

# Αξεπέραστα Προβλήματα στην Έρευνα της Ηλιακής Φυσικής

Αθανάσιος Κουλουμβάκος  
Αστρονομική Εταιρία Πάτρας 'ΩΡΙΩΝ' 28/4/2010

# Τα Δέκα Σημαντικότερα Προβλήματα

- Το Πρόβλημα των Ηλιακών Νετρίνων\*
- Δομή του Ήλιου (Ηλιοσεισμολογία)\*
- Το Ηλιακό Μαγνητικό Πεδίο (Δυναμό, Ηλιακός Κύκλος)
- Υδροδυναμική των Βρόχων του Στέμματος
- MHD Ταλαντώσεις και Κύματα στο Στέμμα (coronal seismology)
- Το Πρόβλημα Θέρμανσης του Στέμματος
- Self-organized criticality (from nanoflares to giant flares)
- Διαδικασία Μαγνητικής Επανασύνδεσης
- Διαδικασία Επιτάχυνσης Σωματίων
- Στεμματικές Εκτοξεύσεις Μάζας (CMEs)

# 1. Το Πρόβλημα των Ηλιακών Νετρίνων

## Πηγή Ενέργειας Του Ήλιου:

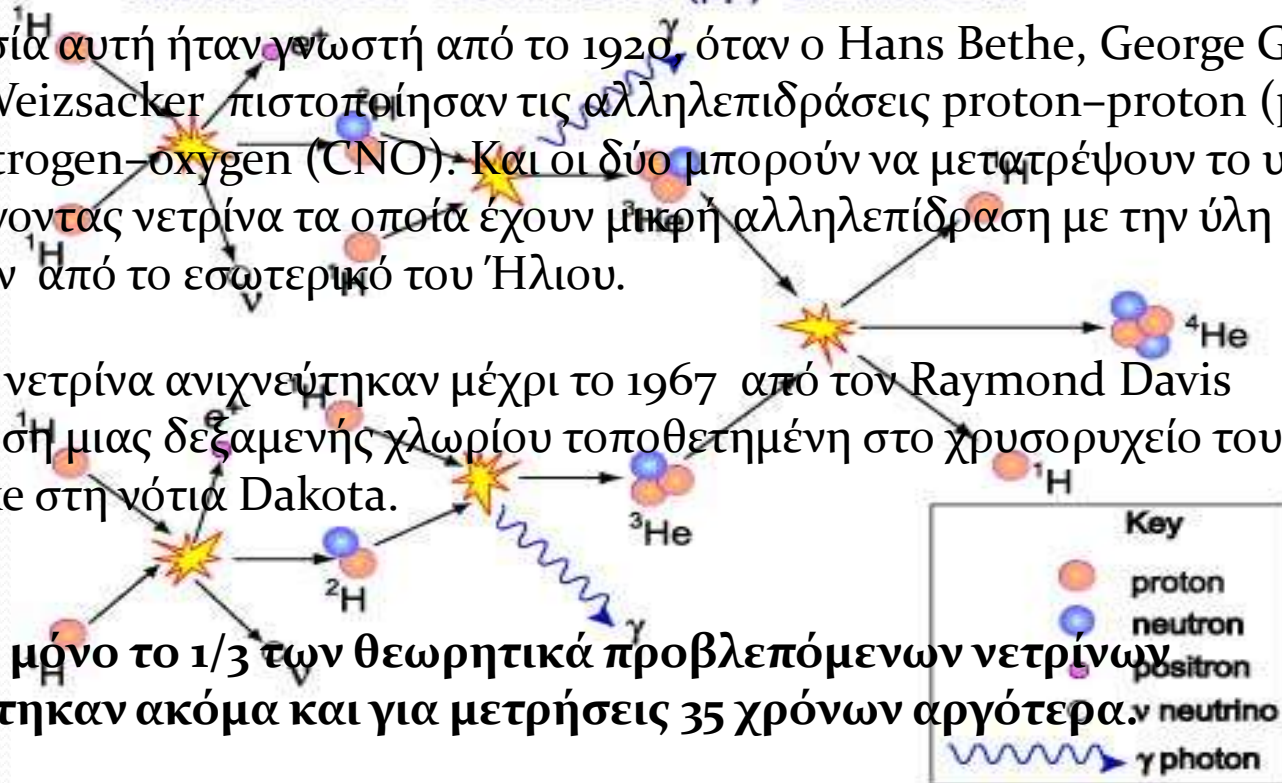
Η βασική πηγή ενέργειας του ήλιου είναι η πυρηνική καύση του υδρογόνου σε ήλιο η οποία συμβαίνει στο πυρήνα του ήλιου σε θερμοκρασία 15 Million°

