



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΣΕ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΔΕΚΤΩΝ  
GNSS ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ ΚΑΙΡΟΥ**

Παπαδοπούλου Φωτεινή Παρασκευή

Αριθμός Μητρώου: 19391004

Επιβλέπων: Χλούπης Γεώργιος, Αναπληρωτής καθηγητής ΠΑΔΑ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

DEPARTMENT OF SURVEYING AND GEOINFORMATICS

GEODESY FIELD

**DIPLOMA THESIS**

**DETECTION OF CHARACTERISTIC PATTERNS IN GNSS TIME SERIES  
FOR SPACE WEATHER STUDIES**

Papadopoulou Foteini Paraskevi

Registration Number: 19391004

Supervisor: Chloupis Georgios, Associate Professor UNIWA

ATHENS, OCTOBER 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΣΕ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΔΕΚΤΩΝ**

**GNSS ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ ΚΑΙΡΟΥ**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Γ. Χλούπης

Β. Ανδριτσάνος

Ι. Χρηστάκης

Αν. Καθηγητής ΠΑΔΑ

Καθηγητής ΠΑΔΑ

Ε.ΔΙ.Π ΠΑΔΑ

*Στην γιαγιά μου και στον παππού μου*

**Παπαδοπούλου Φωτεινή Παρασκευή**

© All rights reserved – 2024

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

## Δήλωση συγγραφέα διπλωματικής εργασίας

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Παπαδοπούλου Φωτεινή Παρασκευή του Ιωάννη με αριθμό μητρώου 19391004, φοιτήτρια του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

---

Παπαδοπούλου Φωτεινή Παρασκευή

## Ευχαριστίες

---

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Χλούπη Γεώργιο, για την καθοδήγηση, την υπομονή και την στήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να αποδώσω θερμές ευχαριστίες σε δύο αγαπημένα μου πρόσωπα, την κυρία Κοτσίνη Βασιλική και τον κύριο Μιχαηλίδη Μανώλη, για την πολύτιμη βοήθεια τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Επιπροσθέτως ευχαριστώ τη φίλη και συνάδελφο μου Ζησίογλου Ευδοξία για την όμορφη και δημιουργική συνεργασία μας στη σχολή, καθώς και για την στήριξη της σε όλη τη διάρκεια της γνωριμίας μας.

Από το κείμενο αυτό δεν μπορεί να λείπει η φίλη μου Μόσχου Μαρία, την οποία ευχαριστώ για την αμέριστη συμπαράσταση της.

Επιπλέον επιθυμώ να ευχαριστήσω τον σύντροφο μου Μιχαηλίδη Μιχάλη για την στήριξη του συνολικά στη ζωή μου. Αποτέλεσε και συνεχίζει ακόμα, αστείρευτη πηγή έμπνευσης και δύναμης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που παρά τις δυσκολίες προσπάθησε να κάνει ότι καλύτερο μπορούσε ώστε να έχω την δυνατότητα να σπουδάσω.

Ολόγυρα μας υπάρχει ένα αναρίθμητο πλήθος γαλαξιών, άστρων, πλανητών, σωμάτων και σωματιδίων, τα οποία απαρτίζουν το σύμπαν και δεν υπήρχαν από πάντα. Η πράξη όλης της ανθρωπότητας και τα επιστημονικά δεδομένα αποδεικνύουν ότι η κίνηση, η ανάπτυξη και η εξέλιξη είναι ιδιότητες της ύλης, και κατ' επέκταση παρατηρούνται σε όλα τα φαινόμενα, συμβάντα και γεγονότα του γήινου και διαστημικού περιβάλλοντος που η ανθρωπότητα καλείται να διερευνά για να απαντά σε ερωτήματα που αφορούν τον υλικό κόσμο και τα φαινόμενα που συντελούνται στο ηλιακό μας σύστημα, και πως αυτά επιδρούν και επηρεάζουν τον διαστημικό χώρο αλλά και τη ζωή στη Γη. Ένα από τα επιστημονικά πεδία που σχετίζεται με τα παραπάνω είναι αυτό του διαστημικού καιρού, καθώς περιλαμβάνει την παρακολούθηση και τη μελέτη των συνθηκών που επικρατούν στον Ήλιο, στον διαπλανητικό χώρο και στο γεωδιάστημα. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν αρκετά κέντρα μελέτης και πρόγνωσης του σε παγκόσμιο επίπεδο. Συγχρόνως οι μέθοδοι και τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των δεδομένων έχουν καθοριστική σημασία για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, με τη μηχανική μάθηση και τα νευρωνικά δίκτυα να έχουν τα τελευταία χρόνια πρωταγωνιστικό ρόλο στην ανάλυση και στη μοντελοποίηση της πληροφορίας.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη σημασία της πρόβλεψης του διαστημικού καιρού, και συγκεκριμένα των γεωμαγνητικών καταιγίδων, για το διαστημικό περιβάλλον και για τις γήινες συνθήκες σε συγκεκριμένους τομείς. Είναι απαραίτητο να κατανοηθεί ότι η γνώση αυτή μας αφορά, καθώς με τον τρόπο αυτό θα ενισχυθεί το ήδη υπάρχον και θα προστεθεί νέο υλικό για τις αιτίες και τα αποτελέσματα των διαφόρων διεργασιών και διαταραχών.



## Περίληψη

---

Στο διαστημικό και γήινο περιβάλλον υπάρχουν διάφορα δυναμικά, δηλαδή μεταβαλλόμενα, γεγονότα, φαινόμενα και συστήματα. Οι αλλαγές αυτές που διακρίνονται για τις ποσοτικές και ποιοτικές τους διεργασίες μπορεί να είναι ήπιες ή ισχυρές. Τέτοια γεγονότα είναι οι ηλιακές εκλάμψεις (solar flares), οι εκτοξεύσεις στεμματικής μάζας (Coronal Mass Ejections) και οι γεωμαγνητικές καταιγίδες (geomagnetic storms), που είναι δυνατό να φανερώσουν τα αίτια, την εξέλιξη, καθώς και άγνωστους μηχανισμούς δημιουργίας διαφόρων συμβάντων. Επίσης, διαταραχές με έντονο μαγνητικό πεδίο και άλλα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στον διαπλανητικό και διαστημικό χώρο επιφέρουν επιπτώσεις σε διαστημικές και γήινες υποδομές, όπως φθορές σε δορυφόρους και διαταραχές στις τηλεπικοινωνίες, αλλά και στην ανθρώπινη υγεία. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται η μελέτη δύο γεωμαγνητικών καταιγίδων με σκοπό την πρόβλεψη τους με μέθοδο που δεν έχει ξανά χρησιμοποιηθεί. Η πρώτη εκτυλίχθηκε στις 10 – 12 Μαΐου του 2024 και η δεύτερη στις 24 Ιουλίου του 2024. Αναλυτικότερα υλοποιήθηκε η καταγραφή χρονοσειρών από δέκτη GNSS, και συγκεκριμένα των τιμών της παράμετρος S4 (λόγος σήματος προς θόρυβο), και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του φυσικού χρόνου για την ανάλυση των σημάτων. Η μοντελοποίηση της πληροφορίας υλοποιήθηκε με επαναληπτικό κώδικα.

Λέξεις κλειδιά: Ήλιος, διάστημα, ηλιακές εκλάμψεις, εκτοξεύσεις στεμματικής μάζας, γεωμαγνητικές καταιγίδες, χρονοσειρές GNSS, μέθοδος του φυσικού χρόνου.

## **Abstract**

---

In the space and Earth environment there are various dynamic, i.e. changing, events, phenomena and systems. These changes, which are distinguished by their quantitative and qualitative processes, can be mild or strong. Such events are solar flares, coronal mass ejections and geomagnetic storms, which can reveal the causes, evolution and unknown mechanisms of the creation of various events. In addition, strong magnetic field disturbances and other phenomena occurring in interplanetary and space area have implications for space and Earth infrastructure, such as damage to satellites and disruptions to telecommunications, as well as for human health. In this paper, a study of two geomagnetic storms is carried out in order to predict them using a method that has not been used before. The first one unfolded on 10 - 12 May 2024 and the second one on 24 July 2024. More specifically the recording of time series from a GNSS receiver was implemented, specifically the values of the S4 parameter (signal-to-noise ratio), and the natural time method was used to analyse the signals. The information modelling was implemented with iterative code.

Key words: Sun, space, solar flares, coronal mass ejections, geomagnetic storms, GNSS time series, method of natural time.

## Περιεχόμενα

---

Πρόλογος .....	iii
Περίληψη .....	iv
Abstract .....	v
Συντμήσεις .....	viii
Κατάλογος εικόνων.....	ix
Κατάλογος σχημάτων .....	xi
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	
<b>Εισαγωγή</b> .....	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Σκοπός.....	1
1.3 Καινοτομία.....	1
1.4 Δομή.....	1
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	
<b>Ήλιος και γεωδιάστημα</b> .....	3
2.1 Ο Ήλιος.....	3
2.2 Ηλιακή δραστηριότητα .....	4
2.2.1 Ηλιακή και γήινη ακτινοβολία .....	4
2.2.2 Ηλιακή ατμόσφαιρα .....	5
2.3 Γεωμαγνητικό πεδίο.....	7
2.4 Γήινη μαγνητόσφαιρα.....	8
2.5 Ιονόσφαιρα.....	8
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	
<b>Γεωμαγνητικές καταιγίδες (geomagnetic storms)</b> .....	10
3.1 Ορισμός και απαιτούμενες συνθήκες εμφάνισης.....	10
3.2 Δείκτης Dst .....	11

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

<b>Διαστημικός καιρός</b>	14
4.1 Διαστημικός καιρός .....	14
4.2 Επιπτώσεις του διαστημικού καιρού .....	14
4.2.1 Επιπτώσεις του διαστημικού καιρού σε διαστημικές υποδομές .....	15
4.2.2 Επιπτώσεις του διαστημικού καιρού σε επίγειες τεχνολογικές υποδομές .....	15
4.2.3 Επιπτώσεις του διαστημικού καιρού στην ανθρώπινη υγεία .....	16
4.3 Τρόποι πρόβλεψης διαστημικών καιρικών φαινομένων .....	17
4.3.1 Επίγειοι σταθμοί και δέκτες παρατήρησης GNSS .....	17
4.3.2 Διαστημικές αποστολές .....	18
4.3.3 Φυσικά μοντέλα (physics-based) .....	19
4.3.4 Data-driven μοντέλα .....	20

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

<b>Περιγραφή δεδομένων και μέθοδος</b>	21
5.1 Γεωμαγνητικές καταγίδες μελέτης .....	21
5.2 Συλλογή δεδομένων .....	23
5.3 Μέθοδος .....	23
5.3.1 Αντιστροφή χρόνου .....	26
5.3.2 Διασπορά $k_1$ .....	27
5.3.3 Εντροπία $S$ .....	28

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

<b>Αποτελέσματα</b>	30
---------------------	----

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

<b>Συμπεράσματα - Προτάσεις</b>	33
<b>Βιβλιογραφία - Διαδικτυακές πηγές</b>	34

## Συντμήσεις

---

CMEs	Coronal Mass Ejections
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
ESA	European Space Agency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
HSSs	High Speed Streams
SEPs	Solar Energetic Particles
H/M	Ηλεκτρομαγνητική
MAGE	Multiscale Atmosphere-Geospace Environmen
Dst	Disturbance Storm Time
GIC	Geomagnetically Indiced Currents
GPS	Global Positioning System
LEO	Low Earth Orbit
Gy	Gray
GNSS	Global Navigation Satellite System
VLF	Very Low Frequency
VHF	Very High Frequency
TEC	Total Electron Content
SDO	Solar Dynamics Observatory
ONERA	Nationald'Etudes et de Recherches Aérospatiales
GREEN	Global Radiation Earth Environment
ML	Machine Learning
EUREF	European Reference Frame
eSWua	electronic Space Weather upper atmosphere
MATLAB	Matrix Laboratory

## Κατάλογος εικόνων

---

- Εικόνα 2.1: Η πρώτη φωτογραφία του Ήλιου με τη δαγκεροτυπία μέθοδο από τους Γάλλους φυσικούς Louis Fizeau και Lion Foucault το 1845. Retrieved from <https://sunearthday.nasa.gov/2006/locations/firstphoto.ph>..... 3
- Εικόνα 2.2: Απεικόνιση του Ήλιου από το διαστημικό σκάφος Solar Orbiter. Retrieved from [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Solar\\_Orbiter/Zooming\\_into\\_the\\_Sun\\_with\\_Solar\\_Orbiter](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/Zooming_into_the_Sun_with_Solar_Orbiter). ....4
- Εικόνα 2.3: Η δομή του Ήλιου. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2218-1997/7/11/440> .....5
- Εικόνα 2.4: Μία ηλιακή έκλαμψη όπως φαίνεται από τον δορυφόρο Solar Orbiter. Το μπλε και κόκκινο χρώμα φανερώνουν πηγές διαφορετικών τύπων ακτίνων X. Retrieved from [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/What\\_are\\_solar\\_flares](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/What_are_solar_flares)..... 6
- Εικόνα 2.5: CME που καταγράφηκε από το Ηλιακό και Ηλιοσφαιρικό Παρατηρητήριο (SOHO) στις 20 Απριλίου του 2013. Retrieved from <https://svs.gsfc.nasa.gov/11257> ..... 6
- Εικόνα 2.6: Απλό μοντέλου του γήινου μαγνητικού πεδίου. Retrieved from <https://www.nasa.gov/missions/icon/nasa-researchers-track-slowly-splitting-dent-in-earths-magnetic-field/i> ..... 7
- Εικόνα 3.1: Στιγμιότυπο, από την προσομοίωση MAGE, του χτυπήματος της μαγνητόσφαιρας από μία γεωμαγνητική καταιγίδα στις 3 Φεβρουαρίου του 2020. Retrieved from <https://svs.gsfc.nasa.gov/5214/> ..... 11
- Εικόνα 4.1: Διαστημικές καιρικές επιπτώσεις. Retrieved from <https://www.esa.int/esearch?q=space+weather>. .... 15
- Εικόνα 4.2: Γεωγραφική κατανομή των δικτύων GNSS σχεδόν σε πραγματικό χρόνο του EUREF Permanent GNSS Network. Retrieved from <https://www.epncb.oma.be/> ..... 18
- Εικόνα 4.3: Σημεία Lagrange. Retrieved from [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Vigil/Airbus\\_to\\_build\\_ESA\\_s\\_Vigil\\_space\\_weather\\_forecasting\\_mission](https://www.esa.int/Space_Safety/Vigil/Airbus_to_build_ESA_s_Vigil_space_weather_forecasting_mission) ..... 19

Εικόνα 5.1: Στιγμιότυπο στις 11 Μαΐου της γεωμαγνητικής καταιγίδας από Ηλιακό και Ηλιοσφαιρικό Παρατηρητήριο (SOHO). Retrieved from <a href="https://www.esa.int/Space_Safety/Space_weather/The_May_2024_solar_storm_your_questions_answered">https://www.esa.int/Space_Safety/Space_weather/The_May_2024_solar_storm_your_questions_answered</a> .....	21
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της χωρικής και χρονικής εξέλιξης της θερμόσφαιρας κατά τη διάρκεια της καταιγίδας στις 11 Μαΐου, από την αποστολή Global-scale Observations of the Limb and Disk (GOLD) της NASA. Retrieved from <a href="https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2024GL110506">https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2024GL110506</a> . ....	22
Εικόνα 5.3: Το όνομα και ο δέκτης του σταθμού GNSS. Retrieved from <a href="http://eskimo.ingv.it/ewphp/daily_data_gnss.php?st=cha0p">http://eskimo.ingv.it/ewphp/daily_data_gnss.php?st=cha0p</a> .....	22
Εικόνα 5.4: Η περιοχή του σταθμού GNSS. Retrieved from <a href="http://eskimo.ingv.it/ewphp/daily_data_gnss.php?st=cha0p">http://eskimo.ingv.it/ewphp/daily_data_gnss.php?st=cha0p</a> . ....	22
Εικόνα 5.5: Χρονοσειρά σεισμικών γεγονότων με διαφορετικό μέγεθος, σε συμβατικό και φυσικό χρόνο. Αυτό το παράδειγμα αναφέρεται στους πρώτους μικρούς σεισμούς που συνέβησαν μετά τη δραστηριότητα SES που καταγράφηκε στις 18 Απριλίου του 1995, και προηγήθηκε του βασικού σεισμού στις 13 Μαΐου 1995. Retrieved from <a href="http://physlab.phys.uoa.gr/org/pdf/d55.pdf">http://physlab.phys.uoa.gr/org/pdf/d55.pdf</a> .....	22

## Κατάλογος σχημάτων

---

Σχήμα 2.1: Η μαγνητόσφαιρα της Γης. Retrieved from <a href="https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-Earths-magnetosphere-the-region-of-space-dominated-by-the_fig6_261874512">https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-Earths-magnetosphere-the-region-of-space-dominated-by-the_fig6_261874512</a> .....	7
Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση μαγνητικής επανασύνδεσης. Retrieved from <a href="https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5516/23/00_master_document.pdf">https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5516/23/00_master_document.pdf</a> ....	10
Σχήμα 3.2: Παράδειγμα εξέλιξης του δείκτη Dst για μια γεωμαγνητική καταιγίδα και ο διαχωρισμός των φάσεων της. Retrieved from <a href="https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/11507/5/714-DAGLIS-space-physics.pdf">https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/11507/5/714-DAGLIS-space-physics.pdf</a> .....	12
Σχήμα 6.1: Αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν 120 ημέρες πριν την πρώτη καταιγίδα .....	30
Σχήμα 6.2 Αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν 120 ημέρες μετά την πρώτη καταιγίδα .....	31
Σχήμα 6.3: Αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν 120 ημέρες πριν τη δεύτερη καταιγίδα .....	31
Σχήμα 6.4: Αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν 120 ημέρες μετά τη δεύτερη καταιγίδα .....	32



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

---

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το κεντρικό πρόβλημα της εργασίας, ο σκοπός, η συνεισφορά, καθώς και το περιεχόμενο των κεφαλαίων.

