



ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ & ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Φασματική ανάλυση των δεδομένων των μετρητών νετρονίων σε σύγκριση με ηλιακούς και γεωμαγνητικούς δείκτες για το χρονικό διάστημα 1965-2018”



Μαρία Τσίχλα

A.M. 201742

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Ε. Μαυρομιχαλάκη, Ομότιμη Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ (Επιβλέπουσα)

Ι. Δαγκλής, Καθηγητής Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Π. Πρέκα-Παπαδήμα, Επίκουρη Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Αθήνα 2019



ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ & ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Φασματική ανάλυση των δεδομένων των μετρητών νετρονίων σε σύγκριση με ηλιακούς και γεωμαγνητικούς δείκτες για το χρονικό διάστημα 1965-2018”

Μαρία Τσίχλα

A.M. 201742

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Ε. Μαυρομιχαλάκη, Ομότιμη Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ (Επιβλέπουσα)

Ι. Δαγκλής, Καθηγητής Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Π. Πρέκα-Παπαδήμα, Επίκουρη Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Αθήνα 2019

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
Abstract.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα	9
1.1 Ηλιακή δραστηριότητα και μαγνητικό πεδίο	9
1.1.1 Ηλιακές κηλίδες	11
1.1.2 Ηλιακές εκλάμψεις.....	12
1.1.3 Στεμματικές εκτινάξεις μάζας	13
1.2 Εκτόνωση του Ηλιακού στέμματος.....	14
1.2.1 Παγωμένη ροή Alfvén.....	15
1.3 Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο	16
1.4 Γήινη Μαγνητόσφαιρα	17
1.4.1 Γεωμαγνητικοί δείκτες	19
1.4.1.1 Δείκτης Dst	19
1.4.1.2 Δείκτες Kp και Ap	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Κοσμική Ακτινοβολία	23
2.1 Κοσμικές ακτίνες.....	23
2.2 Ενεργειακό φάσμα κοσμικών ακτίνων.....	25
2.3 Πηγές κοσμικής ακτινοβολίας.....	27
2.4 Πρότυπα προέλευσης	29
2.5 Ατμοσφαιρικός καταιγισμός.....	30
2.6 Ανίχνευση κοσμικής ακτινοβολίας	32
2.6.1 Όργανα καταγραφής	32

2.6.2 Μετρητές νετρονίων.....	34
2.6.2.1 Αρχές λειτουργίας.....	34
2.6.2.2 Παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων.....	36
2.6.2.3 Σταθμοί νετρονίων “πραγματικού χρόνου”.....	38
2.6.2.4 Σταθμός νετρονίων της Αθήνας.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Μαθηματική Ανάλυση	41
3.1 Fourier Transform.....	41
3.2 Ανάλυση Wavelet.....	43
3.2.1 Συνάρτηση Morlet.....	43
3.2.2 Continuous wavelet transform.....	43
3.2.3 Κανονικοποίηση.....	46
3.2.4 Κλίμακες.....	46
3.2.5 Κλίμακα wavelet και Fourier συχνότητα.....	47
3.2.6 Φάσμα wavelet και Κώνος επιρροής.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Αποτελέσματα Φασματικής Ανάλυσης.....	49
4.1 Συλλογή δεδομένων.....	49
4.2 Φασματική ανάλυση των ηλιακών κηλίδων.....	50
4.3 Φασματική ανάλυση του Διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.....	54
4.4 Φασματική ανάλυση του γεωμαγνητικού δείκτη A_p	60
4.5 Φασματική ανάλυση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.....	65
4.5.1 Μεγάλης κλίμακας ανάλυση.....	65
4.5.2 Μικρής κλίμακας ανάλυση.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα-Προοπτικές.....	77
5.1 Συμπεράσματα.....	77

5.2 Προοπτικές.....	81
Αναφορές.....	83

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών στα πλαίσια των σπουδών μου για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην 'Αστροφυσική' με την επίβλεψη της ομ. Καθηγήτριας του Τμήματος Φυσικής κ. Ελένης Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη και την συνεπίβλεψη του καθ. κ. Ιωάννη Δαγκλή και της Επικ. καθηγ. κ. Παναγιώτας Πρέκα-Παπαδήμα. Η εργασία αυτή διαπραγματεύεται ένα από τα σύγχρονα θέματα της Φυσικής γενικά και ειδικότερα του Διαστημικού καιρού. Ασχολείται με το θέμα της φασματικής ανάλυσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που μετριέται από τους μετρητές νετρονίων σε σχέση με την ανάλυση διαφόρων ηλιακών και γεωμαγνητικών δεικτών.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κύρια επιβλέπουσα και υπεύθυνη του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Ελένη Μαυρομιχαλάκη για την επιστημονική της καθοδήγηση αλλά και την ηθική της συμπαράσταση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου και της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερα ευχαριστώ την διδάκτορα κ. Μαρία Γεροντίδου, ΕΔΙΠ του Τμήματος Φυσικής για τις επιστημονικές παρατηρήσεις και για την βοήθειά της κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας του άρθρου. Τα μέλη της ομάδας κοσμικής ακτινοβολίας ΥΔ Δήμητρα Λίγγρη, ΥΔ Αναστασία Τεζάρη και ΥΔ Λουκά Ξαπλαντέρη ευχαριστώ θερμά για τη συνεργασία τους. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Δρ. Χρήστο Κατσαβριά για τις χρήσιμες υποδείξεις του στη τεχνική της Wavelet Analysis.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω σε όλες τις ερευνητικές ομάδες κοσμικής ακτινοβολίας για την διάθεση των δεδομένων των Μετρητών Νετρονίων και ιδιαίτερα στην Ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του IZMIRAN της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών.

Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής δημοσιεύτηκαν πρόσφατα στο διεθνές περιοδικό Solar Physics: Maria Tsihla, M. Gerontidou, H. Mavromichalaki: "Spectral analysis of solar and geomagnetic parameters in relation to cosmic ray intensity for the time period 1965-2018" Solar Physics, 294, 15, DOI: 10.1007/s11207-019-1403-0. Το paper αυτό παρατίθεται στο τέλος αυτής της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τον Δημήτρη για όλη τη στήριξη που μου δίνουν καθημερινά.

Abstract

Spectral analysis of cosmic-ray intensity as well as solar and geomagnetic parameters was performed aiming to identify possible new periodicities and affirm the well-known ones. Specifically, short-, mid-, and long-term periodicities of the parameters cosmic-ray intensity, sunspot number, B_z -component of the interplanetary magnetic field and geomagnetic Ap index over the time period 1965 – 2018, covering five solar cycles from 20 to 24, are demonstrated. For this purpose, two different techniques, fast Fourier transformation and wavelet analysis, have been used in order to ensure accuracy in the frequency values and also their localization in the time series. The periodicities resulting from this comprehensive study, including the well-known 11-year and 27-day periods alongside their harmonics of 5.5-year and 6-, 9-, and 13.9-day periods respectively, the ≈ 1.3 -year and 1.7-year periods, were found in all of the above parameters except for the B_z -component of the interplanetary magnetic field. New periodicities such as the ≈ 10 -month period for sunspot number and cosmic-ray intensity and the ≈ 3 -year period for sunspot number, Ap index, and cosmic-ray intensity, were also determined. Furthermore, the newly introduced splitting of the 27-day periodicity into two adjacent peaks was confirmed in the Fourier spectra of the interplanetary magnetic field and the geomagnetic Ap index. It was concluded that there are several common periodicities appearing in cosmic-ray intensity, solar activity and Ap index. This result, in association with the fact that the spectral behavior of geomagnetic-activity parameters provides invaluable information about physical processes involved, indicates that the Ap index might be used as a suitable index for space-weather forecasting.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες είναι ενεργητικά σωματίδια που προέρχονται έξω από το ηλιακό μας σύστημα και έχουν ενέργειες μεταξύ 10^6 - 10^{20} eV nucleon⁻¹. Οι κοσμικές αυτές ακτίνες ταξιδεύουν μέσα στην ηλιόσφαιρα και όταν φτάνουν στην ατμόσφαιρα της Γης πυροδοτούν σωματιδιακούς και ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς παράγοντας δευτερογενή σωματίδια που ονομάζονται δευτερογενείς κοσμικές ακτίνες. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της κοσμικής ακτινοβολίας μέσα στην ηλιόσφαιρα είναι η μεταβλητότητα της σε μία ευρεία χρονική κλίμακα. Οι προσωρινές διακυμάνσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των κοσμικών σωματιδίων με το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο που μεταφέρεται από τον ηλιακό άνεμο. Επιπροσθέτως υπάρχει και η γνωστή αντισυσχέτιση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ηλιακή δραστηριότητα. Γι'αυτό είναι αναγκαίο να προσδιορίσουμε το μοτίβο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ροής του προκειμένου να προσδιορίσουμε την χωροχρονική διαμόρφωσή του και να την συνδέσουμε με τις διακυμάνσεις της κοσμικής ακτινοβολίας.

Η διαθεσιμότητα συνεχών μετρήσεων της κοσμικής ακτινοβολίας όπως καταγράφεται από το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων (Simpson, 2000) όπως και ηλιακών και διαπλανητικών δεδομένων, μας επιτρέπει να ερευνήσουμε τη σχέση μεταξύ κοσμικής ακτινοβολίας, διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και ηλιακής δραστηριότητας. Παρόλο που οι περιοδικότητες στην κοσμική ακτινοβολία (π.χ. Kudela, Ananth, and Venkatesan, 1991; Mavromichalaki et al., 2003a, 2003b; Kudela et al., 2010; Chowdhury, Kudela, and Moon, 2016) και σε ηλιακές και γεωμαγνητικές παραμέτρους έχουν μελετηθεί στο παρελθόν από πολλούς ερευνητές (π.χ. Paularena, Szabo, and Richardson, 1995; Prabhakaran Nayar et al., 2002; Chowdhury and Dwivedi, 2011; Poblet and Azpilicueta, 2018), αξίζει να τις επαληθεύσουμε για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και να εντοπίσουμε καινούργιες.

Οι Valdes-Galicia, Perez-Enriquez, and Otaola (1996) και Mavromichalaki et al. (2003b) έχουν βρει την μεσαίας κλίμακας περιοδικότητα των 1.68-χρόνων στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας στο ενεργειακό εύρος που μετράνε οι μετρητές νετρονίων στην επιφάνεια της Γης. Αυτή η περιοδικότητα μπορεί να είναι αποτέλεσμα φαινομένων που γεννιούνται στο εσωτερικό του Ήλιου και αναδύονται και μεταφέρονται με την ροή του μαγνητικού πεδίου. Πρόσφατα οι Singh and Badruddin (2017) εξέτασαν τους δύο τελευταίους ηλιακούς μαγνητικούς κύκλους (1968-1989 και 1989-2014) για τον γεωμαγνητικό δείκτη A_p και βρήκαν γνωστές περιοδικότητες, όπως η 27-ήμερη συνοδική περίοδος με τις αρμονικές της, η 154-ημερών που ονομάζεται περίοδος Rieger, η 6-μηνών, 1-χρόνου, 1.3- και 1.7-χρόνων. Επίσης παρατηρήθηκε και ~1.85-χρόνων διαταραχή. Πολλές σημαντικές μεσαίας κλίμακας περιοδικότητες, όπως, 175, 133, 113, 104, 84 και 63 ημέρες ανιχνεύονται στην ηλιακή δραστηριότητα όπως αναφέρεται από τους Joshi, Pant, and Manoharan (2006). Στην εργασία

τους παρουσιάστηκε η φασματική ανάλυση του αριθμού των ηλιακών κηλίδων, των περιοχών των κηλίδων και του δείκτη των ηλιακών εκλάμψεων κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 23. Ένα σημαντικό συμπέρασμα ήταν ότι οι περιοδικές διαταραχές στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο του Ήλιου παρουσιάζουν μία ασυμμετρική συμπεριφορά, ενώ οι περιοδικότητες των 175 και 133 ημερών είναι πολύ σημαντικές στα δεδομένα των κηλίδων του βόρειου ημισφαιρίου.

Επιπροσθέτως, οι Kudela and Sabbah (2016) μελέτησαν τις ψευδοπεριοδικές και ακανόνιστες παροδικές διακυμάνσεις των χαμηλοενεργειακών κοσμικών ακτίνων από επίγειες άμεσες μετρήσεις όπως τους μετρητές νετρονίων και τα τηλεσκόπια μιονίων. Συμπέραναν ότι τα φάσματα wavelet είναι χρήσιμα εργαλεία στην μελέτη της δομής των ψευδοπεριοδικών διακυμάνσεων και της παροδικής τους συμπεριφοράς. Μελέτες αφιερωμένες στην περιοδική συμπεριφορά του ηλιακού και διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου έχουν αναφερθεί από πολλούς συγγραφείς (Barganji and Ludmany, 2003; Chang, 2014) και όπως δήλωσαν οι Bazilevskaya et al. (2014), πολλά χαρακτηριστικά των ηλιακών ψευδοδιετών ταλαντώσεων (quasi-biennial oscillations-QBOs) με χρονικές κλίμακες από 0.6 έως 4 χρόνια, είναι κοινά σε διαφορετικές παρατηρήσεις. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν ποικίλη και διακοπτόμενη περιοδικότητα καθώς σημάδια στοχαστικότητας.

Για την παρούσα φασματική ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες και μηνιαίες χρονοσειρές των παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω, του αριθμού των ηλιακών κηλίδων, της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, του γεωμαγνητικού δείκτη Ap και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, για το χρονικό διάστημα 1965-2018 που καλύπτει τους ηλιακούς κύκλους 20-24. Εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι ανάλυσης, wavelet ανάλυση (Torrence and Compo, 1998) και fast Fourier μετασχηματισμός (Brigham, 1988), με στόχο να προσδιοριστούν σημαντικές περιοδικότητες διαφόρων κλιμάκων. Οι διάφορες κλίμακες χωρίζονται σε μικρή, μεσαία και μεγάλη. Οι μικρές κλίμακας περιοδικότητες αναφέρονται σε περιοδικότητες από 2 έως 30 ημέρες, οι μεσαίες αναφέρονται από 30 μέρες έως 2 χρόνια και οι μεγάλης κλίμακας περιοδικότητες αναφέρονται σε 2 χρόνια και πάνω. Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα από τις δύο μεθόδους και για τις τέσσερις παραμέτρους και προκύπτουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Οι περιοδικότητες που προκύπτουν είναι ο ήδη γνωστός 11ετής κύκλος και η 27-ημερη ηλιακή περιστροφή μαζί με τις αρμονικές τους, 5.5-χρόνων και 6-, 9-, και 13.9-ημερών περιοδικότητες. Μαζί με τις περιοδικότητες αυτές εμφανίζονται επίσης και οι 1.3-, και 1.7-χρόνων σε όλες τις παραμέτρους εκτός από την Bz συνιστώσα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Προσδιορίστηκαν επίσης καινούργιες περιοδικότητες, όπως η 10-μηνών στις ηλιακές κηλίδες και στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και η 3-χρόνων στις ηλιακές κηλίδες, τον γεωμαγνητικό δείκτη Ap και την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Επιπλέον επιβεβαιώθηκε ο

διχασμός της 27-ημερης κορυφής στο φάσμα της Bz συνιστώσας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και του γεωμαγνητικού δείκτη Ap. Το συμπέρασμα είναι ότι βρέθηκαν πολλές κοινές περιοδικότητες στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, στις ηλιακές κηλίδες και στον γεωμαγνητικό δείκτη Ap. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η φασματική συμπεριφορά των δεικτών γεωμαγνητικής δραστηριότητας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες που αφορούν τις φυσικές διαδικασίες που συμβαίνουν στην μαγνητόσφαιρα καθιστά τον γεωμαγνητικό δείκτη Ap κατάλληλο για την πρόγνωση Διαστημικού καιρού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΗΛΙΑΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Γενικά

Ο Ήλιος είναι ο αστέρας στο κέντρο του ηλιακού μας συστήματος και ο πιο κοντινός στη Γη μας. Είναι μία γιγάντια σφαίρα από πλάσμα, οι κινήσεις του οποίου παράγουν το μαγνητικό πεδίο του Ήλιου μέσω λειτουργίας δυναμό. Το μαγνητικό πεδίο είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της ηλιακής δραστηριότητας. Όλα τα εκρηκτικά και μη φαινόμενα στον Ήλιο σχετίζονται με τα τοπολογικά χαρακτηριστικά των μαγνητικών πεδίων. Γεννιούνται στη ζώνη μεταφοράς και διαδίδονται έως το ηλιακό στέμμα. Τα φαινόμενα στο ηλιακό στέμμα είναι αυτά που καθορίζουν τον διαστημικό καιρό, από την εκτόνωση του στέμματος στο διαπλανητικό διάστημα μέσω του ηλιακού ανέμου έως τα εκρηκτικά γεγονότα, όπως οι ηλιακές εκλάμψεις και οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας. Παρόλο που το μαγνητικό πεδίο της Γης την προστατεύει από τον συνεχή ηλιακό άνεμο, οι δραστηριότητες αυτές πυροδοτούν μία αλυσίδα αντιδράσεων στην μαγνητόσφαιρα και ιονόσφαιρα της Γης που έχουν σαν αποτέλεσμα γεωμαγνητικές καταιγίδες και έντονο πολικό σέλας. Οι καταιγίδες αυτές επηρεάζουν τεχνολογίες όπως την πλοήγηση με GPS, τις επικοινωνίες μέσω δορυφόρων και πολλές φορές προκαλούν και διακοπές ρεύματος. Οι μελέτες Διαστημικού καιρού χρησιμοποιούν παρατηρήσεις, ανάλυση δεδομένων και μοντελοποίηση προκειμένου να κατανοήσουν και να προβλέψουν την περίπλοκη φύση της αλληλεπίδρασης του Ήλιου, του ηλιακού ανέμου, της μαγνητόσφαιρας και της ιονόσφαιρας και το αντίκτυπό τους στα τεχνολογικά συστήματα.