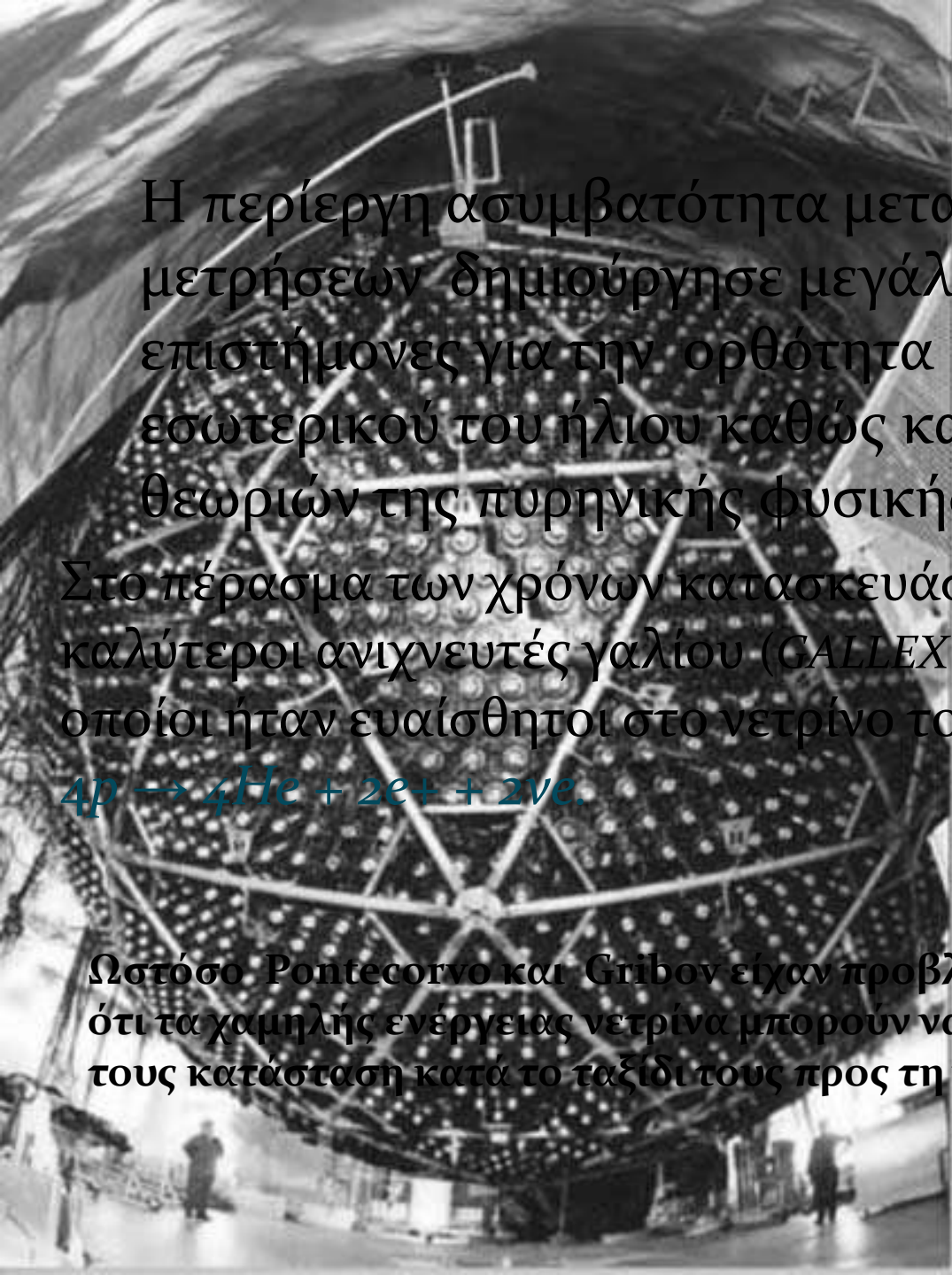
### Main Form of Proton-Proton (pp) Chain in Sun

Η διαδικασία αυτή ήταν γνωστή από το 1920, όταν ο Hans Bethe, George Gamow, και Carl Von Weizsacker πιστοποίησαν τις αλληλεπιδράσεις proton-proton (p-p) και carbon-nitrogen-oxygen (CNO). Και οι δύο μπορούν να μετατρέψουν το υδρογόνο σε ήλιο παράγοντας νετρίνα τα οποία έχουν μικρή αλληλεπίδραση με την ύλη και διαφεύγουν από το εσωτερικό του Ήλιου.

Τα ηλιακά νετρίνα ανιχνεύτηκαν μέχρι το 1967 από τον Raymond Davis με την χρήση μιας δεξαμενής χλωρίου τοποθετημένη στο χρυσορυχείο του Homestake στη νότια Dakota.

Ωστόσο μόνο το 1/3 των θεωρητικά προβλεπόμενων νετρίνων ανιχνεύτηκαν ακόμα και για μετρήσεις 35 χρόνων αργότερα.





Η περίεργη ασυμβατότητα μεταξύ θεωρίας και μετρήσεων δημιούργησε μεγάλο σκεπτικισμό στους επιστήμονες για την ορθότητα των μοντέλων του εσωτερικού του ήλιου καθώς και των θεμελιωδών θεωριών της πυρηνικής φυσικής.

Στο πέρασμα των χρόνων κατασκευάστηκαν καλύτεροι ανιχνευτές γαλίου (GALLEX in Italy and Super-Kamiokande in Japan) οι οποίοι ήταν ευαίσθητοι στο νεutrίνο του ηλεκτρονίου  $\nu_e$ .



Ωστόσο Pontecorvo και Gribov είχαν προβλέψει ήδη από το 1969 ότι τα χαμηλής ενέργειας νεutrίνα μπορούν να μεταβάλουν την μιονική τους κατάσταση κατά το ταξίδι τους προς τη γη μετατρέπόμενα σε  $\nu_\mu$ -  $\nu_\tau$ .

The Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in Ontario, Canada, featuring a heavy-water Cherenkov detector that is designed to detect solar neutrinos. It uses 1000 tons of heavy water and 9600 photomultiplier tubes mounted on a spherical support structure within a 30-meter barrel-shaped cavity, located in the deepest part of the Sudbury mine (Courtesy of SNO).

# Η Λύση ... Βρέθηκε !

Οι πρώτοι ανιχνευτές ήταν ευαίσθητοι στα υψηλής ενέργειας νετρήνα ( $\nu_e$ ) όπως ο ανιχνευτής χλωρίου του Raymond Davis ενώ οι επόμενης γενιάς ανιχνευτές (*Kamiokande*, *Super-Kamiokande-I* και *the Sudbury Neutrino Observatory*) ήταν πιο ευαίσθητοι στα χαμηλής ενέργειας νετρίνα ( $\nu_{\mu-\nu\tau}$ ).

Μεταγενέστερες τροποποιήσεις στο SNO μπόρεσαν να του επιτρέψουν την ταυτόχρονη μέτρηση και στις δυο κατηγορίες νετρίνων οπότε το πρόβλημα της έλλειψης των νετρίνων λύθηκε και επιβεβαιώθηκαν τα αστροφυσικά μοντέλα για την σύσταση του πυρήνα.

## 2. Δομή του Ήλιου (Ηλιοσεισμολογία)

Η δομή του Ήλιου προκύπτει από τα θεωρητικά μοντέλα υδροδυναμικής ισορροπίας και έπειτα από προσομοιώσεις της εξέλιξης των φαινομένων της φωτόσφαιρας. Η πρώτη πειραματική επιβεβαίωση της δομής που γνωρίζουμε μέχρι σήμερα επιτεύχθηκε με μεγάλη ακρίβεια μέσω των μεθόδων ηλιοσεισμολογίας, η οποία αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 60/70, με μετρήσεις των ταλαντώσεων της ηλιακής επιφάνειας στο λευκό φως.