### 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πρόγνωση δύο γεωμαγνητικών καταιγίδων με τη μέθοδο του φυσικού χρόνου.

### 1.2 Σκοπός

Η διερεύνηση και η επιτυχής πρόβλεψη των δύο γεωμαγνητικών καταιγίδων μελέτης με τη μέθοδο του φυσικού χρόνου χρησιμοποιώντας μετρήσεις από χρονοσειρές GNSS, και συγκεκριμένα τις τιμές της παραμέτρου S4 (λόγος σήματος προς θόρυβο), αποτελεί τον σκοπό της εργασίας.

### 1.3 Καινοτομία

Η μέθοδος του φυσικού χρόνου χρησιμοποιείται για πρώτη φορά με σκοπό την πρόβλεψη γεωμαγνητικών καταιγίδων, δηλαδή διαταραχών που επιφέρουν σημαντικές αλλαγές σε ένα δυναμικό σύστημα.

### 1.4 Δομή

Στο κεφάλαιο 2 επισημαίνεται η σημασία και η επίδραση της ηλιακής δραστηριότητας στο διαστημικό και γήινο περιβάλλον για τη διαμόρφωση των καιρικών και άλλων συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα αναφέρονται βασικά στοιχεία για τον Ήλιο και τα είδη ενέργειας που εκλύονται από αυτόν, καθώς και για τη σύσταση της γήινης ακτινοβολίας. Επίσης περιγράφονται η ανατομία του Ήλιου και της ηλιακής ατμόσφαιρας, αλλά και δύο εκρηκτικά φαινόμενα που συντελούνται στην τελευταία.

Στόχος του κεφαλαίου 3 είναι η κατανόηση κύριων περιοχών του γεωδιαστήματος και του μαγνητικού πεδίου της Γης, ώστε υπό καλύτερους όρους να γίνει αντιληπτή η γέννηση μίας γεωμαγνητικής καταιγίδας. Ειδικότερα αναλύονται οι περιοχές της μαγνητόσφαιρας και της ιονόσφαιρας, και γίνεται αναφορά στο πως δημιουργείται και ορίζεται το γήινο μαγνητικό πεδίο.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται στοιχειώδεις πληροφορίες για τις γεωμαγνητικές καταιγίδες: αναγκαία συνθήκη εμφάνισης, δείκτης έντασης Dst και στάδια των καταιγίδων.

Στο κεφάλαιο 5 υπογραμμίζεται η βαρύτητα του διαστημικού καιρού τόσο για τον διαστημικό χώρο όσο και για την Γη μέσα από το πρίσμα των επιπτώσεων του σε διαστημικές και επίγειες τεχνολογικές υποδομές, αλλά και στην ανθρώπινη υγεία. Επίσης αναλύονται τρόποι πρόβλεψης των διαστημικών καιρικών φαινομένων.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται εκτενής αναφορά στις γεωμαγνητικές καταιγίδες μελέτης, στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και στη μέθοδο ανάλυσης αυτών.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της πληροφορίας.

Στο κεφάλαιο 8 παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν με βάση τον σκοπό της εργασίας, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

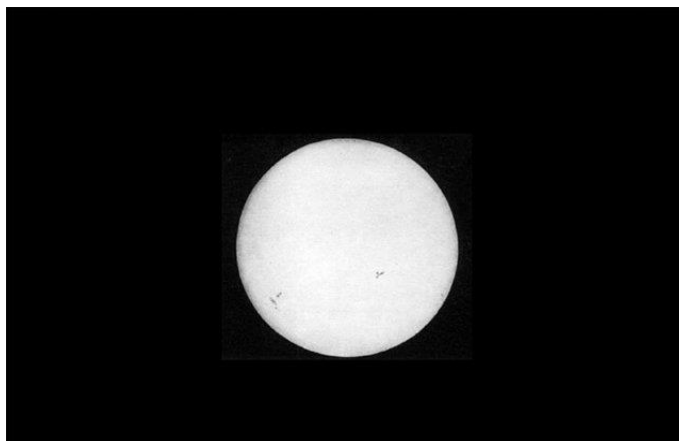
### Ήλιος και γεωδιάστημα

Ο Ήλιος είναι το πιο κοντινό άστρο στη Γη, το οποίο μελετάται συνεχώς από την επιστημονική κοινότητα. Η έρευνα για τη δομή και τη δραστηριότητα του βοηθούν στην κατανόηση των μορφών και της κίνησης της ύλης, του παρελθόντος και του παρόντος του σύμπαντος, καθώς και στην πρόβλεψη μελλοντικών μεταβολών και στην ανακάλυψη νέων φαινομένων στον διαστημικό χώρο. Επιπρόσθετα η ηλιακή δραστηριότητα επηρεάζει, εκτός των άλλων, και το γήινο περιβάλλον προκαλώντας διάφορα συμβάντα και φαινόμενα, όπως γεωμαγνητικές καταιγίδες (geomagnetic storms). Συγχρόνως δεν πρέπει να αγνοούμε τη σημασία που έχει για την εξέλιξη της ζωής στον πλανήτη μας ως η κύρια πηγή ενέργειας του.

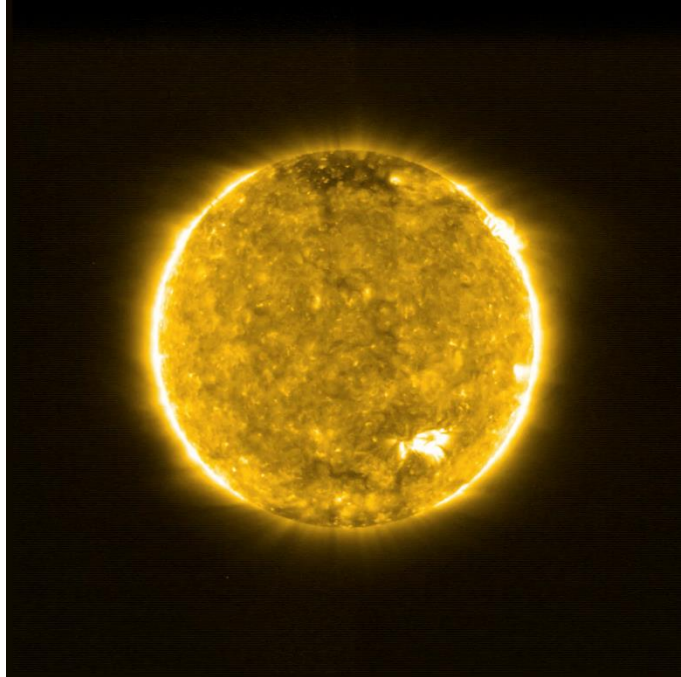
Επιπρόσθετα η ηλιακή δραστηριότητα, οι διάφοροι μηχανισμοί στο εσωτερικό του Ήλιου, καθώς και οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον πυρήνα της Γης προκαλούν μεταβολές στο γεωμαγνητικό πεδίο. Ο ηλιακός άνεμος σε συνδυασμό με τα συστήματα ρευμάτων στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας οδηγούν σε ακόμα πιο σύνθετες ποιοτικές και ποσοτικές αλλαγές του δυναμικού διαστημικού περιβάλλοντος και του γήινου μαγνητικού πεδίου.

#### 2.1 Ο Ήλιος

Ύστερα από μακροχρόνια θεωρητική και πειραματική – πρακτική επιστημονική έρευνα, ανακαλύφθηκε ότι ο Ήλιος συνίσταται από πλάσμα και αέρια, κυρίως υδρογόνο και ήλιο. Επίσης αποτελεί τον κεντρικό αστέρα του ηλιακού μας συστήματος, δηλαδή τα σώματα και τα αντικείμενα κινούνται σε τροχιά γύρω από αυτόν ή σε τροχιές γύρω από άλλα σώματα τα οποία περιφέρονται γύρω του. Η ουράνια αυτή σφαίρα, η οποία εκπέμπει φως και θερμότητα, βρίσκεται σε απόσταση περίπου 150 εκατομμυρίων χιλιομέτρων ή 1 αστρονομικής μονάδας από τη Γη, έχει φασματικό τύπο G2V της κύριας ακολουθίας<sup>1</sup>, και η μάζα της είναι περίπου το 99,8% της συνολικής μάζας του ηλιακού συστήματος [39]. Παράλληλα είναι η κύρια πηγή ενέργειας στο ηλιακό και γήινο περιβάλλον.



**Εικόνα 2.1:** Η πρώτη φωτογραφία του Ήλιου με τη δαγκεροτυπία μέθοδο από τους Γάλλους φυσικούς Louis Fizeau και Lion Foucault το 1845. Retrieved from



**Εικόνα 2.2:** Απεικόνιση του Ήλιου από τον δορυφόρο Solar Orbiter. Retrieved from [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Solar\\_Orbiter/Zooming\\_into\\_the\\_Sun\\_with\\_Solar\\_Orbiter](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/Zooming_into_the_Sun_with_Solar_Orbiter)

<sup>1</sup> Ο φασματικός τύπος του αστέρα αποτελεί βασική παράμετρο για τον καθορισμό της λεγόμενης κατοικήσιμης ζώνης (habitable zone), δηλαδή μιας δακτυλιοειδούς περιοχής γύρω από τον αστέρα εντός της οποίας ένας στερεός πλανήτης μπορεί να διατηρήσει νερό σε υγρή μορφή στην επιφάνειά του, και επομένως έχει πιθανότητες να φιλοξενεί ζωή. Η έκταση και τα όρια της κατοικήσιμης ζώνης εξαρτώνται από τη φωτεινότητα του αστέρα. Όσο φωτεινότερος είναι, τόσο πιο μακριά από αυτόν βρίσκεται η κατοικήσιμη ζώνη [39].

## 2.2 Ηλιακή δραστηριότητα

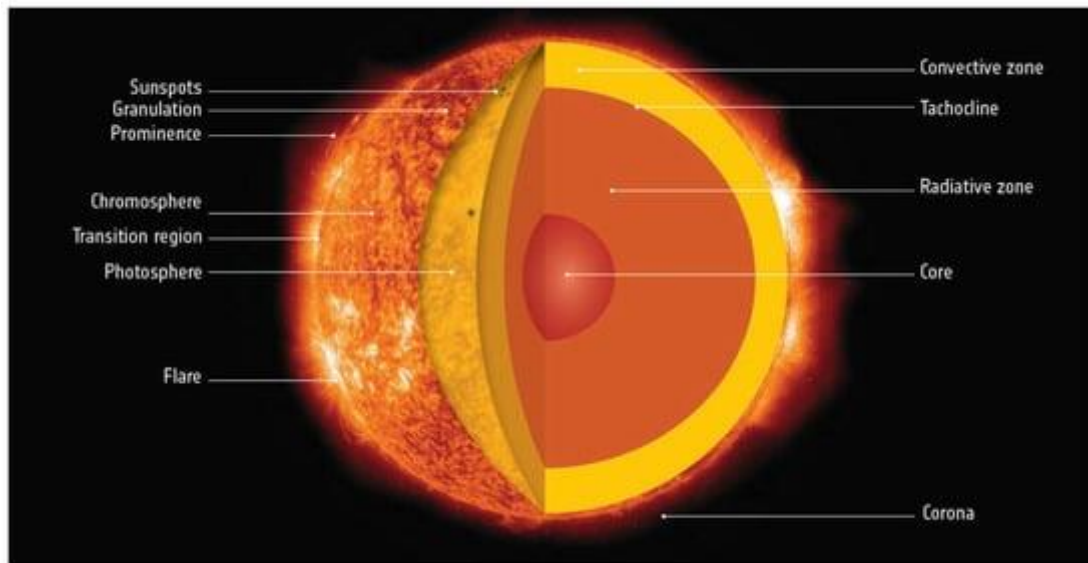
### 2.2.1 Ηλιακή και γήινη ακτινοβολία

Η μεγάλη θερμοκρασία του ηλιακού πυρήνα επιτρέπει να συντελούνται στο εσωτερικό του Ήλιου αντιδράσεις θερμοπυρηνικής σύντηξης που μετατρέπουν το υδρογόνο σε ήλιο. Η ενέργεια που εκλύεται μεταφέρεται στον διαπλανητικό χώρο, είτε με ακτινοβολία είτε με ρεύματα μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται μέσω του διαστημικού περιβάλλοντος ως ηλεκτρομαγνητική και σωματιδιακή κινητική ενέργεια.

Σχετικά με την ακτινοβολία που φτάνει στην Γη η ατμόσφαιρα απορροφά πλήρως την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της σωματιδιακής ηλιακής ενέργειας, η οποία αφορά τον ηλιακό άνεμο που συνίσταται από φορτισμένα ενεργητικά σωματίδια ηλεκτρονίων, πρωτονίων και πυρήνων ηλίου, δεν φτάνει ποτέ στην ατμόσφαιρα λόγω της αποτρεπτικής δράσης της γήινης μαγνητόσφαιρας [34].

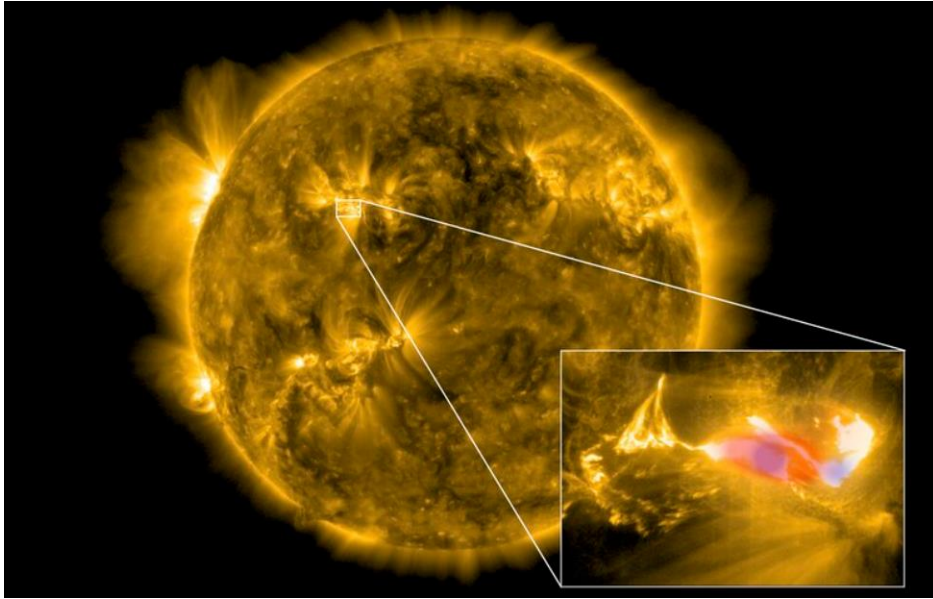
### 2.2.2 Ηλιακή ατμόσφαιρα

Ο Ήλιος περιβάλλεται από ένα ορατό φλοιό πάχους μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων που ονομάζεται φωτόσφαιρα. Ειδικότερα στην περιοχή αυτή παρατηρούνται οι διάφοροι σχηματισμοί, όπως οι ενεργές περιοχές (active regions), οι ηλιακές κηλίδες (sunspots), οι κυψέλες μεταφοράς (convective cells), και άλλοι. Πάνω από το στρώμα αυτό βρίσκεται η ηλιακή ατμόσφαιρα, η οποία αποτελείται από τρεις περιοχές: τη χρωμόσφαιρα, τη μεταβατική περιοχή και το στέμμα, το οποίο είναι και εκείνο το κομμάτι της ηλιακής ατμόσφαιρας που είναι δυνατό να παρατηρήσουμε κατά τη διάρκεια μιας ολικής έκλειψης [34, 35].