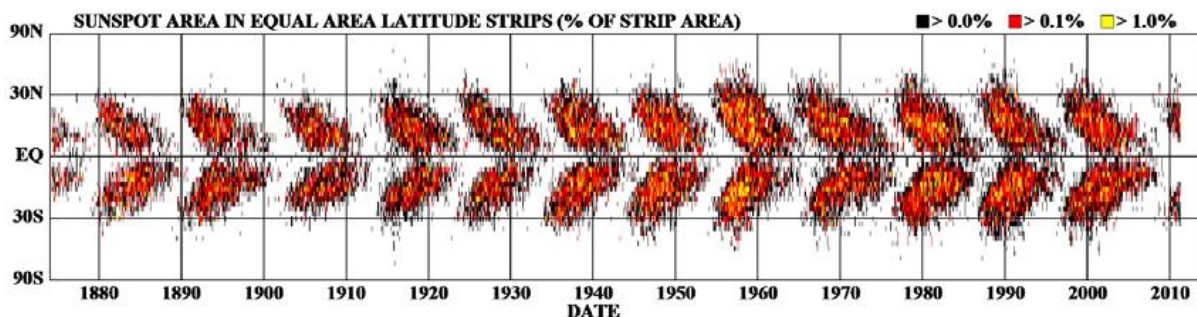
1.1 Ηλιακή δραστηριότητα και μαγνητικό πεδίο

Η ηλιακή δραστηριότητα έχει μια περιοδικότητα 11 χρόνων που ονομάζεται ηλιακός κύκλος. Οι θεωρητικές έρευνες είχαν αρχικά σκοπό να εξηγήσουν αυτή την περιοδικότητα. Η θεωρία του Babcock είναι μία επέκταση του μοντέλου της Ηλιακής Μαγνητικής Γεννήτριας του Parker και εξηγεί το δυναμό του μέσου μαγνητικού πεδίου του Ήλιου. Στη ζώνη μεταφοράς, οι κινήσεις του πλάσματος δημιουργούν ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με το μοντέλο του ηλεκτρικού δυναμό που έχει τη μορφή διπόλου. Το μαγνητικό αυτό πεδίο δημιουργεί, στη συνέχεια, βρόχους οι οποίοι παγωμένοι μέσα στο πλάσμα, αναδύονται στην ατμόσφαιρα του Ήλιου. Λόγω του φαινομένου της διαφορικής περιστροφής του Ήλιου οι δυναμικές γραμμές κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα στο ύψος του ισημερινού από ότι σε μεγαλύτερα ηλιογραφικά πλάτη με αποτέλεσμα να “ξεχειλώνουν”. Με την πάροδο του χρόνου οι

δυναμικές γραμμές πυκνώνουν στο μέσο κάθε ημισφαιρίου και μέρος της κινητικής ενέργειας του Ήλιου μετατρέπεται σε μαγνητική, γεγονός που προκαλεί αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε αυτές τις περιοχές σε μερικές εκατοντάδες Gauss.

Η ανάδυση των βρόχων εξηγείται με την προσέγγιση των λεπτών σωλήνων ροής. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή ένας σωλήνας ροής αντιμετωπίζεται ως μία χορδή από Λανγκρανζιανό ρευστό που υπόκειται στη δράση μαγνητικών, βαρυτικών και περιστροφικών δυνάμεων καθώς και δυνάμεων πίεσης. Έχει δειχθεί ότι ένας οριζόντιος, μη περιστρεφόμενος σωλήνας ροής, ο οποίος αναδύεται από τη ζώνη μεταφοράς, αναπτύσσει ταχέως ένα σχήμα μανιταριού και χωρίζεται σε δύο δίνες οι οποίες κινούνται αζιμουθιακά και όχι ακτινικά. Αν όμως το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του σωλήνα είναι περιστρεφόμενο, τότε ο σωλήνας διατηρείται. Ο ανερχόμενος σωλήνας ροής συστρέφεται ακόμα περισσότερο με αποτέλεσμα η συστροφή να μετατρέπεται σε σπείρα ή αλλιώς μαγνητικά κορδόνια. Αυτό το φαινόμενο προτάθηκε από τον Babcock (1961) ως ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό της δημιουργίας των κηλίδων.

Η κατανομή των ηλιακών κηλίδων στα γεωγραφικά πλάτη που απεικονίζονται στο διάγραμμα της πεταλούδας (σχήμα 1.1) οφείλεται σε ένα επαρκώς ισχυρό μαγνητικό πεδίο έντασης 10^5 G στη βάση της ζώνης μεταφοράς. Επομένως, η δυναμική των σωλήνων ροής των μαγνητικών γραμμών εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες στη βάση της ζώνης μεταφοράς. Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα μαγνητικό σωλήνα σε αυτό το σημείο είναι η φυγόκεντρος δύναμη η οποία τείνει να ανυψώσει τον βρόχο λόγω της γρήγορης περιστροφής του πλάσματος στο εσωτερικό του σωλήνα και η δύναμη λόγω της μαγνητικής καμπυλότητας η οποία εξισορροπεί την φυγόκεντρο. Λόγω της μηχανικής ισορροπίας επιτρέπεται η αποθήκευση σωλήνων ροής στη βάση της ζώνης μεταφοράς με αποτέλεσμα σε αυτό το σημείο το μαγνητικό πεδίο να πιάνει τιμές 10^5 G. Σε αυτό το σημείο ο σωλήνας περνάει το όριο της πλευστότητας, χάνει την σταθερότητα του και η φυγόκεντρος δύναμη τον οδηγεί στην επιφάνεια του Ήλιου.



Σχήμα 1.1 Το διάγραμμα πεταλούδας. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα οι κηλίδες εμφανίζονται σε ηλιογραφικά πλάτη $\pm 30^\circ$, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται η κατανομή τους σε χρονικά διαστήματα 11 ετών κύκλων από το 1880 έως το 2010 (NASA's Marshall Space Flight Center).

Ο μηχανισμός δημιουργίας όμως, του μέσου μαγνητικού πεδίου του Ήλιου που περιγράφηκε παραπάνω, δεν εξηγεί τις τόσο υψηλές τιμές του μαγνητικού πεδίου στη βάση της ζώνης μεταφοράς και άρα την απώλεια αστάθειας και την ανύψωση των βρόχων. Προκειμένου να λυθεί αυτό το πρόβλημα πρέπει να βρεθεί μία θεωρία ηλιακού δυναμό που να πλησιάζει αυτά τα αποτελέσματα.

Οι κινήσεις στη ζώνη μεταφοράς είναι τόσο τυρβώδης που μόνο κατά μέσο όρο μπορούν να προσεγγιστούν από την διαφορική κίνηση, την μέση περιστροφική κίνηση και την μεσημβρινή κυκλοφορία. Το ηλιακό δυναμό παράγει ισχυρά μαγνητικά πεδία τυχαία κατανεμημένα, η μέση τιμή των οποίων δίνει ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό, λοιπόν, είναι σποραδικά κατανεμημένο στο χώρο και το χρόνο και αναδύεται στην επιφάνεια σε τυχαίες στιγμές και περιοχές όταν το συνολικό μαγνητικό πεδίο ξεπερνάει το όριο της πλευστότητας. Με αυτόν τον τρόπο το μέσο πεδίο είναι υπεύθυνο για τις παρατηρούμενες ομαλότητες των μαγνητικών πεδίων των κηλίδων, όπως ο 11-ετής κύκλος, ενώ οι διακυμάνσεις στο πεδίο είναι υπεύθυνες για την ανάδυση των διακριτών βρόχων στις κηλίδες. Στη συνέχεια θα δούμε ότι αυτός ο μηχανισμός είναι υπεύθυνος για διάφορες διαταραχές όχι μόνο στην ηλιακή δραστηριότητα αλλά και στην γεωμαγνητική και στην κοσμική ακτινοβολία.

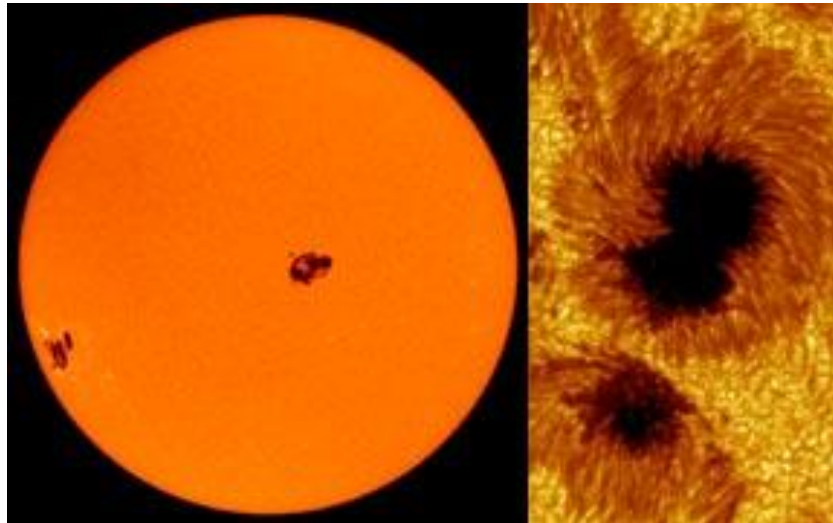
1.1.1 Ηλιακές κηλίδες

Ένας μαγνητικός βρόχος ανέρχεται από την ζώνη μεταφοράς και εμφανίζεται στην επιφάνεια του Ήλιου ως ένας διπολικός βρόχος που δημιουργεί ένα ζεύγος ηλιακών κηλίδων. Οι κηλίδες είναι ψυχρές περιοχές που εμφανίζονται ως σκοτεινές περιοχές πάνω στην επιφάνεια του Ήλιου και χαρακτηρίζονται από ισχυρό μαγνητικό πεδίο (σχήμα 1.2). Επομένως, φαίνεται σαν ένα θερμικό φαινόμενο αλλά στην πραγματικότητα είναι ένα μαγνητικό φαινόμενο. Είναι από τα πιο χαρακτηριστικά ορατά γνωρίσματα του Ηλίου. Μια κηλίδα μετρίου μεγέθους είναι περίπου όσο η Γη. Σχηματίζονται και διαλύονται σε μερικές ημέρες ή και εβδομάδες. Μειώνουν την επιφανειακή θερμοκρασία από τους 6.000K στους 4.200K. Ο λόγος που τα ισχυρά μαγνητικά πεδία ψύχουν την περιοχή είναι ότι καταστέλλουν τη μεταφορά των δινών στο εσωτερικό της καθώς τα σωματίδια κινούνται κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών και όχι εγκάρσια. Η πιο σκοτεινή περιοχή στο κέντρο της κηλίδας ονομάζεται σκιά (umbra) ενώ η λιγότερο σκοτεινή περιοχή γύρω από τη σκιά ονομάζεται παρασκιά (penumbra). Οι κηλίδες παρουσιάζουν μαγνητικό πεδίο έντασης 3.000-4.000 Gauss. Επηρεάζουν το κλίμα της Γης καθώς προκαλούν διακυμάνσεις στην ηλιακή ακτινοβολία και ως μέτρο της ηλιακής δραστηριότητας χρησιμοποιούνται σε μελέτες του Διαστημικού καιρού.

Ο Samuel Heinrich Schwabe (1851) ήταν ο πρώτος επιστήμονας που ανακάλυψε μία περιοδική μεταβολή στον αριθμό των κηλίδων, την οποία προσδιόρισε με διάρκεια 10 ετών. Στη συνέχεια, ο Broun (1858), παρατήρησε ακόμα μία περιοδική μεταβολή στην ηλιακή δραστηριότητα, τεσσάρων εβδομάδων και ο Maunder (1904), έδειξε ότι αυτή η περίοδος

αντιστοιχεί στην περίοδο των 27-ημερών της περιστροφής του ηλιακού ισημερινού. Τέλος, οι Chree (1912) και Bartels (1930) αναπτύσσουν αποτελεσματικές στατιστικές μεθόδους συνέδεσαν τη γεωμαγνητική δραστηριότητα με τις ηλιακές κηλίδες.

Στην εργασία αυτή επιβεβαιώνουμε αυτή τη συσχέτιση καθώς μελετάμε παράλληλα τις περιοδικότητες που εμφανίζονται στη χρονοσειρά των ηλιακών κηλίδων και στη γεωμαγνητική δραστηριότητα και βλέπουμε ότι είναι σχεδόν ίδιες.



Σχήμα 1.2 Ηλιακές κηλίδες (*SOHO (NASA & ESA) and the Royal Swedish Academy of Sciences*)

1.1.2 Ηλιακές εκλάμψεις

Το φαινόμενο των ηλιακών εκλάμψεων (solar flares) είναι το πιο δυναμικό φαινόμενο της ηλιακής δραστηριότητας. Πρόκειται για μία έκρηξη με απότομη απελευθέρωση τεράστιας ενέργειας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αιφνίδια αύξηση της λαμπρότητας στην περιοχή και την επιτάχυνση των σωματιδίων (Pothitakis et.al., 2009) (σχήμα 1.3). Έχει τη βάση του στη φωτόσφαιρα αλλά εκδηλώνεται στη χρωμόσφαιρα. Πρόκειται για εξαιρετικά λαμπρούς φωτεινούς σχηματισμούς που φαίνονται για πολύ περιορισμένο χρόνο, ο οποίος σπάνια ξεπερνά τη μία ώρα. Από επίγειες παρατηρήσεις φαίνονται σαν φωτεινές περιοχές στον Ήλιο στα οπτικά μήκη κύματος και σαν εκρήξεις θορύβου στα ραδιοκύματα. Για την παρατήρηση των εκλάμψεων το πιο κατάλληλο μήκος κύματος είναι η φασματική γραμμή εκπομπής $H\alpha$ του υδρογόνου στην οποία παρατηρείται και η χρωμόσφαιρα.

Ως αίτιο δημιουργίας των εκλάμψεων, σήμερα, αναφέρεται η αστάθεια του μαγνητικού πεδίου στις περιοχές όπου εμφανίζονται. Στην περιοχή των εκλάμψεων παρατηρείται απότομη άνοδος της θερμοκρασίας της χρωμοσφαιρικής ύλης από λίγες χιλιάδες βαθμούς, που είναι και η κανονική, σε πολλές εκατοντάδες χιλιάδες βαθμούς και

μέχρι τους 1.000.000 βαθμούς. Στα άμεσα αποτελέσματα των εκλάμψεων συμπεριλαμβάνεται και η εκτίναξη μεγάλων ποσοτήτων χρωμοσφαιρικής ύλης με εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες και σε πολύ μεγάλα ύψη. Η εκτινασόμενη ύλη σχηματίζει τότε τις ενεργητικές προεξοχές, οι οποίες όταν παρατηρούνται κοντά στο χείλος του ηλιακού δίσκου είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσες αλλά και πολύ εύγλωττοι μάρτυρες των φοβερών γεγονότων που συμβαίνουν στην επιφάνεια του Ηλίου. Τις εκλάμψεις ακολουθεί ακτινοβολία σε όλα σχεδόν τα μήκη κύματος. Περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν η σωματιδιακή εκπομπή, οι ακτίνες Χ, οι υπεριώδεις ακτίνες και η ραδιοακτινοβολία. Ανάλογα με τη λαμπρότητά τους στις ακτίνες Χ χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- εκλάμψεις Χ που είναι οι μεγαλύτερες
- εκλάμψεις Μ
- εκλάμψεις C
- εκλάμψεις Α και Β που είναι και ασθενέστερες.

Σε αυτές τις κατηγορίες υπάρχει και περαιτέρω διαχωρισμός, για παράδειγμα εκλάμψεις Χ2 ή Χ3.



