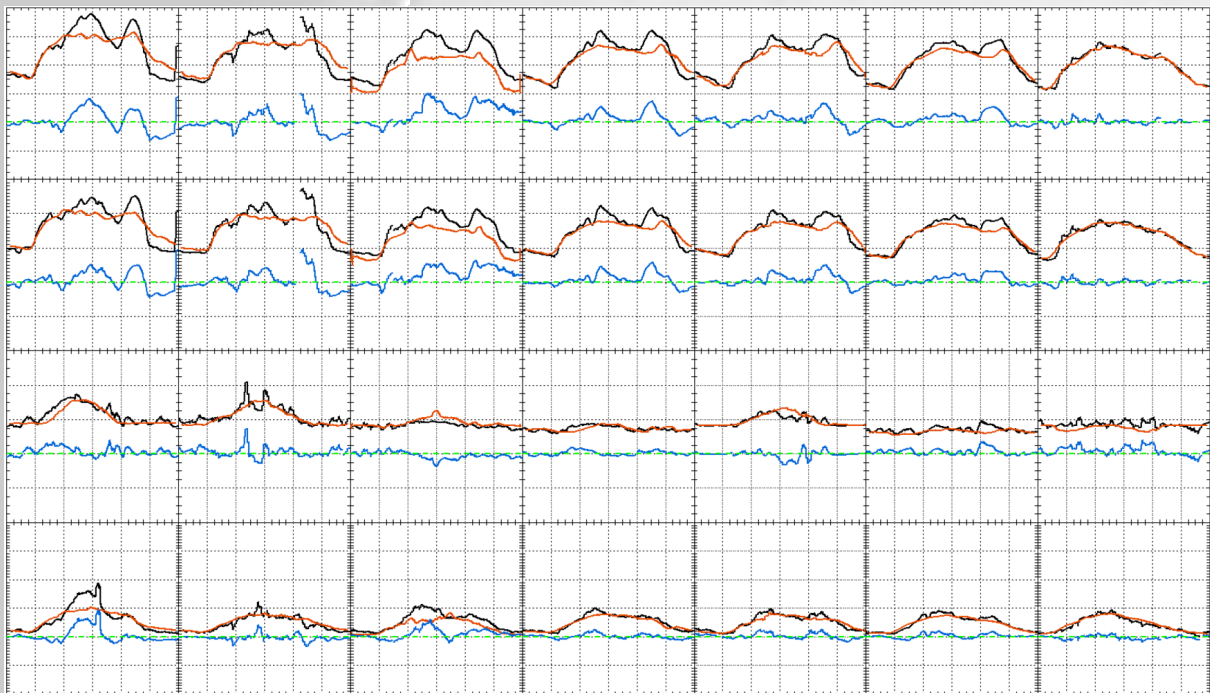




**Αναβάθμιση της λειτουργίας του ηλιακού τηλεσκοπίου του
Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, λήψη ηλιακών
παρατηρήσεων και ενσωμάτωσή τους στον HELIOSERVER.
Μελέτη της απόκρισης της Ιονόσφαιρας σε εκρηκτικά ηλιακά
φαινόμενα**

Ιωάννης Δακανάλης

ΑΜ: 201731



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

για το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης

Επιβλέπων Καθηγητής: Γαζέας Κοσμάς

Αθήνα 2019



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

**Αναβάθμιση της λειτουργίας του ηλιακού τηλεσκοπίου του
Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, λήψη ηλιακών
παρατηρήσεων και ενσωμάτωσή τους στον HELIOSERVER.
Μελέτη της απόκρισης της Ιονόσφαιρας σε εκρηκτικά ηλιακά
φαινόμενα**

Ιωάννης Δακανάλης

ΑΜ: 201731

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

για το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης

Επιβλέπων: Γαζέας Κοσμάς

Τριμελής Επιτροπή:

Γαζέας Κοσμάς, Λέκτορας, Τμήμα Φυσικής, Σχολή Θετικών Επιστημών, ΕΚΠΑ

Τσιροπούλα Γεωργία, Διευθύντρια Ερευνών, Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστρο-
φυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ), Εθνικό

Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ)

Πρέκα-Παπαδήμα Παναγιώτα, Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Φυσικής, Σχολή
Θετικών Επιστημών, ΕΚΠΑ

Αθήνα 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική εργασία ενός τελειόφοιτου μεταπτυχιακού φοιτητή Αστροφυσικής αποτελεί το επιστέγασμα μιας πολυσχιδούς, άκρως ενδιαφέρουσας και, τρόπον τινά, επίπονης διαδικασίας που έχει ως βασικό στόχο την εμβάθυνση του στο πλούσιο αυτό επιστημονικό πεδίο, αλλά και την ομαλή μετάβασή του στους κόλπους της ερευνητικής κοινότητας. Στην διαδικασία αυτή περιλαμβάνεται, όπως αντιλήφθηκα έχοντας πλέον ολοκληρώσει την παρούσα διπλωματική εργασία, η αδιαπραγμάτευτη παιδεία του υποψήφιου ερευνητή τόσο στην κουλτούρα της Αστροφυσικής, όσο και στην αντίληψη της αδιάκοπης ενασχόλησης με μία δυναμικά εξελισσόμενη επιστήμη. Η πορεία αυτή προς την επιστημονική ενηλικίωση συντελείται συχνά, δυστυχώς, κάτω από αντίξοες συνθήκες, εντός και εκτός των ακαδημαϊκών τειχών, και δυσχερείς οικονομικές συγκυρίες για την πλειονότητα των φοιτητών. Γίνεται, λοιπόν, εύκολα αντιληπτό ότι μία προσπάθεια με τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι καταδικασμένη σε αποτυχία χωρίς τον συνδυασμό προσωπικού μόχθου και στήριξης από ανθρώπους του προσωπικού, αλλά και του ερευνητικού/ακαδημαϊκού περιβάλλοντος του εκάστοτε φοιτητή. Με αφορμή την επιτυχή ολοκλήρωση της δικής μου προσπάθειας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους εκείνους που την κατέστησαν εφικτή.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου χωρίς την αμέριστη, πολύπλευρη στήριξη της οποίας, δεν θα υπήρχε συνέχεια στις σπουδές μου. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στην κ. Γεωργία Τσιροπούλα, Δευθύντρια Ερευνών του Ινστιτούτου Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης για την ευκαιρία που μου παρείχε να εργαστώ σε ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον επιστημονικό πρόγραμμα, αλλά και για την μαεστρική καθοδήγηση της, χάρη στην οποία κατάφερα να ολοκληρώσω και τα δύο σκέλη της εργασίας μου. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στον κ. Κώστα Τζιότζιου, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του Ινστιτούτου Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης, για τις εμπειριστατωμένες και εύστοχες παρατηρήσεις του, οι οποίες ενίσχυσαν το επίπεδο της εργασίας σε όλους τομείς, αλλά και για την ειλικρινή προθυμία του να συζητήσει μαζί μου, και να διαλευκάνει σε πολλές περιπτώσεις, πληθώρα ζητημάτων της

Αστροφυσικής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον κ. Γαζέα Κοσμά, Λέκτορα του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, για την συνεχή στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών, αλλά και για τις πολύτιμες συμβουλές του, οι οποίες συνέβαλαν τα μέγιστα τόσο στην επιτυχή εκτέλεση των παρατηρήσεων, όσο και στην περάτωση της εργασίας.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την αναβάθμιση της λήψης συνοπτικών ηλιακών παρατηρήσεων που πραγματοποιούνται στο *Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ)* στο πλαίσιο του έργου *ΚΡΗΠΙΣ/ΠΡΟΤΕΑΣ* και τη μελέτη της απόκρισης της ιονόσφαιρας στα εκρηκτικά ηλιακά γεγονότα του Σεπτεμβρίου του 2017. Περιλαμβάνει τρία εισαγωγικά κεφάλαια γενικών θεωρητικών στοιχείων που αφορούν στα παραπάνω ζητήματα και δύο μέρη επεξεργασίας και δεδομένων. Το Μέρος I αφορά το πρώτο σκέλος και το Μέρος II το δεύτερο.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά του Ήλιου. Περιγράφεται η εσωτερική (πυρήνας, ζώνη ακτινοβολίας, ζώνη μεταφοράς) και η εξωτερική (ηλιακή ατμόσφαιρα: φωτόσφαιρα, χρωμόσφαιρα, μεταβατική περιοχή, στέμμα) δομή του και γίνεται σύντομη περιγραφή του *ενδεκαετούς κύκλου*. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα κύρια εκρηκτικά φαινόμενα που παρουσιάζει (εκλάμψεις, εκτινάξεις στεμματικής μάζας ή CMEs, συμβάντα ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων ή SEPs) κυρίως κατά την περίοδο έντονης δραστηριότητάς του, τα οποία παρουσιάζουν πολυποίκιλες επιδράσεις στη γήινη ιονόσφαιρα.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται εκτενής αναφορά στα όργανα που χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση του Ήλιου, τόσο από επίγεια, όσο και από διαστημικά παρατηρητήρια. Στη συνέχεια παρουσιάζονται επίγειες εγκαταστάσεις τηλεσκοπίων υψηλής διακριτικής ικανότητας που λειτουργούν παγκοσμίως πραγματοποιώντας ηλιακές παρατηρήσεις, αλλά και ένας αριθμός σημαντικών διαστημικών αποστολών που λειτουργούν για τον ίδιο σκοπό.

Το **Κεφάλαιο 3** αφορά τις συνοπτικές παρατηρήσεις του Ήλιου. Παρουσιάζονται τα τηλεσκόπια επισκόπησης, τα οποία πραγματοποιούν τις παρατηρήσεις αυτές σε παγκόσμια κλίμακα είτε μεμονωμένα, είτε ως μέλη δικτύων (π.χ. *Global Ha Network*) ενώ γίνεται γενική περιγραφή των προϊόντων των παρατηρήσεων αυτών (δεδομένα, εικόνες, χάρτες κ.α.). Τέλος, αναπτύσσονται οι δράσεις του *ΙΑΑΔΕΤ* στο πεδίο των συνοπτικών ηλιακών παρατηρήσεων και το ευρύτερο πλαίσιο παρακαλούθησης και πρόγνωσης του διαστημικού καιρού, στο οποίο εντάσσονται οι δράσεις αυτές.

Το **Κεφάλαιο 4** (Μέρος I) περιέχει την περιγραφή των συνοπτικών ηλιακών παρατηρήσεων που πραγματοποιούνται με το τηλεσκόπιο του ΙΑΑΔΕΤ. Περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται (οπτικό σύστημα και κάμερα CCD), το πρωτόκολλο λήψης παρατηρήσεων που ακολουθείται και οι διορθώσεις που εκτελούνται μετά το πέρας τους. Οι παρατηρήσεις περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την προετοιμασία των εγκαταστάσεων (θόλος), τη διαδικασία εντοπισμού του κέντρου της γραμμής Ηα και την επιλογή κατάλληλων χρόνων έκθεσης ανάλογα με τις συνθήκες (καιρικές συνθήκες, συνθήκες φωτισμού κ.α.) και τον τύπο παρατήρησης (πλήρους δίσκου ή περιοχών ενδιαφέροντος). Ακολουθεί περιγραφή των τεχνικών επεξεργασίας (ανάδειξη φαινομένων χείλους, ενίσχυση ευκρίνειας χρωμοσφαιρικών φαινομένων του ηλιακού δίσκου) και των διορθώσεων (επίπεδου πεδίου, ρεύματος σκότους κ.α.) που εκτελούνται σε κάθε περίπτωση.

Το Μέρος II αποτελείται από δύο κεφάλαια. Στο **5ο Κεφάλαιο** γίνεται περιγραφή της ιονόσφαιρας ως προς τη δομή και τη θέση της στη γήινη ατμόσφαιρα, ενώ γίνεται περιγραφή βασικών ιονοσφαιρικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και τη μελέτη της συμπεριφοράς της. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την περιγραφή φαινομένων της σύζευξης ιονόσφαιρας-Ήλιου.

Το **Κεφάλαιο 6** είναι το δεύτερο του Μέρους II. Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει τη γενική περιγραφή/επισκόπηση των εκρηκτικών ηλιακών γεγονότων του Σεπτεμβρίου 2017, κυρίως, όπως καταγράφηκαν από τους ανιχνευτές των διαστημικών αποστολών GOES, ACE, Wind και DSCVR, σε απόσταση $\sim 1 AU$ από τον Ήλιο. Στη συνέχεια περιγράφονται οι πηγές δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν (στις οποίες περιλαμβάνονται και οι παραπάνω δορυφόροι) για την ανάλυσή μας. Η ανάλυση περιλαμβάνει την επίδραση των εκρηκτικών γεγονότων του Σεπτεμβρίου 2017 στο γεωδιάστημα μέσω της μελέτης γραφημάτων ροής ακτινοβολίας ακτίνων-X, ροής ιόντων, ροής EUV και παραμέτρων του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου IMF. Στη συνέχεια, η επίδραση αυτή μελετάται για την ιονόσφαιρα πάνω από την περιοχή της Ευρώπης ως προς τη συμπεριφορά της *ολικής περιεκτικότητας ηλεκτρονίων TEC*, αλλά και άλλων σημαντικών ιονοσφαιρικών παραμέτρων (*foF2*, *MUF3000*, *fmin*).

This thesis presents the general operational upgrade of the solar telescope maintained in the *Institute for Astronomy, Astrophysics, Space Applications and Remote Sensing (IAASARS)*, which is dedicated to synoptic observations of the Sun and funded from the *KRIPIS/PROTEAS* project. Additionally, a case study of the response of the Earth's ionosphere, mainly above Europe, to the solar eruptive events of September 2017 is presented. In the first three introductory chapters the general theoretical framework of the prementioned subjects is described. This description is followed by two parts of data reduction, analysis and study of the science case.

The **first chapter** presents several main properties of the Sun as well as its internal (core, radiative zone, convective zone) and external (solar atmosphere: photosphere, chromosphere, transition region, solar corona) structure followed by a brief description of the 11-year *solar cycle*. Subsequently, the main solar eruptive phenomena (flares, coronal mass ejections or CMEs, solar particle events or SEPs) are described along with their impact on the Earth's ionosphere.

The **second chapter** is dedicated to an extensive description of the basic instruments used for solar observations from both ground-based and space observatories. Furthermore, a number of ground based high resolution solar telescopes is presented, along with the most important space missions that provide high quality solar data.

The **third chapter** contains a presentation of synoptic solar observations, which includes the patrol solar telescopes used for that purpose in a global scale, as standalone observatories or part of networks (e.g. *Global H α Network*), and the products of these observations that are publicly available (raw data, solar images, synoptic maps, etc.). Finally, the latest contributions of the IAASARS in the field of solar synoptic observations are discussed.

The **fourth chapter** describes the process of solar synoptic observations performed in the IAASARS. Firstly, the equipment used for these observations is described along with the necessary corrections performed in the original data. The process includes the preparation of the dome, where the equipment is maintained, the determination of the filter location that provides observations in the center of the H α absorption line and the selection of optimum exposure times, given the environmental conditions (weather

conditions, light conditions, etc.) and the type of observation (full disk or region of interest observations). The presentation concludes with a description of the image processing techniques (enhancement of limb and chromospheric phenomena) and corrections (flat field, dark current etc.) performed in the original raw data, in each case.

Part II includes two chapters. In the **fifth chapter** the basic properties of the ionosphere are presented, in terms of general structure and location in the Earth's atmosphere, as well as the critical parameters used in ionospheric studies. The chapter concludes with a description of the interaction between the Sun (referring mainly in the solar eruptive events) and the ionosphere of the Earth.

The **sixth chapter** is the second of Part II. This chapter includes the general presentation of the solar eruptive events of September 2017, mainly as detected by the instruments of several space missions such as GOES, ACE and DSCVR, in the distance of $\sim 1 AU$ from the Sun and the data sources used for the analysis (prementioned space missions included). The analysis concentrates firstly in the response of the geospace to the eruptive events by inspection of the X-ray, EUV and proton flux graphs and the parameters of the Interplanetary Magnetic Field (IMF). Finally, the response of the ionosphere in these events is studied in terms of the *Total Electron Content (TEC)* and other significant ionospheric parameters (*fmin*, *foF2* and *MUF3000*).

In the **seventh** and final chapter the most significant results from both parts of the thesis are summarized and several conclusions are discussed.

| | |
|--|------------|
| Ευχαριστίες | i |
| Περίληψη | iii |
| Abstract | v |
| 1 Ο Ήλιος | 1 |
| 1.1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.2 Χαρακτηριστικά του Ήλιου | 2 |
| 1.3 Η δομή του Ήλιου | 3 |
| 1.3.1 Το εσωτερικό του Ήλιου | 3 |
| 1.3.2 Η ηλιακή ατμόσφαιρα | 5 |
| 1.4 Ο ενδεκαετής ηλιακός κύκλος | 7 |
| 1.5 Εκρηκτικά φαινόμενα στον Ήλιο | 9 |
| 1.5.1 Ηλιακές εκλάμψεις | 10 |
| 1.5.2 Εκτινάξεις στεμματικής μάζας (CMEs) | 12 |
| 1.5.3 Ηλιακά ενεργητικά σωματίδια | 14 |
| 2 Παρατηρήσεις του Ήλιου με επίγεια και διαστημικά τηλεσκόπια | 17 |
| 2.1 Εισαγωγή | 17 |
| 2.2 Ηλιακά όργανα | 17 |
| 2.2.1 Βοηθητικά εξαρτήματα οπτικών διατάξεων | 17 |
| 2.2.2 Πρίσματα και φίλτρα | 19 |
| 2.2.3 Φασματογράφοι και Φασματοηλιογράφοι | 21 |
| 2.2.4 Στεμματογράφοι | 22 |
| 2.3 Τηλεσκόπια υψηλής διακριτικής ικανότητας | 23 |
| 2.4 Διαστημικά τηλεσκόπια | 28 |
| 3 Συνοπτικές παρατηρήσεις του Ήλιου | 33 |
| 3.1 Εισαγωγή | 33 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.2 | Τηλεσκόπια επισκόπησης (patrol) | 34 |
| 3.3 | Συνοπτικές παρατηρήσεις του Ήλιου | 37 |
| 3.4 | Σπουδαιότητα συνοπτικών παρατηρήσεων | 41 |
| 3.5 | Συνοπτικές παρατηρήσεις του Ήλιου στο ΙΑΑΔΕΤ του ΕΑΑ: το δίκτυο ιονοσφαιρικών σταθμών DIAS και ο Helioserver | 42 |
| I Αναβάθμιση της λειτουργίας του ηλιακού τηλεσκοπίου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, λήψη ηλιακών παρατηρήσεων και ενσωμάτωσή τους στον HELIOSERVER | | 47 |
| 4 Ηλιακές παρατηρήσεις στο ΙΑΑΔΕΤ του ΕΑΑ, διορθώσεις και ενσωμάτωσή τους στον HELIOSERVER | | 49 |
| 4.1 | Εξοπλισμός για τη λήψη συνοπτικών παρατηρήσεων του Ήλιου στο ΙΑΑΔΕΤ | 49 |
| 4.1.1 | Ηλιακό τηλεσκόπιο | 49 |
| 4.1.2 | Κάμερα | 52 |
| 4.2 | Παρατηρήσεις | 52 |
| 4.2.1 | Εντοπισμός του κέντρου της γραμμής Ηα | 55 |
| 4.2.2 | Παρατηρήσεις πλήρους ηλιακού δίσκου | 56 |
| 4.2.3 | Παρατηρήσεις περιοχών ενδιαφέροντος | 57 |
| 4.3 | Σφάλματα και διορθώσεις | 58 |
| 4.3.1 | Διορθώσεις δεδομένων πλήρους δίσκου | 58 |
| 4.3.2 | Ανάδειξη ηλιακών φαινομένων | 63 |
| 4.3.3 | Διορθώσεις δεδομένων περιοχών ενδιαφέροντος | 63 |
| II Μελέτη της απόκρισης της ιονόσφαιρας σε εκρηκτικά ηλιακά φαινόμενα | | 65 |
| 5 Ιονόσφαιρα | | 67 |
| 5.1 | Εισαγωγή | 67 |
| 5.2 | Δομή της ιονόσφαιρας | 68 |
| 5.3 | Παράμετροι της ιονόσφαιρας | 71 |
| 5.4 | Σύζευξη ιονόσφαιρας-Ήλιου | 75 |
| 6 Απόκριση της Ιονόσφαιρας στα εκρηκτικά ηλιακά γεγονότα του Σεπτεμβρίου 2017 | | 79 |
| 6.1 | Εκρηκτικά ηλιακά γεγονότα του Σεπτεμβρίου του 2017 | 79 |
| 6.2 | Πηγές δεδομένων για τη μελέτη μας | 83 |
| 6.3 | Επιδράσεις των εκρηκτικών ηλιακών γεγονότων του Σεπτεμβρίου 2017 στο γεωδιάστημα | 85 |
| 6.3.1 | Απόκριση της ιονόσφαιρας | 91 |

| | | |
|-----------|------------------------|------------|
| 6.4 | Συμπεράσματα | 108 |
| 7 | Σύνοψη | 111 |
| A' | Κώδικες IDL | 115 |
| B' | Βιβλιογραφία | 123 |

1.1 Εισαγωγή

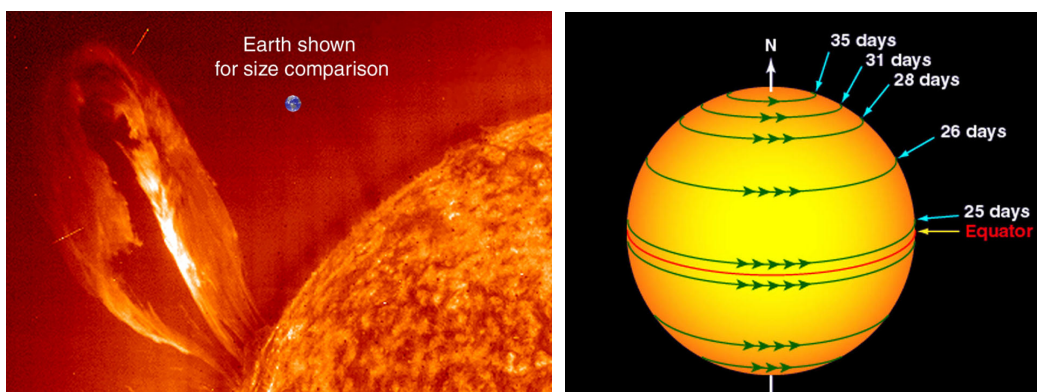
Ο Ήλιος δεν είναι παρά ένας από τους δισεκατομμύρια αστέρες που κοσμούν με τη λαμπρότητά τους το, κατά τα άλλα, σκοτεινό, αφιλόξενο και αχανές Σύμπαν. Όμως, ο φαινομενικά ασήμαντος αυτός αστέρας, λειτουργεί για τον άνθρωπο ως μία ανεξάντλητη πηγή, της απαραίτητης για την επιβίωσή του πάνω στη Γη, ενέργειας. Το γεγονός αυτό είχε καταστεί σαφές από την αρχαιότητα, καθώς, όπως γνωρίζουμε, ο Ήλιος λατρευόταν ως θεός και τα μυστηριώδη, για την εποχή, φαινόμενα που οφείλονταν σε αυτόν, λαμβάνονταν ως οιωνοί. Έτσι, ο Ήλιος εμφανίζεται ως θεότητα με διαφορετικά ονόματα στις μυθολογίες διαφόρων πολιτισμών της αρχαιότητας. Για τους Αιγυπτίους ήταν ο Άμμων-Ρα για τους Ασσύριους ο Βάαλ, για τους Πέρσες ο Μίθρας, ενώ για τους αρχαίους Έλληνες ήταν ο θεός Ήλιος. Πληθώρα φιλοσόφων και διανοητών του αρχαίου κόσμου αποπειράθηκε να τον μελετήσει και να ερμηνεύσει τη συμπεριφορά του. Ο Θαλής ο Μιλήσιος, ο οποίος εισήγαγε πρώτος την έννοια της Έκλειψης του Ήλιου, ο Αναξίμανδρος, που υποστήριζε ότι ο Ήλιος είναι αυτόφωτο αντικείμενο και κατασκεύαζε ηλιακά ρολόγια και ο Αρίσταρχος ο Σάμιος, που παρουσίασε το ηλιοκεντρικό σύστημα, το οποίο εκτόπιζε τη Γη από το κέντρο της δημιουργίας, αποτελούν μερικά μόνο παραδείγματα τέτοιων μελετών.

Στη σύγχρονη αστρονομία και την αστροφυσική, συναντά κανείς ειδικό κλάδο, ο οποίος παρατηρεί και μελετά ανελλιπώς τον Ήλιο και τη συμπεριφορά του. Η Ηλιακή Φυσική μελετά, μεταξύ άλλων, φαινόμενα που σχετίζονται με το εσωτερικό του Ήλιου και τις διάφορες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα εκεί, τη συμπεριφορά της ηλιακής ατμόσφαιρας και την επίδρασή της στη γήινη ατμόσφαιρα, αλλά και στην ίδια τη ζωή πάνω στη Γη. Επιπλέον, ο Ήλιος, όντας ο πλησιέστερος σε εμάς εκπρόσωπος των πολυάριθμων αστρικών δομών του Σύμπαντος, λειτουργεί ως πρότυπο σύμφωνα με το οποίο μπορούμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά τους. Τέλος, ο Ήλιος είναι το ισχυρότερο εργαστήριο παραγωγής της τέταρτης, και πλέον άφθονης στο Σύμπαν, κατάστασης της ύλης, δηλαδή του πλάσματος,

στο ηλιακό σύστημα, παρέχοντας μας τη δυνατότητα να την μελετήσουμε, να την κατανοήσουμε και εν τέλει να επιχειρήσουμε την παραγωγή της σε επίγεια εργαστήρια.

1.2 Χαρακτηριστικά του Ήλιου

Ο Ήλιος είναι ένα τυπικό δείγμα αστέρα της Κύριας Ακολουθίας, ο οποίος εντάσσεται στο διάγραμμα Hertzsprung-Russell με φασματικό τύπο G2V και επιφανειακή θερμοκρασία $T_{eff} = 5780 \text{ K}$. Απέχει από το κέντρο του Γαλαξία ~ 26.000 έτη φωτός, ενώ εντοπίζεται στη σπείρα του Ωρίωνα. Αν ληφθεί υπόψιν η σημερινή του περιεκτικότητα σε υδρογόνο (75%) και δεδομένου ότι γνωρίζουμε το ρυθμό καύσης του, η ηλικία του εκτιμάται σε $\sim 4,5 \cdot 10^9$ έτη. Η απόστασή του από τη Γη κυμαίνεται μεταξύ $\sim 146 \cdot 10^6 \text{ km}$ (η Γη στο περιήλιο) και $\sim 152 \cdot 10^6 \text{ km}$ (η Γη στο αφήλιο), με μέση απόσταση, από την οποία ορίζεται και η *Αστρονομική Μονάδα* (*Astronomical Unit - AU*), $1 \text{ AU} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$. Η φαινόμενη διάμετρος του Ήλιου κυμαίνεται μεταξύ $32,58'$ (η Γη στο περιήλιο) και $31,51'$ (η Γη στο αφήλιο), με μέση τιμή $\sim 32'$, η πραγματική του ακτίνα υπολογίζεται σε $R_{\odot} = 696 \cdot 10^3 \text{ km}$ (συγκριτικά, η μέση γήινη ακτίνα είναι $R_{\oplus} = 6371 \text{ km}$, Σχήμα 1.1). Η μάζα του έχει τιμή $M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{33} \text{ g}$, ξεπερνώντας κατά ~ 333.000 φορές εκείνη της Γης και η μέση πυκνότητά του είναι $\bar{\rho}_{\odot} = 1,41 \text{ g/cm}^3$, ενώ ο όγκος του ξεπερνάει εκείνον του πλανήτη μας κατά $13 \cdot 10^6$ φορές. Με βάση τα παραπάνω, η επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνειά του υπολογίζεται σε $g_{\odot} = 2,74 \cdot 10^4 \text{ cm/s}^2$. Η αεριώδης φύση του Ήλιου, ο οποίος αποτελείται κατά 99% από πλάσμα, έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζει *διαφορική περιστροφή* κατά ηλιογραφικό πλάτος. Ως εκ τούτου, η τιμή της γωνιακής ταχύτητάς της είναι μεγαλύτερη στον ισημερινό από ότι στους πόλους και δίνεται από την εμπειρική σχέση $\Omega(\varphi) = \Omega_{eq}(1 - 0,206 \sin^2 \varphi)$, όπου φ το ηλιογραφικό πλάτος και $\Omega_{eq} = 14,38^{\circ}/\text{day}$ η γωνιακή ταχύτητα στον ισημερινό. Έτσι, στον ισημερινό έχουμε περίοδο της τάξης των 25 ημερών (γραμμική ταχύτητα ιδιοπεριστροφής $\sim 1,9 \text{ km/s}$), ενώ στους πόλους η περίοδος λαμβάνει τιμή της τάξης



Σχήμα 1.1: **Αριστερά:** Η απεικόνιση σε κλίμακα, της Γης σε σχέση με τον Ήλιο. **Δεξιά:** Απεικόνιση της διαφορικής περιστροφής του Ήλιου, όπου φαίνεται η μεταβολή της περιόδου ιδιοπεριστροφής κατά ηλιογραφικό πλάτος (www.nasa.gov).

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά του Ήλιου.

| Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα μέτρησης | Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα μέτρησης |
|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| R_{\odot} | $696 \cdot 10^3$ | km | M_{\odot} | $1,99 \cdot 10^{33}$ | g |
| $\bar{\rho}_{\odot}$ | 1,41 | cm/s ² | g_{\odot} | $2,74 \cdot 10^4$ | cm/s ² |
| L_{\odot} | $3,86 \cdot 10^{33}$ | erg/s · cm ⁻² | F_{\odot} | $6,34 \cdot 10^{10}$ | erg/s · cm ⁻² |
| T_{eff} | 5780 | K | Φασματικός τύπος: | | G2V |
| m_V | -26,73 | mag | M_V | 4,84 | mag |

των 35 ημερών (Σχήμα 1.1). Η φωτεινότητα του Ήλιου είναι $L_{\odot} = 3,86 \cdot 10^{33}$ erg/s και η ολική (για όλα μήκη κύματος και όλες τις γωνίες) επιφανειακή ροή ακτινοβολίας (επιφανειακή λαμπρότητα) του Ήλιου είναι $F_{\odot} = L_{\odot}/(4\pi R_{\odot}^2) = 6,34 \cdot 10^{10}$ erg/s · cm⁻², η οποία σε συνδυασμό με τον νόμο των Stefan-Boltzmann ($F_{\odot} = \sigma T_{eff}^4$) μας δίνει την ενεργό θερμοκρασία (T_{eff}). Με τη χρήση των παραπάνω τιμών μπορούμε να εξάγουμε το φαινόμενο μέγεθος του Ήλιου (μέσω της σχέσης του Pogson), που είναι $-26,73$ mag, ενώ το απόλυτο μέγεθος του προκύπτει $4,84$ mag. Τελικά, στη γήινη ατμόσφαιρα φτάνει η ολοκληρωμένη σε όλα τα μήκη κύματος ροή ακτινοβολίας $S = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda = 1,36 \cdot 10^6$ erg/cm²/s $\simeq 1,3 \cdot 10^3$ Watt/m² η οποία ονομάζεται *ηλιακή σταθερά*.¹ Τα βασικά χαρακτηριστικά του Ήλιου συγκεντρώνονται στον Πίνακα 1.1.

1.3 Η δομή του Ήλιου

Ο Ήλιος αποτελείται από δύο βασικές περιοχές: το εσωτερικό και την ατμόσφαιρα. Παρ' όλο που είναι δύσκολο να προσδιορίσει κανείς τα ακριβή σημεία μετάβασης, μπορεί προσεγγιστικά να διαχωρίσει το εσωτερικό και την ηλιακή ατμόσφαιρα σε φλοιούς.

1.3.1 Το εσωτερικό του Ήλιου

Το εσωτερικό του Ήλιου παρουσιάζει μια διαστρωμάτωση, η οποία, εκκινώντας από το κέντρο συνοψίζεται ως εξής (Σχήμα 1.2):

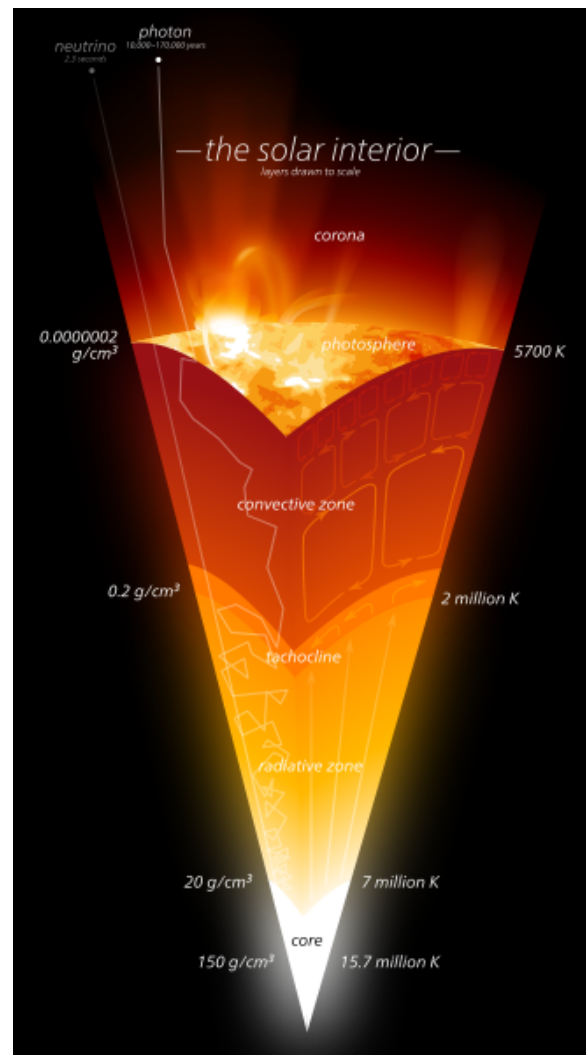
- Πυρήνας (core)
- Ζώνη Ακτινοβολίας (radiative core)
- Ζώνη μεταφοράς (convective zone)

¹ Παρά την ονομασία της, η τιμή της μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή, τον τόπο μέτρησης και την κατάσταση της ατμόσφαιρας, ενώ παρουσιάζει διακυμάνσεις και σε ευρύτερες χρονικές περιόδους

Ο **πυρήνας** είναι η κεντρική περιοχή του Ήλιου, η οποία περιέχει $\sim 10\%$ της μάζας του και εκτείνεται σε ακτίνα $\sim 0,25R_{\odot}$. Εντός της ακτίνας αυτής, λαμβάνει χώρα η πυρηνική σύντηξη και παράγεται το συντριπτικό μέρος της ηλιακής ενέργειας. Η πυκνότητα που επικρατεί είναι πολύ υψηλή ώστε να μπορεί να είναι εφικτή η μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο και αγγίζει τα 150 g/cm^3 , ενώ η θερμοκρασία είναι $\sim 15 \cdot 10^6 \text{ K}$ και η πίεση $\sim 1,3 \cdot 10^{11} \text{ atm}$. Οι δύο βασικές πυρηνικές αντιδράσεις μετατροπής του υδρογόνου σε ήλιο, είναι οι κύκλοι *πρωτονίου-πρωτονίου* και *άνθρακα*. Ο πρώτος κύκλος είναι ο συνηθέστερος και παράγει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του πυρήνα (99%), μέσω της μετατροπής τεσσάρων πρωτονίων (^1H) σε έναν πυρήνα ηλίου (^4He).

Η **ζώνη ακτινοβολίας** είναι το μεγαλύτερο στρώμα του εσωτερικού του Ήλιου και εκτείνεται μεταξύ $0,25R_{\odot}$ και $0,7R_{\odot}$. Η παραγόμενη από τον πυρήνα ενέργεια διαδίδεται στη ζώνη ακτινοβολίας, όπου παραμένει για 170.000 έτη προτού διαφύγει. Οι θερμοκρασίες που επικρατούν είναι της τάξης $8 \cdot 10^6 \text{ K}$ και η πυκνότητα κυμαίνεται στο εύρος $20-0,2 \text{ g/cm}^3$ καθώς κατευθυνόμαστε προς τη ζώνη μεταφοράς. Τα προερχόμενα από τον πυρήνα φωτόνια υπόκεινται σε διαδοχικές σκεδάσεις λόγω της υψηλής πυκνότητας που επικρατεί, σε μία διαδικασία που ονομάζεται *τυχαίος βηματισμός (random walk)*. Λόγω της διαδικασίας αυτής, το φωτόνιο παραμένει στη ζώνη ακτινοβολίας $\sim 10^6$ έτη προτού διαφύγει.

Η **ζώνη μεταφοράς** είναι το στρώμα στο οποίο εισέρχεται η ακτινοβολία αφότου δραπετεύσει από τη ζώνη ακτινοβολίας. Ο φλοιός αυτός εκκινά από $\sim 0,7R_{\odot}$ και τελειώνει περίπου στην $1R_{\odot}$. Εδώ η ενέργεια διαδίδεται μέσω *ρευμάτων μεταφοράς* και η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά καθώς ανερχόμαστε προς την ηλιακή ατμόσφαιρα, από $\sim 10^6 \text{ K}$ μέχρι $\sim 5700 \text{ K}$. Οι πυκνότητες λαμβάνουν τιμές στο εύρος $0,2 \cdot 10^{-3} - 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^3$. Οι χαμηλότερες πυκνότητες και θερμοκρασίες που επικρατούν προκαλούν επανασύνδεση των ηλεκτρονίων, αυξάνοντας έτσι τη διαφάνεια του στρώματος. Τα θερμά ρεύματα της ζώνης μεταφοράς καταλήγουν στη φωτόσφαιρα όπου ψύχονται και επανεισέρχονται στη ζώνη μεταφοράς



Σχήμα 1.2: Η διαστρωμάτωση του εσωτερικού του Ήλιου.

από όπου λαμβάνουν εκ νέου ποσά θερμότητας και επαναλαμβάνουν την κίνηση. Αυτή είναι η προέλευση του φαινομένου της κοκκίασης (Σχήμα 1.2).

1.3.2 Η ηλιακή ατμόσφαιρα

Ως ατμόσφαιρα του Ήλιου θεωρούμε όλα εκείνα τα στρώματα τα οποία συνθέτουν τον φλοιό, ο οποίος έπεται της ζώνης μεταφοράς. Είναι η περιοχή από την οποία προέρχεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τα στρώματα αυτά είναι τα εξής (Σχήματα 1.3, 1.4):

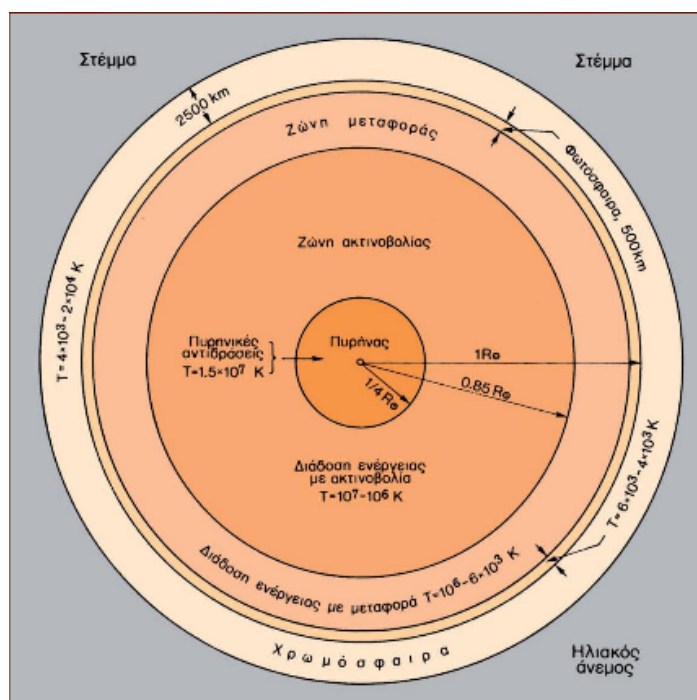
- Φωτόσφαιρα (Photosphere)
- Χρωμόσφαιρα (Chromosphere)
- Μεταβατική περιοχή (Transition region)
- Στέμμα (Corona)

Η φωτόσφαιρα έχει πάχος $\sim 550 \text{ km}$ και είναι το πρώτο στρώμα μετά το εσωτερικό του Ήλιου. Η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας είναι της τάξης των 5800 K και παρουσιάζει μέση πυκνότητα $\sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ g/cm}^3$. Από τη φωτόσφαιρα προέρχεται το συνεχές φάσμα ακτινοβολίας του Ήλιου, ενώ εδώ παρατηρούνται φαινόμενα όπως οι κηλίδες και η κοκκίαση (*granulation*, Σχήμα 1.4). Η φωτόσφαιρα συμπεριφέρεται ως μέλαν σώμα, δίνοντας συνεχές φάσμα εκπομπής, μέχρι τα ανώτερα στρώματα, όπου εμφανίζονται γραμμές απορρόφησης.

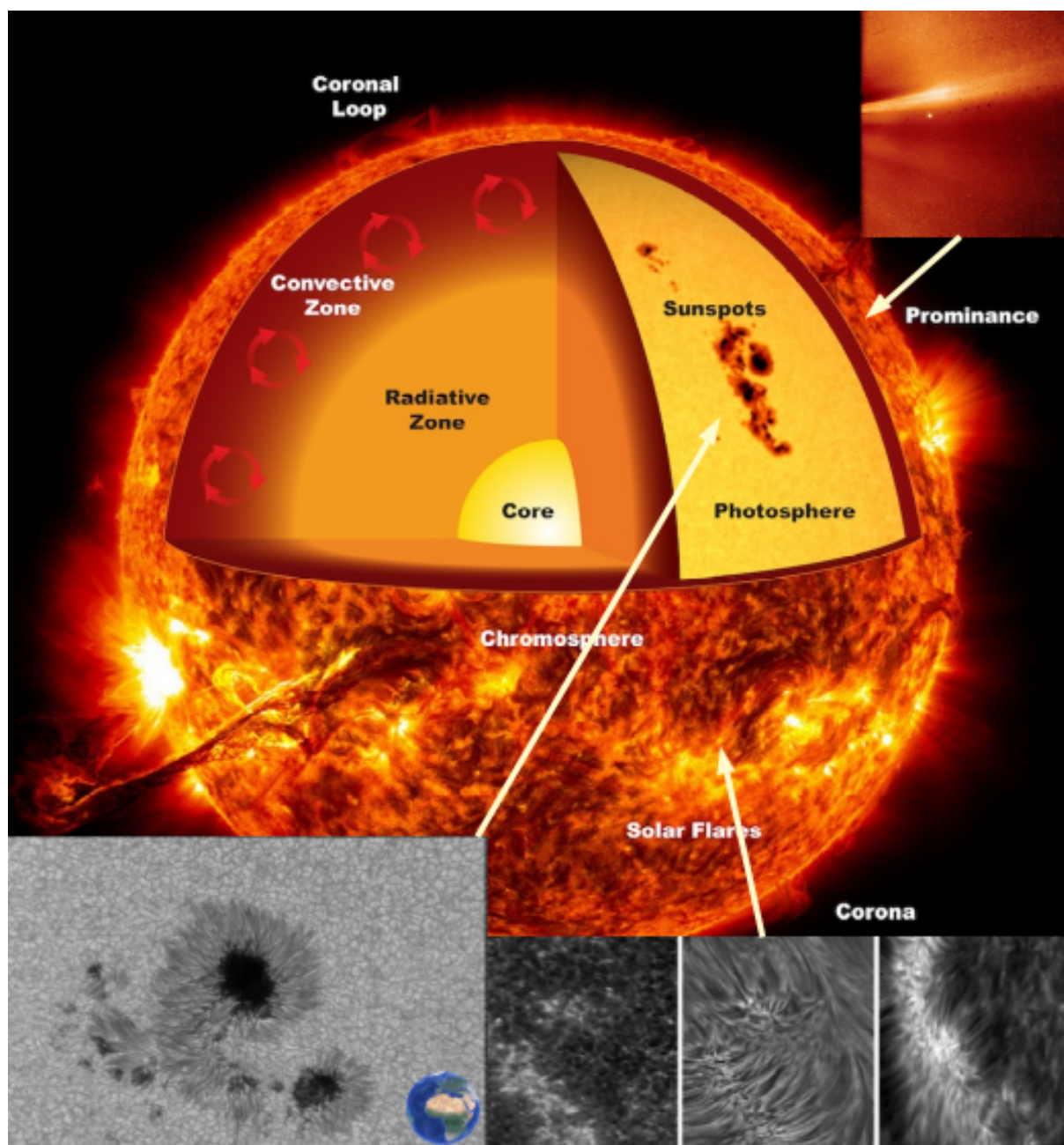
Η χρωμόσφαιρα έχει πάχος $\sim 2500 \text{ km}$, η θερμοκρασία αυξάνεται καθ' ύψος μεταξύ των τιμών 4500 K και 25.000 K περίπου και χαρακτηρίζεται από έντονα φαινόμενα. Η πυκνότητα της μειώνεται καθώς κινούμαστε προς το στέμμα με τιμές που κυμαίνονται από 10^{-7} g/cm^3 έως $2 \cdot 10^{-14} \text{ g/cm}^3$

περίπου. Η χρωμόσφαιρα είθιστα να παρατηρείται κυρίως στη φασματική γραμμή $\text{H}\alpha$ του υδρογόνου και στη γραμμή Ca II του ασβεστίου, οπότε και αναδεικνύονται πολλοί ενδιαφέροντες σχηματισμοί που εμφανίζονται στο στρώμα αυτό.

Η μεταβατική περιοχή εκτείνεται πέρα από τα όρια της χρωμόσφαιρας και παρεμβάλλεται μεταξύ αυτής και του στέμματος. Είναι ιδιαίτερα ανομοιογενής, έχει



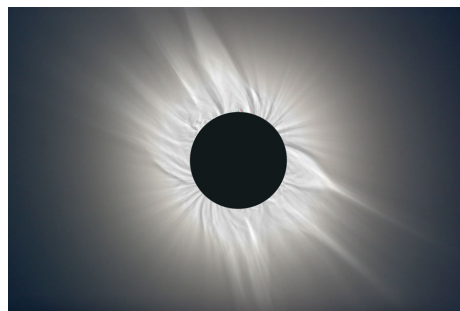
Σχήμα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση της δομής του Ήλιου και της ηλιακής ατμόσφαιρας (Αυγολούπη Σ.Ι., Σειραδάκη Ι.Χ., Παρατηρησιακή Αστρονομία, Εκδόσεις Πλανητάριο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2009).



Σχήμα 1.4: Απεικόνιση του εσωτερικού και της ατμόσφαιρας του Ήλιου. Διακρίνονται οι κηλίδες στο στρώμα της φωτόσφαιρας (spaceplace.nasa.gov). Κατά την μεγέθυνση περιοχών της φωτόσφαιρας και της χρωμόσφαιρας μπορεί να διακρίνει κανείς, **κάτω αριστερά:** τη σκιά και την παρασκιά μίας κηλίδας, σε σύγκριση μάλιστα με τη Γη, καθώς και το φαινόμενο της κοκκίασης στο υπόβαθρο (κηλίδες στην ενεργό περιοχή NOAA 11835, από παρατηρήσεις του τηλεσκοπίου GREGOR (Löhner-Böttcher, 2016). **Κάτω δεξιά:** σύγκριση περιοχών της χρωμόσφαιρας σε διαφορετικά μήκη κύματος. Από αριστερά προς τα δεξιά: Ca II 3968 Å, H α (Dutch Open telescope, Rutten, 2006), Ca II 8542 (Swedish Solar Telescope, De la Cruz Rodriguez, 2012). **Πάνω δεξιά:** Η πρώτη φωτογραφία που τραβήχτηκε ποτέ από το εσωτερικό του στέμματος από τη διαστημική αποστολή Parker Solar Probe το 2019 (www.nasa.gov).

πάχος $\sim 150 \text{ km}$ και παρουσιάζει απότομη άνοδο της θερμοκρασίας, καθώς πλησιάζουμε το στέμμα, ξεκινώντας από $\sim 10^4$ και φτάνοντας $\sim 10^6 \text{ K}$.

Το **στέμμα** του Ήλιου είναι το εξωτερικό στρώμα της Ηλιακής ατμόσφαιρας και ξεκινά περίπου 2400 km πάνω από τη χρωμόσφαιρα. Το στέμμα είναι πολύ αμυδρό με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να το παρατηρήσουμε παρά μόνο καλύπτοντας τον ηλιακό δίσκο με τη χρήση στεμματογράφων (coronographs, Σχήμα 1.5). Η πυκνότητα των ηλεκτρονίων μειώνεται καθ' ύψος από 10^{11} cm^{-3} έως 10^9 cm^{-3} και η θερμοκρασία του είναι $\sim 10^6 \text{ K}$. Το στέμμα παρατηρείται συχνά στις ακτίνες X, τα ραδιοκύματα και ενίοτε στο υπεριώδες, ενώ σε αντίθεση με τα υπόλοιπα στρώματα της ηλιακής ατμόσφαιρας παρουσιάζει ασαφή όρια και ανομοιογενή δομή. Η δομή αυτή είναι συνυφασμένη με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου και σε περιοχές όπου το στέμμα παρουσιάζει χαμηλές πυκνότητες, οι γραμμές αυτές είναι ανοικτές και εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις προτού κλείσουν. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται *στεμματικές οπές* (coronal holes).

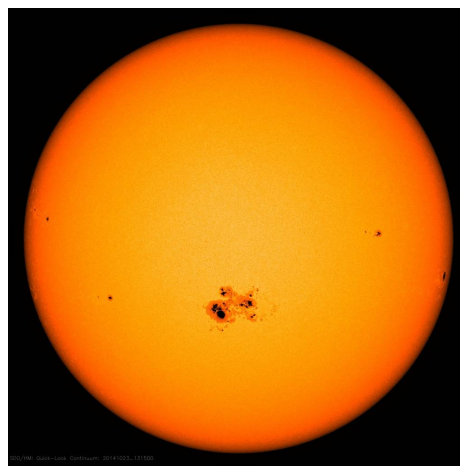


Σχήμα 1.5: Εικόνα του στέμματος από παρατηρήσεις ηλιακής έκλειψης.

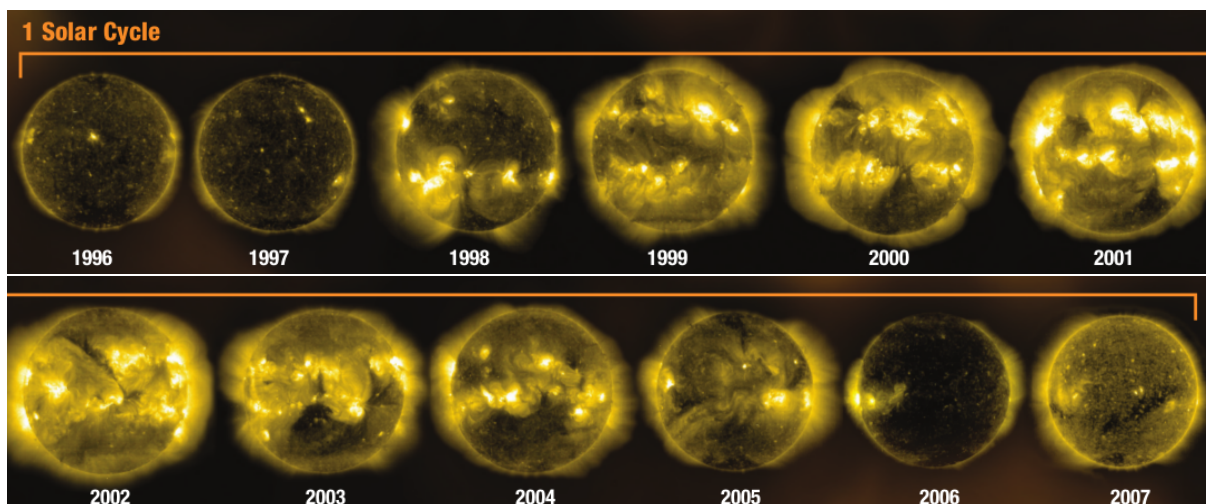
1.4 Ο ενδεκαετής ηλιακός κύκλος

Έπειτα από αιώνες ηλιακών παρατηρήσεων γνωρίζουμε ότι η ηλιακή δραστηριότητα παρουσιάζει μια περιοδικότητα. Η περιοδικότητα αυτή ουσιαστικά οφείλεται στο ηλιακό μαγνητικό πεδίο και τη συμπεριφορά του που γενικά καθορίζεται από τη λειτουργία ενός μεγάλης κλίμακας 'υδροδυναμικού δυναμό' (solar dynamo) στο εσωτερικό του σε συνδυασμό με την διαφορική περιστροφή του Ήλιου. Είναι δε συνυφασμένη κυρίως με τις *ηλιακές κηλίδες*, τη δυναμική και την εξέλιξή τους.

Οι ηλιακές κηλίδες είναι σκοτεινές περιοχές στον ηλιακό δίσκο (Σχήμα 1.6), οι οποίες παρουσιάζουν ισχυρά μαγνητικά πεδία με συμπιεσμένες μεταξύ τους μαγνητικές γραμμές. Αν και παρατηρήσεις κηλίδων έχουν καταγραφεί από τους ιστορικούς χρόνους, οι πρώτες συστηματικές παρατηρήσεις τους έγιναν μετά την ανακάλυψη του τηλεσκοπίου τον 17ο αιώνα και κυρίως μετά την ανακάλυψη της φωτογραφίας αιώνα τον 19ο αιώνα ενώ κατόπιν δεν άργησε να διαπιστωθεί η περιοδικότητα στην εμφάνισή τους. Με τη βοήθεια των



Σχήμα 1.6: Μία γιγαντιαία κηλίδα από παρατηρήσεις της διαστημικής αποστολής Solar Dynamics Observatory (SDO), της NASA (www.nasa.gov).

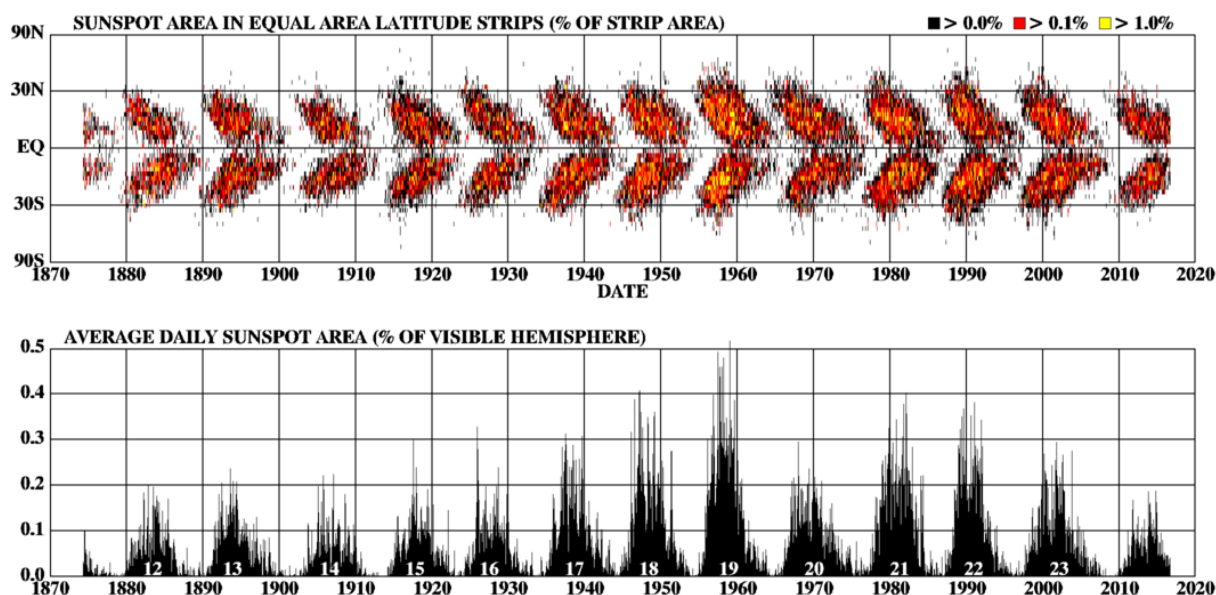


Σχήμα 1.7: Ένας πλήρης ηλιακός κύκλος από σύνθεση εικόνων του ηλιακού δίσκου της διαστημικής αποστολής Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), σε μήκος κύματος 284 Å. Διακρίνεται η έντονη ηλιακή δραστηριότητα στο ηλιακό μέγιστο του ενδεκαετούς κύκλου κατά τα έτη 2001-2002 (Butcher, Mysteries of the Sun, Nasa).

παρατηρήσεων αυτών, ο ηλιακός παρατηρητής Rudolf Wolf όρισε τον δείκτη:

$$R = k(10g + f) \quad (1.1)$$

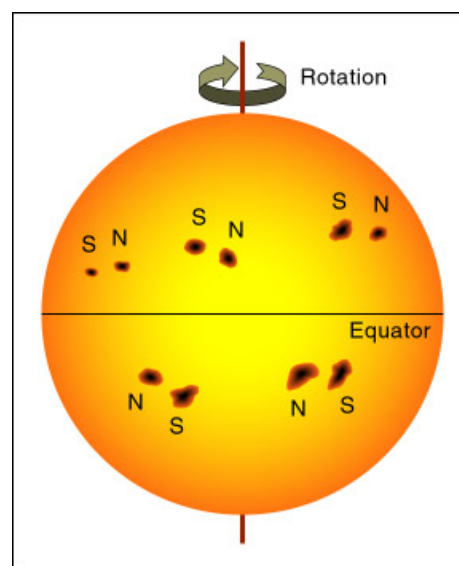
όπου g είναι ο αριθμός των ομάδων στον ηλιακό δίσκο, f ο αριθμός των κηλίδων και k ένας διορθωτικός παράγοντας. Έπειτα από παρατηρήσεις περίπου 400 ετών διαπιστώθηκε ότι οι ηλιακές κηλίδες εμφανίζουν, ως προς το πλήθος και τη θέση τους, *ενδεκαετή περιοδικότητα*. Ο μέγιστος αριθμός των κηλίδων, κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου σηματοδοτεί την περίοδο του *ηλιακού μέγιστου* (*solar maximum*), κατά την οποία ο Ήλιος εμφανίζει έντονη δραστηριότητα (Σχήμα



Σχήμα 1.8: **Επάνω:** διάγραμμα πεταλούδας που απεικονίζει τη θέση των κηλίδων κατά ηλιογραφικό πλάτος συναρτήσει του χρόνου για το χρονικό διάστημα 1874-2016. **Κάτω:** μέσο ημερήσιο εμβαδόν των κηλίδων σε ποσοστό επί της συνολικής επιφάνειας του ορατού ηλιακού δίσκου (solarscience.msfc.nasa.gov)

1.7) και εκρηκτικά φαινόμενα (πχ. εκλάμψεις και εκτινάξεις στεμματικής μάζας, βλ. §1.5), ενώ ο ελάχιστος αριθμός κηλίδων αντιπροσωπεύει την περίοδο του ηλιακού ελαχίστου (*solar minimum*) της ηλιακής δραστηριότητας. Η μέγιστη τιμή του αριθμού Wolf, αλλά και η διάρκεια των κύκλων διαφέρει από τον έναν κύκλο στον άλλον (Σχήμα 1.8). Ένα μέχρι και σήμερα ανεξήγητο γεγονός, που ελαβε χώρα την περίοδο 1640-1700, είναι το επονομαζόμενο ελάχιστο του Maunder, κατά το οποίο η ηλιακή δραστηριότητα ήταν μηδαμινή για αρκετό καιρό (με σχεδόν μηδενικό αριθμό κηλίδων) και συνδέθηκε, χωρίς να έχει επιστημονικά τεκμηριωθεί η πιθανή αλληλοεξάρτηση, με εκτεταμένη περίοδο ψύχους στη Γη. Συστηματικές παρατηρήσεις αρκετών ηλιακών κύκλων είχαν ως αποτέλεσμα την απεικόνιση της κατανομής του ηλιογραφικού πλάτους των κηλίδων ως συνάρτηση του χρόνου σε ένα γραφήμα που είναι γνωστό ως *διάγραμμα πεταλούδας* ή *διάγραμμα Maunder* (Σχήμα 1.8). Στο σχήμα διακρίνουμε την εμφάνιση των κηλίδων σε ηλιογραφικά πλάτη $\sim \pm 40^\circ$ κατά την έναρξη του εκάστοτε κύκλου και τη σταδιακή μετατόπισή τους προς τον ισημερινό του Ήλιου προς το τέλος.

Οι ηλιακές κηλίδες εμφανίζονται στα *κέντρα δράσης* (*active regions*) του Ήλιου, τα οποία χαρακτηρίζονται από έντονη ανάδυση μαγνητικής ροής από το εσωτερικό του και επομένως συγκεντρώσεις ισχυρών μαγνητικών πεδίων σε σχέση με τον *ήρεμο ήλιο* (*quiete Sun*) που τα περιβάλλει. Εμφανίζονται δε συνήθως σε ζεύγη, την *ηγούμενη* και *επόμενη* σε σχέση με την ηλιακή περιστροφή, καθώς οπτικά αντιπροσωπεύουν τις δύο τομές ενός αναδυόμενου καμπυλομένου μαγνητικού σωλήνα ροής (*flux rope*) με την ηλιακή επιφάνεια. Από τη συστηματική μελέτη του μαγνητικού πεδίου των κέντρων δράσης, εξήχθη το συμπέρασμα ότι ο προσανατολισμός του διπολικού μαγνητικού πεδίου ενός ζεύγους κηλίδων είναι συνήθως ίδιος για όλα τα ζεύγη του ίδιου ημισφαιρίου (Σχήμα 1.9). Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι ο προσανατολισμός αυτός, όπως και όλου του ηλιακού μαγνητικού πεδίου, αναστρέφεται κατά τον επόμενο κύκλο, με αποτέλεσμα την επαναφορά στην αρχική κατάσταση μετά το πέρας δύο ενδεκαετών κύκλων. Για τον λόγο αυτόν, πολλές φορές ως ηλιακός κύκλος ορίζεται η περίοδος αυτή των 22 ετών, που χαρακτηρίζει τον λεγόμενο μαγνητικό κύκλο.



Σχήμα 1.9: Σχηματική αναπαράσταση των πολικότητων ηλιακών κηλίδων στα δύο ημισφαίρια του Ήλιου (lifeng.lamost.org).