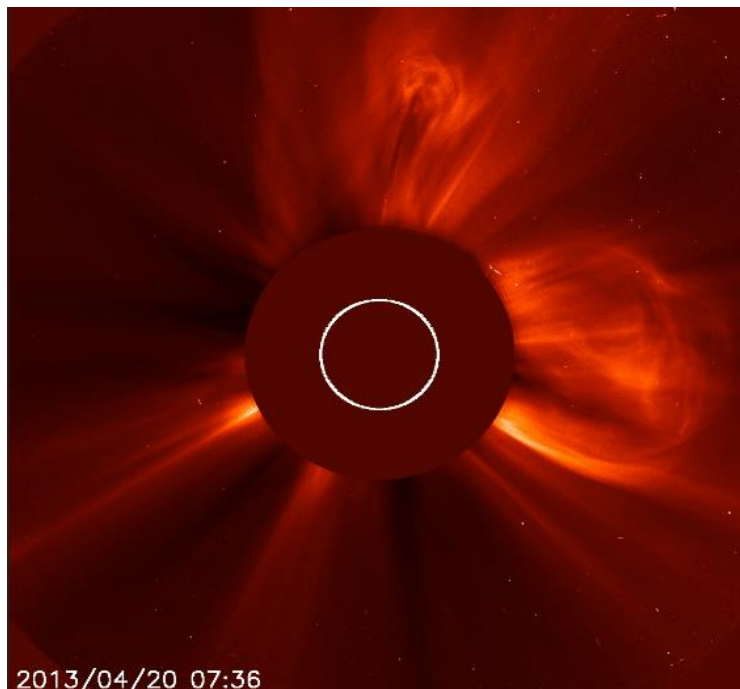
**Εικόνα 2.3:** Η δομή του Ήλιου. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2218-1997/7/11/440>

Αναλυτικότερα στην ηλιακή ατμόσφαιρα συντελούνται εκρηκτικά φαινόμενα (ενεργός Ήλιος), όπως οι ηλιακές εκλάμψεις (solar flares) και οι εκτοξεύσεις στεμματικής μάζας (CMEs). Οι πρώτες είναι εκρήξεις μικροσκοπικών σωματιδίων όπως ιόντων και σωματιδίων σκόνης, πρωτονίων και ηλεκτρονίων, αλλά και βαρύτερων σωματιδίων, κατά τις οποίες η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπέμπεται στο διάστημα ως ραδιοκύματα, ορατό φως, υπεριώδης ακτινοβολία και ακτίνες X, και επιφέρουν αλλαγή του μαγνητικού πεδίου της περιοχής που εκτυλίσσονται. Επίσης η εμφάνιση τους συνδέεται συχνά με ηλιακές κηλίδες (sunspots).



**Εικόνα 2.4:** Μία ηλιακή έκλαμψη όπως φαίνεται από τον δορυφόρο Solar Orbiter. Το μπλε και κόκκινο χρώμα φανερώνουν πηγές διαφορετικών τύπων ακτίνων X. Retrieved from [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/What\\_are\\_solar\\_flares](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/What_are_solar_flares)

Αντίθετα, στις εκτοξεύσεις στεμματικής μάζας (CMEs) πραγματοποιείται διάδοση τεράστιας ποσότητας πλάσματος από το στέμμα, η οποία συνοδεύεται από το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από αυτό.



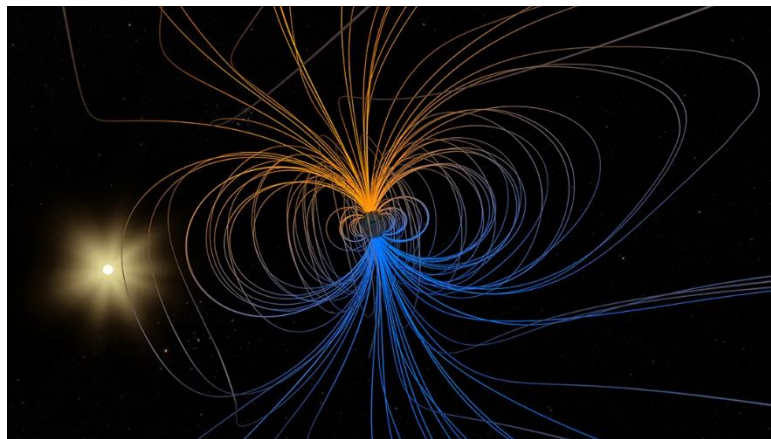
**Εικόνα 2.5:** CME που καταγράφηκε από το Ηλιακό και Ηλιοσφαιρικό Παρατηρητήριο (SOHO) στις 20 Απριλίου του 2013. Retrieved from <https://svs.gsfc.nasa.gov/11257/>

Αν μία ή περισσότερες εκτοξεύσεις στεμματικής μάζας (CMEs), καθώς και άλλα συμβάντα που χαρακτηρίζονται από ισχυρά ρεύματα ηλιακού ανέμου όπως οι ηλιακές ροές υψηλής ταχύτητας (HSSs), αλληλοεπιδράσουν με το γήινο μαγνητικό πεδίο και συγκεκριμένα με την περιοχή της μαγνητόσφαιρας, είναι δυνατό να προκαλέσουν γεωμαγνητικές καταιγίδες. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις συγκεκριμένες καταιγίδες, για τις οποίες παρουσιάζονται πληροφορίες στο κεφάλαιο 3.

Είναι κατανοητό ότι πρόκειται για γεγονότα που είναι δυνατό να προκαλέσουν σημαντικές μεταβολές αλλά και σοβαρές επιπτώσεις στον διαστημικό χώρο και στη Γη. Για να κατανοηθούν και να προβλεφθούν είναι ανάγκη να μελετηθούν, εκτός από τις φυσικές και άλλες διεργασίες στο διαπλανητικό περιβάλλον, οι μηχανισμοί και τα φαινόμενα στην περιοχή του διαστήματος γύρω από τον πλανήτη μας.

### 2.3 Γεωμαγνητικό πεδίο

Στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από το ενδογενές μαγνητικό πεδίο της Γης και από πεδία που αναπτύσσονται στο κοντινό διαστημικό περιβάλλον. Λόγω του ότι ο ηλιακός άνεμος επεμβαίνει στο γήινο μαγνητικό πεδίο και παραμορφώνει τη μαγνητόσφαιρα, το μαγνητικό πεδίο της Γης δεν είναι διπολικό. Η μαγνητόσφαιρα συμπιέζεται στην προσήλια πλευρά εξαιτίας της μεγάλης πίεσης που ασκεί ο ηλιακός άνεμος, ενώ στην αφήλια πλευρά αποκτά ένα μακρόστενο σχήμα (μαγνητική ουρά) που εκτείνεται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τη Γη<sup>2</sup>. Σε μικρές αποστάσεις από τον πλανήτη μας, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως δίπολο με άξονα συμμετρίας που δεν συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής της Γης και με κέντρο μετατοπισμένο ως προς το κέντρο του πλανήτη μας [35]. Σημειώνεται ότι η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου που επάγεται από τον Ήλιο αλλάζει περίπου κάθε 11 χρόνια. Ωστόσο σύνθετα φαινόμενα που πραγματοποιούνται στο διαστημικό περιβάλλον έχουν ως αποτέλεσμα τη διάδοση μαγνητικού πεδίου στην μαγνητόσφαιρα που μεταβάλλεται σε μικρότερο χρόνο.

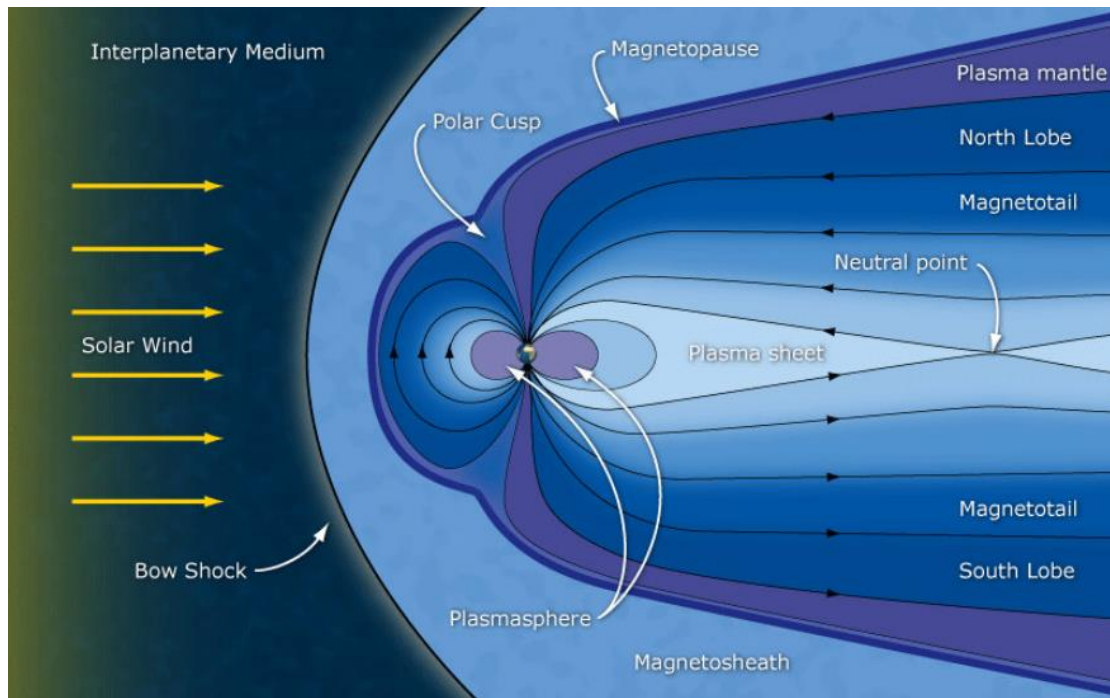


**Εικόνα 2.6:** Απλό μοντέλο του γήινου μαγνητικού πεδίου.  
Retrieved from <https://www.nasa.gov/missions/icon/nasa-researchers-track-slowly-splitting-dent-in-earths-magnetic-field/>

<sup>2</sup> Η προσήλια πλευρά είναι η πλευρά της Γης που βρίσκεται πιο κοντά στον Ήλιο, ενώ η αφήλια πλευρά βρίσκεται πιο μακριά.

## 2.4 Γήινη μαγνητόσφαιρα

Η αλληλεπίδραση του ηλιακού ανέμου και του γήινου μαγνητικού πεδίου σχηματίζει το δυναμικό σύστημα της μαγνητόσφαιρας, το οποίο διαχωρίζεται από τον υπόλοιπο διαστημικό χώρο με την περιοχή της μαγνητόπαυσης, και περιέχει σωματίδια και διάφορα σωματίδια που προέρχονται από τον ηλιακό άνεμο, από ηλιακά ενεργειακά σωματίδια (SEPs) και γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες, καθώς και από την περιοχή της ιονόσφαιρας. Εφόσον σχηματίζεται στον ηλιακό άνεμο από το μαγνητικό πεδίο του πλανήτη μας, στην περιοχή κυριαρχεί το γήινο μαγνητικό πεδίο. Το σύστημα της μαγνητόσφαιρας υφίστανται ποικίλες αλλαγές, οι οποίες μπορεί να είναι ήπιες αλλά και ισχυρές, προκαλώντας διάφορες επιπτώσεις στο γήινο μαγνητικό πεδίο αλλά και στο ιονοσφαιρικό και επίγειο περιβάλλον.



**Σχήμα 2.1:** Η μαγνητόσφαιρα της Γης. Retrieved from [https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-Earths-magnetosphere-the-region-of-space-dominated-by-the\\_fig6\\_261874512](https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-Earths-magnetosphere-the-region-of-space-dominated-by-the_fig6_261874512)

## 2.5 Ιονόσφαιρα

Η ιονόσφαιρα εντοπίζεται περίπου σε ύψος 70 km από την επιφάνεια της Γης και διαχωρίζει την μαγνητόσφαιρα από την ατμόσφαιρα. Η δημιουργία της οφείλεται στην σύζευξη της ηλιακής H/M ακτινοβολίας και της ατμοσφαιρικής δραστηριότητας. Πιο συγκεκριμένα η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία και οι ακτίνες X απορροφώνται εξ ολοκλήρου στην ανώτερη ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να αποτελούν κύριες πηγές



ιονισμού των αερίων συστατικών της. Επίσης η προσπίπτουσα σωματιδιακή ακτινοβολία, όπως φορτισμένα σωματίδια που προέρχονται από έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα, προκαλεί ionισμό. Το σύνολο των διεργασιών στην περιοχή της ιονόσφαιρας εξαρτάται από το ύψος με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαδοχικών ιονοσφαιρικών στρωμάτων ή περιοχών που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες ιδιότητες. Τα στρώματα αυτά είναι τα D, E, και F. Η περιοχή D εκτείνεται από περίπου 70 μέχρι 90 km, η περιοχή E από περίπου 90 μέχρι 150 km, ενώ το μέγιστο της περιοχής F -η οποία περιλαμβάνει τις περιοχές F1 και F2- βρίσκεται περίπου μεταξύ 250 και 350 km. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι περιοχές D και E δεν διακρίνονται εμφανώς την νύχτα [34, 40].

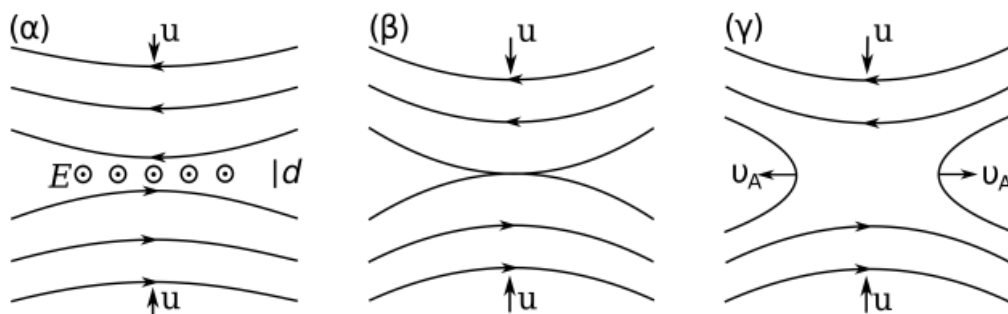
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Γεωμαγνητικές καταιγίδες (geomagnetic storms)

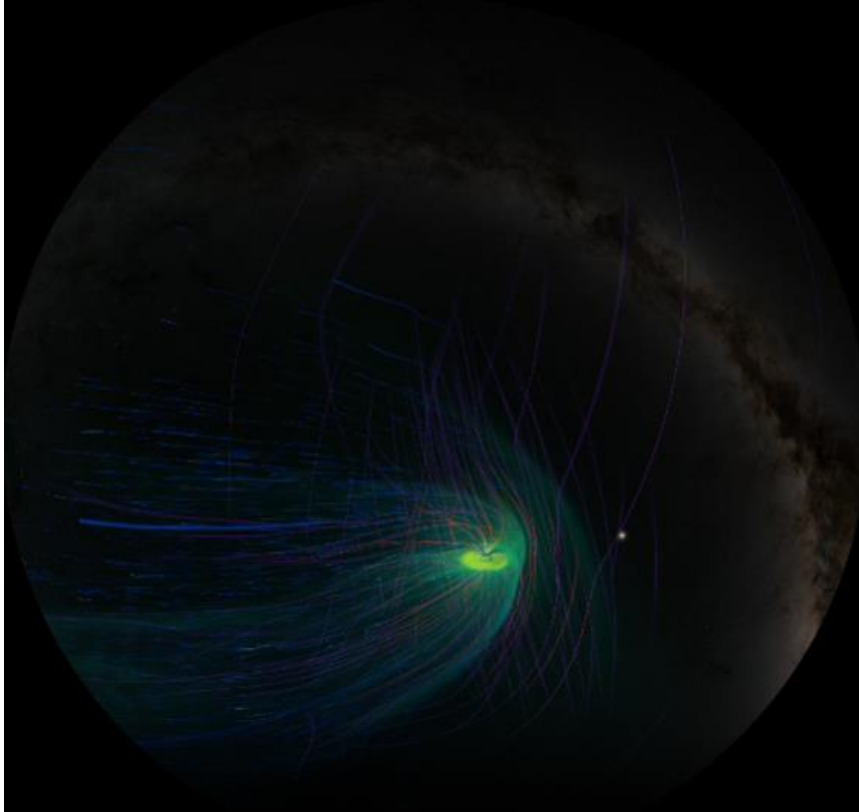
Επίγειες αλλά και δορυφορικές παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν συνεχώς ότι τα φαινόμενα και γεγονότα του διαστημικού περιβάλλοντος, τα οποία γεννούν μεταβολές στα μαγνητικά πεδία και διαφέρουν χωρικά και χρονικά, διαδίδονται στο εσωτερικό της γήινης μαγνητόσφαιρας. Το βάθος μέχρι το οποίο παρατηρούνται διαταραχές του μαγνητικού πεδίου της Γης εξαρτάται κυρίως από τον προσανατολισμό του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που όταν είναι νότιος επιτρέπει την επανασύνδεση των δύο μαγνητικών πεδίων και οδηγεί σε μεταφορά μαγνητικής ενέργειας μέσω του ηλιακού ανέμου στη γήινη μαγνητόσφαιρα.

#### 3.1 Ορισμός και απαιτούμενες συνθήκες εμφάνισης

Η γεωμαγνητική καταιγίδα (geomagnetic storm) ορίζεται ως μία διαταραχή που διαρκεί από μερικές ώρες έως και μερικές μέρες. Για να είναι εφικτή η εμφάνιση της πρέπει η κατακόρυφη συνιστώσα ( $z$ ) του μαγνητικού πεδίου του ηλιακού ανέμου να έχει νότιο προσανατολισμό για πολλές ώρες. Με τον τρόπο επιτυγχάνεται η μαγνητική επανασύνδεση στην προσήλια μαγνητόπαυση, δηλαδή μαγνητικές δυναμικές γραμμές αντίθετης φοράς αναδιατάσσονται και διευκολύνεται η έκλυση μεγάλων ποσών ενέργειας (σχήμα 3.2).