Σχήμα 1.3 Ηλιακή Έκλαμψη (NASA's Goddard Space Flight Center/SDO)

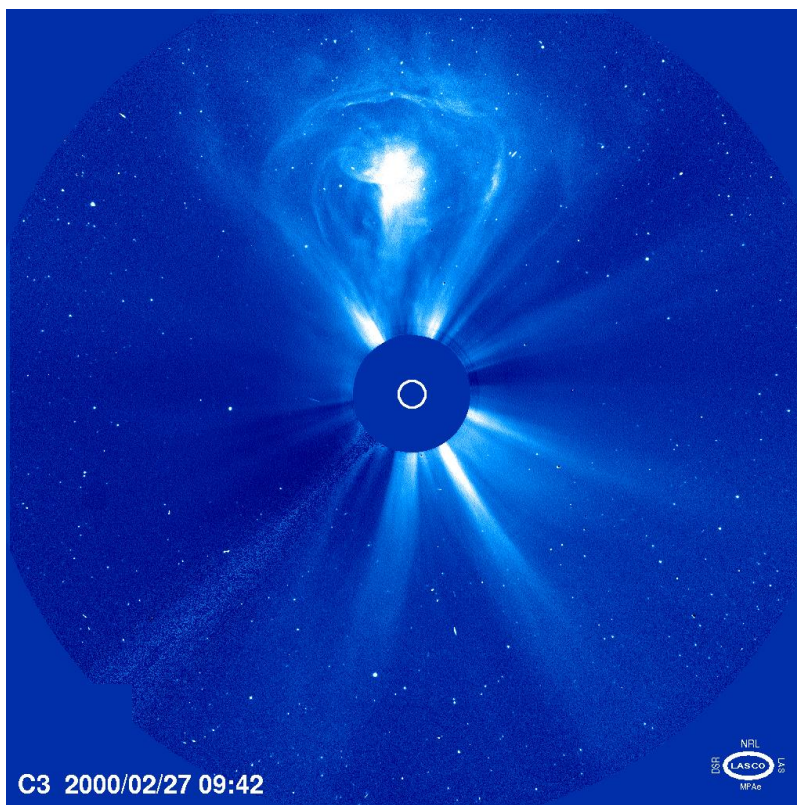
1.1.3 Στεμματικές εκτινάξεις μάζας

Ο Ήλιος διαρκώς εκτινάσσει υλικό στο μεσοδιαπλανητικό διάστημα. Πολλές φορές από τα κέντρα δράσης του Ήλιου δημιουργούνται μαγνητικές φιάλες. Σε ορισμένες περιπτώσεις μια τέτοια φιάλη που αποτελείται από πλασμοειδές με μάζα $\geq 10^{16}$ g και ενέργεια $\geq 10^{32}$ erg μπορεί να αποσπαστεί ολόκληρη και να διαφύγει από τον Ήλιο (σχήμα 1.4). Δημιουργείται τότε μία εκτόξευση στεμματικού υλικού ευρύτερα γνωστή ως CME (Coronal Mass Ejection), όπου το πλάσμα μαζί με το πρότερα σταθεροποιημένο πεδίο αποχωρίζεται από τον Ήλιο. Το υλικό τους εκτοξεύεται βαθμιαία στο διάστημα με μεγάλη ταχύτητα ή ενσωματώνεται μέσα

στο γρήγορο ηλιακό άνεμο που προέρχεται από τις στεμματικές οπές του Ήλιου, κυρίως τις πολικές. Μία μεγάλη CME περιέχει 1.000.000.000 τόνους ύλης και μπορεί να επιταχυνθεί εκατομμύρια μίλια την ώρα σε μια φαντασμαγορική έκρηξη.

Το υλικό του Ηλίου κινείται γρήγορα μέσα στον ενδοπλανητικό χώρο και συγκρούεται με πλανήτες ή διαστημόπλοια που βρίσκονται στο δρόμο του. Οι CMEs συνδέονται κάποιες φορές με τις εκλάμψεις αλλά συνήθως συμβαίνουν ανεξάρτητα.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι τουλάχιστον τέσσερα ηλιακά φαινόμενα ελευθερώνουν ύλη από τον Ήλιο προς το ηλιακό σύστημα και όλα μαζί αποτελούν μια αφετηρία για την κατανόηση των διαδικασιών με τις οποίες ο Διαστημικός καιρός αναπτύσσεται και επηρεάζει το διάστημα κοντά στη Γη: στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας, ηλιακές εκλάμψεις, στεμματικές οπές και ηλιακές προεξοχές.



Σχήμα 1.4 Στεμματική εκτίναξη μάζας (*Lasco, SOHO*)

1.2 Εκτόνωση του Ηλιακού στέμματος

Η ύπαρξη του ηλιακού ανέμου τεκμηριώνεται άμεσα από τις συνεχείς διακυμάνσεις του γεωμαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης, την συνεχή εμφάνιση του πολικού σέλαος

στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και τη μεταβαλλόμενη ένταση της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας. Αρχικά θεωρείτο ότι η εμφανής συσχέτιση της ηλιακής και γεωμαγνητικής δραστηριότητας οφειλόταν σε δέσμες ηλιακής σωματιδιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια όμως, έγινε φανερό ότι ο μεσοπλανητικός χώρος είναι γεμάτος με πλάσμα και μαγνητικά πεδία και ακολούθησε η σύνδεσή τους με το Ηλιακό στέμμα. Το συμπέρασμα ήταν ότι ο Ήλιος διαρκώς βγάζει προς τα έξω μια ροή υψηλά ιονισμένης ύλης, το πλάσμα, παγωμένο μέσα στο οποίο βρίσκεται το ηλιακό μαγνητικό πεδίο. Η ροή αυτή ονομάζεται ηλιακός άνεμος και εκτοξεύεται από τον Ήλιο λόγω της τεράστιας διαφοράς που έχει η πίεση του αερίου στο στέμμα και στον διαπλανητικό χώρο.

Η συνεχής απόθεση θερμότητας, μέσω θερμικής αγωγής, επιτρέπει στο στεμματικό αέριο να απομακρυνθεί αργά από το βαρυτικό δυναμικό του Ήλιου και μετά να επιταχυνθεί σε υπερηχητικές ταχύτητες, καθώς αυξάνεται η απόσταση του από τον Ήλιο. Το αργά διαστελλόμενο στέμμα βρίσκεται σχεδόν σε υδροστατική ισορροπία με μικρή θερμική ενέργεια περίπου ίση με το ένα πέμπτο της αρνητικής βαρυτικής ενέργειας. Ωστόσο, θερμική ενέργεια συνεχώς παρέχεται μέσω θερμικής αγωγής από την υψηλή θερμοκρασία κοντά στον Ήλιο σε κάθε στοιχείο του αερίου, ίσως και από απορρόφηση των κυμάτων Alfvén, με αποτέλεσμα το αέριο να εκτονώνεται για να διατηρηθεί η θερμοκρασία του. Το αποτέλεσμα είναι να προσφέρεται στο αέριο αρκετά περισσότερη ενέργεια από την αρχική θερμική ενέργεια της περιοχής που ξεκίνησε. Έτσι, το βαρυτικά δέσμιο κοντά στον Ήλιο στέμμα σιγά σιγά δραπετεύει από το βαρυτικό δυναμικό του και εκτονώνεται στο κενό προς το άπειρο, καθώς η θερμική ενέργεια συνεχώς αναπληρώνεται. Αυτή είναι μία απλή φυσική περιγραφή της υπερηχητικής εκτόνωσης του στέμματος.

1.2.1 Παγωμένη ροή Alfvén

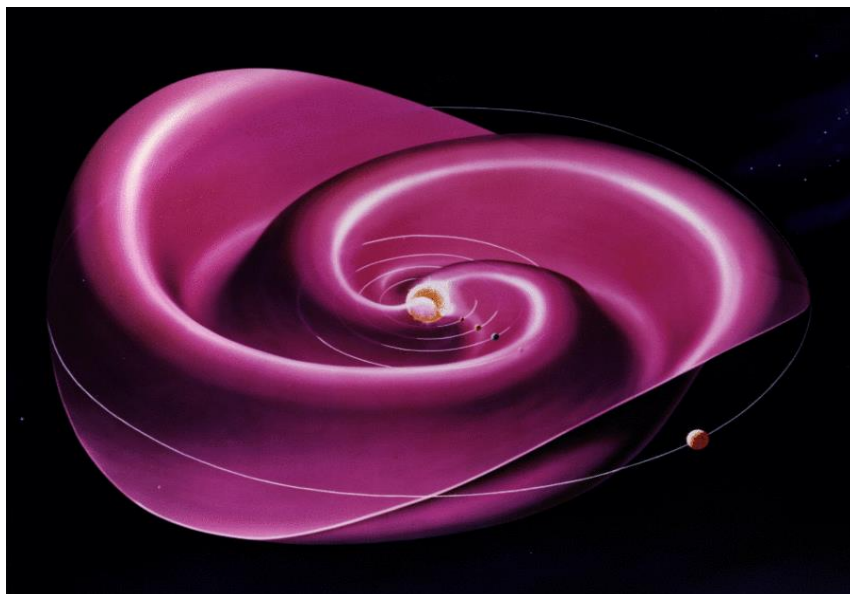
Για να καταλάβουμε την δυναμική του ηλιακού ανέμου είναι σημαντικό να κατανοήσουμε την εγγενή σύνδεση της εκτοξευόμενης ροής πλάσματος με το ηλιακό μαγνητικό πεδίο. Ο Hannes Alfvén έδειξε ότι μία κλειστή γραμμή που κάθε σημείο της κινείται με την ταχύτητα ροής του πλάσματος περικλείει πάντα τις ίδιες δυναμικές γραμμές. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε παγωμένη ροή Alfvén. Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο το πλάσμα κινείται με τις δυναμικές γραμμές με δύο δυνατούς τρόπους, είτε το πλάσμα παρασύρεται από τις δυναμικές γραμμές (frozen out), είτε οι δυναμικές γραμμές παρασύρονται από το πλάσμα (frozen in). Η κατάσταση του frozen in ή του frozen out εξαρτάται από την σχέση των πιέσεων του πλάσματος και του μαγνητικού πεδίου. Στις διάφορες περιοχές του Ήλιου ισχύει και διαφορετικός μηχανισμός. Στη ζώνη μεταφοράς και την φωτόσφαιρα η πυκνότητα ενέργειας του πλάσματος, δηλαδή η πίεση που ασκεί το πλάσμα, είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα ενέργειας του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή από την μαγνητική πίεση. Το αποτέλεσμα είναι το πλάσμα να συμπαρασύρει τις δυναμικές

γραμμές κατά την κίνησή του. Αντίθετα στην χρωμόσφαιρα και στις χαμηλές περιοχές του στέμματος η πυκνότητα ενέργειας του πλάσματος είναι πολύ μικρότερη από την πυκνότητα ενέργειας του μαγνητικού πεδίου. Το αποτέλεσμα είναι το πλάσμα να παρασύρεται από τις δυναμικές γραμμές, δηλαδή το μαγνητικό πεδίο καθορίζει τη θέση και την κίνηση του πλάσματος. Πολύ ψηλά στο στέμμα και στον διαπλανητικό χώρο ισχύει και πάλι ο μηχανισμός frozen in και το ηλιακό μαγνητικό πεδίο παρασύρεται στον διαπλανητικό χώρο μέσα στον ηλιακό άνεμο.

1.3 Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο

Το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο λοιπόν, προέρχεται από περιοχές του Ήλιου όπου το μαγνητικό πεδίο είναι ανοιχτό, δηλαδή από περιοχές όπου οι δυναμικές γραμμές αναδύονται και δεν επιστρέφουν σε μια συζηγή περιοχή αλλά επεκτείνονται επ' άπειρον στο διάστημα. Το ηλιακό μαγνητικό πεδίο παρασύρεται προς τα έξω λόγω της ροής του ηλιακού ανέμου και της περιστροφής του Ήλιου σχηματίζοντας μία Αρχιμήδεια σπείρα. Η μορφή και η έκταση αυτής της σπείρας δεν είναι πάντοτε ίδιες, μεταβάλλονται κατά την διάρκεια του ενδεκαετούς κύκλου, αφού μεταβάλλεται η μορφή του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου και η ένταση του ηλιακού ανέμου. Το μαγνητικό πεδίο από τον Ήλιο παρασύρεται από τον ηλιακό άνεμο με αποτέλεσμα να ταξιδεύει στον διαπλανητικό χώρο και να αποτελεί το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο. Κοντά στη Γη το Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται ότι σχηματίζει γωνία 45° περίπου με την ευθεία Γης-Ήλιου. Η γωνία αυτή με την ακτινική διεύθυνση εξαρτάται από την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και μειώνεται με το ηλιογραφικό πλάτος.

Γύρω από τον μαγνητικό ισημερινό του Ήλιου διακρίνουμε μία επιφάνεια η οποία σηματοδοτεί την περιοχή όπου αλλάζει η πολικότητα των μαγνητικών δυναμικών γραμμών στο εξωτερικό τμήμα του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου. Οι αντίθετα κατευθυνόμενες διευθύνσεις των ανοιχτών δυναμικών γραμμών διαχωρίζονται από ένα λεπτό φύλλο ρεύματος γνωστό και ως διαπλανητικό φύλλο ρεύματος ή ηλιοσφαιρικό φύλλο ρεύματος. Το φύλλο αυτό αλλάζει μορφή κάθε έντεκα χρόνια μαζί με την πολικότητα του ηλιακού μαγνητικού πεδίου. Το φύλλο ρεύματος σχηματίζει γωνία με το επίπεδο της εκλειπτικής εξαιτίας της διαφοροποίησης του άξονα περιστροφής και του μαγνητικού άξονα ως επίσης και της παραμόρφωσης λόγω της τετραπολικής ροπής του ηλιακού μαγνητικού πεδίου. Γι' αυτό το λόγο παρουσιάζει μια κυματοειδή μορφή καθώς επεκτείνεται στο διαπλανητικό χώρο (σχήμα 1.5). Επειδή η Γη άλλωτε βρίσκεται πάνω και άλλωτε κάτω από την ουδέτερη ζώνη ($\beta=0$) παρουσιάζει περιοδικές μεταβολές στην πολικότητα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου με αποτέλεσμα να εμφανίζεται δύο φορές με θετική πολικότητα και δύο φορές με αρνητική στη διάρκεια της ηλιακής περιστροφής 27 ημερών.



Σχήμα 1.5 Το ηλιοσφαιρικό φύλλο ρεύματος είναι μια τρισδιάστατη μορφή σπειροειδούς σχήματος Parker που προκύπτει από την επίδραση του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του Ήλιου στο πλάσμα στο διαπλανητικό μέσο (*Wikipedia*).

Το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο είναι ένα διάνυσμα με τρεις συνιστώσες, δύο από τις οποίες, B_x και B_y , είναι παράλληλες στο επίπεδο της εκλειπτικής. Η τρίτη συνιστώσα B_z είναι κάθετη στο επίπεδο της εκλειπτικής και δημιουργείται από κύματα και διαταραχές στον ηλιακό άνεμο. Όταν το διαπλανητικό και γεωμαγνητικό πεδίο έχουν αντίθετη κατεύθυνση οι δυναμικές γραμμές τους επανασυνδέονται με αποτέλεσμα τη μεταφορά ενέργειας, ορμής και μάζας από τον ηλιακό άνεμο στη μαγνητόσφαιρα. Η ισχυρότερη σύζευξη με τα πιο δραματικά μαγνητοσφαιρικά φαινόμενα συμβαίνει όταν η τιμή της B_z συνιστώσας είναι μεγάλη, δηλαδή όταν το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έχει κατακόρυφη διεύθυνση και φορά προς το κάτω.

Στην εργασία αυτή μελετάμε τη συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου στο Γεωκεντρικό Ηλιακό Μαγνητοσφαιρικό σύστημα συντεταγμένων προκειμένου να έχουμε ένα μέτρο για την μαγνητική δραστηριότητα έξω από την μαγνητόσφαιρα και να συσχετίσουμε αυτήν με την αντίστοιχη ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα.