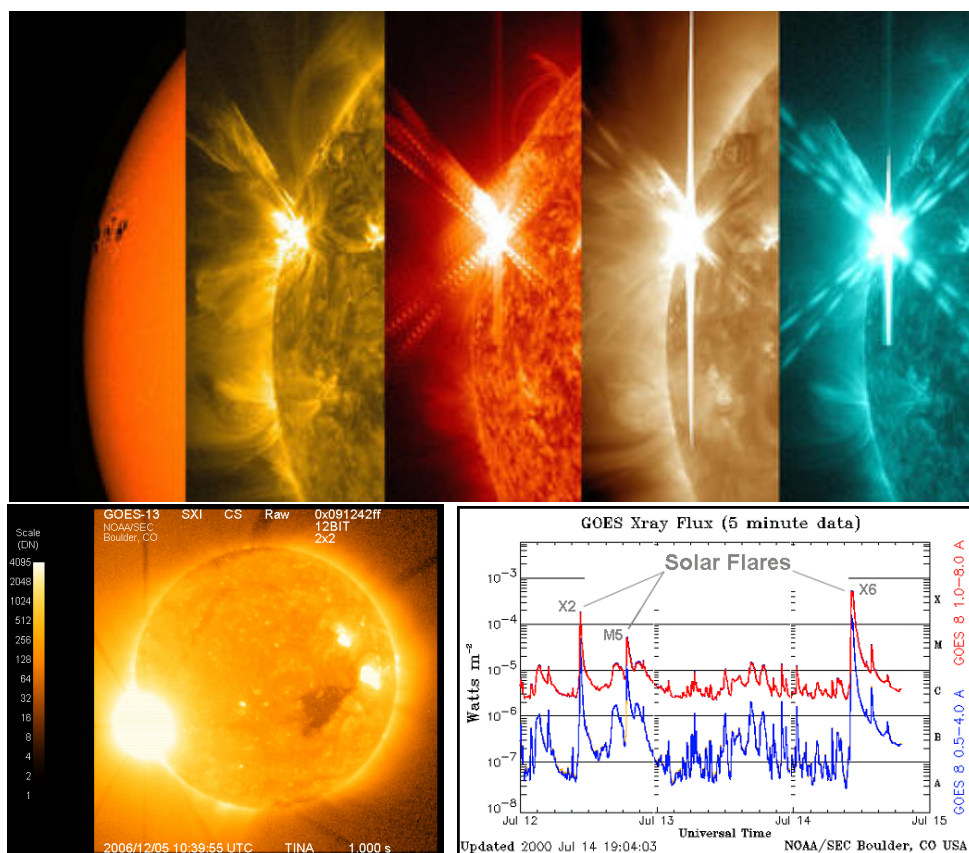
1.5 Εκρηκτικά φαινόμενα στον Ήλιο

Ο Ήλιος κατά τη διάρκεια του 11-ετούς κύκλου παρουσιάζει περιόδους αυξημένης δραστηριότητας. Η έντονη αυτή δραστηριότητα εκδηλώνεται με παροδικά

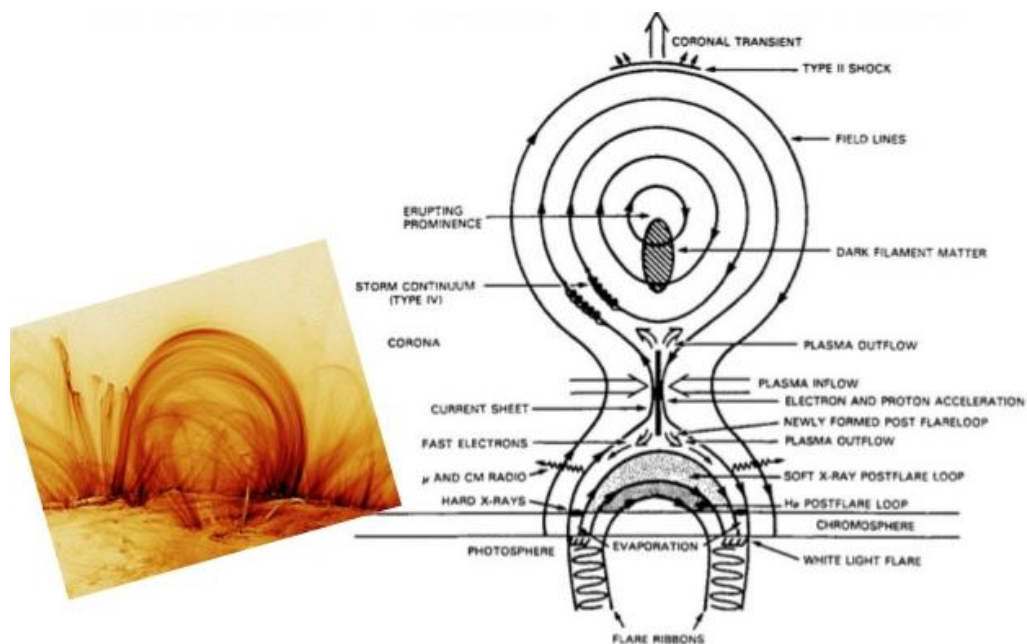
φαινόμενα, σχετικά μικρής διάρκειας, κατά τα οποία απελευθερώνονται υψηλά ποσά ενέργειας, μάζας, ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ενεργητικών σωματιδίων. Τα τρία κυριότερα φαινόμενα της εκρηκτικής αυτής ηλιακής δραστηριότητας είναι **(α)** οι ηλιακές εκλάμψεις (*solar flares*), **(β)** οι εκτινάξεις στεμματικής μάζας (*Coronal Mass Ejections - CMEs*) και **(γ)** τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (*Solar Energetic particles - SEPs*). Τα φαινόμενα αυτά, συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με την ηλιακή δραστηριότητα στα λεγόμενα κέντρα δράσης του Ήλιου. Κύρια γενεσιουργός αιτία της εκρηκτικής συμπεριφοράς του Ήλιου είναι μία φυσική διεργασία που ονομάζεται *μαγνητική επανασύνδεση* και επιτρέπει την αναδιάταξη της τοπολογίας του τοπικού μαγνητικού πεδίου, μέσω της αποκοπής και της επανασύνδεσης μαγνητικών γραμμών διαφορετικής πολικότητας, και τη μετατροπή μαγνητικής ενέργειας σε κινητική και θερμική ενέργεια, καθώς και σε επιτάχυνση σωματιδίων.

1.5.1 Ηλιακές εκλάμψεις

Η *ηλιακή έκλαμψη (solar flare)* είναι μία κολοσσιαία έκλυση ενέργειας που εκδηλώνεται, συνήθως, σε ένα κέντρο δράσης του Ήλιου στο ύψος της χρωμόσφαιρας και του ηλιακού στέμματος (Σχήμα 1.10), διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα και



Σχήμα 1.10: **Επάνω:** εικόνες ισχυρής έκλαμψης (5 Μαΐου 2015) από το διαστημικό ηλιακό παρατηρητήριο Solar Dynamics Observatory (SDO), σε διάφορα μήκη κύματος. **Κάτω:** παραδείγματα ηλιακών εκλάμψεων από παρατηρήσεις του δορυφόρου GOES-13 (αριστερά, www.nasa.gov) και γράφημα της ροής ακτινοβολίας στις ακτίνες-X σε χρονικό διάστημα τριών ημερών, από τους δορυφόρους GOES, όπου διακρίνεται αύξηση λόγω ηλιακών εκλάμψεων (δεξιά, www.spaceweather.com).



Σχήμα 1.11: Τυπικό μοντέλο εκδήλωσης ηλιακής έκλαμψης και παρατήρηση πραγματικής ηλιακής έκλαμψης (Martens & Kuin, 1989).

επηρεάζει όλα τα στρώματα της ηλιακής ατμόσφαιρας. Η τεράστια αυτή απελευθέρωση ενέργειας συνοδεύεται από απότομη θέρμανση του πλάσματος τοπικά, εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο μεγαλύτερο μέρος του φάσματος, εκπομπή ενεργητικών σωματιδίων (§1.5.3) και σε κάποιες περιπτώσεις από εκτίναξη στεμματικής μάζας (CME, §1.5.2). Η προέλευση της ενέργειας αυτής σχετίζεται με το ισχυρό μαγνητικό πεδίο του κέντρου δράσης και προκύπτει από τη μαγνητική επανασύνδεση αναδυόμενων, ενίοτε συστραμμένων μαγνητικών δυναμικών γραμμών αντίθετης πολικότητας του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο δράσης (Σχήμα 1.11). Μία τυπική ηλιακή έκλαμψη απελευθερώνει ενέργεια $10^{27} - 10^{32} \text{ erg}$ σε χρονικό διάστημα μερικών λεπτών με τυπικό ρυθμό έκλυσης $\sim 10^{29} \text{ erg/s}$. Η συνολική διάρκεια του φαινομένου κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως και μερικές ώρες και εκτυλίσσεται σε τρεις φάσεις: **(α)** το στάδιο *συσσώρευσης ενέργειας*, στη διάρκεια του οποίου συντελείται αύξηση της θερμοκρασίας στο κέντρο δράσης και εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στις μαλακές ακτίνες-Χ, τα εκατοστομετρικά ραδιοκύματα αλλά και τη γραμμή Ηα, **(β)** το στάδιο της *απελευθέρωσης της ενέργειας*

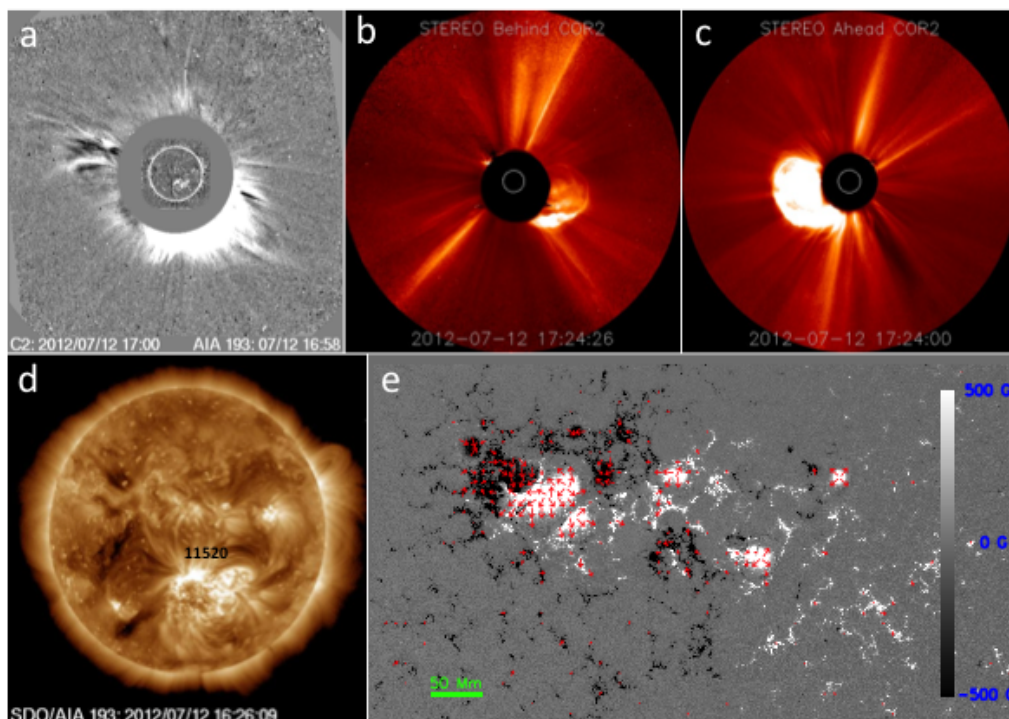
Πίνακας 1.2: Η ταξινόμηση ηλιακών εκλάμψεων του GOES.

| Τάξη | Ροή στις ακτίνες-Χ (0,1 - 0,8 nm) (W/m^2) |
|------|---|
| B | $< 10^{-6}$ |
| C | $10^{-6} < I < 10^{-5}$ |
| M | $10^{-5} < I < 10^{-4}$ |
| X | $> 10^{-4}$ |

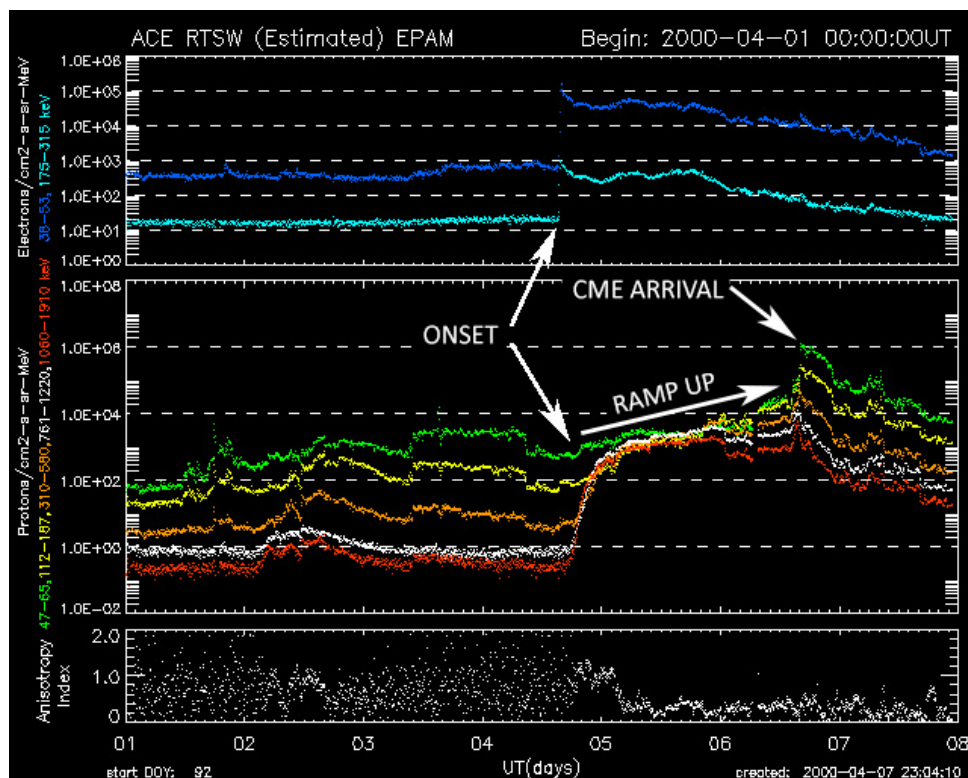
(εκρηκτική φάση), κατά το οποίο εκπέμπεται ακτινοβολία σχεδόν σε κάθε φασματική περιοχή, διαρκεί από μερικά δευτερόλεπτα έως και λίγα λεπτά και επηρεάζει όλα τα στρώματα της ηλιακής ατμόσφαιρας και (γ) τη φάση της αποκατάστασης της ηλιακής ατμόσφαιρας σε συνθήκες ισορροπίας, που διαρκεί από μερικά λεπτά έως και μερικές ώρες και χαρακτηρίζεται από σταδιακή μείωση της ακτινοβολίας στις ακτίνες-Χ και την Ηα στις πρότερες τιμές υποβάθρου πριν την έκλαμψη. Οι εκλάμψεις ταξινομούνται με βάση την καταγραφόμενη ροή ακτινοβολίας στις ακτίνες-Χ σε μήκη κύματος 1 - 8 Å (Σχήμα 1.10, Πίνακας 1.2), από τους δορυφόρους *Geostationary Orbiting Environmental Satellites (GOES)* του *National Administration and Atmospheric Administrations (NOAA)* των ΗΠΑ, σε τέσσερις τάξεις: X, M, C, B, όπου X είναι η κατηγορία των ισχυρότερων εκλάμψεων. Κάθε τάξη, δε, υποδιαιρείται σε μέγεθος από 1 μέχρι 9 εκτός από την τελευταία (X), η οποία μπορεί να έχει μεγέθη μεγαλύτερα του 9. Οι εκλάμψεις συνοδεύονται συχνά από στεμματικές εκτινάξεις μάζας και έκλυση ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων.

1.5.2 Εκτινάξεις στεμματικής μάζας (CMEs)

Όπως αναφέρθηκε κατά την εκδήλωση του φαινομένου της ηλιακής έκλαμψης υπάρχει επίσης πιθανότητα εκτόξευσης πλάσματος από το στέμμα. Εν γένει, ως **εκτίναξη στεμματικής μάζας (Coronal Mass Ejection - CME)** ορίζουμε το φαινόμενο κατά το οποίο αποβάλλεται ένα σημαντικό ποσό στεμματικού πλάσματος, το οποίο



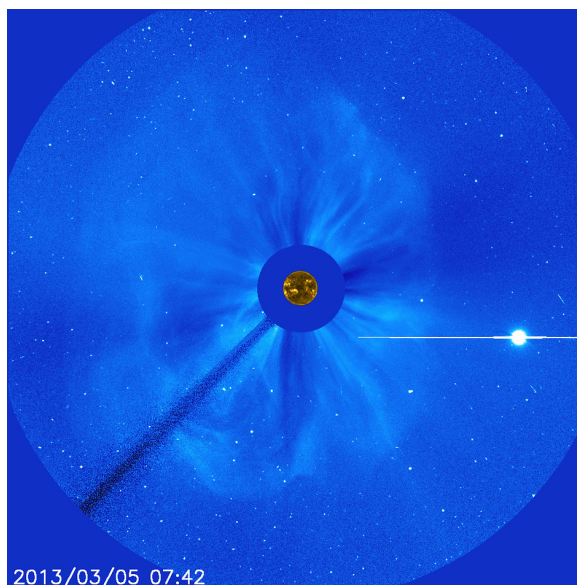
Σχήμα 1.12: Η καταγραφή μίας CME από διάφορα διαστημικά όργανα: (a) εικόνα από τον στεμματογράφο SOHO/LASCO C2, όπου διακρίνεται η ανάδυση της CME, (b), (c) εικόνες από τους στεμματογράφους STEREO-A και B, από όπου υποδεικνύεται ότι η CME είναι κατευθυνόμενη προς τη Γη, (d) εικόνα από το όργανο AIA στα 193 Å, όπου επιβεβαιώνεται το κέντρο δράσης προέλευσης της CME και (e) ανυσματικό μαγνητόγραμμα του κέντρου δράσης.



Σχήμα 1.13: Η επίδραση μίας κατευθυνόμενης προς τη Γη CME στην καταγραφόμενη από τον δορυφόρο Advanced Composition Explorer (ACE) της NASA, ροή των ηλεκτρονίων και των πρωτονίων. Διακρίνεται αύξηση και στα δύο γραφήματα κατά τη στιγμή της έκλαμψης, η οποία δημιουργήσε τη CME και η οποία σηματοδοτεί την αρχική χρονική στιγμή της εκτίναξής της (onset time). Η σταδιακή αύξηση της ροής των πρωτονίων σε συνδυασμό με την απότομη κορυφή υποδεικνύει την άφιξη της CME (www.spaceweatherlive.com).

μαζί με το μαγνητικό του πεδίο κατευθύνεται, απομακρυνόμενο από τον Ήλιο, στον μεσοπλανητικό χώρο (Σχήμα 1.12) και δεν σχετίζεται πάντα με κάποια έκλαμψη, καθώς, σπανιότερα μεν, συνδέεται με εκρηκτικά φαινόμενα *νημάτων* (*filaments*) ή *προεξοχών* (*prominences*). Η συχνότητα δημιουργίας των CMEs αυξάνει κατά το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας (~ 10 /ημέρα) και μειώνεται κατά το ελάχιστο (~ 2 /εβδομάδα), ενώ κατά μέσο όρο οι συχνότητες αυτές είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των εκλάμψεων. Οι μάζες τυπικών CMEs ξεκινούν από τα $\sim 10^{14}$ g και αγγίζουν μέχρι και τα $\sim 10^{16}$ g. Παρατηρούνται κυρίως με τη χρήση *στεμματογράφων* (βλ. §2.2.4), οι οποίοι καταγράφουν ταχύτητες απομάκρυνσης ~ 200 – 2000 km/s. Από τις κατευθυνόμενες προς τη Γη CMEs, οι ταχύτερες καταφθάνουν σε 15–20 ώρες, ενώ οι βραδύτερες σε μερικές ημέρες. Σε περίπτωση που η ταχύτητα μίας CME ξεπεράσει την αντίστοιχη του ηλιακού ανέμου, συχνά δημιουργείται ένα *κρουστικό κύμα* (*shock wave*), το οποίο επιταχύνει με τη σειρά του φορτισμένα σωματίδια, με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της καταγραφόμενης ακτινοβολίας τους. Οι κινούμενες στον μεσοπλανητικό χώρο, πλέον, CMEs που αλληλεπιδρούν με τον *ηλιακό άνεμο* (*solar wind*) παράγοντας ενεργητικά σωματίδια, κρουστικά κύματα και συστραμμένα μαγνητικά πεδία, ονομάζονται συνήθως *Interplanetary CMEs* (ICMEs). Το πραγματικό τρισδιάστατο σχήμα των CMEs είναι δύσκολο να προσδιοριστεί αφού η παρατήρηση (είτε επίγεια, είτε διαστημική, Σχήματα 1.12, 1.14), από ένα μόνο σημείο θα καταγράψει μόνο την προβολή της στο επίπεδο του

ουρανού. Για τον λόγο αυτόν, ενίοτε χρησιμοποιούνται συνδυαστικά, δεδομένα από πολλαπλές πηγές (κυρίως δορυφόρους σε διαφορετικές θέσεις, όπως οι δίδυμοι δορυφόροι STEREO) ώστε να σκιαγραφείται η μορφολογία και η κινηματική τους. Στην περίπτωση δε που η CME αναπτύχθει στο κέντρο του ηλιακού δίσκου και κατευθυνθεί προς τη Γη υπό μικρή γωνία σε σχέση με τη διεύθυνση παρατήρησης, ονομάζεται CME τύπου άλω (*halo CME*) και γεμίζει το πεδίο του στεμματογράφου (Σχήμα 1.14). Οι CMEs απαντώνται σε δύο κυρίως κατηγορίες: (α) οι **σταδιακές CMEs**, οι οποίες έχουν μικρές σχετικά ταχύτητες ($\sim 400 - 600 \text{ km/s}$) και συνδέονται συνήθως με εκρήξεις προεσοχών και (β) οι **εκρηκτικές CMEs**, οι οποίες εμφανίζουν ταχύτητες $> 750 \text{ km/s}$ και σχετίζονται με εκλάμψεις. Η κινηματική εξέλιξη των εκρηκτικών CMEs συχνά διαχωρίζεται σε τρία στάδια:



Σχήμα 1.14: Άλω CME της 05 Μαΐου 2013 από παρατηρήσεις του SOHO (www.nasa.gov).

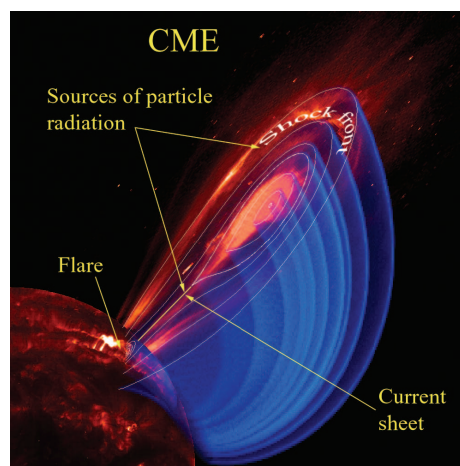
- αρχικό στάδιο κατά το οποίο η CME αναδύεται σε χρονικό διάστημα μερικών δεκάδων λεπτών.
- εκρηκτικό στάδιο κατά το οποίο η CME επιταχύνεται και συμβάλλει στην αύξηση της παρατηρούμενης ροής ακτινοβολίας.
- στάδιο διάδοσης/απομάκρυνσης της CME με ταχύτητα σχεδόν σταθερή.

Τις CMEs καταγράφουν συστηματικά οι διαστημικοί στεμματογράφοι όπως ο *LASCO* της αποστολής *SOHO* και *SECCHI* των διδύμων *STEREO*, καθώς και τα όργανα του δορυφόρου *ACE*, που μας δίνουν πληροφορίες για την κινηματική, τη μορφολογία και την ακτινοβολία τους (Σχήμα 1.13). Οι ίδιοι δορυφόροι σε συνδυασμό με άλλα διαστημικά όργανα μετρούν συστηματικά φυσικές παραμέτρους που σχετίζονται τόσο με της ηλιακές εκλάμψεις, όσο και με τις CMEs, ή και ενδεχόμενα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (Σχήμα 1.17).

1.5.3 Ηλιακά ενεργητικά σωματίδια

Ένα από τα παράγωγα φαινόμενα των ηλιακών εκλάμψεων και των CMEs είναι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η εκπομπή ενεργητικών σωματιδίων. Τα **ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (Solar Energetic Particles - SEPs)** προέρχονται είτε από τα κέντρα δράσης στα οποία εκδηλώνονται οι εκλάμψεις (Σχήμα 1.15), είτε επιταχύνονται στα κρουστικά κύματα που έπονται των CMEs. Τα τελευταία

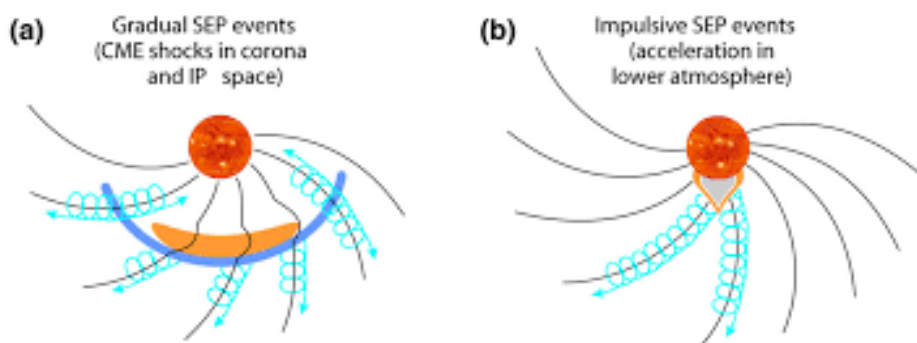
διαχωρίζονται σε προερχόμενα από CMEs κοντά στην ηλιακή ατμόσφαιρα και σε επιταχυνόμενα στα κρουστικά μέτωπα μεσοπλανητικών CMEs (ICMEs, Σχήμα 1.16a). Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι ηλεκτρόνια, πρωτόνια αλλά και βαρύτεροι πυρήνες (He, Fe) που επιταχύνονται σε ενέργειες από μερικά keV μέχρι και κάποια GeV. Τα επιταχυνόμενα σωματίδια διαδίδονται στην ηλιόσφαιρα ακολουθώντας τις μαγνητικές γραμμές του μεσοπλανητικού μαγνητικού πεδίου (*Interplanetary Magnetic Field - IMF*) και αλληλεπιδρούν με τη γήινη μαγνητόσφαιρα και ιονόσφαιρα, σε περίπτωση που είναι μαγνητικά συνδεδεμένη με την περιοχή παραγωγής τους. Τα SEPs χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με το είδος των σωματιδίων που τα απαρτίζουν, το προφίλ της καταγραφόμενης έντασης και τις χρονικές κλίμακες των επιδράσεών τους στο κοντινό μεσοπλανητικό διάστημα (Σχήματα 1.16, 1.17):



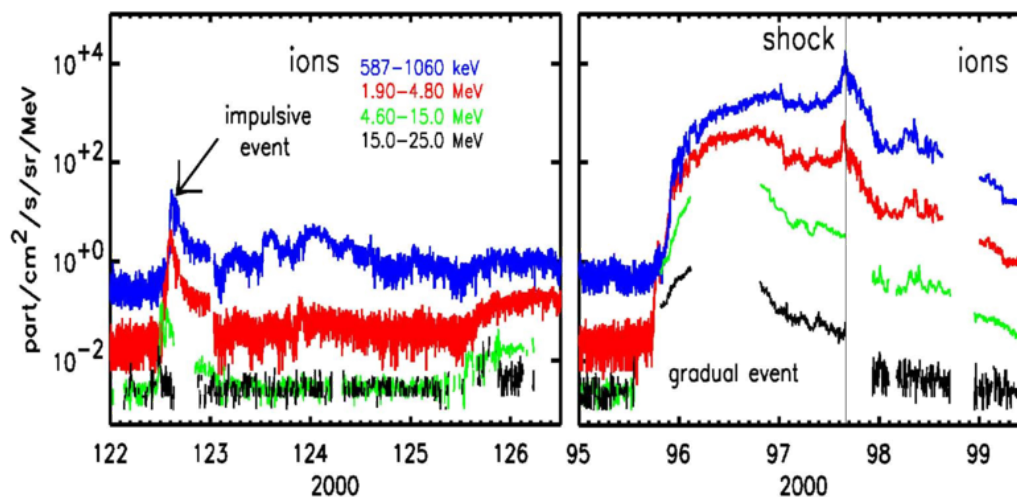
Σχήμα 1.15: Τρισδιάστατη αναπαράσταση μίας σχετιζόμενης με ηλιακή έκλαμψη CME, όπου διακρίνονται οι πηγές των ενεργητικών σωματιδίων (Kohl et al., 2006).

- **Εκρηκτικά συμβάντα (impulsive events):** τα ενεργητικά σωματίδια που σχετίζονται με τις ηλιακές εκλάψεις. Εμφανίζουν απότομη αύξηση στην καταγραφόμενη ροή τους και μεγάλη περιεκτικότητα σε βαρύτερα στοιχεία.
- **Σταδιακά συμβάντα (gradual events):** ενεργητικά σωματίδια που έχουν, κυρίως, επιταχυνθεί στα κρουστικά κύματα των μεσοπλανητικών CMEs. Παρουσιάζουν σταδιακή αύξηση στην καταγραφόμενη ροή τους, αυξημένο αριθμό πρωτονίων σε σχέση με τα ηλεκτρόνια και μέση περιεκτικότητα σε βαρύτερα στοιχεία.

Τα εκρηκτικά συμβάντα είναι κατά πολύ συχνότερα των σταδιακών, ειδικά κατά το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας, αλλά η τυπική διάρκειά τους δεν ξεπερνάει τις μερικές ώρες και η έντασή τους είναι μικρότερη εκείνης των σταδιακών. Τα ενεργητικά σωματίδια καταγράφονται όταν καταφτάσουν στην τροχιά της Γης ($\sim 1 \text{ AU}$) από τους ανιχνευτές διαφόρων διαστημικών αποστολών (όπως οι *GOES*, *STEREO* και *ACE*) και η καταγραφόμενη ροή είναι εξαρτώμενη από τη θέση του

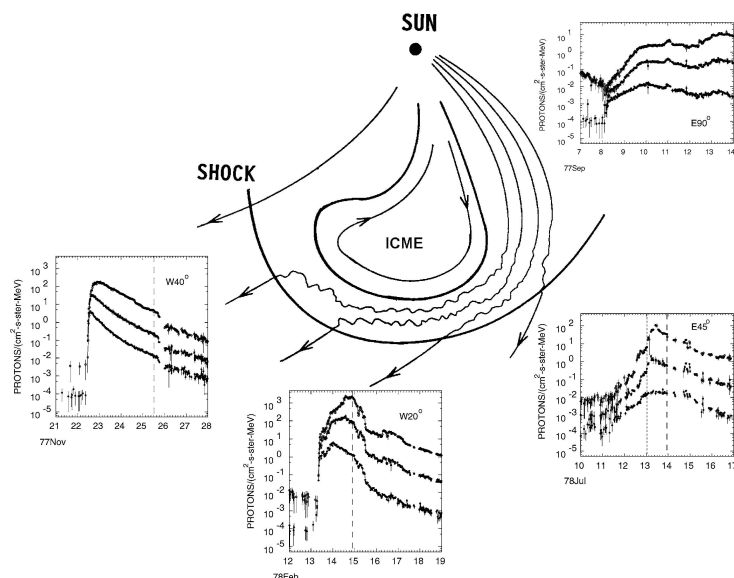


Σχήμα 1.16: Σχηματική αναπαράσταση των κατηγοριών των συμβάντων ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων: (a) σταδιακά συμβάντα, (b) εκρηκτικά συμβάντα (Desai & Giacalone, 2016).



Σχήμα 1.17: Διαγράμματα ροής πρωτονίων συναρτήσει του χρόνου, για ένα εκρηκτικό (αριστερά) και ένα σταδιακό (δεξιά) συμβάν ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων, από δεδομένα των διαστημικών αποστολών ACE και IMP-8 (sepem.eu).

δορυφόρου-ανιχνευτή (Σχήμα 1.18). Μελετώντας τις παρατηρήσεις αυτές, εξάγουμε συμπεράσματα για τους φυσικούς μηχανισμούς επιτάχυνσης των SEPs, την επίδρασή τους στο διαστημικό περιβάλλον αλλά και τη σύνδεσή τους με τα εκρηκτικά ηλιακά φαινόμενα. Επιπλέον, η μελέτη των συμβάντων SEP και των χαρακτηριστικών τους και η πρόβλεψη κυρίως αυτών με σημαντικές ροές σωματιδίων μεγάλης ενέργειας, καθίσταται χρήσιμη και αναγκαία, τόσο για τις επανδρωμένες (επίδραση στη βιολογία των αστροναυτών), όσο και για μη επανδρωμένες (επίδραση στους ανιχνευτές) διαστημικές αποστολές.



Σχήμα 1.18: Παράδειγμα ροής πρωτονίων για τρεις διαφορετικές ενέργειες όπως καταγράφονται από ανιχνευτές σε 4 διαφορετικές θέσεις στον διαπλανητικό χώρο (Cane & Lario, 2006).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ΜΕ ΕΠΙΓΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΑ

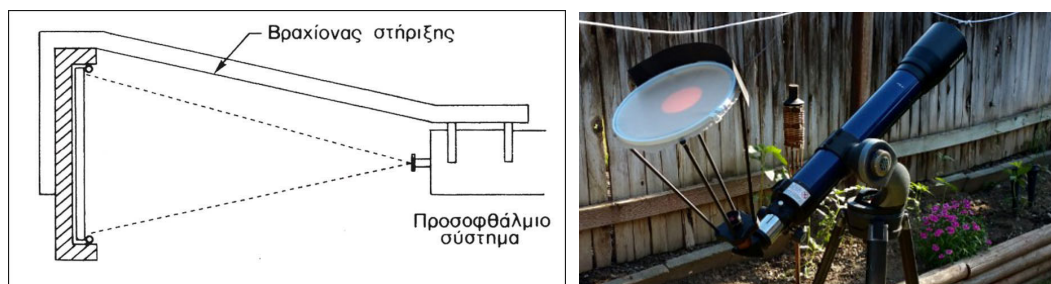
2.1 Εισαγωγή

Η παρατήρηση του Ήλιου, αν και παρουσιάζει παρόμοια προβλήματα και χαρακτηριστικά με τη νυκτερινή παρατήρηση, εμφανίζει και κάποιες ιδιαιτερότητες, οι οποίες αντιμετωπίζονται με κατάλληλα όργανα. Τα υπερπολλαπλάσια φωτόνια, τα οποία εκπέμπονται από τον Ήλιο σε σχέση με τα αντίστοιχα μιας νυκτερινής φωτεινής πηγής, παρατηρούνται με ειδικά κατασκευασμένα ηλιακά όργανα, τα οποία αποκόπτουν μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας και επικεντρώνονται σε επιλεγμένα χαρακτηριστικά του. Τα όργανα αυτά χρησιμοποιούνται, εν τέλει, από ειδικές οπτικές διατάξεις που συνθέτουν ηλιακά τηλεσκόπια, τα οποία κατασκευάζονται ώστε να χρησιμοποιηθούν τόσο από επίγεια, όσο και από διαστημικά προγράμματα. Ο τελικός σκοπός των διατάξεων αυτών, είναι η εξάλειψη των παραγόντων διαταραχής του ηλιακού ειδώλου (υψηλές θερμοκρασίες εντός των οπτικών συστημάτων, ατμοσφαιρικές διαταραχές, υπερχειλίση φωτονίων και υπερθέρμανση στους ανιχνευτές κ.α.) και η επίτευξη υψηλής ευκρίνειας, για την παρατήρηση των πολυποίκιλων φαινομένων του. Τα τελευταία χρόνια υλοποιούνται, αλλά και σχεδιάζονται νέα, μεγάλης κλίμακας επιστημονικά όργανα, τόσο επίγεια όσο και διαστημικά, που αφορούν στην παρατήρηση όλων των παρατηρήσιμων στρωμάτων του εσωτερικού και της ατμόσφαιρας του Ήλιου, σε διάφορα μήκη κύματος.

2.2 Ηλιακά όργανα

2.2.1 Βοηθητικά εξαρτήματα οπτικών διατάξεων

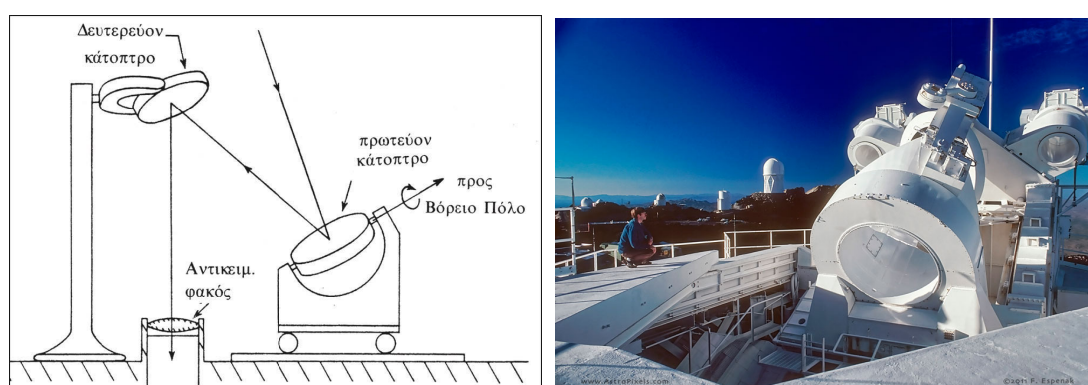
Το απλούστερο βοηθητικό εξάρτημα που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του Ήλιου είναι το **ηλιακό πέτασμα**, στο οποίο προβάλλεται το είδωλο του ηλιακού δίσκου. Μία σχετική, απλή διάταξη αποτελείται από το οπτικό σύστημα, τον



Σχήμα 2.1: **Αριστερά:** η αρχή λειτουργίας του ηλιακού πετάσματος σχηματικά (Παρατηρησιακή Αστρονομία, Σ. Ι. Αυγολούπης, Γ. Χ. Σειραδάκης, 2009). **Δεξιά:** παράδειγμα ηλιακού πετάσματος εφαρμοσμένου σε μικρό διαθλαστικό, ερασιτεχνικό τηλεσκόπιο.

προσοφθάλμιο φακό και το ηλιακό πέτασμα (Σχήμα 2.1). Οι οπτικές ακτίνες εισέρχονται από τον αντικειμενικό φακό, διέρχονται από τον προσοφθάλμιο φακό και εν τέλει προβάλλονται στο πέτασμα. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία του ειδώλου του ηλιακού δίσκου, του οποίου η διάμετρος και η ευκρίνεια εξαρτώνται από τις αποστάσεις μεταξύ αντικειμενικού φακού-προσοφθάλμιου φακού-πετάσματος.

Ένα διαφορετικό βοηθητικό ηλιακό όργανο με μεγάλη πρακτική χρησιμότητα είναι ο **ηλιοστάτης**. Οι ηλιοστάτες αποτελούνται από συστήματα επίπεδων κατόπτρων (συνήθως δύο), τα οποία έχουν ως στόχο την υποδοχή και συγκέντρωση των ακτίνων στον αντικειμενικό φακό του κυρίως οπτικού συστήματος. Το *πρωτεύον κάτοπτρο* του ηλιοστάτη περιστρέφεται γύρω από άξονα παράλληλο στον άξονα του κόσμου¹ με γωνιακή ταχύτητα 1 στροφή/48 hrs. Η κίνηση του *δευτερεύοντος κατόπτρου* πραγματοποιείται σε άξονα κάθετο στον πρώτο, κατά τη διεύθυνση Βορρά-Νότου, και ακολουθεί την καθημερινή μεταβολή της απόκλισης (δ) του Ήλιου (Σχήμα 2.2). Η μεγάλη πρακτική αξία του ηλιοστάτη έγκειται στο γεγονός ότι αποδεσμεύει τους αστρονόμους από την κατασκευή πολυδάπανων κινητών ηλιακών τηλεσκοπίων μεγάλου όγκου.

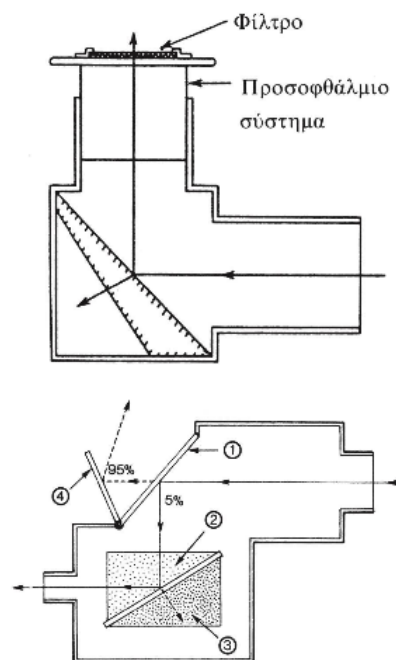


Σχήμα 2.2: **Αριστερά:** η αρχή λειτουργίας ενός ηλιοστάτη με δύο κάτοπτρα (Παρατηρησιακή Αστρονομία, Σ. Ι. Αυγολούπης, Γ. Χ. Σειραδάκης, 2009). **Δεξιά:** ο ηλιοστάτης του ηλιακού τηλεσκοπίου McMath-Pierce (www.astropixels.com).

¹Ο άξονας του κόσμου της ουράνιας σφαίρας σε έναν τόπο, είναι παράλληλος στον άξονα περιστροφής της Γης

2.2.2 Πρίσματα και φίλτρα

Προκειμένου να αποκοπεί ένα μέρος των εισερχόμενων φωτονίων από των ηλιακό δίσκο, χρησιμοποιούνται ειδικά πρίσματα, φίλτρα ή συνδυασμός τους σε διάφορες διατάξεις. Το **πρίσμα Herschel** χρησιμοποιείται για την παρατήρηση της φωτόσφαιρας και της χρωμόσφαιρας και είναι ένας από τους βασικούς τύπους ηλιακών φίλτρων. Αποτελείται από γυάλινο ανακλαστικό πρίσμα (45° γωνία με την οπτική ακτίνα), το οποίο εκτρέπει ένα μεγάλο ποσοστό της εισερχόμενης ακτινοβολίας ($> 90\%$) και τοποθετείται πριν από τον προσοφθάλμιο φακό (Σχήμα 2.3-πάνω). Το **πρίσμα Golzi** είναι μία παρόμοια, ελαφρώς πολυπλοκότερη διάταξη, η οποία αποτελείται από δύο κάτοπτρα (Σχήμα 2.3-κάτω, 1 και 4) και δύο πρίσματα (Σχήμα 2.3-κάτω, 2 και 3). Το πρώτο πρίσμα ανακλά ένα μικρό ποσοστό της εισερχόμενης ακτινοβολίας ($\sim 5\%$), το οποίο απομακρύνεται από τον παρατηρητή με τη βοήθεια του πρώτου κατόπτρου. Στη συνέχεια οι οπτικές ακτίνες ανακλώνται από το δεύτερο, διπλό πρίσμα, του οποίου το ένα τμήμα περιέχει υγρό σε ελαστική μεμβράνη. Σε περίπτωση που το υγρό θερμανθεί, η μεμβράνη διαστέλλεται επιτρέποντας τη διέλευση μέρους της ήδη εξασθενημένης ακτινοβολίας. Λόγω της μετατροπής του από πρίσμα ολικής, σε πρίσμα μερικής ανάκλασης, το πρίσμα Golzi επιτρέπει την παρατήρηση χωρίς τη χρήση πρόσθετου φίλτρου. Τα σύγχρονα πρίσματα χρησιμοποιούν διπλά



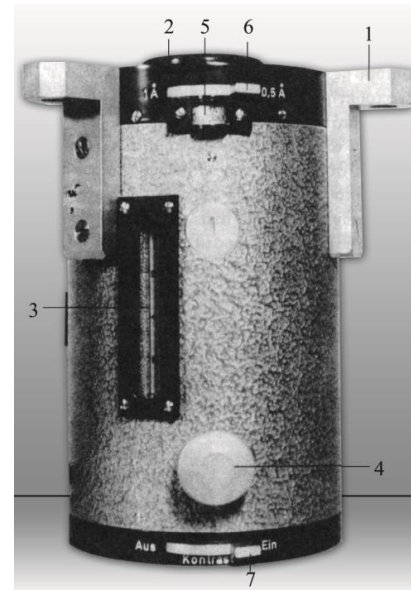
Σχήμα 2.3: Η αρχή λειτουργίας ενός πρίσματος Herschel (επάνω) και ενός Golzi (κάτω) σχηματικά. (Παρατηρησιακή Αστρονομία, Σ. Ι. Αυγολούπης, Γ. Χ. Σειραδάκης, 2009).



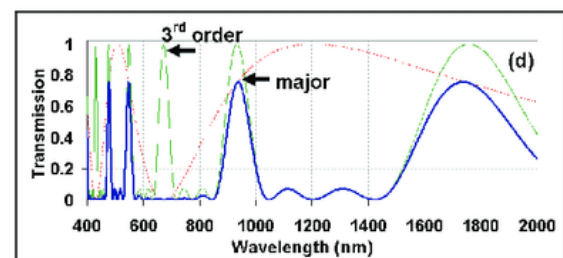
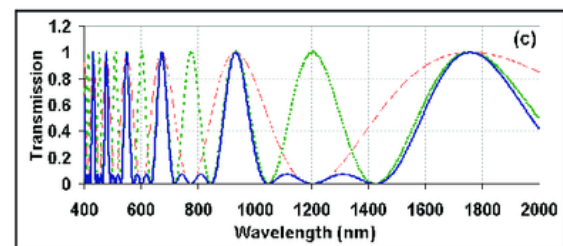
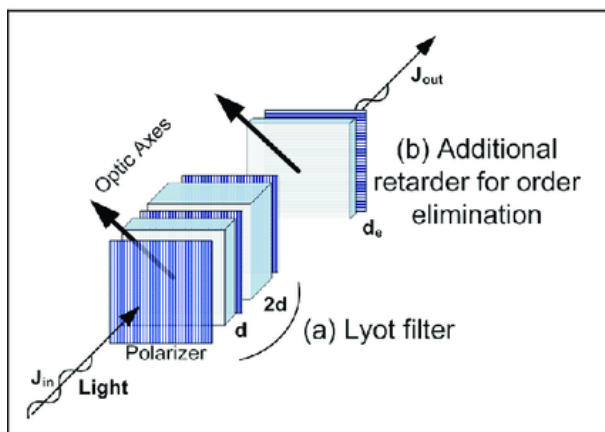
Σχήμα 2.4: Διάφοροι τύποι σύγχρονων αλλά και παλαιότερων φίλτρων Herschel (re.apaaweb.com).

πολωτικά φίλτρα αντί πολύπλοκων διατάξεων πρισμάτων και φίλτρων, για οικονομία και πρακτικότητα στην κατασκευή και τη χρήση (Σχήμα 2.4).

Ένα αρκετά χρήσιμο φίλτρο για τη λήψη μονοχρωματικών παρατηρήσεων της χρωμόσφαιρας του Ήλιου, είναι ο **μονοχρωματικός ηθμός του Lyot** (Σχήμα 2.5). Το φίλτρο αυτό βασίζεται στις διπλοθλαστικές και πολωτικές ιδιότητες συγκεκριμένων υλικών, όπως ο χαλαζίας και ο ισλανδικός κρύσταλλος. Τα πλακίδια των υλικών αυτών πολώνουν γραμμικά το φως, διαχωρίζοντας την προσπίπτουσα δέσμη σε δύο συνιστώσες. Οι συνιστώσες αυτές διαδίδονται σε δύο κάθετους μεταξύ τους άξονες με διαφορετικές ταχύτητες εντός του κρυστάλλου ($v = c/n$, $v' = c/n'$), με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν διαφορά φάσης $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d(n - n')$, όπου n, n' οι δείκτες διάθλασης του κρυστάλλου στις δύο διευθύνσεις διάδοσης, λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και d το πάχος του κρυστάλλου. Ο οπτικός άξονας του κρυστάλλου σχηματίζει γωνία 45° με τη διεύθυνση πόλωσης των ακτίνων, με αποτέλεσμα οι δύο συνιστώσες να έχουν την ίδια ένταση. Για ακέραιες τιμές του $\frac{d}{\lambda}(n - n')$ θα έχουμε διαφορά φάσης πολλαπλάσια του 2π και γραμμικά πολωμένο φως, το οποίο θα διέρχεται και από τα δύο πλακίδια, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα έχουμε κυκλικά ή ελλει-



Σχήμα 2.5: Το φίλτρο του Lyot όπου διακρίνονται: 1-δακτύλιος στήριξης, 2-εμπρόσθιο φίλτρο, 3-θερμόμετρο, 4-ρύθμιση μετατόπισης της γραμμής, 5-κλίμακα μετατόπισης, 6-επιλογή εύρους του φάσματος παρατήρησης και 7-επιλογή αντίθεσης (Παρατηρησιακή Αστρονομία, Σ. Ι. Αυγολούπης, Γ. Χ. Σειραδάκης, 2009).



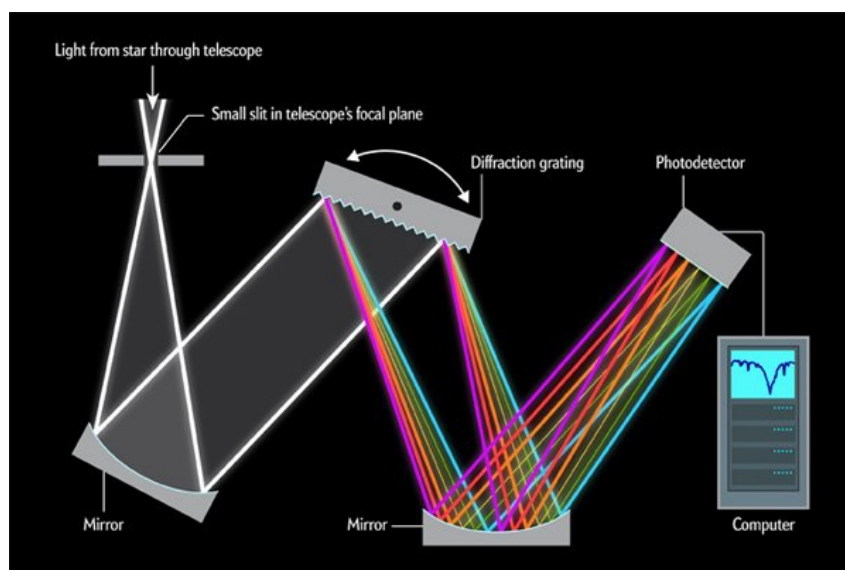
Σχήμα 2.6: (a) Φίλτρο Lyot με υγρό κρύσταλλο και πάχος καθυστερητή d , (b) ο πρόσθετος καθυστερητής, (c) φάσμα εκπομπής μετά τη διέλευση από το πρώτο φίλτρο και (d) φάσμα εκπομπής μετά τη διέλευση από το δεύτερο φίλτρο (Aharon and Abdulhalim, 2009).

πτικά πολωμένο φως, το οποίο θα αποκόπτεται από το δεύτερο πλακίδιο. Στα φίλτρα χρησιμοποιούνται διαδοχικά τέτοια πλακίδια με μεγαλύτερο πάχος, τα οποία δημιουργούν κροσσούς συμβολής από τη διερχόμενη ακτινοβολία (Σχήμα 2.6).

2.2.3 Φασματογράφοι και Φασματοηλιογράφοι

Ο **φασματογράφος** χρησιμοποιείται για την ανάλυση του εισερχόμενου φωτός μέσω του φαινομένου της *περίθλασης*, σε συνιστώσες διαφόρων μηκών κύματος. Μέρος των εισερχόμενων από το οπτικό σύστημα ακτίνων διέρχεται από την είσοδο/σχισμή (slit) του φασματογράφου και προσπίπτουν στο κάτοπτρο-κατευθυντήρα, το οποίο δημιουργεί παράλληλες δέσμες. Οι δέσμες αυτές οδεύουν έπειτα προς μία γυάλινη επιφάνεια, στην οποία έχουν χαραχτεί ισαπέχουσες γραμμές. Η επιφάνεια αυτή είναι το λεγόμενο *φράγμα περίθλασης* (diffraction grating), το οποίο αναλύει τελικά τις οπτικές ακτίνες σε μονοχρωματικές δέσμες, οι οποίες καταλήγουν σε ένα δεύτερο κάτοπτρο σύγκλισης. Τελικά, οι ακτίνες συγκλίνουν και συγκεντρώνονται στο σύστημα καταγραφής (φωτοανιχνευτής, Σχήμα 2.7). Οι κυριότερες παράμετροι ενός φασματογράφου:

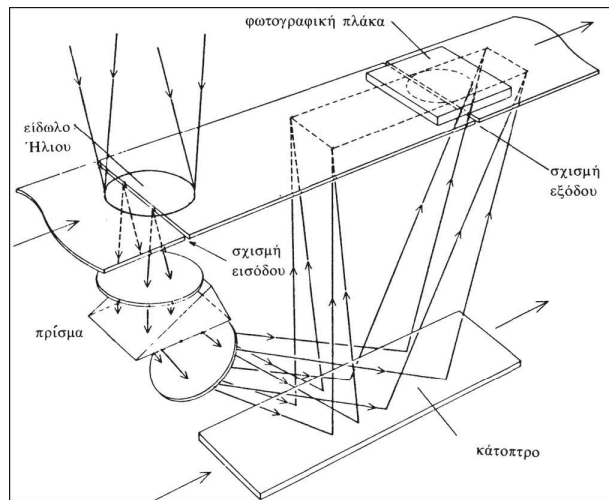
- Φασματική ανάλυση (spectral resolution): η ελάχιστη διαφορά μηκών κύματος $\Delta\lambda$ την οποία μπορεί να διαχωρίσει ο φασματογράφος.
- Διακριτική ικανότητα του φράγματος (resolving power): η διακριτική ικανότητα του φράγματος εξαρτάται από το μήκος κύματος και τη φασματική ανάλυση και είναι ανάλογη του αριθμού N των σχισμών: $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = nN$
- Φασματικό εύρος του φράγματος: ορίζει μία ελάχιστη διαφορά μηκών κύματος $\Delta\lambda_s \propto s$, όπου s το εύρος της σχισμής, την οποία μπορεί το φράγμα να διαχωρίσει.



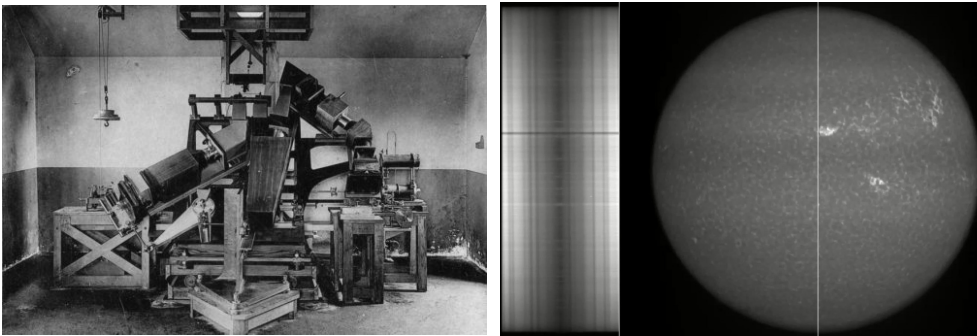
Σχήμα 2.7: Η αρχή λειτουργίας του φασματογράφου. Οι ακτίνες εισέρχονται από τη σχισμή, μετατρέπονται σε παράλληλες δέσμες μέσω του κατευθυντήρα, προσπίπτουν στο φράγμα περίθλασης, όπου διαχωρίζονται, και στη συνέχεια συγκεντρώνονται στον ανιχνευτή μέσω κατόπτρου σύγκλισης (www.scientificamerican.com).

Επομένως, η συνολική διακριτική ικανότητα του οργάνου εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και συνήθως κατασκευάζεται με γνώμονα τις ανάγκες μας.

Προκειμένου να απεικονίσουμε περιοχές στενού φασματικού εύρους, όπως παραδείγματος χάριν η ηλιακή χρωμόσφαιρα, η οποία εμφανίζει γραμμές απορρόφησης στο συνεχές φάσμα του Ήλιου, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τις ιδιότητες του φασματογράφου. Εισάγοντας λοιπόν μία δεύτερη σχισμή στη έξοδο των μονοχρωματικών δεσμών, απομονώνουμε την επιθυμητή φασματική περιοχή (Σχήμα 2.8). Η εικόνα του πλήρους ηλιακού δίσκου, θα προκύψει από την παράλληλη μετακίνηση του ειδώλου (έτσι ώστε η σχισμή να το σαρώσει όλο) και του ανιχνευτή στην έξοδο της σχισμής. Το αποτέλεσμα είναι μία μονοχρωματική εικόνα του Ήλιου, γνωστή και ως *φασματοηλιογράφημα* (Σχήμα 2.9). Ο παραπάνω ελαφρώς τροποποιημένος φασματογράφος ονομάζεται **φασματοηλιογράφος**.



Σχήμα 2.8: Η αρχή λειτουργίας του φασματοηλιογράφου. Οι οπτικές ακτίνες εισέρχονται από τη σχισμή και προσπίπτουν σε πρίσμα όπου διαχωρίζονται σε μήκη κύματος. Μία δεύτερη σχισμή στην έξοδο, συγκεντρώνει τμήμα του ειδώλου στο επιθυμητό μήκος κύματος (Παρατηρησιακή Αστρονομία, Σ.Ι. Αυγολούπτης, Γ. Χ. Σεραδάκης, 2009).

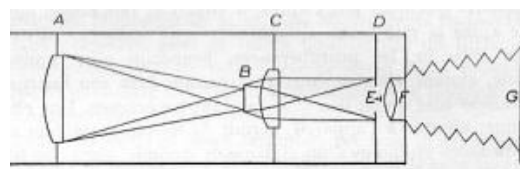


Σχήμα 2.9: Ο φασματογράφος του Αστεροσκοπείου του Meudon (αριστερά) και ένα φασματοηλιογράφημα στη γραμμή Ca II K (δεξιά) (www.lesia.obspm.fr).

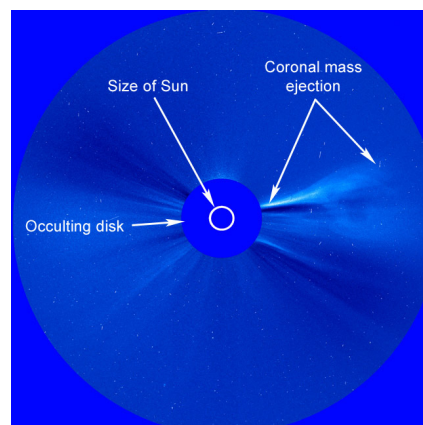
2.2.4 Στεμματογράφοι

Καμία από τις παραπάνω διατάξεις δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά για την παρατήρηση του ηλιακού στέμματος. Ο ηλιακός δίσκος είναι $\sim 10^6$ λαμπρότερος από ότι το στέμμα, το οποίο μπορούμε να διακρίνουμε μόνο κατά τη διάρκεια της ολικής ηλιακής έκλειψης. Ακόμη και τότε όμως, το φως του στέμματος υπερκαλύπτεται πολλές φορές από τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, που οφείλεται

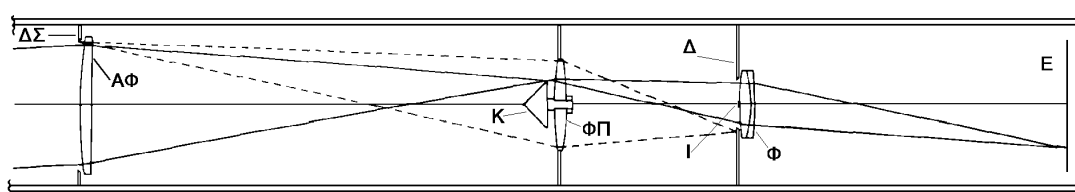
στην ατμόσφαιρα της Γης. Ο **στεμματογράφος** κατασκευάστηκε για να εξαλείψει τους παράγοντες αυτούς που δυσχεραίνουν την παρατήρηση του στέμματος (Σχήμα 2.10). Ο στόχος του στεμματογράφου είναι να δημιουργήσει τεχνητές εκλείψεις, ώστε να αποκρύψει τον ηλιακό δίσκο και να εξαλείψει τη διάχυτη ακτινοβολία (Σχήμα 2.11). Το φως εισέρχεται από τον αντικειμενικό φακό, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από στεφανύαλο ώστε να αποφεύγονται, κατά το δυνατόν, οι ανεπιθύμητες ανακλάσεις και κατάλληλα επεξεργασμένος ώστε να είναι ομοιόμορφος, ομογενής και απαλλαγμένος από στατικά φορτία. Στη συνέχεια, ένας κωνικός αδιαφανής δίσκος αναλαμβάνει τη δημιουργία τεχνητής έκλειψης και ένας φακός πεδίου (ΦΠ) αποτυπώνει το είδωλο στο διάφραγμα (Δ, Σχήμα 2.12). Το διάφραγμα εξυπηρετεί στην αποκοπή του φωτός που προέρχεται από ανεπιθύμητες ανακλάσεις εντός του οπτικού συστήματος, ενώ ένας αδιαφανής δίσκος περιορίζει τις ακτίνες περίθλασης που προέρχονται από τον δακτύλιο στήριξης (ΔΣ). Το αποτέλεσμα είναι η απεικόνιση του ηλιακού στέμματος και των εκρηκτικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα εκεί όπως, οι *στεμματικές εκτινάξεις μάζας* και οι *εκλάμψεις* (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.10: Το σχέδιο του Lyot για τον πρώτο στεμματογράφο (www2.hao.ucar.edu).



Σχήμα 2.11: Εικόνα του στέμματος από τον στεμματογράφο της διαστημικής αποστολής STEREO/SECCHI της NASA, που απεικονίζεται μία έκρηξη στεμματικού υλικού (CME, stereo.gsfc.nasa.gov).



Σχήμα 2.12: Η διάταξη ενός απλού στεμματογράφου και η πορεία των εισερχόμενων σε αυτόν ακτίνων (Φυσική του Διαστήματος και του Ήλιου, Κ. Ε. Αλυσσανδράκης, Α. Νίντος, Σ. Πατσουράκος, 2015).

2.3 Τηλεσκόπια υψηλής διακριτικής ικανότητας

Οι επίγειες παρατηρήσεις του Ήλιου γίνονται με τη χρήση δύο κατηγοριών τηλεσκοπίων: **(α)** μεγάλα τηλεσκόπια υψηλής χωρικής και φασματικής διακριτικής ικανότητας και **(β)** μικρά τηλεσκόπια καταγραφής της συνολικής δραστηριότητας του Ήλιου, επισκόπησης του ηλιακού δίσκου, παρακολούθησης φαινομένων της ηλιακής ατμόσφαιρας και άλλα.

Πίνακας 2.1: Οπτικά τηλεσκόπια υψηλής διακριτικής ικανότητας (Φυσική του Διαστήματος και του Ήλιου, Κ. Ε. Αλυσσανδράκης, Α. Νίντος, Σ. Πατσουράκος, 2015).

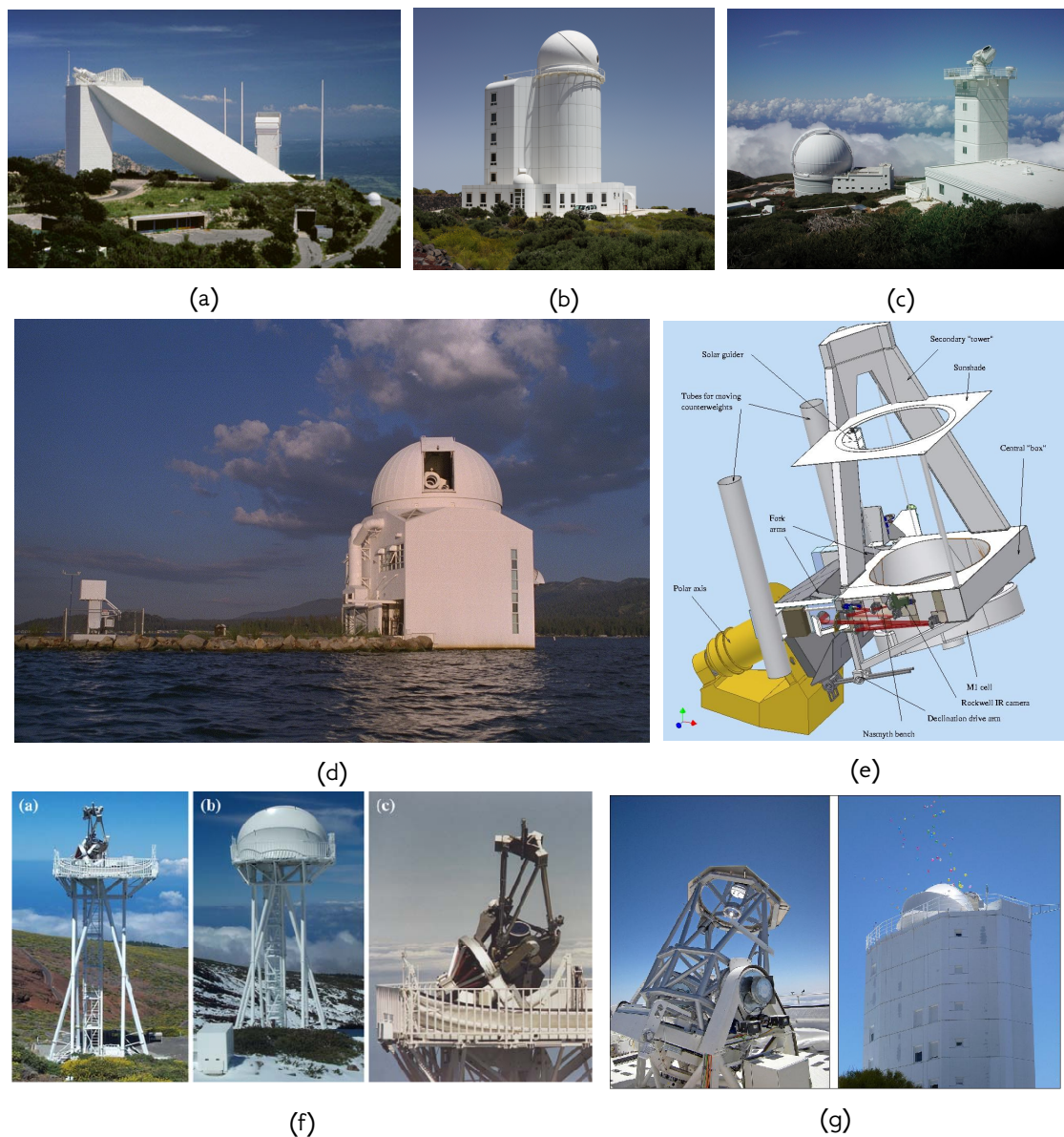
| Όνομα | Τοποθεσία | Διαμ. (cm) | Εστία (m) | Έτος λειτουργίας |
|--|-----------------------------------|---------------|--------------|---------------------|
| 150-Foot Solar Tower | Mt. Wilson, California (ΗΠΑ) | 30 | 45.6 | 1912 |
| McMath-Pierce Telescope | Kitt Peak, Arizona (ΗΠΑ) | 160 | 87 | 1962 |
| Tour Solaire | Meudon (Γαλλία) | 60 | 45 | 1968 |
| Dunn Solar Telescope (DST) | Sacramento Peak, New Mexico (ΗΠΑ) | 76 | 54.9 | 1969 |
| Vacuum Tower Telescope (VTT) | Tenerife, Κανάρια Νησιά (Ισπανία) | 70 | 46 | 1987 |
| THEMIS | Tenerife, Κανάρια Νησιά (Ισπανία) | 90 | 15 | 1996 |
| Swedish 1-m Solar Telescope (SST) | La Palma, Κανάρια Νησιά (Ισπανία) | 100 | 20.3 | 2002 |
| Dutch Open Telescope (DOT) | La Palma, Κανάρια Νησιά (Ισπανία) | 45 | 19.75 | 1997 |
| New Solar Telescope (NST) | Big Bear, California, (ΗΠΑ) | 160 | 83.2 | 2009 |
| GREGOR | Tenerife, Κανάρια Νησιά (Ισπανία) | 150 | 60 | 2010 |
| New Vacuum Solar Telescope (NVST) | Λίμνη Φουξιαν (ΝΔ Κίνα) | 100 | 45 | 2010 |
| Chinese Large Solar Telescope (CLST) | Δυτική Κίνα | 180 | 96 | 2017 |
| Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) | Haleakala, Hawaii(ΗΠΑ) | 424 | | 2020 |
| European Space Telescope (EST) | Κανάρια Νησιά (Ισπανία) | 400 | | 2020 |
| Giant Chinese Solar Telescope (GCST) | Δυτική Κίνα | 800 | | 2020 |

Τα τηλεσκόπια υψηλής διακριτικής ικανότητας εντάσσονται σε μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα ερευνητικά προγράμματα ανά τον κόσμο και στόχος τους είναι η λήψη όσο το δυνατόν υψηλότερης ποιότητας παρατηρήσεων.

