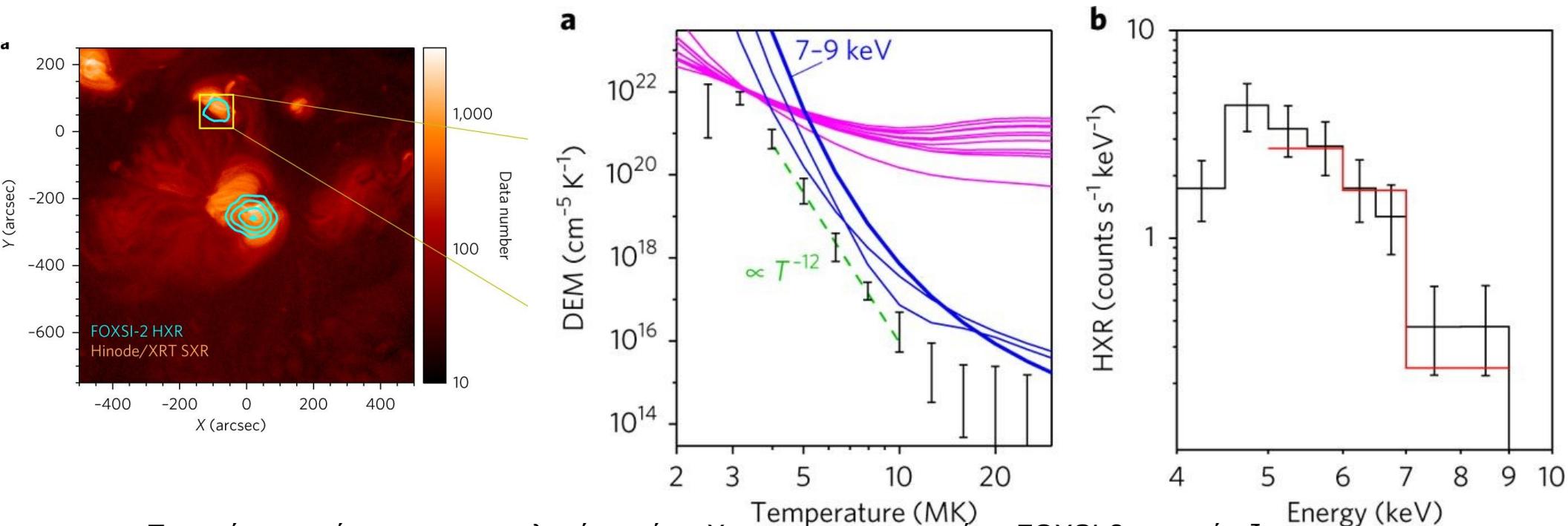
Εδω βλέπουμε τα πόδια των στεμματικών βρόχων.

Τα πόδια των στεμματικών βρόχων που φαίνονται σε εικόνα στο 171Å στηρίζονται σε περιοχές με τις δύο μαγνητικές πολικότητες κάτι που φαίνεται στο μαγνητόγραμμα μεγάλης ευκρίνειας του τηλεσκοπίου SUNRISE. Έτσι οι στεμματικοί βρόχοι έχουν μια σύνθετη μαγνητική δομή που φαίνεται από τις παρατηρήσεις.

Υπαρξη παράσιτης πολικότητας στα πόδια στεμματικών βρόχων.

Δεδομένα SUNRISE 2 50-100km.

Chitta et al 2017.



Παρατήρηση φάσματος στις σκληρές ακτίνες Χ με τον φασματογράφο FOXSI-2 που πέταξε με πύραυλο. Στην μία εικόνα φαίνεται η εικόνα της παρατήρησης (ισόφωτες) πάνω σε εικόνα στις μαλακές ακτίνες Χ από τον δορυφόρο Hinode.

Το φάσμα (συναρτήσει της ενέργειας της ακτινοβολίας keV) και η διαφορική μέτρηση εκπομπής δείχνουν την ύπαρξη πλάσματος θερμοκρασίας 8-9MK, το οποίο είναι ενισχυτικό της θεωρίας των νανοεκλάμψεων.

Η διαφορική μέτρηση εκπομπής Differential Emission Measure DEM

Εκφράζεται σαν $DEM = n_e^2 dV/dT$ εκφράζει την ποσότητα του πλάσματος που εκπέμπει σε διαφορικό όγκου ως προς το διαφορικό της θερμοκρασίας.

Θυμηθείτε την μέτρηση εκπομπής $EM = n_e^2 V$. Το DEM χρησιμοποιείται όταν το πλάσμα έχει πολλές θερμοκρασίες κατα μήκος της γραμμής παρατήρησης.

Κέντρο δράσης χωρίς έκλαμψη στα 3keV-9 keV
Ishikawa, et al 2017, nature astronomy