1.4 Γήινη Μαγνητόσφαιρα

Το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι η πιο σημαντική ασπίδα απέναντι στις βίαιες εκρήξεις του Ήλιου και στις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες. Όταν ο ηλιακός άνεμος αλληλεπιδρά με το γήινο διπολικό μαγνητικό πεδίο δημιουργείται μία κοιλότητα που ονομάζεται μαγνητόσφαιρα. Σε απόσταση 1 AU από τον Ήλιο, δηλαδή στη θέση της Γης, η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου

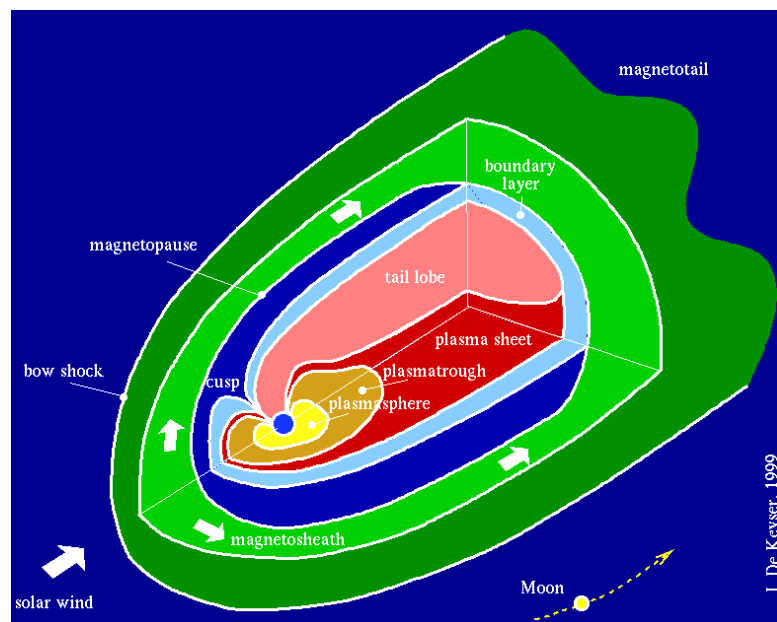
είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου και μεγαλύτερη από την ταχύτητα Alfvén. Αυτό σημαίνει ότι ο ηλιακός άνεμος κινείται γρηγορότερα από το σήμα ότι έχει αλλάξει η πίεση και η πυκνότητα του πλάσματος και των μαγνητικών γραμμών με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα κρουστικό κύμα στο σημείο αυτό. Το κρουστικό, αυτό, κύμα συμπιέζει τις δυναμικές γραμμές στην ημερήσια πλευρά, δημιουργώντας την μαγνητόπαυση όπου η πίεση του ηλιακού ανέμου ισούται με την πίεση του γήινου μαγνητικού πεδίου, και τις επιμηκύνει στην νυχτερινή πλευρά, σχηματίζοντας το σχήμα της ουράς ενός κομήτη (σχήμα 1.6). Στην ημερήσια πλευρά, η μαγνητόσφαιρα επεκτείνεται έως 10 ακτίνες Γης, σε μία ήσυχη περίοδο, ενώ στην νυχτερινή πλευρά η μαγνητοουρά επεκτείνεται σε μερικές εκατοντάδες ακτίνες Γης.

Η μαγνητόσφαιρα αποτελείται από πολλές, μεγάλης κλίμακας, περιοχές με διαφορετικές συνθέσεις, ενέργειες και πυκνότητες του πλάσματος. Η περιοχή ανάμεσα στο κρουστικό κύμα και την μαγνητόπαυση ονομάζεται magnetosheath. Οι περιοχές πάνω από τους μαγνητικούς πόλους της Γης ονομάζονται cusp regions, και σε αυτές τις περιοχές ο ηλιακός άνεμος μπορεί να εισχωρήσει εύκολα στην μαγνητόσφαιρα. Παρόλο που τα εξωτερικά στρώματα της μαγνητόσφαιρας κυριαρχούνται από τις συνθήκες του ηλιακού ανέμου, τα εσωτερικά στρώματα συνδέονται ισχυρά με την ιονόσφαιρα της Γης. Η εσωτερική περιοχή ονομάζεται πλασμόσφαιρα (plasmosphere) και αποτελείται από πυκνό κρύο πλάσμα κυρίως ιονοσφαιρικής προέλευσης και περιστρέφεται μαζί με την Γη. Περικλείεται από τις κλειστές δυναμικές γραμμές του γήινου μαγνητικού πεδίου και το εξωτερικό της όριο ονομάζεται πλασμόπαυση. Η περιοχή έξω από την πλασμόπαυση ονομάζεται plasmatrough και περικλείεται κι αυτή από τις κλειστές δυναμικές γραμμές, είναι πολύ λεπτή και δεν περιστρέφεται. Η μαγνητοουρά αποτελείται κυρίως από δύο λοβούς αντίθετης μαγνητικής πολικότητας. Κάθε λοβός είναι η μαγνητοσφαιρική επέκταση των μαγνητικών γραμμών που προέρχονται από την πολική κοιλότητα της ιονόσφαιρας. Οι λοβοί χωρίζονται από το φύλλο πλάσματος, το οποίο περιέχει θερμό πλάσμα. Το φύλλο πλάσματος είναι μία πολύ δυναμική περιοχή. Διαταραχές στο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο μπορούν να πυροδοτήσουν ασταθή συμπεριφορά σε αυτή την περιοχή, κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας που ονομάζεται μαγνητοσφαιρική υποκαταιγίδα. Το φύλλο πλάσματος βρίσκεται στις μαγνητικές γραμμές που έχουν βάση στις περιοχές του σέλαος

Η μαγνητόσφαιρα είναι γεμάτη από μία ποικιλία ρευμάτων που διαμορφώνουν το μαγνητικό πεδίο και ενώνουν διαφορετικές περιοχές. Το μαγνητοσφαιρικό σύστημα περιλαμβάνει, ένα μεγάλης κλίμακας ρεύμα που ρέει κατά μήκος των γεωμαγνητικών γραμμών στην ημερήσια πλευρά, ρεύματα που ρέουν στην μαγνητοουρά, ρεύματα Birkeland που ρέουν κατά μήκος των γεωμαγνητικών γραμμών που έχουν τη βάση τους στις περιοχές του σέλαος κοντά στον Βόρειο και Νότιο πόλο, το δακτυλιοειδές ρεύμα που ρέει γύρω από τον ισημερινό και ένα περίπλοκο σύστημα ρευμάτων που ρέουν μέσα στην ιονόσφαιρα.

Η μαγνητόσφαιρα της Γης είναι μία υψηλά δυναμική δομή η οποία ανταποκρίνεται αρκετά δραστικά στις αλλαγές της δυναμικής πίεσης του ηλιακού ανέμου και της κατεύθυνσης

του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Η μόνη πηγή ενέργειας της είναι η αλληλεπίδραση της με τον ηλιακό άνεμο. Μέρος της ενέργειας πυροδοτεί άμεσα μαγνητικές καταιγίδες, ενώ το υπόλοιπο αποθηκεύεται στην μαγνητοουρά και απελευθερώνεται στη συνέχεια υπό τη μορφή υποκαταιγίδων. Η κυρίαρχη διαδικασία με την οποία η ενέργεια μεταφέρεται από τον ηλιακό άνεμο στην μαγνητόσφαιρα ονομάζεται επανασύνδεση και συμβαίνει όταν το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έχει αντιπαράλληλη κατεύθυνση με το μαγνητικό πεδίο της Γης. Τότε οι μαγνητικές γραμμές συνδέονται και μεταφέρεται ενέργεια, μάζα και ορμή από τον ηλιακό άνεμο στην μαγνητοουρά. Εκεί μαζεύονται τα σωματίδια και στη συνέχεια, ολισθαίνουν στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας λόγω διαφορετικής βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου. Τα σωματίδια αυτά δημιουργούν ένα δακτυλιοειδές ρεύμα γύρω από τον ισημερινό της Γης και μειώνουν το γεωμαγνητικό πεδίο, ένα φαινόμενο που ονομάζεται γεωμαγνητική καταιγίδα.



Σχήμα 1.6 Δομή γήινης μαγνητόσφαιρας (J.De Keyser, 1999)

1.4.1 Γεωμαγνητικοί δείκτες

1.4.1.1 Δείκτης Dst

Ο δείκτης Dst (Disturbance Storm Time) είναι μία μέτρηση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας η οποία δείχνει το βαθμό μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας. Εξάγεται από ένα δίκτυο σταθμών κοντά στον ισημερινό που μετράνε τις ωριαίες τιμές της οριζόντιας μαγνητικής διακύμανσης και η μονάδα μέτρησής του είναι το nanotesla (nT). Δείχνει την

παγκόσμια μείωση της Η-συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου σε περιόδους μεγάλων μαγνητικών καταιγίδων εξαιτίας της δυτικά κατευθυνόμενης ροής του δακτυλιοειδούς ρεύματος γύρω από τον ισημερινό και σε μεγάλο υψόμετρο. Στην περίπτωση μιας κλασικής μαγνητικής καταιγίδας ο δείκτης Dst δείχνει μια ξαφνική αύξηση, που είναι ανάλογη με το απότομο ξεκίνημα και την πύκνωση των μαγνητικών γραμμών στην μαγνητόπαυση, και στη συνέχεια μία απότομη πτώση σε τιμές κοντά στα -100 nT που σημαίνει μείωση της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου.

1.4.1.2 Δείκτες Kp και Ap

Στην εργασία αυτή μελετάμε τον δείκτη Ap ο οποίος είναι ένα μέτρο του μέσου επιπέδου της γεωμαγνητικής δραστηριότητας. Προκύπτει από μετρήσεις που πάρθηκαν από πολλούς σταθμούς παγκοσμίως για την διακύμανση του γεωμαγνητικού πεδίου εξαιτίας των ρευμάτων στην ιονόσφαιρα και σε ένα βαθμό στην μαγνητόσφαιρα. Εξάγεται από τον δείκτη K με τον τρόπο που περιγράφουμε παρακάτω.

Ο δείκτης K εκφράζει την γεωμαγνητική δραστηριότητα όπως αυτή μετρείται από επίγεια μαγνητόμετρα. Η έκφραση του δείκτη αυτού γίνεται με την ανάθεση ενός ακέραιου αριθμού από το 0 έως το 9 σε κάθε διάστημα 3 ωρών μίας ημέρας. Έτσι, κάθε ημέρα χαρακτηρίζεται από 8 δείκτες K. Το ποιος δείκτης από το 0 έως το 9 θα ανατεθεί σε κάθε 3ωρο διάστημα καθορίζεται από το εύρος των μεταβολών των συνιστωσών H (οριζόντια συνιστώσα) και D (γωνιακή απόκλιση) του γεωμαγνητικού πεδίου σε μονάδες nT για το κάθε 3ωρο διάστημα, αφού πρώτα έχει αφαιρεθεί η πιθανή αναμενόμενη ημερήσια διακύμανση λόγω της ηλιακής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Προκειμένου να γίνει η αφαίρεση αυτή και να βρεθεί μία μέση κανονική διακύμανση βάσει της οποίας θα υπολογίζονται οι μεταβολές των συνιστωσών του γεωμαγνητικού πεδίου, λαμβάνονται υπόψη οι πέντε πιο ήρεμες ημέρες ως προς την γεωμαγνητική δραστηριότητα για κάθε μήνα. Η μετατροπή του εύρους από nT σε μια αριθμητική τιμή γίνεται με τη χρήση ημιλογαριθμικής κλίμακας, με τις τιμές της κλίμακας να διαφέρουν ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητηρίου. Οι ίδιες πλανητικές γεωμαγνητικές διαταραχές μπορούν να εμφανιστούν σε πολλά γεωγραφικά πλάτη με διαφορετική ένταση, οπότε κάθε παρατηρητήριο έχει τέτοια κλίμακα που να αντιπροσωπεύει το γεωγραφικό της πλάτος. Παρατηρητήρια με μεγαλύτερο γεωγραφικό πλάτος χρειάζονται μεγαλύτερο εύρος γεωμαγνητικής διαταραχής για τον ίδιο δείκτη K.

Ο δείκτης Kp είναι ο κανονικοποιημένος δείκτης K για όλους τους σταθμούς παγκοσμίως. Δημιουργήθηκε για να μετρά την εκπομπή ακτινοβολίας των ηλιακών σωματιδίων από τη μαγνητική τους συμπεριφορά. Είναι κοινώς αποδεκτό πως είναι ο σημαντικότερος γεωμαγνητικός δείκτης στη μελέτη του Διαπλανητικού Μαγνητικού Πεδίου, καθώς καταγράφει τις διαταραχές που προκαλούνται από την αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα. Η κλίμακα του δείκτη Kp παίρνει τιμές από 0 έως 9 και έχει υποδιαιρέσεις του

ενός τρίτου. Για παράδειγμα, ο δείκτης 5- αντιπροσωπεύει το 4 και 2/3, ο δείκτης 5ο σημαίνει 5 και ο δείκτης 5+ είναι 5 και 1/3. Λόγω της μη γραμμικής σχέσης του δείκτη K_p με τις διακυμάνσεις των μαγνητομέτρων δεν έχει νόημα να πάρουμε τη μέση τιμή από ένα σετ τιμών αυτού του δείκτη. Αντ'αυτού κάθε μέση τιμή τριών ωρών του δείκτη K_p μετατρέπεται σε μία γραμμική κλίμακα που ονομάζεται δείκτης a_p σύμφωνα με τον πίνακα 1.1. Το μέσο όρο των 8 ημερίσιων τιμών του δείκτη a_p μας δίνει τον δείκτη A_p μιας συγκεκριμένης ημέρας. Ο δείκτης A_p είναι λοιπόν, ένας δείκτης γεωμαγνητικής δραστηριότητας όπου οι υψηλότερες τιμές του δείκτη A_p αντιστοιχούν και σε ημέρες με υψηλότερη δραστηριότητα.

K_p	0o	0+	1-	1o	1+	2-	2o	2+	3-	3o	3+	4-	4o	4+
a_p	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
K_p	5-	5o	5+	6-	6o	6+	7-	7o	7+	8-	8o	8+	9-	9o
a_p	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

Πίνακας 1.1 Αντιστοιχία του δείκτη K_p με τον δείκτη a_p

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΟΣΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Γενικά

Ο όρος κοσμική ακτινοβολία (cosmic rays) αναφέρεται σε σωματίδια υψηλών ενεργειών που προέρχονται από εξωγήινες πηγές. Σήμερα είναι πια γνωστό πως ο διαστημικός αλλά και διαστρικός χώρος είναι γεμάτος από ελεύθερα πρωτόνια, ηλεκτρόνια, πυρήνες ηλίου αλλά και βαρύτερους πυρήνες που υπόκεινται στις δυνάμεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Όταν φτάνουν στη Γη συγκρούονται με τα νουκλεόνια των ατόμων στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, παράγοντας έναν καταγισμό σωματιδίων τα οποία ταξιδεύουν στην ατμόσφαιρα και φτάνουν στο έδαφος απ' όπου καταγράφονται από τους μετρητές νετρονίων.

2.1 Κοσμικές ακτίνες

Η ύπαρξη της κοσμικής ακτινοβολίας αρχικά διαπιστώθηκε από τον μερικό ιονισμό που παρατηρείται στον αέρα ενός εργαστηρίου. Το εργαστηριακό ηλεκτροσκόπιο δεν μένει φορτισμένο για πάντα παρά την απαραίτητη τέλεια ηλεκτρική μόνωση της κατασκευής του. Είχε αποδειχτεί ότι η διαρροή του φορτίου γινόταν μέσω του περιβάλλοντα αέρα. Η ανακάλυψη της ραδιενέργειας στα τέλη του 19^{ου} αιώνα έδωσε μία εξήγηση, αφού οι ακτίνες α, β και γ προκαλούν όλες ιονισμό καθώς διέρχονται από τον αέρα. Το ερώτημα όμως ήταν για το αν ο συνήθης ιονισμός του αέρα ήταν εξ'ολοκλήρου αποτέλεσμα της διάχυτης ραδιενέργειας, ή, αν υπήρχε κάποιος επιπλέον παράγοντας εκτός από τη διάχυτη ραδιενέργεια, ίσως κάποια άγνωστη μέχρι τώρα ακτινοβολία ιονισμού από το διάστημα.

Το ζήτημα αποσαφηνίστηκε από τον Victor Hess το 1912 όταν μετέφερε ένα ηλεκτροσκόπιο ψηλά πάνω σε ένα μπαλόνι και ανακάλυψε ότι όσο πιο ψηλά πήγαινε το ηλεκτροσκόπιο τόσο πιο γρήγορα εκφορτιζόταν. Ήταν ξεκάθαρο ότι η επίδραση προερχόταν από κάπου εκεί έξω. Στη συνέχεια, ανακαλύφθηκε και μετρήθηκε η ασυμμετρία της κοσμικής ακτινοβολίας μεταξύ ανατολής και δύσης, δείχνοντας ότι οι κοσμικές ακτίνες αποτελούνται κυρίως από θετικά φορτισμένα σωματίδια που εκτρέπονται από το γήινο μαγνητικό πεδίο.

Αυτά τα υψηλής ενέργειας σωματίδια που έρχονται από το διάστημα αποτελούνται κατά 85% από πρωτόνια, κατά 12% από πυρήνες ηλίου, κατά 1% από βαρύτερα στοιχεία όπως Li, Be, B, C, N, O, F, Fe και υπερβαρέα υπερουράνια στοιχεία και κατά 2% από ηλεκτρόνια, ακτίνες γ και νετρόνια. Μερικά από τα σωματίδια προέρχονται από τον Ήλιο, πιο

συγκεκριμένα από τις ηλιακές εκλάμψεις, αλλά τα περισσότερα προέρχονται από πηγές έξω από το ηλιακό μας σύστημα και γι' αυτό ονομάζονται γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες.