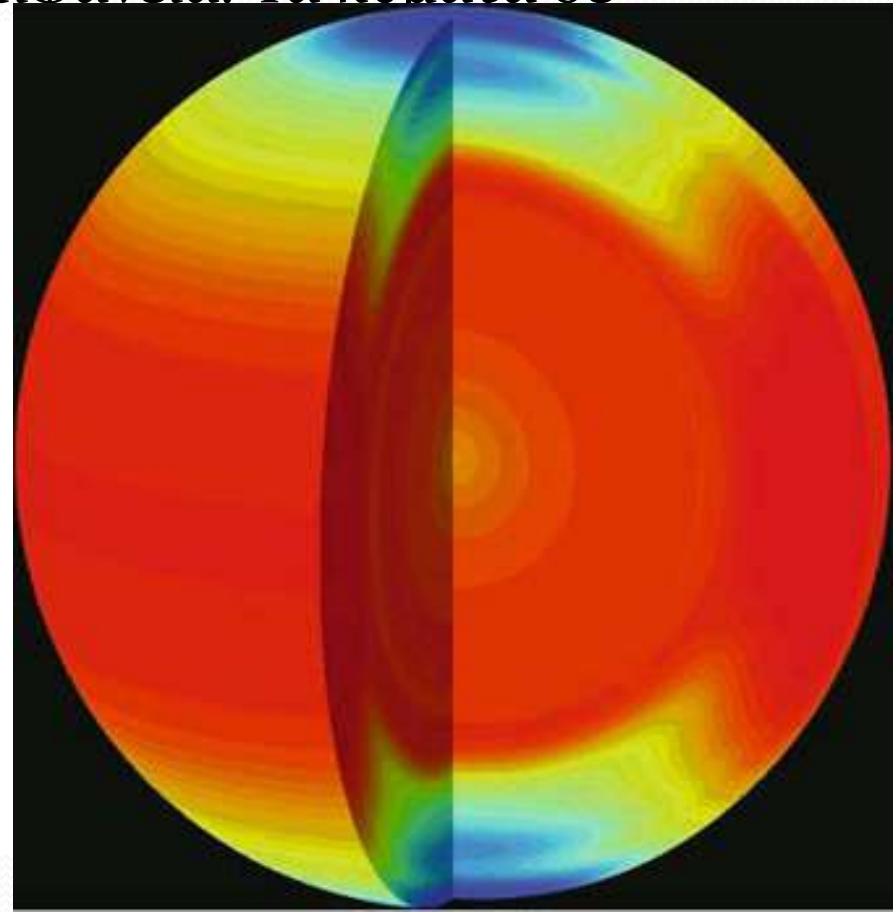
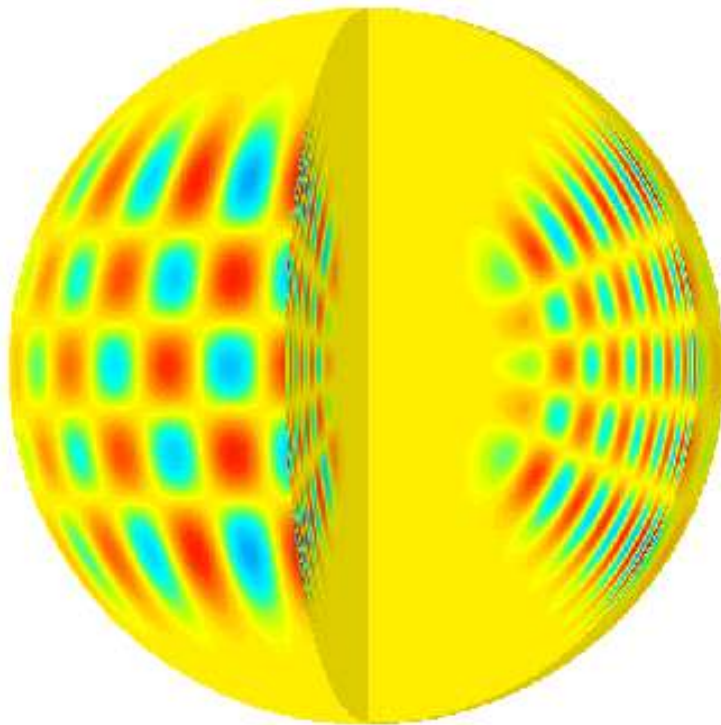
Οι ταλαντώσεις μετρήθηκαν αρχικά από τον R. Leighton το 1970 και ερμηνεύτηκαν έπειτα από τους R. Ulrich, C. Wolfe, και J. Leibacher ως ηχητικά κύματα της ζώνης μεταφοράς. Οι ηχητικές ταλαντώσεις αποκαλούνται και *p-modes* (*pressure-driven waves*).

$$V_D(\theta, \phi, t) = \sin \theta \cos \phi \sum_{n,l,m} A_{nlm}(t) c_{lm} P_l^m(\cos \theta) \cos[m\phi - \omega_{nlm}t - \delta_{nlm}(t)] .$$

radial order is  $n$  angular degree is  $l$  the angular order is  $m$



Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται με το βάθος η ταχύτητα του ήχου στο εσωτερικό του ήλιου εξαρτάται και αυτή με το βάθος. Τα κύματα P-mode που δημιουργούνται στην επιφάνεια του ήλιου διαδίδονται προς το εσωτερικό του και ανακλούνται πάλι προς την επιφάνεια. Τα κύματα σε



- **Τα προβλήματα:**

Έως τώρα η μελέτη των p-mode κυμάτων έχει επιβεβαιώσει την εικόνα που είχαμε για το εσωτερικό του Ήλιου τόσο για την δομή του όσο και την δυναμική της ζώνης μεταφοράς και της φωτόσφαιρας. Ωστόσο εκτός από τα p-mode κύματα θεωρητικά υπάρχουν και τα g-mode τα οποία προέρχονται από ταλαντώσεις βαρυτικής φύσεως και ακόμα δεν έχουμε σοβαρές αποδείξεις ότι τα έχουμε μετρήσει.