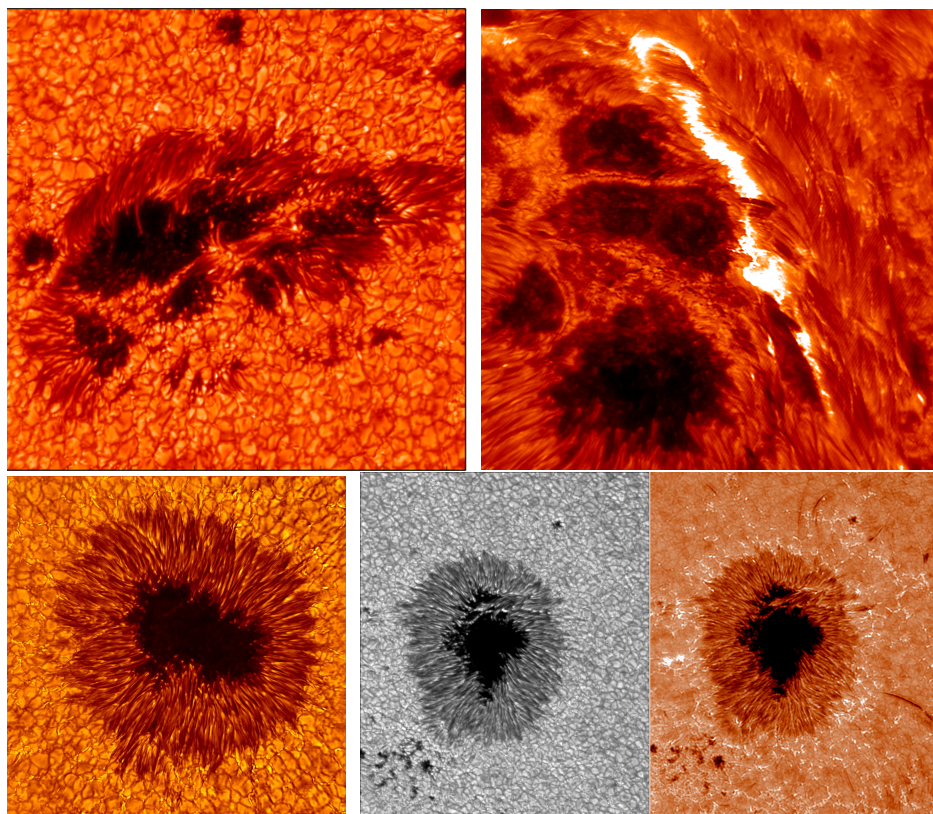
Οι φακοί τους έχουν, συνήθως, διαμέτρους στο εύρος 0,5 - 1,5 m και εστιακές αποστάσεις της τάξης των 50 m (Πίνακας 2.1), ενώ είναι όλα είναι εφοδιασμένα με ευαίσθητα ηλιακά όργανα (φασματογράφους, φασματοηλιογράφους, στεμματογράφους κ.α., §2.2). Οι τοποθεσίες εγκατάστασης των τηλεσκοπίων αυτών επιλέγονται με γνώμονα τις ευνοϊκές καιρικές συνθήκες και τη μείωση των σφαλμάτων. Τοποθεσίες όπως η Τενερίφη και η La Palma στα Κανάρια Νησιά ή η Λίμνη Φούξιαν στην Κίνα, ήταν κατάλληλες για τη δημιουργία παρατηρητηρίων, καθώς τα συγκεκριμένα νησιά εμφανίζουν εξαιρετικές καιρικές συνθήκες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ οι λίμνες εν γένει τείνουν να διατηρούν χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το έδαφος, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζονται από πολλές μετακινήσεις θερμών αερίων μαζών. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στον σχεδιασμό ακίνητων διοπτρικών τηλεσκοπίων μεγάλης εστιακής απόστασης, τα οποία δέχονται και συγκεντρώνουν φως από τον ηλιοστάτη (βλ.



Σχήμα 2.13: Ο Ηλιακός πύργος 150-ποδών στην California των ΗΠΑ λειτουργεί από το 1912 μέχρι και σήμερα (obs.astro.ucla.edu).



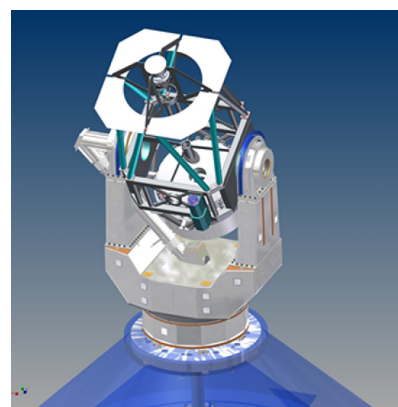
Σχήμα 2.14: Μερικά από τα μεγαλύτερα ηλιακά τηλεσκόπια του κόσμου: (a) McMATH-Pierce Solar Telescope (www.noao.edu), (b) THEMIS Solar Telescope (www.scientificartist.com), (c) Swedish Solar Telescope (SST, www.isf.astro.su.se), (d) Big Bear Solar Observatory (www.bbso.njit.edu), Το τηλεσκόπιο (e) Goode Solar Telescope (GST) του Αστεροσκοπείου Big Bear στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, ήταν πριν από τον Ιούλιο του 2017 γνωστό ως New Solar Telescope (NST), (f) ο ηλιακός πύργος και το τηλεσκόπιο Dunn Solar Telescope (DST, www.researchgate.net), (g) ο ηλιακός πύργος και το τηλεσκόπιο GREGOR (directory.eoportal.org, GREGOR consortium).



Σχήμα 2.15: Υψηλής ευκρίνειας παρατηρήσεις από τα μεγαλύτερα ηλιακά τηλεσκόπια. **Επάνω:** Ενεργός περιοχή την 14 Ιουνίου 2013 από παρατηρήσεις του τηλεσκοπίου GREGOR (αριστερά) και ηλιακή έκλαμψη της 29 Μαρτίου 2017 από παρατηρήσεις του New Solar Telescope (NST, δεξιά). **Κάτω:** Κηλίδα της 23 Αυγούστου 2005 από παρατηρήσεις του Dunn Solar Telescope (αριστερά) και εικόνες κηλίδας από παρατηρήσεις του Fuxian Solar Observatory (FSO) στη Λίμνη Φούξιαν (Κίνα)².

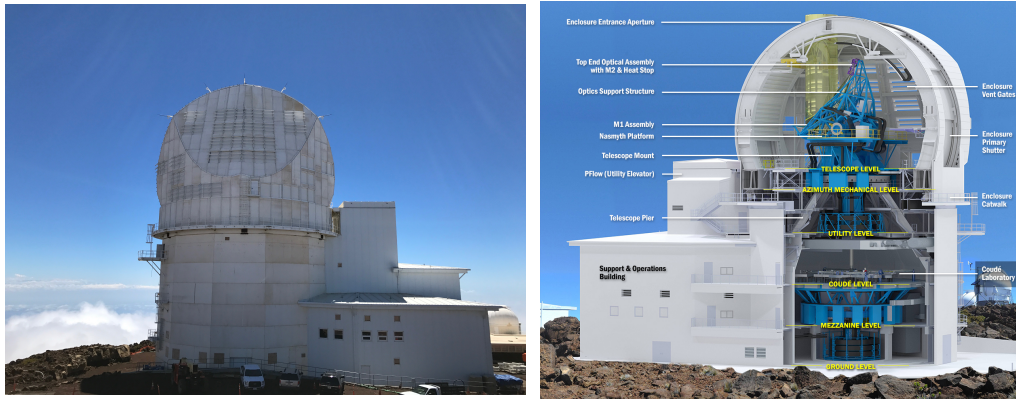
εδάφιο 2.2.1). Οι επιθυμητές εστιακές αποστάσεις επιτυγχάνονταν, μέχρι πρότινος, με την κατασκευή **ηλιακών πύργων** (Σχήμα 2.13). Παραδείγματα ηλιακών πύργων εφοδιασμένων με μερικά από τα μεγαλύτερα ηλιακά τηλεσκόπια είναι το *McMath-Pierce Telescope* στο *Kitt Peak*, στην Αριζόνα των ΗΠΑ, τα *THEMIS* και *Swedish Solar Telescope (SST)* στα Κανάρια Νησιά (Ισπανία), (Σχήματα 2.14 (a), (b), (c)).

Στα σύγχρονα τηλεσκόπια, τείνουν να χρησιμοποιούνται πολλαπλά κάτοπτρα για την επίτευξη μεγάλων εστιακών αποστάσεων, διατηρώντας παράλληλα το μήκος των τηλεσκοπίων μικρό. Παραδείγματα τέτοιων τηλεσκοπίων είναι τα: *Goode Solar Telescope (GST)* στο Αστεροσκοπείο *Big Bear* στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, *Dunn Solar Telescope (DST)* στο βουνό *Sacramento Peak*, στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ και *GREGOR*, το οποίο είναι ένα από τα τρία ηλιακά τηλεσκόπια του Αστεροσκοπείου *Teide*, στην Τενερίφη των Καναρίων Νήσων (Σχήματα 2.14 (d), (e), (f), (g)). Τα τηλεσκόπια



Σχήμα 2.16: Τριδιάστατο σχέδιο του τηλεσκοπίου CLST (Rao et al. 2015).

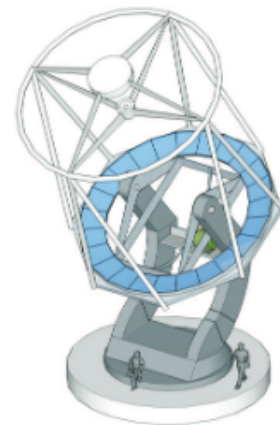
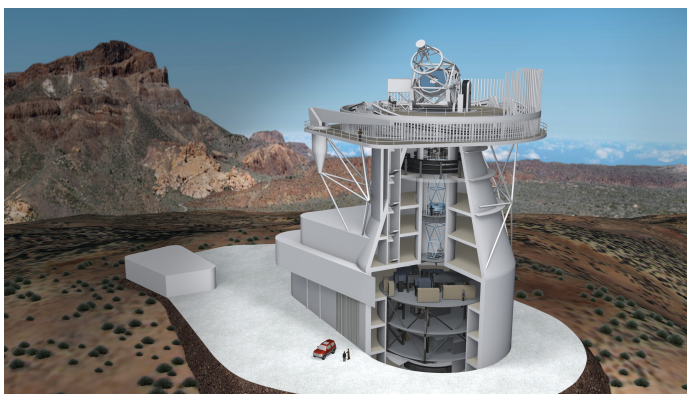
²Πηγές: www.mps.mpg.de, fso.ynao.ac.cn, www.bbso.njit.edu, www.researchgate.net, www.mps.mpg.de



Σχήμα 2.17: Ο ηλιακός πύργος του DKIST στη Χαβάη και τριδιάστατο διάγραμμα της πλήρους διάταξης μετά την κατασκευή του τηλεσκοπίου (dkist.nso.edu).

αυτά παρέχουν υψηλής ποιότητας παρατηρήσεις φαινομένων του ηλιακού δίσκου και της ηλιακής ατμόσφαιρας (Σχήμα 2.15).

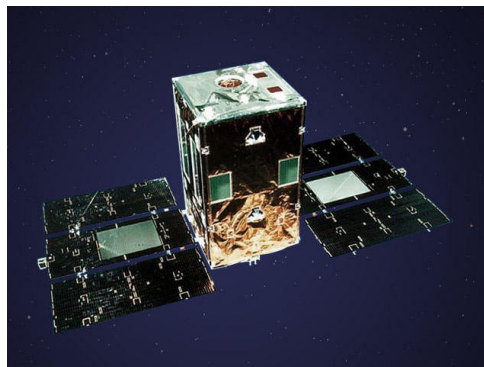
Εκτός των παραπάνω πανίσχυρων σύγχρονων τηλεσκοπίων, τα οποία βρίσκονται σε λειτουργία, σχεδιάζονται και κατασκευάζονται τηλεσκόπια με διαμέτρους $> 1.6 \text{ m}$, τα οποία θα εφοδιάσουν τους επιστήμονες με ακόμη μεγαλύτερης ακρίβειας παρατηρήσεις. Υπό κατασκευή βρίσκονται ήδη τα τηλεσκόπια *Chinese Large Solar Telescope (CLST)* διαμέτρου $1,8 \text{ m}$, στην Κίνα (Σχήμα 2.16) και το *Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST)*, μέχρι πρότινος *Advanced Technology Solar Telescope (ATST)*) στη Χαβάη των ΗΠΑ διαμέτρου 4 m (Σχήμα 2.17). Υπό σχεδιασμό βρίσκονται τα τηλεσκόπια *European Solar Telescope (EST)* και *Giant Chinese Solar Telescope (GCST)*, τα οποία με τις διαμέτρους της τάξης των 4 m και 8 m αντίστοιχα, αναμένεται να εφοδιάσουν τους επιστήμονες με εξαιρετικής ποιότητας παρατηρήσεις.



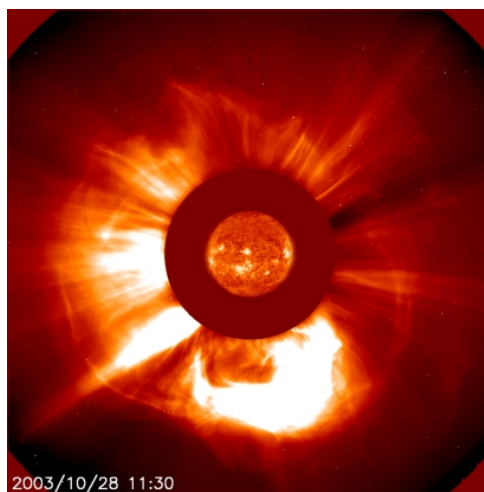
Σχήμα 2.18: Τριδιάστατα σχέδια που απεικονίζουν: την εγκατάσταση του European Solar Telescope (EST, αριστερά, www.est-east.eu) και το τηλεσκόπιο Giant Chinese Solar Telescope (GCST, δεξιά, Deng, 2011).

2.4 Διαστημικά τηλεσκόπια

Από την εποχή της ανάπτυξης των μεγάλων διαστημικών τηλεσκοπίων δε θα μπορούσαν να λείπουν οι εκπρόσωποι των ηλιακών παρατηρήσεων. Τηλεσκόπια απαλλαγμένα από τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας έχουν αναλάβει τη συνεχή καταγραφή του Ήλιου. Οι διαστημικές παρατηρήσεις του Ήλιου εκκινούν ήδη από τη δεκαετία του '70 και τις πρώτες πτήσεις διαστημικών πυραύλων εφοδιασμένων με ηλιακά όργανα. Σημαντική συνεισφορά την παραπάνω περίοδο είχε ο πύραυλος *High Resolution Telescope and Spectrograph*, (*HRTS*, 1975-1985), με τη χρήση του ενσωματωμένου σε αυτόν φασματογράφου υπεριώδους. Τα επόμενα έτη ξεκίνησαν οι διαστημικές αποστολές μακράς διάρκειας, όπως η *Solar Maximum Mission*, (*SMM*, 1980-1989), η οποία πραγματοποίησε φασματοσκοπικές παρατηρήσεις στις ακτίνες- γ και τις σκληρές και μαλακές ακτίνες- X , παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες για τις φυσικές παραμέτρους του Ήλιου. Η πρώτη πολύ μεγάλη διαστημική αποστολή ηλιακών παρατηρήσεων ήταν η αποστολή *YOHKOH* (1991-2001, Πίνακας 2.2, Σχήμα 2.19), η οποία παρείχε κυρίως φασματοσκοπικές παρατηρήσεις ακτίνων- X και παρατηρήσεις ακτίνων- γ και σκληρών και μαλακών ακτίνων- X , με τη χρήση τεσσάρων οργάνων, όπως φαίνεται και στον αντίστοιχο πίνακα. Τα δεδομένα της αποστολής βοήθησαν στη μελέτη του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου, στην κατανόηση φαινομένων, όπως οι μαγνητικοί βρόχοι και οι στεμματικοί πίδακες και παρείχαν πληροφορίες ζωτικής σημασίας για τις ηλιακές εκλάμψεις. Η επόμενη μεγάλης σπουδαιότητας διαστημική αποστολή ήταν η *Solar and Heliospheric Observatory*, (*SOHO*, 1996-), η οποία αποτελεί το κορυφαίο διαστημικό ηλιακό παρατηρητήριο μέχρι και σήμερα. Με τα συνολικά 12 όργανα με τα οποία είναι εφοδιασμένο, παρείχε στους ερευνητές υψηλής ποιότητας δεδομένα που αφορούν όλες τις περιοχές του Ήλιου (Πίνακας 2.2, Σχήμα 2.21). Παραδείγματος χάριν, το τηλεσκόπιο μακρινού υπεριώδους *Extreme Ultraviolet Telescope* (*EIT*) κατέγραψε με μεγάλη επιτυχία τα φαινόμενα του ηλιακού στέμματος και έδωσε τη δυνατότητα συσχέτισης των ηλιακών εκλάμψεων με τις εκτινάξεις στεμματικού υλικού (*CMEs*, Σχήμα 2.21), ενώ οι στεμματογράφοι *C1*, *C2* του *Large*



Σχήμα 2.19: Σχέδιο του διαστημικού τηλεσκοπίου Yohkoh (www.isas.jaxa.jp).



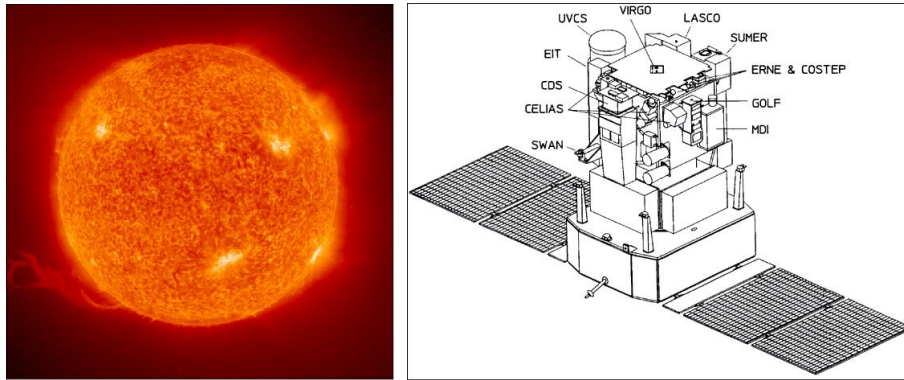
Σχήμα 2.20: Εικόνα στο ηλιακό στέμμα από τον στεμματογράφο LASCO/C2, σε συνδυασμό με εικόνα του ηλιακού δίσκου του EIT (sci.esa.int).

Πίνακας 2.2: Διαστημικές αποστολές παρατήρησης του Ήλιου.

| Τηλεσκόπιο | Έτος εκτόξευσης | Όργανα | Χαρακτηριστικά παρατήρησης |
|---|-----------------|---|---|
| Yohkoh (Solar-A) | 1991 | Bragg Crystal (BCS) Spectrometer | φασματογράφος ακτίνων-Χ |
| | | Hard X-ray Telescope (HXT) | σκληρές ακτίνες-Χ |
| | | Soft X-ray Telescope (SXT) | μαλακές ακτίνες-Χ |
| | | Wide Band Spectrometer (WBS) | ακτίνες-Χ, ακτίνες-γ |
| SOHO ^α | 1995 | Coronal Diagnostic Spectrometer (CDS) | ηλιακό στέμμα, πλάσμα |
| | | Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO) | ηλιακό στέμμα, κομήτες |
| | | Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT) | ηλιακό στέμμα |
| Reuven Ramaty Solar High Energy Spectroscopic Imager (RHESSI) | 2002 | Imaging Telescope Assembly (IMT) | ακτίνες-γ, μαλακές ακτίνες-Χ, απεικονιστική φασματοσκοπία |
| Hinode (Solar-B) | 2006 | Solar Optical Telescope (SOT) | οπτικό |
| | | EUV Imaging Spectrometer (EIS) | μακρινό υπεριώδες |
| | | X-Ray Telescope (XRT) | ακτίνες-Χ |
| Solar TErrestrial RElations Observatory (STEREO) | 2006 | SECCHI (EUVI, COR1, COR2, HI) | οπτικό, ραδιοκύματα |
| | | STEREO/WAVES (SWAVES) | ραδιοκύματα, ενεργητικά σωματίδια, |
| | | IMPACT (SWEA, STE, MG, SEPT, SIT, LET, HET) | μαγνητικό πεδίο, ηλιακός άνεμος |
| | | PLASTIC | ενεργητικά σωματίδια, ηλιακός άνεμος |
| Solar Dynamics Observatory (SDO) | 2010 | Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) | ηλιοσεισμολογία, μαγνητικό πεδίο |
| | | Atmospheric Imaging Assembly (AIA) | ηλιακή ατμόσφαιρα |
| | | Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) | μακρινό υπεριώδες |

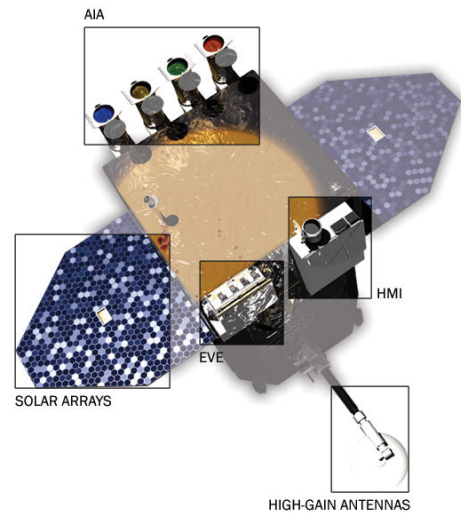
^αΤα υπόλοιπα όργανα του SWAN, CELIAS, COSTEP, ERNE, GOLF, MDI, SUMER, UVCS, VIRGO.

Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment (LASCO) έχουν δώσει μερικές από τις καλύτερες εικόνες του στέμματος που έχουν ληφθεί ποτέ (Σχήμα 2.20) και πληθώρα δεδομένων φυσικών παραμέτρων, που σχετίζονται με αυτές, όπως ταχύτητα,

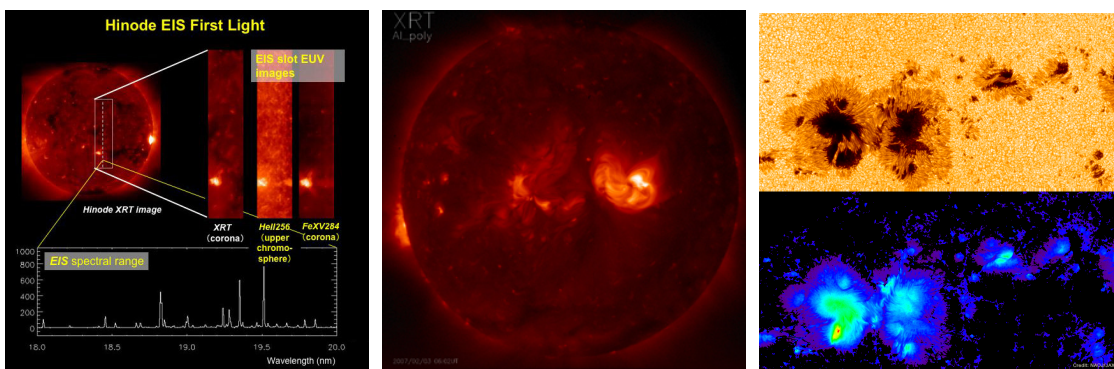


Σχήμα 2.21: Σχέδιο του διαστημικού τηλεσκοπίου SOHO, όπου διακρίνονται τα συνολικά 12 όργανα τα οποία τον συνοδεύουν (αριστερά) και εικόνα του Ήλιου σε μήκος κύματος 304 Å από το όργανο απεικόνισης μακρινού υπεριώδους, EIT (directory.eoportal.org).

θερμοκρασία, γεωμετρία κ.α. Η αλληλουχία σημαντικών διαστημικών αποστολών συνεχίζεται με το *Hinode*, (2006-) το οποίο με τη χρήση των 3 ηλιακών οργάνων του, παρέχει εξαιρετικά δεδομένα στο οπτικό, το μακρινό υπεριώδες και τις ακτίνες-Χ (*SOT*, *EIS*, *XRT* αντίστοιχα, Πίνακας 2.2, Σχήμα 2.23) και το *Solar Terrestrial Relation Observatory* (*STEREO*, 2006-), το οποίο αποτελείται από δύο διαστημικά τηλεσκόπια (*STEREO-A*, έπεται της Γης και *STEREO-B*, ακολουθεί τη Γη), που εκτελούν παρατηρήσεις στο οπτικό και τα ραδιοκύματα, ενώ παράλληλα καταγράφουν ενεργητικά σωματίδια, παραμέτρους του μαγνητικού πεδίου και τον ηλιακό άνεμο. Επιπλέον, οι στεμματογράφοι του (*COR1*, *COR2*) πραγματοποιούν συνεχείς μετρήσεις για σημαντικές παραμέτρους του στέμματος και των CMEs που διαδίδονται εκεί. Από την περιγραφή των σπουδαιότερων διαστημικών αποστολών ηλιακών παρατηρήσεων, δε μπορεί να λείπει το διαστημικό ηλιακό παρα-

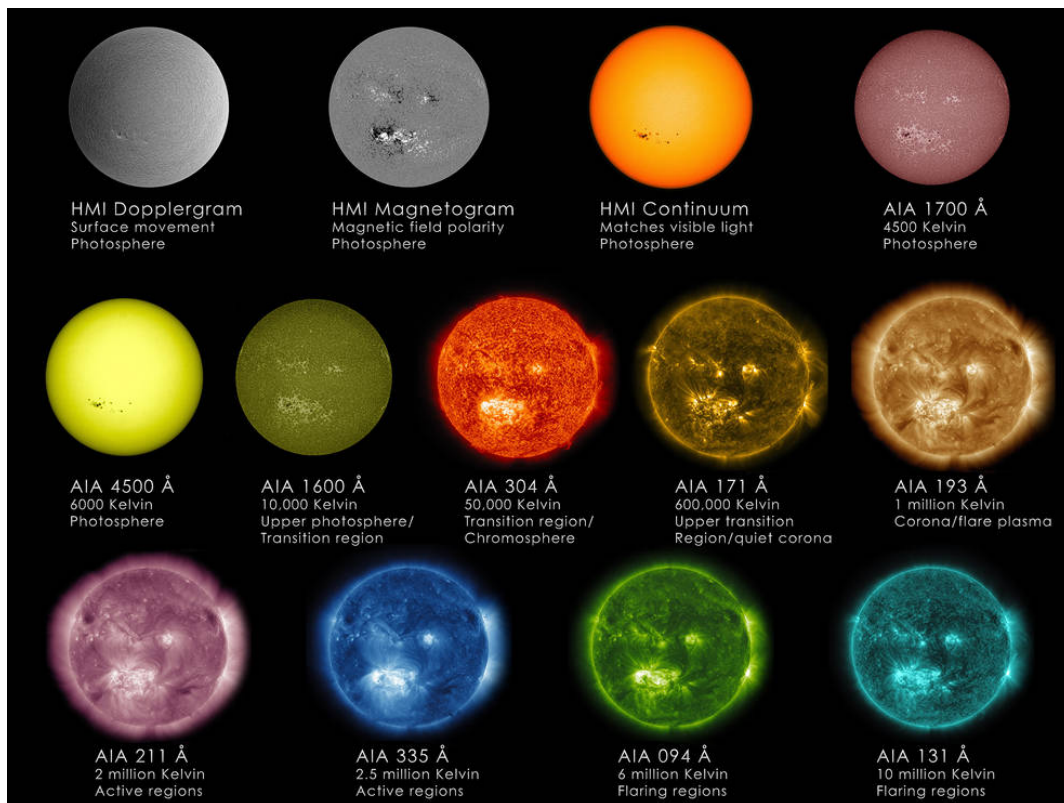


Σχήμα 2.22: Απεικόνιση του διαστημικού τηλεσκοπίου SDO, όπου διακρίνονται τα όργανα καταγραφής του (sdo.gsfc.nasa.gov).



Σχήμα 2.23: Από αριστερά προς τα δεξιά: Τα πρώτα αποτελέσματα και το φασματικό εύρος του EIS, εικόνα του XRT στις ακτίνες-Χ και εικόνα κηλίδων (επάνω) και έντασης μαγνητικού πεδίου (κάτω), από δεδομένα του SOT (www.esa.int, xrt.cfa.harvard.edu, hinode.msfc.nasa.gov).

τηρητήριο *Solar Dynamics Observatory (SDO, 2010-)*, το οποίο από τη στιγμή της έναρξης της λειτουργίας του, παρέχει αδιάκοπα παρατηρήσεις αξεπέραστης ποιότητας μέσω των 3 ηλιακών οργάνων του (*HMI, AIA, EVE*, Πίνακας 2.2, Σχήμα 2.22) σε πληθώρα μηκών κύματος για όλες τις περιοχές του Ήλιου (Σχήμα 2.24). Το χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει την ποιότητα των παρατηρήσεων του *SDO*, είναι η υψηλή διακριτική ικανότητα των οργάνων του και η ταχύτητα λήψης εικόνων (*image cadence*), η οποία είναι 1 εικόνα/s (συγκριτικά, οι ταχύτητες λήψης εικόνων των *SOHO* και *STEREO* είναι 1 εικόνα/12 min και 1 εικόνα/3 min αντίστοιχα). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η διαστημική αποστολή *Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS)* της NASA, η οποία είναι επιφορτισμένη με την καταγραφή της ροής του ηλιακού πλάσματος στα χαμηλά στρώματα της ηλιακής ατμόσφαιρας, με τη χρήση του, υψηλής χωρικής και χρονικής διακριτικής ικανότητας, φασματογράφου στο μακρινό υπεριώδες.



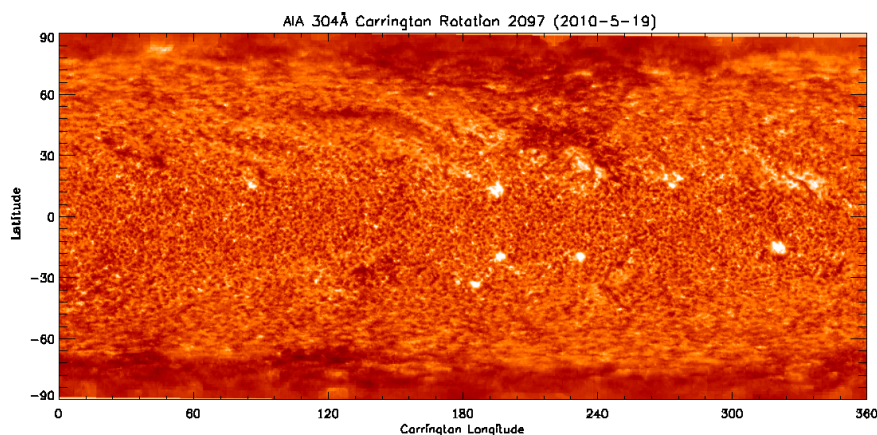
Σχήμα 2.24: Εικόνες του ηλιακού δίσκου από τα όργανα Atmospheric Imaging Assembly (AIA) και Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) του SDO σε διάφορα μήκη κύματος και περιοχές του Ήλιου (φωτόσφαιρα, χρωμόσφαιρα και στέμμα, www.nasa.gov).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΝΟΠΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Τα τηλεσκόπια υψηλής διακριτικής ικανότητας είναι κατάλληλα για την λεπτομερή καταγραφή και παρακολούθηση των διαφόρων ηλιακών φαινομένων. Η παρατήρηση τους σε υψηλές μεγεθύνσεις δίνει τη δυνατότητα για την εύρεση των φυσικών παραμέτρων που τα χαρακτηρίζουν, για τη μελέτη των χρονικών και χωρικών μεταβολών τους και για την ανάπτυξη θεωριών που αφορούν τα φαινόμενα αυτά και εν γένει τη φυσική του Ήλιου. Βέβαια, το μέγεθος και οι δυνατότητες των τηλεσκοπίων αυτών, τα καθιστούν ακατάλληλα για μακροπρόθεσμες και συνεχείς παρατηρήσεις της γενικής συμπεριφοράς του Ήλιου, για πρόβλεψη εκρηκτικών φαινομένων του, για συστηματική καταγραφή και ταξινόμηση του αριθμού και της μορφής των κηλίδων του και άλλες παρόμοιες παρατηρήσεις, οι οποίες ονομάζονται παρατηρήσεις **επισκόπησης** ή **συνοπτικές παρατηρήσεις**. Οι παρατηρήσεις αυτές πραγματοποιούνται τόσο με επίγεια όσο και με διαστημικά παρατηρητήρια. Τα επίγεια αστεροσκοπεία χρησιμοποιούν κατά βάση φασματογράφους και φασματοηλιογράφους (§2.2.3) για την απεικόνιση του ηλιακού δίσκου, σε διάφορες φασματικές γραμμές με τη χρήση φίλτρων συμβατικού τύπου, Fabry-Perot ή συνδυασμό τους. Ο ηλιακός δίσκος σαρώνεται σε επιλεγμένες φασματικές περιοχές με τη χρήση φίλτρων *μεταβλητής πίεσης* (*tuning filters*) και τα δεδομένα διορθώνονται από σφάλματα ειδώλων, λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης (*seeing*), οπτικά σφάλματα των οργάνων και από φαινόμενα όπως η αμαύρωση χείλους (§4.3). Πολλά από τα παραπάνω σφάλματα εξαλείφονται στις συνοπτικές παρατηρήσεις των διαστημικών αποστολών. Ηλιακά όργανα μεγάλων διαστημικών προγραμμάτων όπως τα *SOHO/MDI* και *SDO/AIA* (§2.4) συνεισφέρουν στις συνοπτικές παρατηρήσεις (Σχήμα 3.1) ως κύρια ή/και συμπληρωματική πηγή δεδομένων επισκόπησης του Ήλιου. Παρ' όλο που τα δεδομένα των αποστολών αυτών είναι απαλλαγμένα από την επίδραση της ατμόσφαιρας, ο σχεδιασμός και η κατασκευή τους είναι χρονοβόρα και δαπανηρά με αποτέλεσμα να προτιμάται σε μεγάλο βαθμό η ανάπτυξη επίγειων κατασκευών. Οι κατασκευές αυτές αποτελούνται είτε από μεμονωμένα παρατηρη-



Σχήμα 3.1: Χάρτης Carrington (§3.3) από συνοπτικές παρατηρήσεις του *SDO/AIA* σε μήκος κύματος 304 \AA (hspaceweather.gmu.edu).

τήρια, είτε από δίκτυα αστεροσκοπειών ανά τον κόσμο και προσανατολίζονται σε κατά το δυνατόν αδιάκοπη καταγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του Ήλιου.

3.2 Τηλεσκοπία επισκόπησης (patrol)

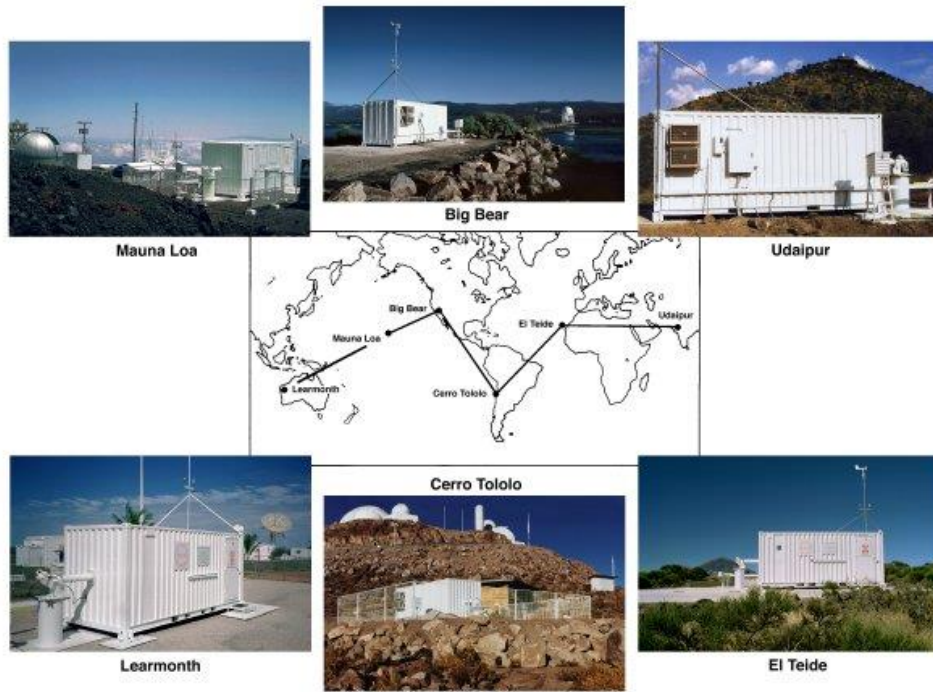
Τηλεσκοπία επιφορτισμένα με συνοπτικές παρατηρήσεις του Ήλιου συναντά κανείς σε πληθώρα αστεροσκοπειών ανά των κόσμο. Τα **τηλεσκοπία επισκόπησης**, όπως λέγονται, είναι συνήθως διοπτρικά τηλεσκοπία με διαμέτρους αντικειμενικών φακών που δεν ξεπερνούν τα 30 cm , εστιακές αποστάσεις της τάξης των 2 m και χρησιμοποιούν ποικίλα ηλιακά όργανα και φίλτρα για την καταγραφής και παρατήρηση του Ήλιου σε διάφορα μήκη κύματος. Οι συνοπτικές παρατηρήσεις του Ήλιου εκκινούν πίσω στον 16ο αιώνα από όπου έχουμε τις πρώτες καταγραφές ηλιακών κηλίδων. Οι σύγχρονες συστηματικές παρατηρήσεις ξεκίνησαν τη δεκαετία του '60 για στρατιωτικούς, κυρίως, σκοπούς. Η εκτόξευση των διαστημικών αποστολών ανέδειξε την ανάγκη προστασίας των οργάνων, αλλά και των αστροναυτών από την ηλιακή δραστηριότητα. Για τον σκοπό αυτόν, υψηλής ποιότητας, συνεκτικότητας και συχνότητας δεδομένα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα και παρέχονται σήμερα από τα επίγεια δίκτυα συνοπτικών παρατηρήσεων. Οι παρατηρήσεις αυτές δίνονται από δίκτυα τηλεσκοπίων και οργάνων, τα οποία είναι καταναμημένα ανά τον κόσμο και συγκεντρώνουν συνεχώς δεδομένα για τον Ήλιο, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο (Σχήμα 3.2). Τα μεγαλύτερα μέχρι σήμερα δίκτυα είναι τα *Birmingham Solar Oscillations Network (BiSON)*, *Global Oscillation Network Group (GONG)* του *National Solar Observatory (NSO)* και *Global High-Resolution Ha Network* του *New Jersey Institute of Technology (NJIT)* (πιν. 3.1), τα οποία παράγουν δεδομένα ηλιοσεισμολογίας και εικόνες του Ήλιου σε διάφορες φασματικές γραμμές, οι οποίες αντανακλούν τη συμπεριφορά των διαφόρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Αναπτύσσοντας περαιτέρω τη δραστηριότητα του, το *NSO* δημιούργησε το πρόγραμμα *Precision Solar Photometric Telescope (PSPT)*, με σκοπό την καταγραφή των μεταβολών της ηλιακής ακτινοβολίας, σε συνεργασία με το *Inputs from Sun to Earth (RISE)* του κέντρου επιστημών *National Science Foundation (NSF)*, των ΗΠΑ,

Πίνακας 3.1: Τα μεγαλύτερα δίκτυα συνοπτικών παρατηρήσεων του Ήλιου.

| Δίκτυο | Χαρακτηριστικά παρατήρησης | Αστεροσκοπεία |
|---|--|--|
| BiSON (1979) | μη απεικονιστική καταγραφή των ταλαντώσεων του Ήλιου (ηλιοσεισμολογία) | Las Campanas (Χιλή) |
| | | Mount Wilson, Καλιφόρνια (ΗΠΑ) |
| | | Izaña, Τενερίφη, Κανάρια Νησιά (Ισπανία) |
| | | Sutherland, Νότια Αφρική |
| | | Carnarvon, Δυτική Αυστραλία |
| | | Narrabri, New South Wales (Αυστραλία) |
| Global Oscillation Network Group (GONG, 1995) | απεικόνιση του ηλιακού δίσκου και καταγραφή ταλαντώσεων | Big Bear, Καλιφόρνια (ΗΠΑ) |
| | | Learmonth Solar Observatory, Αυστραλία |
| | | Udaipur Solar Observatory, Ινδία |
| | | Observatorio del Teide, Κανάρια Νησιά (Ισπανία) |
| | | Cerro Tololo Interamerican Observatory, Χιλή |
| Global High-Resolution H α Network (2000) | μαγνητικό πεδίο, απεικόνιση του Ήλιου στη γραμμή H α και το λευκό φως και παρατηρήσεις ηλιοσεισμολογίας | Mauna Loa Observatory, Χαβάη (ΗΠΑ) |
| | | Big Bear, Καλιφόρνια (ΗΠΑ) |
| | | Kanzelhöhe Solar Observatory, Αυστρία |
| | | Catania Astrophysical Observatory, Κατάνια (Ιταλία) |
| | | Observatoire de Paris Section de Meudon, Meudon, Γαλλία |
| | | Observatoire du Pic du Midi/Pyrénées, Γαλλία |
| | | Yunnan Astronomical Observatory, Κίνα |
| | | Uccle Solar Equatorial Table, Royal Observatory of Belgium (ROB), Βέλγιο |
| | | Observatorio Astronomico da Universidade de Coimbra (OAU), Πορτογαλία |
| Huairou Solar Observing Station National Astronomical Observatories, Κίνα | | |

το οποίο καταγράφει την προσπίπτουσα στη Γη ηλιακή ενέργεια και το πως αυτή μεταβάλλεται. Το *PSPT* λαμβάνει παρατηρήσεις υψηλής φωτομετρικής ακρίβειας στο συνεχές, τη γραμμή Call K και το στέμμα από το Αστεροσκοπείο Manua Loa στη Χαβάη, το οποίο παρέχει παρατηρήσεις του στο λευκό φως και τη γραμμή Call K, και από άλλα αστεροσκοπεία τα οποία εμπíπτουν παράλληλα και σε άλλα, παρόμοια, προγράμματα.

Το *GONG* εμπíπτει σε ένα ευρύτερο πρόγραμμα συνοπτικών παρατηρήσεων του *NSO*, το οποίο ονομάζεται *NSO integrated Synoptic Program (NISIP)*. Το πρόγραμμα



Σχήμα 3.2: Τα αστεροσκοπεία που συμμετέχουν στο δίκτυο Global Oscillating Network Group (GONG), ανά τον κόσμο. Αστεροσκοπεία όπως το Mauna Loa, συμμετέχουν και σε άλλα προγράμματα συνοπτικών παρατηρήσεων (PSPT)

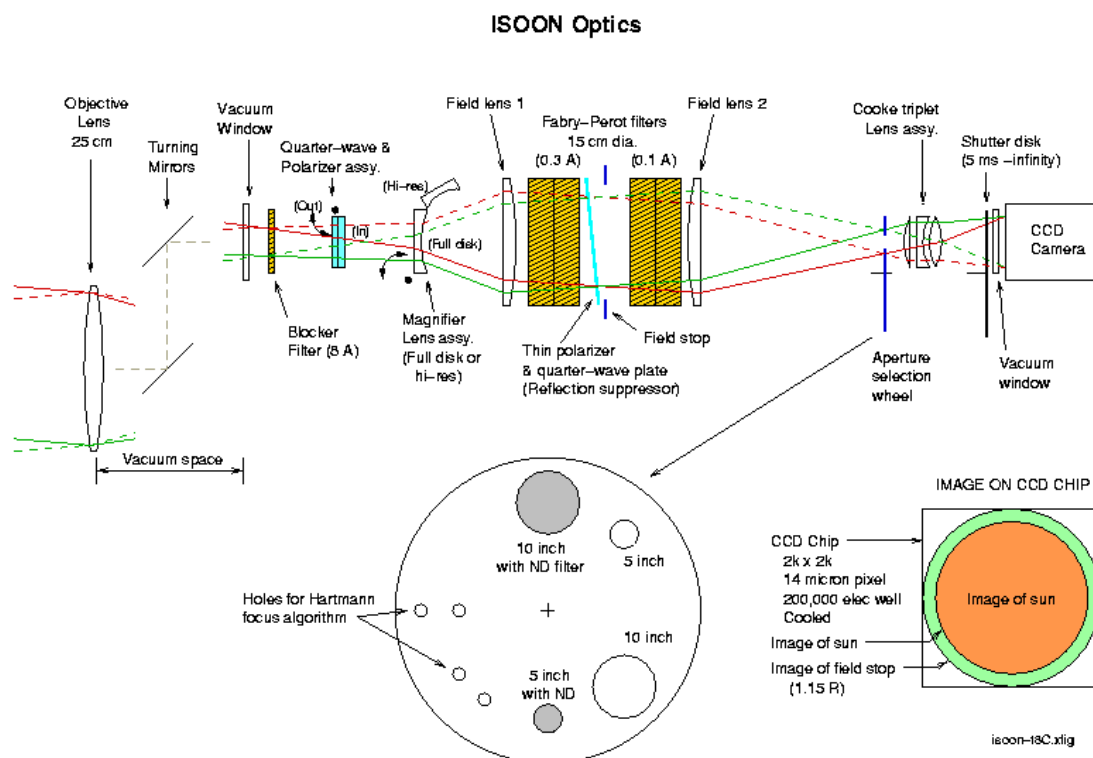
αυτό περιλαμβάνει, πέραν του GONG, τις διατάξεις του *Synoptic Optical Long-term Investigations of the Sun (SOLIS)*, το οποίο παράγει, συστηματικά, μαγνητογράμματα (§3.3), εικόνες πλήρους ηλιακού δίσκου στη γραμμή H α και φασματικά δεδομένα, μέσω τριών οργάνων (VSM-ανυσματικός φασματογράφος, FDP-τηλεσκόπιο-14 cm, ISS-φασματομέτρο, αντίστοιχα, Σχήμα 3.3).

Τη λειτουργία και αναβάθμιση ενός εκ των πρώτων δικτύων συνοπτικών παρατηρήσεων, του *Solar Observing Optical Network (SOON)*, έχει αναλάβει το πρόγραμμα *Improved Solar Observing Optical Network (ISOON)*, το οποίο πραγματοποιεί φασματοσκοπικές απεικονιστικές παρατηρήσεις του ηλιακού δίσκου και φασματοπολωσιμετρία (spectropolarimetry), με υψηλή ταχύτητα λήψης παρατηρήσεων. Το SOON αποτελείτο από ένα διαθλαστικό αχρωματικό τηλεσκόπιο, το οποίο τέθηκε σε λειτουργία τη δεκαετία του '70 με στόχο την καταγραφή του Ήλιου και την πρόγνωση του διαστημικού καιρού. Το νέο πρόγραμμα θα χρησιμοποιεί μία οπτική διάταξη με δύο φίλτρα Fabry-Perot με φασματικό εύρος $< 0.1 \text{ \AA}$ και δυνατότητα μετακίνησης σε μήκη κύματος 6000 - 11000 \AA , μέσω συστήματος μεταβλητής πίεσης (tuning system, Σχήμα 3.4).

Στην προσπάθειά του να συνεισφέρει στην επιστημονική κοινότητα των συνοπτικών παρατηρήσεων και της πρόγνωσης του διαστημικού καιρού, το Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ), του



Σχήμα 3.3: Το όργανο SOLIS. (Παρατηρησιακή Αστρονομία, Σ. Ι. Αυγολούπης, Γ. Χ. Σειραδάκης, 2009).



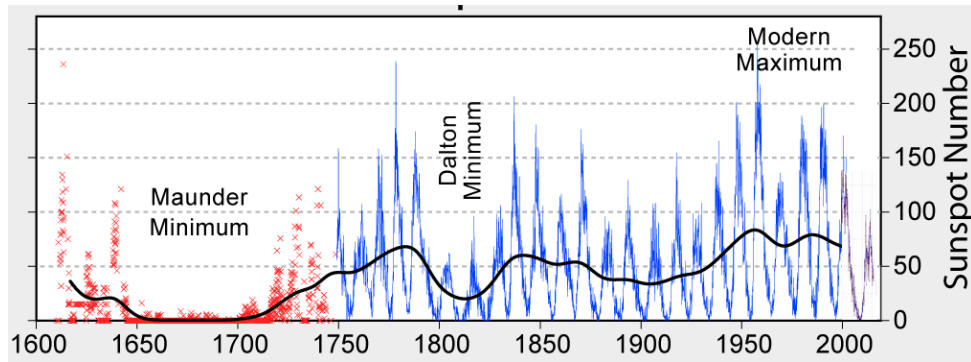
Σχήμα 3.4: Το οπτικό σύστημα ISOON με τα δύο φίλτρα Fabry-Perot και το σύστημα εστίασης και καταγραφής (Balasubramaniam & Pevtsov, 2012).

Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ), στην Πεντέλη της Αττικής, έχει εγκαταστήσει ένα διαθλαστικό τηλεσκόπιο διαμέτρου 10 cm, το οποίο πραγματοποιεί συστηματικές παρατηρήσεις στο κέντρο, αλλά και στα όρια της γραμμής Η α , με τη χρήση φίλτρου Fabry-Perot με φασματικό εύρος διέλευσης (bandpass) $< 0.7 \text{ \AA}$ και παρέχει εικόνες του Ήλιου σχεδόν σε πραγματικό χρόνο (εδάφιο 4.1.1, §4.2).

3.3 Συνοπτικές παρατηρήσεις του Ήλιου

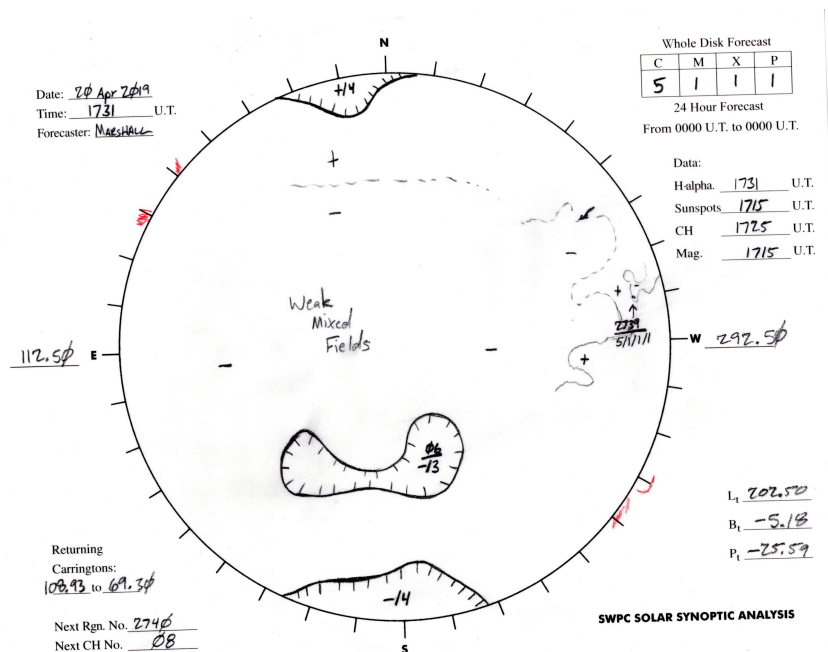
Οι συνοπτικές παρατηρήσεις του Ήλιου πραγματοποιούνται με στόχο τη συστηματική καταγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του ανά πάσα στιγμή και την συμπεριφορά τους σε βάθος χρόνου. Για τον λόγο αυτόν, τα προγράμματα συνοπτικών παρατηρήσεων παρέχουν μία σειρά από δεδομένα, τα οποία προέρχονται από όλες τις περιοχές του Ήλιου και περιλαμβάνουν: συνοπτικούς χάρτες, εικόνες του ηλιακού δίσκου σε διάφορα μήκη κύματος, χάρτες Carrington, μαγνητογράμματα, γραφήματα Doppler και άλλα.

Ένας σημαντικός δείκτης της ηλιακής δραστηριότητας είναι, ως γνωστόν, οι **ηλιακές κηλίδες**. Τα αρχεία παρατήρησης κηλίδων ξεκινούν από πολύ νωρίς, από τον Γαλιλαίο, και συνεχίζονται μέχρι και σήμερα (Σχήμα 3.5). Τα σύγχρονα αστεροσκοπεία, κατασκευάζουν **συνοπτικούς χάρτες-σκίτσα (drawn synoptic maps)** του ηλιακού δίσκου σε **ηλιογραφικές συντεταγμένες**, στους οποίους καταγράφονται διάφορα ηλιακά φαινόμενα (κηλίδες, ενεργές περιοχές, στεμματικές οπές, μαγνητικές γραμμές, πυρσοί, νημάτια και προεξοχές), ως προς τον αριθμό, τη θέση, την ένταση

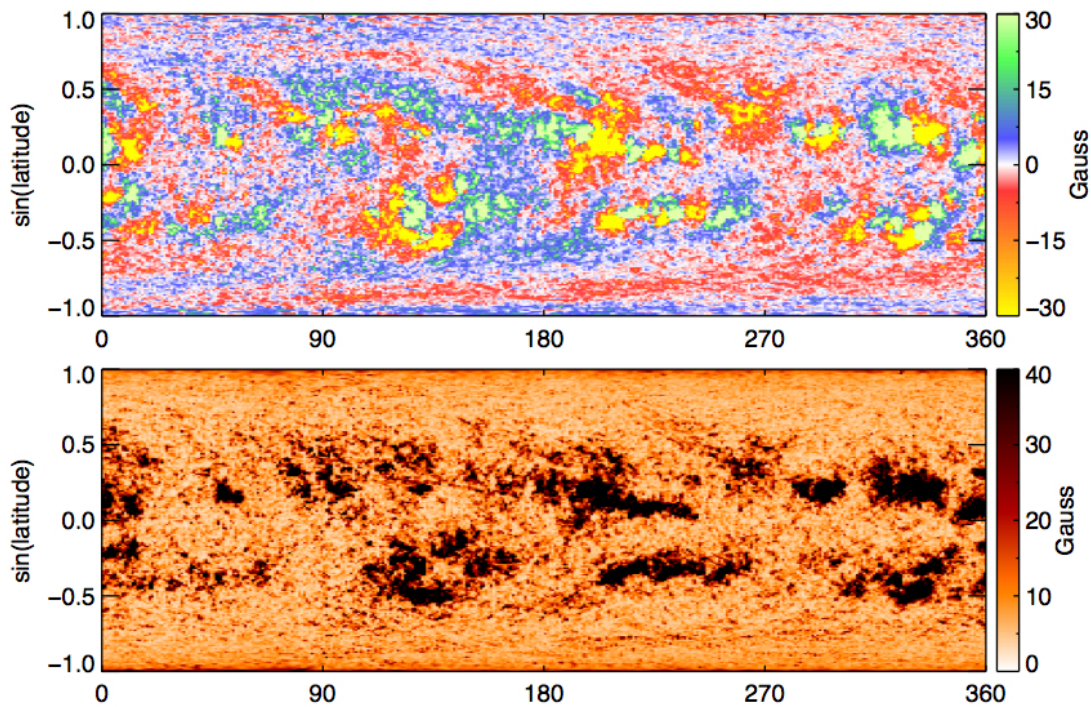


Σχήμα 3.5: Αριθμός ηλιακών κηλίδων τα τελευταία 400 έτη. Η μπλε γραμμή δείχνει τις μέσες μηνιαίες μεταβολές από το βελγικό αστρονομικό observatory Royal Observatory of Belgium. Τα κόκκινα σημεία αντιπροσωπεύουν προγενέστερες, λιγότερο αξιόπιστες, παρατηρήσεις.

και τυχόν ιδιαιτερότητές τους. Επίσης, στους χάρτες αποτυπώνονται προγνώσεις των ερευνητών για ηλιακά φαινόμενα, όπως οι εκλάμψεις. Το κέντρο διαστημικού καιρού *Space Weather Prediction Center (SWPC)* του *National Oceanic and Atmospheric Prediction Center (NOAAA)* δημοσιεύει καθημερινά τέτοιους χάρτες από το 1972 (Σχήμα 3.6). Η συμπεριφορά των φαινομένων του ηλιακού δίσκου καταγράφεται και μέσω **συνοπτικών χαρτών** και **χαρτών Carrington**. Οι χάρτες αυτοί απεικονίζουν τον ηλιακό δίσκο σε ένα επιλεγμένο ευρύ χρονικό διάστημα, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα ταυτόχρονης απεικόνισης εξέλιξης φαινομένων, όπως οι κηλίδες, και κατασκευάζονται για παρατηρήσεις διαφόρων μηκών κύματος, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που αφορούν στη μελέτη του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου. Ένας χάρτης Carrington είναι μία προέκταση του συνοπτικού χάρτη, καθώς απεικονίζει τον ηλιακό δίσκο σε δύο διαστάσεις, όπου ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει το ηλιογραφικό πλάτος και ο οριζόντιος το ηλιογραφικό μήκος. Το ηλιογραφικό αυτό

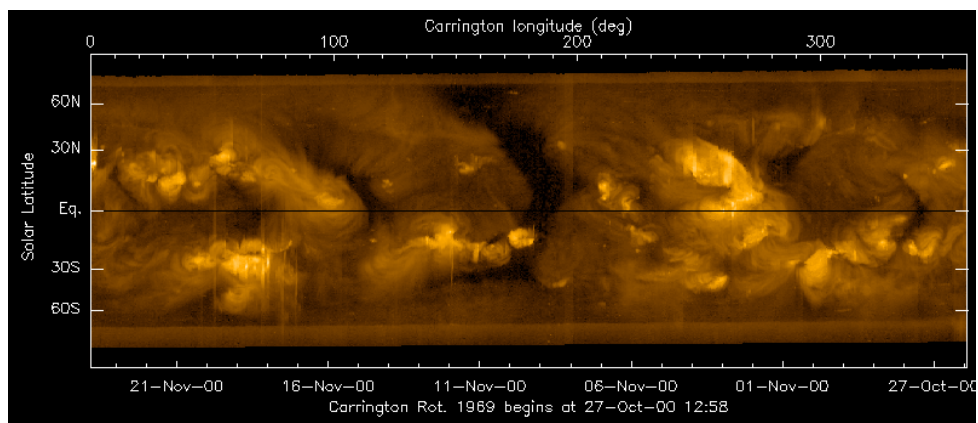


Σχήμα 3.6: Σχέδιο συνοπτικού χάρτη από το κέντρο διαστημικού καιρού Space Weather Prediction Center (SWPC) του National Oceanic and Atmospheric Prediction Center (NOAAA, www.swpc.noaa.gov).



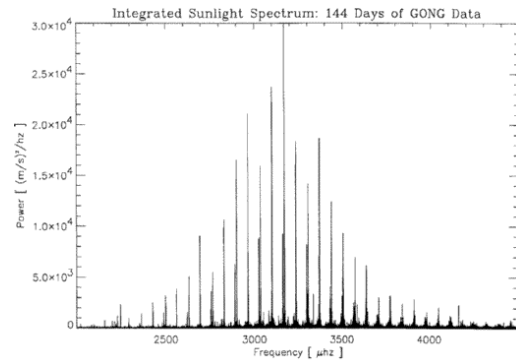
Σχήμα 3.7: Συνοπτικοί χάρτες για την περιστροφή Carrington (Carrington rotation) 2137, όπου απεικονίζεται η φωτοσφαιρική πυκνότητα ροής του μαγνητικού πεδίου (επάνω) και η αντίστοιχη αβεβαιότητα των τιμών της, ανά γεωγραφικό πλάτος. Ο κατακόρυφος άξονας αναφέρεται στα ημίτονα των ηλιογραφικών πλατών και οι τιμές των μαγνητικών πεδίων είναι βαθμονομημένες στο εύρος (-30, 30) Gauss. Οι παρατηρήσεις προέρχονται από τον ανυσματικό φασματογράφο VSM του επίγειου προγράμματος συνοπτικών παρατηρήσεων SOLIS (§3.2, hmi.stanford.edu).

μήκος συνήθως αντιστοιχεί σε μία πλήρη περιστροφή του ηλιακού δίσκου, η οποία ονομάζεται *περιστροφή Carrington* (*Carrington rotation*, $\sim 27 \text{ day} \sim 360^\circ$), χωρίς να αποκλείεται η δυνατότητα απεικόνισης σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα/περιστροφές. Συνοπτικοί χάρτες και χάρτες Carrington δημιουργούνται και από παρατηρήσεις οργάνων των διαστημικών παρατηρητηρίων (§2.4), συμπληρώνοντας έτσι την εποπτική γνώση για τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στον Ήλιο, χωρίς μάλιστα την επίδραση της ατμόσφαιρας στις παρατηρήσεις. Οι συνοπτικοί χάρτες των διαστημικών οργάνων καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος, δίνοντας της δυνατότητα παρακολούθησης της εξέλιξης ενός φαινομένου σε διάφορα

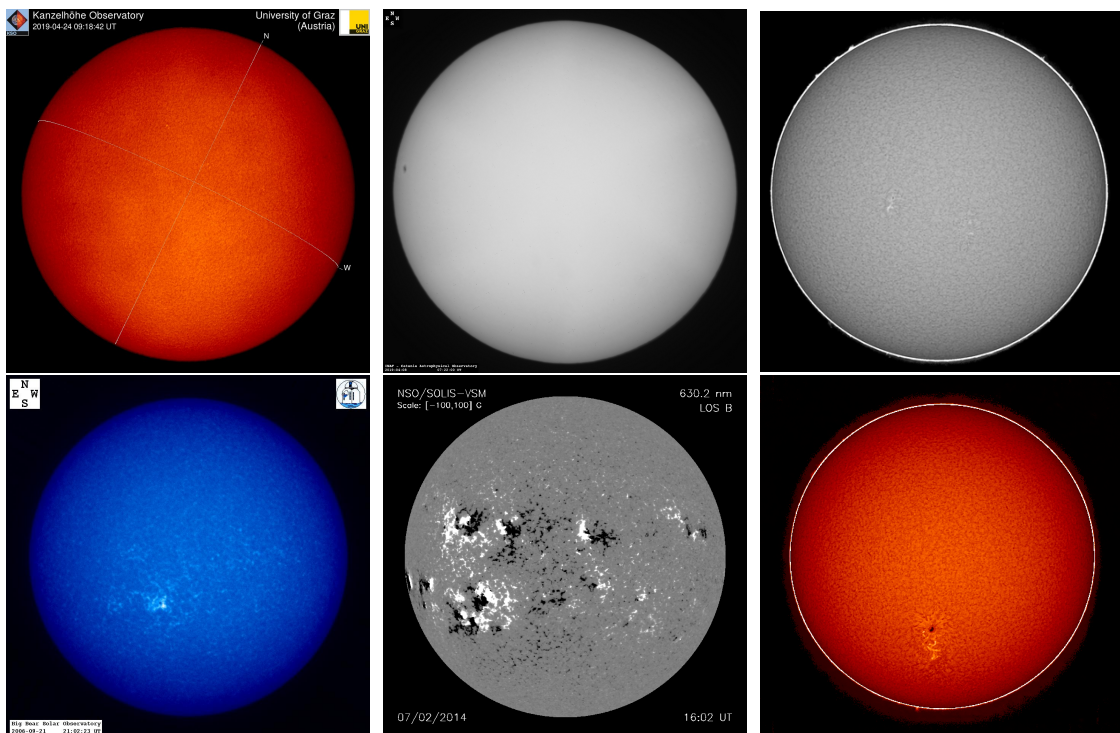


Σχήμα 3.8: Συνοπτικός χάρτης για την περιστροφή Carrington 1969, από παρατηρήσεις του τηλεσκοπίου ακτίνων-X SXT της διαστημικής αποστολής Yohkoh (§2.4).