Η ένταση των εισερχόμενων φορτισμένων σωματιδίων διαμορφώνεται από τον ηλιακό άνεμο, το επεκτανόμενο μαγνητισμένο πλάσμα που παράγεται στον Ήλιο. Τα χαμηλής ενέργειας σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας επιβραδύνονται και δεν μπορούν να εισέλθουν στην ηλιόσφαιρα. Έχει διαπιστωθεί μια έντονη αντισυσχέτιση μεταξύ της ηλιακής δραστηριότητας και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με μαγνητική δυσκαμψία κάτω από 10 GV. Επιπροσθέτως, οι χαμηλής ενέργειας κοσμικές ακτίνες επηρεάζονται από το μαγνητικό πεδίο της Γης και δεν φτάνουν καν στο ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας. Γι' αυτό η ένταση σε κάποιες περιοχές της ενέργειας εξαρτάται από την τοποθεσία και τον χρόνο.

Επειδή η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία επηρεάζεται ισχυρά από το γνήινο και διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο, όσα σωματίδια εντοπίζονται κοντά στην Γη έχουν κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από 1 GeV. Αυτή η ενέργεια αντιστοιχεί σε ταχύτητες μεγαλύτερες από το 87% της ταχύτητας του φωτός. Ο αριθμός των σωματιδίων μειώνεται απότομα με την αύξηση της ενέργειας. Μεμονωμένα σωματίδια με ενέργεια της τάξεως 10^{20} eV έχουν εντοπιστεί πολύ λίγες φορές.

Η κοσμική ακτινοβολία μελετάται από βαθιά μέσα στη Γη έως στο διάστημα. Πρωτοπόρες μελέτες έχουν διεξαχθεί πάνω σε βουνά όπου μόνο η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία μπορούσε να μετρηθεί. Μερικά δευτερογενής μίονια έχουν τόσο υψηλές ενέργειες που είναι ικανά να εισχωρήσουν στη Γη σε βάθος μεγαλύτερο από 3.2 km. Για την απευθείας μελέτη της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας έχουν χρησιμοποιηθεί μπαλόνια τα οποία φτάνουν μέχρι και τα 37 km. Πύραυλοι μπορούν να φτάσουν πιο ψηλά αλλά έχουν λιγότερα όργανα μέσα και για μόνο μερικά λεπτά. Παρατηρήσεις έχουν γίνει και από δορυφόρους σε τροχιά γύρω από την Γη και επίσης από αισθητήρες μεγάλης κλίμακας.

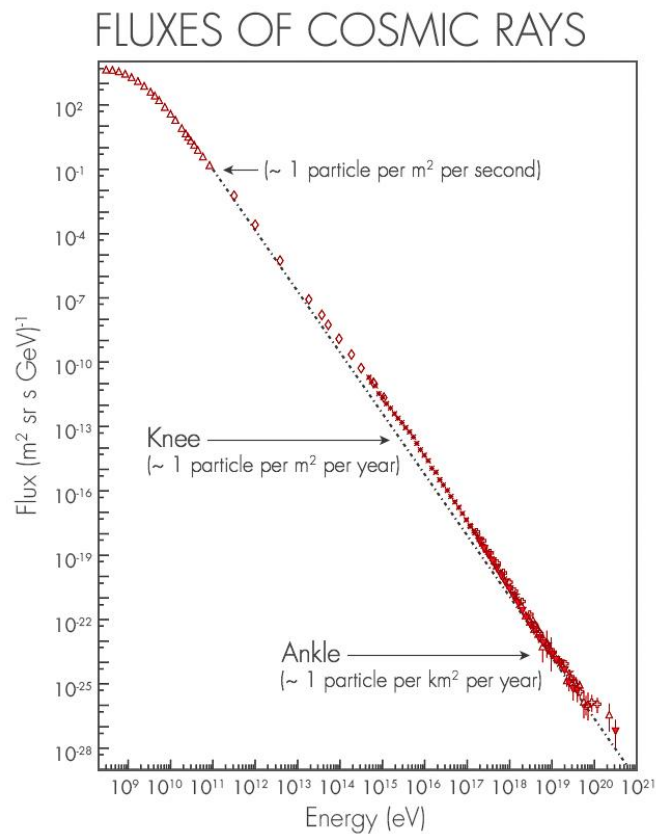
Από τις αρχές της δεκαετίας του 1930 έως και τη δεκαετία του 1950, οι κοσμικές ακτίνες έπαιξαν πάρα πολύ σημαντικό ρόλο στην επιστημονική μελέτη των ατομικών πυρήνων και των συστατικών τους, καθώς ήταν η μόνη πηγή υψηλοενεργειακών σωματιδίων. Ανακαλύφθηκαν υποατομικά σωματίδια μικρού χρόνου ζωής μέσω συγκρούσεων κοσμικών ακτίνων. Το πεδίο της σωματιδιακής φυσικής εδραιώθηκε ως αποτέλεσμα της ανακάλυψης του ποζιτρονίου και του μιονίου. Ακόμα και μετά την ανακάλυψη των σωματιδιακών επιταχυντών το 1950, οι μελέτες πάνω στις κοσμικές ακτίνες συνεχίστηκαν, αν και σε μικρότερο βαθμό, επειδή περιέχουν σωματίδια με ενέργειες πολύ μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν να επιτευχθούν σε ένα εργαστήριο.

2.2 Ενεργειακό φάσμα κοσμικής ακτινοβολίας

Το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων που ανιχνεύονται στη Γη είναι γαλαξιακής προέλευσης. Τα σωματίδια που προέρχονται από τον Ήλιο έχουν αρκετά χαμηλές ενέργειες και απορροφώνται από το μαγνητικό πεδίο της Γης και την ατμόσφαιρα της πριν προλάβουν να φτάσουν στο έδαφος. Η ροή της κοσμικής ακτινοβολίας ελαττώνεται με την αύξηση της ενέργειας. Η σχέση που εκφράζει τη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας συναρτήσει της ενέργειας δίνει το ολοκληρωμένο ενεργειακό φάσμα. Το φάσμα αυτό ακολουθεί μία κατανομή που δίνεται από τη σχέση:

$$J(E) = kE^{-\gamma} \quad (2.1)$$

όπου γ είναι ο φασματικός εκθέτης και k σταθερά. Στο σχήμα 2.1 διακρίνουμε το ολοκληρωμένο ενεργειακό φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας για ενέργειες από 10^9 έως 10^{21} eV.



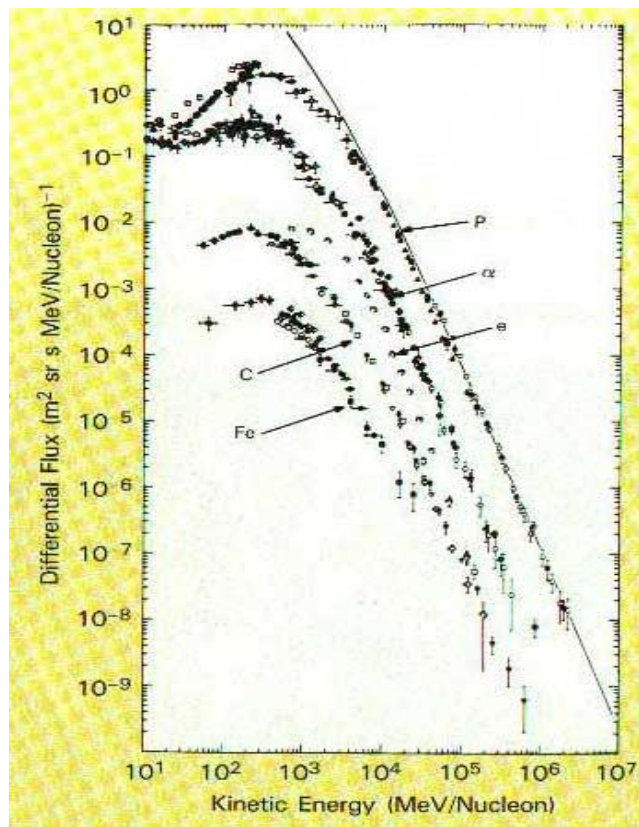
Σχήμα 2.1 Ολοκληρωμένο ενεργειακό φάσμα κοσμικής ακτινοβολίας (Olena Shmahalo/Quanta Magazine. Original data via S. Swordy, U. Chicago).

Η τιμή του δείκτη γ είναι $\sim 2,7$ στο πρώτο κομμάτι του φάσματος μέχρι την ενέργεια $\sim 10^{15}$ eV (“γόνατο”) και στο τελευταίο κομμάτι του φάσματος από την ενέργεια $\sim 10^{18}$ eV (“αστράγαλος”). Στο ενδιάμεσο κομμάτι η τιμή του είναι $\sim 3,1$. Η μορφή του φάσματος και η διαφορά στην κλίση θεωρείται ότι οφείλεται στην διαφορετική προέλευση και τους διαφορετικούς μηχανισμούς επιτάχυνσης μεταξύ των κοσμικών ακτίνων. Στην περιοχή από το γόνατο μέχρι τον αστράγαλο που το φάσμα γίνεται πιο απότομο θεωρείται ότι ο μηχανισμός επιτάχυνσης που οδηγεί σε αυτές τις ενέργειες δεν είναι τόσο αποτελεσματικός όσο ο μηχανισμός που οδηγεί στα δύο ακριανά τμήματα του φάσματος.

Διαφορίζοντας την σχέση (2.1) προκύπτει η σχέση:

$$dJ(E) = -k\gamma E^{(\gamma+1)}dE \quad (2.2)$$

το φάσμα αυτό ονομάζεται διαφορικό και δίνει τη μεταβολή της έντασης σε μία συγκεκριμένη περιοχή ενεργειών E και $E + dE$.



Σχήμα 2.2 Διαφορικό ενεργειακό φάσμα των κύριων συνιστωσών της κοσμικής ακτινοβολίας (Αναφορές)

Στο σχήμα 2.2 δίνεται το διαφορικό ενεργειακό φάσμα των κύριων συνιστωσών της κοσμικής ακτινοβολίας. Παρατηρούμε ότι τα φάσματα των δευτερογενών πυρήνων είναι πιο απότομα από τα φάσματα των πρωτογενών. Επίσης η αναλογία των δευτερογενών προς τους πρωτογενείς πυρήνες μειώνεται όσο αυξάνει η ενέργεια, γεγονός που δηλώνει ότι τα υψηλής ενέργειας σωματίδια διαχέονται πιο γρήγορα στον γαλαξία.

Στο ίδιο σχήμα παρατηρούμε ότι στις χαμηλές ενέργειες ($E < 1$ GeV) υπάρχει ένα κατώφλι και το διαφορικό φάσμα αποκλίνει από το ολοκληρωμένο. Η ενέργεια και το σχήμα του κατωφλίου αλλάζει ανάλογα με την φάση του ηλιακού κύκλου. Κατά το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας η ροή των χαμηλοενεργειακών σωματιδίων είναι ελάχιστη και κατά το ελάχιστο η ροή αυξάνεται. Η εξάρτηση αυτή ονομάζεται ηλιακή διαμόρφωση της ροής των κοσμικών ακτίνων. Όσο πιο έντονη είναι η ηλιακή δραστηριότητα τόσο πιο έντονες είναι οι διαταραχές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που εμποδίζουν τη διάδοση των σωματιδίων χαμηλών ενεργειών. Στο σχήμα 7 η συνεχής γραμμή δίνει το φάσμα των πρωτονίων όπως αναμενόταν αν αγνοούσαμε την ηλιακή διαμόρφωση.

Το φάσμα των συνιστωσών της κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί να περιγραφεί με διάφορους τρόπους. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται ο αριθμός των σωματιδίων προς την μονάδα μαγνητικής δυσκαμψίας. Η διάδοση και η επιτάχυνση μέσα από κοσμικά μαγνητικά πεδία εξαρτάται από την γυροακτίνα ή την μαγνητική δυσκαμψία, R , η οποία ισούται με την γυροακτίνα επί την ένταση του μαγνητικού πεδίου: $R = \frac{pc}{Ze} = r_L B$.

2.3 Πηγές κοσμικής ακτινοβολίας

Λόγω του μαγνητικού καθρεφτισμού η πρωτογενής γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία ακολουθεί ελικοειδή μονοπάτια και φτάνει στο ανώτατο στρώμα της ατμόσφαιρας σχεδόν ομοιογενώς από όλες τις κατευθύνσεις. Συνεπώς, η αναγνώριση της πηγής της κοσμικής ακτινοβολίας δεν μπορεί να βασιστεί στην κατεύθυνση με την οποία φτάνει το σωματίδιο στην ατμόσφαιρα. Αντιθέτως, ο προσδιορισμός της πηγής μπορεί να γίνει από την μελέτη της αφθονίας των διαφόρων σωματιδίων που συναντώνται στην κοσμική ακτινοβολία, το χρόνο ημιζωής αυτών των σωματιδίων καθώς και τα παράγωγα των συγκρούσεων των σωματιδίων αυτών με την διαστρική ύλη. Τα παραπάνω δεδομένα δίνουν πολλές πληροφορίες και για τις πηγές των κοσμικών ακτίνων και για το ταξίδι τους στον γαλαξία.

Για παράδειγμα τα ελαφρά στοιχεία λίθιο, βηρύλλιο και βόριο είναι σπάνια στο σύμπαν αλλά παρουσιάζουν μία σχετική αφθονία μεταξύ της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Είναι αποδεκτό ότι αυτά τα στοιχεία παράγονται όταν βαρύτερα στοιχεία διασπώνται από συγκρούσεις με το διαστρικό αέριο το οποίο αποτελείται κυρίως από υδρογόνο. Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες θα πρέπει να ταξιδεύουν για περίπου 10 εκατομμύρια χρόνια για να παράξουν τον απαραίτητο αριθμό των παραπάνω ελαφρών νουκλεονίων. Βγαίνει λοιπόν το συμπέρασμα ότι οι ακτίνες αυτές προέρχονται είτε από τον

γαλαξιακό δίσκο είτε έξω από τον γαλαξία. Επιπλέον οι συγκρούσεις της κοσμικής ακτινοβολίας με το διαστρικό μέσο οδηγούν σε ουδέτερα πιόνια τα οποία διασπώνται γρήγορα παράγοντας υψηλής ενέργειας ακτίνες γάμμα. Έρευνες σχετικά με τις ακτίνες γάμμα υποδηλώνουν ότι οι κοσμικές ακτίνες έχουν μεγάλη συγκέντρωση στο δίσκο του γαλαξία και πολύ μικρότερη στην γαλαξιακή άλω.

Μετά τη διόρθωση από τις διαστρικές διασπάσεις, συμπεραίνουμε ότι η πηγή της κοσμικής ακτινοβολίας είναι παρόμοια με την ύλη ενός ηλιακού συστήματος. Παρόλ'αυτά πολύ λίγο υδρογόνο και ήλιο παρουσιάζονται και επίσης είναι σημαντικές οι διαφορές μεταξύ κάποιων ισοτόπων. Θεωρείται λοιπόν, ότι οι κοσμικές ακτίνες αντιπροσωπεύουν κάποιο συνδυασμό διαστρικής ύλης εμπλουτισμένης με ύλη από εξελιγμένα αστέρια, όπως οι υπερκαινοφανείς.

Μία ακόμα ένδειξη ότι οι υπερκαινοφανείς αστέρες είναι πηγές κοσμικών ακτίνων είναι ότι κατά τη διάρκεια συγκρούσεων μεταξύ πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας και διαστρικού υδρογόνου παράγονται φορτισμένα μεσόνια, κυρίως πιόνια. Αυτά τα πιόνια διασπώνται σε μόνια παράγοντας ηλεκτρόνια και νετρίνα. Τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν σε έλικες γύρω από το γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο και παράγουν σύγχροτρον ακτινοβολία. Σύγχροτρον ακτινοβολία έχει ανιχνευθεί σε υπολείμματα υπερκαινοφανών, όπως το νεφέλωμα του Καρκίνου.

Από τα παραπάνω βγαίνει το συμπέρασμα ότι η πηγή των κοσμικών ακτίνων είναι οι αστέρες. Σταθεροί αστέρες όπως ο Ήλιος, καινοφανείς και υπερκαινοφανείς, παλλόμενοι και αστέρες εκλάμψεων καθώς και η διαστρική ύλη.