## **Η σημασία:**

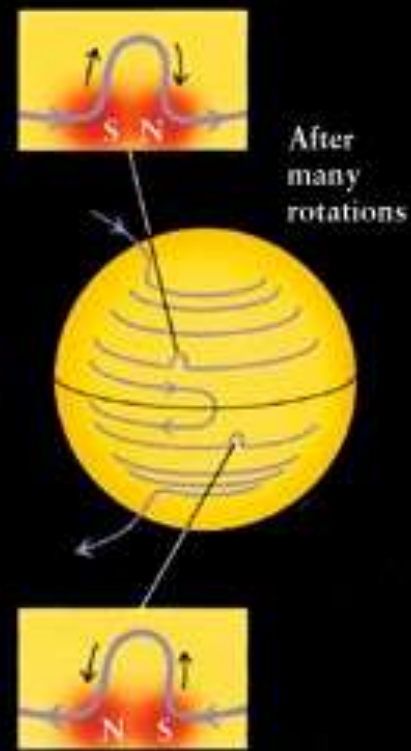
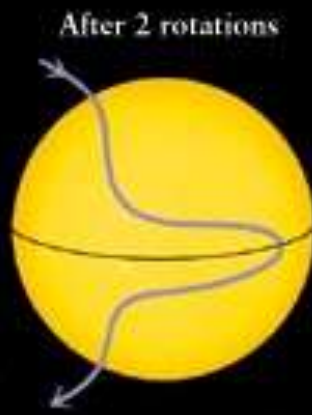
Με την μελέτη των g-mode κυμάτων μπορούμε να επιτύχουμε την ακριβή μέτρηση της πυκνότητας και της θερμοκρασίας του πυρήνα και του κατώτερου στρώματος της ζώνης μεταφοράς. Τέλος το πρόβλημα κοσμολογικής σημασίας το οποίο αφορά την περιεκτικότητα του Ήλιου σε ήλιο και βαρύτερα στοιχεία μπορεί να λυθεί από την έρευνα της ηλιοσεισμολογίας.

# 3. Το Ηλιακό Μαγνητικό Πεδίο

Το σημαντικότερο πρόβλημα που αφορά το ηλιακό μαγνητικό πεδίο είναι η μελέτη της **θεωρίας του δυναμό** το οποίο αναπτύσσεται στο εσωτερικό του ήλιου και παράγει το μαγνητικό πεδίο που παρατηρούμε στην επιφάνεια και το στέμμα.

Η βασική ιδέα αναπτύχθηκε από τους Parker, Babcock, Leighton, Deubner, και Ulrich περίπου το 1955.

***Το Πρόβλημα: Αν και κατανοούμε την διαδικασία του δυναμό δεν κατανοούμε ακόμα πλήρως τον ακριβή συνδυασμό των φυσικών διαδικασιών που το γεννάνε.***



Subsurface magnetic field  
now in coils

B

Coils develop links that break  
through surface



C

Εκτός από την θεωρία του δυναμό σημαντικά προβλήματα προκύπτουν στην μελέτη του μαγνητικού πεδίου στην ηλιακή ατμόσφαιρα και το στέμμα. Τα μοντέλα τα οποία έχουν αναπτυχθεί έως τώρα δεν μπορούν να αναπαράγουν το σύνθετο μαγνητικό πεδίο των νημάτων καθώς και των περιοχών όπου παράγονται οι εκλάμψεις και οι CMEs.

Τέλος τα μη MHD μοντέλα δεν λαμβάνουν υπ' όψη την πυκνότητα και τη θερμοκρασία του πλάσματος όπου υπάρχει το μαγνητικό πεδίο.

**Η λύση :** Κατανόηση της φυσικής διαδικασίας  
Καλύτερη Μοντελοποίηση  
Μετρήσεις καλύτερης διακριτικότητας  
Ανάπτυξη μη Γραμμικών μοντέλων

## 4. Υδροδυναμική Στεμματικών Βρόχων

Τα μοντέλα του ηλιακού στέμματος υποθέτουν βαρυτική διαστρωμάτωση και σφαιρική συμμετρία και παρέχουν 1D μοντελοποίηση της πυκνότητας και θερμοκρασίας στην περιοχή του στέμματος σε συνάρτηση με το ύψος.

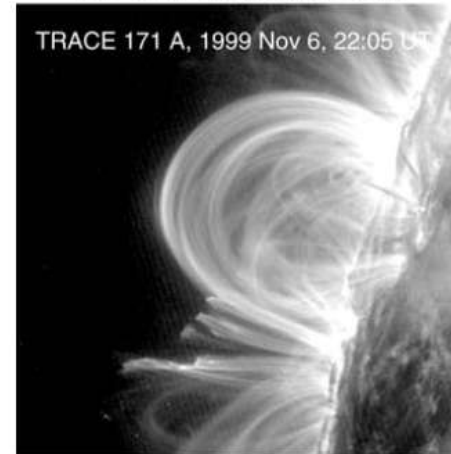
**Ωστόσο** το στέμμα δεν είναι ομογενές και αποτελείται από κλειστές και ανοικτές μαγνητικές γραμμές με αποτέλεσμα να έχουμε μια πιο περίπλοκη δομή όχι απαραίτητα σε υδροδυναμική ισορροπία.

Το ποιο διαδεδομένο έως τώρα μοντέλο είναι το Rosner–Tucker–Vaiana (RTV) το οποίο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την θερμοκρασία, το μέγεθος και την πίεση των στεμματικών βρόχων. Όμως νέες παρατηρήσεις των βρόχων στο *EUV* δείχνουν απόκλιση στην πυκνότητα των βρόχων και το ύψος τους σε σχέση με το μοντέλο.