στρώματα της ηλιακής ατμόσφαιρας (Σχήμα 3.8). Ένα σημαντικό μέρος, αν όχι το σημαντικότερο, των δεδομένων συνοπτικών παρατηρήσεων που δημοσιεύουν τα αρμόδια αστεροσκοπεία, είναι οι **εικόνες του ηλιακού δίσκου** σε διάφορα μήκη κύματος και συγκεκριμένα στα κέντρα αλλά και τα όρια επιλεγμένων (με τη χρήση φίλτρων) γραμμών απορρόφησης του ηλιακού φάσματος. Τα δεδομένα που αναπύχθηκαν συμπληρώνονται και από άλλες παρεμφερείς παρατηρήσεις, γραφήματα και δεδομένα, βελτιώνοντας έτσι το βαθμό επισκόπησης του Ήλιου σε καθημερινή βάση (Σχήμα 3.9). Χαρακτηριστικές γραμμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα στρώματα της ατμόσφαιρας, και για τις οποίες πραγματοποιούνται παρατηρήσεις, είναι η γραμμή απορρόφησης Ηα της σειράς Balmer (χρωμόσφαιρα), το λευκό φως (white light, πλησιέστερο στο κατώτατο όριο της ηλιακής ατμόσφαιρας στρώμα), η γραμμή του ηλίου (He, χαμηλά στρώματα στέματος) και η γραμμή του ιονισμένου και διπλά ιονισμένου ασβεστίου (CaI, CaII, φωτόσφαιρα/χρωμόσφαιρα),



Σχήμα 3.9: Φάσμα συχνοτήτων των ταλαντώσεων του Ήλιου από το δίκτυο συνοπτικών παρατηρήσεων Global Oscillation Network Group (GONG), στα πλαίσια μελετών ηλιοσεισμολογίας (www.noao.edu).



Σχήμα 3.10: Εικόνες του ηλιακού δίσκου σε διάφορες γραμμές απορρόφησης από παρατηρήσεις επίγειων τηλεσκοπίων επισκόπησης. **Επάνω:** εικόνες του ηλιακού δίσκου στη γραμμή Ηα από το αστεροσκοπείο Kanzelhöhe (cesar.kso.ac.at), στο συνεχές του φάσματος (white light) από το αστεροσκοπείο της Catania (web.ct.astro.it) και στη γραμμή Ηα από παρατηρήσεις της 27 Μαρτίου 2019, στο IAADET. **Κάτω:** Ομοίως, εικόνα στη γραμμή CaII K από το αστεροσκοπείο Big Bear (www.bbso.njit.edu), μαγνητόγραμμα από το SOLIS (www.nso.edu) και εικόνα στη γραμμή Ηα από παρατηρήσεις της 28 Ιανουαρίου 2019, στο IAADET.

όπου καταγράφονται τα διάφορα φαινόμενα του ηλιακού δίσκου, αλλά και του χείλους (Σχήμα 3.10).

3.4 Σπουδαιότητα συνοπτικών παρατηρήσεων

Την εποχή των επαναστατικών διαστημικών αποστολών/παρατηρητηρίων και των επίγειων τηλεσκοπίων μεγάλης διακριτικής ικανότητας, ίσως η ανάπτυξη μικρών ερευνητικών προγραμμάτων βασισμένων σε τηλεσκόπια επισκόπησης του Ήλιου (patrol) να φαίνεται περιττή. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν πολλοί και σημαντικοί λόγοι για τους οποίους τα προγράμματα αυτά όχι μόνο δεν πρέπει να εγκαταλειφθούν, αλλά θα πρέπει αναπτυχθούν νέα.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει καταστεί σαφής η επίδραση της ηλιακής δραστηριότητας στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου, ιδιαιτέρως έπειτα από την ανάπτυξη δραστηριοτήτων που εξαρτώνται από το διάστημα, όπως των τηλεπικοινωνιών, των αερομεταφορών, των διαστημικών αποστολών αλλά και της πλοήγησης. Προκειμένου λοιπόν να μπορέσουμε να σκιαγραφήσουμε την επίδραση αυτή ώστε να προστατευτούμε και ίσως να επωφεληθούμε τελικά από αυτήν, θα πρέπει η φύση της ηλιακής δραστηριότητας να καταστεί όσο το δυνατόν πιο ξεκάθαρη σε μας. Ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό, είναι η συνεχής, μακροπρόθεσμη καταγραφή της συμπεριφοράς και των γενικών χαρακτηριστικών του Ήλιου (Σχήμα 3.11). Μερικές λοιπόν από τις παραμέτρους που καταγράφουν οι **συνοπτικές παρατηρήσεις (synoptic observations)** που πραγματοποιούνται στο πλαίσιο αυτό είναι:

- η ένταση και ο αριθμός των κηλίδων σε ημερήσια βάση και σε βάθος χρόνου
- η συμπεριφορά του γενικού μαγνητικού πεδίου του Ήλιου
- η μακροπρόθεσμη αλληλεπίδρασή του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου με τη γήινη μαγνητόσφαιρα



Σχήμα 3.11: Οι σύγχρονες παρατηρήσεις επισκόπησης του Ήλιου πραγματοποιούνται από δίκτυα συνοπτικών παρατηρήσεων και καταγράφουν την ηλιακή δραστηριότητα σε διάφορα μήκη κύματος.

- στατιστική καταγραφή των φαινομένων των εκρηκτικών περιόδων του
- καταγραφή των μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων μεταβολών της ηλιακής σταθεράς

Τα τηλεσκόπια μεγάλης διακριτικής ικανότητας παρά τις εξαιρετικές δυνατότητές τους, δεν είναι κατάλληλα για την πραγματοποίηση των παραπάνω στόχων. Παράλληλα, τα διαστημικά τηλεσκόπια αποδεινούνται δαπανηρά και στην επισκευή και ανανέωση, με αποτέλεσμα οι συνοπτικές παρατηρήσεις να πραγματοποιούνται κατά βάση από τηλεσκόπια επισκόπησης εντεταγμένα σε δίκτυα συνοπτικών παρατηρήσεων (§3.2).

3.5 Συνοπτικές παρατηρήσεις του Ήλιου στο ΙΑΑΔΕΤ του ΕΑΑ: το δίκτυο ιονοσφαιρικών σταθμών DIAS και ο Helioserver

Οι συνοπτικές παρατηρήσεις μπορούν να ενταχθούν σε ένα ευρύτερο πλαίσιο παρακολούθησης της επίδρασης της δραστηριότητας του Ήλιου στο γεωμαγνητικό περιβάλλον (μαγνητόσφαιρα, γεωμαγνητικό πεδίο) και την ανώτερη ατμόσφαιρα της Γης (πλασμόσφαιρα, ιονόσφαιρα), με τελικό στόχο την πρόγνωση του διαστημικού καιρού. Τα τελευταία χρόνια στο *Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ)* του *Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ)* επιχειρείται η δημιουργία ενός Κέντρου για την παρακολούθηση και πρόγνωση του διαστημικού καιρού. Η δημιουργία του Κέντρου αυτού, το οποίο χρηματοδοτείται από τη ΓΓΕΤ μέσω του προγράμματος ΚΡΗΠΙΣ/ΠΡΟΤΕΑΣ, σκοπό έχει να ενσωματώνει υπάρχουσες και θα αναπτύξει νέες υποδομές για την παρατήρηση του Ήλιου, της μαγνητόσφαιρας, της πλασμόσφαιρας, της ανώτερης ατμόσφαιρας και του γεωμαγνητικού πεδίου. Οι υποδομές αφορούν σε όργανα παρατήρησης (ιονοσφαιρικός πομποδέκτης, μαγνητόμετρα, δέκτες GNSS και ηλιακό τηλεσκόπιο) και συστήματα ανάλυσης και επεξεργασίας των παρατηρήσεων με βάση φυσικά αλγοριθμικά μοντέλα κατανόησης και πρόγνωσης της δυναμικής του διαστημικού καιρού, καθώς και των επιδράσεών του στο εγγύς διαστημικό περιβάλλον. Στο πλαίσιο αυτό το ΙΑΑΔΕΤ προμηθεύτηκε ηλιακό τηλεσκόπιο (βλ. §4.1) με φίλτρο στη γραμμή Ηα με σκοπό την απεικόνιση της ηλιακής χρωμόσφαιρας σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, αναπτύχθηκαν δράσεις σε δύο πυλώνες:

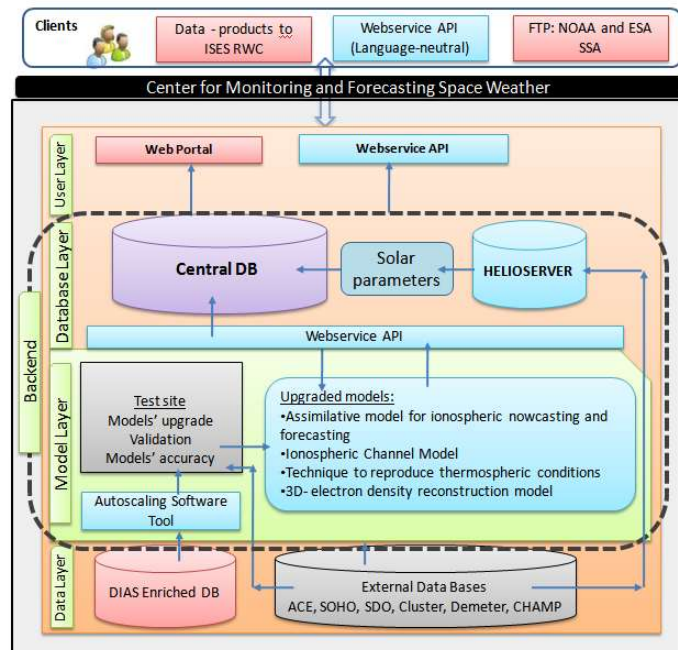
- μελέτη των ηλιακών εκρηκτικών φαινομένων και τη μοντελοποίηση των επιδράσεων του ηλιακού ανέμου στη μαγνητόσφαιρα, την πλασμόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τη θερμόσφαιρα της Γης.
- ανάπτυξη πιλοτικού συστήματος για την παρακολούθηση και πρόγνωση των επιδράσεων του διαστημικού καιρού στις ζώνες ακτινοβολίας την ιονόσφαιρα, τη θερμόσφαιρα, την πλασμόσφαιρα και το έδαφος.

Οι πληροφορίες για την απόκριση των ιονοσφαιρικών παραμέτρων στα εκρηκτικά ηλιακά φαινόμενα προέρχονται από το πανευρωπαϊκό δίκτυο ιονοσφαιρικών

σταθμών *European Digital Upper Atmosphere Server (DIAS)*. Η παρακολούθηση του διαστημικού καιρού από το *DIAS* πραγματοποιείται με την i) καταγραφή σημαντικών ιονοσφαιρικών παραμέτρων (*TEC*, *foF3*, *M(3000)F2* κ.α., βλ. §5.3) από 9 ιονοσφαιρικούς σταθμούς (συμπεριλαμβανομένου εκείνου της Αθήνας), σε πραγματικό χρόνο και ii) τη βραχυπρόθεσμη και iii) μακροπρόθεσμη πρόγνωση της συμπεριφοράς τους.

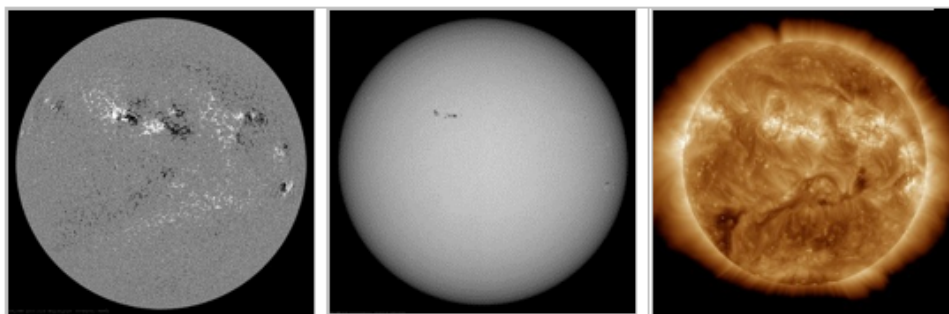
Σε πλήρη λειτουργία, το τηλεσκόπιο παρέχει εικόνες ολόκληρου του ηλιακού δίσκου. Προς τούτο, απαιτήθηκε η δημιουργία προγραμμάτων για την επεξεργασία και προκαταρκτική ανάλυση των παρατηρήσεων. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας, οι εικόνες αποθηκεύονται στον server και είναι διαθέσιμες μέσω του συστήματος *HELIOSEVER* μαζί με τα υπόλοιπα δεδομένα. Το ηλιακό τηλεσκόπιο παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας μιας πλούσιας βάσης δεδομένων ηλιακών παρατηρήσεων, η οποία μπορεί να συμπληρώσει τις ήδη υπάρχουσες διεθνείς βάσεις δεδομένων (π.χ. *Global H α Network*). Με τις παρατηρήσεις αυτές είναι δυνατός ο εντοπισμός, σε πραγματικό χρόνο, ηλιακών εκρηκτικών φαινομένων και η κατάταξή τους σε κατηγορίες ως προς την έντασή τους.

Τη σύνδεση της καταγραφόμενης ιονοσφαιρικής δραστηριότητας με την ηλιακή δραστηριότητα αναλαμβάνει το σύστημα *HELIOSEVER* του ΙΑΑΔΕΤ. Η λειτουργία του βασίζεται σε εξυπηρετητή (server) που λειτουργεί στις εγκαταστάσεις του ΙΑΑΔΕΤ και σκοπός του είναι η ενσωμάτωση: ηλιακών παρατηρήσεων, μετρήσεων της ηλιακής ατμόσφαιρας και του διαστημικού περιβάλλοντος, προγνώσεων εκπομπής ενεργητικών σωματιδίων που συνδέονται με ηλιακές εκλάμψεις και στεμματικές εκτινάξεις μάζας (βλ. Κεφάλαιο 1, §1.5.1, §1.5.2 και §1.5.3) και των ιονοσφαιρικών δεδομένων του *DIAS*, σε μία κοινή διαδικτυακή πύλη ελεύθερης πρόσβασης. Οι αναβαθμισμένες υπηρεσίες παρακολούθησης και πρόγνωσης διαστημικού καιρού είναι διαθέσιμες μέσω υπολογιστικού συστήματος που υποστηρίζει την συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων από το αναβαθμισμένο σύστημα *DIAS* και το σύστημα *HELIOSEVER* με βάση την αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12. Συγκεκριμένα, οι ηλιακές παρατηρήσεις και μετρήσεις προέρχονται από δύο πηγές:



Σχήμα 3.12: αρχιτεκτονική του συστήματος αναβαθμισμένων υπηρεσιών του DIAS.

1. Από τις εν ενεργεία διαστημικές αποστολές (για την περιγραφή τους βλέπε



Σχήμα 3.13: Παράδειγματα εικόνων του Ήλιου σε διαφορετικά μήκη κύματος διαθέσιμα στον HELIOSERVER, από τα όργανα της αποστολής SDO (από αριστερά προς τα δεξιά: μαγνητόγραμμα του SDO/HMI, εικόνα του Ήλιου στο λευκό φως από το SDO/HMI και εικόνα του Ήλιου σε μήκος κύματος 193 Å, sdo.gsfc.nasa.gov).

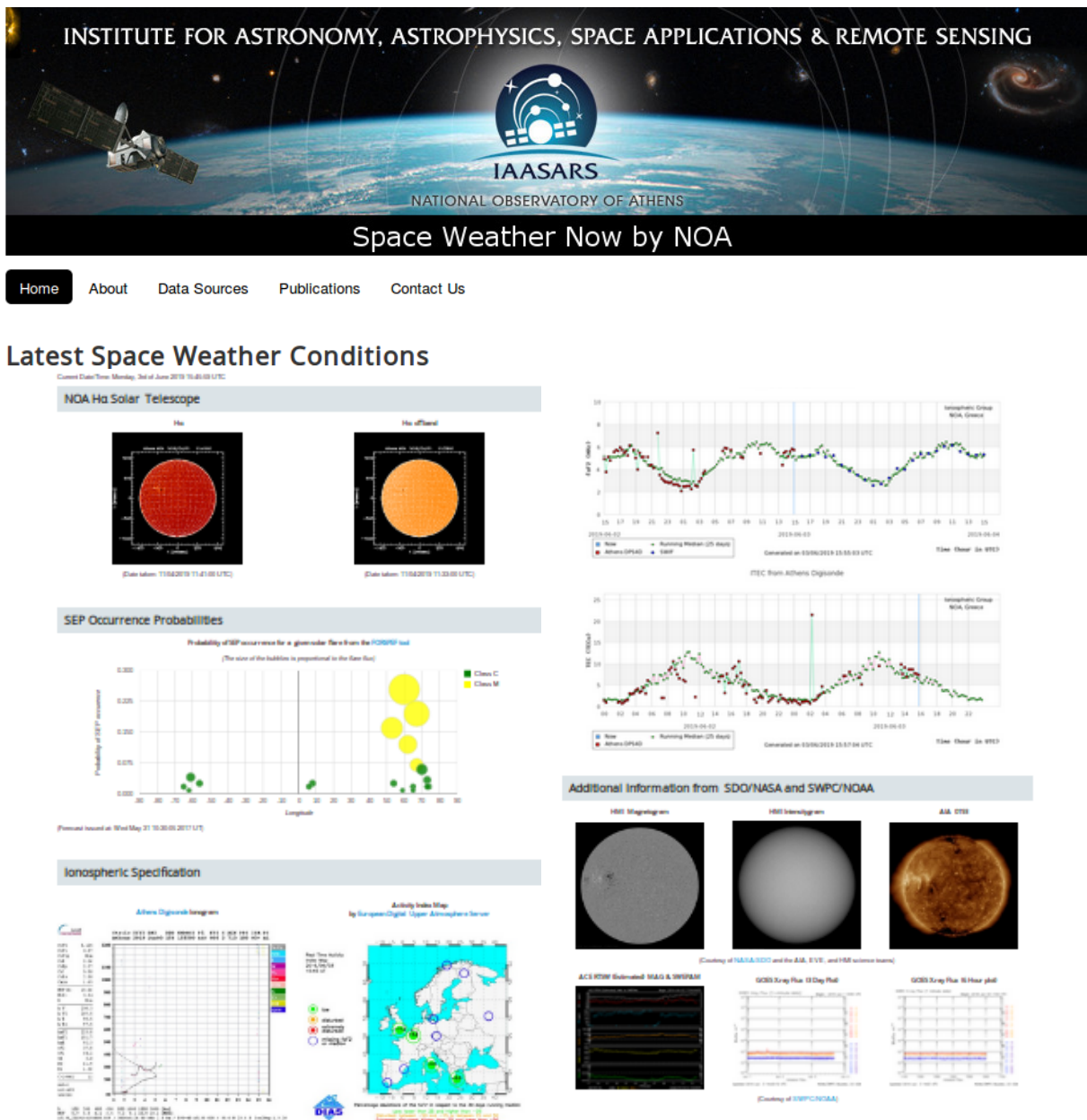
§2.4), των οποίων τα δεδομένα είναι ανοικτής πρόσβασης στο κοινό (Σχήμα 3.13).

- Το όργανο *SDO/HMI (Helioseismic and Magnetic Imager)* παρέχει μαγνητογράμματα υψηλής ανάλυσης της ηλιακής φωτόσφαιρας. Αυτά παρέχουν την κατανομή των ισχυρών μαγνητικών πεδίων στον ηλιακό δίσκο. Με τα δεδομένα αυτά εντοπίζουμε τις ενεργές περιοχές που συνδέονται με τα φαινόμενα ηλιακής δραστηριότητας.
- Το ίδιο όργανο παρέχει και εικόνες υψηλής ανάλυσης της ηλιακής φωτόσφαιρας στο ορατό. Σε αυτά τα δεδομένα εντοπίζουμε τις ηλιακές κηλίδες.
- Το όργανο *SDO/AIA (Atmospheric Imaging Assembly)* παρέχει εικόνες υψηλής ανάλυσης στο υπεριώδες (193 Å), που απεικονίζει το στρώμα της ηλιακής ατμόσφαιρας με θερμοκρασία της τάξης των 106 K (στέμμα). Οι εκλάμψεις, οι οποίες συνήθως συνοδεύουν τις στεμματικές εκρήξεις μάζας, εμφανίζονται σε αυτά τα δεδομένα ως πολύ λαμπρές περιοχές.
- Το όργανο *GOES/EPSS (Energy Particle Sensor)* παρέχει μετρήσεις της ροής των σωματίων α, των πρωτονίων και ηλεκτρονίων σε ένα εύρος ενεργειών.
- Το όργανο *GOES/XRS (X-ray Sensor)* καταγράφει τη ροή μαλακών ακτίνων-Χ ηλιακής προέλευσης, με μήκος κύματος από 0.4-5 Å και 1-8 Å. Οι μετρήσεις παρέχονται με ανάλυση 1 ή 5 λεπτών.
- Το όργανο *GOES/MFS (Magnetic Field Sensor)* παρέχει μετρήσεις του τοπικού μαγνητικού πεδίου στην περιοχή όπου βρίσκεται ο δορυφόρος.
- Το όργανο *ACE/MAG (Magnetic Field Experiment)* παρέχει μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου του ηλιακού ανέμου.
- Το όργανο *ACE/EPAM (Electron, Proton and Alpha Monitor)* παρέχει μετρήσεις, σε πραγματικό χρόνο, της σύστασης του ηλιακού ανέμου σε ηλεκτρόνια, πρωτόνια και σωματία α.

2. Από τον εξοπλισμό ηλιακών παρατηρήσεων (ηλιακό τηλεσκόπιο και κάμερα), που εγκαταστάθηκε στο ΙΑΑΔΕΤ (βλ. §4.1) .

Τα προϊόντας της συλλογής των παραπάνω δεδομένων του *HELIOSERVER*, συμπε-

ριλαμβανομένων εκείνων του DIAS, συγκεντρώνονται σε έναν ιστότοπο με ελεύθερη πρόσβαση (<http://spaceweather.space.noa.gr/>, Σχήμα 3.14).



Σχήμα 3.14: Ο ιστότοπος του HELIOSERVER (spaceweather.space.noa.gr).

Μέρος Ι

**Αναβάθμιση της λειτουργίας του
ηλιακού τηλεσκοπίου του Εθνικού
Αστεροσκοπείου Αθηνών, λήψη
ηλιακών παρατηρήσεων και
ενσωμάτωσή τους στον
HELIOSERVER**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΗΛΙΑΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΙΑΑΔΕΤ ΤΟΥ ΕΑΑ, ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟΝ HELIOSERVER

4.1 Εξοπλισμός για τη λήψη συνοπτικών παρατηρήσεων του Ήλιου στο ΙΑΑΔΕΤ

4.1.1 Ηλιακό τηλεσκόπιο

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις ηλιακές παρατηρήσεις αποκτήθηκε από το ΙΑΑΔΕΤ γι' αυτόν αποκλειστικά τον σκοπό. Τη λήψη δηλαδή, συνοπτικών παρατηρήσεων του Ήλιου, με απώτερο στόχο την καταγραφή του, κατά το δυνατόν, σε πραγματικό χρόνο (§3.5). Το οπτικό σύστημα είναι κατασκευασμένο από την εταιρεία *Lunt Solar Systems*, η οποία ειδικεύεται στην κατασκευή οπτικών συστημάτων για ηλιακές παρατηρήσεις. Το μοντέλο του τηλεσκοπίου είναι το LS100T/Ha. Πρόκειται για διαθλαστικό τηλεσκόπιο με διάφραγμα φακού 100 mm και εστιακή απόσταση 800 mm, με εσωτερικό Etalon Fabry-Perot εργοστασιακά κατασκευασμένο για παρατήρηση στη γραμμή Ha της σειράς του Balmer σε περιορισμένο φασματικό εύρος διέλευσης μικρότερο των 0,7 Å. Το οπτικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Οπτικός σωλήνας διαμέτρου 100 mm (Σχήμα 4.1a)
- Εστιαστής (Σχήμα 4.1c)
- Φίλτρο αποκοπής 12 cm (blocking filter - B1200, Σχήμα 4.1d)
- Προσοφθάλμιος φακός, πολλαπλασιαστής, μειωτής εστιακού λόγου (focal reducer, Σχήμα 4.1e, f, g)
- Φίλτρο περιορισμού του φασματικού εύρους διέλευσης της γραμμής Ha με δυνατότητα μεταβολής της πίεσης για τον περιορισμό του εύρους σε $>0,5 \text{ \AA}$ (double stack, Σχήμα 4.1b).



Σχήμα 4.1: Τα διακριτά μέρη του οπτικού συστήματος: (a) ο οπτικός σωλήνας, (b) το εξωτερικό φίλτρο ρυθμιζόμενης πίεσης (λειτουργία double stack), (c) ο εστιαστής, (d) το ανακλαστικό φίλτρο Herschel 1800 mm (blocking filter), (e) ο προσοφθάλμιος φακός, (f) ο πολλαπλαστής (Powermate 2.5x) και (g) ο μειωτής εστιακού λόγου (focal reducer).

Τα τελευταία εξαρτήματα χρησιμοποιήθηκαν με διάφορους συνδυασμούς για παρατηρήσεις σε ποικίλες μεγεθύνσεις. Οι παρατηρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν αρχικά με τη χρήση μόνο του εσωτερικού φίλτρου Etalon. Επιπρόσθετα, σε μεταγενέστερο στάδιο, αξιοποιήθηκε η δυνατότητα ακριβέστερων παρατηρήσεων, μέσω της προσθήκης εξωτερικού διπλού φίλτρου ρυθμιζόμενης πίεσης (double stack), για τη μετακίνηση της παρατηρούμενη γραμμής απορρόφησης. Με την προσθήκη αυτή, έπιτυγχάνεται περαιτέρω περιορισμός του φασματικού εύρους διέλυσης σε $<0.5 \text{ \AA}$ με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίθεσης και την ανάδειξη λεπτομερειών στην ηλιακή χρωμόσφαιρα. Ο οπτικός σωλήνας του ηλιακού τηλεσκοπίου μαζί με τα φίλτρα και το σύστημα καταγραφής (§4.1.2), εγκαταστάθηκε σε μικρό θόλο τον οποίο διατηρεί το *Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ)* στις εγκαταστάσεις του. Συγκεκριμένα, το πλήρες ηλιακό σύστημα παρατηρήσεων τοποθετήθηκε σε οδηγούς/ράγες κατοπτρικού τηλεσκοπίου νυκτερινών παρατηρήσεων, το οποίο στεγάζεται στον ίδιο χώρο και χρησιμοποιείται από τους ερευνητές. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη ευστάθεια της πλήρους διάταξης, επιστρατεύτηκε στιβαρή ρομποτική ισημερινή στήριξη. Τέλος έγινε προσθήκη



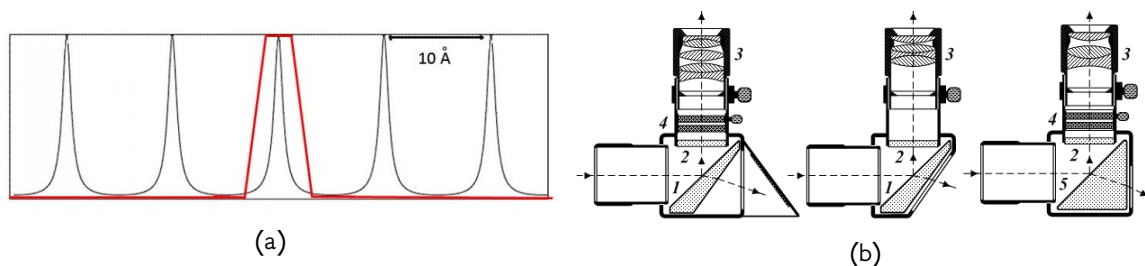
Σχήμα 4.2: Το πλήρες οπτικό σύστημα στον θόλο.



Σχήμα 4.3: Εσωτερική δομή ενός τυπικού τηλεσκοπίου της Lunt. Αρχής γενομένης από τον φακό και οδεύοντας προς τον παρατηρητή, διακρίνονται ο αχρωματικός φακός, το εσωτερικό Etalon και το ανακλαστικό φίλτρο.

αυτοσχέδιου σκίαστρου ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση της κάμερας, αλλά και για λόγους προστασίας του παρατηρητή (Σχήμα 4.2).

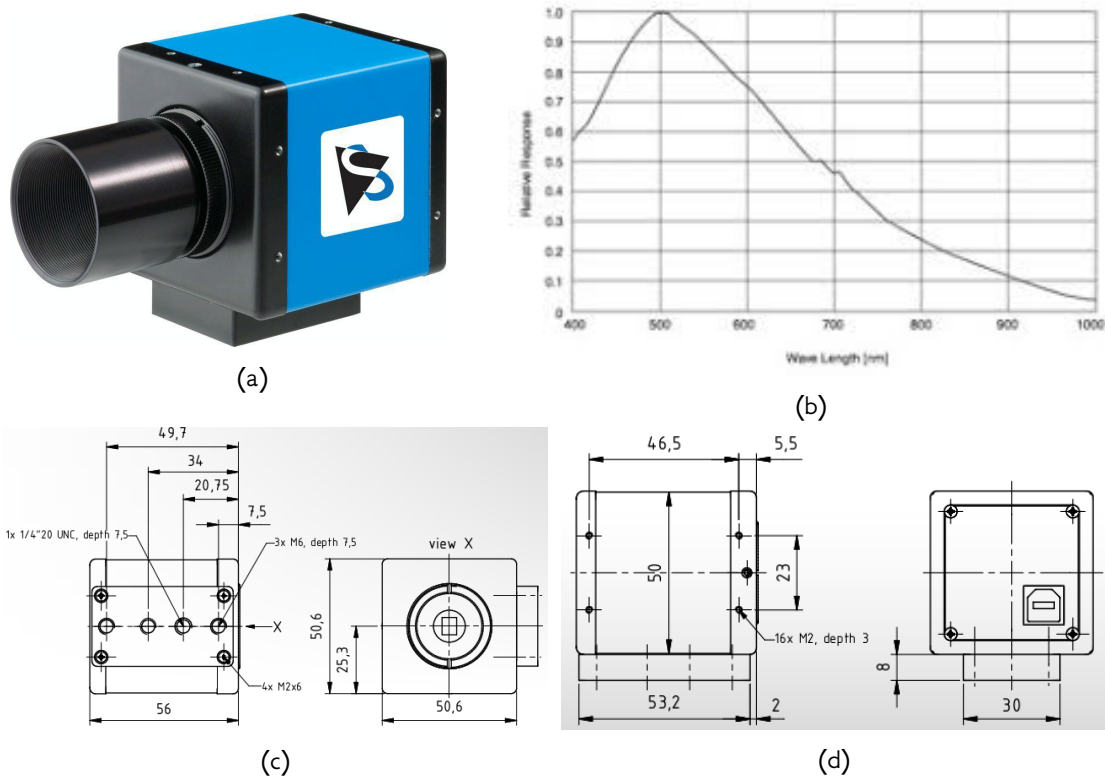
Το οπτικό σύστημα της *Lunt* αποτελείται, εκκινώντας από την είσοδο των οπτικών ακτίνων, από έναν εμπρόσθιο αχρωματικό φακό εξάλειψης χρωματικών σφαλμάτων, σφαιρικών εκτροπών, αστιγματισμού και άλλων σφαλμάτων των φακών, που μειώνει, κατά το δυνατόν, τα φανταστικά είδωλα και τις σκιές. Ακολουθεί το εσωτερικό φίλτρο (Etalon Fabry-Perot), το οποίο είναι εργοστασιακά κατασκευασμένο και βαθμονομημένο για παρατήρηση στη γραμμή Ηα. Το φίλτρο αυτό αποτελείται από έναν θαλαμίσκο κενού, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ δύο διορθωτικών φακών οπτικών ακτίνων, επιτρέποντας έτσι την αλλαγή της πίεσης στον χώρο περιμετρικά του θαλαμίσκου μέσω εξωτερικού κυλίνδρου με έμβολο, δίνοντας εν τέλει τη δυνατότητα μετατόπισης του μήκους κύματος παρατήρησης, λόγω συνεπαγόμενης αλλαγής του δείκτη διάθλασης (Σχήμα 4.3). Ακολουθεί το ανακλαστικό φίλτρο Herschel (blocking filter), το οποίο αποκόπτει ένα μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας και ανακλά το υπόλοιπο προσφέροντας έτσι ασφαλή παρατήρηση (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: (a) Η επίδραση του φίλτρου αποκοπής στην εισερχόμενη (μετά τη διέλευση από το Etalon) ακτινοβολία. (b) Τρεις τύποι φίλτρων Herschel: 1 - σφηνοειδές φίλτρο Herschel, 2 - φίλτρο χαμηλής πυκνότητας, 3 - προσοφθάλμιος φακός, 4 - φίλτρο πόλωσης μεταβλητής εκπομπής, 5 - ανακλαστικό πρίσμα.

4.1.2 Κάμερα

Για την αποτύπωση του ηλιακού δίσκου και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε αυτόν, χρησιμοποιήθηκε μονοχρωματική διάταξη στοιχείων συζευγμένου φορτίου (CCD). Η CCD κάμερα που επιστρατεύτηκε ήταν η DMK51AU02, της σειράς μονοχρωματικών καμερών DMK της Imaging Source (Σχήμα 4.5a). Η δυναμικού εύρους 8-bit διάταξη του αισθητήρα Sony ICX271AL, αποτελείται από 1600x1200 εικονοστοιχεία (pixels) διαστάσεων 4.4x4.4 μm έκαστο και προσφέρει σχεδόν πλήρη απεικόνιση του ηλιακού δίσκου. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά δίνουν τη δυνατότητα απεικόνισης ειδώλου με διακριτική ικανότητα περί τα 1.6 arcsec με κλίμακα ειδώλου 1.27"/pixel σε binning 1x1. Επιπλέον, η κάμερα έχει δυνατότητα καταγραφής άνω των 12fps (frames per second) και η φασματική της απόκριση εκτείνεται στα 400-950 nm (Σχήμα 4.5b). Ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά της, η μάζα της δεν ξεπερνάει τα 265g, γεγονός που σε συνδυασμό με τις διαστάσεις της (50.6x50.6x56 mm) την καθιστά ιδιαίτερα εύχρηστη (Σχήμα 4.5c, d).



Σχήμα 4.5: (a) Η κάμερα DMK51AU02. (b) Η φασματική απόκριση της κάμερας. (c,d) Διαγράμματα διαστάσεων της κάμερας.

4.2 Παρατηρήσεις

Ο σκοπός του προγράμματος είναι, μεταξύ άλλων, η λήψη ηλιακών παρατηρήσεων και η ενσωμάτωσή τους στον HELIOSERVER. Εν γένει επιχειρήθηκε να αυτοματοποιηθεί η λήψη και η επεξεργασία των παρατηρήσεων στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Αυτό επετεύχθη μέσα από την εφαρμογή ενός πρωτοκόλλου παρα-

τηρήσεων/διορθώσεων, το οποίο έγινε προσπάθεια να ακολουθείται σε κάθε ημέρα παρατήρησης. Στο Κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται τόσο η διαδικασία αυτή, όσο και οι δυσκολίες που απαντήθηκαν κατά την εφαρμογή της.

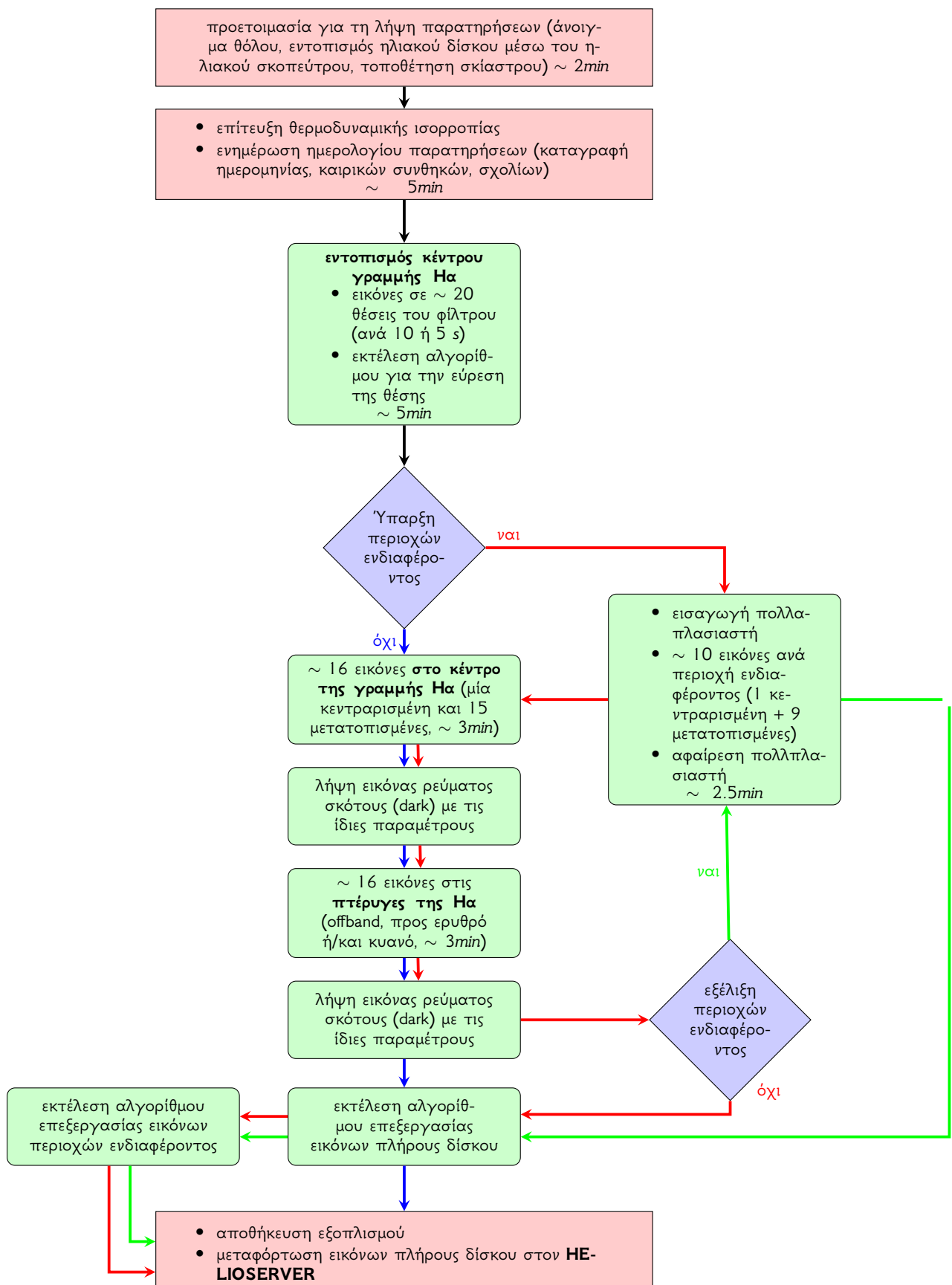
Οι παρατηρήσεις λαμβάνονταν είτε πριν, είτε μετά την άνω μεσουράνηση του Ήλιου, ανάλογα με την ημερομηνία παρατήρησης, σε γεωγραφικές συντεταγμένες $\varphi = 38^\circ$, $\lambda = 23^\circ$, στις εγκαταστάσεις του ΙΑΑΔΕΤ στην Πεντέλη, δηλαδή σε υψόμετρο 495 m. Η προετοιμασία του εξοπλισμού περιλαμβάνει το άνοιγμα του θόλου, την έναρξη της λειτουργίας της ρομποτικής στήριξης, τον εντοπισμό του Ήλιου μέσω του ειδικού ηλιακού σκοπεύτρου και την προσθήκη του προτατευτικού σκίαστρου. Το σύστημα αφήνεται ως έχει για περίπου 20 λεπτά έως ότου επιτευχθεί μία υποτυπώδης θερμοδυναμική και θερμική ισορροπία του οπτικού συστήματος με το περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, καταγράφονται οι ατμοσφαιρικές συνθήκες της ημερομηνίας και ώρας παρατήρησης, μέσω του Μετεωρολογικού σταθμού Πεντέλης, του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, ο οποίος διατηρεί εξωτερικό σταθμό καταγραφής ατμοσφαιρικών συνθηκών σε μικρή απόσταση από τον θόλο (Σχήμα 4.6). Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν πληροφορίες για την ασφαλή λειτουργία της κάμερας και του οπτικού συστήματος, όπως τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, την ατμοσφαιρική πίεση, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου και την τιμή της ηλιακής σταθεράς, καθώς



Σχήμα 4.6: Εικόνα από την εξωτερική κάμερα των εγκαταστάσεων στην Πεντέλη (penteli.meteo.gr).

τα παραπάνω επηρεάζουν την ποιότητα των παρατηρήσεων.

Μετά το πέρας αυτού του χρονικού διαστήματος, λαμβάνεται μία αρχική εικόνα με κλειστό το καπάκι της κάμερας. Η μέτρηση αυτή καταγράφει το προϋπάρχον φορτίο της CCD, το λεγόμενο Bias, το οποίο, ειδικά στις ηλιακές παρατηρήσεις, είναι αμελητέο. Έπειτα, η κάμερα τοποθετείται στην είσοδο του φίλτρου αποκοπής στη θέση του προσοφθάλμιου φακού ώστε να ξεκινήσει η καταγραφή. Η διαδικασία της καταγραφής χωρίζεται σε τρία μέρη: **βαθμονόμηση του φίλτρου (εντοπισμός κέντρου γραμμής Η α)**, **παρατηρήσεις πλήρους δίσκου**, **παρατηρήσεις περιοχών ενδιαφέροντος**. Η παραπάνω διαδικασία καθώς και οι ενέργειες που εκτελούνται πριν μετά το πέρας αυτής (προετοιμασία εξοπλισμού, διορθώσεις παρατηρήσεων, εφαρμογή τεχνικών ενίσχυσης φαινομένων στις προκύπτουσες εικόνες κλπ.), συνοψίζονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 4.7) και αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω.



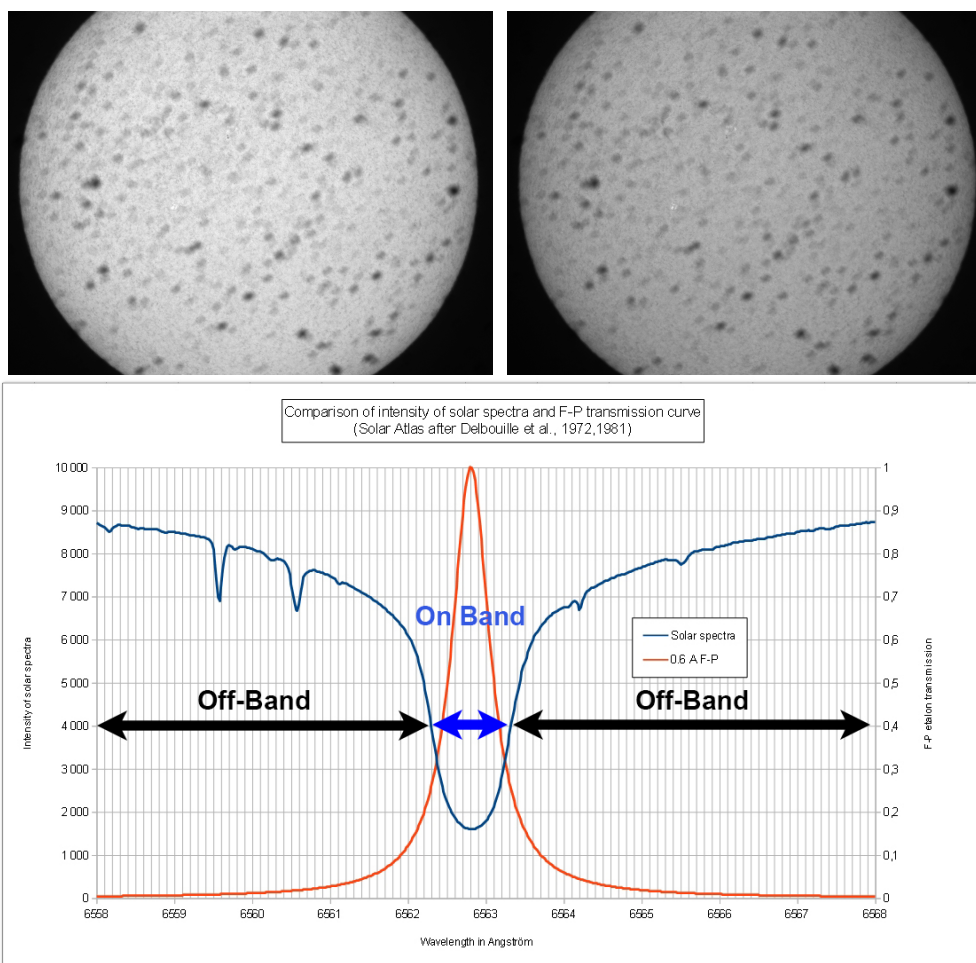
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας λήψης και επεξεργασίας των παρατηρήσεων.

4.2.1 Εντοπισμός του κέντρου της γραμμής Ηα

Η διαδικασία που ακολουθεί υιοθετήθηκε με σκοπό να εντοπίζεται η θέση του εμβόλου του θαλάμου του Etalon, για την οποία παρατηρούμε ακριβώς στο κέντρο της γραμμής Ηα. Έχοντας τοποθετήσει μία μικρομετρική κλίμακα στον κυλινδρικό θάλαμο, λαμβάνουμε περίπου 15 εικόνες του Ήλιου περιστρέφοντας το καπάκι του θαλάμου, έτσι ώστε να μετατακινείται κατά 0,5, mm σε μία αριθμημένη κλίμακα 20 θέσεων (0-20, 1 θέση/0,5 mm, Σχήμα 4.8). Ο χρόνος έκθεσης που επιλέγεται για τις εικόνες αυτές είναι περίπου $1/400 \text{ s} \approx 25 \text{ ms}$ ώστε η κάμερα να μην κινδυνεύει με υπερέκθεση ή υποέκθεση σε καμία από τις θέσεις αυτές (Σχήμα 4.9). Στη συνέχεια, επιστρατεύεται μία



Σχήμα 4.8: Η μικρομετρική κλίμακα του φίλτρου.



Σχήμα 4.9: **Επάνω:** δύο από τις συνολικά 15 ακατέργαστες κεντραρισμένες εικόνες του ηλιακού δίσκου που λαμβάνονται σε διαφορετικές θέσεις του φίλτρου με σκοπό την εύρεση του κέντρου της γραμμής Ηα. Καθώς μετακινούμε το καπάκι μετατοπιζόμαστε προς το κέντρο της γραμμής με αποτέλεσμα οι εικόνες να γίνονται σκοτεινότερες για δεδομένο χρόνο έκθεσης. **Κάτω:** τυπικό προφίλ της γραμμής απορρόφησης της Ηα (μπλε γραμμή) και το προφίλ εκπομπής ενός Fabry-Perot Etalon στα ίδιο μήκος κύματος (www.astrosurf.com).

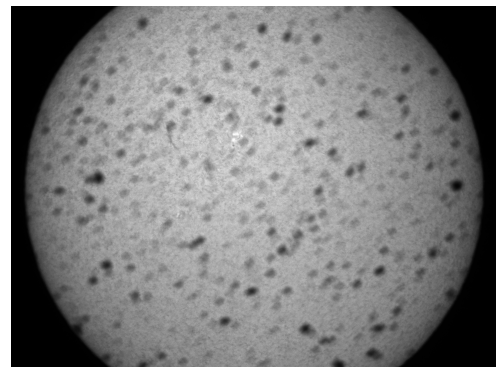
ρουτίνα γραμμένη σε κώδικα IDL (βλ. Κώδικα 1, Παράρτημα Α'), η οποία υπολογίζει την ελάχιστη τιμή του προφίλ της έντασης της γραμμής Ηα (η οποία είναι γραμμή απορρόφησης) για κάθε θέση του φίλτρου, κρατάει την μικρότερη από αυτές τις τιμές και τελικά μας δίνει τη θέση της κλίμακας του φίλτρου, στην οποία εκτιμάται ότι βρίσκεται το κέντρο της γραμμής απορρόφησης (Σχήμα 4.9). Το φασματικό εύρος διέλευσης της γραμμής με τη χρήση μόνο του εσωτερικού Etalon εκτιμάται σε $\sim 0,7 \text{ \AA}$.

4.2.2 Παρατηρήσεις πλήρους ηλιακού δίσκου

Με το φίλτρο ρυθμισμένο στη θέση που υπολογίστηκε ως κέντρο της γραμμής, γίνεται η έναρξη των παρατηρήσεων για την παραγωγή εικόνων πλήρους δίσκου. Είναι γνωστό ότι ο ηλιακός δίσκος έχει διάμετρο $\sim 32 \text{ arcmin} = 1920 \text{ arcsec}$. Όπως προαναφέρθηκε, η κλίμακα ειδώλου εκτιμάται περίπου στα $1,27 \text{ arcsec/pixel}$ (§4.1.2). Δεδομένου ότι η συστοιχία του τσιπ της κάμερας αποτελείται από $1600 \times 1200 \text{ pixels}$ έχουμε συνολικό πεδίο απεικόνισης $2032 \times 1524 \text{ arcsec}$, αποκλείοντας έτσι καταγραφή ολόκληρης της ηλιακής διαμέτρου (άρα και του πλήρους δίσκου) στον έναν άξονα (Σχήμα 4.10).

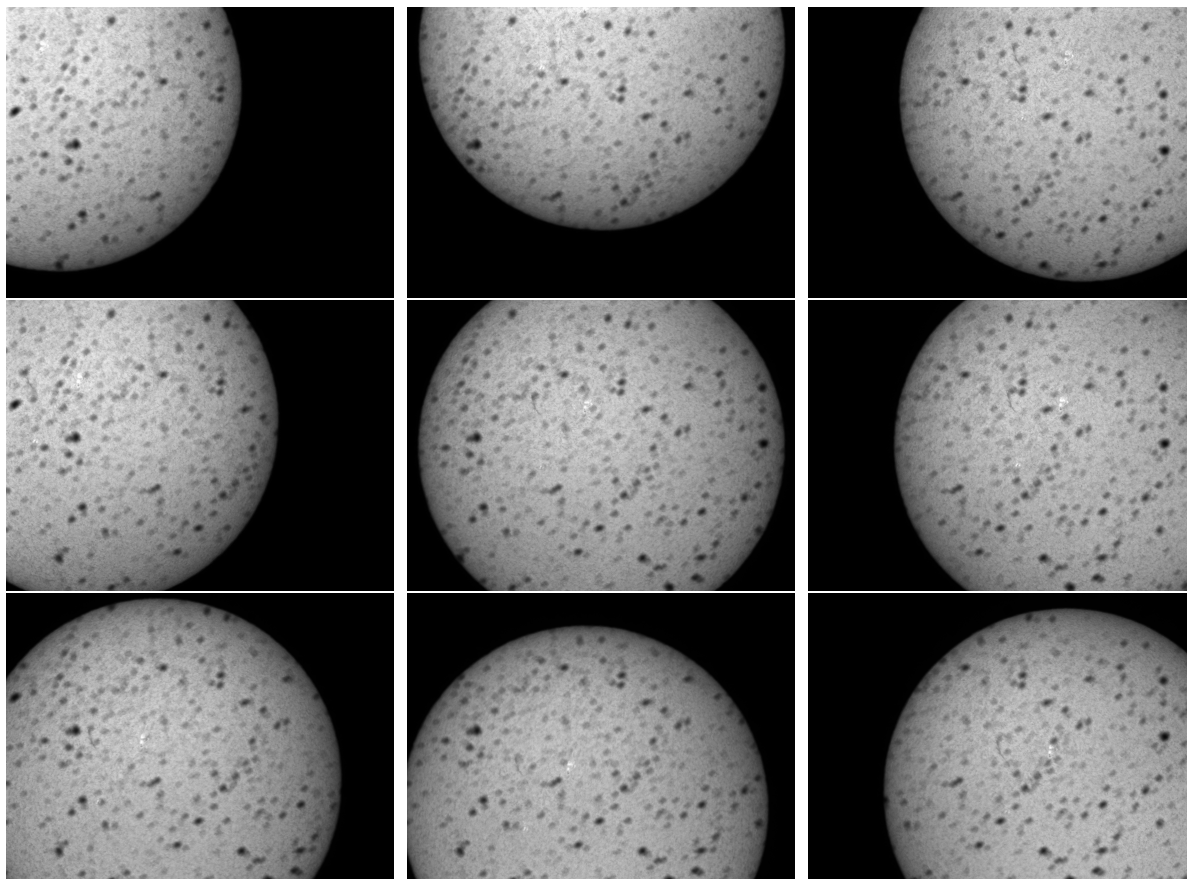
Η συνέχεια της διαδικασίας αφορά την κατασκευή εικόνων πλήρους δίσκου και τη δημιουργία εικόνας απόκρισης (*flat-field*). Ένας τυπικός χρόνος έκθεσης, ο οποίος επιλέγεται έπειτα από έλεγχο και του ιστογράμματος, είναι τα $1/217 \text{ s} \simeq 4,5 \text{ ms}$ με αντίστοιχη απολαβή, $\text{gain} = 185 \text{ e}^-/\text{ADUs}$ ($\text{ADUs} \equiv \text{counts}$). Τα παραπάνω νούμερα είναι ενδεικτικά και μεταβάλλονται αναλόγως των καιρικών συνθηκών, της τοποθεσίας και των οργάνων παρατήρησης. Μετά την εστίαση του ειδώλου λαμβάνεται μία κεντραρισμένη εικόνα και ~ 15 μετατοπισμένες, σε σχέση με το κέντρο του οπτικού πεδίου καταγραφής¹, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μεταγενέστερο στάδιο για την κατασκευή της εικόνας απόκρισης (βλ. 4.3.1) με ρυθμό λήψης 1 εικόνα/4 s και συνολική διάρκεια $\sim 2.5 \text{ min}$ (Σχήμα 4.11). Ο προσανατολισμός της κάμερας έχει επιλεγεί έτσι, ώστε οι μετατοπίσεις του οπτικού συστήματος κατά την ορθή αναφορά (*RA*) και την απόκλιση (δ), να συνεπάγονται την ίδια μετατόπιση του ηλιακού δίσκου στο οπτικό πεδίο της κάμερας, ανεξαρτήτως της ημέρας παρατήρησης. Το τελευταίο γεγονός λαμβάνεται υπόψιν και κατά τις διορθώσεις (§4.3).

Μετά την λήψη της πρώτης σειράς εικόνων,



Σχήμα 4.10: Ακατέργαστη εικόνα από παρατηρήσεις της 19ης Μαρτίου 2019. Οι μετατοπισμένες εικόνες χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της εικόνας απόκρισης (*flat field*) και για τη σύνθεση του μωσαϊκού της εικόνας πλήρους δίσκου (*full-disk*).

¹Γενικά ενδείκνυται οι εικόνες για την κατασκευή της εικόνας απόκρισης να λαμβάνονται αφεστιασμένες. Παρ' όλα αυτά, οι ίδιες εικόνες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μωσαϊκού σε παρατηρήσεις σχεδόν πλήρους δίσκου, με αποτέλεσμα να λαμβάνονται με το είδωλο εστιασμένο.



Σχήμα 4.11: Πακέτο παρατηρήσεων της 19ης Μαρτίου 2019, όπου φαίνεται η κεντραρισμένη εικόνα και οι επτά από τις συνολικά 15 μετατοπισμένες ως προς αυτήν εικόνες, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της εικόνας απόκρισης και του μωσαϊκού του πλήρους δίσκου.

η κάμερα αφαιρείται από το οπτικό σύστημα και λαμβάνεται μία εικόνα με κλειστό το καπάκι στον ίδιο χρόνο έκθεσης και *gain*. Αυτή είναι η εικόνα *ρεύματος σκότους* (*dark current*) που αποτυπώνει τον ψηφιακό θόρυβο κατά την λειτουργία της CCD και το οποίο είναι εν γένει, $dark = dark(t, T)$, όπου t ο χρόνος έκθεσης και T η μέση θερμοκρασία τη κάμερας. Ακολουθώς, η κάμερα επανατοποθετείται και το φίλτρο μετακινείται κατά 2 – 3 θέσεις προς μικρότερα ή και μεγαλύτερα μήκη κύματος για τη λήψη παρατηρήσεων εκτός του κέντρου γραμμής (*offband*). Το σύστημα αφήνεται ένα χρονικό διάστημα κάποιων λεπτών, ούτως ώστε να επέλθει θερμική και θερμοδυναμική ισορροπία στον θάλαμο του φίλτρου, μετά την πάροδο του οποίου η διαδικασία λήψης εικόνων επαναλαμβάνεται²

4.2.3 Παρατηρήσεις περιοχών ενδιαφέροντος

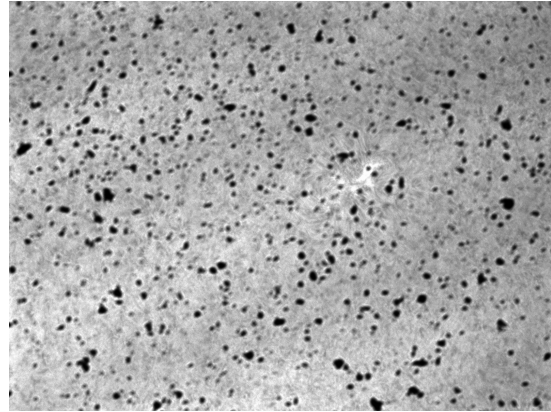
Οι παρατηρήσεις περιοχών ενδιαφέροντος λαμβάνονται στην περίπτωση που παρατηρείται κάποιο φαινόμενο στη χρωμόσφαιρας του Ήλιου με σκοπό αυτό καταγραφεί/μελετηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται πριν ή/και μετά τις κυρίως παρατηρήσεις, εφόσον υπάρχουν χρωμοσφαιρικά

²Η εικόνα ρεύματος σκότους λαμβάνεται εκ νέου για τα δεδομένα λήψης των *offband* εικόνων.

φαινόμενα (πχ. ενεργός περιοχή, κηλίδα, φαινόμενο χείλους κλπ.), άξια παρατήρησης.

Η μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος επιτυγχάνεται με τη χρήση του πολλαπλασιαστή (Powermate 2.5x), ο οποίος αυξάνει την εστιακή απόσταση και μικραίνει αναλόγως το οπτικό πεδίο περιορίζοντάς το στα 812×609 arcsecs με κλίμακα ειδώλου $0,508''/\text{pixel} \rightarrow 367 \text{ km}/\text{pixel}$. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η ακρίβεια του οργάνου είναι $\sim 1''$ μπορούμε να εκτελούμε τη λήψη σε ομαδοποίηση εικονοστοιχείων (binning) 2×2 ώστε να διερύνουμε στα $1,016''/\text{pixel}$. Με τις παραπάνω

ρυθμίσεις μπορούμε να διακρίνουμε δομές του Ήλιου έκτασης $\geq 750 \text{ km}$. Επιλέγονται κατά βάση μικροί χρόνοι έκθεσης και υψηλότερες τιμές απολαβής (*gain*) και αντίθεσης (*gamma*, Σχήμα 4.12). Ο λόγος είναι ότι οι τυρβώδεις κινήσεις γίνονται εντονότερες σε τέτοιες μεγεθύνσεις και το μέτωπο του κύματος (*seeing*) είναι συνήθως συγκρίσιμο με την ακρίβεια του οργάνου επηρεάζοντας τα είδωλα σε μεγάλο βαθμό. Ο μικρός χρόνος έκθεσης αυξάνει την πιθανότητα καταγραφής στατικού, ευκρινούς ειδώλου, ενώ οι αυξημένες τιμές απολαβής εισάγουν θόρυβο ο οποίος, ωστόσο, είναι αμελητέος σε αυτούς τους χρόνους έκθεσης και εξαλείφεται σε μεγάλο βαθμό με την αφαίρεση του φορτίου *dark*. Τυπικές τιμές χρόνων έκθεσης είναι τα $1/45 \text{ s} = 22 \text{ ms}$ με $\text{gain} = 47 \text{ e}^-/\text{ADUs}$ σε διαταραγμένη ατμόσφαιρα. Τη λήψη των εικόνων περιοχής ενδιαφέροντος ακολουθεί η λήψη, μία συνήθως, εικόνας ρεύματος σκότους με κλειστό το καπάκι στον ίδιο χρόνο έκθεσης, απολαβής και αντίθεσης.



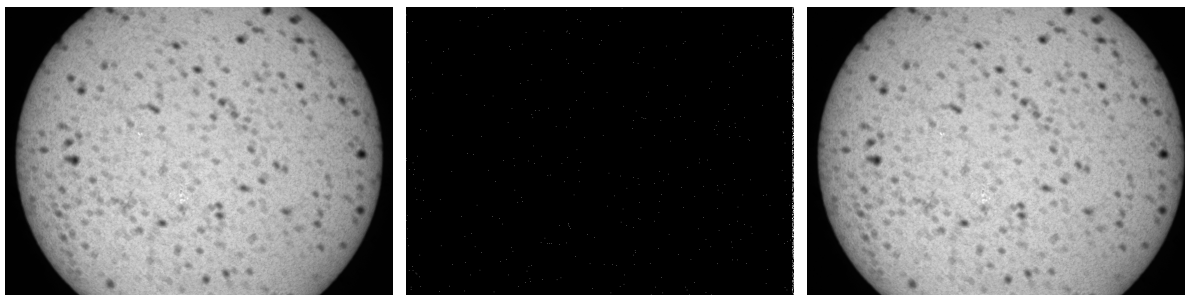
Σχήμα 4.12: Ακατέργαστη εικόνα της από παρατηρήσεις της 20 Ιανουαρίου 2019 όπου διακρίνεται μία ενεργός περιοχή.

4.3 Σφάλματα και διορθώσεις

Μετά το πέρας των παρατηρήσεων, ακολουθεί η επεργασία των δεδομένων. Οι εικόνες εισάγονται σε κώδικες IDL, οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί και εκτελούν τις απαραίτητες διορθώσεις (βλ. Κώδικα 2, Παράρτημα Α'). Οι διορθώσεις μεταξύ παρατηρήσεων ευρέως πεδίου και περιοχών ενδιαφέροντος, εκτελούνται ξεχωριστά. Η τελική εικόνα των δεδομένων ευρέως πεδίου χαρτογραφείται και μεταφορτώνεται στον HELIOSERVER. Παρακάτω αναπτύσσονται τα δύο αυτά σκέλη επεξεργασίας: **Διορθώσεις πλήρους δίσκου, Διορθώσεις περιοχών ενδιαφέροντος.**

4.3.1 Διορθώσεις δεδομένων πλήρους δίσκου

Η πρώτη διόρθωση που εκτελείται, αφορά το ρεύμα σκότους (*dark current*, Κώδικας 2, Παράρτημα Α'). Η εικόνα του ρεύματος σκότους αφαιρείται από όλες τις εικόνες. Στις ηλιακές παρατηρήσεις, όπου οι χρόνοι έκθεσης είναι μικροί και ο

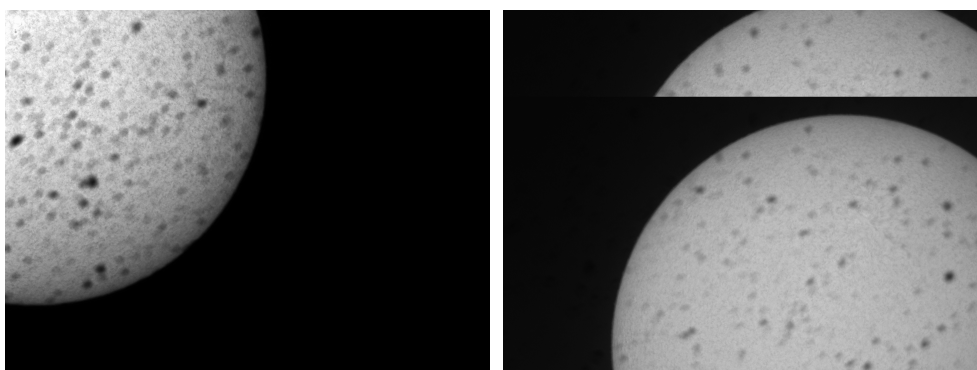


Σχήμα 4.13: Από αριστερά προς τα δεξιά: ακατέργαστη εικόνα (πριν τη διόρθωση για το ρεύμα σκότους), η εικόνα του ρεύματος σκότους και η εικόνα μετά την αφαίρεση ρεύματος σκότους.

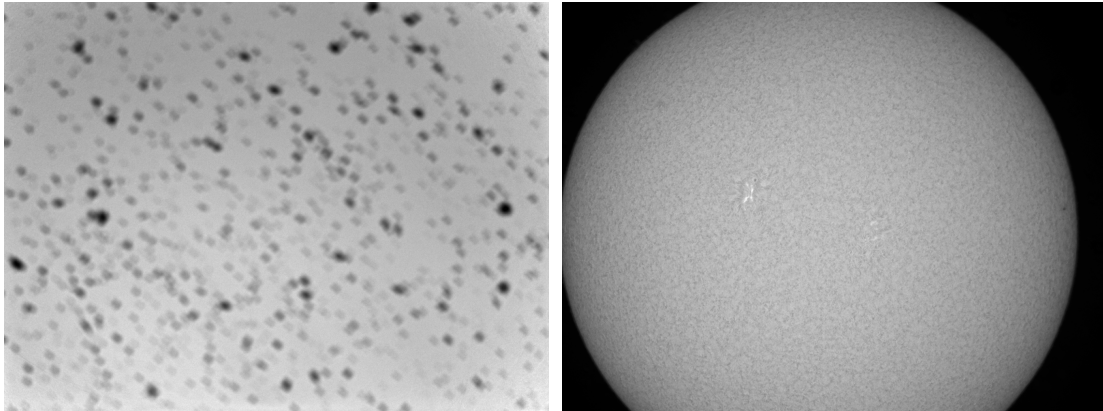
αριθμός φωτονίων μεγάλος, η διόρθωση είναι αμελητέα και αντιστοιχεί σε μικρό ποσοστό ($< 1\%$) των ψηφιακών καταγεγραμμένων μονάδων (counts) της εικόνας (Σχήμα 4.13).