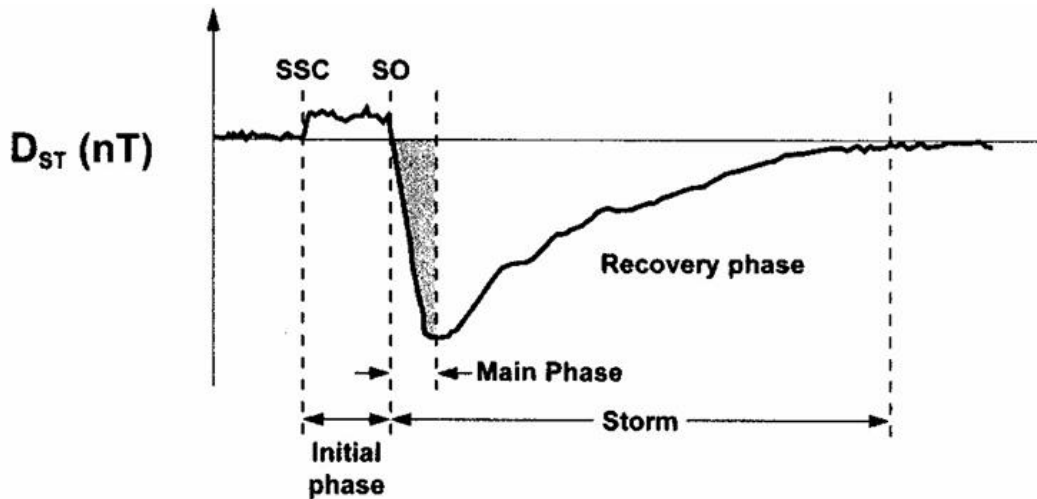
**Σχήμα 3.1:** Αναπαράσταση μαγνητικής επανασύνδεσης. Retrieved from [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5516/23/00\\_master\\_document.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5516/23/00_master_document.pdf)



**Εικόνα 3.1:** Στιγμιότυπο, από την προσομοίωση MAGE, του χτυπήματος της μαγνητόσφαιρας από μία γεωμαγνητική καταιγίδα στις 3 Φεβρουαρίου του 2020. Retrieved from <https://svs.gsfc.nasa.gov/5214/>

### 3.2 Δείκτης Dst

Η συχνότητα των γεωμαγνητικών καταιγίδων (geomagnetic storms) εξαρτάται από τη φάση του ηλιακού κύκλου και η ένταση τους εκτιμάται μέσω γεωμαγνητικών δεικτών (geomagnetic indices), οι οποίοι υπολογίζονται από τις διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου της Γης που μετρούνται από επίγειους σταθμούς μαγνητόμετρων. Ένας από τους πιο χαρακτηριστικούς δείκτες για την εκτίμηση μίας μαγνητικής καταιγίδας είναι ο δείκτης Dst (Disturbance Storm Time index), ο οποίος είναι ένας ωριαίος δείκτης με τον οποίο υπολογίζεται η μεταβολή της οριζόντιας (x-y) συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου. Από φυσικής άποψης σχετίζεται άμεσα με τις μεταβολές του δακτυλιοειδούς ρεύματος και αυτός είναι ο λόγος που για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούνται τέσσερα γεωμαγνητικά παρατηρητήρια (Hermanus - S. Africa, Kakioka - Japan, Honolulu - Hawaii, San Juan - Puerto Rico). Με βάση τη χρονική εξέλιξη του δείκτη Dst μία καταιγίδα χωρίζεται σε τρεις φάσεις (σχήμα 3.3) [35]:



**Σχήμα 3.2:** Παράδειγμα εξέλιξης του δείκτη Dst για μια γεωμαγνητική καταιγίδα και ο διαχωρισμός των φάσεων της. Retrieved from <https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/11507/5/714-DAGLIS-space-physics.pdf>

I. *Αιφνίδια έναρξη καταιγίδας ή αρχική φάση (storm sudden commencement)*

Κατά την πρώτη φάση εξαιτίας της μαγνητικής επανασύνδεσης στην προσήλια μαγνητόπαυση, παρατηρείται αύξηση της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης, η οποία αποτυπώνεται και ως αύξηση της τιμής του δείκτη Dst. Παράλληλα, και λόγω της επανασύνδεσης, δημιουργούνται υποκαταιγίδες οι οποίες διαχέουν φορτισμένα σωματίδια στην μαγνητόσφαιρα [35].

I. *Κύρια φάση (mainphase)*

Η κύρια φάση αρχίζει με την διάδοση των σωματιδίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια τους τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ενίσχυση του δακτυλοειδούς ρεύματος, του οποίου το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο θα δημιουργήσει μείωση της οριζόντιας συνιστώσας, η οποία απεικονίζεται και ως μείωση του δείκτη Dst. Το τέλος της κύριας φάσης συμπίπτει με το τέλος της διαδικασίας της διάδοσης σωματιδίων που ταυτίζεται με την ελάχιστη τιμή της οριζόντιας συνιστώσας και άρα και του δείκτη Dst [35].

II. *Φάση ανάκαμψης (recovery phase)*

Η έναρξη της τελευταίας φάσης σηματοδοτείται από τον τερματισμό της επανασύνδεσης και της διάδοσης των σωματιδίων. Η διαδικασία αυτή είναι συνήθως αργή (έως και αρκετές μέρες), διότι για την επαναφορά του ρεύματος είναι απαραίτητη η αφαίρεση των σωματιδίων με υψηλή ενέργεια. Αυτή η σταδιακή αφαίρεση αποτυπώνεται και ως αύξηση της τιμής του Dst [35].

Η ελάχιστη τιμή που λαμβάνει ο δείκτης Dst είναι μια ποιοτική προσέγγιση της ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στο σύστημα και χρησιμοποιείται ως κλίμακα για τον χαρακτηρισμό της έντασης μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας. Μια γενική κατηγοριοποίηση της ισχύος των μαγνητικών καταιγίδων είναι η εξής: ασθενούς

ισχύος για  $-50 < Dstmin < -30$  nT, μεσαίας ισχύος για  $-100 < Dstmin < -50$ nT και μεγάλης ισχύος για  $Dstmin < -100$ nT [35].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Διαστημικός καιρός

---

Η επιστημονική έρευνα για τον διαστημικό καιρό είναι αναγκαία για τη μελέτη, την κατανόηση, και την ανακάλυψη νέων φαινομένων που αφορούν τόσο το διαστημικό περιβάλλον όσο και το επίγειο. Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στο διάστημα είναι ο προάγγελος για αυτές που μπορεί να εμφανιστούν στη Γη και στην ατμόσφαιρα της. Οι κίνδυνοι και οι επιπτώσεις του διαστημικού καιρού αναλύονται στην ενότητα 4.2.

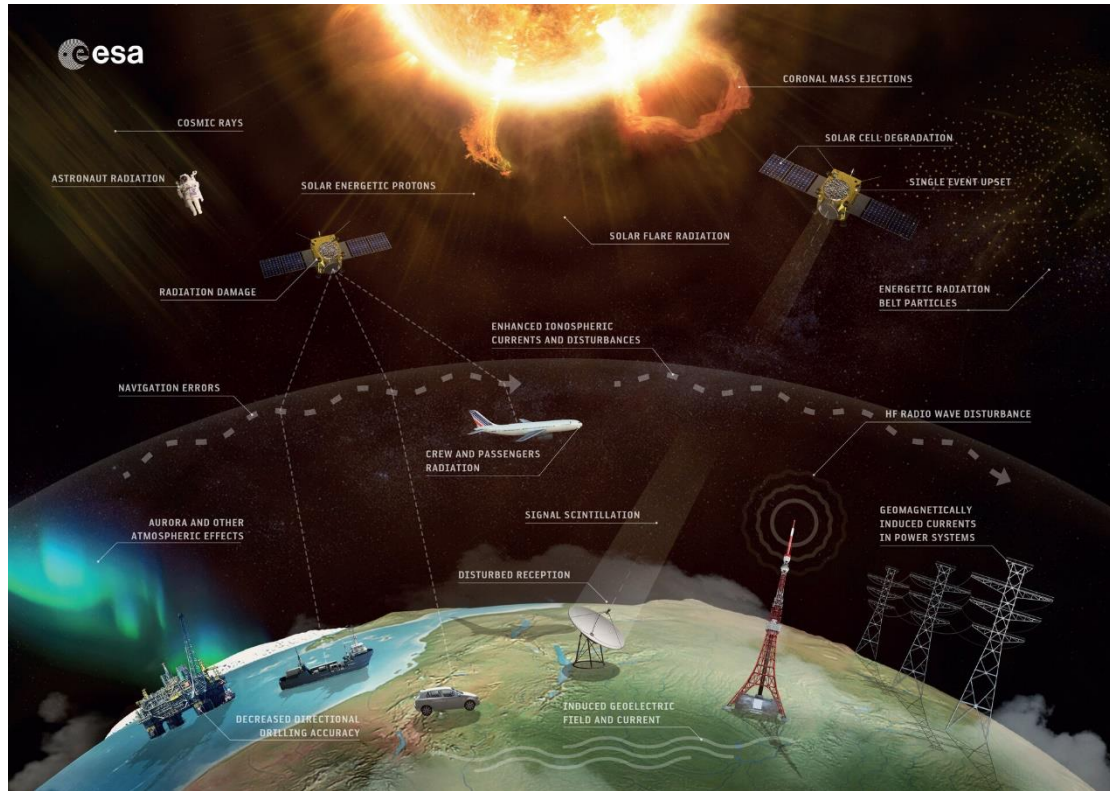
#### 4.1 Διαστημικός καιρός

Από τα μέσα περίπου του 19ου αιώνα χρησιμοποιούνταν ορολογίες όπως «ηλιακή μετεωρολογία», «μαγνητικός καιρός», και «κοσμική μετεωρολογία» για να περιγραφούν συμβάντα, καταστάσεις, και φαινόμενα που σχετίζονταν με τον καιρό στο διάστημα. Οι μελέτες διαφόρων επιστημόνων για τις ηλιακές κηλίδες και την ηλιακή δραστηριότητα, το μαγνητικό πεδίο, και τις διαταραχές του, καθώς και για τα αίτια του σέλας, ήταν οι πρώτες που βοήθησαν στην κατανόηση των διαφόρων συνθηκών. Στην πορεία συλλογής δεδομένων, μέσα από την ανάπτυξη της θεωρητικής και πειραματικής γνώσης, και στον βαθμό που οι επιστήμες αποκτούσαν αυτοτέλεια και πραγματοποιούνταν η μετάβαση από το γενικό στο ειδικό, εμφανίστηκε η ανάγκη εύρεσης ενός νέου όρου που να καλύπτει το σύνολο των παρατηρούμενων γεγονότων. Συνεπώς ο όρος «διαστημικός καιρός» γεννήθηκε ως αποτέλεσμα της κοινωνικής και επιστημονικής εξέλιξης και άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως τη δεκαετία του 1990, με την πρώτη εμφάνιση του να είναι το 1957.

Σήμερα αναφέρεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες στο περιβάλλον του διαστήματος, όπως σε εκείνες που επικρατούν στον Ήλιο, στο διαπλανητικό μέσο και στο σύστημα μαγνητόσφαιρας-ιονόσφαιρας [22].

#### 4.2 Επιπτώσεις του διαστημικού καιρού

Είναι πολλοί οι τομείς που είναι δυνατό να επηρεαστούν από τις διαστημικές καιρικές συνθήκες. Ειδικότερα από τη σωματιδιακή ακτινοβολία και συγκεκριμένα από ζώνες ακτινοβολίας, κοσμικές ακτίνες, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και άλλα, μπορεί να προκληθούν βλάβες στους δορυφόρους και σε διαστημικά και επίγεια τεχνολογικά συστήματα. Επίσης η αυξημένη ακτινοβολία που δέχονται οι αστροναύτες στις διαστημικές αποστολές ή τα πληρώματα αεροπλάνων που ταξιδεύουν σε πολύ μεγάλα υψόμετρα επιφέρει πολλαπλούς κινδύνους για την υγεία τους.



Εικόνα 4.1: Διαστημικές καιρικές επιπτώσεις. Retrieved from <https://www.esa.int/eseach?q=space+weather>

#### 4.2.1 Επιπτώσεις του διαστημικού καιρού σε διαστημικές υποδομές

Κάποιες από τις συνέπειες του διαστημικού καιρού στις διαστημικές τεχνολογικές υποδομές είναι οι βλάβες στους δορυφόρους, όπως η δυσλειτουργία των ηλιακών τους πάνελ και οι αλλοιώσεις των σημάτων τους. Επίσης η ηλιακή δραστηριότητα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή τροχιάς κάποιων δορυφόρων ή ακόμα και το θάνατο τους. Ακόμα λόγω ανωμαλιών στην ιονόσφαιρα η επικοινωνία μεταξύ επίγειων σταθμών και δορυφόρων μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα ή και να διακοπεί.

Επιπρόσθετα τα συμβάντα με ισχυρό γεωμαγνητικό πεδίο, όπως οι γεωμαγνητικές καταιγίδες, είναι πιθανό να προκαλέσουν βλάβες σε διάφορα ηλεκτρονικά συστήματα των διαστημικών σκαφών, όπως στα συστήματα ελέγχου και στα συστήματα πλοήγησης τους.

#### 4.2.2 Επιπτώσεις του διαστημικού καιρού σε επίγειες τεχνολογικές υποδομές

Οι γεωμαγνητικές διαταραχές είναι δυνατό να προκαλέσουν ισχυρά ρεύματα, όπως τα γεωμαγνητικώς επαγόμενα ρεύματα (GICs). Τα GICs ρέουν σε μεγάλους αγωγούς, όπως δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου, καλώδια τηλεπικοινωνιών και σιδηροδρομικά συστήματα [35]. Συνεπώς είναι δυνατό να προκαλέσουν φθορές στα παραπάνω, διακοπές ρεύματος, και διαταραχές στις ραδιοεπικοινωνίες και στα συστήματα GPS. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η

γεωμαγνητική καταιγίδα στις 13 Μαρτίου του 1989, η οποία προκάλεσε πολύωρη διακοπή ρεύματος στην πόλη Κεμπέκ του Καναδά.

#### 4.2.3 Επιπτώσεις του διαστημικού καιρού στην ανθρώπινη υγεία

Στις υποενότητες 4.2.1 και 4.2.2 περιγράφηκαν οι συνέπειες του διαστημικού καιρού στις διαστημικές και επίγειες υποδομές. Εκτός αυτών, η σωματιδιακή ακτινοβολία επηρεάζει αρνητικά την υγεία των πληρωμάτων των διαστημικών αποστολών και αεροπλάνων κυρίως σε μεγάλες πτήσεις που περνούν κοντά από τους πόλους της Γης<sup>3</sup>, καθώς και γενικά την ανθρώπινη υγεία.

Όσο αφορά τους αστροναύτες, ανάλογα με τη δόση ακτινοβολίας που παίρνουν είναι δυνατό να εμφανίσουν δερματικές παθήσεις, καρκίνο, καθώς και μη αναστρέψιμες βλάβες που οδηγούν στο θάνατο. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αποστολές εκτός της τροχιάς LEO η δόση της ακτινοβολίας μέσα σε ένα διαστημόπλοιο μπορεί να φτάσει τα 100 m Gy/h<sup>4</sup> και κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων εκτός διαστημικού σκάφους είναι δυνατό να αγγίξει τα 500 m Gy/h [35].

Σχετικά με τις συνέπειες στη υγεία των ανθρώπων στη Γη, αρκετές έρευνες, εκ των οποίων μία είναι ελληνική, υποδηλώνουν ότι τα καιρικά φαινόμενα του διαστήματος μπορεί να σχετίζονται με τη μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού. Πιο συγκεκριμένα ο καρδιακός ρυθμός επηρεάζεται είτε από διακυμάνσεις της έντασης των κοσμικών ακτίνων είτε από τη γεωμαγνητική δραστηριότητα [4]. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω έρευνα, με περισσότερα στοιχεία και σε περισσότερες χώρες, ώστε η επιστημονική κοινότητα να αποφανθεί για τις συνέπειες του διαστημικού καιρού στον ανθρώπινο οργανισμό και ειδικά για την επίδραση των γεωμαγνητικών γεγονότων.

<sup>3</sup> Το γήινο μαγνητικό πεδίο κοντά στους πόλους είναι ασθενέστερο και τα φορτισμένα σωματίδια που προέρχονται από το διαπλανητικό μέσο μπορούν να εισέλθουν ευκολότερα.

<sup>4</sup> Το Gray (Gy) είναι μονάδα μέτρησης της δόσης ακτινοβολίας και αντιπροσωπεύει την ποσότητα που η ακτινοβολία οποιουδήποτε είδους εναποθέτει ενέργεια 1 Joule ανά kg υλικού [35].