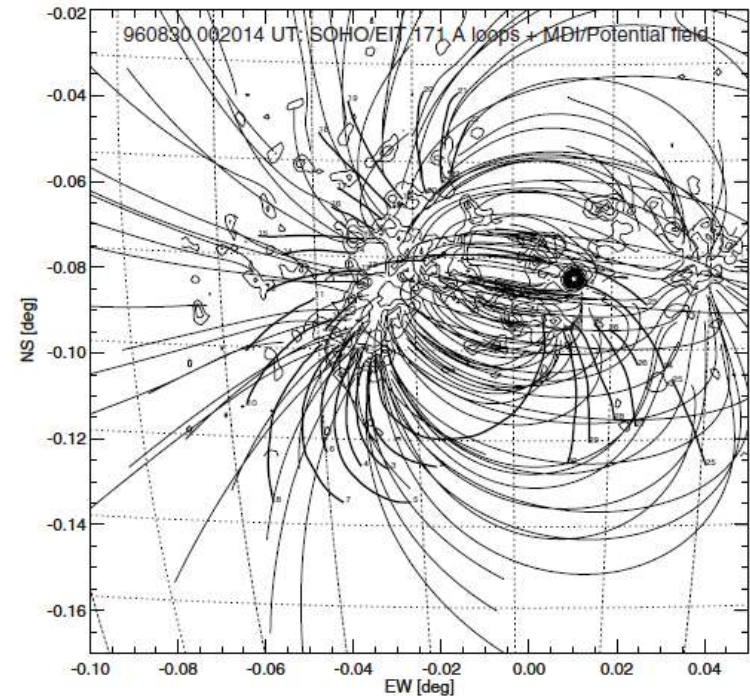
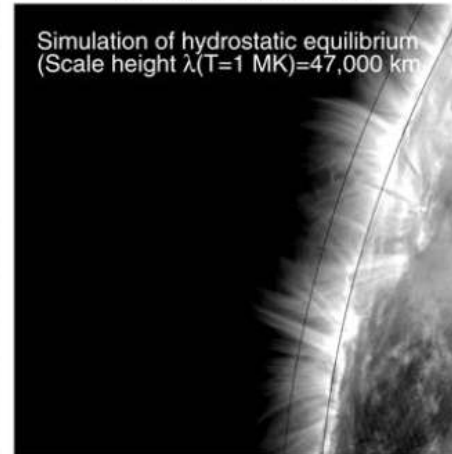
## Η αρχική λύση:

Εγκατάλειψη των υδροστατικών μοντέλων και νέα δημιουργία υδροδυναμικών μοντέλων τα οποία θα αποδίδουν σωστά την πυκνότητα και την θερμοκρασία των βρόχων καθώς και μετρήσεις καλύτερης διακριτικής ικανότητας και διαχωρισμός των δεδομένων από τους κύριους βρόχους από το πολύπλοκο υπόβαθρο.

The Non-Hydrostatic Sun



The Hydrostatic Sun



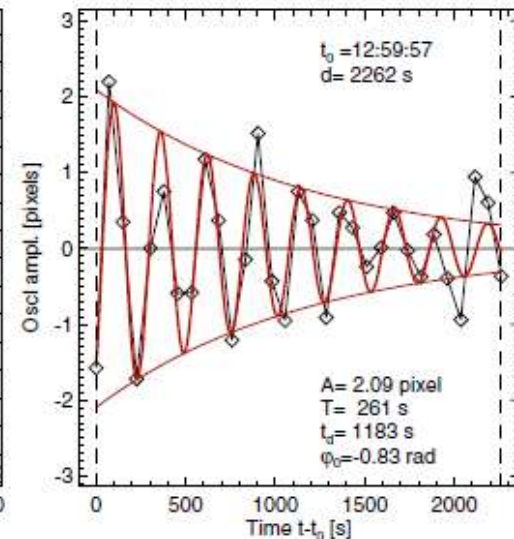
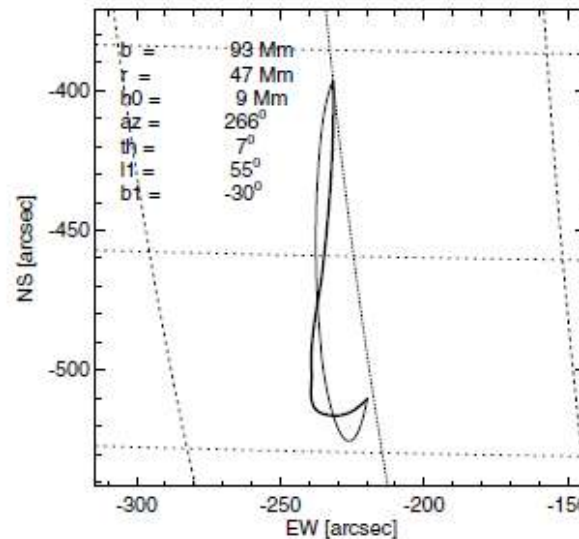
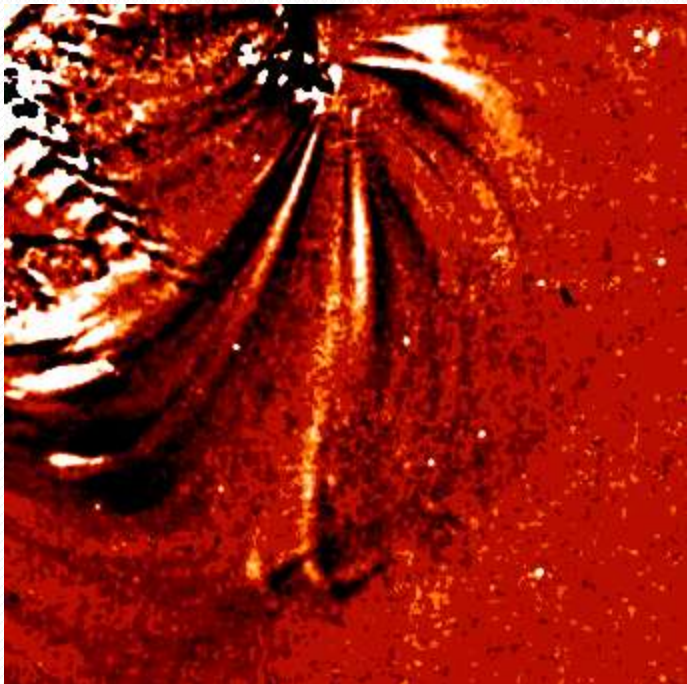
## 5. MHD Ταλαντώσεις και Κύματα στο Στέμμα (coronal seismology)

Όπως και στην περίπτωση της Ηλιακής σεισμολογίας το στέμμα του ήλιου περιέχει ένα μεγάλο πλήθος δομών πλάσματος οι οποίες είναι ικανές να παράγουν ηχητικά κύματα και αρμονικές ταλαντώσεις .