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα κέντρα και οι μετατοπίσεις $(x(i) - x_0, y(i) - y_0)$, όπου x_0, y_0 η θέση του κέντρου του ηλιακού δίσκου, όπως υπολογίζεται από τη ρουτίνα) των εικόνων (Σχήμα 4.11) σε σχέση με την κεντρική, αφού εντοπιστεί το όριο του χείλους του Ήλιου για κάθε εικόνα. Ακολουθεί διαλογή δεδομένων, κατά την οποία απορρίπτονται εικόνες με μεγάλες μετατοπίσεις ή τον ηλιακό δίσκο εκτός πεδίου. Ο κώδικας υπολογίζει την ακτίνα και προσθέτει στα κριτήρια διαλογής την τιμή της. Αν δεχτούμε ότι η φαινόμενη διάμετρος του Ήλιου είναι $\sim 1920 \text{ arcsec}$, τότε δοθήσεις ακτίνας 960 arcsec σε κλίμακα ειδώλου, $1,27 \text{ arcsec/pixel}$ αναμένουμε στο επίπεδο καταγραφής της CCD (chip), ο Ήλιος να καταλαμβάνει $\sim 756 \text{ pixels}$. Με βάση τα παραπάνω το κριτήριο διαλογής δέχεται εικόνες με ακτίνα ηλιακού δίσκου $\geq (r(i) + 10 \text{ pixels})$, όπου $r(i)$ η μέση (median) τιμή σε pixels των υπολογισμένων από τη ρουτίνα ακτίνων (απο το σύνολο των εικόνων). Παράλληλα ελέγχεται αν η τιμή αυτή συμπίπτει με την αναμενόμενη. Με τον τρόπο αυτόν, απορρίπτονται οι θολές εικόνες, οι εσφαλμένες εικόνες που ενδεχομένως προέκυψαν από κραδασμούς του οπτικού συστήματος (λόγω ριπής ανέμου παραδείγματος χάριν) ή και εικόνες στις ο δίσκος έχει ληφθεί κοντά στα όρια του πεδίου (Σχήμα 4.14).

Εν συνεχεία, οι μετατοπίσεις των εικόνων που έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιούνται τόσο για την κατασκευή του μωσαϊκού που συνθέτει τον πλήρη ηλιακό δίσκο,

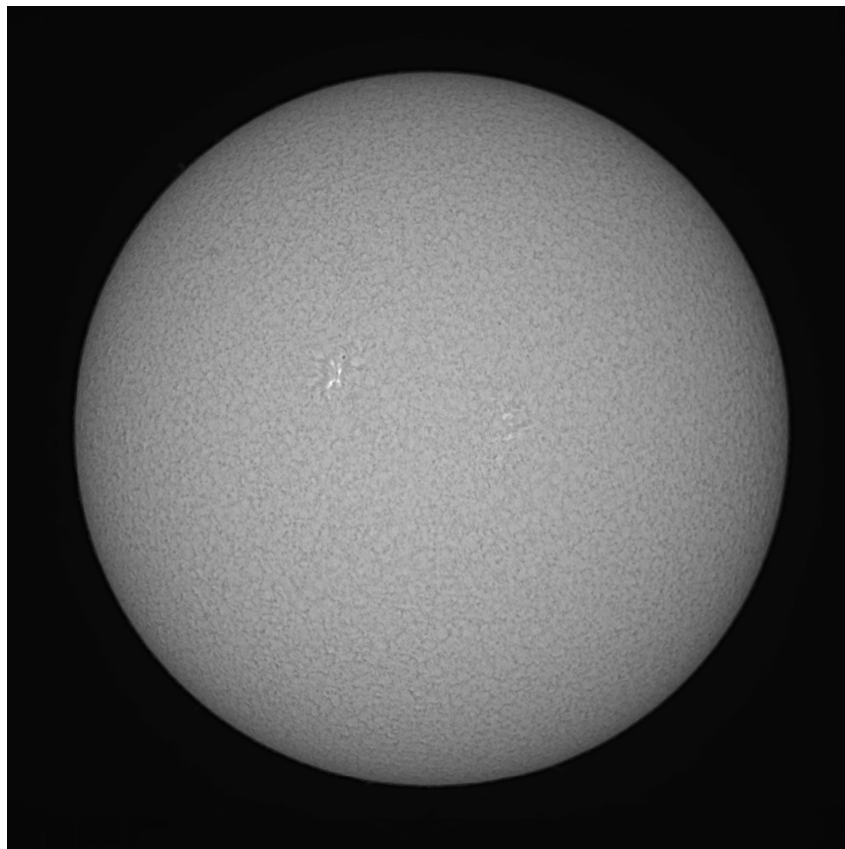


Σχήμα 4.14: Παραδείγματα εικόνων που απορρίφθηκαν από τον κώδικα κατά τη διαδικασία διαλογής.

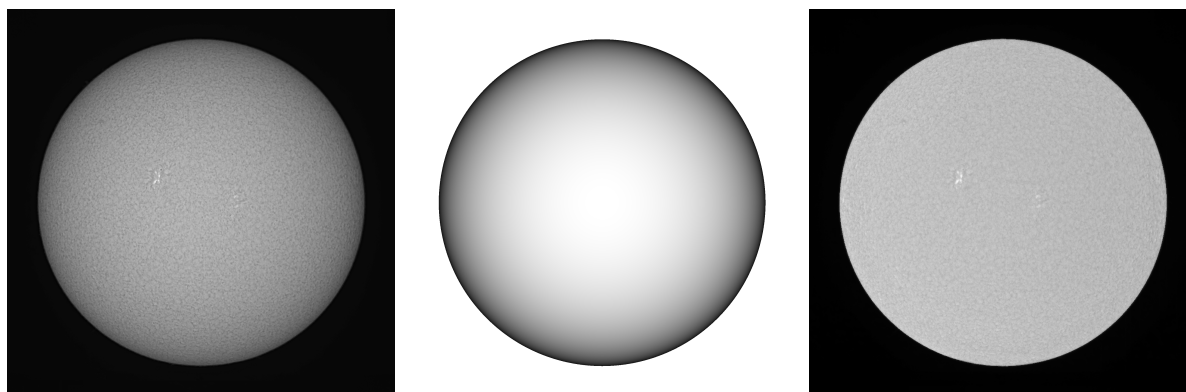


Σχήμα 4.15: Εικόνα απόκρισης (αριστερά) και εικόνα του ηλιακού δίσκου (δεξιά) μετά τη διαίρεση με την πρώτη, από παρατηρήσεις της 8ης Μαρτίου 2019.

όσο και για τον υπολογισμό της εικόνας απόκρισης (flat field) από τις διορθωμένες για το ρεύμα σκότους εικόνες. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι εκείνη των Kuhn et al. (1991), η οποία χρησιμοποιεί τις μετατοπισμένες εικόνες ώστε να εξάγει τον πίνακα απόκρισης (*gain table*) με την παραδοχή ότι το αντικείμενο παρατήρησης δεν αλλάζει σημαντικά κατά τις μετατοπίσεις των εικόνων. Με την παραπάνω παραδοχή μπορούμε να δεχτούμε ότι $s_i(\vec{x}) = s(\vec{x} - \vec{a}_i)$, όπου s_i το εισερχόμενο σήμα που είχε ως αποτέλεσμα την i εικόνα, \vec{x} το διάνυσμα θέσης ενός εικονοστοιχείου και \vec{a}_i το διάνυσμα κατά το οποίο μετατοπίστηκε η εικόνα σε σχέση με την κεντρική.



Σχήμα 4.16: Η προκύπτουσα εικόνα μετά τη σύνθεση του μωσαϊκού από τις διορθωμένες από ρεύμα σκότους και διαιρεμένες με την εικόνα απόκρισης, εικόνες. Η τελική εικόνα κατασκευάστηκε από παρατηρήσεις της 8ης Μαρτίου 2019.

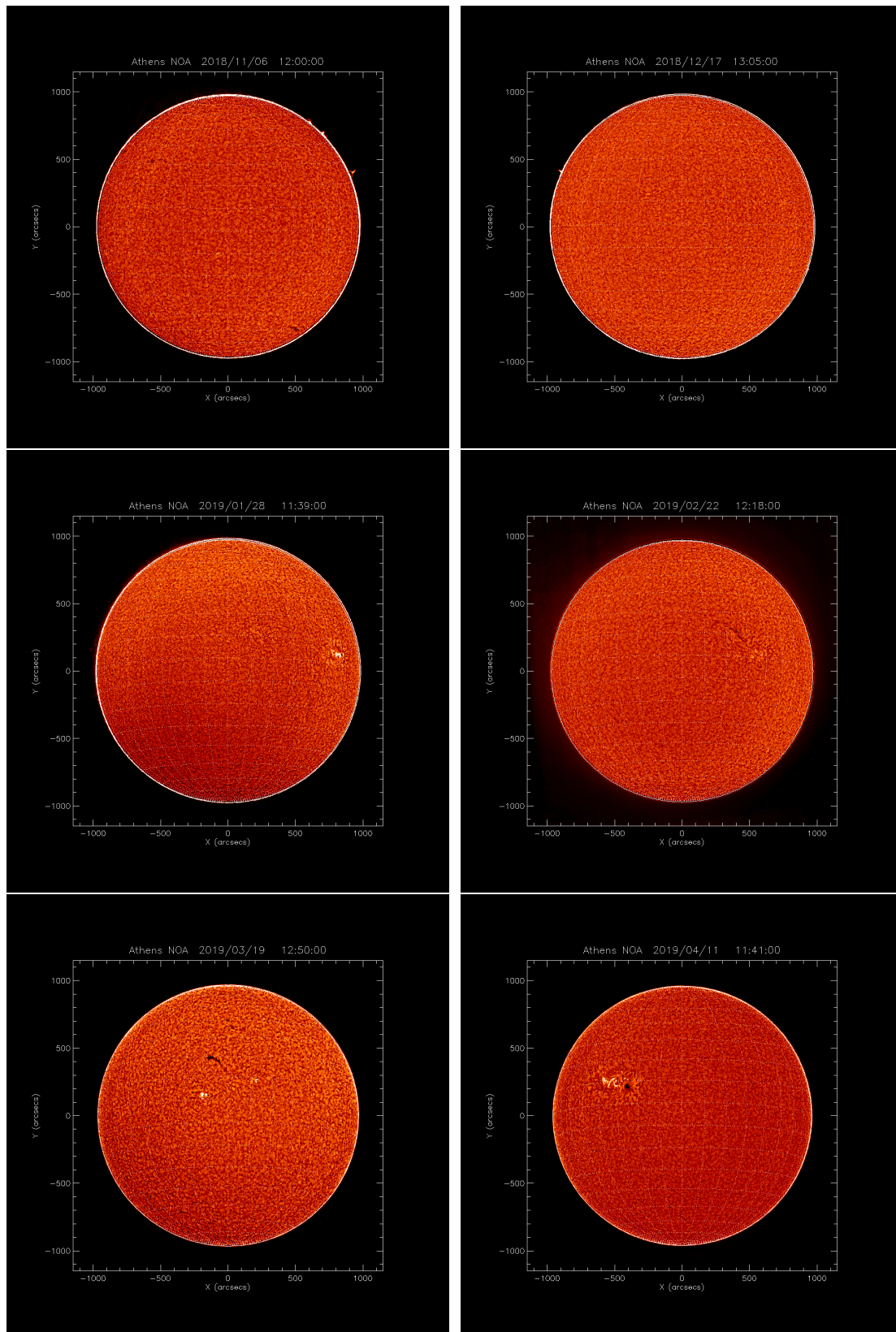


Σχήμα 4.17: Από αριστερά προς τα δεξιά: η αρχική εικόνα πλήρους δίσκου, η εικόνα της συνάρτησης αμαύρωσης χείλους και η διορθωμένη, ομοιόμορφα κατανομημένης έντασης του φωτός εικόνα, από παρατηρήσεις της 8ης Μαρτίου 2019.

Τελικά, το καταγραφόμενο σήμα είναι $d_i(\vec{x}) = g(\vec{x})s_i(\vec{x})$, όπου $g(\vec{x})$ είναι ο πίνακας (εικόνα) απόκρισης. Το πρόβλημα ανάγεται κατόπιν στη μαθηματική επίλυση της εξίσωσης $\frac{d_i(\vec{x} + \vec{a}_i)}{d_j(\vec{x} + \vec{a}_j)} = \frac{g_i(\vec{x} + \vec{a}_i)}{g_j(\vec{x} + \vec{a}_j)}$ για την εύρεση του g . Η διαίρεση με την εικόνα απόκρισης που προκύπτει επιτυγχάνει, εν τέλει, την αφαίρεση των οφειλόμενων σε κόκκους σκόνης σκιών στην εικόνα, των ενδεχόμενων σφάλματων λόγω συσσωρευμένης υγρασίας, των ανομοιομορφιών στην φασματική απόκριση μεμονωμένων εικονοστοιχείων και άλλων παραγόντων που σκιάζουν το είδωλο. Ο υπολογισμός του πίνακα απόκρισης και η διαίρεση όλων των εικόνων με αυτόν προηγείται της κατασκευής του μωσαϊκού (Σχήμα 4.15, βλ. Κώδικα 2, Παράρτημα Α').

Κατά την κατασκευή του μωσαϊκού δημιουργείται ένας πίνακας διαστάσεων 1800×1800 pixels για τη σύνθεση του πλήρους ηλιακού δίσκου. Εξάγεται έπειτα η μέση τιμή των ζευγών εικονοστοιχείων (i,j) από το σύνολο των εικόνων και εισάγεται στο κατασκευασμένο πεδίο (βλ. Κώδικα 2, Παράρτημα Α'). Το αποτέλεσμα είναι μία εικόνα-μωσαϊκό διαστάσεων 1800×1800 pixels, το οποίο εμπεριέχει τον πλήρη ηλιακό δίσκο (Σχήμα 4.16).

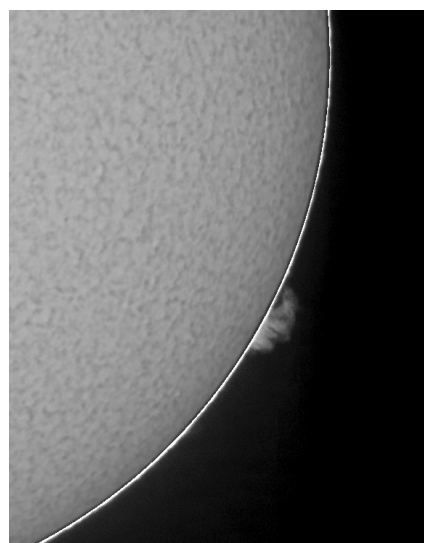
Ακολουθεί η διόρθωση του φαινομένου αμαύρωσης χείλους του ηλιακού δίσκου (limb darkening correction). Στόχος είναι να εξαληφθεί η μείωση της έντασης του φωτός από το κέντρο του Ήλιου έως το χείλος του. Επιστρατεύεται λοιπόν, μία ρουτίνα υπολογισμού της συνάρτησης αμαύρωσης χείλους (limb darkening function, Κώδικας 2, Παράρτημα Α') με την οποία, εν τέλει, διαιρούμε την εικόνα του Ήλιου, ώστε να επέλθει ομοιομορφία στην κατανομή της έντασης του φωτός (Σχήμα 4.17). Η ρουτίνα προσαρμόζει ένα πολυώνυμο 5ης τάξης σε σταθερές οι οποίες έχουν εξαχθεί από αστροφυσικές παραμέτρους, με σκοπό να εξαγωγή της εν λόγω συνάρτησης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για συγκεκριμένο μήκος κύματος ή για δοσμένο εύρος μηκών κύματος. Τη διόρθωση αμαύρωσης χείλους ακολουθεί η διόρθωση των μη ακτινικών ανομοιομορφιών στην κατανομή της έντασης του φωτός. Αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλης ρουτίνας η οποία υπολογίζει τον εξομαλυσμένο δίσκο με ολοένα και μικρότερες ακτίνες εξομάλυνσης και εν τέλει τον αφαιρεί από την εικόνα.



Σχήμα 4.18: Διορθωμένες χαρτογραφημένες εικόνες του ηλιακού δίσκου από διάφορες ημέρες παρατήρησης. Στην εικόνα της 6ης Νοεμβρίου 2018 διακρίνονται και φαινόμενα χείλους.

4.3.2 Ανάδειξη ηλιακών φαινομένων

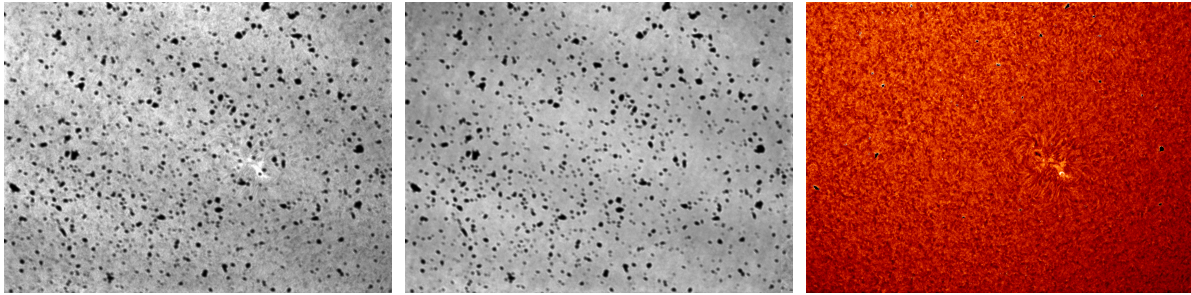
Το τελικό στάδιο επεργασίας αφορά την ανάδειξη χρωμοσφαιρικών φαινομένων ηλιακού δίσκου και ηλιακού χείλους και την αποτύπωσή του σε χάρτη ηλιογραφικών συντεταγμένων. Μία μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αύξηση της αντίθεσης είναι η αναβαθμονόμηση των τιμών κάθε εικονοστοιχείων από το εύρος $[0, max]$ σε ένα επιλεγμένο $[min, max']$ πριν ή/και μετά τις κυρίως παρατηρήσεις, εφόσον υπάρχουν χρωμοσφαιρικά φαινόμενα. Με τον τρόπο αυτόν αναδεικνύονται οι σκοτεινές και οι φωτεινές περιοχές που αντιπροσωπεύουν φαινόμενα του ηλιακού δίσκου (Σχήμα 4.18, Κώδικας 2, Α'). Ένας άλλος τρόπος είναι η συνέλιξη (convolution) της εικόνας με έναν πίνακα/πυρήνα μετασχηματισμού. Στις παρακάτω εικόνες χρησιμοποιείται κυρίως η πρώτη μέθοδος (βλ. Κώδικα 2, Παράρτημα Α'). Για την ανάδειξη των φαινομένων χείλους του Ήλιου χρησιμοποιείται η ίδια εικόνα αλλά κατάλληλα αναβαθμονομημένη σε τιμές υπερέκθεσης. Ο λόγος είναι ότι οι ψηφιακές καταγεγραμμένες μονάδες (counts) ακόμη και για τις εντονότερες προεξοχές δεν ξεπερνούν το 10% των αντίστοιχων της σκοτεινότερης περιοχής του ηλιακού δίσκου. Επομένως, προκειμένου να εντοπίζονται τα φαινόμενα χείλους, θα πρέπει η εικόνα να συντίθεται από την αρχική στην ίδια σε υπερέκθεση (Σχήμα 4.19). Ο κώδικας μετασχηματίζει της συντεταγμένες (x, y) σε ζεύγη πολικών συντεταγμένων (r, θ) και εισάγει τα στοιχεία της υπερεκτεθειμένης εικόνας στην αρχική, αντικαθιστώντας κάθε στοιχείο με συντεταγμένες $(r \geq r_0, \theta)$. Ο κώδικας μετασχηματίζει την τελική εικόνα, την χρωματίζει κατάλληλα και την αποτυπώνει σε χάρτη ηλιογραφικών συντεταγμένων με κατάλληλο προσανατολισμό, μέσα από μια αλληλουχία εντολών της IDL (Κώδικας 2, Παράρτημα Α', Σχήμα 4.18).



Σχήμα 4.19: Προεξοχή στο ηλιακό χείλος από παρατηρήσεις της 16ης Οκτωβρίου 2018.

4.3.3 Διορθώσεις δεδομένων περιοχών ενδιαφέροντος

Στην περίπτωση των παρατηρήσεων περιοχών ενδιαφέροντος χρησιμοποιούμε διαφορετική μέθοδο για τη δημιουργία της εικόνας απόκρισης. Η μέθοδος αυτή εισήχθη από τον Chae (2004) και χρησιμοποιεί, όπως και η μέθοδος των Kuhn et al. (1991) που περιγράψαμε (§4.3.1), μετατοπισμένες εικόνες ανάγοντας ωστόσο το πρόβλημα στη μαθηματική επίλυση της σχέσης $a = of + n$, όπου a η καταγεγραμμένη εικόνα, o η προσπίπτουσα πληροφορία, f η συνάρτηση απόκρισης (από εδώ προκύπτει η εικόνα απόκρισης) και n ο θόρυβος τους ανιχνευτή (θεωρείται ότι το ρεύμα σκότους έχει αφαιρεθεί) με τελικό στόχο τον προσδιορισμό της f . Η



Σχήμα 4.20: Από αριστερά προς τα δεξιά: η αρχική ακατέργαστη εικόνα σε ομαδοποίηση εικονοστοιχείων (binning) 1×1 , η εικόνα απόκρισης της μεθόδου Chae (2004) και η τελική εικόνα η οποία έχει διαιρεθεί με την εικόνα απόκρισης έχει αφαιρεθεί από αυτήν το ρεύμα σκότους, έχει χρωματιστεί και έχουν εφαρμοστεί τεχνικές ενίσχυσης της ευκρίνειας των φαινομένων.

μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι λαμβάνει υπόψιν τις ανομοιόμορφα φωτισμένες εικόνες, βρίσκει τις μετατοπίσεις και υπολογίζει τον χρόνο των αριθμητικών ολοκληρώσεων που πραγματοποιεί. Η προκύπτουσα εικόνα απόκρισης εξαλείφει, εκτός των άλλων, και το φαινόμενο της δημιουργίας κροσσών συμβολής (φαινόμενο *fringing*, Σχήμα 4.20), οι οποίοι οφείλονται σε φαινόμενα συμβολής του φωτός μεταξύ φακών διαφορετικής καμπυλότητας εντός του οπτικού συστήματος.

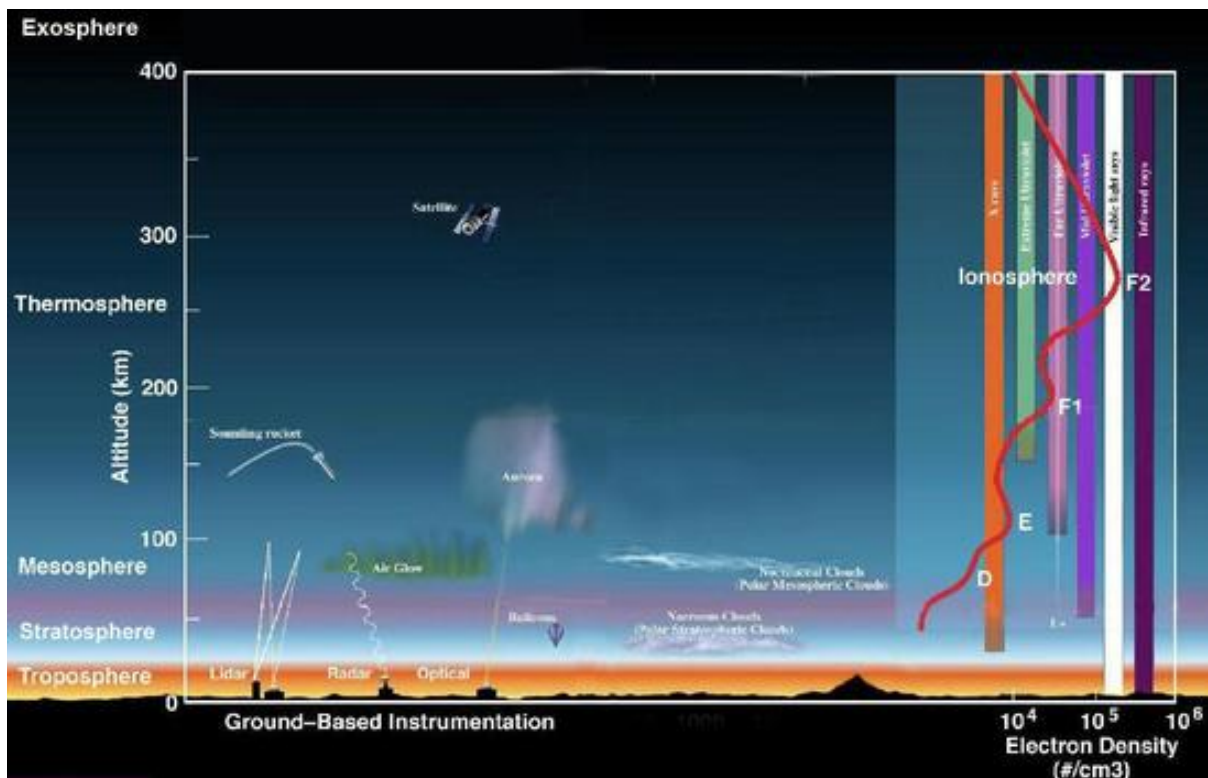
Μέρος II

**Μελέτη της απόκρισης της
ιονόσφαιρας σε εκρηκτικά ηλιακά
φαινόμενα**

5.1 Εισαγωγή

Η ατμόσφαιρα της Γης συντίθεται, όπως είναι γνωστό, από στρώματα τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, που προέρχονται κυρίως από διαφορές στη χημική σύσταση και την πυκνότητα των δομικών της λίθων. Απομακρυνόμενοι από τη γήινη επιφάνεια συναντάμε την *τροπόσφαιρα*, τη *στρατόσφαιρα* και τη *μεσόσφαιρα*, μέχρι το ύψος των 85 km περίπου (Σχήματα 5.1, 5.2). Τα στρώματα αυτά συνθέτουν την κατώτερη ατμόσφαιρα και αποτελούνται από μόρια, τα οποία κατανέμονται ανάλογα με τη μάζα τους και παρουσιάζουν μείωση της αριθμητικής πυκνότητας καθ' ύψος, ήπιες θερμικές κινήσεις και μικρές μέσες ελεύθερες διαδρομές. Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει επίσης το στρώμα του όζοντος και τα μεγάλα ρεύματα κυκλοφορίας, ενώ εδώ λαμβάνει χώρα και το σύνολο των μετεωρολογικών φαινομένων. Καθώς αυξάνει το ύψος, εισερχόμαστε στη *θερμόσφαιρα* και την *εξώσφαιρα*, οι οποίες συνθέτουν την ανώτερη ατμόσφαιρα. Τα στρώματα αυτά απορροφούν τις ακτίνες-Χ και την υπεριώδη ακτινοβολία (UltraViolet - UV), με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να αυξάνεται ραγδαία. Η εξώσφαιρα θεωρείται το (ασαφές) ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας και η κορυφή της θεωρείται ότι βρίσκεται μεταξύ 100.000 - 190.000 km.

Η **ιονόσφαιρα** είναι ένα σημαντικό στρώμα της ανώτερης ατμόσφαιρας και δεν είναι διακριτό, αλλά ενσωματωμένο, μέρος της παραπάνω διαστρωματώσεως, καθώς περιλαμβάνει τμήμα της μεσόσφαιρας, τη θερμόσφαιρα και μέρος της εξώσφαιρας (Σχήμα 5.2). Οι πρώτες υποθέσεις περί ύπαρξης ενός τέτοιου στρώματος στην ανώτερη ατμόσφαιρα έγιναν γύρω στο 1890, έτσι ώστε να εξηγηθεί η συμπεριφορά της γήινης μαγνητόσφαιρας. Στις αρχές του 20ου αιώνα οι υποθέσεις αυτές επαναδιατυπώθηκαν από τους Heaviside και Kennelly, προκειμένου να ερμηνεύσουν τη διάδοση και ανάκλαση ραδιοκυμάτων στην ανώτερη ατμόσφαιρα, ενώ το 1925 η ύπαρξη ιονισμένων περιοχών στη γήινη ατμόσφαιρα αποδείχθηκε από τον Appleton. Τα επόμενα χρόνια η ύπαρξη του στρώματος αυτού επιβεβαιώθηκε επανειλημμένα και απέκτησε την ονομασία 'ιονόσφαιρα'.



Σχήμα 5.1: Τα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας και η θέση της ιονόσφαιρας (www.nasa.gov).

Η ιονόσφαιρα εκτείνεται πάνω από τη στρατόσφαιρα, εντός της μεσόσφαιρας, περί τα 60 km, έως και το κατώφλι της εξώσφαιρας (~ 900 km). Στην περιοχή αυτή κυριαρχούν οι κινήσεις ελεύθερων ηλεκτρονίων που προέρχονται από ιονισμούς των ατόμων που τη συνθέτουν, λόγω της εισερχόμενης μικροκυματικής ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτά τα ηλεκτρόνια παρουσιάζουν μεγάλες μέσες ελεύθερες διαδρομές και έντονες θερμικές κινήσεις, ενώ στα μεγαλύτερα ύψη επηρεάζουν τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το τελευταίο γεγονός καθιστά την ιονόσφαιρα ένα πολύ σημαντικό τμήμα της ατμόσφαιρας, καθώς εντός της διαδίδονται και ανακλώνται τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιούνται από τις τηλεπικοινωνίες και την πλοήγηση, τόσο από επίγειες όσο και από δορυφορικές πηγές (Σχήμα 5.3). Τέλος, το ιονισμένο αυτό τμήμα της ατμόσφαιρας παρουσιάζει περαιτέρω διαστρωματώση, η οποία οφείλεται στη φασματική του απόκριση στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η δομή του μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της νύκτας (Σχήμα 5.4).

5.2 Δομή της ιονόσφαιρας

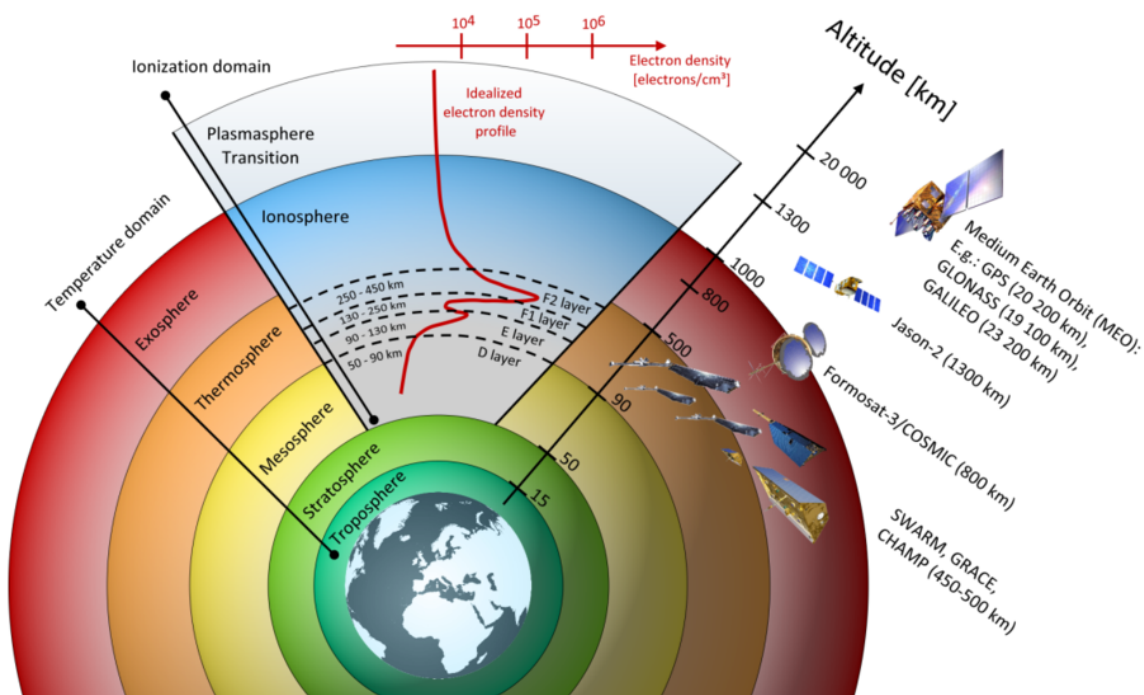
Όπως ήδη αναφέρθηκε η ιονόσφαιρα αποτελείται από μία δυναμική περιοχή που παρουσιάζει διαστρωματώση, η οποία οφείλεται στη διαφορετική χημική σύσταση και την αριθμητική πυκνότητα των δομικών λίθων της περιοχής, καθώς και στην μεταβλητότητα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Υπάρχουν τρία κύρια στρώματα η ονοματολογία των οποίων εισήχθη το 1969 και για ιστορικούς λόγους διατηρείται μέχρι και σήμερα. Το ύψος και το πάχος τους είναι μεταβλητό

και εξαρτάται από την εποχή αλλά και από την πλευρά της Γης στην οποία τη μελετάμε (μέρα ή νύκτα). Τα στρώματα της (Σχήμα 5.2) διαμορφώνονται ως εξής καθώς απομακρυνόμαστε από τη γήινη επιφάνεια:

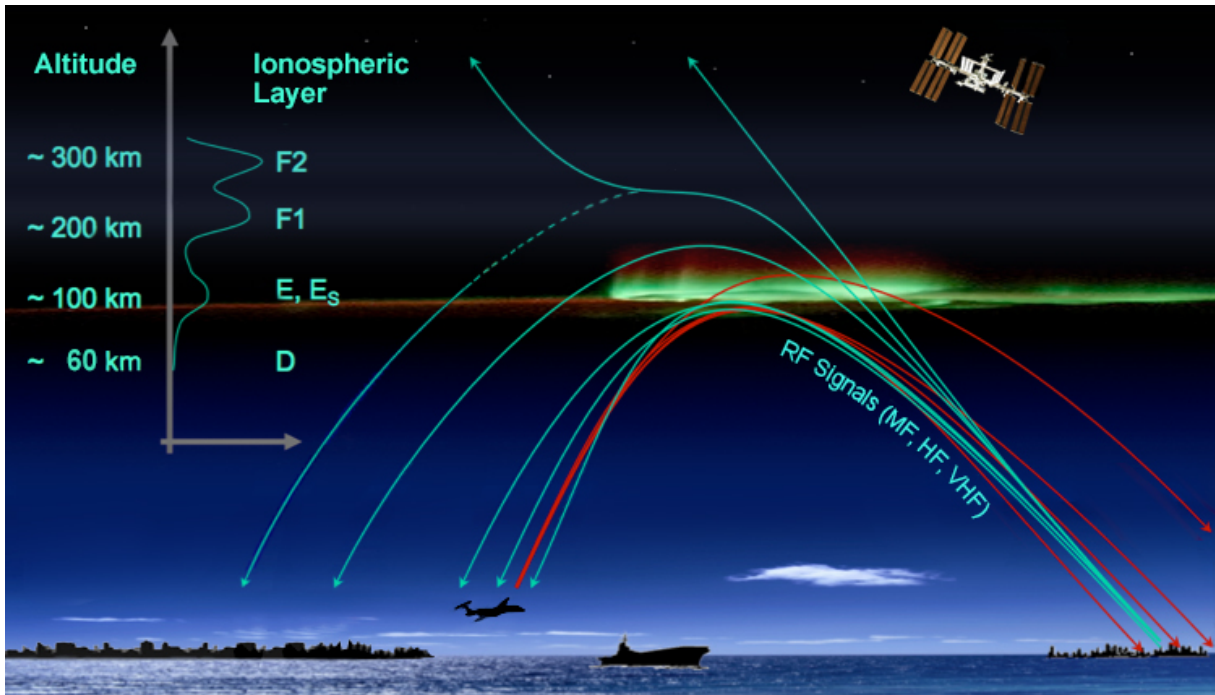
- Στρώμα D (60 – 90 km)
- Στρώμα E (90 – 150 km)
- Στρώμα F (120 – 800 km)

Το **στρώμα D** εκτείνεται σε ύψη 60-90 km, παρουσιάζει μέση θερμοκρασία -76°C , συγκέντρωση ηλεκτρονίων (αριθμητική πυκνότητα ηλεκτρονίων) $10^7 - 10^{10} \text{ e/m}^3$ και μέση πίεση $\sim 2 \text{ Pa}$. Τα ιόντα αυτού του στρώματος προέρχονται από ιονισμούς ουδέτερων ατόμων της ατμόσφαιρας που προκαλούνται από ακτινοβολία ακτίνων-X και της γραμμής Lyman α (121,56 nm) του ηλιακού φάσματος (Σχήμα 5.5) και είναι επι το πλείστον NO^+ και O_2^+ . Το στρώμα αυτό συνήθως εξαφανίζεται κατά τη διάρκεια της νύκτας, λόγω πτώσης της θερμοκρασίας και επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων με τα ιόντα. Επιπλέον, η περιοχή αυτή απορροφά σε μεγάλο βαθμό τα εισερχόμενα ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας (HF radio waves).

Το **στρώμα E** βρίσκεται στο υψομετρικό εύρος 90-150 km, παρουσιάζει παρόμοιες θερμοκρασίες με το στρώμα D ($\sim -50^{\circ}\text{C}$), αρκετά χαμηλότερες πιέσεις ($0,01 \text{ Pa}$) και μέγιστη συγκέντρωση ηλεκτρονίων 10^{11} e/m^3 . Όπως και το προηγούμενο στρώμα, παρουσιάζει ημερήσιες διακυμάνσεις στο πάχος και τον βαθμό



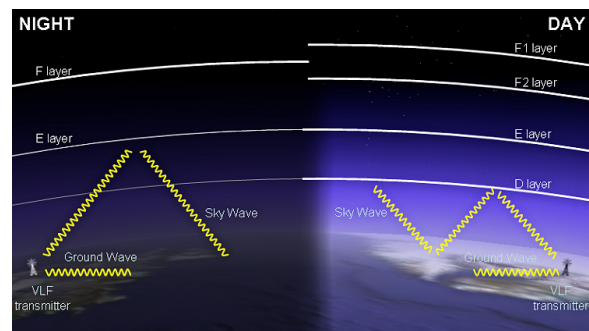
Σχήμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση της γήινης ατμόσφαιρας. Διακρίνονται τόσο τα κυρίως στρώματα της, όσο και η ιονόσφαιρα με τους δικούς της υποφλοιούς. Επιπλέον, παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό προφίλ της αριθμητικής πυκνότητας των ηλεκτρονίων καθ' ύψος. Τέλος, απεικονίζονται κάποιοι γνωστοί δορυφόροι που μελετούν κυρίως τη γήινη ατμόσφαιρα από διάφορα ύψη.



Σχήμα 5.3: Αναπαράσταση των ανακλάσεων που υφίστανται τα ραδιοκύματα μέσης, υψηλής και πολύ υψηλής συχνότητας (MF, HF και VHF, αντίστοιχα) από τα στρώματα E και F.

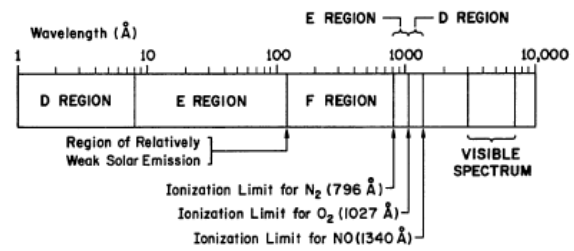
ιονισμού, ο οποίος μεγιστοποιείται κατά την τοπική άνω μεσουράνηση του Ήλιου. Συντίθεται κυρίως από μόρια O_2^+ , αποτέλεσμα της απορρόφησης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, και NO^+ , τα οποία δημιουργούνται από συγκρούσεις ηλεκτρονίων με ιόντα που δημιουργούνται από τις ακτίνες-X του ηλιακού στέμματος.

Το **στρώμα F** εκτείνεται από το ύψος των 120 km μέχρι και τα 800 km και είναι το στρώμα το οποίο βρίσκεται στη θερμόσφαιρα, όπου η θερμοκρασία αυξάνει κατακόρυφα ($\sim 1000^\circ C$). Η μέγιστη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων εδώ είναι $\sim 10^{12} e/m^3$ και η δημιουργία του στρώματος οφείλεται στον ιονισμό ατομικού οξυγόνου (O) από ακτινοβολία γραμμών της σειράς του Lyman και από ακτινοβολία προερχόμενη από γραμμές εκπομπής του He. Το στρώμα F συνήθως διαχωρίζεται περαιτέρω σε δύο υποφλοιούς F_1 και F_2 . Το F_1 εμφανίζει μέγιστη συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε ύψος $\sim 200 km$ και το F_2 σε ύψος $\sim 350 km$. Στο πρώτο τα ιόντα του ατομικού οξυγόνου (O^+) αντλούν αρνητικό φορτίο από τα ουδέτερα μονοξείδια του αζώτου (NO) προς τον σχηματισμό NO^+ και εξαφανίζεται κατά τη διάρκεια της νύκτας λόγω επανασύνδεσης, ενώ στο δεύτερο παραμένουν κυρίως τα ιόντα O^+ . Το στρώμα F θεωρείται το σημαντικότερο όσον αφορά στις τηλεπικοινωνίες υψηλών συχνοτήτων (HF communications, Σχήμα 5.3). Η διαστρωμάτωση που παρουσιάστηκε αλλάζει κατά τη διάρκεια της νύκτας (Σχήμα 5.4), καθώς οι επανασυνδέσεις



Σχήμα 5.4: Η αλλαγή της δομής της ιονόσφαιρας κατά την εναλλαγή μέρας-νύκτας (sidstation.loudet.org).

ηλεκτρονίων με ιόντα στα στρώματα D και F_1 έχουν ως αποτέλεσμα να παραμένουν μόνο τα F και E. Ως επακόλουθο, τα ραδιοκύματα πολύ χαμηλής συχνότητας (Very Low Frequency - VLF) ανακλώνται στο στρώμα E προτού φτάσουν το F (Σχήμα 5.4). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η ιονόσφαιρα παρουσιάζει εκτός των ημερήσιων, και μακροπρόθεσμες διακυμάνσεις, που οφείλονται τόσο στην ηλιακή δραστηριότητα (11-ετής κύκλος, Σχήμα 5.6, εκρηκτικά ηλιακά φαινόμενα, Κεφάλαιο 1, §1.5), όσο και στην αλλαγή της σχετικής θέση Γης-Ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους (εποχικές διακυμάνσεις), ενώ εμφανίζει διαφοροποιήσεις και κατά γεωγραφικό πλάτος.



Σχήμα 5.5: Εκτίμηση των περιοχών του ηλιακού φάσματος που είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των στρωμάτων της ιονόσφαιρας (Reid 1976).

5.3 Παράμετροι της ιονόσφαιρας

Η σημαντικότερη ίσως παράμετρος της ιονόσφαιρας είναι η **αριθμητική πυκνότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων** (συγκέντρωση ηλεκτρονίων, αριθμός ηλεκτρονίων ανά όγκο, N_e) καθώς λειτουργεί ως δείκτης για το πάχος και τα χαρακτηριστικά της ιονόσφαιρας και κάθε στρώματός της. Από την επίλυση των εξισώσεων διάδοσης στην ιονόσφαιρα προκύπτει ότι σε πρώτη προσέγγιση ο δείκτης διάθλασης είναι

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0\omega^2} \approx 1 - \frac{N81}{f^2} \quad (5.1)$$

όπου e το φορτίο του ηλεκτρονίου, m η μάζα του, ω η γωνιακή συχνότητα, ω_p η συχνότητα πλάσματος, ϵ_0 η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού και $f = \frac{\omega}{2\pi}$ η συχνότητα του ραδιοκύματος. Αν υιοθετήσουμε την παραδοχή διαχωρισμού της ιονόσφαιρας σε απειροστού πάχους στρώματα, τότε από τον νόμο του Snell προκύπτει ότι, $n_0 \sin \theta_i = n_k \sin \theta_k$, όπου θ_i η γωνία πρόσπτωσης της εισερχόμενης ακτινοβολίας, n_0 ο δείκτης διάθλασης του αρχικού στρώματος και n_k και θ_k ο δείκτης διάθλασης του στρώματος k και η γωνία διάθλασης του ραδιοκύματος αντίστοιχα. Υπό αυτές τις συνθήκες, ολική ανάκλαση θα έχουμε στο k στρώμα όταν $\theta_k = 90^\circ \rightarrow n_0 \sin \theta_i = n_k$ και αν δεχτούμε ότι το αρχικό στρώμα της ιονόσφαιρας έχει συντελεστή διάθλασης $n_0 = 1$, τότε έχουμε

$$\sin \theta_i = n_k \Rightarrow \sin^2 \theta_i = n_k^2 = 1 - \frac{N81}{f^2} \quad (5.2)$$

Στην περίπτωση της μέγιστης συγκέντρωσης του στρώματος (N_{max}) και κάθετης πρόσπτωσης ($\theta_i = 0^\circ$) του ραδιοκύματος, ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί εσωτερική ανάκλαση είναι να έχουμε $n_k = 0$. Αυτό επιτυγχάνεται για μία **κρίσιμη συχνότητα** του εισερχόμενου ραδιοκύματος, η οποία σύμφωνα με τη σχέση (5.2)

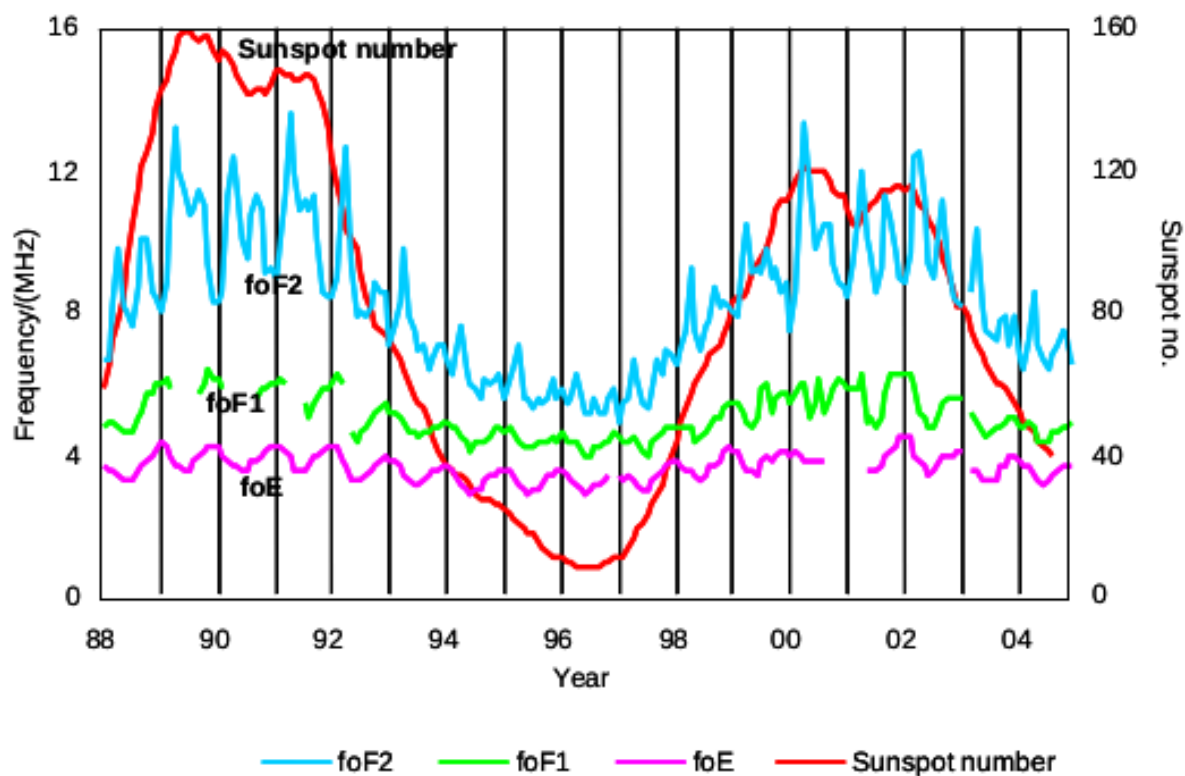
είναι

$$\frac{81N_{max}}{f_c^2} = 1 \Rightarrow f_c = 9 \cdot \sqrt{N_{max}} \quad (5.3)$$

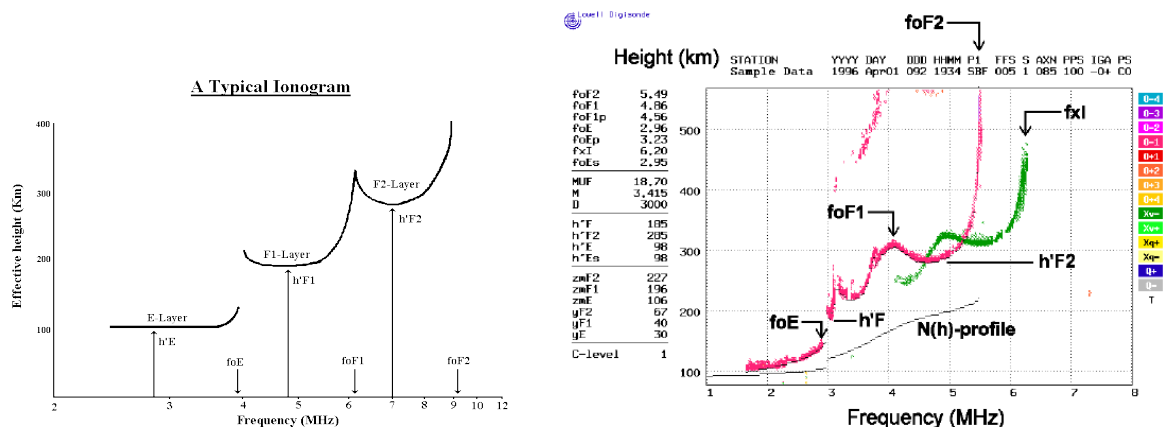
όπου N_{max} είναι η μέγιστη συγκέντρωση ηλεκτρονίων (μέγιστη αριθμητική πυκνότητα ηλεκτρονίων) στο στρώμα αυτό. Αν πρόκειται, παραδείγματος χάριν, για το F_2 , στο οποίο πραγματοποιούνται οι ανακλάσεις των HF, τότε η μέγιστη αυτή συχνότητα διείσδυσης του ραδιοκύματος, λέγεται **foF2**. Στην περίπτωση πλάγιας πρόσπτωσης έχουμε την αντίστοιχη **μέγιστη συχνότητα (Maximum Usable Frequency - MUF)**, η οποία συνδέεται με την κρίσιμη συχνότητα με τη σχέση

$$f(MUF) = \frac{f_c}{\cos\theta_i} = f_c \sec\theta_i = 9 \cdot \sqrt{N_{max}} \sec\theta_i \quad (5.4)$$

Τόσο η κρίσιμη συχνότητα, όσο και η MUF ελέγχονται για να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά διαφόρων στρωμάτων της ιονόσφαιρας. Έτσι, για τα διαφορετικά στρώματα έχουμε τις κρίσιμες συχνότητες **foF1**, **foF2**, **foE** (Σχήμα 5.6) και τις αντίστοιχες MUFs, οι οποίες μετρώνται συνήθως σε *MHz*. Μία χρήσιμη παράμετρος η οποία σχετίζεται με τη θέση του εκάστοτε στρώματος στην ιονόσφαιρα, είναι το **φαινόμενο ή υποθετικό ύψος h'** , το οποίο αν και δεν έχει άμεση φυσική σημασία, χρησιμοποιείται από ιονοσφαιρικά μοντέλα για την εξαγωγή πραγματικών υψών **hm**. Έτσι μετρώντας τις παραμέτρους **h'F2**, **h'F1** (ή **h'F**), **h'E** των στρωμάτων F2, F1 (ή F), E αντίστοιχα και με τη χρήση μοντέλων και παρατηρήσεων, προ-



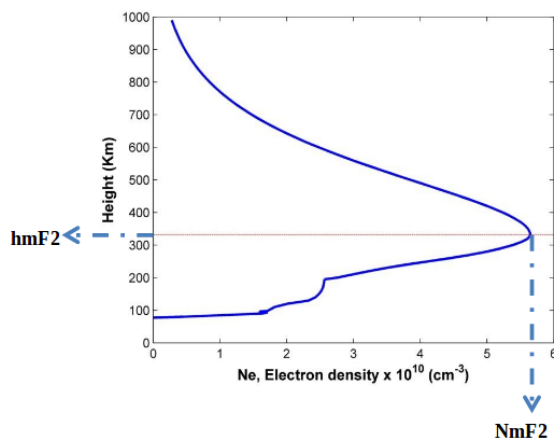
Σχήμα 5.6: Η διακύμανση διαφόρων παραμέτρων της ιονόσφαιρας σε συνάρτηση με τους ηλιακούς κύκλους περασμένων ετών. Διακρίνεται η επίδραση της ηλιακής δραστηριότητας (αριθμός κηλίδων) στις μακροπρόθεσμες μεταβολές (Introduction to HF Radio Propagation, IPS Radio and Space Services).



Σχήμα 5.7: **Αριστερά:** τυπική μορφή ενός ιονογράμματος (www.nerc-bas.ac.uk). **Δεξιά:** πραγματικό ιονογράμμα από το αστεροσκοπείο του Millstone Hill, στη Μασσαχουσέτη, ΗΠΑ. (www.researchgate.net).

κύπτουν τα ύψη των μέγιστων συγκεντρώσεων για κάθε στρώμα, **hmF2**, **hmF1** (ή **hmF**), **hmE**. Τα υποθετικά ύψη των στρωμάτων με τις αντίστοιχες συχνότητες τους απεικονίζονται συνήθως σε *ιονογράμματα* (Σχήμα 5.7).

Επιπλέον, με την καταγραφή της κατανομής της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων καθ' ύψος, προσδιορίζονται παράμετροι όπως η μέγιστη συγκέντρωση του στρώματος **Nm**. Έτσι, προκύπτουν οι τιμές **NmF2**, **NmF1** (ή **NmF**), **NmE** για τα αντίστοιχα στρώματα, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν άμεσα από τους ιονοσφαιρικούς σταθμούς (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8: Προφίλ της αριθμητικής πυκνότητας των ηλεκτρονίων καθ' ύψος (Bello et al. 2016).

Μία παράμετρος μεγάλης σημασίας, η οποία είναι και αυτή άμεσα συνδεδεμένη με την αριθμητική πυκνότητα των ηλεκτρονίων στην ιονόσφαιρα, είναι η **ολική περιεκτικότητα ηλεκτρονίων (Total Electron Content - TEC)**, η οποία εκφράζει την ολοκληρωμένη στη διαδρομή του ραδιοκύματος εντός της ιονόσφαιρας, πυκνότητα ηλεκτρονίων

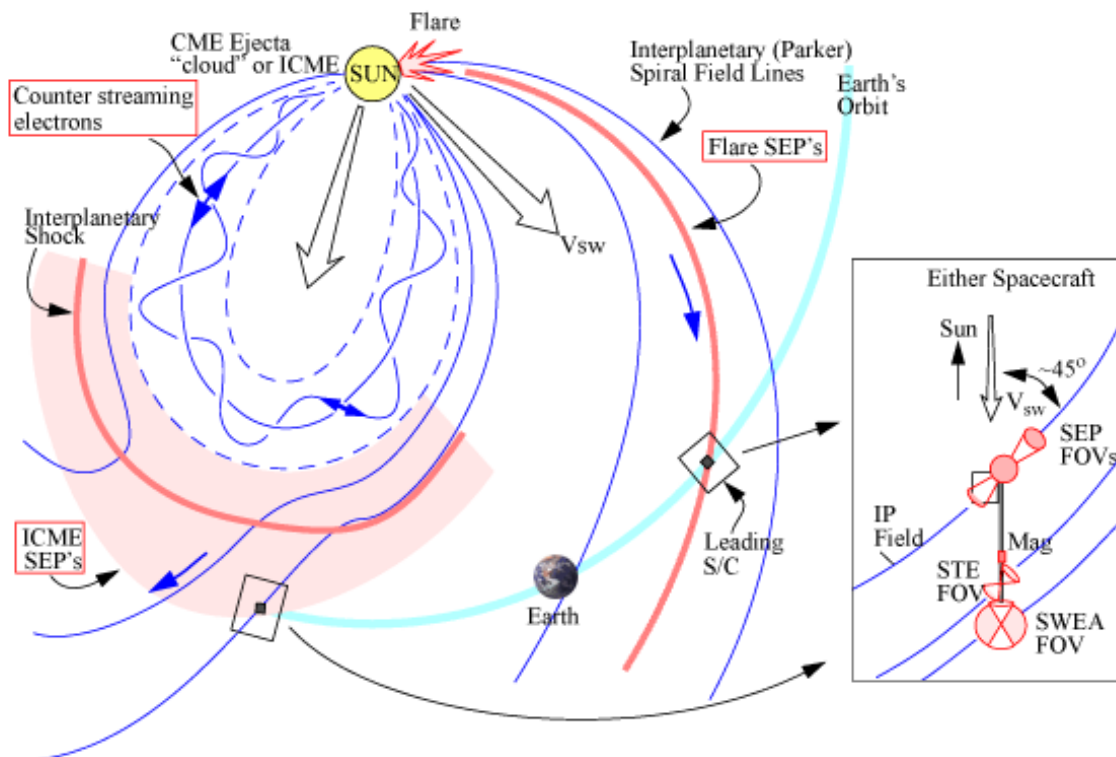
$$TEC = \int N_e(s) ds \tag{5.5}$$

όπου $N_e(s)$ είναι το προφίλ της αριθμητικής πυκνότητας των ηλεκτρονίων κατά μήκος της διαδρομής s του ραδιοκύματος εντός της ιονόσφαιρας, ενώ τα όρια του ολοκληρώματος καθορίζονται από τη διαδρομή του. Το TEC μετράται σε e/m^2 αλλά κυρίως χρησιμοποιείται η μονάδα μέτρησης $TECU = 10^{16} e/m^2$. Το παραπάνω ολοκλήρωμα δίνει το λεγόμενο **Slant TEC (STEC)** όταν το ραδιοκύμα εισέρχεται υπό γωνία σε σχέση με την κατακόρυφο και το **Vertical TEC (VTEC)** το οποίο εκφράζει την προβολή του στην κατακόρυφο. Σε πρώτη προσέγγιση η σχέση

5.4 Σύζευξη ιονόσφαιρας-Ήλιου

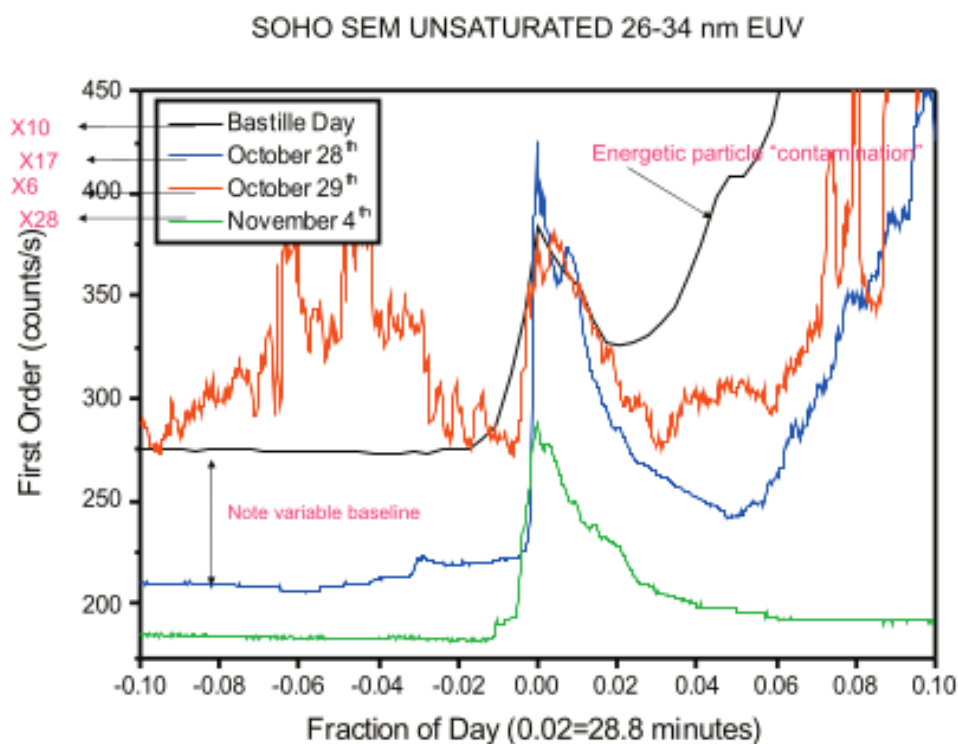
Οι πρώτες συνδέσεις μεταξύ της ηλιακής δραστηριότητας και της γήινης ατμόσφαιρας πραγματοποιήθηκαν κατά το *συμβάν του Carrington* (*Carrington event*) από τον ίδιο, το 1859, που τη συνέδεσε με την παρατηρημένη αύξηση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας στη Γη, και κατόπιν στις δεκαετίες που ακολούθησαν. Έκτοτε, η επίδραση του Ήλιου στη γήινη ατμόσφαιρα μελετάται συνεχώς και φυσικά αποτελεί κομβικό ζήτημα στη σύγχρονη εποχή των δορυφορικών τηλεπικοινωνιών, της πλοήγησης και των διαστημικών αποστολών. Η ίδια η ιονόσφαιρα, ως δημιούργημα της παραπάνω επίδρασης, είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ηλιακή δραστηριότητα. Το εγγύς διαστημικό περιβάλλον της Γης, και κατ' επέκταση και η γήινη ιονόσφαιρα, επηρεάζεται άμεσα από τα έντονα ηλιακά φαινόμενα που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 1 (§1.5).

Οι ηλιακές εκλάμψεις (βλ. §1.5.1) και οι CMEs (βλ. §1.5.2) εκτοξεύουν υπέρογκα ποσά ενέργειας, ακτινοβολίας και ενεργητικών σωματιδίων (βλ. §1.5.3), που καταγράφονται από δορυφορικά όργανα στη γειτονιά της Γης. Οι ηλιακές εκλάμψεις ακόμη και στην περίπτωση που δε σχετίζονται με κάποια CME, επιδρούν άμεσα στην ιονόσφαιρα, καθώς η ακτινοβολία που εκπέμπουν στις ακτίνες-X και στο υπε-



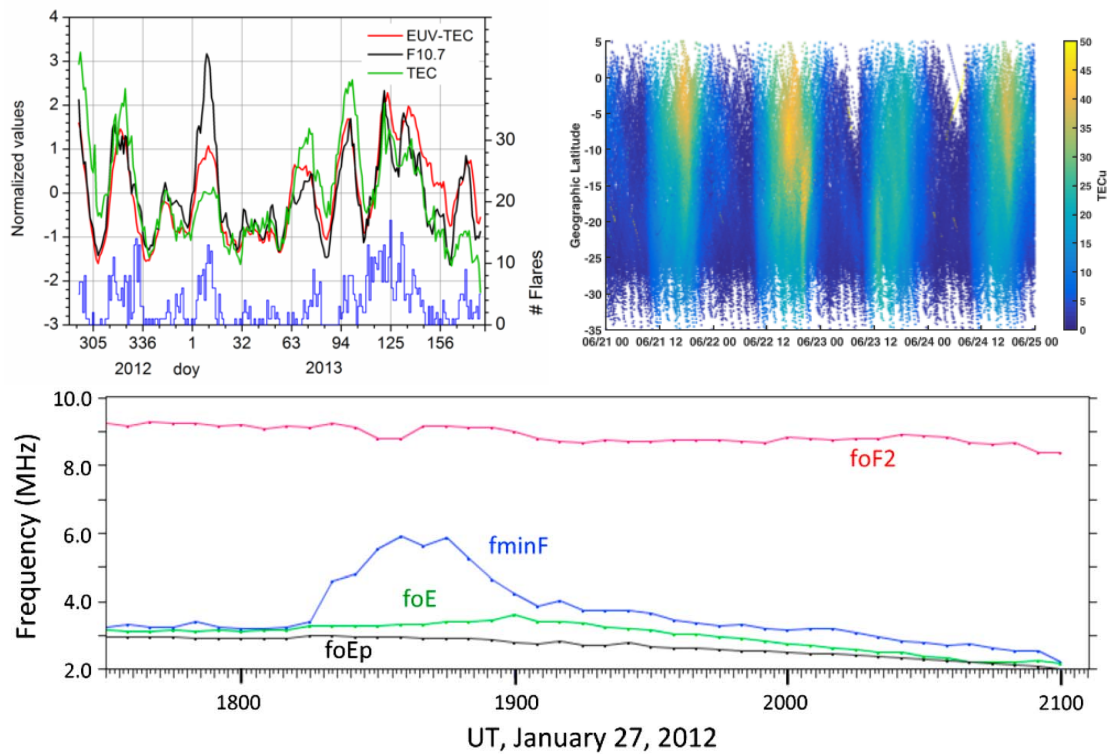
Σχήμα 5.11: Σχηματική απεικόνιση της εκδήλωσης μίας ηλιακής έκλαμψης και της διάδοσης μίας επαγόμενης CME όπου φαίνεται το πως γίνεται η καταγραφή τους από διαφορετικές θέσεις του παρατηρητή. Η ICME που δημιουργείται καταγράφεται από το όργανο STEREO-B το οποίο ακολουθεί τη Γη, ενώ το STEREO-A, το οποίο έπεται της Γης καταγράφει μόνο ενεργητικά σωματίδια που προέρχονται απευθείας από την έκλαμψη (helio-vo.eu).