Οι σταθεροί αστέρες εκπέμπουν σωματίδια υψηλών ενεργειών κατά τη διάρκεια εκλάμψεων. Η παρεχόμενη ισχύς από έναν τέτοιο αστέρα κατά τη διάρκεια μιας έκλαμψης πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των σταθερών αστέρων του γαλαξία μας είναι ικανή να δώσει την ένταση των σωματιδίων με ενέργεια μέχρι 10^9 eV στο ενεργειακό φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας.

Οι υψηλότερες ενέργειες του φάσματος γεννώνται πιθανότατα στα υπολείμματα ενός υπερκαινοφανή. Μετά την αρχική βαρυτική συστολή του υπερκαινοφανούς η πίεση από τα εκφυλισμένα σωματίδια στον πυρήνα οδηγεί στην γέννηση ενός κρουστικού κύματος που πιάνει σχετικιστικές ταχύτητες στα εξωτερικά στρώματα του αστέρα. Το κύμα αυτό επιταχύνει τα σωματίδια σε πολύ υψηλές ενέργειες. Στη συνέχεια, τα σωματίδια αυτά επιταχύνονται περαιτέρω από τις σκεδάσεις κατά μήκος του κρουστικού κύματος. Κατά τη διάρκεια της έκρηξης δημιουργούνται έντονες ροές νετρονίων τα οποία δεσμεύονται από υπερβαρέα στοιχεία και δημιουργούνται πυρήνες που συναντώνται στις κοσμικές ακτίνες. Έτσι το πρότυπο της υπερκαινοφανούς προέλευσης των κοσμικών ακτίνων υποστηρίζεται και από τις τιμές της ενέργειας που πιάνουν τα σωματίδια αλλά και από την αφθονία των βαρύτερων στοιχείων.

Το τελευταίο στάδιο της ζωής των υπερκαινοφανών είναι οι αστέρες νετρονίων. Η πυκνότητά τους είναι ίση με την πυκνότητα ενός ατομικού πυρήνα. Η ενέργεια συστολής του

αστέρα περικλείεται σαν ενέργεια περιστροφής. Από τη συμπίεση του αστρικού μαγνητικού πεδίου πιστεύεται ότι δημιουργούνται έντονα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία από τα οποία επιταχύνονται τα σωματίδια σε ενέργειες 10^{14} eV και πάνω.

Υπάρχει όμως μία αρνητική ένδειξη για τα δύο αυτά πρότυπα. Δεν υπάρχει ο κατάλληλος αριθμός υπερκαινοφανών και αστέρων νετρονίων κάθε χρονική στιγμή έτσι ώστε να εξασφαλίζουν την ισοτροπία και τη σταθερότητα των κοσμικών ακτίνων αυτών των ενεργειακών τάξεων.

Το πρόβλημα αυτό έρχονται να λύσουν οι λευκοί νάνοι. Με μηχανισμούς επιτάχυνσης παρόμοιων αυτών των παλλόμενων αστέρων και με 10^{10} λευκούς νάνους μπορούμε να έχουμε την απαιτούμενη ισχύ των κοσμικών ακτίνων με ενέργειες από 10^8 έως και 10^{14} eV. Επειδή όμως στην επιφάνεια των λευκών νάνων δεν περιέχονται βαρέα στοιχεία, η παρουσία των πυρηνικών κοσμικών ακτίνων οφείλεται στο διαστρικό αέριο.

Τα συστατικά της διαστρικής ύλης είναι συνεπή με εκείνα των κοσμικών ακτίνων. Τα στοιχεία αυτά λοιπόν φαίνεται να επιταχύνονται μέσα στην διαστρική ύλη. Τα ηλεκτρικά πεδία που χρειάζονται για να επιταχύνουν τις κοσμικές ακτίνες μπορεί να βρίσκονται στα θερμά νεαρά αστέρια ή γύρω από τα αστέρια εκλάμψεων ή στο ξεκίνημα ενός κρουστικού κύματος που διαδίδεται στο διαστρικό μέσο. Πάλι όμως εντοπίζεται το πρόβλημα της σταθερότητας και της ισοτροπίας των ακτίνων καθώς είναι μικρός ο αριθμός αυτών των πηγών.

Έχει βρεθεί μία μικρή ανισοτροπία μεταξύ των σωματιδίων με την υψηλότερη ενέργεια, μεγαλύτερης από 10^{18} eV. Το γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο δεν είναι αρκετά ισχυρό προκειμένου να περιορίσει τόσο ενεργητικά σωματίδια μέσα στο γαλαξία και γι'αυτό θεωρείται ότι είναι η μόνη σημαντική εξωγαλαξιακή συνιστώσα των κοσμικών ακτίνων. Αυτά τα πάρα πολύ ενεργητικά σωματίδια είναι τόσο σπάνια που μπορούν να εντοπισθούν μόνο μέσω των καταιγισμών που δημιουργούν στη γήινη ατμόσφαιρα. Ένας ισχυρός καταιγισμός αποτελείται από δισεκατομμύρια δευτερογενή σωματίδια, όπως ηλεκτόνια και μίονια, που φτάνουν στο έδαφος σε μία περιοχή πολλών τετραγωνικών χιλιομέτρων.

2.4 Πρότυπα προέλευσης

- Ηλιακή Κοσμική Ακτινοβολία

Τα σωματίδια με ενέργειες μέχρι 10^{10} eV θεωρείται ότι προέρχονται από τον Ήλιο. Πρόκειται για σχετικιστικά πρωτόνια κατά κύριο λόγο, ηλεκτρόνια, πυρήνες ηλίου και κάποιους βαρύτερους πυρήνες που διασχίζουν τον διαπλανητικό χώρο και φτάνουν μέχρι τη Γη. Προέρχονται από τις ηλιακές εκλάμψεις και τις στεμματικές εκτινάξεις μάζας. Παρατηρείται μία αντισυσχέτιση της έντασης των σωματιδίων αυτών με την ένταση της ηλιακής δραστηριότητας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηλιακή διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας. Ενεργητικά σωματίδια προκύπτουν από ηλιακές εκλάμψεις και στη συνέχεια

από επιτάχυνση στα ισχυρά μαγνητικά πεδία. Τα περισσότερα από αυτά τα σωματίδια είναι πρωτόνια, ενώ πολύ λιγότερα είναι πυρήνες ηλίου και ελάχιστα βαρύτερα στοιχεία. Παρατηρήσεις του λόγου ήλιο προς οξυγόνο μεταξύ των ενεργητικών ηλιακών σωματιδίων έχουν συνεισφέρει σημαντικά σε ηλιακές μελέτες επειδή η αφθονία του ηλίου στον Ήλιο είναι δύσκολο να εκτιμηθεί μέσω της κλασικής φασματοσκοπίας. Το ενεργειακό φάσμα των ηλιακών σωματιδίων, σε σύγκριση με αυτό των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, μειώνεται πιο γρήγορα με την ενέργεια και σπάνια επεκτείνεται πάνω από τα 10 GeV. Επίσης υπάρχει μεγάλη ποικιλομορφία μεταξύ των φασμάτων διαφορετικών ηλιακών εκλάμψεων.

- Γαλαξιακή Κοσμική Ακτινοβολία

Τα σωματίδια με ενέργειες πάνω από 10^{10} eV έως 10^{14} eV θεωρείται ότι έχουν γαλαξιακή προέλευση. Προέρχονται από περιοχές εκτός του ηλιακού μας συστήματος. Οι κύριες πηγές προέλευσης είναι οι υπερκαινοφανείς και τα υπολείμμά τους, οι αστέρες νετρονίων και οι λευκοί νάνοι. Η σύσταση των σωματιδίων αυτών είναι κυρίως πρωτόνια, πυρήνες ηλίου και βαρύτεροι πυρήνες. Καθώς τα σωματίδια αυτά επιταχύνονται κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών στον μεσοαστρικό χώρο, κάποια από αυτά διασπώνται και εκπέμπονται ακτίνες γ . Από την μελέτη των ακτίνων αυτών μπορούμε να κατανοήσουμε την διαδρομή τους μέσα στον γαλαξία. Στα γαλαξιακά πρότυπα προέλευσης ανήκουν τα πρότυπα “Leaky box Model” και “Cosmic-ray clocks”.

- Εξωγαλαξιακή Κοσμική Ακτινοβολία

Τα σωματίδια με ενέργειες πάνω από 10^{14} eV έως 10^{19} eV θεωρείται ότι έχουν εξωγαλαξιακή προέλευση. Τα ελάχιστα σωματίδια που έχουν βρεθεί μέχρι τώρα να έχουν ενέργειες μεγαλύτερες από 10^{19} eV έχουν και αυτά εξωγαλαξιακή προέλευση αλλά επιταχύνονται με διαφορετικό μηχανισμό. Πηγές της εξωγαλαξιακής ακτινοβολίας μπορεί να είναι πέρα από τις πηγές που αναφέρθηκαν για τον δικό μας γαλαξία, οι AGNs και οι ραδιογαλαξίες. Στα πρότυπα προέλευσης ανήκουν το εξωγαλαξιακό ομογενές πρότυπο και εξωγαλαξιακό τοπικό πρότυπο.

2.5 Ατμοσφαιρικός καταιγισμός

Όταν η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία έρχεται σε επαφή με την γήινη ατμόσφαιρα πυροδοτούνται αλυσιδωτές αντιδράσεις οι οποίες ονομάζονται συνολικά ατμοσφαιρικός καταιγισμός σωματιδίων (σχήμα 2.3). Τα πρωτογενή σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας με ενέργειες μικρότερες από μερικές εκατοντάδες MeV/nucleon απορροφώνται στην ατμόσφαιρα λόγω ιονισμού ενώ αντίθετα οι πρωτογενείς κοσμικές ακτινοβολίες υψηλότερης ενέργειας αντιδρούν με τα μόρια της ατμόσφαιρας και παράγονται ελαφρότερα θραύσματα

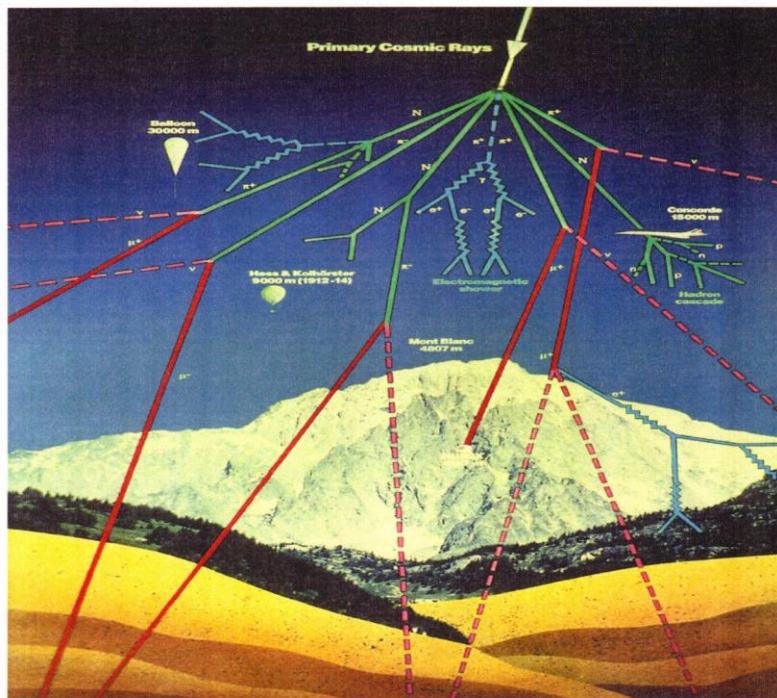
από τους αρχικούς πυρήνες όπως πρωτόνια, νετρόνια, μεσόνια (π, μ) ακτινοβολία γ και ηλεκτρόνια. Μπορούμε να διακρίνουμε τρεις κύριες συνιστώσες της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας:

- Νουκλεονική συνιστώσα που αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια. Λόγω της ποικιλίας των αντιδράσεων μπορεί να προσδιορισθεί δύσκολα, αλλά είναι η πιο σταθερή συνιστώσα.
- Σκληρή ή μεσονική συνιστώσα που αποτελείται από μόνια και είναι πολύ διεισδυτική. Χαρακτηριστικό είναι ότι μόλυβδος πάχους ενός μέτρου ελαττώνει την έντασή της μόνο στο μισό.
- Μαλακή ή ηλεκτρονική – φωτονική συνιστώσα που αποτελείται από ηλεκτρόνια και φωτόνια και η οποία απορροφάται σχεδόν τελείως από μόλυβδο πάχους 10 cm.

Η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία στην επιφάνεια της θάλασσας αποτελείται από μόνια 80%, ηλεκτρόνια 18% και πρωτόνια και νετρόνια 1-2% (Simpson 2000).

Ο αριθμός των παραγόμενων σωματίων είναι τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια του προσπίπτοντος σωματίου.

Πολλά φωτόνια μεγάλης ενέργειας προστίθενται βαθμιαία στις αντιδράσεις κι έτσι μέσω ηλεκτρομαγνητικών αντιδράσεων παράγονται ηλεκτρομαγνητικοί καταιγισμοί γνωστοί και ως electromagnetic showers. Η έκταση των καταιγισμών στην επιφάνεια της γης είναι της τάξης του ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου, ενώ ο αριθμός των σωματίων που συμμετέχουν είναι της τάξης των δέκα δισεκατομμυρίων.



Σχήμα 2.3 Ατμοσφαιρικός καταγισμός όπου διακρίνεται η πρωτογενής και δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία (Αναφορές)

2.6 Ανίχνευση Κοσμικής Ακτινοβολίας

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να καταγράψουμε την κοσμική ακτινοβολία, είτε άμεσα είτε έμμεσα. Ένα μεγάλο δίκτυο μετρητών κοσμικής ακτινοβολίας επεκτείνεται από το διάστημα έως το εσωτερικό της Γης.

2.6.1 Όργανα καταγραφής

Ανιχνευτές μπαλόνια: Εκτός από τους δορυφόρους που ανιχνεύουν απευθείας τις κοσμικές ακτίνες αναπτύχθηκε από τους Robert Fleischer, P. Buford Price και Robert M. Walker μια άλλη μέθοδος με μπαλόνια σε μεγάλο υψόμετρο. Στη μέθοδο αυτή, φύλλα διαυγούς πλαστικού στοιβάζονται μαζί και εκτίθενται άμεσα σε κοσμικές ακτίνες σε μεγάλο υψόμετρο. Το πυρηνικό φορτίο προκαλεί θραύση ή ιονισμό χημικού δεσμού στο πλαστικό. Στην κορυφή της πλαστικής στοιβάς ο ιονισμός είναι μικρότερος, λόγω της υψηλής ταχύτητας της κοσμικής ακτίνας. Ο ιονισμός αυξάνεται κατά μήκος της διαδρομής καθώς η ταχύτητα μειώνεται. Το αποτέλεσμα είναι τα πλαστικά φύλλα να "χαράζονται" ή να διαλύονται βραδέως σε θερμό καυστικό διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου, το οποίο αφαιρεί το επιφανειακό υλικό με αργό, γνωστό ρυθμό. Το καυστικό υδροξείδιο του νατρίου διαλύει το πλαστικό με ταχύτερο ρυθμό κατά

μήκος της διαδρομής του ιονισμένου πλαστικού. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι μία κωνική διάτρητη κοιλότητα στο πλαστικό. Οι κοιλότητες χάραξης μετρώνται με μικροσκόπιο υψηλής ισχύος και ο ρυθμός χάραξης σχεδιάζεται σε συνάρτηση με το βάθος στο στοιβαγμένο πλαστικό. Αυτή η τεχνική δίνει μια μοναδική καμπύλη για κάθε ατομικό πυρήνα από το 1 έως το 92, επιτρέποντας την ταυτοποίηση τόσο του φορτίου όσο και της ενέργειας της κοσμικής ακτίνας που διασχίζει την πλαστική στοίβα.

Τηλεσκόπιο Cherenkov: Το τηλεσκόπιο Cherenkov είναι σχεδιασμένο να ανιχνεύει χαμηλής ενέργειας κοσμική ακτινοβολία (<200 GeV) από την ανάλυση της Cherenkov ακτινοβολίας της που για τις κοσμικές ακτίνες είναι ακτίνες γάμμα οι οποίες εκπέμπονται καθώς η ακτινοβολία διαδίδεται με ταχύτητα μεγαλύτερη του φωτός στο εκάστοτε μέσο. Τα τηλεσκόπια αυτά παρότι είναι πολύ καλά στο να διακρίνουν την ακτινοβολία υποβάθρου από την κοσμική, λειτουργούν καλά μόνο σε συνθήκες καθαρού ουρανού, για μικρά παράθυρα ενεργειών και μικρά χρονικά διαστήματα. Ένα είδος ανιχνευτή Cherenkov χρησιμοποιεί νερό σαν μέσο διάδοσης της ακτινοβολίας.