### 4.3 Τρόποι πρόβλεψης διαστημικών καιρικών φαινομένων

Η πρόβλεψη του διαστημικού καιρού είναι μία πολύ δύσκολη διαδικασία, καθώς οι επιστήμονες καλούνται να μελετούν και να επεξεργάζονται δεδομένα από ένα πολύπλοκο σύστημα το οποίο υφίστανται συνεχείς μεταβολές. Στην πρόγνωση μπορεί να συμμετέχουν γεωμαγνητικά παρατηρητήρια, ιονοσφαιρικά ραντάρ, επίγειοι σταθμοί και δέκτες παρατήρησης GNSS, σταθμοί παρατήρησης με συμβολόμετρα Fabry–Perot και με δέκτες πολύ υψηλής συχνότητας (VHF) και πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF), και άλλα. Επίσης χωρίς τις διαστημικές αποστολές θα ήμασταν πολλά βήματα πίσω από το επιστημονικό έργο και την εξελικτική πορεία σχετικά με την μελέτη των διαστημικών καιρικών συνθηκών.

Όλα τα δεδομένα και η ληφθείσα πληροφορία είναι αναγκαίο να μοντελοποιηθούν για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της πρόγνωσης. Υπάρχουν πολλά μοντέλα, τα οποία ταξινομούνται στις παρακάτω δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Φυσικά μοντέλα (physics-based)
- Data-driven μοντέλα

#### 4.3.1 Επίγειοι σταθμοί και δέκτες παρατήρησης GNSS

Οι σταθμοί και δέκτες GNSS αποτελούν αναπόσπαστο εργαλείο για την μελέτη πολλών τομέων στο περιβάλλον της Γης που έχουν αντίκτυπο στην καθημερινή μας ζωή αλλά και για την παρακολούθηση του διαστημικού καιρού. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ναυσιπλοΐας, γεωδαισίας και γεωργίας, για την παρακολούθηση της κίνησης των τεκτονικών πλακών, για την μελέτη των αλλαγών της στάθμης της θάλασσας, και για αρκετά άλλα.

Σχετικά με τη συνεισφορά τους στην παρακολούθηση του διαστημικού καιρού, μια βασική τους λειτουργία είναι η παρακολούθηση της ιονόσφαιρας, οι μεταβολές της οποίας μαρτυρούν φαινόμενα και συμβάντα του διαστημικού καιρού. Οι δέκτες GNSS μπορούν να μετρήσουν την ολική περιεκτικότητα ηλεκτρονίων (TEC) της ιονόσφαιρας, με αποτέλεσμα την επίτευξη της συνεχούς παρακολούθησης της. Επίσης προσφέρουν σημαντικά αποτελέσματα συνολικά στην ανίχνευση σημάτων που έχουν υποστεί διαταραχές λόγω έντονης μαγνητικής δραστηριότητας, καθώς και εξαιτίας άλλων διαστημικών φαινομένων και γεγονότων. Παράλληλα οι επίγειοι σταθμοί παρακολουθούν συνεχώς τους δορυφόρους GNSS καταγράφοντας τα σήματα που λαμβάνουν. Όλα τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να εισαχθούν στα μοντέλα πρόβλεψης βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό τα αποτελέσματα.



**Εικόνα 4.2:** Γεωγραφική κατανομή των δικτύων GNSS σχεδόν σε πραγματικό χρόνο του EUREF Permanent GNSS Network. Retrieved from <https://www.epncb.oma.be/>

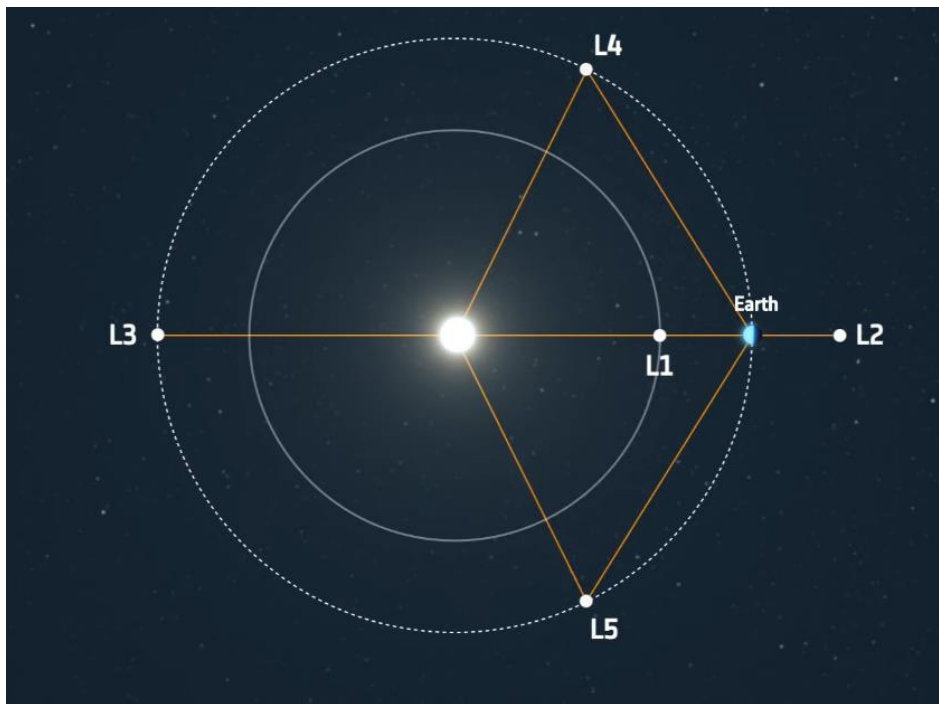
#### 4.3.2 Διαστημικές αποστολές

Δεν είναι λίγες οι αποστολές για την παρακολούθηση της ηλιακής δραστηριότητας και την πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών. Σημειώνεται ότι για την παρατήρηση του διαστημικού καιρού οι δορυφόροι διαθέτουν διάφορα όργανα όπως μαγνητόμετρα, πλασμομετρητές, φασματογράφους, κάμερες, δέκτες σωματιδίων και ραδιοκυμάτων, καθώς και άλλα. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες αποστολές:

- Το Ηλιακό και Ηλιοσφαιρικό Παρατηρητήριο (SOHO) το οποίο εκτοξεύθηκε το 1995, περιφέρεται αργά γύρω από το σημείο Lagrange 1 (L1) και παρακολουθεί το εσωτερικό του Ήλιου, την ορατή του επιφάνεια, και την ηλιακή ατμόσφαιρα. Είναι κοινό έργο των οργανισμών ESA και NASA.
- Το Παρατηρητήριο Ηλιακής Δυναμικής (SDO) είναι η πρώτη αποστολή που εκτοξεύτηκε το 2010 για το Πρόγραμμα Living With a Star (LWS) της NASA. Ο δορυφόρος σχεδιάστηκε για να βοηθήσει στην κατανόηση της επίδρασης του Ήλιου στο διαστημικό περιβάλλον και στη λειτουργία των επίγειων υποδομών μελετώντας την ηλιακή ατμόσφαιρα σε μικρές χωρικές και χρονικές κλίμακες και σε πολλά μήκη κύματος ταυτόχρονα.
- Ο δορυφόρος Solar Orbiter αναπτύχθηκε από τις υπηρεσίες ESA και NASA και εκτοξεύθηκε το 2020. Είναι ο πρώτος δορυφόρος σε τόσο κοντινή απόσταση, η οποία είναι περίπου ίση με το ένα τρίτο της απόστασης μεταξύ της Γης και του Ήλιου. Με την συμβολή του είναι δυνατό να βρεθούν άγνωστες μέχρι σήμερα περιοχές, αιτίες γεγονότων και φαινομένων και ίσως η πρόβλεψη αυτών.

Επίσης λόγω της θέσης του παρέχει τις πιο κοντινές λήψεις των πολικών περιοχών του Ήλιου.

Άξια προσοχής είναι η επερχόμενη αποστολή της ESA, με την οποία ο δορυφόρος Vigil θα παρέχει συνεχώς δεδομένα από το σημείο Lagrange 5 (L5). Οι παρατηρήσεις από το συγκεκριμένο σημείο θα δίνουν πολύ πιο έγκαιρα πληροφορίες για την ηλιακή δραστηριότητα και ο συνδυασμός αυτών με δεδομένα από άλλους δορυφόρους θα προσφέρουν περισσότερη αξιοπιστία εκτός από πρόσθετη γνώση. Συνεπώς πρόκειται για ένα εξαιρετικά σημαντικό βήμα, καθώς με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα πρωτοφανές σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης που θα προσφέρει κρίσιμες προβλέψεις για τα ηλιακά φαινόμενα με στόχο την προστασία των διαστημικών και επίγειων υποδομών, των αστροναυτών, και των κατοίκων.



**Εικόνα 4.3:** Σημεία Lagrange. Retrieved from [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Vigil/Airbus\\_to\\_build\\_ESA\\_s\\_Vigil\\_space\\_weather\\_forecasting\\_mission](https://www.esa.int/Space_Safety/Vigil/Airbus_to_build_ESA_s_Vigil_space_weather_forecasting_mission)

#### 4.3.3 Φυσικά μοντέλα (physics-based)

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στη φυσική, δηλαδή σε θεμελιώδεις αρχές και νόμους, και προσπαθούν να αντιμετωπίσουν την εκπομπή των φορτισμένων σωματιδίων εντός των ορίων της μαγνητόσφαιρας της Γης λύνοντας διάφορες εξισώσεις. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι το μοντέλο Salammbô, VERB και BAS-RB [35].

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματά τους είναι ότι τα περισσότερα φυσικά μοντέλα είναι πολύπλοκα με αποτέλεσμα να είναι χρονοβόρα η υλοποίησή τους. Συνεπώς για να είναι εφικτή μια έγκαιρη πρόγνωση απαιτείται συνδυασμός μοντέλων μέσω των οποίων να

καλύπτεται μεγάλο κομμάτι του διαστημικού περιβάλλοντος για πιο ασφαλή συμπεράσματα. Εντούτοις τα σφάλματα που μεταφέρονται από το ένα μοντέλο στο άλλο μπορούν να είναι επιζήμια.

#### **4.3.4 Data-driven μοντέλα**

Τα data-driven μοντέλα περιλαμβάνουν τα πιθανολογικά μοντέλα και τα μοντέλα μηχανικής μάθησης (ML). Το πλεονέκτημα τους σε σχέση με τα physics-based μοντέλα είναι η δυνατότητα εισαγωγής μεγάλου όγκου δεδομένων από αρκετούς δορυφόρους και η πρόβλεψη μακροπρόθεσμων επιπτώσεων. Τέτοια μοντέλα είναι το IGE-2006 για τη γεωσύγχρονη τροχιά, τα MEO-V1 και MEO-V2 για τροχιές μεσαίου ύψους (MEO) και το SLOT για την περιοχή της σχισμής (slot region), τα οποία έχουν δημιουργηθεί από το Γαλλικό Εθνικό Ερευνητικό Κέντρο Αεροδιαστημικής Έρευνας (ONERA). Επίσης υπάρχει το παγκόσμιο μοντέλο GREEN [35].

Ωστόσο ο μεγάλος όγκος πληροφορίας που χρειάζονται καθιστά αναπόφευκτη τη χρησιμοποίηση δεδομένων από διαφορετικές αποστολές. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό χρησιμοποιούνται νευρωνικά δίκτυα (neural networks). Γενικά οι τεχνικές μηχανικής μάθησης (ML) αξιοποιούνται ευρέως για την πρόβλεψη του διαστημικού καιρού με επίκεντρο την εύρεση γεωμαγνητικών δεικτών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Περιγραφή δεδομένων και μέθοδος

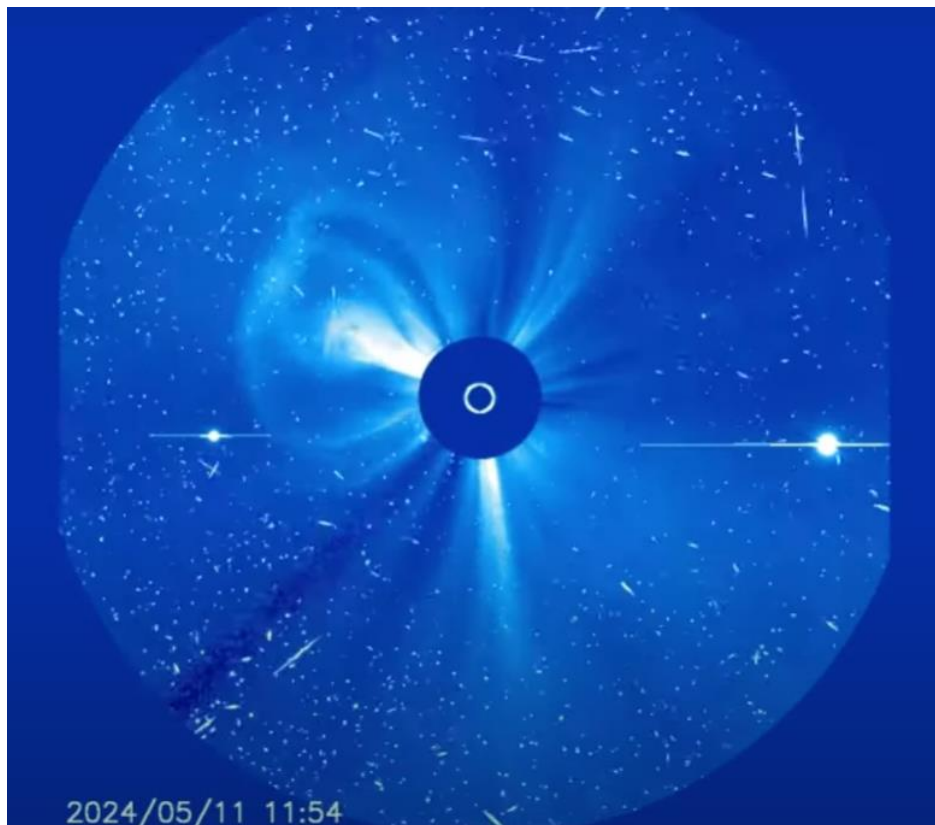
---

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων μιας έρευνας ή μελέτης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη μέθοδο ανάλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων. Ως εκ τούτου η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου είναι βασικό κομμάτι της διαδικασίας επίλυσης του εκάστοτε επιστημονικού προβλήματος.

#### 5.1 Γεωμαγνητικές καταιγίδες μελέτης

##### *Α γεωμαγνητική καταιγίδα*

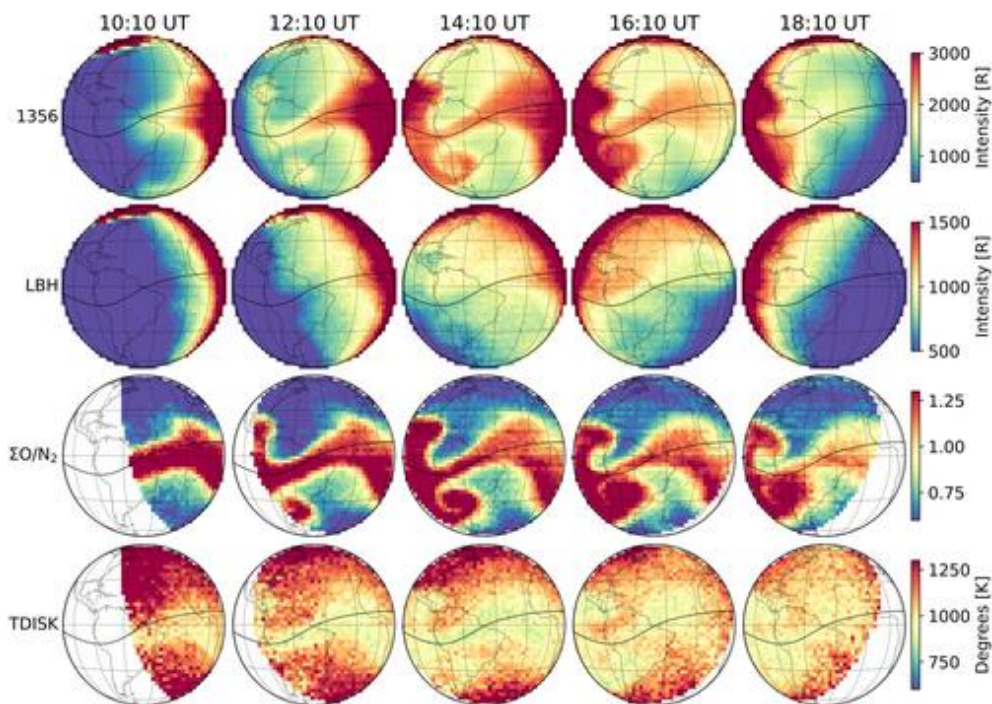
Η πρώτη γεωμαγνητική καταιγίδα που μελετήθηκε ήταν η «καταιγίδα της Ημέρας της Μητέρας» και σημειώθηκε στις 10-12 Μαΐου του 2024. Είναι η ισχυρότερη που έχει καταγραφεί από το 2003 και ήταν το αποτέλεσμα μιας σειράς ηλιακών εκλάμψεων κατηγορίας X και εκτινάξεων στεμματικής μάζας. Πλήθος επιστημόνων αποδίδει την ένταση της καταιγίδας στο γεγονός ότι διανύουμε την κορύφωση της ηλιακής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια του 11ετή κύκλου του Ήλιου.