ριώδες (UV) προκαλεί πρόσθετους ιονισμούς στα ουδέτερα στρώματα της ανώτερης ατμόσφαιρας εντός μερικών λεπτών. Το αποτέλεσμα είναι η άμεση αύξηση της αριθμητικής πυκνότητας των ηλεκτρονίων σε ένα μεγάλο εύρος υψών, το οποίο μπορεί να εκτείνεται από το στρώμα D έως και το F. Η απότομη αυτή αύξηση μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχή της ιονόσφαιρας στο σύνολό της, αλλά και τοπικά, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ισχυρών έκλαμψεων (*M* και *X*). Το στρώμα D (~ 60 – 90 km) φαίνεται πως επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την εισερχόμενη ακτινοβολία, κυρίως τις σκληρές ακτίνες-Χ, γεγονός που έχει επιπτώσεις στα ραδιοκύματα υψηλής



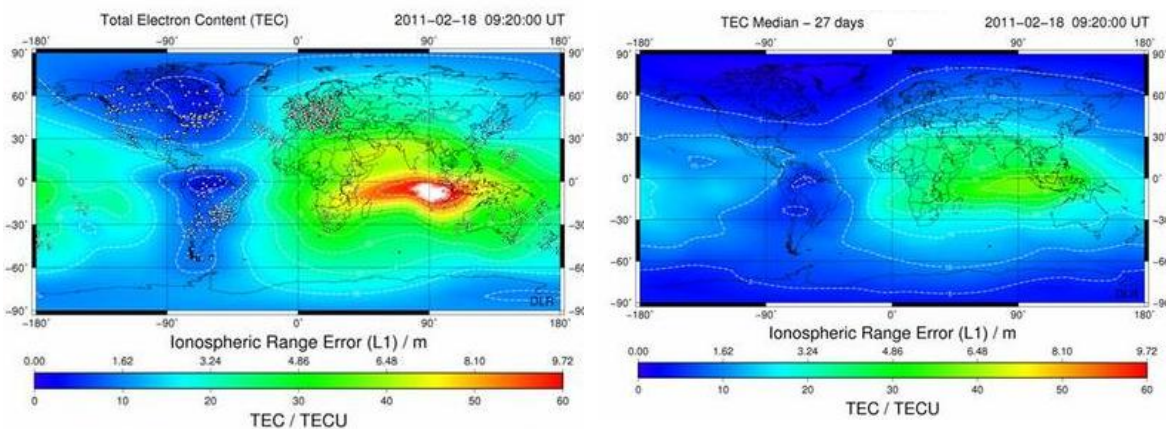
Σχήμα 5.12: Αύξηση της ροής ακτινοβολίας στις EUV για τις ισχυρές ηλιακές των συμβάντων Halloween 2003 και Bastille Day, την 14η Ιουλίου 2000 (Tsurutani et al., 2009).

συχνότητας (HF radio waves, αυξημένη απορρόφηση), δυσχεραίνοντας τις τηλεπικοινωνίες και την πλοήγηση και δημιουργώντας συχνά ακόμη και σύντομες (μερικών λεπτών) ραδιοφωνικές διακοπές (*radio blackouts*). Παρ' όλα αυτά, επηρεάζονται, σε μικρότερο βέβαια βαθμό, και τα στρώματα E (~ 90 – 150 km) και F (~ 120 – 800 km). Η πυκνότητα ηλεκτρονίων του στρώματος F καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την τιμή του TEC και επηρεάζεται από την εισερχόμενη ακτινοβολία του μακρινού υπεριώδους (EUV, Σχήμα 5.12), με παραπάνω από έναν τρόπους, καθώς τείνει να μειώσει το ύψος ανάκλασης ραδιοκυμάτων των E και F. Για τον λόγο αυτόν, ελέγχονται ιονοσφαιρικές παράμετροι όπως οι κρίσιμες συχνότητες f_o , τα TEC, τα MUF_D και τα f_{min} και η απόκρισή τους στην ηλιακή δραστηριότητα (βλ. §5.3), από ιονοσφαιρικούς σταθμούς (Σχήμα 5.13) τόσο σε παγκόσμια (Σχήμα 5.14), όσο και σε τοπική κλίμακα (Σχήμα 5.15), ούτως ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την έκταση των φαινομένων καθ' ύψος, αλλά και κατά γεωγραφικό πλάτος (Σχήματα 5.13, 5.15). Υπάρχουν δύο κύριες πηγές ενεργητικών σωματιδίων που



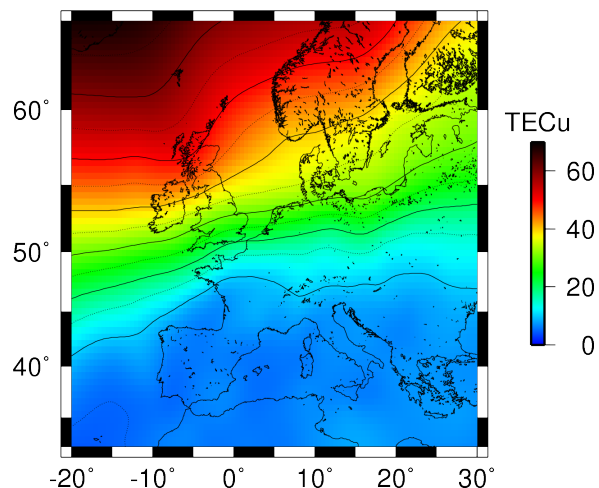
Σχήμα 5.13: **Επάνω:** Χρονοσειρά της παραμέτρου EUV-TEC (παραμέτρος της απόκρισης της ιονόσφαιρας στην EUV ακτινοβολία), της παραμέτρου F10.7 (σχετίζεται με την ηλιακή ροή ακτινοβολίας στα ραδιοκύματα) και του κανονικοποιημένου παγκόσμιου TEC. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει τον αριθμό των κηλίδων (αριστερά, Jacobi et al., 2014). Τιμή του κάθετου TEC (VTEC) από στο χρονικό διάστημα 21-24 Ιουλίου 2015 για, γεωγραφικά πλάτη 35°S-5°N (δεξιά, Piersanti et al., 2017). **Κάτω:** χρονοσειρές διαφόρων ιονοσφαιρικών παραμέτρων κατά την εκδήλωση μίας έκλαμψης στις 27 Ιανουαρίου 2012.

προέρχονται από εκλάμψεις και καταφθάνουν στην ιονόσφαιρα. Τα πρώτα επιταχύνονται στην περιοχή εκδήλωσης της έκλαμψης και τα ταχύτερα εξ αυτών (ενέργειες > 100 MeV) καταφθάνουν σχεδόν ταυτόχρονα με την εκδήλωση του φαινομένου στους δορυφορικούς ανιχνευτές, υπό την προϋπόθεση ότι αυτή η περιοχή συνδέεται μαγνητικά με τον κοντινό στη Γη μεσοπλανητικό χώρο (Σχήμα 5.11). Τα δεύτερα επιταχύνονται στο κρουστικό κύμα της ICME, η οποία είναι η μετεξέλιξη



Σχήμα 5.14: Παγκόσμιοι χάρτες Space Weather Application Center (SWAC) που δείχνουν την απόκριση της ιονόσφαιρας (TEC, αριστερά) μετά την άφιξη μίας CME (στις 15 Φεβρουαρίου 2011) συγκριτικά με τη μέση τιμή του TEC των τελευταίων 27 ημερών (swaciweb.dlr.de).

της αρχικής CME στον μεσοπλανητικό χώρο. Συγκεκριμένα, ενεργητικά πρωτόνια ενεργιών από μερικά keV έως και GeV , που παράγονται από τις ηλιακές εκλάμψεις, καταφθάνουν σε χρονικά διαστήματα από μερικά λεπτά έως και μερικές ώρες στους ανιχνευτές (και κατ' επέκταση στη γήινη ατμόσφαιρα-ιονόσφαιρα), ενώ τα αντίστοιχα που παράγονται από τη δραστηριότητα μίας κατευθυνόμενης προς τη Γη ICME, έχουν ενέργειες $\sim 10 keV$ με $\sim 10 MeV$ και προσπίπτουν συνεχόμενα, καθώς εκείνη πλησιάζει (Σχήμα 5.11). Οι κατευθυνόμενες προς τη Γη CMEs καταφθάνουν σε διάστημα $\sim 1 - 5$ ημερών ανάλογα με την ταχύτητά τους, αλληλεπιδρούν με τη γήινη μαγνητόσφαιρα και ενδεχομένως την διαταράσσουν προκαλώντας συμβάντα όπως οι *μαγνητικές καταιγίδες*, ενώ στη συνέχεια διαταρράσσουν και την ιονόσφαιρα προς τον σχηματισμό *ιονοσφαιρικών καταιγίδων*, οι οποίες έχουν άμεση επίδραση στις ιονοσφαιρικές παραμέτρους (f_o , TEC , $MUF D$ κλπ., Σχήματα 5.13, 5.15). Η εξέλιξη των φαινομένων της απόκρισης της ιονόσφαιρας κατά την εκδήλωση των εκρηκτικών φαινομένων, διαρκεί από μερικά λεπτά έως και μερικές ημέρες.



Σχήμα 5.15: Κατανομή του VTEC στην Ευρώπη κατά τη διάκριση ιονοσφαιρικής καταιγίδας στις 30 Ιανουαρίου 2003 (gnss.be).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΑ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΤΟΥ ΣΕΠΤΕΜΒΙΟΥ 2017

Ο Σεπτέμβριος του 2017 αποτέλεσε για τον Ήλιο μία ιδιαίτερη και απρόσμενα δραστήρια χρονική περίοδο. Τα εκρηκτικά γεγονότα τα οποία έλαβαν χώρα κατά την περίοδο αυτή στην ηλιακή ατμόσφαιρα, παρήγαγαν πληθώρα δεδομένων, μελετών και θεωρητικών επιβεβαιώσεων, ενώ έδωσαν την ευκαιρία να καταγραφεί και να μελετηθεί, για ακόμα μια φορά, σε πραγματικό χρόνο η απόκριση της γήινης ιονόσφαιρας σε αυτά. Παρόλο που τον Σεπτέμβριο του 2017 ο 24ος ηλιακός βρισκόταν στη φάση ελάχιστης δραστηριότητας (solar minimum) οδεύοντας προς το τέλος του (μέσα στο 2019 ή αρχές του 2020), έδωσε μερικές από τις ισχυρότερες ηλιακές εκλάμψεις των τελευταίων ετών. Είναι χαρακτηριστικό, ότι η έκλαμψη τάξης X9.3 της 6ης Σεπτεμβρίου του 2017 ήταν η μεγαλύτερη από τον Σεπτέμβριο του 2005 που είχε καταγραφεί μία αρκετά ισχυρότερη τάξης X17, κατά τη διάρκεια όμως του προηγούμενου κύκλου (του 23ου).

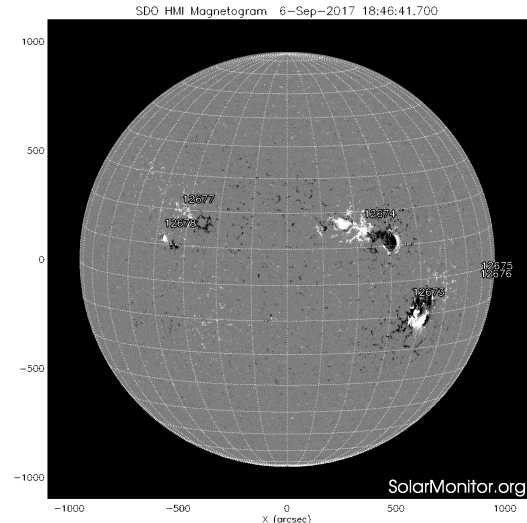
6.1 Εκρηκτικά ηλιακά γεγονότα του Σεπτεμβρίου του 2017

Κατά το χρονικό διάστημα 5-14 Σεπτεμβρίου παρατηρήθηκαν συνολικά τέσσερις ηλιακές εκλάμψεις (Κεφάλαιο 1, §1.5.1) τάξης X (Πίνακας 6.1), η μία εκ των οποίων

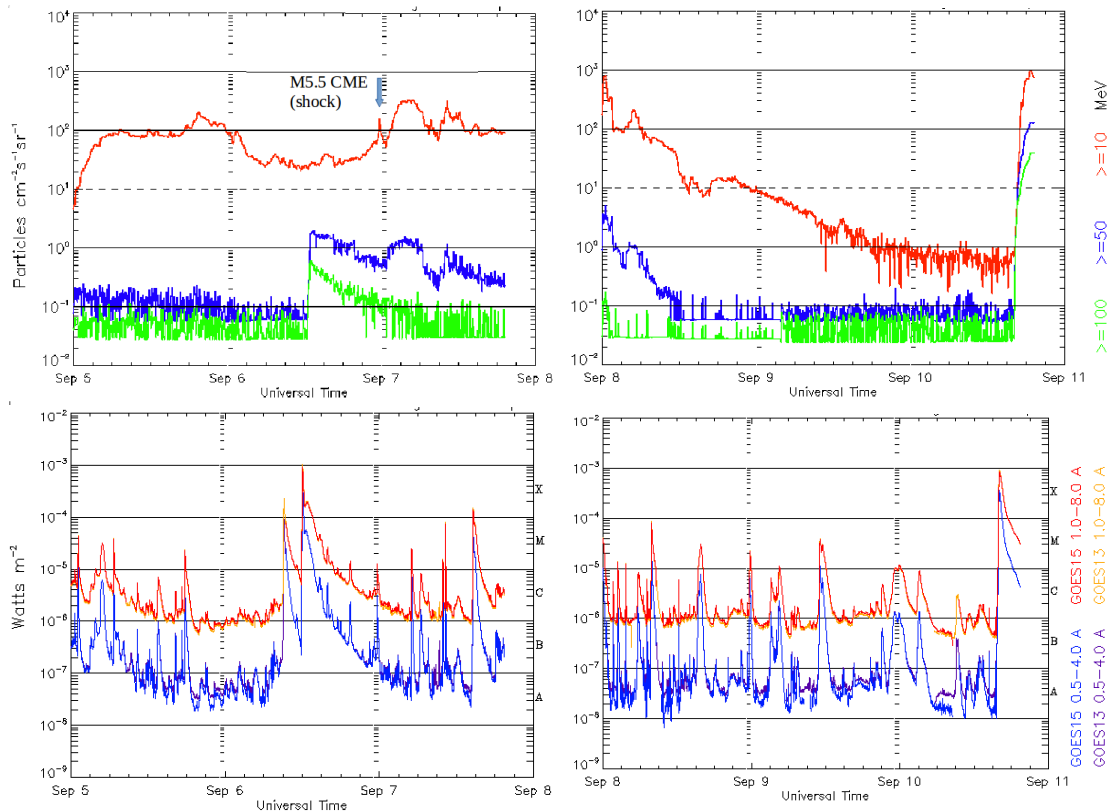
Πίνακας 6.1: Πίνακας σύνοψης εκρηκτικών γεγονότων Σεπτεμβρίου 2017 που συνδέονται με τις ισχυρές εκλάμψεις τύπου X.

| ηη/μμ | Τάξη | Ενεργός περιοχή (NOAA) | Ηλ. συντεταγμένες | έναρξη (UT) | κορύφωση (UT) | λήξη (UT) | διάρκεια (min) | CME (UT, km/s) |
|-------|------|------------------------|-------------------|-------------|---------------|-----------|----------------|-------------------|
| 06/09 | X2.2 | 12673 | S08W32 | 08:57 | 09:10 | 09:17 | 20 | - |
| | X9.3 | 12673 | S09W34 | 11:53 | 12:02 | 12:10 | 17 | Άλω (12:24, 1571) |
| 07/09 | X1.3 | 12673 | S11W49 | 14:20 | 14:36 | 14:55 | 35 | - |
| 10/09 | X8.2 | 12673 | S08W88 | 15:35 | 16:06 | 16:31 | 56 | Άλω (09:48, 3163) |

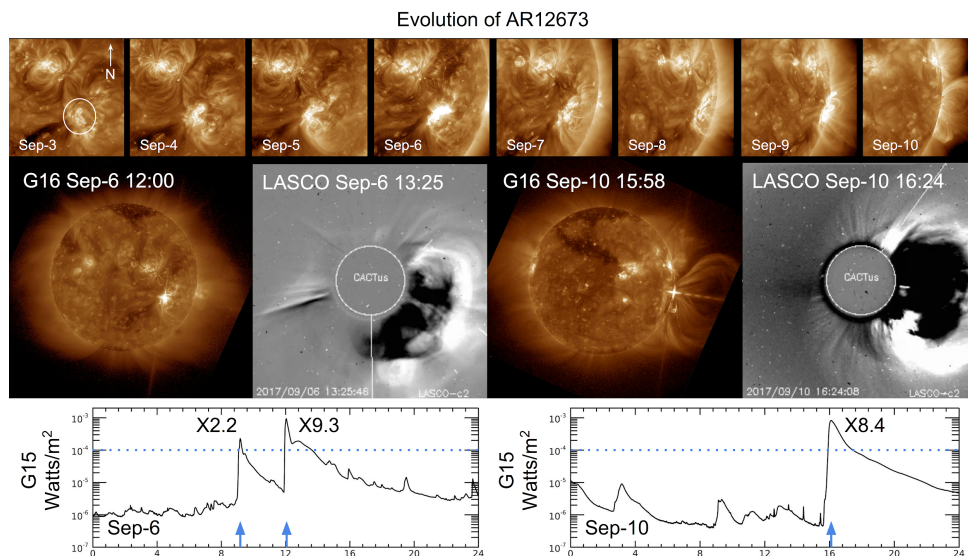
ήταν η ισχυρότερη των τελευταίων δώδεκα ετών. Όλες έλαβαν χώρα στην ενεργό περιοχή (active region - AR) με την ονομασία AR 12673 (ονομασία NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, Σχήμα 6.1), η οποία έδωσε, επιπλέον, συνολικά 27 εκλάμψεις τάξης M και πάρα πολλές μικρότερης τάξης C. Στις 6 Σεπτεμβρίου παρατηρήθηκε από τον γεωσύγχρονο δορυφόρο *Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES, G13*, βλ. §6.2) μία απότομη αύξηση ροής ακτινοβολίας στις ακτίνες-X (Σχήματα 6.2 και 6.3). Επρόκειτο για την έκλαμψη τάξης X2.2, η οποία καταγράφηκε από τον γεωσύγχρονο δορυφόρο *Solar Dynamics Observatory (SDO)* και από τον *Hinode* σε ηλιογραφικές συντεταγμένες S08W32. Τα όργανα (στεμματογράφοι) του ηλιακού δορυφόρου *SOHO (SOHO/LASCO*, στεμματογράφοι C2, C3) κατέγραψαν σε πραγματικό χρόνο την εξέλιξη



Σχήμα 6.1: Μαγνητόγραμμα του ηλιακού δίσκου την 6η Σεπτεμβρίου από το όργανο SDO/HMI, όπου διακρίνονται συνολικά 6 ενεργές περιοχές, μεταξύ των οποίων και η AR12673 που έδωσε τις ισχυρές εκλάμψεις τάξης X (solarmonitor.org).

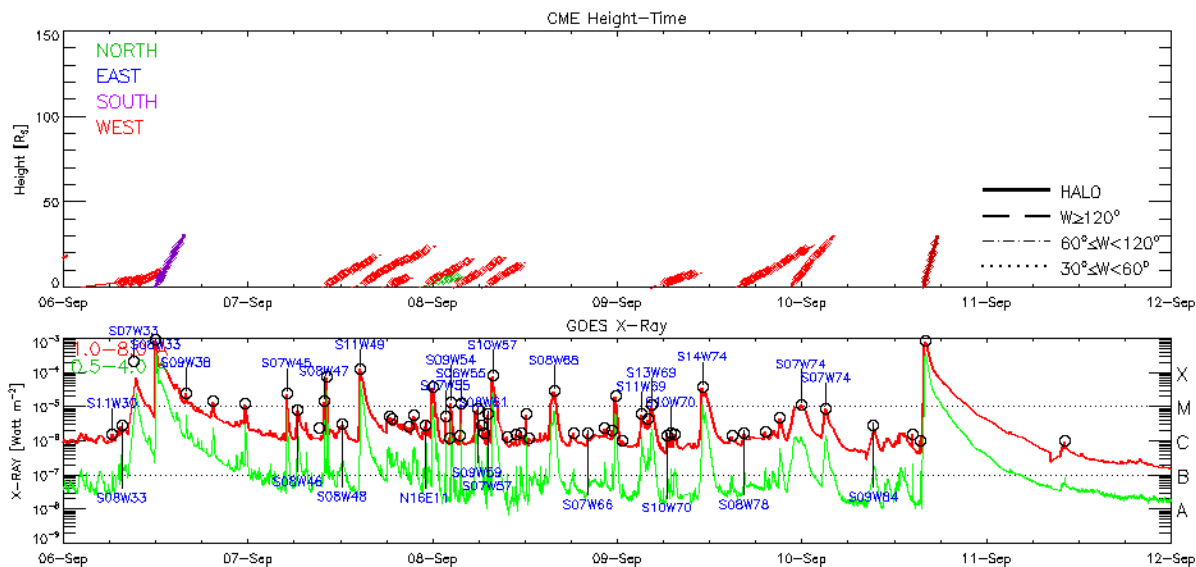


Σχήμα 6.2: **Επάνω:** ροή πρωτονίων σε διάφορες ενέργειες στα χρονικά διαστήματα 5-8 Σεπτεμβρίου (όπου έχει σημειωθεί και η άφιξη πρωτονίων από το κρουστικό κύμα της M5.5, αριστερά) και 8-11 Σεπτεμβρίου (δεξιά) από τον δορυφόρο GOES-13, όπου διακρίνεται καθαρά η αύξηση ροής τους λόγω των εκλάμψεων X2.2 και X9.3 στις 6 Σεπτεμβρίου και της X8.2 στις 10 Σεπτεμβρίου (δεξιά). **Κάτω:** αντίστοιχη ροή ακτινοβολίας στις ακτίνες-X.



Σχήμα 6.3: Εξέλιξη της ενεργού περιοχής AR12673 στο χρονικό διάστημα 3-10 Σεπτεμβρίου από το όργανο SDO/AIA (γραμμή 193 Å, πρώτη γραμμή), οι δύο ισχυρότερες εκλάμψεις της (X9.3-6 Σεπτεμβρίου και X8.2-10 Σεπτεμβρίου) από τα GOES-16 και οι αντίστοιχες καταγεγραμμένες CMEs από τον SOHO/LASCO (C2, μεσαία γραμμή) και τα αντίστοιχα γραφήματα (κάτω γραμμή) της ροής ακτινοβολίας στις ακτίνες-X (1 - 8 Å) από τον GOES-15 (από Redmon et al., 2018).

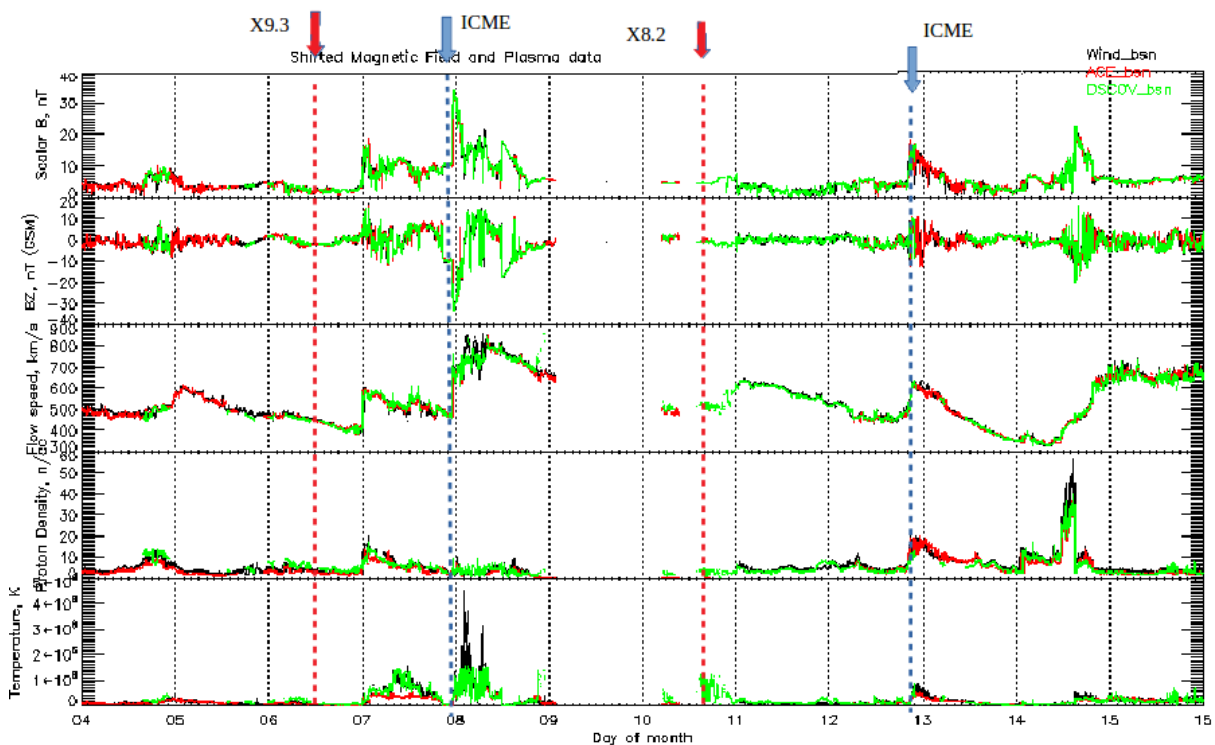
της CME (Σχήμα 6.3). Η έκλαμψη ξεκίνησε στις 08:57 UT, κορυφώθηκε στις 09:10 UT και διήρκεσε συνολικά 20 min (Πίνακας 6.1). Την ίδια ημέρα, και συγκεκριμένα λίγες ώρες μετά την κορύφωση της πρώτης, έκανε την εμφάνιση της μία δεύτερη, ακόμα ισχυρότερη έκλαμψη, η οποία καταγράφηκε σε ηλιογραφικές συντεταγμένες S09W34 (*Hinode*) και ταξινομήθηκε από τον GOES (*G15*) ως τάξης X9.3 (Σχήμα 6.2 και 6.3). Η έναρξή της σημειώθηκε στις 11:53 UT (από τον ίδιο δορυφόρο), κορυφώθηκε στις 12:02 UT και έληξε στις 12:10 UT, συμπληρώνοντας έτσι δι-



Σχήμα 6.4: Γραφήματα ύψους CME (επάνω) και ροής ακτινοβολίας στις ακτίνες-X (κάτω). Στις περιπτώσεις των εκλάμψεων X9.3 (6 Σεπτεμβρίου-08:57) και X8.2 (10 Σεπτεμβρίου-15:35) η στιγμή αύξησης της ροής της καταγραφόμενης ακτινοβολίας συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό με τη στιγμή εκτίναξης της CME. Τα γραφήματα προέρχονται από τον κατάλογο των CMEs του SOHO/LASCO. Από τα σημεία παρατήρησης (επάνω σχήμα) προκύπτουν, έπειτα από γραμμική προσαρμογή, οι ταχύτητες απομάκρυνσης πρώτης τάξης των CMEs (cdaw.gsfc.nasa.gov).

άρκεια 17 min και ολοκληρώνοντας μία ημέρα με έντονη ηλιακή δραστηριότητα, πολλές ενεργές περιοχές και αρκετές εκλάμψεις, αφού εκτός των X, ανιχνεύθηκαν και τρεις τάξης M: M2.5 (15:51 UT), M1.4 (19:21 UT) και M1.2 (23:33 UT). Η συγκεκριμένη έκλαμψη (X9.3) απελευθέρωσε μία CME, η οποία καταγράφηκε από τα όργανα του SOHO/LASCO ως άλω CME (halo CME), με εκτιμώμενη ταχύτητα απομάκρυνσης πρώτης τάξης, 1571 km/s (ώρα καταγραφής: 12:24 UT, βλ. Σχήματα 6.3 και 6.4 και Πίνακας 6.1). Η προσέγγιση της ενεργού περιοχής στο δυτικό ηλιακό χείλος, σε συνδυασμό με τη χρονική στιγμή, τη διάρκεια και την έκταση του φαινομένου στο σύνολό του (διαδοχικές εκλάμψεις), υποδεικνυε κατάλληλες συνθήκες για αλληλεπίδραση της προκύπτουσας CME (ICME) με το γεωδιάστημα και αυτό άλλωστε παρατηρήθηκε όπως δείχνει το Σχήμα 6.5. Επιπλέον, φαίνεται πως τη συγκεκριμένη ημέρα κατέφθασε στους ανιχνευτές ροή σωματιδίων από το κρουστικό κύμα μίας ICME προερχόμενης από προηγούμενη έκλαμψη τάξης M5.5, την 4η Σεπτεμβρίου (Redmon et al., 2018, Σχήμα 6.2).

Παρόλο που οι εκτιμήσεις έκαναν λόγο για εξασθένησή της, η AR 12673 συνέχισε την έντονη δραστηριότητά της (Σχήμα 6.3) και στις 7 Σεπτεμβρίου εκδηλώθηκε άλλη μία έκλαμψη, αυτήν τη φορά τάξης X1.3 (G15) σε ηλιογραφικές συντεταγμένες S11W49 (Hinode), η οποία ξεκίνησε στις 14:20 UT, κορυφώθηκε στις 14:36 UT και έληξε στις 14:55 UT (συνολική διάρκεια: 35 min, Πίνακας 6.1, Σχήμα 6.2). Οι δο-

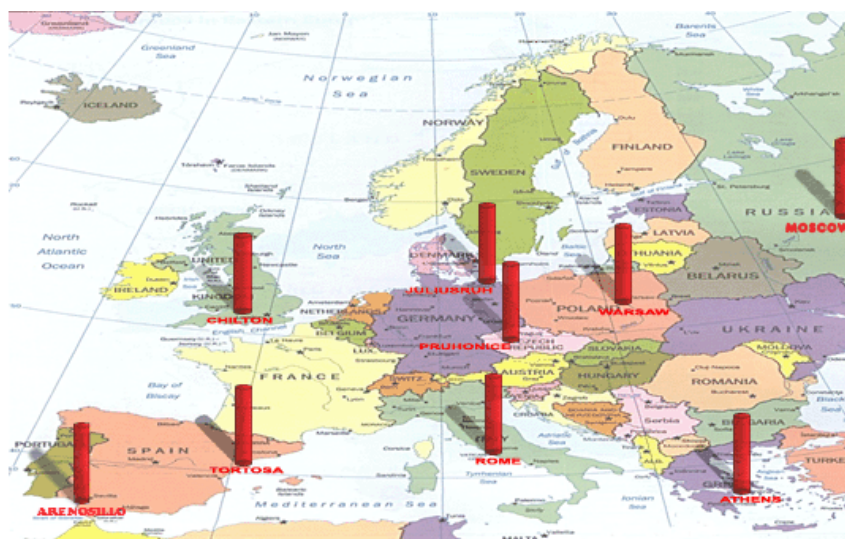


Σχήμα 6.5: Χρονοσειρές (4-15 Σεπτεμβρίου) για παραμέτρους του ηλιακού ανέμου στο διαστημικό περιβάλλον της Γης, από δεδομένα των δορυφόρων ACE, Wind και DSCOVR στο Λανγκραντζιανό σημείο 1 ($L_1 \sim 1 AU$). Από πάνω προς τα κάτω: βαθμωτό μαγνητικό πεδίο, z συνιστώσα μαγνητικού πεδίου, ταχύτητα ροής ηλιακού ανέμου, πυκνότητα πρωτονίων, θερμοκρασία. Φαίνεται πως όλες οι παράμετροι διαταράχθηκαν τις ίδιες χρονικές στιγμές υποδεικνύοντας τις αφίξεις των CMEs (omniweb.gsfc.nasa.gov).

ρυφόροι GOES κατέγραψαν τόσο την αύξηση στη ροή ακτινοβολίας των ακτίνων-X ($G15$), όσο και την αύξηση στη ροή των πρωτονίων, κυρίως σε ενέργειες >50 MeV και >10 MeV ($G13$, Σχήμα 6.2). Η τελευταία έκλαμψη τάξης X του Σεπτεμβρίου (αλλά και συνολικά του 24ου κύκλου) καταγράφηκε στις 10 Σεπτεμβρίου. Ήταν μία έκλαμψη τάξης X8.2 (Σχήμα 6.2) που ανιχνεύτηκε για πρώτη φορά στις 15:35 UT σε ηλιογραφικές συντεταγμένες S08W88 (*Hinode*), παρουσίασε μέγιστο στις 16:06 UT και έληξε στις 16:31 UT, φτάνοντας συνολική διάρκεια 56 min (Πίνακας 6.1). Η έκλαμψη αυτή ήταν υπεύθυνη για ένα συμβάν ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων (SEP event, βλ. Κεφάλαιο 1, §1.5.3) και συνδέθηκε με μία άλω CME, για την οποία ο SOHO/LASCO δίνει ταχύτητα πρώτης τάξης, 3163 km/s (Σχήμα 6.4 και Πίνακας 6.1), καθιστώντας την μία από τις ταχύτερες ICMEs των τελευταίων ετών. Όπως και στην περίπτωση της X9.3, η επίδρασή της στις παραμέτρους του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου στην περιοχή της Γης, ήταν εμφανής (Σχήμα 6.5), ενώ μελετήθηκε η επίδρασή της και στην ιονόσφαιρα του Άρη (Thiemann et al., 2018). Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, τα εκρηκτικά γεγονότα του Σεπτεμβρίου του 2017 είχαν άμεση και έντονη επίδραση στη Γη. Παρακάτω θα μελετήσουμε την επίδραση αυτή, ιδιαίτερα στην ιονόσφαιρα κυρίως πάνω από τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη του ευρωπαϊκού χώρου, εξετάζοντας σημαντικές ιονοσφαιρικές παραμέτρους (βλ. Κεφάλαιο 5, 5.3) από διάφορες πηγές.

6.2 Πηγές δεδομένων για τη μελέτη μας

Για τη μελέτη της επίδρασης των εκρηκτικών γεγονότων του Ήλιου κατά τον Σεπτέμβριο του 2017, χρησιμοποιήθηκαν επίγειες και διαστημικές πηγές δεδομένων για να εξαχθούν όλα τα κατάλληλα αρχεία δεδομένων, γραφήματα και χρονοσειρές. Η επίδραση αυτή, ειδικότερα στην περιοχή της Ευρώπης, μελετήθηκε με τη χρήση δεδομένων από το πανευρωπαϊκό ιονοσφαιρικό δίκτυο *European Digital*



Σχήμα 6.6: Το δίκτυο του DIAS server με τους 9 ιονοσφαιρικούς σταθμούς (hertz2.space.noa.gr).



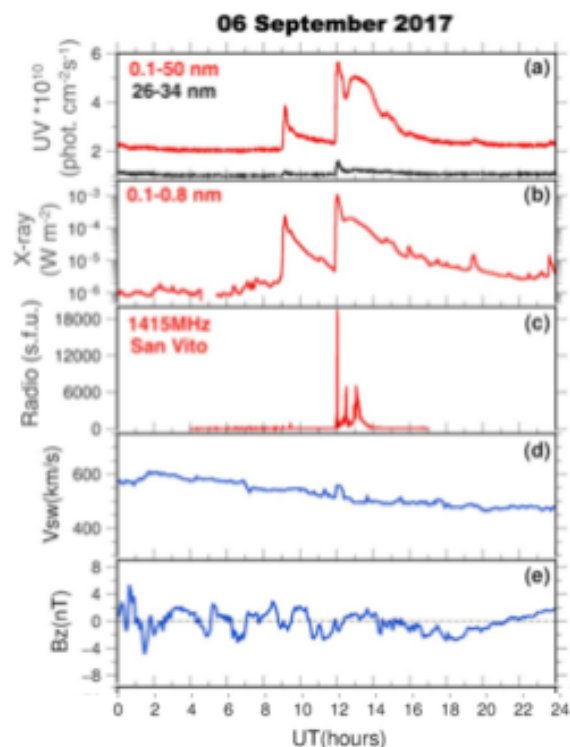
Σχήμα 6.7: Τρισδιάστατη σχηματική απεικόνιση του δικτύου των δορυφόρων GOES, καθώς και άλλων γεωσύγχρονων και μη, δορυφόρων, από διαστημικά προγράμματα διαφόρων χωρών. Απεικονίζεται επίσης ο δορυφόρος DSCOVR στο L1.

Upper Atmosphere Server (DIAS), το οποίο συγκεντρώνει δεδομένα από ψηφιακούς ιονοσφαιρικούς σταθμούς (*digisondes*) και καταγράφει σε πραγματικό χρόνο τις ιονοσφαιρικές συνθήκες. Το δίκτυο απαρτίζεται από 9 σταθμούς, μεταξύ των οποίων και τον ιονοσφαιρικό σταθμό του *Ινστιτούτου Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ)* στην Πεντέλη της Αττικής (Σχήμα 6.6). Η βάση δεδομένων του DIAS παρέχει χρονοσειρές, ιονοσφαιρικούς χάρτες και ιονογράμματα για σημαντικές ιονοσφαιρικές παραμέτρους όπως το foF_2 , το TEC , το $fmin$ κ.α. Συμπληρωματικοί χάρτες TEC για την περιοχή της Ευρώπης επιστρατεύτηκαν από δεδομένα *GPS* του δικτύου *EUREF Permanent Network (EPN)* του *Royal Observatory of Belgium (ROB)*, προκειμένου να συσχετιστούν με τις παραπάνω παραμέτρους. Τα δεδομένα αυτά απεικονίζουν την κατανομή του κάθετου TEC ($VTEC$, βλ. §5.3) πάνω από την Ευρώπη, ανά 15 λεπτά. Πρόσθετες χρονοσειρές και στοιχεία εξήχθησαν επίσης από το δίκτυο *Global Ionosphere Radio Observatory (GIRO)*, το οποίο περιέχει, πέραν των ευρωπαϊκών, δεδομένα από σταθμούς σε παγκόσμια κλίμακα. Για τη σύγκριση των χρονοσειρών των παραμέτρων αυτών με την επίδραση των συμβάντων στα όρια της γήινης μαγνητόσφαιρας, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους δορυφόρους *Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)* του οργανισμού *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, της *NASA*. Σήμερα το πρόγραμμα αριθμεί 4 γεωσύγχρονους δορυφόρους (G14-17, Σχήμα 6.7) σε λειτουργία, ενώ δεδομένα παλαιότερων δορυφόρων του προγράμματος είναι ακόμη διαθέσιμα (G1-13). Η βάση δεδομένων τους παρέχει διαγράμματα (χρονοσειρές) ροής ακτινοβολίας ακτίνων-Χ, ροής πρωτονίων και ροής ηλεκτρονίων σε αρκετές ενέργειες. Προκειμένου να εκτιμηθεί η απόκριση του κοντινού στη Γη διαστημικού περιβάλλοντος στα εν λόγω εκρηκτικά γεγονότα, χρησιμοποιήθηκαν,

επιπλέον, δεδομένα (χρονοσειρές βαθμωτού μαγνητικού πεδίου, πυκνότητας πρωτονίων, ταχύτητας ροής ηλιακού ανέμου κ.α.) από τους δορυφόρους της NASA *Advanced Composition Explorer (ACE)*, *Deep Space Climate Observatory (DSCOVER)* και *WIND*, που υπάρχουν στη βάση δεδομένων OmniWeb, η οποία συγκεντρώνει πληροφορίες από έναν μεγάλο αριθμό δορυφόρων, παρέχοντας χρονοσειρές ανάλυσης 1 λεπτού και 5 λεπτών, σε εύρος μέχρι και 27 ημερών. Οι δορυφόροι αυτοί βρίσκονται στο Λανγκραντζιανό σημείο 1 (L_1 , Σχήμα 6.7) του συστήματος Γης-Ήλιου και θεωρούμε ότι απέχουν από τον αστέρα μας 1 AU, κατά προσέγγιση.

6.3 Επιδράσεις των εκρηκτικών ηλιακών γεγονότων του Σεπτεμβρίου 2017 στο γεωδιάστημα

Τα απρόσμενα εκρηκτικά ηλιακά γεγονότα του Σεπτεμβρίου του 2017 είχαν επιπτώσεις σε κάθε περιοχή του γεωδιαστήματος και είχαν ως αποτέλεσμα να προκληθούν διαταραχές τόσο στον διαπλανητικό χώρο όσο και στη γήινη μαγνητόσφαιρα, αλλά και την ιονόσφαιρα καθ' ύψος και κατά γεωγραφικό πλάτος. Η πλούσια σε ηλιακά και γεωμαγνητικά φαινόμενα αυτή περίοδος συμπεριλάμβανε, μεταξύ άλλων, πάνω από 140 εκλάμψεις όλων των τάξεων, από τις οποίες 27 ήταν τάξης M και 4 τάξης X, συμπεριλαμβανομένης και της ισχυρότερης έκλαμψης των τελευταίων ετών, αλλά και μία εκ των ταχύτερων CMEs που έχουν παρατηρηθεί ποτέ (για τη γενική επισκόπηση των εκρηκτικών φαινομένων, βλ. §3.3). Τα γεγονότα αυτά καταγράφηκαν και μελετήθηκαν εκτενώς στη βιβλιογραφία (π.χ. Redmon et al., 2018), ενώ η επίδραση των εν λόγω φαινομένων ήταν εμφανής στην ιονόσφαιρα, την πλοήγηση και τα ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας HF, (Yasyukevich et al., 2018). Η ενεργός περιοχή AR 12673 (NOAA) έδωσε στις **6 Σεπτεμβρίου** τρεις εκλάμψεις M και δύο X τάξης (Πίνακας 6.2). Η πρώτη έκλαμψη, τάξης X2.2, είχε ως αποτέλεσμα φυσικά την άμεση αύξηση της καταγραφόμενης ροής ακτινοβολίας στις ακτίνες-X από τους δορυφόρους GOES, ενώ δεν εμφάνισε άμεση επίδραση στην καταγραφόμενη ροή πρωτονίων και τις πα-

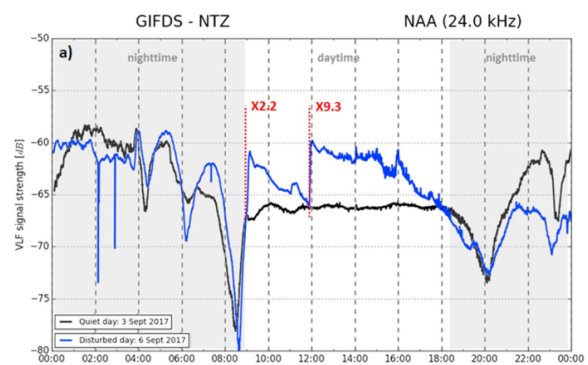


Σχήμα 6.8: Η επίδραση των εκρηκτικών γεγονότων της 6ης Σεπτεμβρίου 2017 στις εξής παραμέτρους (από πάνω προς τα κάτω): ροή ακτινοβολίας EUV, ροή ακτινοβολίας στις ακτίνες-X, εκπομπή στα ραδιοκύματα, ταχύτητα ηλιακού ανέμου, z συνιστώσα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (B_z). Είναι εμφανές ότι το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο δεν επηρεάστηκε άμεσα, σε αντίθεση με τις ροές ακτινοβολίας (Yasyukevich et al., 2018).

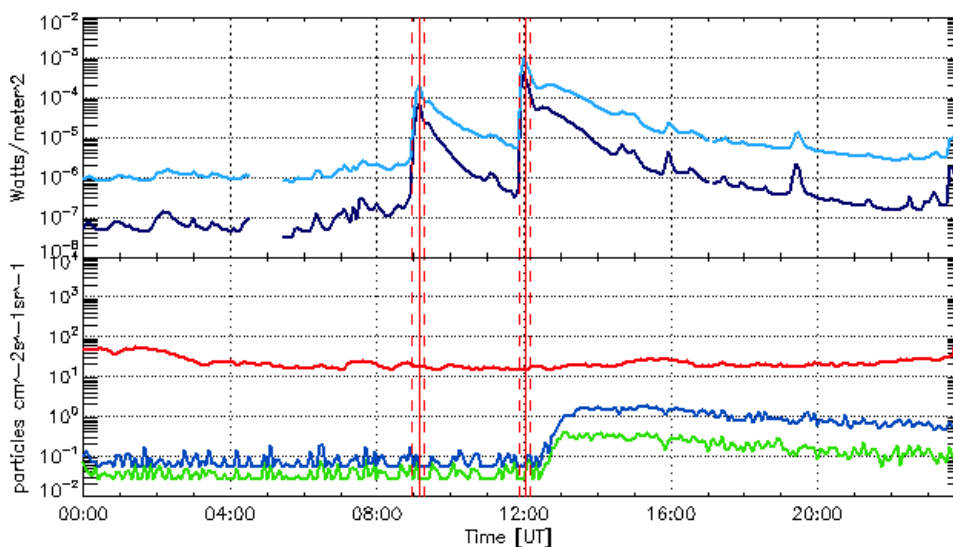
Πίνακας 6.2: Εκλάμψεις M και X τάξεων στις 6 Σεπτεμβρίου.

| Τάξη | Θέση | έναρξη (UT) | κορύφωση (UT) | λήξη (UT) |
|------|--------|-------------|---------------|-----------|
| X2.2 | S08W32 | 08:57 | 09:10 | 09:17 |
| X9.3 | S09W34 | 11:53 | 12:02 | 12:10 |
| M2.5 | S09W38 | 15:51 | 15:56 | 17:52 |
| M1.4 | S08W38 | 19:21 | 19:30 | 19:35 |
| M1.2 | S08W40 | 23:33 | 23:39 | 23:44 |

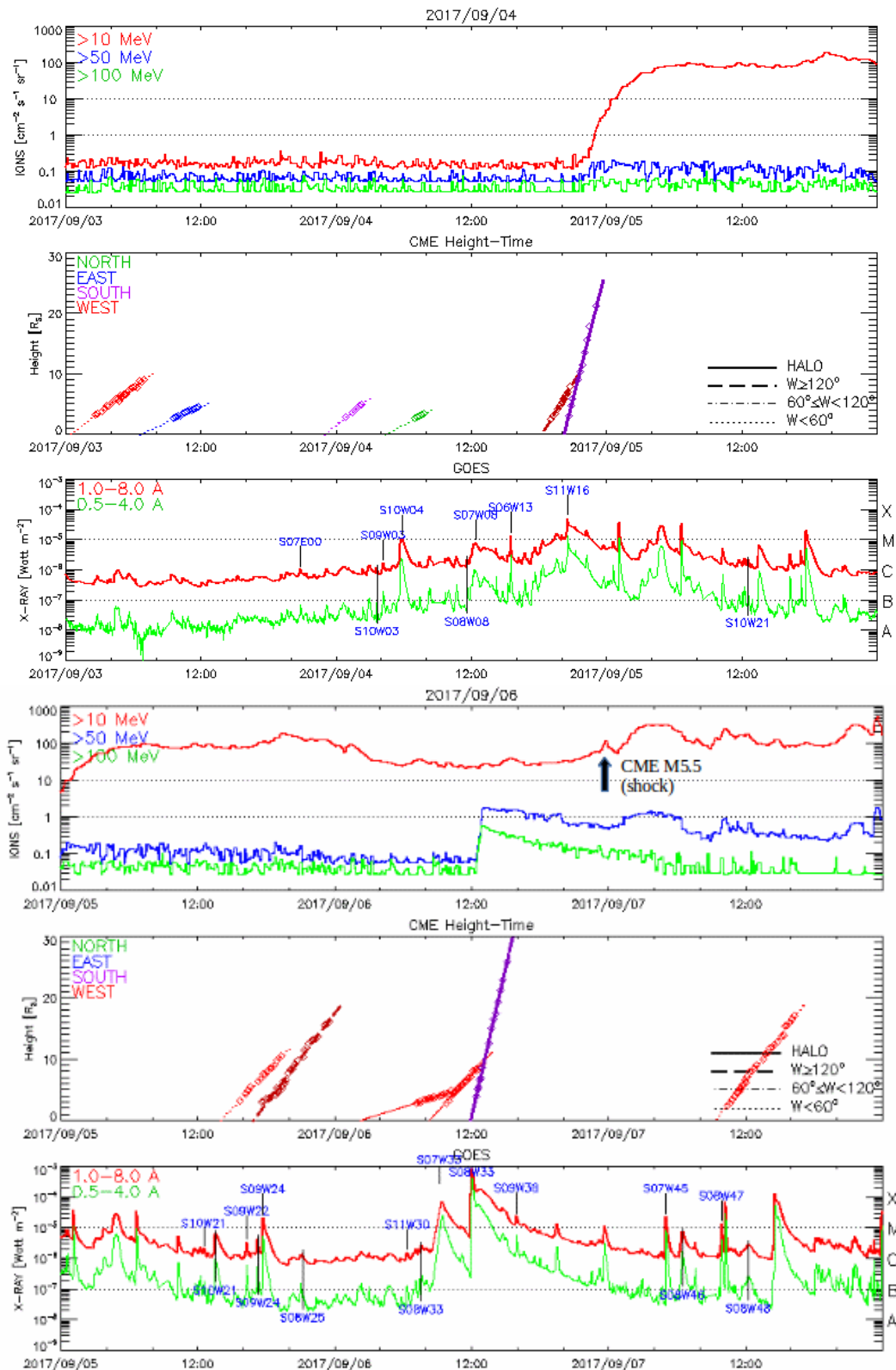
ραμέτρους του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (Interplanetary Magnetic Field-IMF) (Σχήμα 6.8). Η ισχυρότερη έκλαμψη της ημέρας, αλλά και του 24ου κύκλου στο σύνολό του (τάξης X9.3), καταγράφηκε από διάφορους δορυφορικούς ανιχνευτές και μελετήθηκε η πολυδιάστατη επίδρασή της στην καταγραφόμενη ροή ακτινοβολίας, στον μεσοπλανητικό χώρο και στις γεωφυσικές παραμέτρους (Σχήμα 6.8), αλλά και η τοπολογία του ηλιακού μαγνητικού πεδίου στο οποίο οφείλεται η εμφάνιση και η εξέλιξή της (Jiang et al., 2018). Συγκεκριμένα, οι εκλάμψεις της 6ης Σεπτεμβρίου είχαν αρνητικές επιπτώσεις στο σύστημα πλοήγησης *Global Navigation Satellite System (GNSS)* πάνω από την Ευρώπη (Berdermann et al., 2018) και ει-



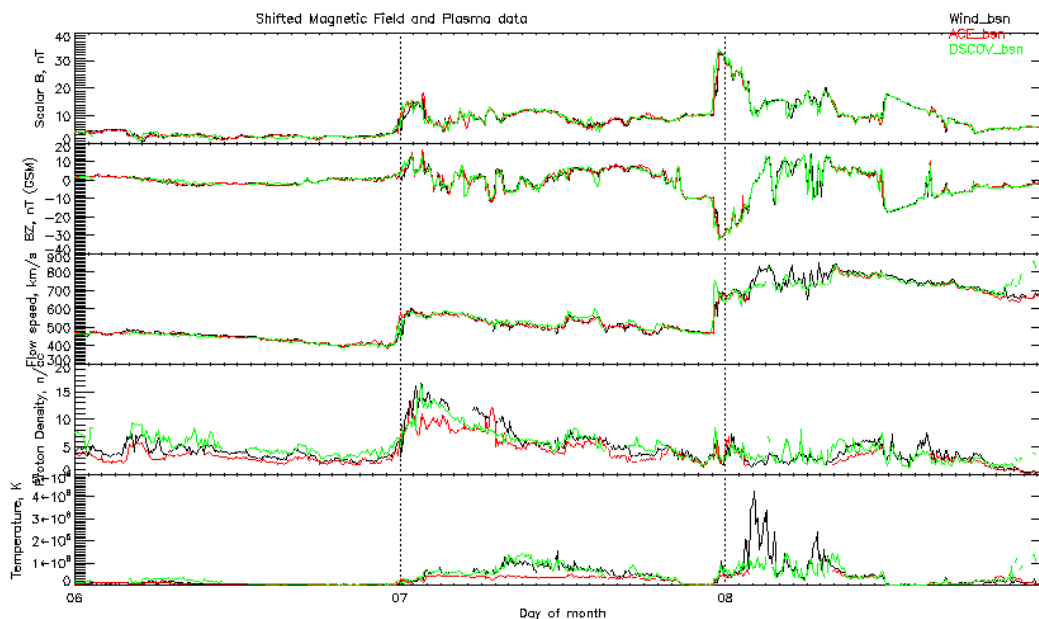
Σχήμα 6.9: Η διαταραχή στα σήματα VLF (24 kHz) στις 6 Σεπτεμβρίου (μπλε γραμμή) σε σύγκριση με μία ήπια ημέρα (3 Σεπτεμβρίου, μαύρη γραμμή) (Berdermann et al., 2018).



Σχήμα 6.10: Ροή ακτινοβολίας ακτίνων-X από τον GOES-14 (1 έως 8 Å-σκούρο μπλε, 0.5 έως 4 Å-γαλάζιο, επάνω) και ροή πρωτονίων από τον GOES-15 (>10 MeV-κόκκινο, >50 MeV-μπλε και >100 MeV-πράσινο, κάτω) για την 6η Σεπτεμβρίου. Όλες οι καμπύλες απεικονίζουν τη μέση τιμή ανά 5άλεπτο, ενώ οι κάθετες κόκκινες γραμμές απεικονίζουν τις χρονικές στιγμές έναρξης (διακεκομμένη), κορύφωσης (πυκνή) και λήξης (διακεκομμένη) των εκλάμψεων.

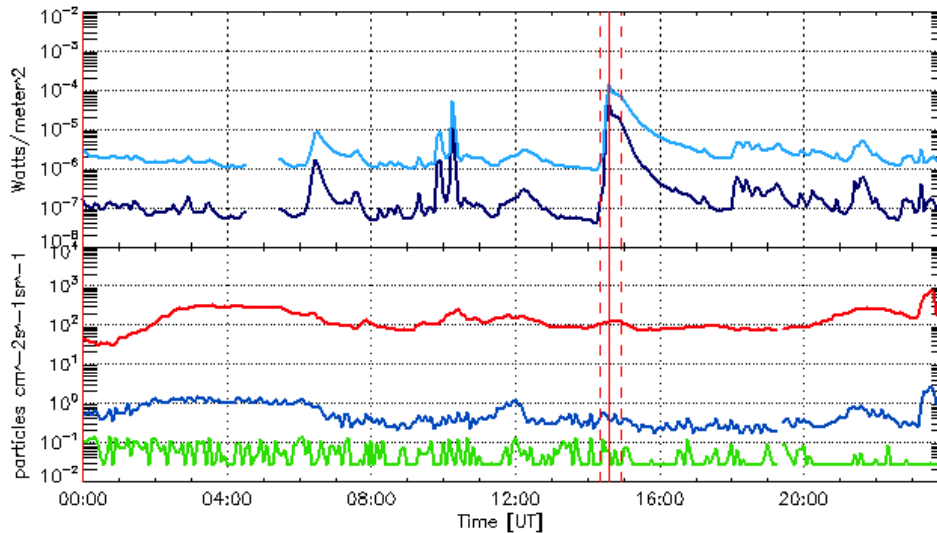


Σχήμα 6.11: Γραφήματα ροής ιόντων, καταγραφόμενου ύψους της CME και ροής ακτινοβολίας στις ακτίνες-X (από επάνω προς τα κάτω) για τα χρονικά διαστήματα 3-5 Σεπτεμβρίου (3 πρώτα γραφήματα) και 5-7 Σεπτεμβρίου (3 τελευταία γραφήματα), όπου απεικονίζονται και οι ηλιογραφικές συντεταγμένες των φαινομένων στα οποία οφείλονται οι καταγραφόμενες μεταβολές. Στις 4 Σεπτεμβρίου πραγματοποιήθηκε έκλαμψη M5.5 και όπως φαίνεται και στο σχήμα συνδέθηκε με μία άλω CME, της οποίας σωματίδια χαμηλών ενεργειών κατέφτασαν στις 6 Σεπτεμβρίου στους ανιχνευτές. Τα γραφήματα προέρχονται από τα δεδομένα του SOHO/LASCO.

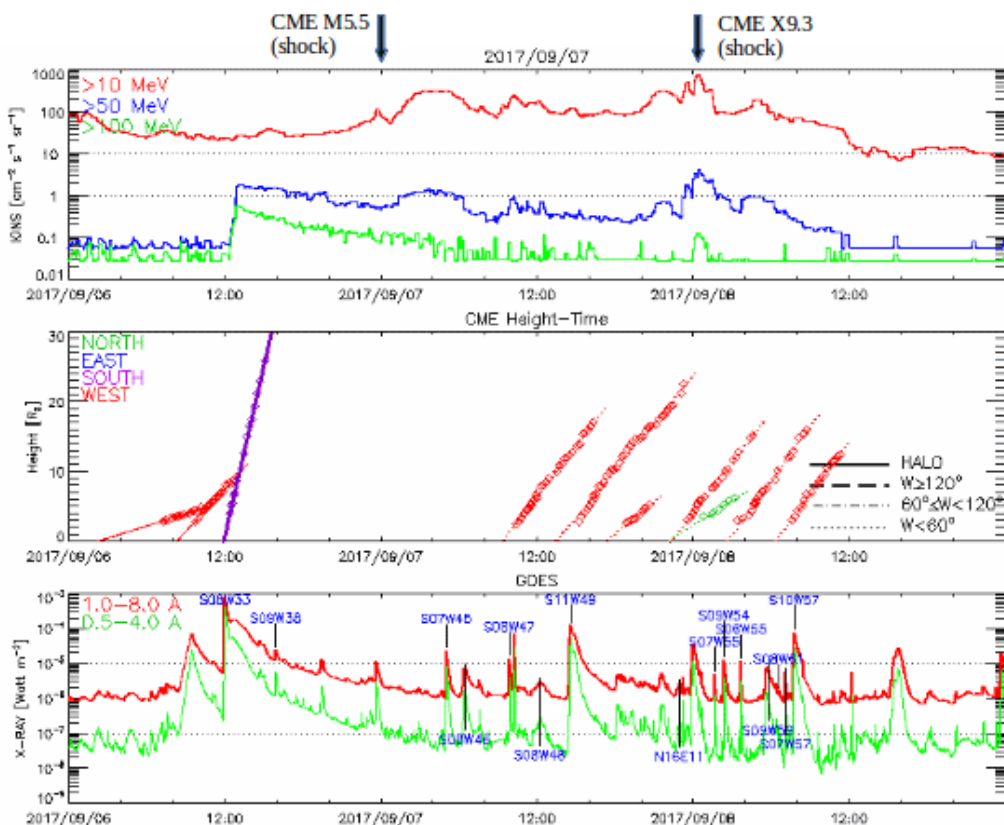


Σχήμα 6.12: Συμπεριφορά των παραμέτρων του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και του πλάσματος στο γεωδιάστημα, κατά τα γεγονότα του χρονικού διαστήματος 6-8 Σεπτεμβρίου 2017. Η διαταραχή εκδηλώθηκε με τις γεωμαγνητικές καταιγίδες στις 7 και στις 8 του μήνα, μετά την άφιξη της κατευθυνόμενης προς τη Γη CME, που απελευθερώθηκε από την X9.3. Από δεδομένα (μέση τιμή ανά πεντάλεπτο) των δορυφόρων ACE, Wind και DSCVR.

δικά στα βορειότερα γεωγραφικά πλάτη κατά τη διάρκεια των γεωμαγνητικών καταιγίδων που προκλήθηκαν στις 7 και 8 Σεπτεμβρίου (Linty et al., 2018). Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.8a το μέγιστο της αύξησης εκπομπής στα ραδιοκύματα έλαβε χώρα στις $\sim 12:00-12:10$ UT, ενώ η αύξηση στη ροή ακτινοβολίας στις ακτίνες EUV ήταν εξίσου έντονη με την αντίστοιχη στις ακτίνες-X. Παράλληλα μπορεί να διακρίνει κανείς την άμεση επίδραση που είχαν οι δύο ισχυρές εκλάμψεις στη διάδοση ραδιοκυμάτων χαμηλής συχνότητας (Very Low Frequency radio waves - VLF) στην ιονόσφαιρα ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 6.9). Οι δορυφόροι GOES κατέγραψαν αύξηση στη ροή ακτινοβολίας των ακτίνων-X, ενώ παρατηρήθηκε απότομη αύξηση στη ροή των πρωτονίων μόνο για τις υψηλές ενέργειες (>50 MeV και >100 MeV) κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 6.10) και μόνο στο χρονικό διάστημα μετά την εκδήλωση της X9.3. Από τις δύο πανίσχυρες εκλάμψεις, μόνο η μία συνδέθηκε με την απελευθέρωση μίας κατευθυνόμενης προς τη Γη CME με ταχύτητα απομάκρυνσης 1571 km/s (Σχήμα 6.11), η οποία καταγράφηκε στον κατάλογο του SOHO/LASCO ως άλω CME στις $12:24$ UT. Την ίδια μέρα κατέφθασαν ενεργητικά σωματίδια από το κρουστικό κύμα της CME που απελευθερώθηκε από την έκλαμψη M5.5 στις 4 Σεπτεμβρίου (Redmon et al., 2018). Η CME αυτή καταγράφηκε από τον SOHO/LASCO ως άλω με ταχύτητα πρώτης τάξης 1418 km/s στις $20:36$ UT (Σχήμα 6.11) και παρά την άφιξή της, η γεωμαγνητική δραστηριότητα της ημέρας διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα, έχοντας προκαλέσει ωστόσο μικρές διαταραχές (Σχήματα 6.8d, e και 6.12). Στις **07 Σεπτεμβρίου** εκδηλώθηκε, όπως προαναφέρθηκε, η έκλαμψη τάξης X1.3, της οποίας η αύξηση της ροής ακτινοβολίας καταγράφηκε μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα από τους δορυφόρους GOES (Σχήμα 6.13). Την ίδια μέρα παρουσιάστηκαν έντονες διαταραχές

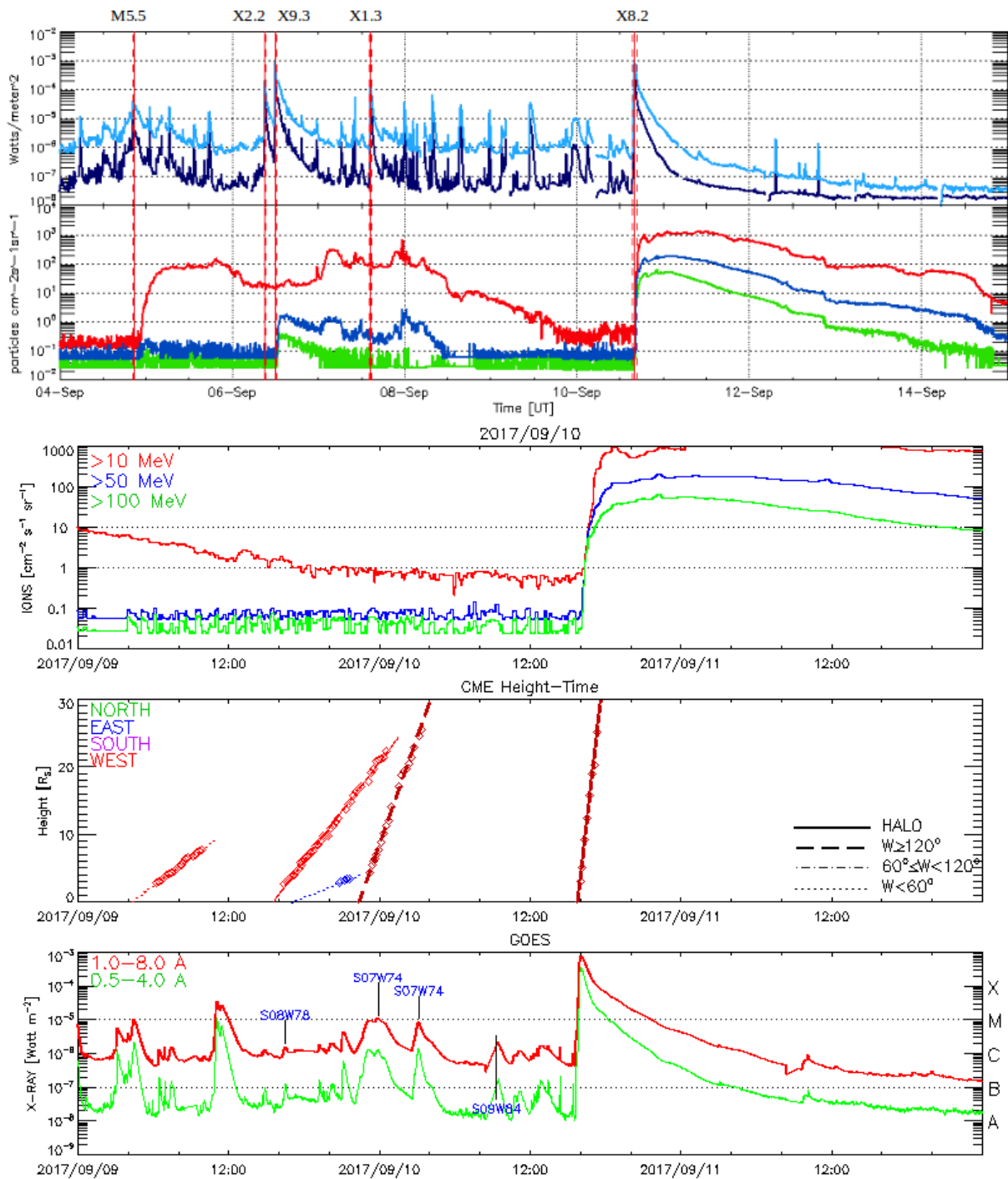


Σχήμα 6.13: Ροή ακτινοβολίας ακτίνων-X από τον GOES-14 (1 έως 8 Å-σκούρο μπλε, 0.5 έως 4 Å-γαλάζιο, επάνω) και ροή πρωτονίων από τον GOES-15 (> 10 MeV-κόκκινο, > 50 MeV-μπλε και > 100 MeV-πράσινο, κάτω) για την 7η Σεπτεμβρίου. Απεικονίζονται οι μέσες τιμές ανά 5άλεπτο, ενώ οι κάθετες κόκκινες γραμμές απεικονίζουν τις χρονικές στιγμές έναρξης (διακεκομμένη), κορύφωσης (πυκνή) και λήξης (διακεκομμένη) της έκλαμψης.