Η ανίχνευση φορτισμένων σωματιδίων που δημιουργούνται από τον καταιγισμό σωματιδίων που ενεργοποιούν οι κοσμικές ακτίνες με το που μπαίνουν στην ατμόσφαιρα (Extensive air shower (EAS)) γίνεται με διαφορετικών ειδών σωματιδιακούς ανιχνευτές. Τέτοιοι είναι:

Τηλεσκόπια μιονίων: Τα τηλεσκόπια μιονίων καταγράφουν την σκληρή συνιστώσα του καταιγισμού. Αποτελούνται από διπλές και τριπλές συστοιχίες ανιχνευτών Geiger-Muller, αναλογικών απαριθμητών και σπινθηριστών. Οι μετρητές μιονίων χαμηλών ενεργειών τοποθετούνται στην επιφάνεια του εδάφους ενώ των υψηλών ενεργειών βαθιά μέσα στο έδαφος.

Σπινθηριστές: Οι σπινθηριστές παράγουν τους σπινθηρισμούς όταν διεγείρονται από φορτισμένα σωματίδια και επιτρέπουν πολύ μεγάλη ακρίβεια στην μέτρηση της ώρα άφιξης των σωματιδίων.

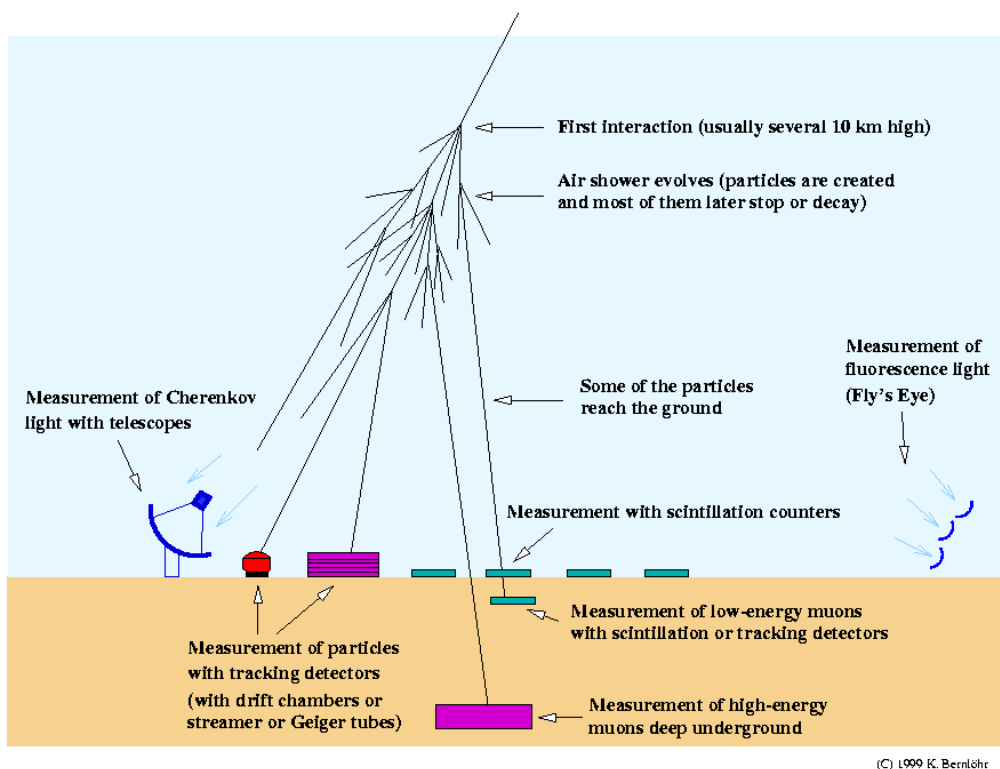
Μετρητές φθορισμού: Οι μετρητές φθορισμού ανιχνεύουν τον φθορισμό που εκπέμπεται από μόρια αζώτου όταν φορτισμένα σωματίδια περνούν κοντά.

Τηλεσκόπια φωτοπολλαπλασιαστών: Τα τηλεσκόπια αυτά είναι συσκευές απεικόνισης που λειτουργούν ως κάμερες που μπορούν να δουν το ίχνος των ατμοσφαιρικών καταιγισμών μέσω της ατμόσφαιρας και σε μεγαλύτερες αποστάσεις από ότι επιτρέπει η εκπομπή φθορισμού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στο Fly's Eye πείραμα.

Θωρακισμένοι θάλαμοι πλάκας: Οι θωρακισμένοι θάλαμοι πλάκας (resistive plate chambers), είναι συσκευές ευαίσθητες στη θέση και επιτρέπουν τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης του σωματιδίου.

Η μέθοδος αυτή με τη συστοιχία όλων των παραπάνω ανιχνευτών (σχήμα 2.4) ανιχνεύει πολύ υψηλότερων ενεργειών κοσμική ακτινοβολία από τα τηλεσκόπια Cherenkov, παρακολουθεί ένα μεγάλο μέρος του ουρανού και είναι ενεργή για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Δεν είναι όμως τόσο ικανή να διαχωρίζει την ακτινοβολία υποβάθρου από την κοσμική όσο οι ανιχνευτές Cherenkov.

Measuring cosmic-ray and gamma-ray air showers



Σχήμα 2.4 Συστοιχία ανιχνευτών για καταγισμό της κοσμικής ακτινοβολίας (Wikipedia)

2.6.2 Μετρητές νετρονίων

2.6.2.1 Αρχές λειτουργίας

Οι Μετρητές Νετρονίων είναι επίγειοι σταθμοί που καταγράφουν μεταβολές της νουκλεονικής συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας. Το μαγνητικό πεδίο της Γης λειτουργεί

ως φασματογράφος και επιτρέπει μετρήσεις του πρωτογενούς φάσματος των κοσμικών ακτίνων από 500 MeV μέχρι 20 GeV. Η ενεργειακή περιοχή των Μετρητών Νετρονίων αρχίζει από το άνω όριο ενέργειας των ανιχνευτών κοσμικής ακτινοβολίας που υπάρχουν στους δορυφόρους. Το ύψος στο οποίο είναι τοποθετημένος ο μετρητής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην καταγραφόμενη ένταση της ακτινοβολίας. Επίσης, το μαγνητικό πλάτος ενός μετρητή καθορίζει τη χαμηλότερη μαγνητική δυσκαμψία ενός φορτισμένου σωματιδίου που μπορεί να φτάσει στον ανιχνευτή. Οι τιμές του κατωφλίου κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας κυμαίνονται από 1GV στους μαγνητικούς πόλους μέχρι 17 GV στον μαγνητικό ισημερινό. Με το μεγάλο ρυθμό καταμέτρησης που έχουν και την μεγάλη ενεργό επιφάνεια (μερικά τετραγωνικά μέτρα) μπορούν να μετρούν και μικρής κλίμακας μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας ειδικά όταν αυτές είναι ανισότροπες.

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην ανίχνευση των κοσμικών ακτίνων με τους μετρητές νετρονίων γι' αυτό και αναλύονται εκτενώς οι αρχές λειτουργίας τους.

Όλοι οι μετρητές νετρονίων εκμεταλλεύονται τη μεγάλη διαφορά στον τρόπο που αλληλεπιδρούν τα υψηλής και χαμηλής ενέργειας νετρόνια με τους διαφορετικούς πυρήνες. Τα νετρόνια υψηλής ενέργειας αλληλεπιδρούν σπάνια, αλλά όταν το κάνουν, είναι σε θέση να διαταράξουν τους βαρείς πυρήνες παράγοντας πολλά νετρόνια χαμηλής ενέργειας στη διαδικασία. Τα νετρόνια χαμηλής ενέργειας έχουν πολύ μεγαλύτερη πιθανότητα αλληλεπίδρασης με τους πυρήνες, αλλά αυτές οι αλληλεπιδράσεις είναι συνήθως ελαστικές που μεταφέρουν ενέργεια αλλά δεν αλλάζουν τη δομή του πυρήνα. Οι εξαιρέσεις από αυτό είναι μερικοί ειδικοί πυρήνες που απορροφούν γρήγορα εξαιρετικά χαμηλής ενέργειας νετρόνια, στη συνέχεια διασπώνται απελευθερώνοντας πολύ ενεργητικά φορτισμένα σωματίδια. Με αυτή τη συμπεριφορά των αλληλεπιδράσεων νετρονίων στο μυαλό, ο καθηγητής Simpson επέλεξε έξυπνα τα τέσσερα βασικά συστατικά μιας οθόνης νετρονίων:

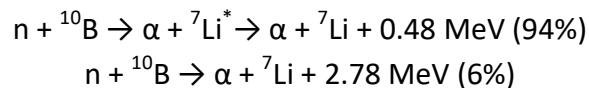
Ανακλαστήρας: Ένα εξωτερικό κέλυφος πλούσιο σε πρωτόνια, π.χ παραφίνη στις πρώιμες οθόνες νετρονίων και πολυαιθυλένιο στα πιο σύγχρονα. Τα νετρόνια χαμηλής ενέργειας που δεν παράγονται από την κοσμική ακτινοβολία δεν μπορούν να διεισδύσουν σε αυτό το υλικό. Έτσι, τα νετρόνια που προκαλούνται από το περιβάλλον φυλάσσονται εκτός της οθόνης και με τον ίδιο τρόπο τα χαμηλής ενέργειας νετρόνια που παράγονται στο μόλυβδο δεν μπορούν να διαφύγουν. Το υλικό αυτό είναι σε μεγάλο βαθμό διαφανές στα νετρόνια που προκαλούνται από τον καταγισμό των κοσμικών ακτίνων. Ο ανακλαστήρας έχει σχήμα ορθογώνιου κουτιού το οποίο περικλείει τα υπόλοιπα τμήματα του μετρητή.

Παραγωγός: Ο παραγωγός είναι μόλυβδος και, κατά βάρος, είναι το κύριο συστατικό ενός μετρητή νετρονίων. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια που διέρχονται από τον ανακλαστήρα αλληλεπιδρούν με το μόλυβδο και τότε λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του βομβαρδισμού. Ο πυρήνας του μολύβδου εκπέμπει τότε διάφορα δευτερογενή σωματίδια ανάμεσα στα οποία και

πολλά νετρόνια. Ο μέσος αριθμός νετρονίων που παράγονται ταυτόχρονα από τον βομβαρδισμό ενός πυρήνα μολύβδου από ένα νετρόνιο και έχουν ενέργεια μέσα στο εύρος στο οποίο είναι ευαίσθητος ο ανιχνευτής, ονομάζεται πολλαπλότητα n και ακολουθεί νόμο δύναμης ως προς την ενέργεια του αρχικού νετρονίου: $n=25E^{0.4}$ (GeV). Δηλαδή ο ρυθμός παραγωγής μειώνεται όσο αυξάνεται η ενέργεια του αρχικού νουκλεονίου.

Επιβραδυντής: Ο επιβραδυντής είναι ένα υλικό πλούσιο σε πρωτόνια, όπως ο ανακλαστήρας, ο οποίος ελαττώνει την ταχύτητα των νετρονίων που έχουν παραχθεί στον παραγωγό μετά από έναν μικρό αριθμό συγκρούσεων χωρίς να τα απορροφά σε μεγάλο βαθμό. Η ελάττωση αυτή της ταχύτητας των νετρονίων καθιστά τον εντοπισμό τους πιο πιθανό.

Αναλογικός απαριθμητής: Αυτή είναι η καρδιά ενός μετρητή νετρονίων. Προκειμένου να παρατηρηθούν παλμοί πρέπει να πραγματοποιηθεί ενίσχυση του σήματος. Η ταχεία ενίσχυση δια μέσου των δευτερογενών ιονισμών ονομάζεται “χιονοστιβάδα”. Το ύψος του εξαγόμενου παλμού είναι ανάλογο της ενέργειας που εναποτίθεται δια μέσου της ακτινοβολίας που εκπέμπεται μετά τον πρωτογενή ιονισμό. Για την ενίσχυση των νετρονίων χρησιμοποιείται το ισότοπο ^{10}B . Οι μετρητές νετρονίων χρησιμοποιούν αναλογικούς απαριθμητές που περιέχουν $^{10}\text{BF}_3$ και η λειτουργία τους στηρίζεται στις αντιδράσεις:



Καθώς ένα νετρόνιο αντιδρά με έναν πυρήνα ^{10}B , παράγονται ενεργητικά ιόντα ^4He και ^7Li , τα οποία απορροφούν ηλεκτρόνια από τα ουδέτερα άτομα του μετρητή, παράγοντας φορτίο. Ένα λεπτό καλώδιο τοποθετημένο κατά μήκος του κεντρικού άξονα του μετρητή συνδέεται με έναν ενισχυτή. Το φορτίο ανιχνεύεται από τον ενισχυτή και καταγράφεται ως μία μέτρηση.

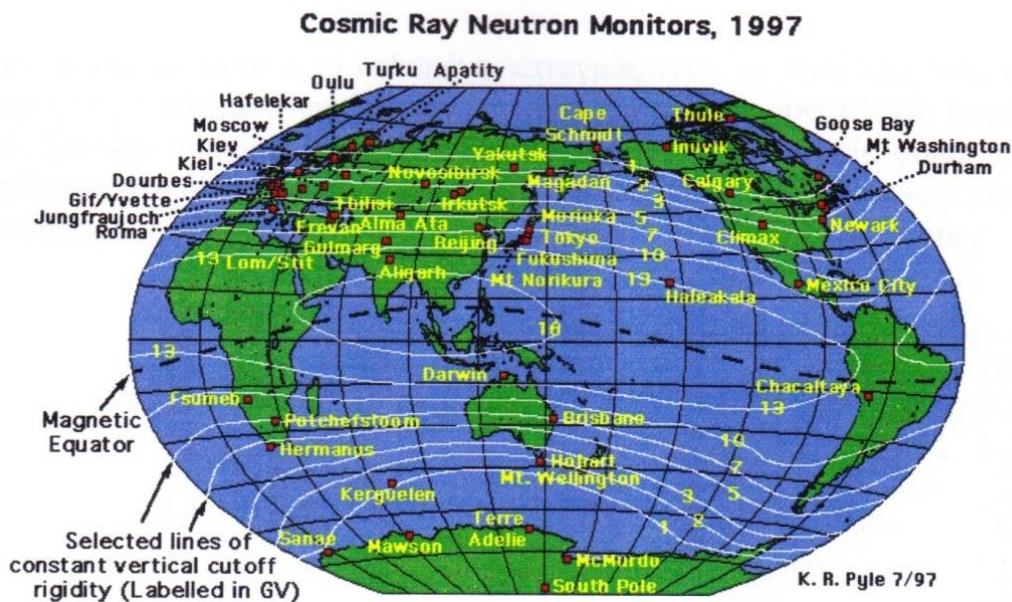
2.6.2.2 Παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων

Το Παγκόσμιο δίκτυο Μετρητών Νετρονίων που αποτελείται από 60 περίπου σταθμούς κατανεμημένους σε όλη τη Γη με μετρήσεις για χρονικό διάστημα σήμερα άνω των 50 ετών είναι ένα ισχυρό διαγνωστικό εργαλείο του φάσματος των κοσμικών ακτίνων στις χαμηλές πρωτογενείς ενέργειες, που χρησιμοποιεί το γήινο μαγνητικό πεδίο σαν φασματόμετρο. Το τμήμα αυτό του κοσμικού φάσματος που φθάνει στην ατμόσφαιρα της Γης διαμορφώνεται από το γεωμαγνητικό κατώφλι δυσκαμψίας, που ποικίλλει από 0 GV στους μαγνητικούς πόλους μέχρι 15GV στις ισημερινές περιοχές. Μετρητές με μεγάλο κατακόρυφο κατώφλι δυσκαμψίας, όπως ο Μετρητής Νετρονίων του Πανεπιστημίου της Αθήνας είναι λίγοι και πολύ

χρήσιμοι για τη μελέτη του Διαστημικού Καιρού (Simpson, 2000), όπως ονομάζεται σήμερα η Μετεωρολογία του Διαστήματος.

Το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων (σχήμα 2.5) είναι τελευταίας τεχνολογίας εξοπλισμός για μέτρηση πρωτογενών κοσμικών ακτίνων στην ενεργειακή περιοχή των 0.5-20 GeV. Οι μετρήσεις αυτές είναι υψηλής ευκρίνειας και προέρχονται από διάφορους σταθμούς μετρητών νετρονίων κατανεμημένων σε όλη τη Γη. Τελευταία δημιουργήθηκε η υψηλής ανάλυσης βάση δεδομένων μετρητών νετρονίων σε πραγματικό χρόνο (High resolution neutron monitor database-NMDB) (www.nmdb.eu/nest/) στην οποία συμμετέχει και η ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, η οποία συγκεντρώνει τα δεδομένα όλων των σταθμών και τα οποία στη συνέχεια είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο σε πραγματικό χρόνο.