**Εικόνα 5.1:** Στιγμιότυπο στις 11 Μαΐου της γεωμαγνητικής καταιγίδας από το Ηλιακό και Ηλιοσφαιρικό Παρατηρητήριο (SOHO). Retrieved from [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_weather/The\\_May\\_2024\\_solar\\_storm\\_your\\_questions\\_answered](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_weather/The_May_2024_solar_storm_your_questions_answered)

Πιο συγκεκριμένα στις 8 Μαΐου του 2024 η ηλιακή ενεργή περιοχή AR13664 άρχισε να απελευθερώνει μια σειρά από ηλιακές εκλάμψεις. Οι εκλάμψεις κατηγορίας X, δηλαδή ο πιο ισχυρός τύπος ηλιακών εκλάμψεων, οδήγησαν στην εμφάνιση συνεχόμενων CMEs με πολύ μεγάλες ταχύτητες. Η έναρξη της γεωμαγνητικής καταιγίδας κατηγορίας G5 καταγράφηκε στις 10 Μαΐου με τον δείκτη Dst να αγγίζει στην κύρια φάση την τιμή των  $-412$  nT [10, 14].

Η γεωμαγνητική καταιγίδα είχε σοβαρές επιπτώσεις στο γήινο περιβάλλον και ειδικότερα στη Μεσόγειο και επηρέασε διαστημικές αποστολές, όπως το Ηλιακό και Ηλιοσφαιρικό Παρατηρητήριο (SOHO) των ESA/NASA. Πιο συγκεκριμένα προξένησε σημαντική διαταραχή στη μαγνητόσφαιρα και οδήγησε σε αλλαγές στην ιονοσφαιρική δομή, στη σύνθεση, και στη θερμοκρασία της γήινης θεμόσφαιρας. Επίσης έπληξε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και διέκοψε συστήματα πλοήγησης. Συγχρόνως παρήγαγε σέλας σχεδόν σε όλο τον κόσμο [14].



**Εικόνα 5.2:** Απεικόνιση της χωρικής και χρονικής εξέλιξης της θεμόσφαιρας κατά τη διάρκεια της καταιγίδας στις 11 Μαΐου, από την αποστολή Global-scale Observations of the Limb and Disk (GOLD) της NASA. Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2024GL110506>

### *B γεωμαγνητική καταιγίδα*

Η δεύτερη γεωμαγνητική καταιγίδα σημειώθηκε στις 24 Ιουλίου του 2024 και προκλήθηκε από CMEs, οι οποίες εκτοξεύθηκαν στις 21 Ιουλίου. Η συγκεκριμένη καταιγίδα ταξινομείται στην κατηγορία G2, δηλαδή έχει μέτρια ισχύ.

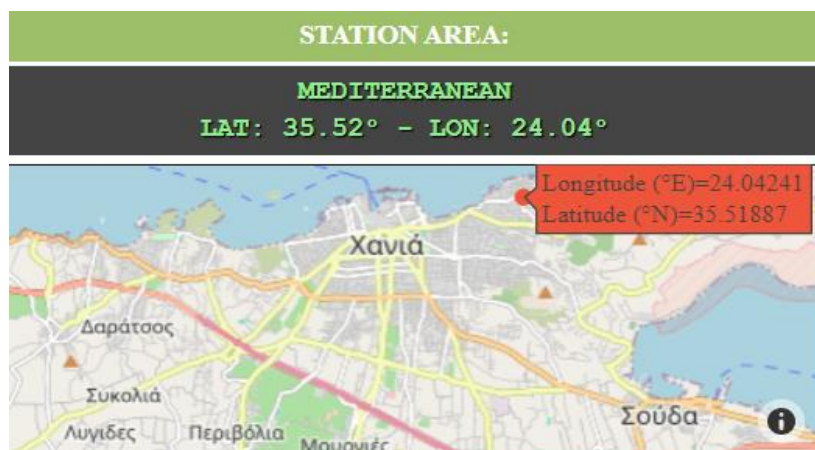
Συμπερασματικά οι δύο καταιγίδες έχουν τον ίδιο μηχανισμό δημιουργίας και διαφορετική ισχύ.

### 5.2 Συλλογή δεδομένων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις ανά ένα δευτερόλεπτο από τον δέκτη GNSS του σταθμού cha0p (εικόνα 5.3) που βρίσκεται στην περιοχή των Χανίων. Παρακάτω παρουσιάζονται σε εικόνες πληροφορίες για το όνομα, τον δέκτη και την περιοχή του σταθμού.

STATION CODE - LOCATION
cha0p - Chania
STATION INSTRUMENT
Septentrio PolaRx5S

**Εικόνα 5.3:** Το όνομα και ο δέκτης του σταθμού GNSS. Retrieved from [http://eskimo.ingv.it/ewphp/daily\\_data\\_gnss.php?st=cha0p](http://eskimo.ingv.it/ewphp/daily_data_gnss.php?st=cha0p)



**Εικόνα 5.4:** Η περιοχή του σταθμού GNSS. Retrieved from [http://eskimo.ingv.it/ewphp/daily\\_data\\_gnss.php?st=cha0p](http://eskimo.ingv.it/ewphp/daily_data_gnss.php?st=cha0p)

Για την πραγματοποίηση της συλλογής της πληροφορίας και της διαδικασίας της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε ο ιστότοπος <http://www.eswua.ingv.it/>. Το ψηφιακό έργο eSWua δημιουργήθηκε από το Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia της Ιταλίας και στοχεύει στην υλοποίηση ενός συστήματος hardware-software με σκοπό την αρχειοθέτηση, την επεξεργασία, και την προσβασιμότητα σε δεδομένα σχεσιακής βάσης, σε πραγματικό και μη πραγματικό χρόνο, από διαφορετικά όργανα.

Αναλυτικότερα, τα δεδομένα, στα οποία δεν έχουν πραγματοποιηθεί διορθώσεις, είναι οι τιμές της παραμέτρου ιονοσφαιρικού σπινθηρισμού S4 που περιλαμβάνονται στα raw δεδομένα του δέκτη GNSS. Ο συγκεκριμένος δείκτης περιγράφει τις διακυμάνσεις και τις μεταβολές του πλάτους (ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός πλάτους) ή της φάσης (ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός φάσης) των ραδιοσημάτων στην ιονόσφαιρα. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται, όπως έχει αναφερθεί, από την έντονη ηλιακή δραστηριότητα και συγκεκριμένα εξαιτίας των συνεχών αλλαγών στην ηλεκτρονική πυκνότητα. Ειδικότερα η παράμετρος ισούται με τον λόγο του σήματος προς τον θόρυβο ( $S / N_0$ ) και υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις [79]:

$$S / N_0 = 10^{0,1(\frac{C}{N_0})} \quad (5.2.1)$$

$$SI_{trended}^{S/N_0} = \frac{S/N_{0k}}{\sum_{i=1}^{60 \times fs(S/N_{0k})-1} \frac{1}{60 \times fs}} \quad (5.2.2)$$

όπου,

το  $fs$  αντιπροσωπεύει το διάστημα δειγματοληψίας και το  $SI$  την ένταση της ακτινοβολίας, δηλαδή την ένταση του σήματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω για την παράμετρο ενδιαφέροντος S4 ισχύει η σχέση:

$$\sqrt{\frac{\langle (SI_{trended}^{S/N_0})^2 \rangle - \langle SI_{trended}^{S/N_0} \rangle^2}{\langle SI_{trended}^{S/N_0} \rangle^2}} \quad (5.2.3)$$

Συνεπώς η ποσότητα S4 είναι ίση με την τυπική απόκλιση της έντασης του σήματος.

Επίσης καταγράφηκαν οι παρακάτω μετρήσεις:

- A) 120 ημέρες πριν την πρώτη καταιγίδα
- B) 120 ημέρες μετά την πρώτη καταιγίδα
- Γ) 120 ημέρες πριν την δεύτερη καταιγίδα
- Δ) 120 ημέρες μετά την δεύτερη καταιγίδα



### 5.3 Μέθοδος

Η ανάλυση των σημάτων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του φυσικού χρόνου. Η επιλογή της μεθόδου έγινε με κριτήρια το είδος των δεδομένων και τον σκοπό της εργασίας.

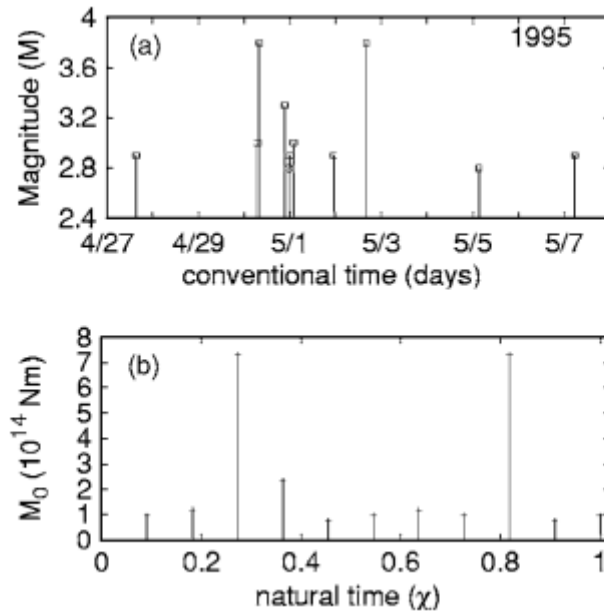
Είναι γνωστό ότι φαινόμενα που εξελίσσονται στο γήινο και διαστημικό περιβάλλον είναι δυνατό να παρουσιάσουν σε μια ροή «φυσιολογικών» και μικρών διακυμάνσεων ένα σημαντικό ή ακόμα και ένα επικίνδυνο και καταστροφικό γεγονός. Το κρίσιμο ερώτημα είναι αν είναι επιτεύξιμος ο προσδιορισμός αυτού του συμβάντος. Η σημαντικότερη συνεισφορά της μεθόδου του φυσικού χρόνου είναι η θετική απάντηση στο παραπάνω ερώτημα. Πιο συγκεκριμένα η ανάλυση στον φυσικό χρόνο, ο οποίος δεν θεωρείται συνεχής σε αντίθεση με τον συμβατικό χρόνο, δίνει την δυνατότητα εξαγωγής της μέγιστης δυνατής πληροφορίας από ένα σήμα που προέρχεται από κάποιο πολύπλοκο δυναμικό φυσικό σύστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, αφενός την επεξεργασία και την μελέτη ιδιοτήτων του συστήματος που δεν είναι εφικτό να γίνουν αντιληπτές όταν το σήμα καταγράφεται στον συμβατικό χρόνο, και αφετέρου τον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής που το σύνθετο αυτό σύστημα πλησιάζει ένα κρίσιμο σημείο.

Σχετικά με τον ορισμό, σε μια χρονοσειρά που αποτελείται από  $N$  γεγονότα που συμβαίνουν σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές ο φυσικός χρόνος του συμβάν  $k$ , το οποίο εκπέμπει ενέργεια  $A_k$ , ορίζεται ως [29]:

$$\chi_k = k / N \quad (5.2.4)$$

Μία σημαντική διάκριση που παίζει ρόλο για την ανάλυση των σημάτων και κατ' επέκταση για την αξιολόγηση του φαινομένου ή γεγονότος είναι ανάμεσα στα συστήματα σε ισορροπία και σε εκείνα εκτός ισορροπίας. Στα πρώτα το σύστημα παράγει στάσιμες χρονοσειρές με πιθανότητες  $p_k$  ανεξάρτητες από το  $\chi_k$ , ενώ στα συστήματα με απουσία ισορροπίας οι χρονοσειρές είναι μη στάσιμες και οι πιθανότητες  $p_k$ , ή ισοδύναμα η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $p(x)$  δεν είναι ανεξάρτητη από το  $\chi_k$ .

Όσο αφορά τη διαδικασία που ακολουθείται στη μέθοδο, από τα διαγράμματα των σημάτων στον συμβατικό χρόνο πραγματοποιείται η μέτρηση της ενέργειας του πρώτου σήματος, ύστερα του δεύτερου, και ούτω καθεξής. Συνεπώς οι πληροφορίες που αντλούνται είναι η τάξη των γεγονότων και η ενέργεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις σημάτων ορθογωνίων παλμών η ενέργεια είναι ίση με τη διάρκεια του συμβάν. Είναι δυνατό να υπολογιστεί η ανοιγμένη ενέργεια, δηλαδή το ποσοστό της εκλυόμενης ενέργειας.



**Εικόνα 5.5:** Χρονοσειρά σεισμικών γεγονότων με διαφορετικό μέγεθος, σε συμβατικό και φυσικό χρόνο. Αυτό το παράδειγμα αναφέρεται στους πρώτους μικρούς σεισμούς που συνέβησαν μετά τη δραστηριότητα SES που καταγράφηκε στις 18 Απριλίου του 1995, και προηγήθηκε του βασικού σεισμού στις 13 Μαΐου 1995. Retrieved from <http://physlab.phys.uoa.gr/org/pdf/d55.pdf>

Επισημαίνεται ότι στην ακολουθία των γεγονότων μελετάται η χρονική εξέλιξη του ζεύγους  $(\chi_k, p_k)$ , όπου  $p_k$  είναι η κανονικοποιημένη ενέργεια του συμβάν  $k$  και υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο [29, 31]:

$$p_k = \frac{A_k}{\sum_{n=1}^N A_n} \quad (5.1.5)$$

Τα ζεύγη  $(\chi_k, p_k)$  και  $(\chi_k, A_k)$  είναι ισοδύναμα. Επίσης από τη σχέση 5.2.1 προκύπτει ότι:

$$\sum_{k=1}^N p_k = 1 \quad (5.2.6)$$

### 5.3.1 Αντιστροφή χρόνου

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η αντιστροφή του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα σε μια χρονοσειρά που αποτελείται από  $N$  γεγονότα η επίδραση του συντελεστή αντιστροφής του χρόνου  $\hat{T}$  στην ενέργεια  $A_k$  και στην κανονικοποιημένη ενέργεια  $p_k$  είναι:

$$\hat{T}A_k = A_{N-k+1} \quad (5.2.7)$$

$$\hat{T}p_k = p_{N-k+1} \quad (5.2.8)$$

Συμπερασματικά το πρώτο συμβάν της χρονοσειράς ( $k = 1$ ) αποτελεί το τελευταίο, το δεύτερο ( $k = 2$ ) το προτελευταίο, και ούτω καθεξής.