Σχήμα 6.14: Γραφήματα ροής ιόντων, καταγεγραμμένου ύψους CME και ροής ακτινοβολίας στις ακτίνες-X (από επάνω προς τα κάτω) για το χρονικό διάστημα 6-8 Σεπτεμβρίου. Τα γραφήματα προέρχονται από τα δεδομένα του SOHO/LASCO.

στις παραμέτρους του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κατά τις πρώτες ώρες μετά την εκδήλωσή της (Σχήμα 6.12), οι οποίες ακολούθησαν την απότομη αύξηση



Σχήμα 6.15: Το γράφημα στην κορυφή απεικονίζει τη ροή ακτινοβολίας στις ακτίνες-X από τον GOES-14 (1 έως 8 Å-σκούρο μπλε, 0.5 έως 4 Å-γαλάζιο, επάνω) και τη ροή πρωτονίων από τον GOES-15 (> 10 MeV-κόκκινο, > 50 MeV-μπλε και > 100 MeV-πράσινο, κάτω) για το χρονικό διάστημα 4-14 Σεπτεμβρίου, ενώ έχουν σημειωθεί και οι χρονικές στιγμές των εκλάμψεων με κόκκινες διακεκομμένες γραμμές. Απεικονίζονται οι μέσες τιμές ανά 5άλεπτο. Τα επόμενα τρία διαγράμματα απεικονίζουν (από επάνω προς τα κάτω): τη ροή ιόντων, το καταγεγραμμένο ύψος της CME και τη ροή ακτινοβολίας, όλα συναρτήσει του χρόνου στο διάστημα 9-11 Σεπτεμβρίου από δεδομένα του SOHO/LASCO. Στις 10 Σεπτεμβρίου πραγματοποιήθηκε η X8.2 έκλαμψη και, όπως φαίνεται και στο σχήμα, συνδέθηκε με μία ταχύτατη άλω CME.

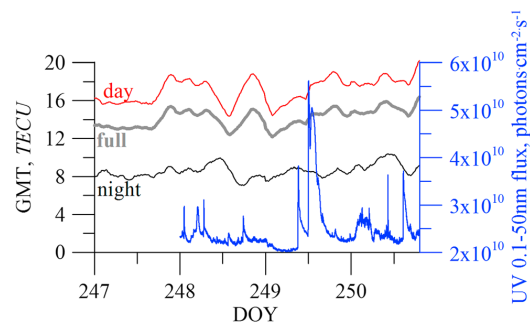
στη ροή πρωτονίων λόγω της άφιξης κοντά στη Γη του κρουστικού κύματος της CME (προέλευση: έκλαμψη M5.5, Σχήματα 6.11, 6.14). Οι διαταραχές των παραμέτρων εντάθηκαν εντός της ημέρας και κορυφώθηκαν κατά το τέλος της 7ης και

αρχές της 8ης Σεπτεμβρίου (Σχήμα 6.12) λόγω της άφιξης της CME (προέλευση: έκλαμψη X9.3) και ακολουθήθηκε αύξηση στη ροή σωματιδίων υψηλών ενεργειών ($>10\text{ MeV}$, $>50\text{ MeV}$ και $>100\text{ MeV}$, Σχήμα 6.14). Τις επόμενες ημέρες η ροή των πρωτονίων ακολούθησε συνολικά πτωτική τάση αποκατάστασης (όπως φαίνεται και στο πρώτο από τα Σχήματα 6.15), όπως και οι παράμετροι του IMF έως την **10η Σεπτεμβρίου** κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η έκλαμψη X8.2 τάξης, η οποία απελευθέρωσε μία άλω CME (κατευθυνόμενη προς τη Γη με ταχύτητα 3163 km/s), που παρατηρήθηκε στις 16:00 UT από το *SOHO/LASCO* (Σχήμα 6.15).

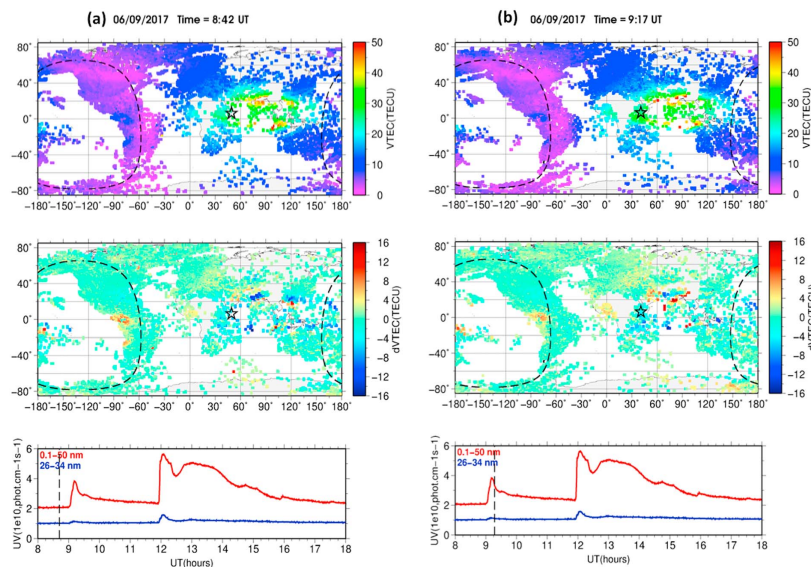
Παρακάτω παρουσιάζουμε αναλυτικά την απόκριση όλων αυτών των γεγονότων που περιγράψαμε ως τώρα στην ιονόσφαιρα της Γης.

6.3.1 Απόκριση της ιονόσφαιρας

Τα εκρηκτικά ηλιακά γεγονότα που περιγράφηκαν είχαν άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στη γήινη ιονόσφαιρα, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις οι επιδράσεις τους επικαλύπτονται χρονικά. Στο Σχήμα 6.16 φαίνεται η γενικότερη επίδραση των φαινομένων του χρονικού διαστήματος 4-7 Σεπτεμβρίου στην ολική περιεκτικότητα ηλεκτρονίων Total Electron Content - *TEC*) και πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται οι μεταβολές του μέσου παγκόσμιου *TEC* (Global mean *TEC* - GMT), το οποίο εκφράζει τον συνολικό αριθμό ηλεκτρονίων στη γήινη ιονόσφαιρα, κανονικοποιημένο στη συνολική επιφάνεια της Γης (Yasyukevich et al., 2018). Προκειμένου να μελετηθεί η άμεση επίδραση των εκρηκτικών ηλιακών γεγονότων στην πυκνότητα των ηλεκτρονίων ελέγχονται παρακάτω τόσο παγκόσμιοι (Σχήμα



Σχήμα 6.16: Οι διακυμάνσεις του παγκόσμιου μέσου *TEC* (GMT) κατά το χρονικό διάστημα 4-7 Σεπτεμβρίου (ημέρες 247-250). Η μπλε γραμμή απεικονίζει τη ροή ακτινοβολίας στις ακτίνες EUV (0,1-50 nm) από τον δορυφόρο *SOHO* (Yasyukevich et al., 2018).

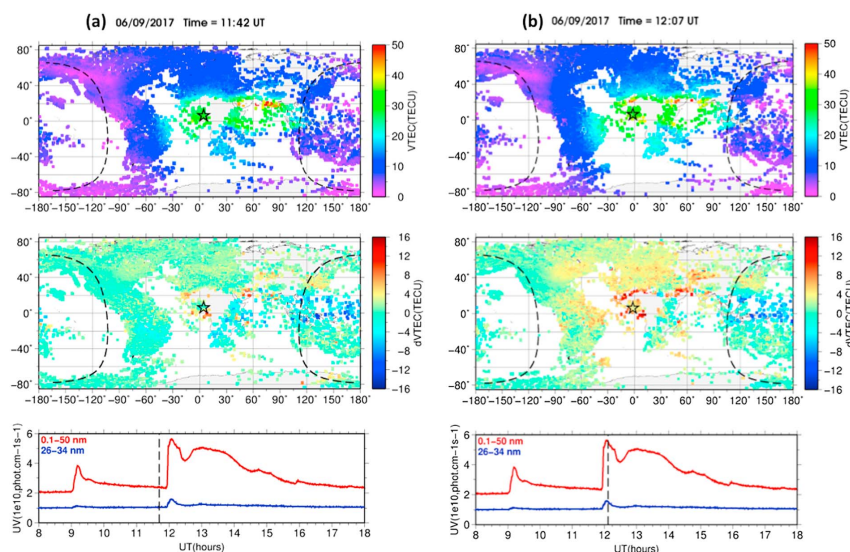


Σχήμα 6.17: Χάρτες για το απόλυτο κάθετο *TEC* (VTEC) (πρώτη γραμμή) για το διαφορικό κάθετο *TEC* (dVTEC) (μεσαία γραμμή) και τη μεταβολή της ροής ακτινοβολίας στις ακτίνες EUV (κάτω γραμμή). Οι στήλες (a) και (b) παρουσιάζουν αντίστοιχα τους χάρτες πριν και κατά το μέγιστο της X2.2 στις 6 Σεπτεμβρίου (διακεκομμένες κάθετες μαύρες γραμμές στη ροή ακτινοβολίας) (Yasyukevich et al., 2018).

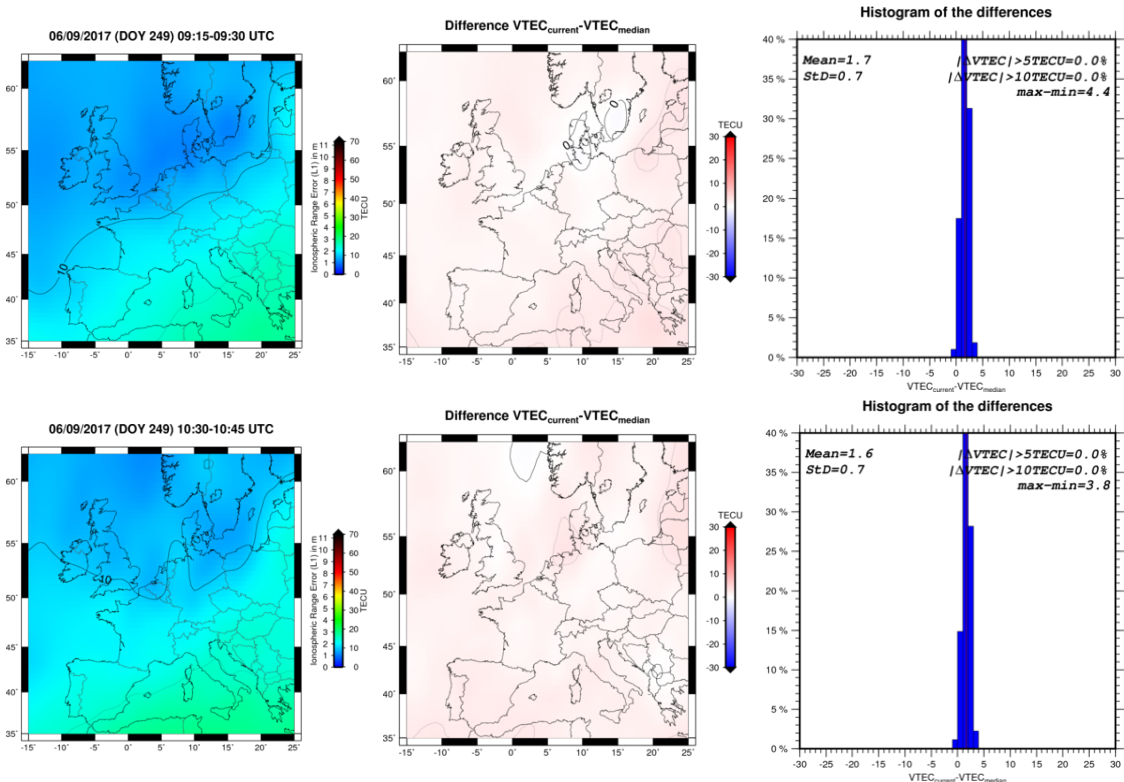
6.17) όσο και τοπικοί χάρτες TEC (π.χ. Σχήμα 6.18). Επιπλέον, μελετούμε τη χρονική μεταβολή άλλων κρίσιμων ιονοσφαιρικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια των ημερών ενδιαφέροντος τον Σεπτέμβριο 2017.

6 Σεπτεμβρίου 2017

Η άμεση επίδραση της $X9.3$ είναι πιο εμφανής σε αντίθεση με την $X2.2$, η οποία φαίνεται να είχε μικρότερο αντίκτυπο, στις ιονοσφαιρικές παραμέτρους (και όχι μόνο), γεγονός που έρχεται σε συμφωνία, σε πρώτη ανάγνωση, με τις καταγραφόμενες ροές ενεργητικών πρωτονίων από τους δορυφόρους GOES (Σχήμα 6.15). Τις άμεσες επιδράσεις των εκλάμψεων της **6ης Σεπτεμβρίου** στο παγκόσμιο TEC μπορούμε να τις παρατηρήσουμε στους αντίστοιχους χάρτες του Σχήματος 6.17. Οι χάρτες των Yasyukevich et al. (2018) δείχνουν αύξηση $\sim 3 - 4 TECU$, κατά βάση στα μεσαία και νότια γεωγραφικά πλάτη του βορείου ημισφαιρίου, για την $X2.2$ στο διαφορικό $VTEC$ ($dVTEC$), το οποίο προκύπτει από την αφαίρεση των τιμών της πρόσφατης αδιατάρκτης περιόδου (μέσο $VTEC$ από τις ημέρες 4 και 5 Σεπτεμβρίου 2017) από τις τιμές των διαταραγμένων (Σχήμα 6.17). Παράλληλα η απόκριση της ιονόσφαιρας σε ότι αφορά την πυκνότητα των ηλεκτρονίων ήταν άμεση και εμφανής στην περίπτωση της $X9.3$, αφού καταγράφηκε αύξηση $\sim 8 - 10 TECU$ στα μεσαία-βόρεια και $\sim 12 - 16 TECU$ στα νότια γεωγραφικά πλάτη του βορείου ημισφαιρίου (Ευρωπαϊκή Ήπειρος), ενώ σημαντική αύξηση παρατηρείται και στη νότια Αφρική και την ανατολική Αμερική (Σχήμα 6.18). Ειδικότερα στην Ευρώπη, η διαφορά στην απόκριση του TEC λόγω των δύο εκλάμψεων είναι εμφανής, καθώς καθ' όλη τη διάρκεια της εκδήλωσης της $X2.2$ δεν παρατηρείται κάποια ραγδαία αύξηση. Οι τιμές του TEC στους χάρτες του Σχήματος 6.19 πριν, κατά τη διάρκεια (09:15-09:30 UT) και μετά το πέρας (10:30-10:45 UT) της $X2.2$ (ολοκληρώθηκε στις 09:17 UT, Πίνακας 6.2) παραμένουν στα επίπεδα των μέσων

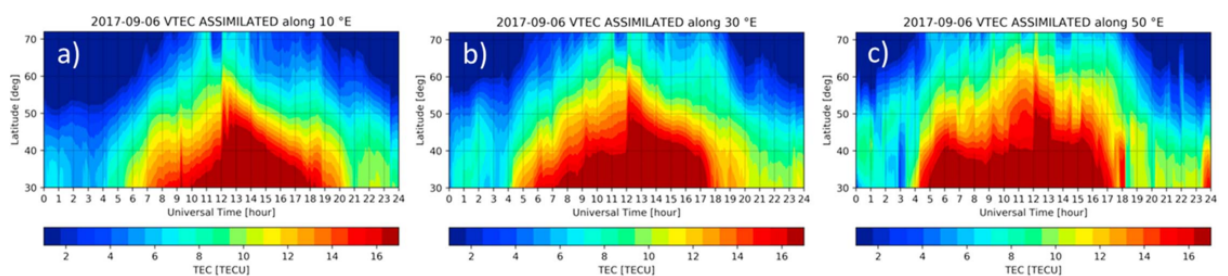


Σχήμα 6.18: Ομοίως με το Σχήμα 6.17 για την έκλαμψη $X9.3$ στις 6 Σεπτεμβρίου (Yasyukevich et al., 2018).

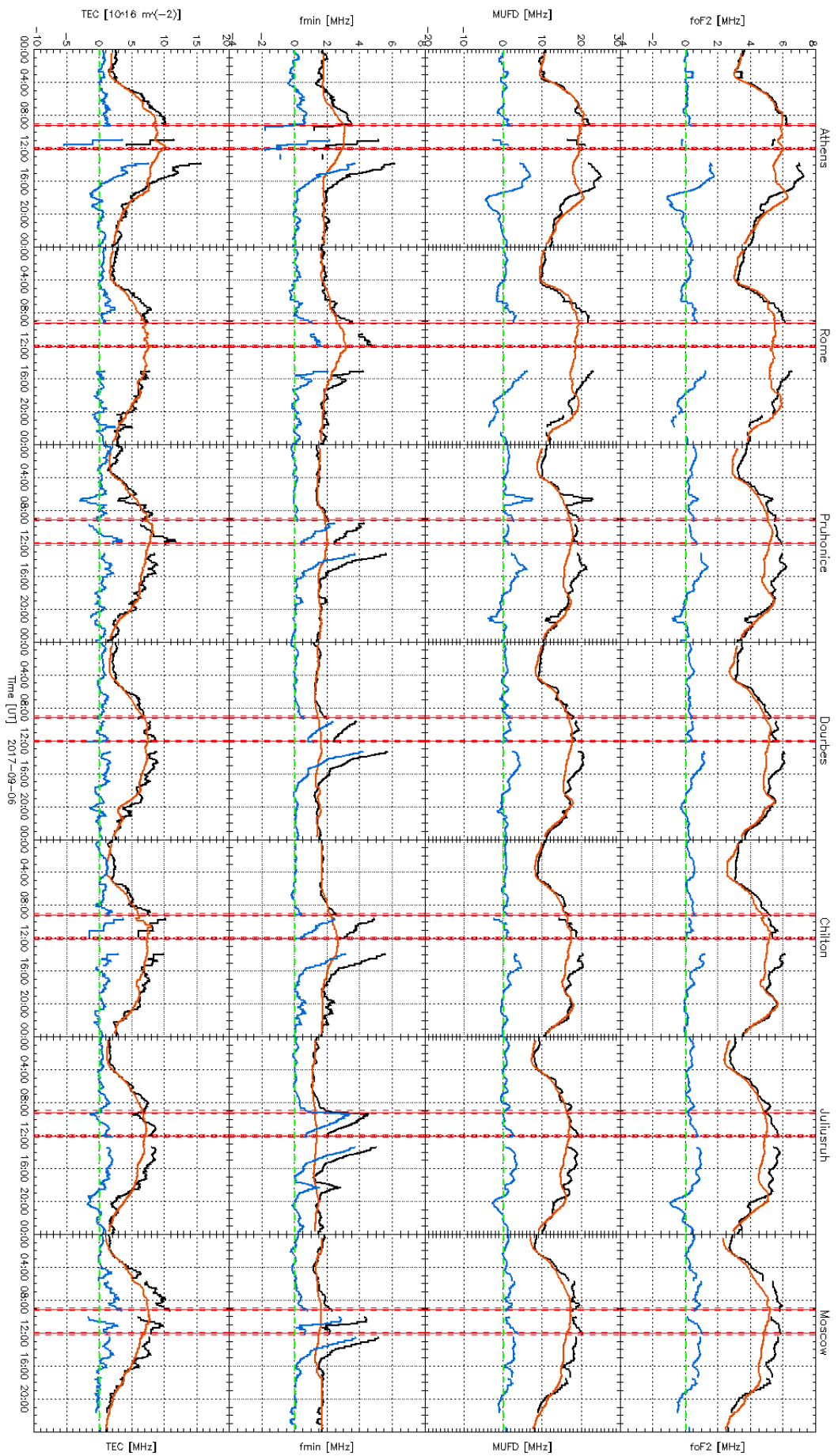


Σχήμα 6.19: Ευρωπαϊκοί χάρτες VTEC (αριστερή στήλη), της μεταβολής του ($dVTEC$, μεσαία στήλη) και ιστόγραμμα μεταβολών του (δεξιά στήλη) της 6ης Σεπτεμβρίου για χρονικά διαστήματα πριν (επάνω γραμμή, 09:15-09:30 UT) και μετά (κάτω γραμμή, 11:30-11:45 UT) την έκλαμψη X2.2 (χάρτες από Belgium Royal Observatory).

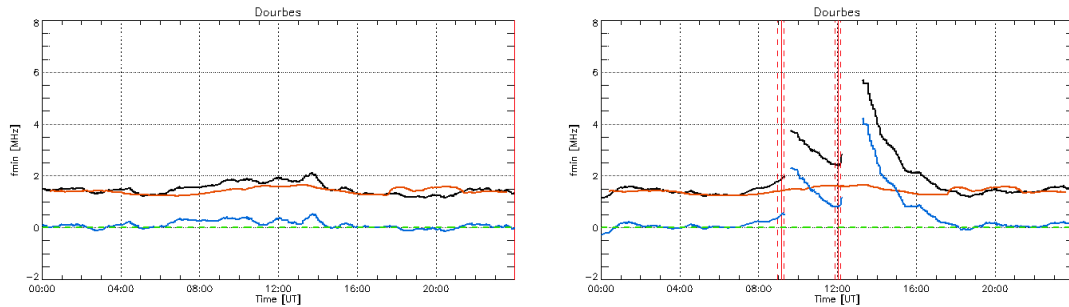
τιμών των 15 προηγούμενων ημερών (κατά την περίοδο αυτή είχαμε μηδαμινές διαταραχές), παρά την παρατηρούμενη αύξηση στις ροές των ακτίνων-X και των ακτίνων EUV στα χρονικά αυτά διαστήματα (Σχήματα 6.8, 6.10). Το παραπάνω γεγονός αποτυπώνεται και στα γραφήματα των Berdermann et al. (2018) (Σχήμα 6.20), στα οποία η μεταβολή του TEC απεικονίζεται για ένα εύρος γεωγραφικών πλατών (30°B-70°B) σε τρία διαφορετικά γεωγραφικά μήκη (10°E, 30°E, 50°E), όπου καταγράφεται μία μικρή απότομη αύξηση μετά τις 09:00 UT. Η συμπεριφορά του TEC όμως εξετάζεται σε σχέση και με άλλες ιονοσφαιρικές παραμέτρους. Στο Σχήμα 6.21 καταγράφουμε, πέραν του TEC (ολικό TEC), τη συμπεριφορά των παραμέτρων $foF2$, $MUFDF$, $fmin$ για την 6η Σεπτεμβρίου, από τους 7 ιονοσφαιρικούς σταθμούς του DIAS (§6.2), που είχαν διαθέσιμα δεδομένα την περίοδο αυτή, συν-



Σχήμα 6.20: Κατανομή του TEC κατά τη διάρκεια της 6ης Σεπτεμβρίου για τρία γεωγραφικά μήκη (10°E, 30°E, 50°E) και σε γεωγραφικά πλάτη 30°B-70°B (Berdermann et al., 2018).



Σχήμα 6.21: 6 Σεπτεμβρίου. Οι στήλες είναι κατανεμημένες από πάνω προς τα κάτω ως προς τις παραμέτρους: foF2, MUF3000, fmin και ολικό TEC, και από αριστερά προς τα δεξιά ως προς τους ιονοσφαιρικούς σταθμούς, από νοτιότερα προς βορειότερα γεωγραφικά πλάτη. Απεικονίζεται για κάθε παράμετρο: η καταγραφόμενη τιμή (μαύρη γραμμή), η στατιστικά πιθανότερη τιμή (median) υπολογισμένη από τις 30 προηγούμενες ημέρες (προτοκαλή γραμμή) και η διαφορά τους (μπλε γραμμή). Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές τονίζουν τα χρονικά σημεία στα οποία εκδηλώθηκαν οι εκλάμψεις.



Σχήμα 6.22: Παράδειγμα υπολογισμού της τυπικής απόκλισης για την παράμετρο f_{min} από τον σταθμό του δικτύου DIAS στο Dourbes. Απεικονίζεται η συμπεριφορά του ολικού f_{min} για μία αδιατάρακτη ημέρα (5η Σεπτεμβρίου, αριστερά) και για την 6η Σεπτεμβρίου (δεξιά), κατά την οποία εκδηλώθηκαν οι εκλάμψεις X2.2 και X9.3 (κάθετες κόκκινες γραμμές). Οι γραμμές απεικονίζουν την καταγραφόμενη τιμή (μαύρη γραμμή), τη στατιστικά πιθανότερη τιμή (median) υπολογισμένη από τις 30 προηγούμενες ημέρες (πορτοκαλί γραμμή) και τη διαφορά τους (μπλε γραμμή).

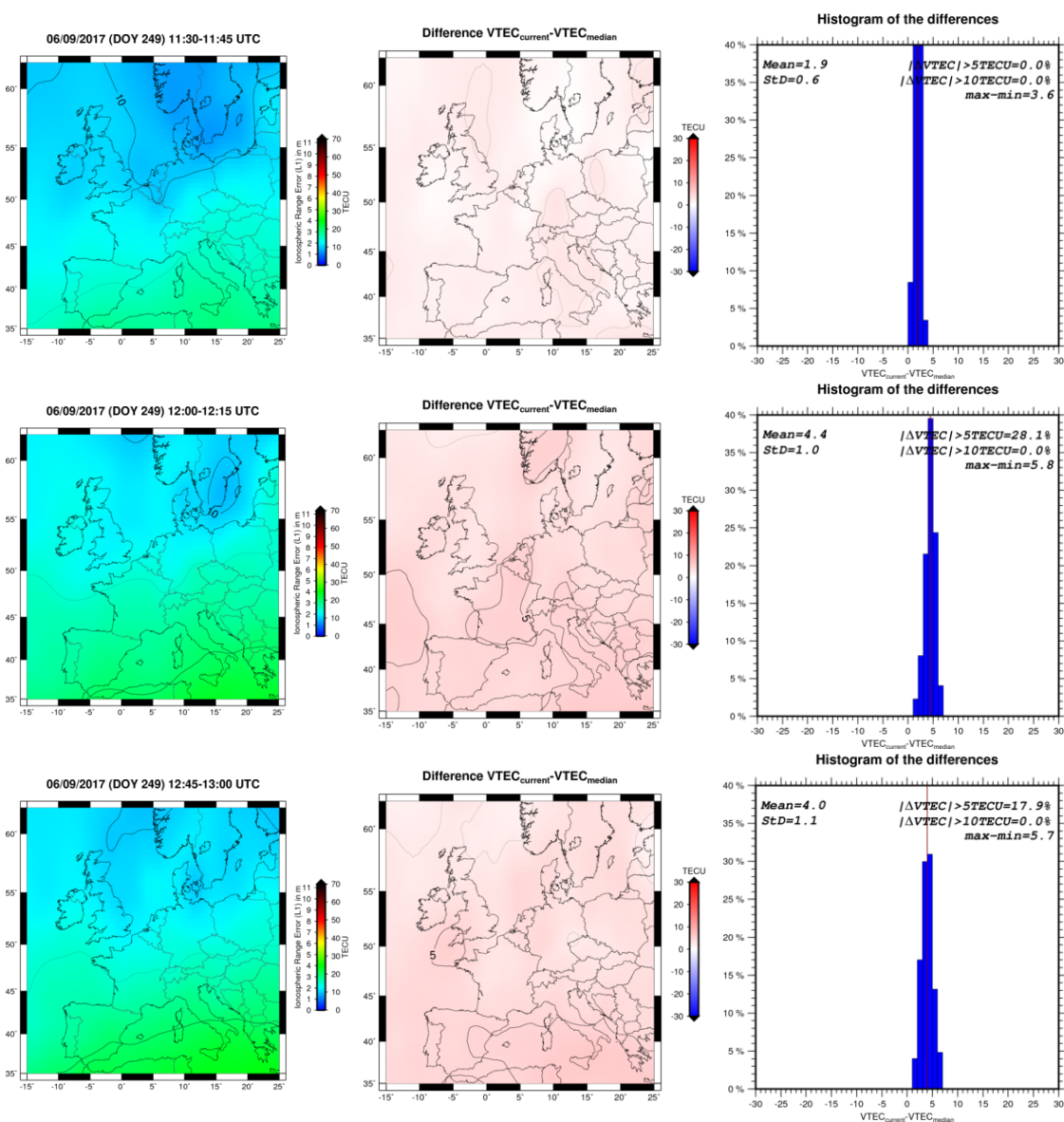
θέτοντας έναν “πίνακα” γραφημάτων με διαστάσεις 4×7 . Για την αναφορά μας σε κάποιο από αυτά εφεξής, θα χρησιμοποιούμε τα στοιχεία $[i, j]$ του “πίνακα” αυτού μαζί με το πρόθεμα της αντίστοιχης ημέρας του Σεπτεμβρίου στην οποία αναφέρονται, ήτοι, $dd/[i, j]$ (πχ. το 06/[2, 3] είναι το γράφημα της παραμέτρου $MUFD$ για την 6η Σεπτεμβρίου, από τον σταθμό του Pruhonicé, Σχήμα 6.21). Σε όλη την ανάλυσή μας θεωρούμε ασφαλή την αύξηση κάθε παραμέτρου με την προϋπόθεση να υπερβαίνει την τιμή της τυπικής απόκλισης (*standard deviation*) μίας αδιατάρακτης ημέρας (Σχήμα 6.22). Δεδομένου ότι πραγματοποιούμε τόσο ποιοτική όσο και ποσοτική ανάλυση, χρησιμοποιήσαμε τις μέσες τιμές (mean) των τυπικών απολίσεων κάθε παραμέτρου από όλους του σταθμούς, για την αδιατάρακτη ημέρα (5η Σεπτεμβρίου), που δίνονται στον Πίνακα 6.3).

Πίνακας 6.3: Μέσες τιμές των τυπικών αποκλίσεων των παραμέτρων, υπολογισμένες από όλους τους σταθμούς.

| Παράμετρος | TEC (TECU) | foF2 (MHz) | MUFD (MHz) | f_{min} |
|------------|------------|------------|------------|-----------|
| stdev | 2.2 | 1.1 | 2.7 | 0.3 |

Από τα γραφήματα αυτά βλέπουμε σαφή αύξηση κυρίως στο f_{min} της τάξης των $\sim 2 - 3$ MHz σε όλους τους σταθμούς (06/[3, j]) σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την εκδήλωση της έκλαμψης. Το ολικό TEC παρουσιάζει απότομη αύξηση στον νοτιότερο σταθμό (της Αθήνας, 06/[4, 1]) της τάξης των ~ 8 TECU, ενώ στους βορειότερους σταθμούς η διαταραχή δεν ξεπερνάει τα ~ 4 TECU. Τα παραπάνω συμφωνούν με την κατανομή του $VTEC$ στους χάρτες του Σχήματος 6.19, όπου η (μικρή) απόκριση εντοπίζεται στις νοτιοανατολικές περιοχές της Ευρώπης.

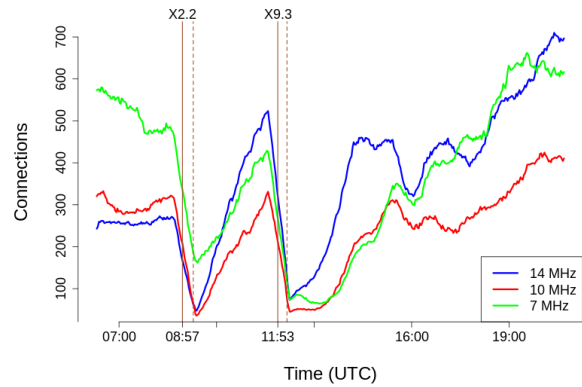
Στον αντίποδα, η απόκριση στην έκλαμψη που ακολούθησε (X9.3) είναι εμφανής σε όλα τα σχετικά γραφήματα. Αναλυτικότερα, μελετήθηκε ήδη η άμεση επίδραση της στη ροή ακτινοβολίας UV (Σχήμα 6.8, Σχήμα 6.18), στη ροή ακτίνων-X (Σχήματα 6.8, 6.10, 6.11 και 6.15), στη ροή υψηλοενεργειακών πρωτονίων (Σχήματα 6.10, 6.15 και 6.11, > 50 MeV και > 100 MeV) και στα ραδιοκύματα πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF, ~ 24 kHz, Σχήμα 6.9). Η άμε-



Σχήμα 6.23: Ευρωπαϊκοί χάρτες VTEC (αριστερή στήλη), της μεταβολής του (μεσαία στήλη) και ιστόγραμμα των μεταβολών του (δεξιά στήλη) της 6ης Σεπτεμβρίου για χρονικά διαστήματα πριν (επάνω, 09:15-09:30 UT) και μετά (κάτω γραμμή, 11:30-11:45 UT) την έκλαμψη X9.3 (χάρτες από το Belgium Royal Observatory).

ση απόκριση της ιονόσφαιρας σε παγκόσμια κλίμακα είναι εμφανής στα σχήματα για το παγκόσμιο μέσο TEC (Σχήμα 6.16), όπου παρατηρούμε μέγιστη αύξηση της τάξης των ~ 5 TECU (ημέρα 249, 6 Σεπτεμβρίου) σε σχέση με την αδιάταρακτη ημέρα (247, 4 Σεπτεμβρίου), και για το απόλυτο κάθετο TEC (Σχήμα 6.18) ειδικά στην περιοχή της Ευρώπης και της Ανατολικής Αμερικής. Συγκεκριμένα, στην Ευρώπη παρατηρείται αύξηση του VTEC, σε σχέση με τη μέση τιμή των προηγούμενων 15 ημερών ($dVTEC = VTEC_{current} - VTEC_{median,15d}$), μετά την έναρξη (11:53 UT) και κατά την διάρκεια (Πίνακας 6.2) της X9.3 της τάξης των $\sim 5 - 8$ TECU, ειδικά στα νοτιότερα γεωγραφικά πλάτη (Σχήμα 6.23), γεγονός το οποίο παρατηρείται και στο Σχήμα 6.20, που η απότομη αύξηση του TEC είναι εμφανής και εντονότερη νοτιοανατολικά. Το ολικό TEC στις

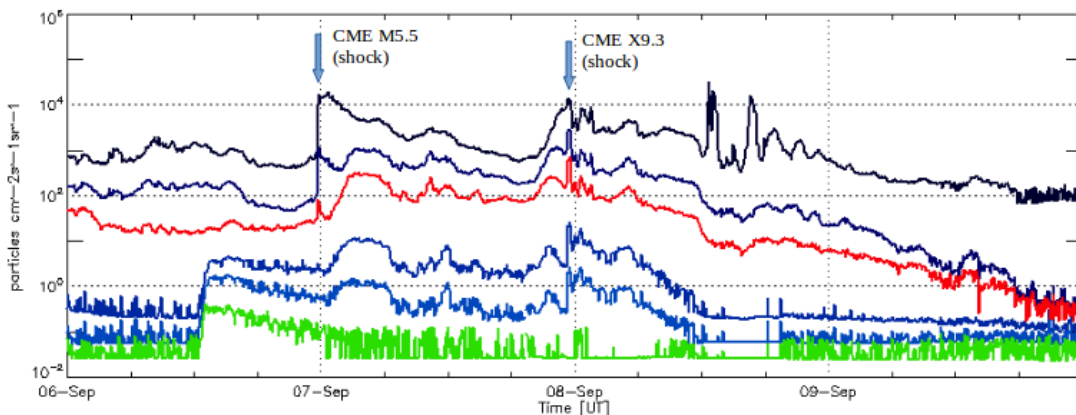
χρονοσειρές του Σχήματος 6.21 εμφανίζει στην περιοχή της Αθήνας (06/[4,1]) αύξηση της τάξης των ~ 8 TECU ($dTEC = TEC_{current} - TEC_{median,30d}$) σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την έναρξη της X9.3. Επιπλέον, στις υπόλοιπες περιοχές η παράμετρος κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (μέγιστη αύξηση ~ 4 TECU, 06/[4,5]), γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην ανομοιογένεια της κατανομής του TEC καθ' ύψος. Την αυξητική τάση ακολουθούν και οι υπόλοιπες παράμετροι του σταθμού (06/[i,1]). Αύξηση στις τιμές τους κατά το χρονικό διάστημα που ακολούθησε την έκλαμψη παρουσιάζουν και οι f_oF2 και $MUF3000$ ειδικά στους νοτιότερους σταθμούς (06/[1,2], 06/[2,2], 06/[1,3], 06/[2,3]). Ακόμα, η παράμετρος που επηρεάζεται άμεσα σε όλους τους σταθμούς και για τις δύο εκλάμψεις, είναι η $fmin$ (06/[3,i]), η οποία παρέχει συνήθως ενδείξεις για υψηλή απορρόφηση ραδιοκυμάτων από την ιονόσφαιρα (Σχήματα 6.9 και 6.24, όπου συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό χρονικά, τόσο οι εκλάμψεις, όσο και η αύξηση του $fmin$, με τη μείωση της ισχύος του σήματος ραδιοκυμάτων χαμηλών συχνοτήτων).



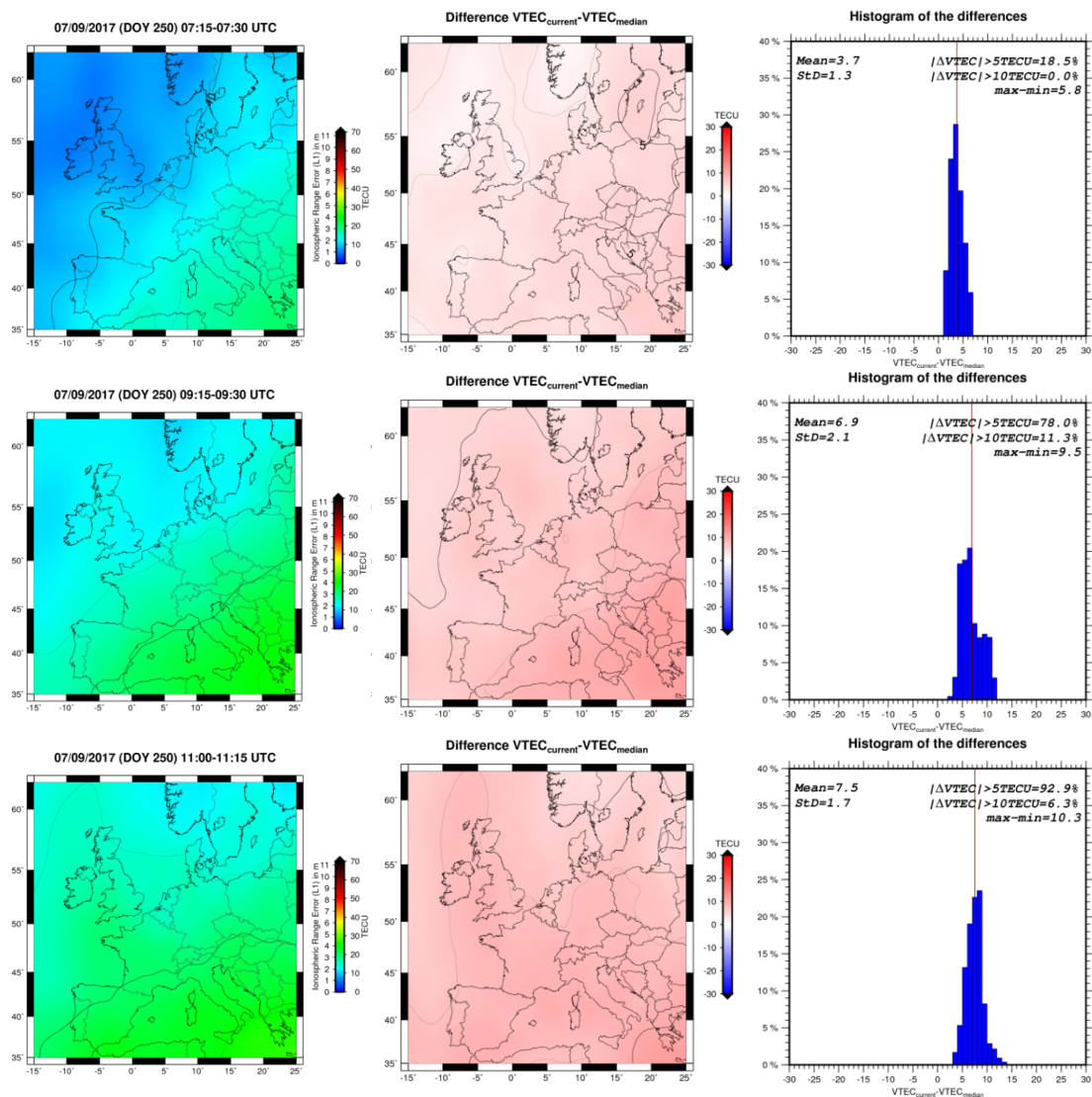
Σχήμα 6.24: Επίδραση των εκλάμψεων στα ραδιοκύματα χαμηλής συχνότητας (wsprnet.org).

7 και 8 Σεπτεμβρίου 2017

Όπως είδαμε κατά την **7η Σεπτεμβρίου** εκδηλώθηκε η έκλαμψη X1.3 (14:20 UT), η οποία προκάλεσε απότομη αύξηση στη ροή ακτίνων-X, αλλά όχι στη ροή των πρωτονίων. Η μέρα χαρακτηρίζεται από έντονες διαταραχές στις παραμέτρους του διαπλανητικού πεδίου λόγω της άφιξης της κατευθυνόμενης προς τη Γη CME που απελευθερώθηκε από μία προηγούμενη έκλαμψη τάξης M5.5, η οποία προκάλεσε απότομη αύξηση στην καταγραφόμενη ροή πρωτονίων (> 10

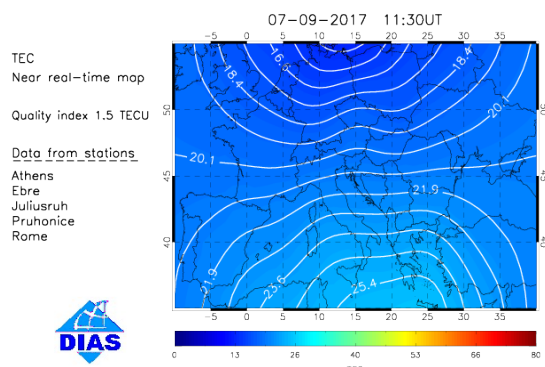


Σχήμα 6.25: Ροή πρωτονίων κατά τις ημέρες 6-10 Σεπτεμβρίου, για ενέργειες (σε φθίνουσα σειρά) > 100 MeV (πράσινο), > 50 MeV (ανοικτό μπλε), > 30 MeV (μπλε), > 10 MeV (κόκκινο), > 5 MeV (σκούρο μπλε) και > 1 MeV (πολύ σκούρο μπλε). Τα γραφήματα προέρχονται από τον δορυφόρο GOES-15. Καταγράφονται επίσης (με μπλε βελάκια) οι στιγμές άφιξης δύο CME shocks από αντίστοιχες εκλάμψεις.

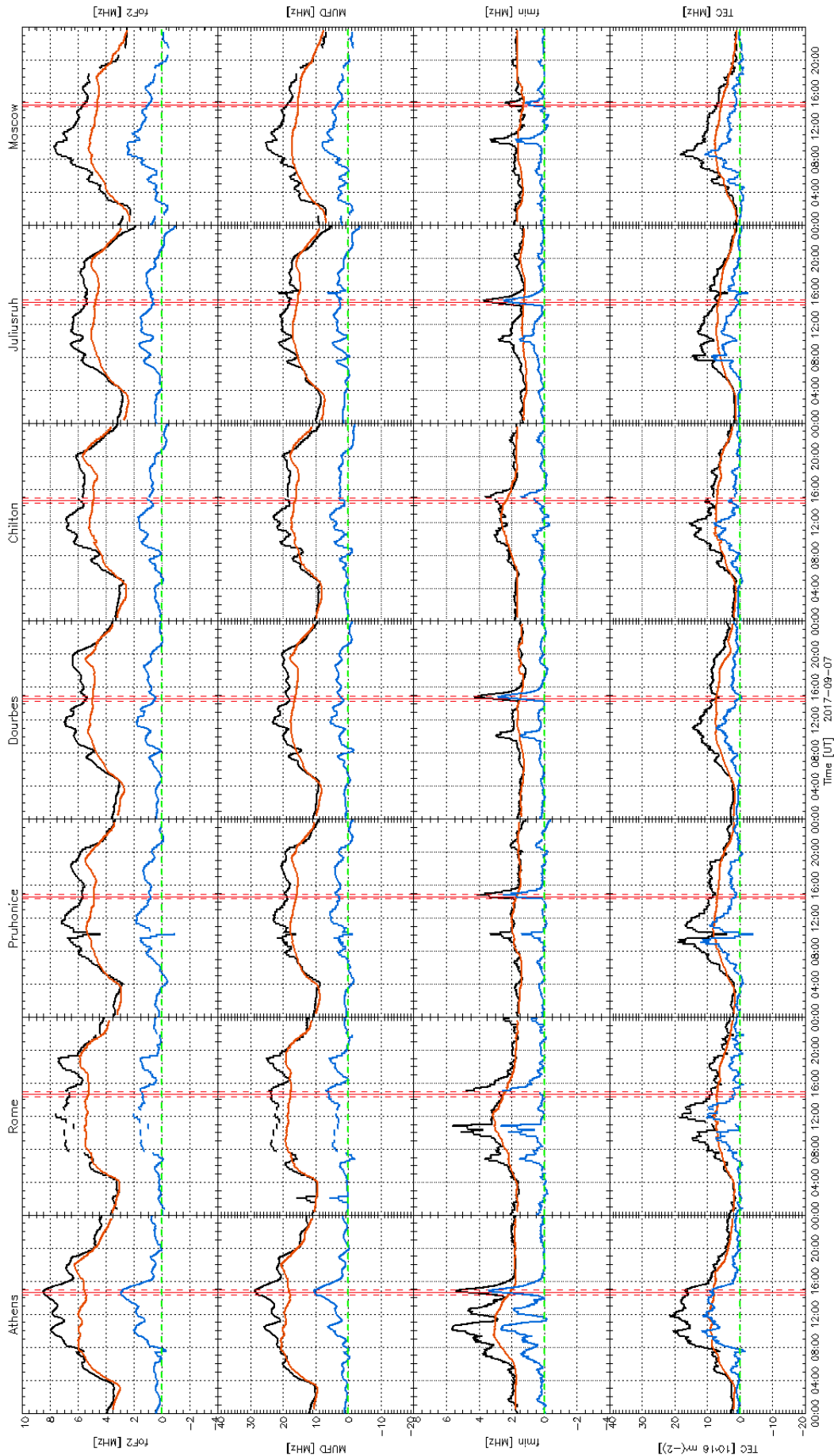


Σχήμα 6.26: Ευρωπαϊκοί χάρτες VTEC Ευρωπαϊκοί χάρτες VTEC (αριστερή στήλη), της μεταβολής του (μεσαία στήλη) και ιστόγραμμα των μεταβολών του (δεξιά στήλη) της 7ης Σεπτεμβρίου για τα χρονικά διαστήματα πριν την έκλαμψη X1.3. Η ιονόσφαιρα παρουσιάζεται ήδη διαταραγμένη, κατά πάσα πιθανότητα λόγω των φαινομένων που προηγήθηκαν της X1.3 (βλέπε κείμενο) (χάρτες VTEC του Belgium Royal Observatory).

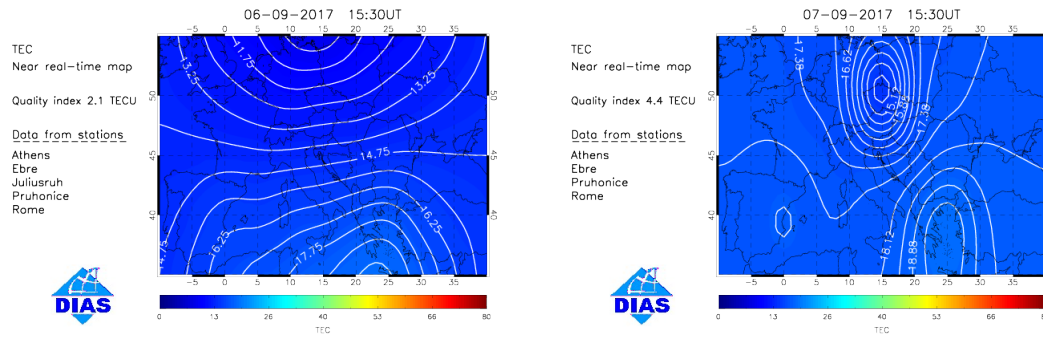
MeV, > 5 MeV και > 1 MeV) που επιταχύνθηκαν στο κρουστικό της κύμα (shock, Σχήμα 6.25), που συμπίπτει χρονικά με τις έντονες διαταραχές των παραμέτρων του IMF (Σχήμα 6.12). Οι χάρτες TEC δίνουν εικόνα έντονης απόκρισης καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η δραστηριότητα είναι έντονη από τις πρωινές ώρες (Σχήμα 6.26) πριν από την εκδήλωση της X1.3 και η αύξηση του VTEC ξεπερνάει τις ~ 10 TECU ακόμα και στις ώρες αυτές. Είναι δε χαρακτηριστικό πως η μέγιστη δραστηριότητα του VTEC λαμβάνει χώρα στις ~ 11:00 UT που έχουμε διαφορές



Σχήμα 6.27: Χάρτης ολικού TEC του δικτύου ιονοσφαιρικών σταθμών DIAS για τις 11:30 UT της 7ης Σεπτεμβρίου (hertz2.space.noa.gr).



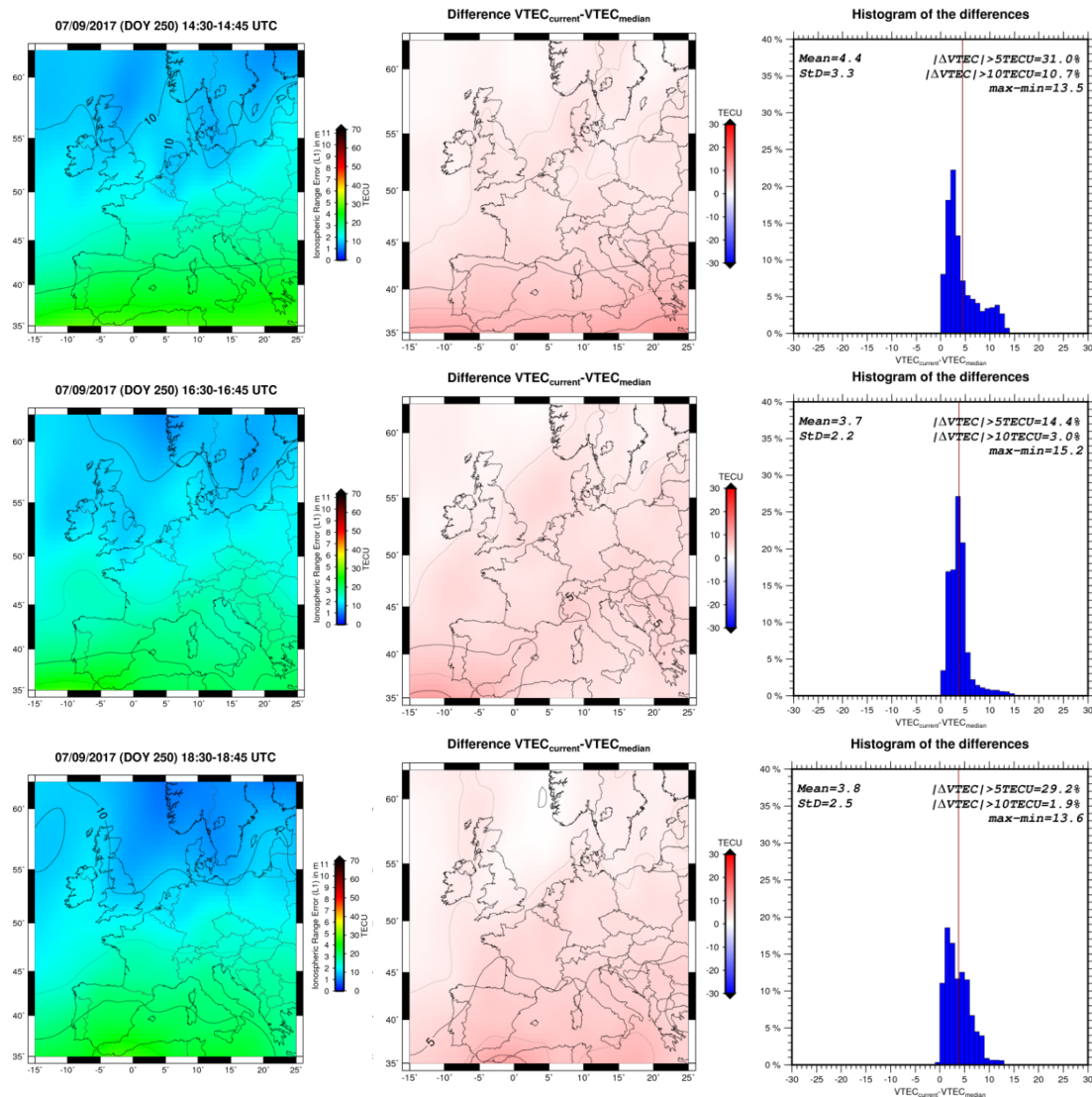
Σχήμα 6.28: 7 Σεπτεμβρίου. Οι στήλες είναι κατανεμημένες από πάνω προς τα κάτω ως προς τις παραμέτρους: $foF2$, $MUF3000$, $fmin$ και TEC , και από αριστερά προς τα δεξιά ως προς τους ιονοσφαιρικούς σταθμούς, από νοτιότερα προς βορειότερα γεωγραφικά πλάτη. Απεικονίζεται για κάθε παράμετρο: η καταγραφόμενη τιμή (μαύρη γραμμή), η στατιστικά πιθανότερη (median) υπολογισμένη από τις 30 προηγούμενες ημέρες (πορτοκαλί γραμμή) και η διαφορά τους (μπλε γραμμή). Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές τονίζουν το χρονικό σημείο στο οποίο σημειώθηκε η έκλαμψη.



Σχήμα 6.29: Χάρτες ολικού TEC του δικτύου ιονοσφαιρικών σταθμών DIAS για τις 6 (αριστερά) και 7 (δεξιά) Σεπτεμβρίου στις 15:30 UT (hertz2.space.noa.gr).

$|dVTEC| > 5 \text{ TECU}$ σε ποσοστό 92% και $|dVTEC| > 10 \text{ TECU}$ σε ποσοστό 6.3% (Σχήματα 6.26, 6.27). Τα γραφήματα του Σχήματος 6.28 μαρτυρούν παρόμοια συμπεριφορά του ολικού TEC . Συγκεκριμένα, η δραστηριότητα αυτή είναι εμφανής σε όλους τους σταθμούς (07/[4,j]) όπου παρατηρούνται αυξήσεις του $dTEC \sim 10 \text{ TECU}$ (07/[4,1-3], 07/[4,7]) και $\sim 5 - 8 \text{ TECU}$ (07/[4,4-6]) στο χρονικό διάστημα $\sim 08:00-12:30 \text{ UT}$ με κορύφωση $\sim 11:30 \text{ UT}$ (07/[4,1-6], αλλά και στα Σχήματα 6.26 και 6.27). Παρόμοια συμπεριφορά κατά τα ίδια χρονικά διαστήματα φαίνεται να ακολουθούν και οι υπόλοιπες παράμετροι, υποδεικνύοντας ότι η αυξημένη διαταραχή της ιονόσφαιρας πάνω από την Ευρώπη εκείνη την ημέρα οφείλεται ενδεχομένως στην άφιξη της CME (που σχετίζεται με την έκλαμψη M5.5), ενώ γενικά παρατηρείται ότι όλες οι παράμετροι εμφανίζουν μεγαλύτερες μέγιστες τιμές από την προηγούμενη μέρα (σύγκριση 06/[i,j] και 07/[i,j] και Σχήμα 6.29). Αυξημένη δραστηριότητα παρατηρείται, πέραν των νοτιότερων σταθμών, και σε εκείνων της Μόσχας (07/[i,7]), έως $\sim 2 \text{ MHz}$ αύξηση στο $dfoF2$ ($foF2 = foF2_{current} - foF2_{median,30d}$) και έως και $\sim 10 \text{ MHz}$ αύξηση στο $dMUFD$ ($dMUFD = MUFD_{current} - MUFD_{median,30d}$).

Η μειωμένη επίδραση της X1.3 στη ροή υψηλοενεργειακών πρωτονίων και το γεγονός ότι εκείνη δεν συνδέθηκε με κάποια CME, υποδηλώνει την έλλειψη ισχυρής διασύνδεσης και αλληλεπίδρασης με το γεωμαγνητικό περιβάλλον. Επιπλέον, τόσο οι χάρτες $VTEC$ όσο και τα γραφήματα 07/[i,j], δεν παρουσιάζουν σε πρώτη ανάγνωση άμεση απόκριση σε αυτήν, δεδομένου ότι ενδεχόμενες μεταγενέστερες παρατηρούμενες αυξήσεις στις παραμέτρους μπορεί να οφείλονται εν γένει στην έντονη δραστηριότητα της ιονόσφαιρας. Εντούτοις, οι παράμετροι $foF2$, $MUFD$ και $fmin$ (το TEC ήταν ήδη αυξημένο) των νότιων σταθμών εμφανίζουν μία απότομη αύξηση στο χρονικό (07/[1,1-2], 07/[2,1-2]), γεγονός που σε συνδυασμό με το αυξημένο $VTEC$ στα νότια γεωγραφικά πλάτη που παρατηρείται στους χάρτες του Σχήματος 6.30 το χρονικό διάστημα που ακολούθησε την έκλαμψη, θα μπορούσε ενδεχομένως να συνδεθεί με την X1.3, χωρίς, ωστόσο, αυτό να είναι ξεκάθαρο με τα υπάρχοντα δεδομένα. Άλλωστε, κάποιες από τις παραμέτρους αυτές παρουσιάζουν ήδη σταδιακή αυξητική τάση πριν από το μέγιστο (το οποίο συμπίπτει με τη χρονική στιγμή έναρξης της X1.3, 07/[1,1], 07/[2,1]). Ασφαλή συμπεράσματα δεν μπορούν να εξαχθούν, για τους ίδιους λόγους, για την εκ νέου αύξηση του TEC (όλων των ειδών) που παρατηρείται τις απογευματινές ώρες με κορύφωση

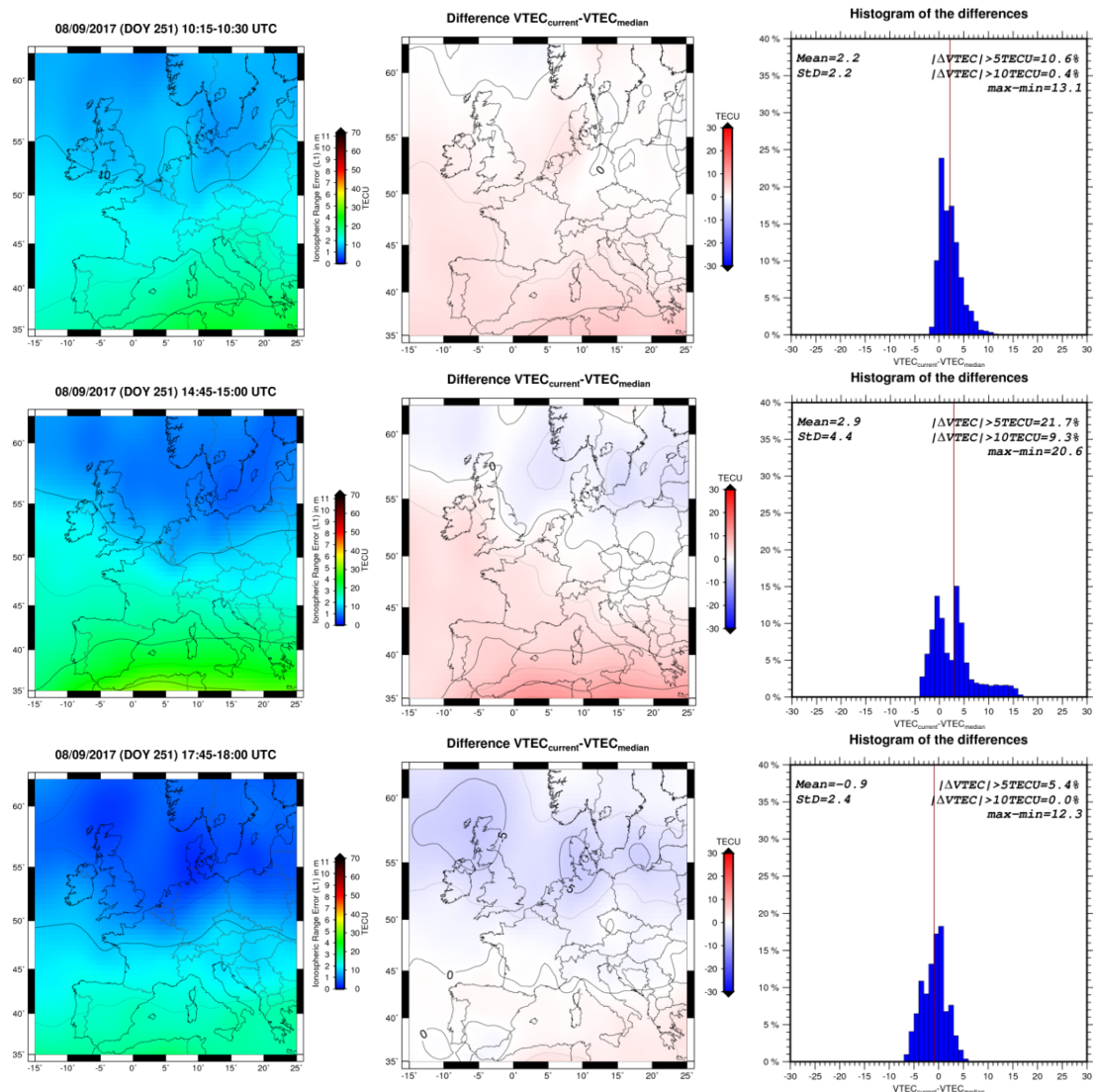


Σχήμα 6.30: Ευρωπαϊκοί χάρτες $VTEC$ (αριστερή στήλη), της μεταβολής του (μεσαία στήλη) και ιστόγραμμα των μεταβολών του (δεξιά στήλη) της 7ης Σεπτεμβρίου για τα χρονικά διαστήματα μετά την έκλαμψη X1.3. Η ιονόσφαιρα παρουσιάζεται ήδη διαταργμένη, κατά πάσα πιθανότητα λόγω των φαινομένων που προηγήθηκαν της X1.3 (βλέπε κείμενο) (χάρτες $VTEC$ του Belgium Royal Observatory).

~ 18:00 UT (Σχήμα 6.30, 07/[4,2-3], ~ 4 $TECU$ αύξηση του $dTEC$), αλλά και σε άλλες παραμέτρους και σταθμούς (κυρίως κεντρική Ευρώπη και Ρώμη, 07/[1,2-3], 07/[2,2-3] και 07/[1,6]). Η απόκριση της παραμέτρου $fmin$, παρ' όλα αυτά, παραμένει αξιοσημείωτα συνεπής με τη χρονική στιγμή εκδήλωσης της έκλαμψης σε όλους τους σταθμούς (07/[3, j]).