Η δημιουργία διαστημοσυσκευών με καταγραφές υψηλής ανάλυσης (SoHO και TRACE EUV images) επέτρεψαν στην στεμματική σεισμολογία να αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Βρόχοι που ταλαντώνονται ,προεξοχές και κηλίδες μελετούνται εκτενώς από το 1999 ενώ η θεωρία των MHD oscillations έχει αναπτυχθεί πλήρως από το 1980.

Η διαδικασία δημιουργίας των MHD ταλαντώσεων έχει ως εξής: Εκρηκτικό γεγονός στον ήλιο το οποίο προκαλεί αστάθεια στην πίεση του πλάσματος στο στέμμα το οποίο ταλαντώνεται μέχρι να αποκτήσει την υδροδυναμική του ισορροπία.

Ο νέος κλάδος της ηλιακής σεισμολογίας έχει επιβεβαιώσει τα θεωρητικά μοντέλα MHD αλλά πρέπει ακόμα να βρεθεί ο μηχανισμός που δημιουργεί την αρχική ταλάντωση του πλάσματος καθώς και ο μηχανισμός της απόσβεσης της ταλάντωσης.



# 6. Το πρόβλημα της Θέρμανσης του Στέμματος

Το πρόβλημα της θέρμανσης του στέμματος ανακάλυψε ο αστρονόμος Αρθούρος Ε. Εβινγκχάιμ και 6 δεκαετίες αργότερα οι αστρονόμοι Τζορτζ Γουόλφ και Τζορτζ Ε. Πέιζαν τις πρώτες λύσεις. Ήδη από το 1943 το πρόβλημα του στέμματος ήταν γνωστό ως το πρόβλημα του Η. Κ.

Ένα τόσο σημαντικό πρόβλημα που έμεινε άλυτο για ένα μήνα περίπου, μέχρι που ο αστρονόμος Άνθωνι Γουόλφ και ο Άλφρεν Ράιχσταρντ ανιχνεύσαν την απάντηση. Ο Άλφρεν Ράιχσταρντ είναι ένας άλλος πιο γνωστός αστρονόμος.

Τα επιτεύγματα του Άλφρεν Ράιχσταρντ είναι:

1. Ένας αστρονόμος που ζώνη του Η. Κ. βρόχου του Η. Κ.
2. Ένας αστρονόμος που ζώνη του Η. Κ. βρόχου του Η. Κ.



ώ και 6  
ορισαν τις  
φάσμα το  
Η. Κ.

νθεί από  
λλος πιο  
α

ς στην  
τούς

Alven.

Οι πιο πρόσφατες παρατηρήσεις δεν δείχνουν ότι η θέρμανση του στέμματος είναι ένα τοπικό φαινόμενο ή παρατηρείται κυρίως στις ενεργές περιοχές. Πρόκειται για ένα γενικό φαινόμενο το οποίο εδρεύει στην χρωμόσφαιρα και πιθανά να σχετίζεται με τις εκλάμψεις και εμφανίζεται σε ολόκληρο το στέμμα.

Παρατηρησιακές αποδείξεις:

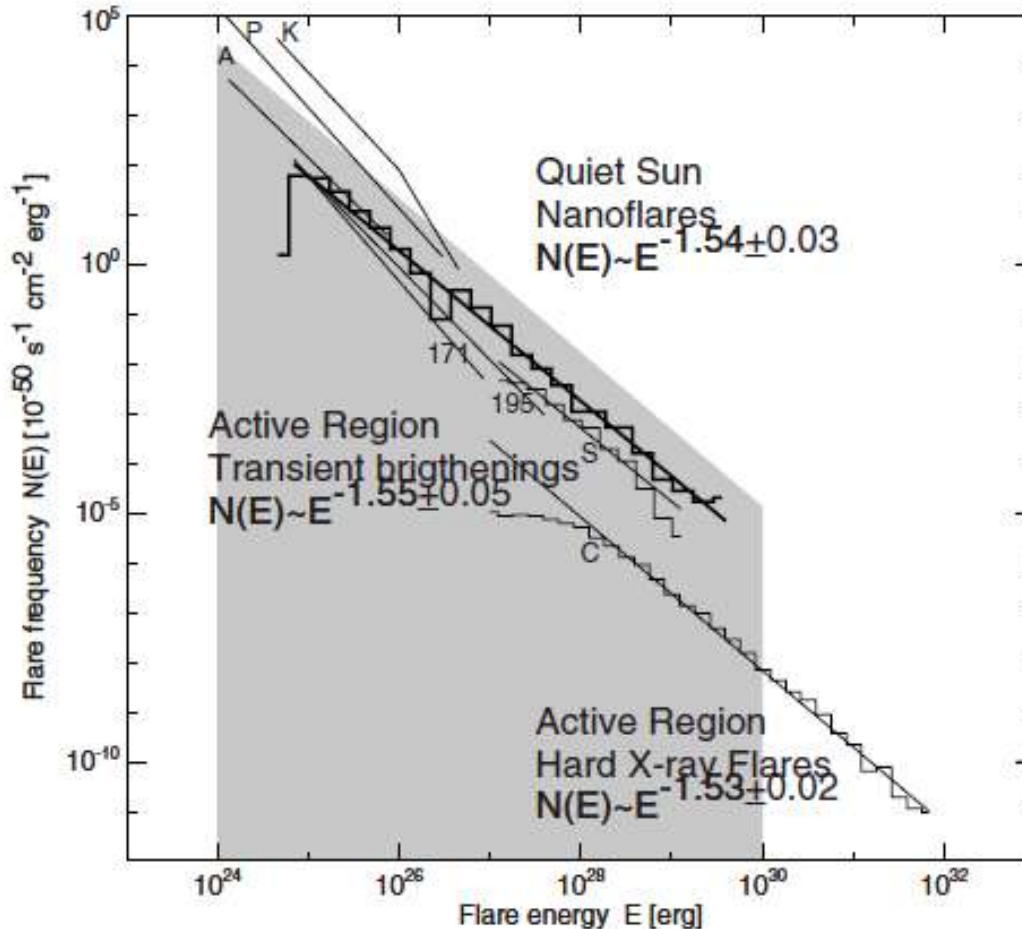
- (1) την εξέλιξη της θερμοκρασίας στους βρόχους του στέμματος,
- (2) την υπερβολική πυκνότητα των βρόχων,
- (3) οριζόντια ροή στους βρόχους, (4) Ταχύτητα ανάπτυξης των βρόχων
- (5), Ταχεία ανοδικά κύματα (6), ενεργειακή ισορροπία στους βρόχους,
- (7) η μαγνητική πολυπλοκότητα στην περιοχή μετάβασης
- (8) Το ύψος των nanoflares και microflares (9), η διατομή των στοιχειωδών βρόχων, καθώς και από (10) 3D MHD προσομοιώσεις.