### 5.3.2 Διασπορά $k_1$

Αρχικά, για την υλοποίηση της ανάλυσης του χρόνου έχει οριστεί η συνεχής συνάρτηση  $\Phi(\omega)$ :

$$\Phi(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^N A_k e^{i\omega \frac{k}{N}}}{\sum_{n=1}^N A_k} = \sum_{k=1}^N p_k e^{i\omega \frac{k}{N}} = \sum_{k=1}^N p_k e^{i\omega x_k} \quad (5.2.9)$$

Με την αξιοποίηση αυτής της συνάρτησης, το κανονικοποιημένο φάσμα ισχύος υπολογίζεται από την σχέση:

$$\Pi(\omega) = |\Phi(\omega)|^2 = \left| \sum_{k=1}^N p_k e^{i\omega \frac{k}{N}} \right|^2 \quad (5.2.10)$$

Επίσης σύμφωνα με τη σχέση  $p(\chi) = \sum_{k=1}^N p_k \delta(\chi - k/N)$  ισχύει ότι:

$$\Pi(\omega) = \int_0^1 \int_0^1 p(\chi) p(\chi') \cos[\omega(\chi - \chi')] d\chi d\chi' \quad (5.2.11)$$

Η εφαρμογή του αναπτύγματος Taylor στην εξίσωση 5.2.7 για χαμηλές τιμές του  $\omega$  γύρω από το μηδέν έχει τα εξής αποτελέσματα:

$$\Pi(\omega) = 1 + \kappa_1 \omega^2 + \kappa_2 \omega^4 + \kappa_3 \omega^6 + \kappa_4 \omega^8 + \dots \quad (5.2.12)$$

$$\kappa_1 = \frac{1}{2} \int_0^1 \int_0^1 p(\chi) p(\chi') (\chi - \chi')^2 d\chi d\chi' \quad (5.2.13)$$

όπου,

$$\kappa_1 = -\frac{1}{2} \left. \frac{d^2 \Pi(\omega)}{d\omega^2} \right|_{\omega=0} \quad (5.2.14)$$

Ακολουθώς ισχύουν:

$$\frac{d^2 \Pi(\omega)}{d\omega^2} = \Phi^*(\omega) \frac{d^2 \Phi(\omega)}{d\omega^2} + \Phi(\omega) \frac{d^2 \Phi^*(\omega)}{d\omega^2} + 2 \frac{d\Phi(\omega)}{d\omega} \frac{d\Phi^*(\omega)}{d\omega} \quad (5.2.15)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 5.2.6, καθώς και ότι  $\Phi(0) = 1$ , καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση:

$$\kappa_1 = -\frac{1}{2} \left[ -\sum_k p_k \chi_k^2 - \sum_k p_k \chi_k^2 - 2 \left( \sum_k p_k \chi_k \right)^2 \right] = \langle \chi^2 \rangle - \langle \chi \rangle^2 \quad (5.2.16)$$

όπου,

$$\langle \chi^n \rangle = \sum_{k=1}^N p_k \chi_k^n \quad (5.2.17)$$

Η εξίσωση 5.2.12 υπολογίζει τις ροπές και η ποσότητα  $\kappa_1$  αποτελεί τη διασπορά του φυσικού χρόνου. Ισχύει ότι:

$$\kappa_1 = \langle \chi^2 \rangle - \langle \chi \rangle^2 = \sum_{k=1}^N p_k \left( \frac{k}{N} \right)^2 - \left( \sum_{k=1}^N \frac{k}{N} p_k \right)^2 \quad (5.2.18)$$

Οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης είναι ίσοι με:

$$\kappa_2 = \frac{\langle \chi^2 \rangle^2}{4} + \frac{\langle \chi^4 \rangle}{12} - \frac{\langle \chi \rangle \langle \chi^3 \rangle}{3} \quad (5.2.19)$$

$$\kappa_3 = \frac{\langle \chi^3 \rangle^2}{36} + \frac{\langle \chi \rangle \langle \chi^5 \rangle}{60} - \frac{\langle \chi^6 \rangle}{360} - \frac{\langle \chi^2 \rangle \langle \chi^4 \rangle}{24} \quad (5.2.20)$$

$$\kappa_4 = \frac{\langle \chi^8 \rangle}{20160} + \frac{\langle \chi^2 \rangle \langle \chi^6 \rangle}{720} + \frac{\langle \chi^4 \rangle^2}{576} - \frac{\langle \chi^3 \rangle \langle \chi^5 \rangle}{360} - \frac{\langle \chi \rangle \langle \chi^7 \rangle}{2520} \quad (5.2.21)$$

Σημειώνεται πως η διασπορά  $\kappa_1$  δεν αλλάζει κατά την αντιστροφή του χρόνου διότι προκύπτει από ένα φάσμα ισχύος. Ακόμα είναι δείκτης κρισιμότητας μίας κατάστασης ενός δυναμικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα έχει αποδειχθεί ότι για αρκετά συστήματα, όπως σεισμολογικά φαινόμενα, όταν η διασπορά πλησιάζει την τιμή 0.07 σημαίνει ότι το γεγονός πλησιάζει το κρίσιμο σημείο [28].

### 5.3.3 Εντροπία S

Σχετικά με την εντροπία παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές. Πιο συγκεκριμένα αποδεικνύεται ότι η δυναμική συμπεριφορά μεγάλων γεγονότων που είναι ισοκατανεμημένα ή συμβαίνουν όλα μαζί μεταβάλλεται στο πεδίο του φυσικού χρόνου, ενώ κατά Shannon πρόκειται στατιστικά για την ίδια συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό η εντροπία στον φυσικό χρόνο ονομάζεται δυναμική και όχι στατιστική και για κάθε γεγονός που συμβαίνει πρέπει να γίνεται υπολογισμός. Επίσης εξαρτάται από την πορεία των γεγονότων και υπολογίζεται ως εξής:

$$S \equiv \langle \chi \ln \chi \rangle - \langle \chi \rangle \ln \langle \chi \rangle \quad (5.2.22)$$

$$S \equiv \sum_{k=1}^N \frac{k}{N} \ln \left( \frac{k}{N} \right) p_k - \left( \sum_{l=1}^N \frac{l}{N} p_l \right) \ln \left[ \sum_{m=1}^N \frac{m}{N} p_m \right] \quad (5.2.23)$$

$$S = \int_0^1 p(\chi) \chi \ln \chi d\chi - \left( \int_0^1 p(\chi) \chi d\chi \right) \ln \left[ \int_0^1 p(\chi') \chi' d\chi' \right] \quad (5.2.24)$$

Όταν οι ενέργειες είναι ανεξάρτητες και όμοια κατανομημένες τυχαίες μεταβλητές και ισχύει  $p(\chi) = 1$  και  $\langle \chi \rangle = 0.5$ , η εντροπία προσεγγίζει την τιμή της ομοιόμορφης κατανομής [27]:

$$S_u = \frac{\ln 2}{2} - \frac{1}{4} \approx 0.0966 \quad (5.2.25)$$

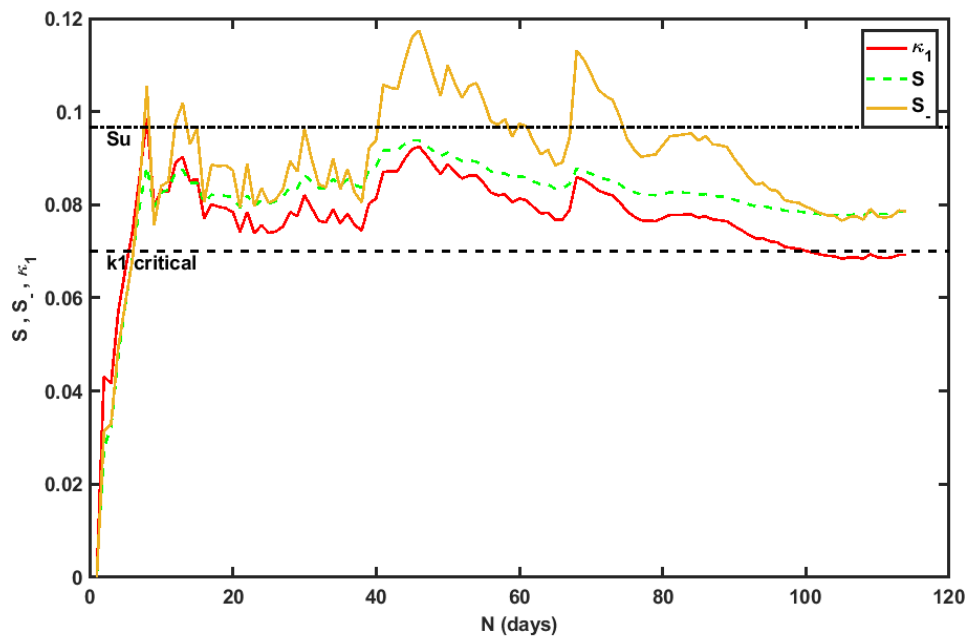
Με την αναστροφή του βέλους του χρόνου η εντροπία ( $S_-$ ) μεταβάλλεται. Σύμφωνα με τη γενική αυτή αρχή όταν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των δύο ποσοτήτων σημαίνει ότι επέρχεται μία κρίσιμη κατάσταση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Αποτελέσματα

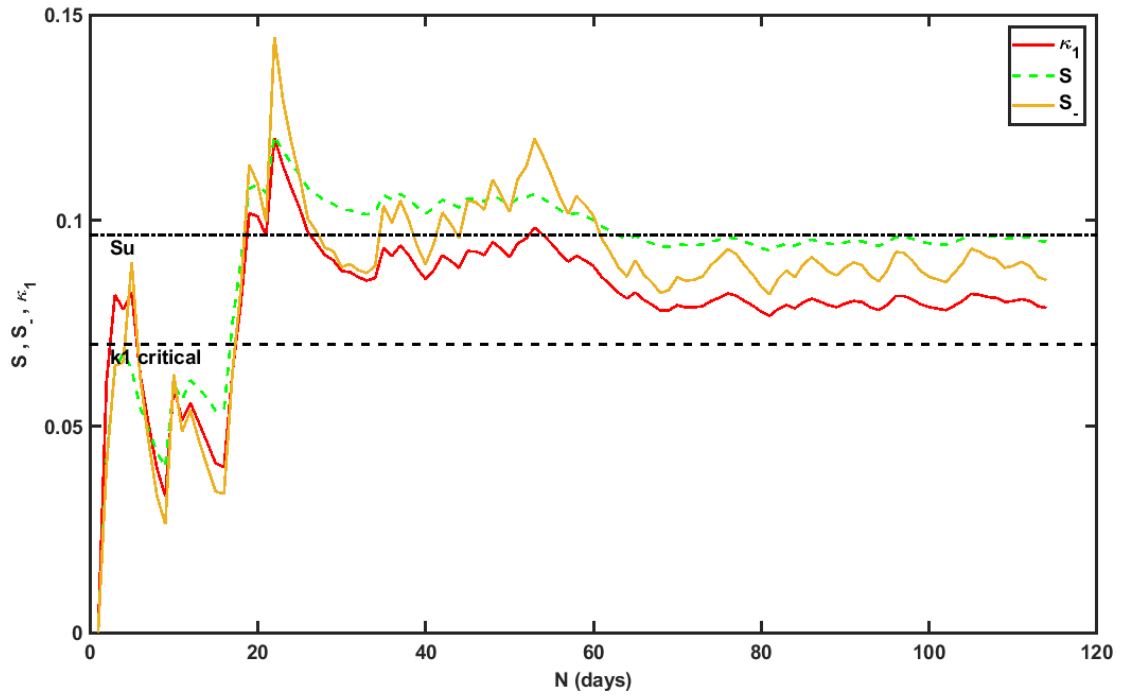
Η μοντελοποίηση της πληροφορίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση επαναληπτικού κώδικα στο περιβάλλον του MATLAB. Με βάση τις μετρήσεις που υλοποιήθηκαν παρατίθενται παρακάτω τα γραφήματα για κάθε περίπτωση.

A) 120 ημέρες πριν την πρώτη καταιγίδα



**Σχήμα 6.1:** Αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν 120 ημέρες πριν την πρώτη καταιγίδα.

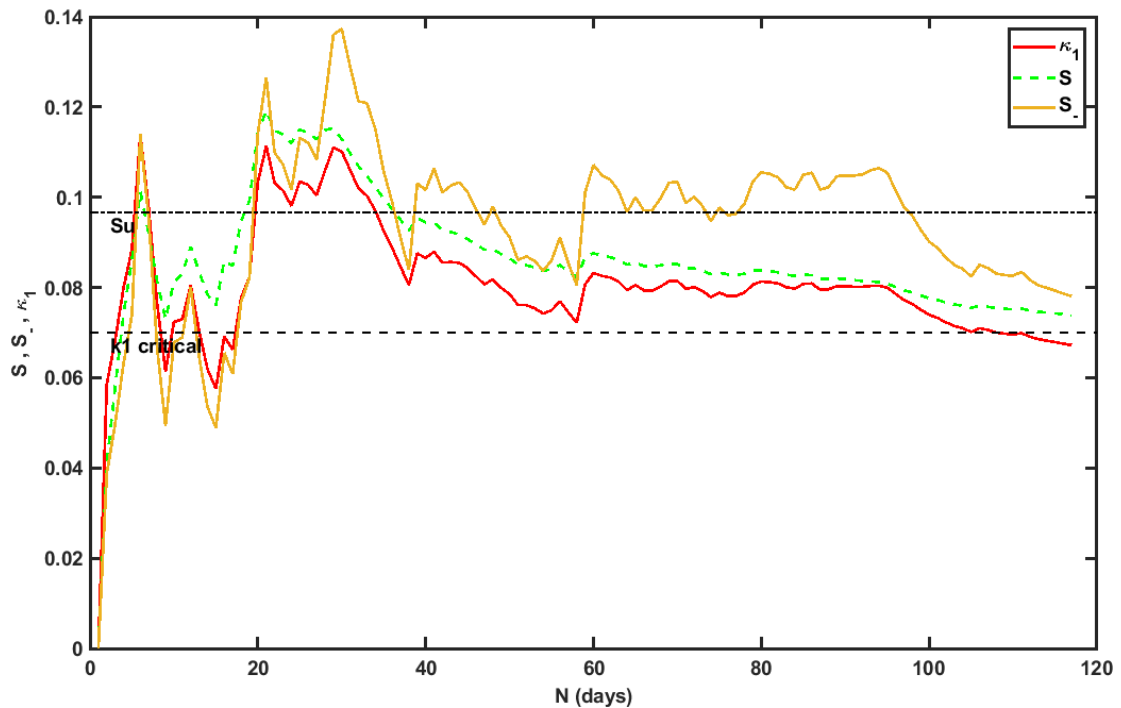
B) 120 ημέρες μετά την πρώτη καταιγίδα



Σχήμα 6.2: Αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν

120 ημέρες μετά την πρώτη καταιγίδα.

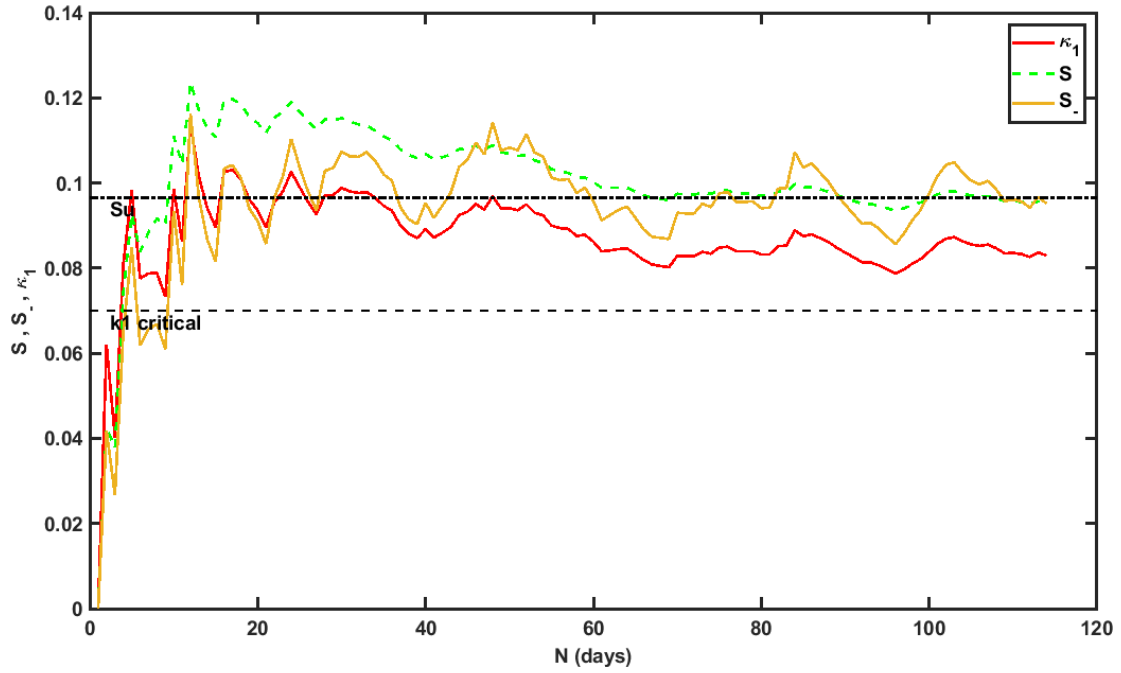
Γ) 120 ημέρες πριν την δεύτερη καταιγίδα



Σχήμα 6.3: Αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν

120 ημέρες πριν τη δεύτερη καταιγίδα.

Δ) 120 ημέρες μετά την δεύτερη καταιγίδα



Σχήμα 6.4: Αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν

120 ημέρες μετά τη δεύτερη καταιγίδα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### Συμπεράσματα – Προτάσεις

---

#### *Συμπεράσματα*

Στο κεφάλαιο 6 επισημαίνεται η σημασία της διασποράς  $k_1$ , της εντροπίας  $S$ , και της εντροπίας  $S_-$  για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επικείμενη κατάσταση ενός συστήματος. Στην παρούσα εργασία παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις Α και Γ, δηλαδή 120 ημέρες πριν την πρώτη καταιγίδα και 120 ημέρες πριν τη δεύτερη καταιγίδα, είναι δυνατό να προβλεφθούν οι μεταβολές φάσης του συστήματος, άρα και οι γεωμαγνητικές καταιγίδες. Αυτό ισχύει διότι ικανοποιούνται οι αναγκαίες συνθήκες: η ποσότητα  $k_1$  πλησιάζει την τιμή 0.07 και οι εντροπίες  $S$  και  $S_-$  είναι μικρότερες από 0.0966 και διαφέρουν. Πιο συγκεκριμένα όσο αφορά την καταιγίδα στο διάστημα 10 – 12 Μαΐου η πρόγνωση της ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί 10 ημέρες πριν, και της δεύτερης στις 24 Ιουλίου 5 ημέρες πριν. Η διαφορά στις ημέρες πρόγνωσης μπορεί να αποδοθεί στην ισχύ των καταιγίδων που είναι και μία από τις σημαντικές διαφορές τους. Σχετικά με τις μετρήσεις μετά τις γεωμαγνητικές καταιγίδες φαίνεται και στις δύο περιπτώσεις ότι η διασπορά δεν αγγίζει την τιμή 0.07 και άρα αποδεικνύεται αυτό που ισχύει, ότι δεν υπήρχε κάποια μεγάλη διαταραχή. Κατά συνέπεια η θεωρία του φυσικού χρόνου εφαρμόστηκε επιτυχώς στο επιστημονικό πρόβλημα της παρούσας εργασίας.