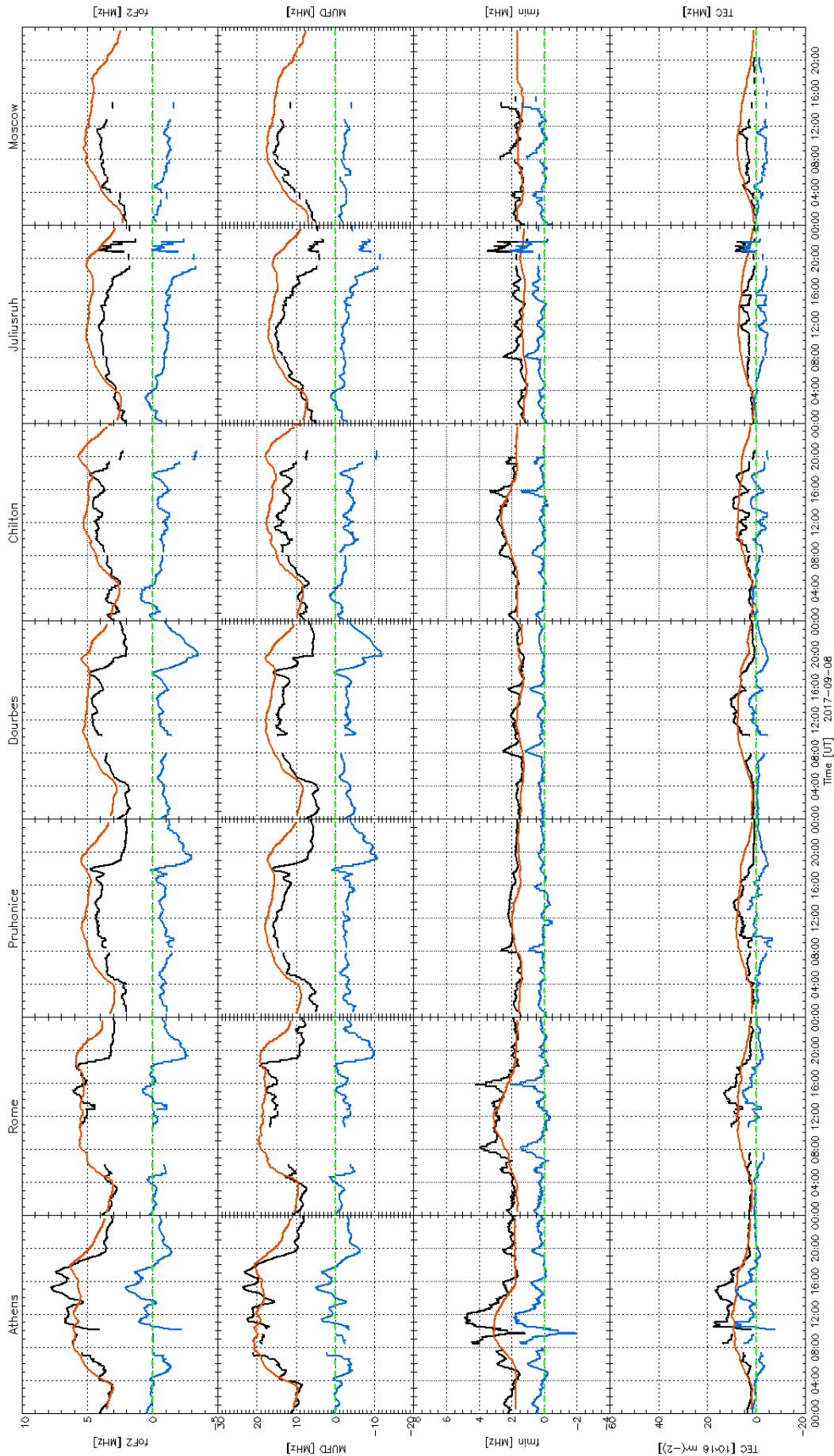
Οι διαταραχές των παραμέτρων του IMF, όπως είδαμε, αλλά και της ιονόσφαιρας, όπως θα δούμε, συνεχίστηκαν και κατά την **8η Σεπτεμβρίου**. Η απότομη αύξηση στην καταγραφόμενη ροή πρωτονίων όλων των ενεργειών (Σχήμα 6.25) υποδεικνύει την άφιξη σωματιδίων από το κρουστικό κύμα (shock wave) της CME (προέλευση: X9.3), ενώ σύντομα (~ 00:00 UT) οι παράμετροι του IMF διαταράχθηκαν εκ νέου (Σχήμα 6.12). Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι διαταραχές τις ιονόσφαιρας φαίνεται πως περιορίστηκαν κυρίως στα νότια γεωγραφικά πλάτη της Ευρώπης και μόνο κατά το χρονικό διάστημα (~ 13:30-15:30 UT). Για τα

παραπάνω μας παρέχουν ενδείξεις τόσο οι χάρτες VTEC (Σχήμα 6.31, μέγιστη απόκριση ~ 10 TECU), όσο και τα γραφήματα του Σχήματος 6.32 (08/[4,1-2]). Αν συνυπολογίσει κανείς την αυξημένη δραστηριότητα των προηγούμενων ημερών (αυξημένη μέση τιμή των παραμέτρων) θα διαπιστώσει έντονη αύξηση στην τιμή του $\Delta VTEC$ του TEC και των υπολοίπων παραμέτρων. Εν γένει παρατηρήθηκε εντονότερη δραστηριότητα κατά την 7η και κατά την 8η Σεπτεμβρίου αντί της 6ης που εκδηλώθηκαν οι δύο εκλάμψεις τάξης X, ενώ η αντίστοιχη της 10ης δεν φαίνεται να είχε άμεσο και ισχυρό αντίκτυπο στην ιονόσφαιρα. Βεβαίως, πρέπει να συνυπολογιστεί το γεγονός της συγκέντρωσης πληθώρας φαινομένων που επηρε-

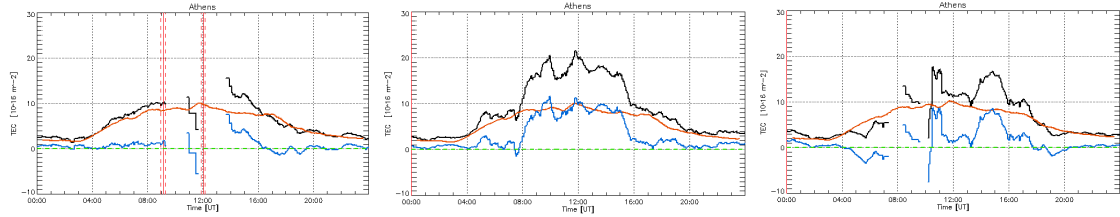


Σχήμα 6.31: Ευρωπαϊκοί χάρτες VTEC (αριστερή στήλη), της μεταβολής του (μεσαία στήλη) και ιστόγραμμα των μεταβολών του (δεξιά στήλη) της 8ης Σεπτεμβρίου για χρονικά διαστήματα κατά τις πρωινές ώρες (επάνω γραμμή, 10:15-10:30 UT) κατά τη μέγιστη απόκριση της ημέρας (μεσαία γραμμή, 14:45-15:00 UT) και κατά τις απογευματινές ώρες (κάτω γραμμή, 17:45-18:00 UT) (χάρτες από το Belgium Royal Observatory).

άζουν την απόκριση της ιονόσφαιρας και δυσχεραίνουν την ερμηνεία. Η αυξημένη διαταραχή της 7ης και της 8ης Σεπτεμβρίου έναντι της 6ης Σεπτεμβρίου φαίνεται και στο ολικό TEC του σταθμού της Αθήνας (Σχήμα 6.33), ο οποίος κατέγραψε γενικά και τις υψηλότερες τιμές απο όλους (γεγονός που συμφωνεί και με του χάρ-



Σχήμα 6.32: 8 Σεπτεμβρίου. Οι στήλες είναι καταμεμημένες από πάνω προς τα κάτω ως προς τις παραμέτρους: foF2, MUF3000, fminF2 και ολικό TEC, και από αριστερά προς τα δεξιά ως προς τους ιονοσφαιρικούς σταθμούς, από νοτιότερα προς βορειότερα γεωγραφικά πλάτη. Απεικονίζεται για κάθε παράμετρο: η καταγραφόμενη τιμή (μαύρη γραμμή), η στατιστικά πιθανότερη τιμή (median) υπολογισμένη από τις 30 προηγούμενες ημέρες (πορτοκαλί γραμμή) και η διαφορά τους (μπλε γραμμή).

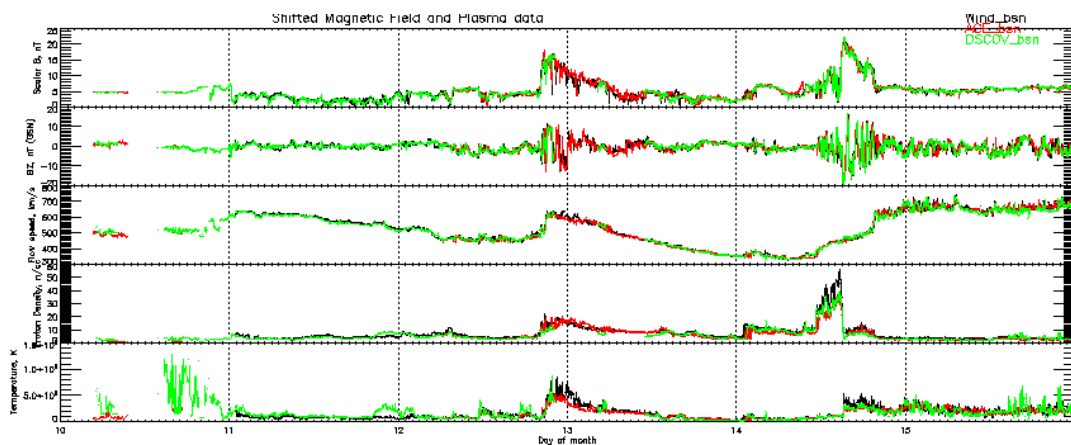


Σχήμα 6.33: Σύγκριση του καταγραφόμενου ολικού *TEC* από τον ιονοσφαιρικό σταθμό της Αθήνας, για τις 6, 7 και 8 Σεπτεμβρίου.

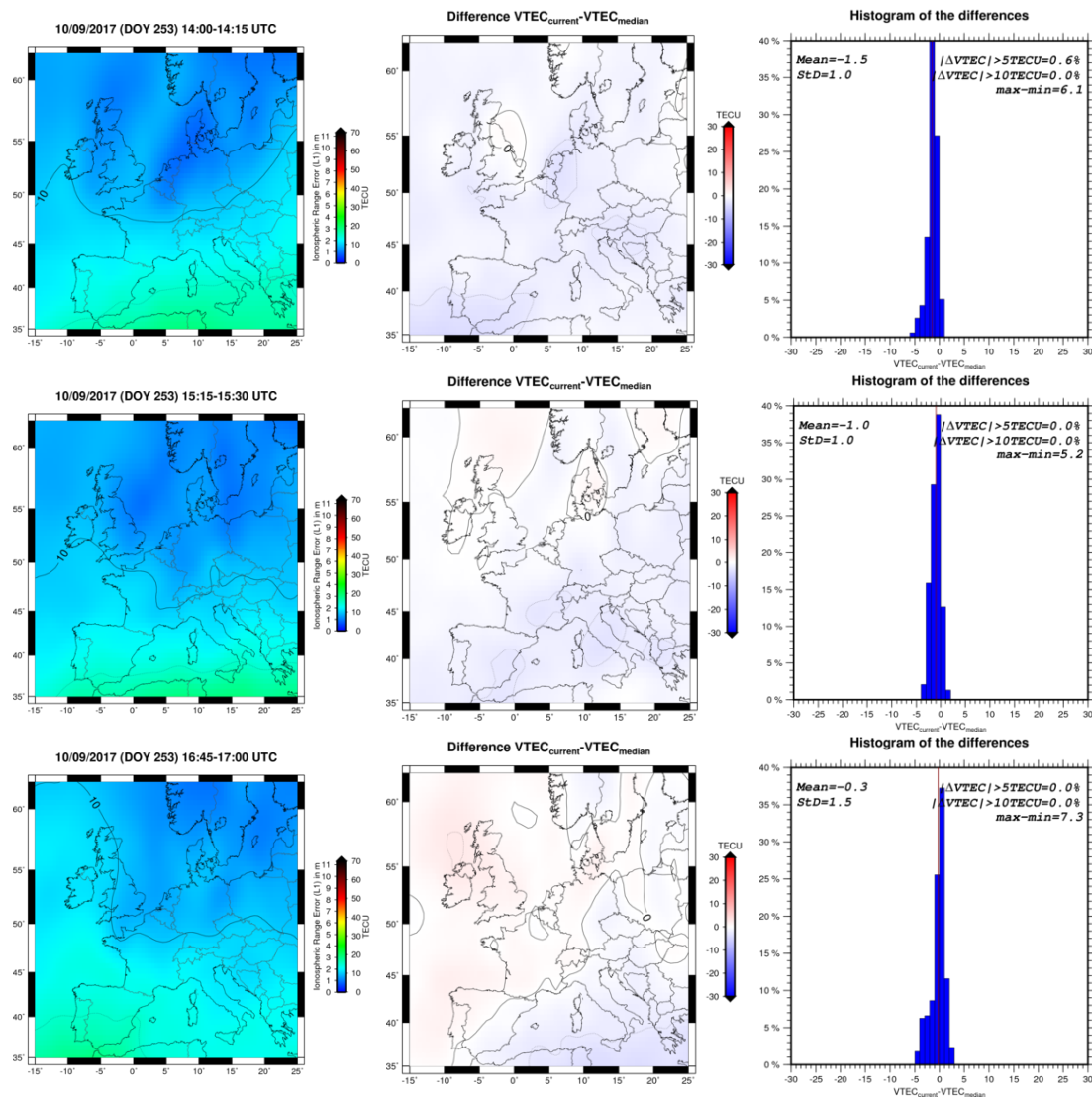
τες *VTEC* του Belgium Royal Observatory), παρ' όλα αυτά ενδέχεται το φαινόμενο να οφείλεται σε διαφορές στην απόκριση και τη λειτουργία των οργάνων μεταξύ των σταθμών.

10-14 Σεπτεμβρίου

Κατά την 9η Σεπτεμβρίου η ιονόσφαιρα παρουσιάστηκε αδιατάρακτη σε επίπεδα υποβάθρου, χωρίς να εκδηλώσει κάτι ιδιαίτερο. Όπως είδαμε, κατά τη **10η Σεπτεμβρίου** έλαβε χώρα η έκλαμψη τάξης X8.2, με μεγάλη επίδραση στη ροή ακτινοβολίας ακτίνων-X αλλά και στη ροή των πρωτονίων, ενώ απελευθέρωσε μία από τις ταχύτερες CMEs (άλω) των τελευταίων ετών, η οποία ήταν, επιπλέον, μαγνητικά συνδεδεμένη με τη Γη (Σχήμα 6.15). Η επίδραση των φαινομένων αυτών στον διαπλανητικό χώρο μπορεί να φανεί στο Σχήμα 6.34, όπου, ωστόσο, παρατηρείται μερική έλλειψη δεδομένων κατά την ημέρα εκείνη από τους τρεις δορυφόρους. Παρ' όλα αυτά, οι επόμενες ημέρες εμφανίζουν ένα έντονα διαταραγμένο διαπλανητικό πεδίο στην περιοχή της Γης λόγω της άφιξης της CME. Η άφιξη της συνέβη προς το τέλος της 12ης αρχές 13ης Σεπτεμβρίου και είχε έντονη επίδραση στο IMF. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζουν τα *TEC* (Σχήμα 6.35), αλλά και οι υπόλοιπες παράμετροι μαρτυρώντας την έλλειψη άμεσης απόκρισης της ιονόσφαιρας πάνω από την Ευρώπη στην έκλαμψη αυτήν. Επιπλέον, εξετάζοντας τιμές του *TEC* (*VTEC* και ολικό *TEC*) των ημερών 11-12-13 Σεπτεμβρίου, παρατηρούμε ότι έντονη απόκριση της ιονόσφαιρας πάνω από την Ευρώπη, δεν είχαμε παρά μόνο στις **14**

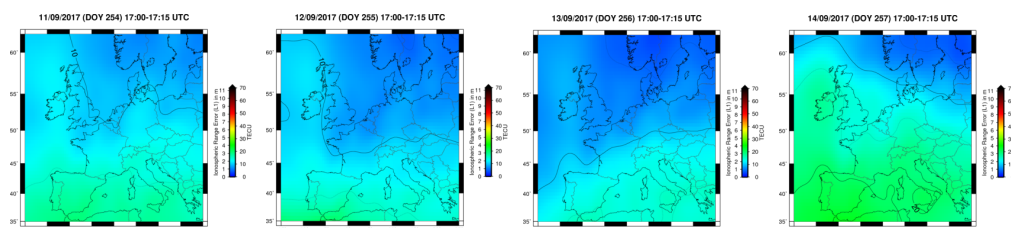


Σχήμα 6.34: Η διακύμανση των παραμέτρων του IMF και του πλάσματος στην περιοχή της Γης, κατά τις ημέρες 10-15 Σεπτεμβρίου, από δεδομένα των δορυφόρων ACE, Wind και DSCOVR της NASA.

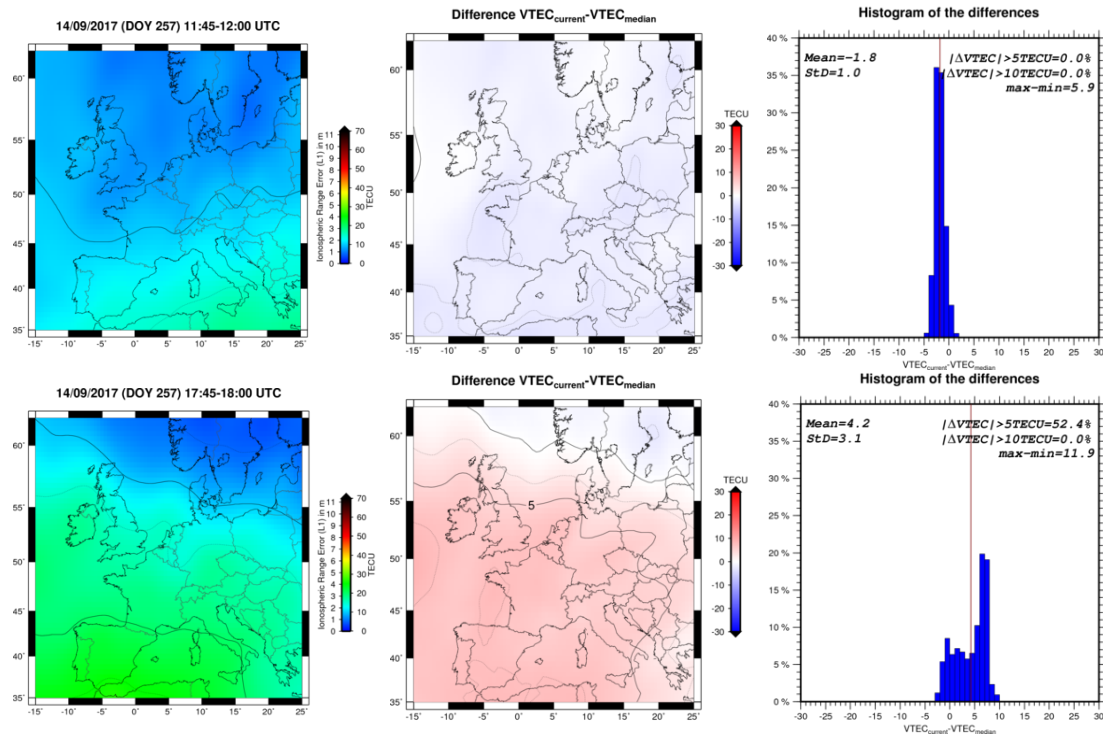


Σχήμα 6.35: Ευρωπαϊκοί χάρτες VTEC (αριστερή στήλη), της μεταβολής του (μεσαία στήλη) και ιστόγραμμα των μεταβολών του (δεξιά στήλη) της 10ης Σεπτεμβρίου για χρονικά διαστήματα πριν (επάνω γραμμή, 14:00-14:15 UT) κατά τη διάρκεια (μεσαία γραμμή, 15:15-15:30 UT) και μετά το πέρας (κάτω γραμμή, 16:45-17:00 UT) της έκλαμψης (χάρτες από το Belgium Royal Observatory).

Σεπτεμβρίου (Σχήματα, 6.36, 6.37). Το VTEC κινήθηκε σε χαμηλά επίπεδα κατά τη διάρκεια της ημέρας (όπως και στις 11, 12, 13 Σεπτεμβρίου), ενώ υπήρξε σταδιακή αύξηση από τις 16:00 UT και έπειτα, έως ότου φτάσει τη μέγιστη τιμή του (17:45-18:00 UT). Η ίδια τάση παρατηρείται σε έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων ιδιαίτεως στο χρονικό διάστημα ~ 16:00-20:00 UT στα γραφήματα του Σχήματος



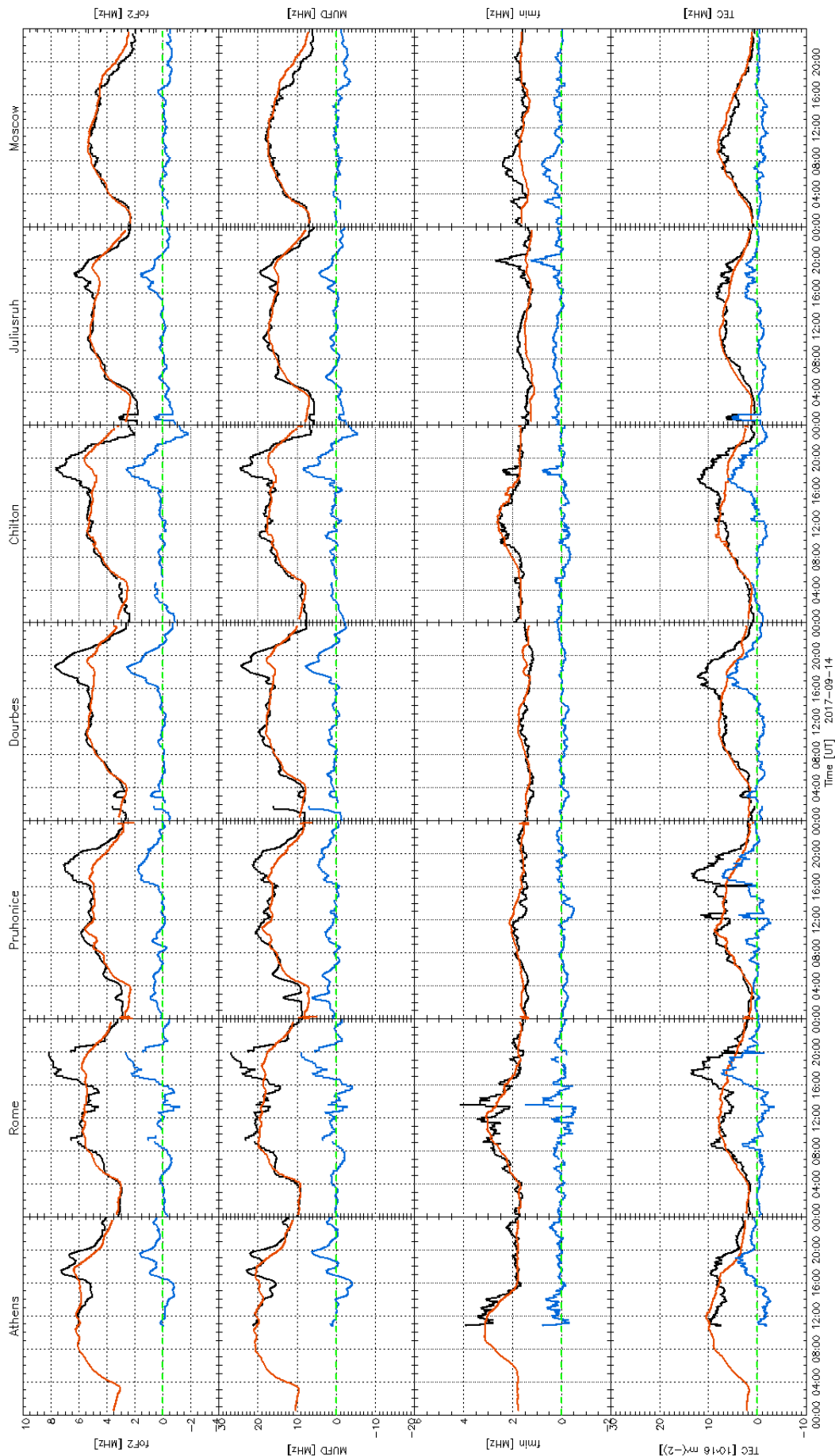
Σχήμα 6.36: Ευρωπαϊκοί χάρτες VTEC για τις ημέρες 11, 12, 13 και 14 Σεπτεμβρίου στο χρονικό διάστημα 17:00-17:15 UT. Τα παραδείγματα των ημερών 11, 12 και 13 είναι αντιπροσωπευτικά της συνολικής διακύμανσης του VTEC κατά τη διάρκεια κάθε ημέρας (δεδομένα του Belgium Royal Observatory).



Σχήμα 6.37: Ευρωπαϊκοί χάρτες VTEC (αριστερή στήλη), της μεταβολής του (μεσία στήλη) και ιστόγραμμα των μεταβολών του (δεξιά στήλη) της 14ης Σεπτεμβρίου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το VTEC ήταν χαμηλό όπως και τις προηγούμενες (11, 12, 13 Σεπτεμβρίου) μέχρι τις ~ 16:00 UT όπου ξεκίνησε να αυξάνει. Κατά το χρονικό διάστημα 17:45-18:00 UT (κάτω γραμμή) το TEC μεγιστοποιήθηκε (χάρτες από Belgium Royal Observatory).

6.38), όπου παρατηρείται αύξηση στο ολικό TEC μέχρι και ~ 10 TECU (14/[4,2], 14/[4,5]). Επιπλέον, η επίδραση φαίνεται να είναι ισχυρότερη στην κεντρική και τη βορειοδυτική¹ Ευρώπη κυρίως στις παραμέτρους TEC, foF2 και MUFD, οι οποίες παρουσιάζουν υψηλές μέγιστες τιμές ($dTEC \sim 7 \text{ TECU} \rightarrow 14/[4,2-5]$, $dfoF2 \sim 3 \text{ MHz} \rightarrow 14/[1,2]$ και $14/[1,4-5]$, $dMUFD \sim 10 \text{ MHz} \rightarrow 14/[2,2]$ και $14/[2,4-5]$). Δεδομένου ότι οι αυξητικές τάσεις των παραμέτρων ακολουθούν τη διαταραχή των παραμέτρων του IMF η οποία αποδόθηκε σε λεγόμενο Stream Interaction Region (SIR), το οποίο είναι συχνό φαινόμενο κατά την προσέγγιση του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου (Redmon et al., 2018) είναι ασαφές το που ακριβώς οφείλονται, καθώς τα φαινόμενα επικαλύπτονται. Τα SIRs προέρχονται από ταχύως κινούμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου που προέρχονται από στεμματικές οπές, τα οποία αλληλεπιδρούν με τον βραδύτερο ηλιακό άνεμο που προπορεύεται και δημιουργούν περιοχές συμπιεσμένου πλάσματος λόγω σύστρεψης του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου κατά την περιστροφή του (σπείρα του Αρχιμήδη). Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα τα SIRs να επιβιώνουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα και να αλληλεπιδρούν με τη γήινη μαγνητόσφαιρα (Richardson, 2017). Η έντονη διαταραχή των παραμέτρων του IMF στις ~ 13:00 UT (Σχήμα 6.34) και έπειτα, αποδόθηκε κυρίως σε αυτό το φαινόμενο.

¹ Η επίδραση είναι εμφανής από τους χάρτες του Σχήματος 6.36 και στη νοτιοδυτική Ευρώπη, ωστόσο δεν έχουμε δεδομένα από σταθμούς σε εκείνες τις τοποθεσίες ώστε να το υποστηρίξουμε με τις αντίστοιχες χρονοσειρές.



Σχήμα 6.38: 14 Σεπτεμβρίου. Οι στήλες είναι κατανεμημένες από πάνω προς τα κάτω ως προς τις παραμέτρους: $foF2$, $MUF3000$, $fmin$ και TEC , και από αριστερά προς τα δεξιά ως προς τους ιονοσφαιρικούς σταθμούς, από νοτιότερα προς βορειότερα γεωγραφικά πλάτη. Απεικονίζεται για κάθε παράμετρο: η καταγραφόμενη τιμή (μαύρη γραμμή), η στατιστικά πιθανότερη τιμή (median) υπολογισμένη από τις 30 προηγούμενες ημέρες (πορτοκαλί γραμμή) και η διαφορά τους (μπλε γραμμή).

6.4 Συμπεράσματα

Ο Σεπτέμβριος του 2017 προσέφερε στους ηλιακούς φυσικούς πληθώρα ενδιαφέροντων φαινομένων για παρατήρηση και μελέτη. Τα εκρηκτικά γεγονότα που εκδηλώθηκαν στον Ήλιο κατά την περίοδο αυτήν, περιείχαν, μεταξύ άλλων, την ισχυρότερη έκλαμψη των τελευταίων ετών (X9.3) και μία εκ των ταχύτερων CMEs που έχουν καταγραφεί ποτέ (προέλευση: X8.2). Η έντονη ηλιακή δραστηριότητα ξεκίνησε ήδη από την 4η Σεπτεμβρίου κατά την οποία έλαβε χώρα η έκλαμψη τάξης M5.5, η οποία απελευθέρωσε μία μαγνητικά συνδεδεμένη με τη Γη CME. Η έκλαμψη είχε επίδραση στη ροή ακτινοβολίας ακτίνων-X και στη ροή ιόντων με ενέργειες $> 10 \text{ MeV}$. Η CME που εκτινάχτηκε από αυτήν, φαίνεται πως είχε μεγάλη επίδραση τόσο στο παγκόσμιο μέσο TEC (GMT), όσο και στο ευρωπαϊκό ολικό και κάθετο TEC ($VTEC$). Η έκλαμψη τάξης X2.2 (έναρξη: 08:57 UT, 6η Σεπτεμβρίου) παρουσίασε άμεση επίδραση στις ροές ακτινοβολίας ακτίνων-X και EUV, αλλά όχι στα ραδιοκύματα και στη ροή υψηλοενεργειακών ιόντων, ενώ δεν συνδέθηκε με κάποια CME. Επιπλέον, μικρή ήταν και η επίδρασή της στην ιονόσφαιρα πάνω από την Ευρώπη, αφού παρουσίασε μέγιστη αύξηση $dVTEC \sim 3\text{-}4 \text{ TECU}$ και μηδαμινή αύξηση στις παραμέτρους $foF2$ και $MUF3000$. Αντιθέτως, η έκλαμψη τάξης X9.3 της ίδια ημέρας (έναρξη: 11:53 UT), είχε άμεσο αντίκτυπο στις ροές ακτινοβολίας ακτίνων-X και EUV, στην εκμπομπή ραδιοκυμάτων υψηλής συχνότητας (VLF) και στη ροή υψηλοενεργειακών σωματιδίων (> 100 , > 50 , $> 30 \text{ MeV}$). Ανάλογο ως προς την αμεσότητα και την ένταση αντίκτυπο είχε και στην ιονόσφαιρα πάνω από την περιοχή της Ευρώπης, με αυξήσεις $dTEC$ της τάξης των 8 TECU και αυξήσεις της τάξης των $\sim 5 \cdot STDEV$ στις υπόλοιπες παραμέτρους (κυρίως στα νότια γεωγραφικά πλάτη της). Οι δύο εκλάμψεις της ημέρας προκάλεσαν άμεση απόκριση στην παράμετρο $fmin$ και ταυτόχρονα στα σήματα ραδιοκυμάτων χαμηλών συχνοτήτων, υποδεικνύοντας, σε πρώτη ανάγνωση, πιθανή συσχέτισή τους. Επίσης, οι αυξήσεις στις παραμέτρους σε συνδυασμό με τους χάρτες TEC και $VTEC$ δείχνουν απόκριση κυρίως στην ιονόσφαιρα πάνω από τη νότια Ευρώπη, γεγονός που ενισχύεται και από τα μετέπειτα γεγονότα. Η 7η Σεπτεμβρίου σημαδεύτηκε από την άφιξη της προερχόμενης από την M5.5 CME ($\sim 00:00 \text{ UT}$), την ταυτόχρονη διαταραχή των παραμέτρων του γεωμαγνητικού πεδίου και την εκδήλωση της έκλαμψης τάξης X1.3 (έναρξη: 14:20 UT). Η έκλαμψη είχε άμεση επίδραση στη ροή ακτίνων-X, αλλά αν και ισχυρή, όχι στη ροή των ενεργητικών ιόντων, ενώ δεν συνδέθηκε με κάποια CME. Επιπλέον, η αυξημένη δραστηριότητα των ιονοσφαιρικών παραμέτρων εκείνη την ημέρα, φαίνεται πως οφείλεται, ως επί το πλείστον, στην επίδραση της CME και όχι στην ίδια την έκλαμψη, αφού εκδηλώθηκε, και μεγιστοποιήθηκε, πριν από την δεύτερη. Οι τιμές των TEC και $VTEC$ ήταν οι μεγαλύτερες μεταξύ των υπό μελέτη ημερών, αφού οι αυξήσεις ($dTEC$, $dVTEC$) άγγιξαν τις $\sim 12 \text{ TECU}$ σε κάποιες περιοχές, με τις υπόλοιπες ιονοσφαιρικές παραμέτρους, πλυν της $fmin$, να ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά, ενώ το φαινόμενο ήταν εντονότερο ξανά στα νοτιότερα γεωγραφικά πλάτη (σταθμούς) της Ευρώπης. Το φαινόμενο της γεωγρα-

φικής αυτής κατανομής της αύξησης του TEC εντάθηκε κατά την 8η Σεπτεμβρίου, κατά την οποία κατέφτασε η προερχόμενη από την X9.3 CME, με αποτέλεσμα την εκ νέου διαταραχή των παραμέτρων του IMF. Οι αυξήσεις των παραμέτρων δεν ήταν ανάλογες της έντασης του φαινομένου, ενώ η ερμηνεία τους είναι δυσχερής λόγω επικαλύψεις των σχετικών φαινομένων και απαιτεί πρόσθετες πληροφορίες. Οι μέρες που ακολούθησαν κινήθηκαν, ως προς τις ιονοσφαιρικές παραμέτρους, σε επίπεδα τιμών υποβάθρου (αυξημένου, μιν, λόγω της πρόσφατης έντονης δραστηριότητας), μέχρι και την 14η Σεπτεμβρίου. Κατά την ημέρα αυτή παρουσιάστηκε έντονη διαταραχή των παραμέτρων του IMF (έναρξη $\sim 10:00$ UT) που αποδίδεται σε εισερχόμενο SIR, ενώ η απόκριση της ιονόσφαιρας εκδηλώθηκε συντονισμένα ως προς τις παραμέτρους (πλυν της $fmin$) και την ένταση, στο χρονικό διάστημα ($\sim 16:00-20:00$ UT) κυρίως στα μέσα γεωγραφικά πλάτη της Ευρώπης.

Στα πλαίσια της παρακολούθησης και της πρόγνωσης του διαστημικού καιρού το Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ) του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) επιχειρεί τη δημιουργία ενός Κέντρου γι' αυτόν τον σκοπό. Το υπό διαμόρφωση Κέντρο παρακολούθησης και πρόγνωσης του διαστημικού καιρού χρηματοδοτείται από τη ΓΓΕΤ, μέσω του προγράμματος ΚΡΗΠΙΣ/ΠΡΟΤΕΑΣ, και έχει ως απώτερο σκοπό τη συνεχή παρατήρηση του Ήλιου, της μαγνητόσφαιρας, της πλασμόσφαιρας, της ανώτερης ατμόσφαιρας και του γεωμαγνητικού πεδίου μέσω της αναβάθμισης των υπο λειτουργία υποδομών, αλλά και μέσω της ανάπτυξης νέων. Στις υποδομές αυτές περιλαμβάνονται όργανα παρατήρησης, συστήματα ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων και αλγοριθμικά μοντέλα σχεδιασμένα για την περιγραφή, αλλά και την πρόγνωση, του διαστημικού καιρού. Ένα σκέλος του παραπάνω εγχειρήματος είναι και η αναβάθμιση του συστήματος *HELIOSERVER* του *ΙΑΑΔΕΤ* στο οποίο ενσωματώνονται και δεδομένα από το πανευρωπαϊκό δίκτυο ιονοσφαιρικών σταθμών *DIAS*. Ο *HELIOSERVER* περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, ηλιακές παρατηρήσεις που λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο από το ηλιακό τηλεσκόπιο του *ΙΑΑΔΕΤ* και δεδομένα από διαστημικές αποστολές. Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε και διαρθρώθηκε με βάση δύο πυλώνες: **i)** αναβάθμιση και συντήρηση της λειτουργίας του ηλιακού τηλεσκοπίου του *ΙΑΑΔΕΤ*, το οποίο αποτελεί βασική πτυχή του παραπάνω εγχειρήματος και **ii)** μελέτη της επίδρασης εκρηκτικών ηλιακών γεγονότων στη γήινη ιονόσφαιρα στην περιοχή της Ευρώπης.

Η λειτουργία του ηλιακού τηλεσκοπίου, το οποίο έχει τοποθετηθεί σε θόλο των εγκαταστάσεων του *ΙΑΑΔΕΤ*, περιλαμβάνει παρατηρήσεις πλήρους ηλιακού δίσκου με τη χρήση CCD κάμερας και παρατηρήσεις περιοχών ενδιαφέροντος (κέντρα δράσης, κηλίδες, νημάτια, προεξοχές), σε μεγέθυνση, έπειτα από την προσθήκη πολλαπλασιαστή. Το λογισμικό που έχει σχεδιαστεί εκτελεί βασικές διορθώσεις στις ληφθείσες εικόνες (επίπεδου πεδίου, αμαύρωσης χείλους) και αποθηκεύει τα αποτελέσματα τα οποία μεταφορτώνονται στον *HELIOSERVER*. Στο

σκέλος των παρατηρήσεων δημιουργήσαμε κατά την πραγματοποίηση της εργασίας μας, ένα πρωτόκολλο παρατηρήσεων (προετοιμασία συστήματος καταγραφής και θόλου, καταγραφή καιρικών συνθηκών, διατήρηση ημερολογίου παρατηρήσεων, χρόνοι έκθεσης, λήψη εικόνων, επεξεργασία παρατηρήσεων, μεταφόρτωση στον HELIOSERVER), με στόχο την αυτοματοποίηση της διαδικασίας και τη λήψη βέλτιστης ποιότητας παρατηρήσεων. Επιπλέον, σχεδιάστηκε και προστέθηκε μία διαδικασία ακριβέστερου εντοπισμού του κέντρου της γραμμής Η α που βασίζεται στην ελάχιστη τιμή του προφίλ της έντασης της γραμμής Η α , η οποία επιτυγχάνεται μέσω της μετακίνησης του φίλτρου, ενώ πραγματοποιήθηκε και καθαρισμός του οπτικού συστήματος. Ακόμα, μελετήθηκε η λειτουργία του οπτικού συστήματος και εντοπίστηκαν συστηματικά οπτικά σφάλματα, τα οποία επιχειρήθηκε να διορθωθούν με τροποποιήσεις στο οπτικό σύστημα ή/και στον κώδικα. Στο σκέλος της επεξεργασίας των παρατηρήσεων, έγιναν τροποποιήσεις και προσθήκες στο ήδη υπάρχον λογισμικό με γνώμονα την εξάλειψη όσο το δυνατόν περισσότερων σφαλμάτων και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας για τον χρήστη. Συγκεκριμένα, στον κώδικα προστέθηκαν: διόρθωση για το ρεύμα σκότους (dark current) και κριτήριο απόρριψης εικόνων με μεγάλα σφάλματα (θολές εικόνες) ή/και εικόνες που βρίσκονται οριακά εντός του οπτικού πεδίου, ενώ σχεδιάστηκε και ο κώδικας υπολογισμού της βέλτιστης θέσης του φίλτρου για τον εντοπισμό του κέντρου της γραμμής Η α . Η απόρριψη των παραπάνω εικόνων διευκολύνει και δίνει καλύτερα αποτελέσματα στην κατασκευή της εικόνας του επίπεδου πεδίου. Επιπλέον, προστέθηκαν δύο εναλλακτικές μέθοδοι για την ενίσχυση των χρωμοσφαιρικών φαινομένων και ρουτίνα ενσωμάτωσης των, κατά πολύ αμυδρότερων, φαινομένων χείλους στην εικόνα του πλήρους δίσκου. Τέλος, αυτοματοποιήθηκε η εξαγωγή πληροφοριών από τις εικόνες που αφορούν στην ημερομηνία και ώρα λήψης των παρατηρήσεων, ώστε η τελική αποθήκευσή τους να μην απαιτεί ενέργειες από το χρήστη. Οι παραπάνω τροποποιήσεις και αναβαθμίσεις έγιναν λαμβάνοντας υπόψη και την μελλοντική προσθήκη μιας νέας, υψηλότερης ευκρίνειας και ευρύτερου πεδίου CCD κάμερας, καθώς και ενός νέου φίλτρου (double stack etalon).

Η απόκριση της ιονόσφαιρας πάνω από την Ευρώπη στα εκρηκτικά γεγονότα του Σεπτεμβρίου 2017 μελετήθηκε κυρίως με βάση τις καταγραφόμενες ροές ακτινοβολίας ακτίνων-Χ και ροές ιόντων, επιλεγμένες παραμέτρους του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (IMF) και τις ιονοσφαιρικές παραμέτρους TEC , f_oF2 , $MUF3000$ και f_{min} . Η ανάλυση έδειξε ότι από τις δύο εκλάμψεις (X2.2 και X9.3) της 6ης Σεπτεμβρίου 2017 η πρώτη, είχε περιορισμένη βραχυπρόθεσμη επίδραση της τάξης των ωρών και μεσοπρόθεσμη της τάξης μερικών ημερών, τόσο στη ροή ακτίνων-Χ και τη ροή ιόντων, όσο και στις ιονοσφαιρικές παραμέτρους. Αντιθέτως, η δεύτερη είχε επίδραση σχεδόν σε όλες τις προαναφερθείσες παραμέτρους, τόσο βραχυπρόθεσμη, όσο και μεσοπρόθεσμη λόγω της CME που απελευθέρωσε. Η απόκριση ήταν εντονότερη και στις δύο περιπτώσεις στα νότια γεωγραφικά πλάτη της Ευρώπης. Η 7η Σεπτεμβρίου περιλάμβανε την άφιξη μίας προερχόμενης από την έκλαμψη M5.5 της 4ης Σεπτεμβρίου CME, την εκδήλωση μίας έκλαμψης τάξης

X1.3 και την έντονη διαταραχή των παραμέτρων του IMF, ενώ οι παρατηρούμενες επιδράσεις στις ιονοσφαιρικές παραμέτρους φαίνεται πως οφείλονταν κυρίως στο πρώτο φαινόμενο. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στις 8 Σεπτεμβρίου 2017, τόσο στη συμπεριφορά των παραμέτρων του IMF, όσο και στις ιονοσφαιρικές παραμέτρους, αυτή τη φορά ενδεχομένως λόγω της άφιξης της CME που προήλθε από την έκλαμψη τάξης X9.3, χωρίς να είναι δυνατή πληρέστερη ερμηνεία λόγω επικάλυψης φαινομένων και περιορισμένου εύρους δεδομένων. Τέλος, στις 14 Σεπτεμβρίου παρατηρήθηκε έντονη διαταραχή των παραμέτρων του IMF και συντονισμένη απόκριση των επιλεγμένων ιονοσφαιρικών παραμέτρων, πιθανότατα λόγω εισερχόμενου Stream Interaction Region (SIR). Τα αποτελέσματα αυτά θα μπορούσαν μελλοντικά να συνδεθούν με μετρήσεις που αφορούν την ιονόσφαιρα σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και να συσχετιστούν με δεδομένα από ποικίλες πηγές (ραδιοκύματα υψηλών συχνοτήτων, ραδιοκύματα χαμηλών συχνοτήτων, μετρήσεις GPS, ιονοσφαιρικές παραμέτρους ανά ύψος κ.α.) για μια πληρέστερη ανάγνωση και ερμηνεία της απόκρισης της ιονόσφαιρας σε εκρηκτικά ηλιακά φαινόμενα εν γένει και της επίπτωσής τους στην πλοήγηση και τις τηλεπικοινωνίες.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'

ΚΩΔΙΚΕΣ IDL

Κώδικας 1: βαθμονόμηση φίλτρου

```
in_str = dialog_pickfile ( )
path_dat = strmid( in_str , 0, rstrpos ( in_str , '\')+1)
dat_arr_str =path_dat+'.*.tiff '
instring = findfile ( dat_arr_str )
nfiles =n_elements( instring )

data = fitarr (1600,1200, nfiles )
for i=0, nfiles -1 do begin
    temp= read_tiff ( instring ( i ))
    data (*,*, i)= float (temp)
endfor

mean_l= fitarr ( nfiles )
for i=0, nfiles -1 do begin
    img=reform(data (*,*, i))
    M=where(img gt 30,/164)
    mean_l(i)=mean(img(M))
endfor

plot ,mean_l,/ ynozero

mn=min(mean_l, location )

result = array_indices (mean_l, location )

print , result

END
```


Κώδικας 2: Επεξεργασία εικόνας (ρεύμα σκότους *dark*, εικόνα απόκρισης *flat field*, αμαύρωση χείλους (*limb darkening*))

```

;;-----PICKING DATA-----

; pick a file from the folder :
in_str = dialog_pickfile ()
path_dat =strmid( in_str , 0,  rstrpos ( in_str , '\')+1)
dat_arr_str =path_dat+'. tiff '
instring = file_search ( dat_arr_str )
nfiles =n_elements( instring )

;; extracting date info . the images must have been saved
;; with the appropriate format of IC capture software
print , 'EXTRACTING_DATE_INFO'

yr=strmid( instring (0),  strpos ( instring (0), 'i')+9, 2)
mnth=strmid( instring (0),  strpos ( instring (0), 'i')+12, 2)
day=strmid( instring (0),  strpos ( instring (0), 'i')+15, 2)
datet = strcompress ( '20'+ string ( fix (yr))+ '/' + string ( fix (mnth))+ '/' + string (day ),/ remove_all )
date_s = strcompress ( '20'+ string ( fix (yr))+ string (mnth)+ string (day ),/ remove_all )

;;-----READING DATA-----

print , 'READING_DATA'
data = ftarr (1600,1200, nfiles )
for i=0, nfiles -1 do begin
    temp= read_tiff ( instring ( i ))
    data (*,*, i)= float (temp)
endfor

; dark subtraction
print , 'SUBTRACTING_DARK'
dark_str = dialog_pickfile ( get_path = dark_path ,/ multiple_files )
dark_data = ftarr (1600,1200)
dark_data = read_tiff ( dark_str )

dark_corr =data
for i=0, nfiles -1 do begin
    dark_corr (*,*, i)=data (*,*, i)- dark_data
    data (*,*, i)= dark_corr (*,*, i)
endfor

; find the boundary of the solar limb , fit a circle and estimate radius and offsets
print , '_CALCULATING_OFFSETS_FROM_LIMB_DETECTION_AND_FITTING'
sz = size ( data ,/ dim)
xc = ftarr ( sz (2))

```

```

yc = ftarr ( sz (2))
dxc = ftarr ( sz (2))
dyc = ftarr ( sz (2))
rc = ftarr ( sz (2))
FOR i=0,sz(2)-1 do begin
    img=reform(data (*,*, i))
    solar_disk =where(img gt 30.)
    solar_limb = find_boundary ( solar_disk , xsi =sz(0), ysi =sz(1))
    xlimb =reform( solar_limb (0,*))
    ylimb =reform( solar_limb (1,*))
    sslimb =where(xlimb ne 0 and xlimb ne sz(0)-1 and ylimb ne 0 and ylimb ne sz(1)-1)
; exclude image boundaries
    xlimb =xlimb( sslimb )
    ylimb =ylimb( sslimb )
; fit circle
    res = fit_circle ( xlimb , ylimb )
    xc(i)=res(0)
    yc(i)=res(1)
    rc(i)=res(2)
endfor

; select data with moderate shifts , the condition being that the solar center
; is found with +/-100 pixel from the image boudnary . Reject images with large
; flaws or/and offsets between image boundaries

sc=where(xc gt -100 and xc lt sz(0)+100 and yc gt -100 and yc $
lt sz(1)+100 and rc lt median(rc)+10 and rc gt median(rc)-10)
if total (sc) lt 0. then goto ,terma
xc=xc(sc)
yc=yc(sc)

; exclude flawed images
data =data (*,*, sc)
instring = instring (sc)
nfiles =n_elements( instring )

sz = size ( data ,/ dim)

; define offsets in respect with the centre of the image .
x_offs =xc-xc(0)
y_offs =yc-yc(0)
offs = ftarr (2, sz (2))
for i=0,sz(2)-1 do begin
    offs (0, i)= x_offs ( i)
    offs (1, i)= y_offs ( i)
endfor

;;-----FLAT-FIELD CORRECTION-----

print , 'CALCULATING_FLAT_FIELD_BASED_ON_KUHN_ET_AL_1991'
mk_kuhn_flat , data , 30., flat , offsets =offs , niter =10

```

```

ss=where( flat eq 0.)
if total (ss) gt 0. then flat (ss)=min( flat (where( flat ne 0.)))

print , 'SAVING_FLAT,_LOOK_INSIDE_FOLDER_...' + path_dat
flat_fname =path_dat+' master_flat_field .sav '
save , flat , filename = flat_fname
; ; ; flat field correction
dataflat =data
for i=0,sz(2)-1 do dataflat (*,*, i)=data (*,*, i)/ flat

;-----BUILDING THE FULL-DISK IMAGE-----

; create mosaic image using all frames. The pixels will
; fill a supercube array with dimensions 1800x1800
print , 'CALCULATING_MOSAIC_HA_IMAGE'
ha_image= ftarr (1801,1801)
supercube = ftarr (1801,1801,n_elements( instring ))
supercube (0:sz(0)-1,0:sz(1)-1,*)= dataflat

; convert coordinates of im1, im2 in respect with the solar centers
xshift =900-xc & yshift=900-yc
for i=0,n_elements( instring )-1 do supercube (*,*, i)= shift ( supercube (*,*, i), xshift ( i), yshift ( i))

; fill in the superimage the pixels of the original ones
for i=0,1800 do begin
  for j=0,1800 do begin
    temp=reform( supercube ( i, j ,*))
    s0=where(temp ne 0. and temp lt median(temp)+3*stddev( temp))

    if total (s0) gt 0 then ha_image(i, j)=max(temp(s0)) else ha_image(i, j)=0.
  endfor
endfor

;save the parameters of the created ha image
print , 'HA_IMAGE_SAVED,_LOOK_INSIDE_FOLDER_...' + path_dat
ha_image_fnam=path_dat+'ha_image .sav '
save , ha_image , filename =ha_image_fnam

;save flat image for inspection
window ,0, xsize =800,ysize =600
tvsc1 , congrid ( flat ,800,600)
flm =tvrd (/ true )
pngfnam= strcompress ( path_dat +' flat_ ' +day+'_' +mnth+'_2.png' ,/ remove_all )
write_png ,pngfnam, flm

; sharpen the resulted ha image ( before the limb darkening correction , optional )
ha_img2=unsharp_mask( corim , radius =10)

;-----LIMB DARKENING AND NON-RADIAL VARIATION CORRECTIONS-----

```

```

;due to optical errors the routine searches for the optimum
;wavelenth correction

print , 'CORRECTING_FOR_LIMB_DARKENING'
img=smooth( bytscl (ha_image ,max=100,min=1),[5,5])
find_limb2 ,img,x0,y0,r0 , r_err

; create 200nm seperated wavelenths
llam =6000+200*indgen(25)

szz =size( llam )
imgt = ftarr (1801,1801,szz (1))
limbfilt = ftarr (1801,1801,szz (1))
STD= ftarr (szz (1))

;perform dark limb correction and get the best result
;by getting the minimum of the differences inner_layer_intensity - outer_layer_intensity
for i=0,szz(1)-1 do begin
    lam=llam(i)
    darklimb_correct ,ha_image ,imgt , limbf , lambda=lam, limbxyr =[x0,y0,r0]
    limbfilt ( ** , i)= limbf
    imgt ( ** , i)=imgt
    dist_circle ,imgc,1801,x0,y0
    range_c =where(imgc lt r0/6)
    range_limb =where(imgc gt 5*r0/6 and imgc lt r0)
    STD(i)=abs(mean(imgt ( range_c ))-mean(imgt ( range_limb )))
endfor

mnn=min(STD,location)
ind = array_indices (STD, location )
imgout =imgt ( ** , ind )

;get limb darkening image ( optional )
limbout = limbfilt ( ** , ind )

; correcting non-radial intensity variations
NONRAD_GRAD_JK,imgout,imradcorr

;save the limb darkening corrected image variables
print , 'SAVING_LIMB_DARKENING_CORRECTED_IMAGE,_LOOK_INSIDE_...' +path_dat
ha_limb_corr = imradcorr
ha_image_fnam=path_dat+' ha_image_limb_corr .sav '
save , ha_limb_corr , filename =ha_image_fnam

;save limb darkening corrected image for inspection ( optional )
window ,3, xsize =900,ysize =900
corrim =congrid( ha_limb_corr ,900,900)
tvsc1 , corrim
img=tvrd (/ true )
jpegfnam = strcompress ( path_dat +'ha_' +date_s+' _cor .png' ,/ remove_all )
WRITE_png, jpegfnam, img

```

```

;;-----SOLAR DISK AND LIMB FEATURE ENHANCEMENT-----

; enhancing features with use of high contrast filters and mask sharing
; alternatively use convolution kernels
print , 'ENHANCING_FEATURES_AND_SHOWING_LIMB_PHENOMENA'
corimm = bytscl ( ha_limb_corr , max=mean(ha_limb_corr)+1.35*stddev ( ha_limb_corr ) , $
min=mean(ha_limb_corr)+0.35*stddev ( ha_limb_corr ))

;-----alternative-----
; change the element (2,2) of the kernel for different results
; info = size ( corimm )
; img1x = info ( 1 )
; img2x = info ( 2 )
; kernel = [[-1,-1,-1],[-1,9,-1],[-1,-1,-1]]
; limb_img2 = convol ( corimm , kernel )
;-----

limb_img2 = unsharp_mask ( corimm , radius = 10 )

; combine ha and ha overexposed images to include limb phenomena
timg = bytscl ( ha_image , max=25 , min=15 ); set after inspection

dist_circle , Ha_fin , 1801 , x0 , y0
dist_circle , Ha_fin_nolimb , 1801 , x0 , y0
for i = 0 , 1800 do begin
  for j = 0 , 1800 do begin
    if Ha_fin ( i , j ) gt r0 then Ha_fin ( i , j ) = timg ( i , j ) $
    else Ha_fin ( i , j ) = limb_img2 ( i , j )
    if Ha_fin_nolimb ( i , j ) gt r0 then Ha_fin_nolimb ( i , j ) = timg ( i , j ) $
    else Ha_fin_nolimb ( i , j ) = ha_img2 ( i , j )
  endfor
endfor

;;-----CREATING HELIOSERVER COMPATIBLE NAMES-----

;; extracting time info :
print , 'EXTRACTING_TIME_INFO'

ss = ftarr ( nfiles )
mm = strarr ( nfiles )
hh = intarr ( nfiles )
exptime = strarr ( nfiles )
for i = 0 , nfiles - 1 do begin
  ss ( i ) = strmid ( instring ( 0 ) , strpos ( instring ( 0 ) , 'i' ) + 23 , 2 )
  mm ( i ) = strmid ( instring ( 0 ) , strpos ( instring ( 0 ) , 'i' ) + 21 , 2 )
  hh ( i ) = strmid ( instring ( 0 ) , strpos ( instring ( 0 ) , 'i' ) + 18 , 2 )
  exptime ( i ) = strcompress ( string ( fix ( hh ( i ) ) ) + $
  ':' + string ( fix ( mm ( i ) ) ) + ':' + string ( fix ( ss ( i ) ) ) , / remove_all )
endfor

```



```

;UTC time compressed string
;UTC+3 in summer
utctimcom = strcompress ( string ( fix (hh(0)-3))+mm(0))

; create pre-formated names for uploading in the server
date_tit = 'Athens_NOA_...' + datet + '...' + utctime + ':00' ; '+ sys_time + '
suffix1000 = 'ha0_' + date_s + '...' + utctimcom + '00_1000.png'
suffix256 = 'ha0_' + date_s + '...' + utctimcom + '00_256.png'
suffix1000_2 = 'ha0_' + date_s + '...' + utctimcom + '00_1000_2.png'
suffix256_2 = 'ha0_' + date_s + '...' + utctimcom + '00_256_2.png'

;-----MAPPING AND SAVING FINAL IMAGES-----

; rotate to align with the solar north
;(depends on the alignment of the camera-optical tube system)
hamap1 = make_map(rot(Ha_fin,135,/ int ), xc=0.,yc=0., roll_center = [900,900],$
dx=1.275,dy=1.275,time=t_time, units = 'arcsec ')
hamap2 = make_map(rot(Ha_fin_nolimb ,135,/ int ), xc=0.,yc=0., roll_center = [900,900],$
dx=1.275,dy=1.275,time=t_time, units = 'arcsec ')
add_prop , hamap1, time = datet + '...' + utctime + ':00'
add_prop , hamap2, time = datet + '...' + utctime + ':00'

;-----plot and save the created maps-----
; must save a 256x256 and a 1000x1000 map image for each map
; for uploading in the Helioserver

loadct ,3
stretch
window ,1, xsi =256,ysi=256
plot_map ,hamap1, grid =10,/limb , gsty =1 ,gthi=0.05,/ notit
xyouts ,0,1200, date_tit , align =0.5
img=tvrd (/ true )
jpegfnam = strcompress ( path_dat + suffix256 ,/ remove_all )
WRITE_png, jpegfnam, img
window ,1, xsi =256,ysi=256
plot_map ,hamap2, grid =10,/limb , gsty =1 ,gthi=0.05,/ notit
xyouts ,0,1200, date_tit , align =0.5
img=tvrd (/ true )
jpegfnam = strcompress ( path_dat + suffix256_2 ,/ remove_all )
WRITE_png, jpegfnam, img
window ,1, xsi =1000,ysi=1000
plot_map ,hamap1, grid =10,/limb , gsty =1 ,gthi=0.1,/ notit
xyouts ,0,1200, date_tit , align =0.5, charsize =2
img=tvrd (/ true )
jpegfnam = strcompress ( path_dat + suffix1000 ,/ remove_all )
WRITE_png, jpegfnam, img
plot_map ,hamap2, grid =10,/limb , gsty =1 ,gthi=0.1,/ notit
xyouts ,0,1200, date_tit , align =0.5, charsize =2
img=tvrd (/ true )
jpegfnam = strcompress ( path_dat + suffix1000_2 ,/ remove_all )

```

```
WRITE_png, jpegfnam, img
```

```
;
```

```
goto, enda
```

```
terma :
```

```
print , 'ABORTING,_VERY_LARGE_SHIFTS,_CHOOSE_ANOTHER_DATA_SET!!!'
```

```
enda :
```

```
print , 'TERMINATING_PROCESS'
```

```
END
```

Ελληνική

Αλυσσανδράκης, Κ. Ε. Νίντος, Α, Πατσουράκος, Σ. (2015), *Παρατηρησιακή αστροφυσική*, ΣΕΑΒ, ISBN:978-960-603-429-9.

Αλυσσανδράκης, Κ. Ε. Νίντος, Α, Πατσουράκος, Σ. (2015), *Φυσική του Ήλιου και του διαστήματος*, ΣΕΑΒ, ISBN:978-960-603-430-5.

Αυγολούπης, Σ. Ι., Σειραδάκης, Γ. Χ. (2012), *Παρατηρησιακή αστρονομία*, Έκδοση Β΄, ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Πρέκα-Παπαδήμα, Π., Δανέζης Μ., Θεοδοσίου Σ. & Καργιολάκη, Δ.: 2009, *Στα μονοπάτια του ήλιου*, Δίαυλος, Αθήνα, ISBN: 978-960-532-243-5.

Κοντογιάννης, Γ. (2013), *Μελέτη του ρόλου της λεπτής υφής της χρωμόσφαιρας στο σχηματισμό του μαγνητικού θόλου και στη διάδοση των κυμάτων*, διδακτορική διατριβή, Αθήνα.

Κουλουμβάκος, Α. (2017), *Μελέτη Κρουστικών Κυμάτων στο Ηλιακό Στέμμα και το Μεσοπλανητικό Χώρο*, διδακτορική διατριβή, Ιωάννινα.

Διεθνής

Aharon, O. & Abdulhalim, I. (2009), *Optics Express* 11426, 17, 14.

Balasubramaniam, K. S. & Pevtsov A. (2012), *Solar Physics and Space Weather Instrumentation IV*, Proc. of SPIE, 8148, 814809.

Belehaki, A., Kutiev, I., Marinov, P., et al., (2012), *ASR*, 59, 1041-1056.

Bello, S. A., Abdullah, M., Hamid, N. S. A., et al. (2017), *Journal of Physics Conf. Series*, 852, 012016.

Berger, T., Matthiä, D., Burmeister, S., et al. (2018), *Space Weather*, 16, 1173-1189.

Berdermann, J., Kriegel, M., Banyas, D., et al. (2018), *Space Weather*, 16, 1604-1615.

Butcher, G. (2012), *Mysteries of the Sun*, Nasa's Heliophysics division of the science mission directorate, NASA, USA.

- Cane, H. V. & Lario, D. (2006), *Space Science Reviews*, 123, 1-3, 45-56.
- Chae, J. (2004), *Solar Physics*, 221, 1-14.
- De la Cruz Rodriguez, J. (2010), *Measuring the solar atmosphere*, doctoral thesis, Department of Astronomy, Stockholm University.
- Deng, Y. Y. (2011), *ASI Conf. Series*, 2, 31-36.
- Desai, M. & Giacalone, J. (2016), *Living Rev. Sol. Phys.*, 13, 3.
- Elsworth, Y., Broomhall, A.-M., Gosain, S., et al. (2015), *Space Science Reviews*, 196, 137-166.
- Handzo, R., Forbes J. M., Reinisch, B. (2014), *Space Weather*, 12, 205-216.
- Jacobi, Ch., Nikutowsk, B., Hein J., et al. (2014), *Solar Physics*, 289, Issue 5, 1863-1883.
- Jiang, C., Zou, P., Feng, X., et al. (2018), *AJ*, 869, 1, id.13, 18.
- Kamalam, V. (2013), *The role of chromospheric jet-like events in coupling the chromosphere and corona: A multi-instrument approach*, doctoral thesis, Belfast, Northern Ireland.
- Klava, M., Sobotka, M., Svanda, M. (2011), *CoSka*, 41, 92-98.
- Kohl, J. L., Noci, G., Cranmer, S.R. et al. (2006), *Astron. Astrophys. Rev.*, 13, 31.
- Kontogiannis, I., Belehaki, A., Tsiropoula, G. et al., (2016), *ASR*, 57, 418-430.
- Kontogiannis, I. & Tsiropoula, G. (2016), *ASP Conf. Series*, 504, 317.
- Kuhn, J. R., Lin, H., Loran, D. (1991), *PASP*, 103, 1097.
- Kutiev, I., Tsagouri, I., Perrone, L. (2013), *JSWSC*, 3, A06.
- LiBo, L., WeiXing, W., YiDing, C., HuiJun, L. (2011), *Chinese Science Bulletin*, 56, 1202-1211.
- Löhner-Böttcher, J. (2015), *Wave phenomena in sunspots*, doctoral thesis, Freiburg, Breisgau, Albert-Ludwigs-Universität.
- Luhmann, J. G., Mays, M. L., Li, Y., et al. (2018), *Space Weather*, 16, 557-568.
- Malandraki, O. & Crosby, N. B. (2018), *Solar Particle Radiation Storms Forecasting and Analysis: The HESPERIA HORIZON 2020 Project and Beyond*, Astrophysics and Space Science Library, Springer, Switzerland.
- Martens, P. C. H. & Kuin, N. P. M. (1989), *Solar Physics*, 122, 2, 263-302.
- Neidig, D., Wilborg, R., Cofer, M., et al. (1998), *Synoptic Solar Physics*, *ASP Conf. Series*, 140.
- Otruba, W. & Potzi, W. (2003), *Hvar Obs. Bull.*, 27, 1, 189-195.
- Piersanti, M., Tommaso, A., Bemporad, A., et al. (2017), *Solar Physics*, 292, 169.
- Qian, L., Burns, A. G., Chamberlin, P. C., Solomon, S. C. (2011), *JGR*, 116, A10309.
- Rao et al. (2015), *Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1(2).
- Ravindra, B., Prabhu, K., Rangarajan, K. E., et al., (2015), *RAA*, X, XX.
- Redmon, R. J., Seaton, D. B., Steenburgh, R., et al. (2018), *Space Weather*, 16, 9, 1190-1201.
- Reid, G. C. (1976), *Solar Activity Observations and Predictions* by P.S. McIntosh and M. Dryer, 293-312.
- Rutten, R. J. (2006), *ASP Conf. Series*, 368, 27.
- Sanchez-Bajo, F., Vaquero, J. M., Montero, M. P. R. (2002), *EJP*, 23, 323-330.
- Steinegger, M., Denker, C., Goode, P.R, et al. (2000), *ESASP*, 463, 617S.

Thiemann, E. M. B., Andersson, L., Lillis, R. et al. (2018), *Geophysical Research Letters*, 45, 26.

Tsurutani, B. T., Verkhoglyadova, O. P., Mannucci, A. J., et al. (2009), *Radio Science*, 44, RSOA17.

Xiong, B., Weixing, W., Liu, L., et al. (2011), *JGR*, 116, A11317.

Xu, G.-G., Zheng, S., Lin, G.-H., et al. (2016), *AJ*, 827, 137.

Yasyukevich, Y., Astafyeva, E., Padokhin, A. (2018), *Space Weather*, 16, 1013-1027.

Zharkova, V. V., Ipson, S. S., Zharkov, S. I., et al. (2002), *Solar Physics*, 214, 89-105.

Zharkova, V. V., Ipson, S. S., Benkhalil, A., Zharkov, S. (2005), *AIRJ*, 23/3, 209-266.