**Η πολυπλοκότητα του μηχανισμού θα μας καθυστερήσει για πολύ ακόμα μέχρι την τελική λύση του προβλήματος**

# 7. Self-organized criticality

Η SOC  
συστήμ  
Οι νόμ  
γραμμ  
έχουμε

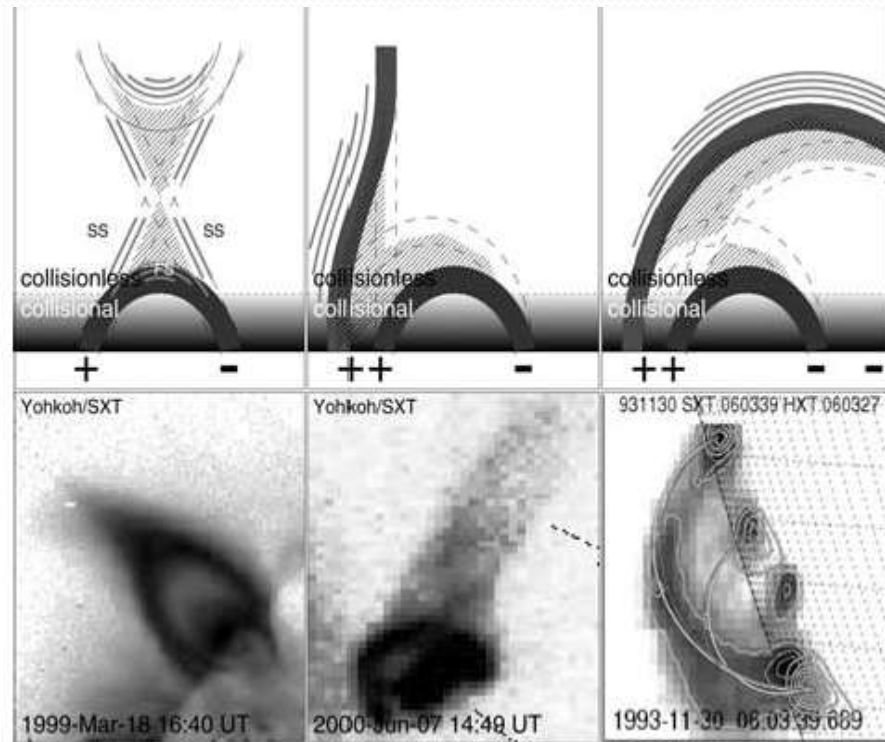
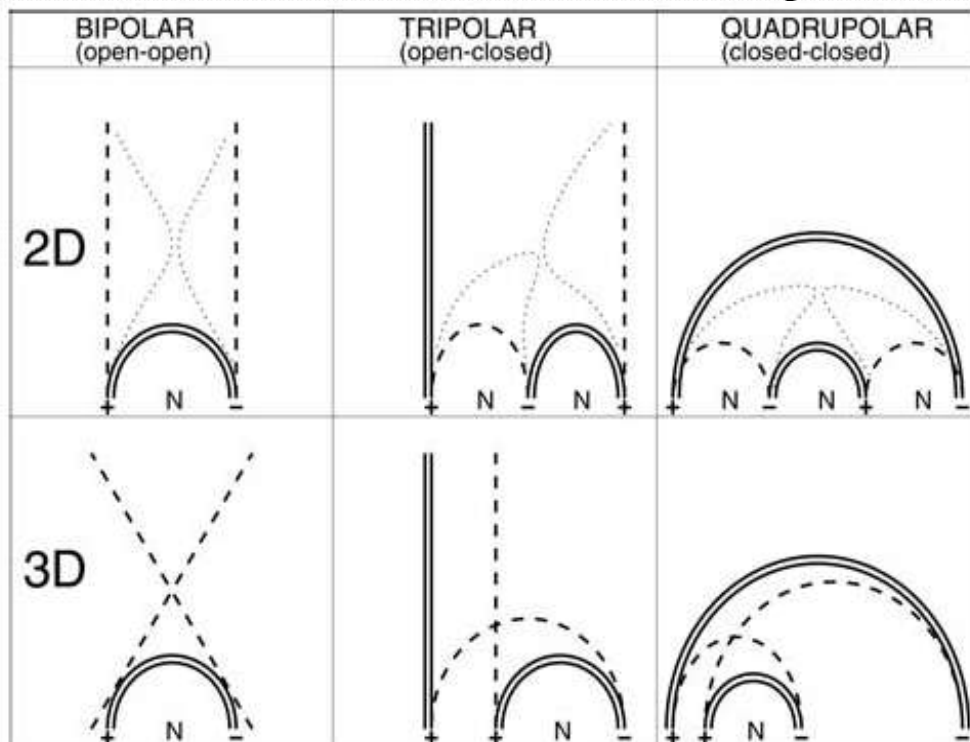
Η πρό  
της ενέ  
υποδεί  
προέρχ



ών ενός  
δύναμης.  
ες μη  
βλητές  
ιές.

ατανομών  
μας  
έμματος

# 8. Διαδικασία Μαγνητικής Επανασύνδεσης



κύματα ταλαντώσεως πλασμάτος στο σημείο.