#### *Προτάσεις*

Αρχικά, είναι σημαντικό να διερευνηθεί η συνεισφορά της θεωρίας του φυσικού χρόνου στη μελέτη του διαστημικού καιρού. Αναλυτικότερα θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε διάφορα συμβάντα με μικρές ή μεγάλες μεταβολές και διαταραχές, για να υπάρξει το κατάλληλο δείγμα σε ποσότητα και ποιότητα, ώστε να διαπιστωθεί σε ποια γεγονότα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί. Προτείνεται η μελέτη γεωμαγνητικής καταιγίδας που προκλήθηκε από ηλιακές ροές υψηλής ταχύτητας (HSSs), δηλαδή από διαφορετικό μηχανισμό.

Επιπρόσθετα στο πεδίο της μηχανικής μάθησης η ανάπτυξη των νευρωνικών δικτύων προσφέρει σημαντικά αποτελέσματα. Σύμφωνα με τα ήδη υπάρχοντα επιστημονικά στοιχεία προτείνεται η δημιουργία ενός σύνθετου νευρωνικού δικτύου που θα ανιχνεύει την έναρξη, την ένταση, και τη διάρκεια μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας με βάση την εξέλιξη του δείκτη Dst, καθώς και η χρήση νευρωνικού δικτύου στη θεωρία του φυσικού χρόνου. Επίσης ο συνδυασμός φυσικών μοντέλων και νευρωνικών δικτύων θα μπορούσε να αποτελέσει μία νέα λύση στην πρόγνωση και στην ανάλυση της εξέλιξης μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας και άλλων γεγονότων, καθώς με την αξιοποίηση των φυσικών νόμων εξασφαλίζεται η φυσική εξέλιξη και οι συνέπειες του γεγονότος.

**Βιβλιογραφία - Διαδικτυακές πηγές**

- [1] A. Hu, E. Camporeale, and B. Swiger, “Multi-Hour-Ahead Dst Index Prediction Using Multi-Fidelity Boosted Neural Networks,” *Space Weather*, vol. 21, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.1029/2022SW003286.
- [2] A. Collado-Villaverde, P. Muñoz, and C. Cid, “Neural Networks for Operational SYM-H Forecasting Using Attention and SWICS Plasma Features,” *Space Weather*, vol. 21, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.1029/2023SW003485.
- [3] C. Brester, V. Kallio-Myers, A. V. Lindfors, M. Kolehmainen, and H. Niska, “Evaluating neural network models in site-specific solar PV forecasting using numerical weather prediction data and weather observations,” *Renew Energy*, vol. 207, pp. 266–274, May 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.02.130.
- [4] M. Papailiou *et al.*, “Space weather phenomena on heart rate: a study in the Greek region,” *Int J Biometeorol*, vol. 67, no. 1, pp. 37–45, Jan. 2023, doi: 10.1007/s00484-022-02382-3.
- [5] N. Balan, Q.-H. Zhang, S. T. Ram, K. Shiokawa, V. Manu, and Z.-Y. Xing, “How to identify and forecast severe space weather events,” *J Atmos Sol Terr Phys*, vol. 256, p. 106183, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jastp.2024.106183.
- [6] A. A. Ferreira, D. De, E. Elétrica, F. De Tecnologia, and U. De Brasília, “ANALYSIS AND PREDICTION OF SPACE WEATHER EVENTS AND THEIR IMPACTS ON SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS.”
- [7] M. Ishii, J. Berdermann, B. Forte, M. Hapgood, M. M. Bisi, and V. Romano, “Space weather impact on radio communication and navigation,” *Advances in Space Research*, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.asr.2024.01.043.
- [8] M. K. Georgoulis *et al.*, “Prediction of solar energetic events impacting space weather conditions,” *Advances in Space Research*, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.asr.2024.02.030.
- [9] A. Masson *et al.*, “Heliophysics and space weather information architecture and innovative solutions: Current status and ways forward,” *Advances in Space Research*, May 2024, doi: 10.1016/j.asr.2024.05.052.
- [10] L. Spogli *et al.*, “The effects of the May 2024 Mother’s Day superstorm over the Mediterranean sector: from data to public communication,” *Annals of Geophysics*, vol. 67, no. 2, p. PA218, Jun. 2024, doi: 10.4401/ag-9117.
- [11] W. B. Cade, “The First Space Weather Prediction,” *Space Weather*, vol. 11, no. 6, pp. 330–332, Jun. 2013, doi: 10.1002/swe.20062.

- [12] D. J. Knipp, B. J. Fraser, M. A. Shea, and D. F. Smart, “On the Little-Known Consequences of the 4 August 1972 Ultra-Fast Coronal Mass Ejecta: Facts, Commentary, and Call to Action,” *Space Weather*, vol. 16, no. 11, pp. 1635–1643, Nov. 2018, doi: 10.1029/2018SW002024.
- [13] W. B. Cade, “The First Recorded Space Weather Impact?,” *Space Weather*, vol. 11, no. 9, pp. 489–489, Sep. 2013, doi: 10.1002/swe.20091.
- [14] J. S. Evans *et al.*, “GOLD Observations of the Thermospheric Response to the 10–12 May 2024 Gannon Superstorm,” *Geophys Res Lett*, vol. 51, no. 16, Aug. 2024, doi: 10.1029/2024GL110506.
- [15] H. Haralambous *et al.*, “Multi-Instrument Observations of Various Ionospheric Disturbances Caused by the 6 February 2023 Turkey Earthquake,” *J Geophys Res Space Phys*, vol. 128, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.1029/2023JA031691.
- [16] M. Piersanti and U. Villante, “On the discrimination between magnetospheric and ionospheric contributions on the ground manifestation of sudden impulses,” *J Geophys Res Space Phys*, vol. 121, no. 7, pp. 6674–6691, Jul. 2016, doi: 10.1002/2015JA021666.
- [17] N. M. Viall and J. E. Borovsky, “Nine Outstanding Questions of Solar Wind Physics,” *J Geophys Res Space Phys*, vol. 125, no. 7, Jul. 2020, doi: 10.1029/2018JA026005.
- [18] W. D. Gonzalez *et al.*, “What is a geomagnetic storm?” *J Geophys Res Space Phys*, vol. 99, no. A4, pp. 5771–5792, Apr. 1994, doi: 10.1029/93JA02867.
- [19] K. E. J. Huttunen *et al.*, “April 2000 magnetic storm: Solar wind driver and magnetospheric response,” *J Geophys Res Space Phys*, vol. 107, no. A12, Dec. 2002, doi: 10.1029/2001JA009154.
- [20] T. K. Breus, E. R. Boiko, and T. A. Zenchenko, “Magnetic storms and variations in hormone levels among residents of North Polar area – Svalbard,” *Life Sci Space Res (Amst)*, vol. 4, pp. 17–21, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.lssr.2014.12.001.
- [21] A. Kolarski, N. Veselinović, V. A. Srećković, Z. Mijić, M. Savić, and A. Dragić, “Impacts of Extreme Space Weather Events on September 6th, 2017 on Ionosphere and Primary Cosmic Rays,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 5, p. 1403, Mar. 2023, doi: 10.3390/rs15051403.
- [22] P. Baki *et al.*, “The Status of Space Weather Infrastructure and Research in Africa,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no. 12, p. 1791, Dec. 2023, doi: 10.3390/atmos14121791.

- [23] S. Savchuk, S. Doskich, P. Golda, and A. Rurak, “The Seasonal Variations Analysis of Permanent GNSS Station Time Series in the Central-East of Europe,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 15, p. 3858, Aug. 2023, doi: 10.3390/rs15153858.
- [24] H. Duman, “GNSS-specific characteristic signals in power spectra of multi-GNSS coordinate time series,” *Advances in Space Research*, vol. 73, no. 12, pp. 5860–5875, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.asr.2024.03.016.
- [25] E. Shehaj, O. Frey, G. Moeller, T. Strozzi, A. Geiger, and M. Rothacher, “On the Consistency of Tropospheric Delays Over Mountainous Terrain Retrieved From Persistent Scatterer Interferometry, GNSS, and Numerical Weather Prediction Models,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62, pp. 1–18, 2024, doi: 10.1109/TGRS.2023.3344277.
- [26] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, H. K. Tanaka, and E. S. Skordas, “Similarity of fluctuations in correlated systems: The case of seismicity,” *Phys Rev E*, vol. 72, no. 4, p. 041103, Oct. 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.72.041103.
- [27] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, E. S. Skordas, H. K. Tanaka, and M. S. Lazaridou, “Entropy of seismic electric signals: Analysis in natural time under time reversal,” *Phys Rev E*, vol. 73, no. 3, p. 031114, Mar. 2006, doi: 10.1103/PhysRevE.73.031114.
- [28] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, and E. S. Skordas, “Scale-specific order parameter fluctuations of seismicity in natural time before mainshocks,” *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 96, no. 5, p. 59002, Dec. 2011, doi: 10.1209/0295-5075/96/59002.
- [29] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, and E. S. Skordas, “Phenomena preceding major earthquakes interconnected through a physical model,” *Ann Geophys*, vol. 37, no. 3, pp. 315–324, May 2019, doi: 10.5194/angeo-37-315-2019.
- [30] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, and E. S. Skordas, “Long-range correlations in the electric signals that precede rupture,” *Phys Rev E*, vol. 66, no. 1, p. 011902, Jul. 2002, doi: 10.1103/PhysRevE.66.011902.
- [31] P. Varotsos, “Spatio-temporal complexity aspects on the interrelation between seismic electric signals and seismicity,” 2001. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/234077930>
- [32] Α. Δερμάνης, *Διαστημική γεωδαισία και γεωδυναμική GPS*. Εκδόσεις Ζήτη, 1999.
- [33] Ν. Ασημάκης and Μ. Αδάμ, *Σήματα και Συστήματα [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015. Available: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-506>
- [34] Χ. Χαλδούπης, *Εισαγωγή στην Ατμοσφαιρική Φυσική [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015. Available: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-673>

- [35] I. Δαγκλής, X. Κατσαβριάς, N. Σέργης, and M. Γεωργίου, *Διαστημική Φυσική [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2023. Available: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-384>
- [36] K. Αλυσσανδράκης, A. Νίντος, and Σ. Πατσουράκος, *Φυσική του ήλιου και του διαστήματος [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015. Available: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-485>
- [37] A. Μαστιχιάδης and N. Βλαχάκης, *Αστροφυσική υψηλών ενεργειών [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015. Available: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-725>
- [38] Δ. Βουγιούκας, *Δορυφορικές επικοινωνίες [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015. Available: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-751>
- [39] K. Τσιγάνης and X. Βάρβογλης, *Πλανητικά συστήματα [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015. Available: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-763>
- [40] A. Πασχαλίδου, *Μαθήματα Φυσικής του Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2023. Available: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-219>
- [41] A. Μιντζέλας, “Μελέτη πολύπλοκων συστημάτων με την βοήθεια του φυσικού χρόνου,” Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2019.
- [42] Θ. Παπανικολάου, “Μοντελοποίηση δυναμικών δορυφορικών τροχιών στο πλαίσιο σύγχρονων αποστολών της διαστημικής γεωδαισίας,” Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2012.
- [43] “Strong geomagnetic storm reaches Earth, continues through weekend.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.noaa.gov/stories/strong-geomagnetic-storm-reaches-earth-continues-through-weekend>
- [44] “About The SDO Mission.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/mission/>
- [45] “SafeSpace Radiation Belt Environmental Indicators for the Safety of Space Assets.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.safespace-h2020.eu/>
- [46] “The Earth’s Plasmasphere.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://plasmasphere.nasa.gov/>

- [47] “Solar Eclipses in 2023 and 2024.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/solar-system/skywatching/night-sky-network/solar-eclipses-in-2023-and-2024/>
- [48] “ESA’s Solar Orbiter traces solar wind to its source.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Solar\\_Orbiter/ESA\\_s\\_Solar\\_Orbiter\\_traces\\_solar\\_wind\\_to\\_its\\_source](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/ESA_s_Solar_Orbiter_traces_solar_wind_to_its_source)
- [49] “Can’t stop won’t stop: Solar Orbiter shows the Sun raging on.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Solar\\_Orbiter/Can\\_t\\_stop\\_won\\_t\\_stop\\_Solar\\_Orbiter\\_shows\\_the\\_Sun\\_raging\\_on](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/Can_t_stop_won_t_stop_Solar_Orbiter_shows_the_Sun_raging_on)
- [50] “Zooming into the Sun with Solar Orbiter.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Solar\\_Orbiter/Zooming\\_into\\_the\\_Sun\\_with\\_Solar\\_Orbiter](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/Zooming_into_the_Sun_with_Solar_Orbiter)
- [51] “The Sun.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.lpl.arizona.edu/solarsystem/sun>
- [52] “Solar System Facts.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/solar-system/solar-system-facts/>
- [53] “Solar System Exploration.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/solar-system/>
- [54] “How many planets are outside our Solar System?” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/How\\_many\\_planets\\_are\\_outside\\_our\\_Solar\\_System](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/How_many_planets_are_outside_our_Solar_System)
- [55] “What Is... Earth’s Atmosphere?” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/general/what-is-earths-atmosphere/>
- [56] “Ionospheric Connection Explorer.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/mission/icon>
- [57] “Postcards from the Edge of Space: Scientists Present New Ionosphere Images and Science.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/missions/icon/postcards-from-the-edge-of-space-scientists-present-new-ionosphere-images-and-science/>
- [58] “10 Things to Know About the Ionosphere.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/earth/10-things-to-know-about-the-ionosphere/>

- [59] “NOAA Space Weather Scales.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>
- [60] “Solar Orbiter overview.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Solar\\_Orbiter\\_overview](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter_overview)
- [61] “New Models Illuminate Sun-to-Earth Space Weather Dynamics.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/Shaping\\_the\\_Future/New\\_Models\\_Illuminate\\_Sun-to-Earth\\_Space\\_Weather\\_Dynamics](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/New_Models_Illuminate_Sun-to-Earth_Space_Weather_Dynamics)
- [62] “Protecting Earth from space weather.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Preparing\\_for\\_the\\_Future/Space\\_for\\_Earth/Energy/Protecting\\_Earth\\_from\\_space\\_weather](https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Energy/Protecting_Earth_from_space_weather)
- [63] “Space Weather Projects and Core Activities.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_Weather\\_Projects\\_and\\_Core\\_Activities](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Weather_Projects_and_Core_Activities)
- [64] “The science of space weather.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2018/11/The\\_science\\_of\\_space\\_weather](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/11/The_science_of_space_weather)
- [65] “Space weather.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Space\\_weather](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Space_weather)
- [66] “Space Weather Segment.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_Weather\\_Segment](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Weather_Segment)
- [67] “Proba-3’s new view on space weather.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2024/07/Proba-3\\_s\\_new\\_view\\_on\\_space\\_weather](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2024/07/Proba-3_s_new_view_on_space_weather)
- [68] “Space weather and its hazards.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_weather](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_weather)
- [69] “What is space weather?” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2018/11/What\\_is\\_space\\_weather](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2018/11/What_is_space_weather)
- [70] “The May 2024 solar storm: your questions answered.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_weather/The\\_May\\_2024\\_solar\\_storm\\_your\\_questions\\_answered](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_weather/The_May_2024_solar_storm_your_questions_answered)
- [71] “Solar and Heliospheric Observatory.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/SOHO](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/SOHO)

- [72] “ExoMars rover model testing science mode.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2021/02/ExoMars\\_rover\\_model\\_testing\\_science\\_mode](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/02/ExoMars_rover_model_testing_science_mode)
- [73] “SOHO data used for real-time space radiation forecasting.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/SOHO\\_data\\_used\\_for\\_real-time\\_space\\_radiation\\_forecasting](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/SOHO_data_used_for_real-time_space_radiation_forecasting)
- [74] “ESA’s space weather mission to be protected against stormy Sun.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/ESA\\_s\\_space\\_weather\\_mission\\_to\\_be\\_protected\\_against\\_stormy\\_Sun](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/ESA_s_space_weather_mission_to_be_protected_against_stormy_Sun)
- [75] “The ‘no name’ space weather mission.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Space\\_Safety/The\\_no\\_name\\_space\\_weather\\_mission](https://www.esa.int/Space_Safety/The_no_name_space_weather_mission)
- [76] “Airbus to build ESA’s Vigil space weather forecasting mission.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Vigil/Airbus\\_to\\_build\\_ESA\\_s\\_Vigil\\_space\\_weather\\_forecasting\\_mission](https://www.esa.int/Space_Safety/Vigil/Airbus_to_build_ESA_s_Vigil_space_weather_forecasting_mission)
- [77] “The Sun up close.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Solar\\_Orbiter](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter)
- [78] “ESA’s Proba-3 will create artificial solar eclipses.” Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/Proba\\_Missions/ESA\\_s\\_Proba-3\\_will\\_create\\_artificial\\_solar\\_eclipses](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Proba_Missions/ESA_s_Proba-3_will_create_artificial_solar_eclipses)
- [79] A. Atabati, M. Alizadeh, H. Schuh, and L.-C. Tsai, “Ionospheric Scintillation Prediction on S4 and ROTI Parameters Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 11, p. 2092, May 2021, doi: 10.3390/rs13112092.