# 10.Στεμματικές Εκτοξεύσεις Μάζας

Οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας οι οποίες είναι το τελευταίο φαινόμενο στην αλυσίδα των μαγνητικών ασταθειών του στέμματος. (filament eruption, generate a flare, and launch a CME).

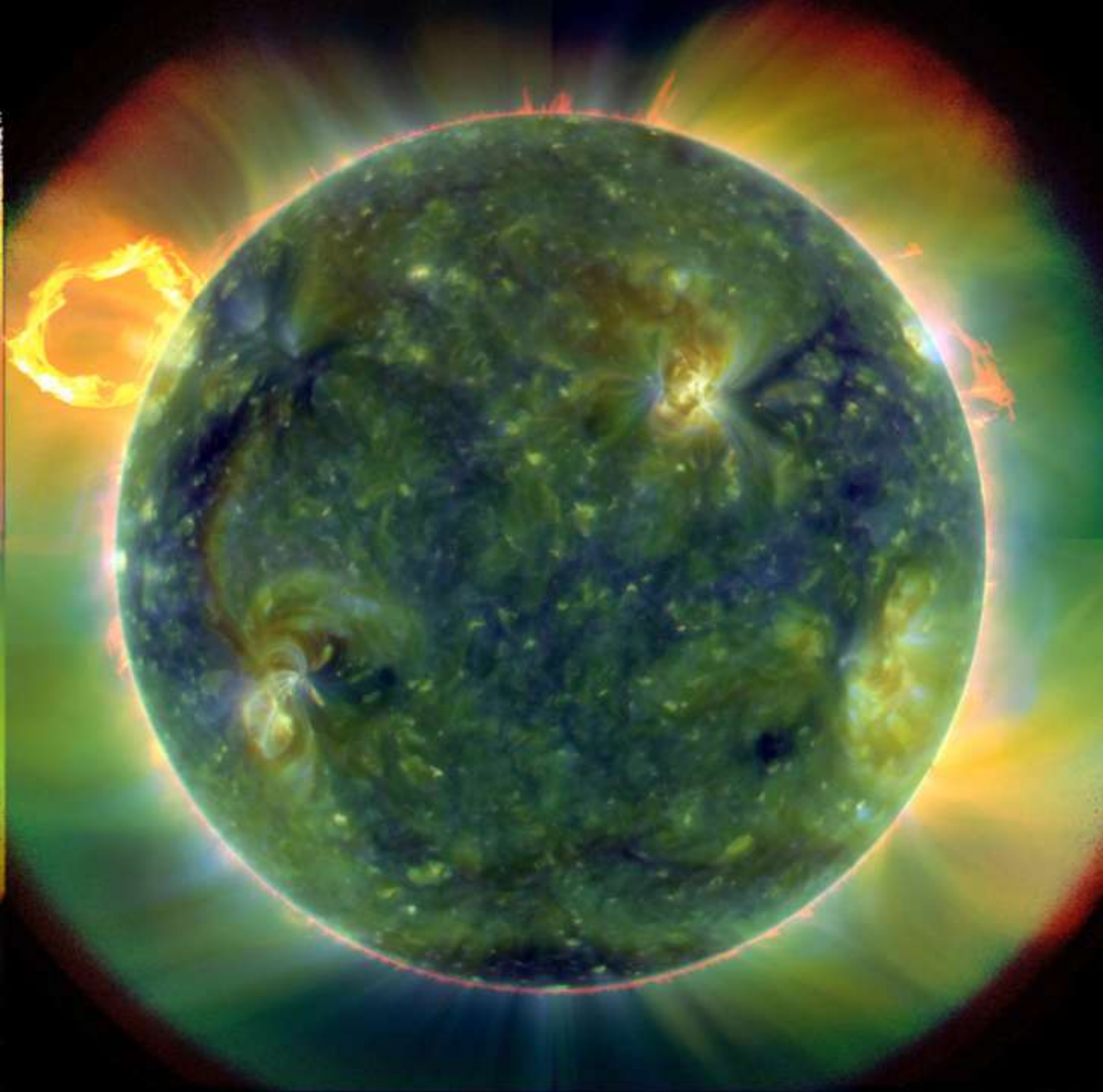
Οι CMEs άρχισαν να κεντρίζουν το ενδιαφέρον μόλις μετά το 1980 όπου μετρήσεις από στεμματογράφους έδειξαν ότι είναι τόσο συχνό φαινόμενο όσο και οι εκλάμψεις. Τα σημερινά όργανα καταγραφής του στέμματος είναι το LASCO στο SoHO και το STEREO τα οποία άρχισαν ουσιαστικά την χρυσή εποχή μελέτης των CMEs.

## Τα κύρια προβλήματα :

- Η προέλευσή τους (μαγνητική αστάθεια → Νήματα, Εκλάμψεις).
- Η εξέλιξη και η τοπολογία τους.
- Η δυναμική του στέμματος μετά από μια CME.
- Το υδροδυναμικό μοντέλο μιας CME.
- Η επιτάχυνση των σωματίων του στέμματος και του μεσοπλανητικού χώρου από τα κρουστικά κύματα.
- Ηλιακός καιρός και πρόγνωση.

# Τα Δέκα Σημαντικότερα Προβλήματα

- ☺ Το Πρόβλημα των Ηλιακών Νετρίνων
- ☺ Δομή του Ήλιου (Ηλιοσεισμολογία)
- ✳ Το Ηλιακό Μαγνητικό Πεδίο (Δυναμό, Ηλιακός Κύκλος)
- ✳ Υδροδυναμική των Βρόχων του Στέμματος
- ✳ MHD Ταλαντώσεις και Κύματα στο Στέμμα (coronal seismology)
- ☺ Το Πρόβλημα Θέρμανσης του Στέμματος ❤️
- ✳ Self-organized criticality (from nanoflares to giant flares)
- ☺ Διαδικασία Μαγνητικής Επανασύνδεσης
  - Διαδικασία Επιτάχυνσης Σωματίων
- ☺ Στεμματικές Εκτοξεύσεις Μάζας



Τ  
Ε  
Λ  
Ο  
Σ