Οι σταθμοί νετρονίων ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο που βρίσκονται, δηλαδή ανάλογα με το γεωμαγνητικό κατώφλι δυσκαμψίας τους, έχουν ελαφρώς διαφοροποιημένες μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές υπόκεινται σε κάποιες αλλαγές με βάση ένα σύστημα τροποποίησης, έτσι ώστε να μπορούν να συνδυαστούν και να χρησιμοποιηθούν στην πρόγνωση του Διαστημικού καιρού αλλά και των καιρικών συνθηκών μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα. Επιπλέον οι μετρήσεις αυτές είναι καίριας σημασίας για την παρακολούθηση της έκθεσης των δορυφορικών σταθμών και των αεροσκαφών στην κοσμική ακτινοβολία αλλά και την μακροπρόθεσμη συσχέτιση της κοσμικής ακτινοβολίας με τους ηλιακούς και γεωμαγνητικούς δείκτες.

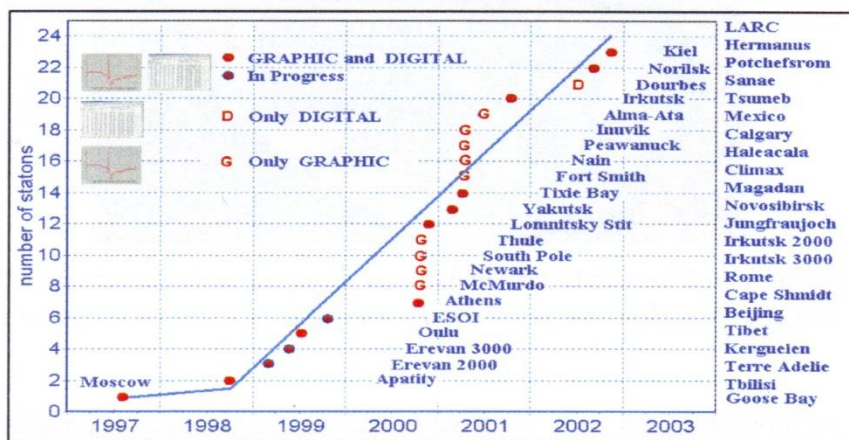


Σχήμα 2.5 Παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων

2.6.2.3 Σταθμοί νετρονίων “πραγματικού χρόνου”

Η βάση δεδομένων πραγματικού χρόνου ιδρύθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση το 2008 και αρχικά συμμετείχαν 12 χώρες, αν και διαρκώς αυξάνονται οι συμμετοχές (σχήμα 2.6). Στους σταθμούς αυτούς τα δεδομένα καταγράφονται με ανάλυση ενός λεπτού. Πραγματοποιείται έλεγχος της ποιότητας των δεδομένων κάθε μία ώρα με δυνατότητα διορθώσεων. Επιπλέον πραγματοποιούνται διορθώσεις με την πίεση μία φορά την ώρα και τα δεδομένα διατίθενται στο διαδίκτυο μέσω γραφήματος σε web server και σε αρχεία μέσω ftp server.

Η τεχνολογική ανάπτυξη επιτρέπει πλέον τον έλεγχο της ποιότητας των δεδομένων και την απευθείας σύγκριση με άλλους σταθμούς κοσμικής ακτινοβολίας. Επιτυγχάνεται επίσης ο έλεγχος και η διόρθωση των σφαλμάτων των οργάνων και πραγματοποιείται διόρθωση των δεδομένων με βάση τους μετεωρολογικούς παράγοντες. Χάρη στην ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ο οποίος μπορεί να ελέγχει όλα τα κανάλια ξεχωριστά αποκόπτονται σφάλματα χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία του σταθμού. Τέλος, υπολογίζονται στατιστικά σφάλματα από το κάθε κανάλι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό σφάλμα, μία διαδικασία που είναι απαραίτητη προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ποιότητα των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 2.6 Οι σταθμοί Νετρονίων που λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο χρονολογικά (Αναφορές)

2.6.2.4 Σταθμός νετρονίων της Αθήνας

Ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1970 με ένα μετρητικό σύστημα 3NM-64. Αρχικά ήταν εγκατεστημένος στο παλαιό

κτίριο του τμήματος Φυσικής, στο κέντρο της Αθήνας, σε ύψος 40 μέτρων από την θάλασσα και λειτουργούσε υπό την εποπτεία του καθηγητή Α. Αποστολάκη. Ο σταθμός έπαψε να λειτουργεί το 1977. Τον Νοέμβριο του 2000 τέθηκε σε λειτουργία ένας νέος σταθμός καταμέτρησης 6-NM64 ο οποίος εγκαταστάθηκε στο τμήμα φυσικής στην Πανεπιστημιούπολη της Αθήνας. Στη συνέχεια, επεκτάθηκε σε έξι κανάλια και λειτούργησε με την πιο σύγχρονη τεχνολογία χάρη στις συντονισμένες προσπάθειες των Ομάδων Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου της Αθήνας (ΕΥ Καθηγ. Ε. Μαυρομιχαλάκη) και του Ινστιτούτου Γήινου Μαγνητισμού, Ιονόσφαιρας και Ραδιοκυμάτων της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών (Drs V. Yanke, A. Belov, E. Eroshenko). Το ανιχνευτικό σύστημα αποτελείται από έξι αναλογικούς απαριθμητές τύπου BP28 Chalk Canada που περιέχουν BF_3 εμπλουτισμένο με το ισότοπο ^{10}B (σχήμα 2.7).

Ο σταθμός είναι τοποθετημένος σε ειδικά κατασκευασμένο χώρο στην οροφή του κτηρίου Φυσικής στην Πανεπιστημιούπολη του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σε ύψος 260m από την επιφάνεια της θάλασσας και έχει γεωμαγνητική δυσκαμψία 8.53 GV. Ήταν ο πρώτος μικρού πλάτους σταθμός και ο μοναδικός στην ανατολική Μεσόγειο. Ήταν ο τέταρτος σταθμός που παρείχε δεδομένα “πραγματικού χρόνου” ανάμεσα στο παγκόσμιο δίκτυο Μετρητών Νετρονίων.



Σχήμα 2.7 Ο μετρητής Νετρονίων του Πανεπιστημίου Αθηνών λειτουργεί με τεχνολογία πραγματικού χρόνου ανεληπώς από το Νοέμβριο του 2000 (τέταρτος κατά σειρά παγκοσμίως) (A.Ne.Mo.S.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Γενικά

Προκειμένου να προσδιοριστούν πιθανές περιοδικότητες σε δεδομένες χρονοσειρές παραμέτρων χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές φασματικής ανάλυσης. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι δύο τεχνικές ανάλυσης, fast Fourier μετασχηματισμός (FFT) και wavelet ανάλυση (Brigham, 1988; Torrence and Compro, 1998) που αναλύονται παρακάτω.

3.1 Fourier Transform

Η διαδικασία της κατανόησης ενός προβλήματος, μιας διαδικασίας ή ενός σήματος διευκολύνεται εάν είναι γνωστό ότι οι περίπλοκες δομές συντίθενται από απλούστερες. Στην μαθηματική ανάλυση δεν επιτυγχάνεται συχνά μία πλήρης αποσύνθεση στις απλούστερες δομές αλλά μία προσέγγιση από τις πιο περίπλοκες στις πιο στοιχειώδεις. Η ποιότητα της προσέγγισης εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχειωδών όρων. Ο Jean Baptiste Joseph Fourier επιβεβαίωσε ότι οποιαδήποτε περιοδική συνάρτηση μπορεί να γραφεί σαν μία τριγωνομετρική σειρά, την σειρά Fourier. Η σειρά Fourier έχει εφαρμογή σε συναρτήσεις οι οποίες είτε φθίνουν έξω από ένα πεπερασμένο διάστημα, είτε είναι περιοδικές. Αυτό όμως, δεν συμβαίνει συχνά στη φύση. Κάποιες συναρτήσεις είναι πολύ ταραχώδεις για να αναλυθούν σε μια τέτοια σειρά. Παρ'όλ'αυτά η σειρά Fourier δίνει σε μεγάλο ποσοστό τη λύση καθώς είναι αδύνατο να συλληφθεί η έννοια της ανάλυσης σήματος, στην οποία βασίζεται η σύγχρονη κοινωνία, χωρίς τη σειρά Fourier και τα μοντέρνα παρακλάδια της, Fourier μετασχηματισμό, fast Fourier μετασχηματισμό και wavelet μετασχηματισμό.

Έτσι λοιπόν μία συνάρτηση που ορίζεται για όλους τους πραγματικούς αριθμούς και δεν είναι εφικτός ο περιορισμός της σε ένα πεπερασμένο διάστημα ολοκληρώνεται στο διάστημα $[-\infty, +\infty]$ και η έκφραση (3.1.1) που προκύπτει ονομάζεται μετασχηματισμός Fourier:

$$\tilde{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.1.1).$$

Ο μετασχηματισμός Fourier αποσυνθέτει μία συνάρτηση χρόνου στις συχνότητες οι οποίες το αποτελούν.

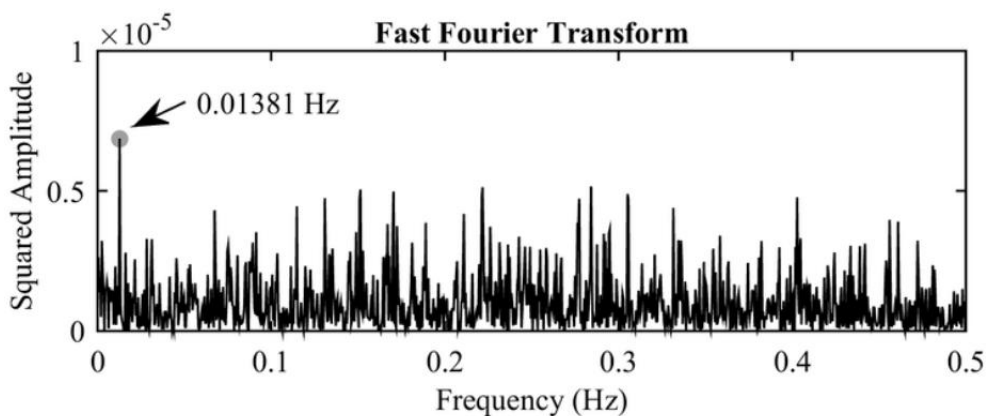
Μερικές συναρτήσεις είναι περιορισμένες χρονικά και αποτελούνται από διακριτές τιμές και όχι συνεχείς, όπως είναι οι χρονοσειρές που μελετώνται στην εργασία αυτή. Σε αυτή

την περίπτωση το ολοκλήρωμα του μετασχηματισμού προσεγγίζεται από ένα πεπερασμένο άθροισμα. Στην περίπτωση μίας χρονοσειράς N ισαπεχόντων σημείων το άθροισμα αυτό δίνεται από τον τύπο (3.2.2)

$$X_k = \sum_{n=0}^N x_n e^{-2i\pi kn/N} \quad (3.2.2)$$

όπου x_n τα σημεία της χρονοσειράς και X_k οι συχνότητες που προκύπτουν, με $n, k = 0, 1, 2, \dots, N$ καθώς για N διακριτά στοιχεία παράγονται N διακριτές συχνότητες. Το άθροισμα αυτό ονομάζεται discrete Fourier μετασχηματισμός (DFT) και είναι πολύ χρήσιμο καθώς μπορεί να υπολογιστεί ως ένα γινόμενο πινάκων. Πολλές φορές μερικοί όροι και μοτίβα μπορεί να επαναλαμβάνονται στον πίνακα αυτό και μία μέθοδος που εκμεταλλεύεται αυτή την επανάληψη είναι ο fast Fourier μετασχηματισμός (σχήμα 3.1). Η αποτελεσματικότητα αυτού του αλγορίθμου είναι τεράστια καθώς μπορεί να μειώσει ένα δισεκατομμύριο υπολογισμούς σε ένα εκατομμύριο, σε λιγότερο δηλαδή από το ένα χιλιοστό του αρχικού αριθμού. Είναι μία από τις μεγαλύτερες τεχνολογικές επιτεύξεις του εικοστού αιώνα.

Στην εργασία αυτή που μελετώνται μεγάλες χρονοσειρές χρησιμοποιείται ο fast Fourier μετασχηματισμός προκειμένου να εντοπιστούν γρήγορα οι βασικές περιοδικότητες από τις οποίες απαρτίζονται οι χρονοσειρές. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το περιοδόγραμμα που έχει αναπτυχθεί από τους Lomb και Scargle (Zechmeister and Kurster, 2009) και το οποίο είναι μία μέθοδος προσέγγισης ενός φάσματος συχνοτήτων, το οποίο βασίζεται στην εφαρμογή ημιτονοειδών συναρτήσεων στη χρονοσειρά με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, παρόμοια με την ανάλυση Fourier, η οποία είναι γνωστή και ως φασματική ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων (least-squares spectral analysis-LSSA).



Σχήμα 3.1 Fast Fourier Transform (Αναφορές)

3.2 Ανάλυση Wavelet

Η ανάλυση wavelet είναι μία μέθοδος παρόμοια με τον μετασχηματισμό Fourier καθώς κι αυτή αποσυνθέτει ένα σήμα στο χώρο χρόνου συχνότητας και προκύπτουν οι κυρίαρχες συχνότητες, αλλά επιπλέον απεικονίζει τη μεταβολή της έντασης αυτών των συχνοτήτων σε συνάρτηση με το χρόνο. Είναι δηλαδή μία τρισδιάστατη απεικόνιση χρόνου, συχνότητας και έντασης.

3.2.1 Συνάρτηση Morlet

Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση wavelet αποσυνθέτει ένα σήμα σε ένα άθροισμα wavelets (κυματιδίων), όπως ακριβώς η ανάλυση Fourier το αποσυνθέτει σε ένα άθροισμα ημιτόνων και συνημιτόνων. Ένα wavelet είναι μία ταλάντωση σαν κύμα με πλάτος που ξεκινάει από το μηδέν, αυξάνεται και μετά επιστρέφει στο μηδέν. Μπορεί να οπτικοποιηθεί σαν μία σύντομη ταλάντωση όπως αυτές που καταγράφονται από έναν καρδιογράφο ή μαθηματικά σαν μία γκαουσιανή συνάρτηση με μικρό πλάτος.

Τα wavelets προέρχονται από μία μητρική συνάρτηση. Η μητρική συνάρτηση που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία είναι η Morlet και δίνεται από την σχέση (3.2.1)

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (3.2.1)$$

όπου ω_0 είναι μία αδιάστατη συχνότητα. Η σχέση αυτή δίνει ένα wavelet το οποίο έχει συντεθεί από μία σύνθετη εκθετική συνάρτηση πολλαπλασιασμένη με μία γκαουσιανή συνάρτηση. Μία συνάρτηση wavelet μπορεί να δημιουργήσει μία βάση είτε ορθογωνίων είτε μη ορθογωνίων wavelets. Αυτή η συνάρτηση δημιουργεί μία βάση μη ορθογώνιων wavelets, δηλαδή τα στοιχεία που την αποτελούν δεν είναι κάθετα μεταξύ τους.

3.2.2 Continuous wavelet transform

Μία τέτοια συνάρτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε με διακριτό είτε με συνεχή μετασχηματισμό wavelet. Ο συνεχής μετασχηματισμός χρησιμοποιείται σε σήματα τα οποία δεν είναι στατικά ώστε να αναγνωρίσει στατικά τμήματα μέσα στο σήμα. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται μόνο ο συνεχής μετασχηματισμός και αυτός θα αναλυθεί.

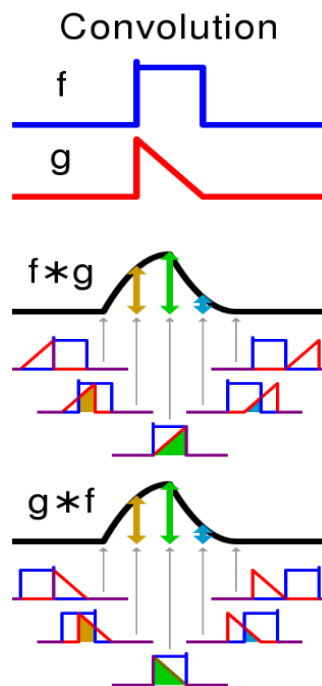
Οι χρονοσειρές που μελετώνται στην εργασία αυτή αποτελούνται από διακριτές, χρονικά ισαπέχουσες τιμές x_n όπου $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Ο συνεχής μετασχηματισμός wavelet μιας διακριτής σειράς x_n ορίζεται ως το άθροισμα των συνελίξεων της σειράς αυτής με τις μεταβαλλόμενες σε διάρκεια (scaled) και μετατοπισμένες στο χρόνο (translated) μορφές της μητρικής συνάρτησης $\psi_0\left(\frac{t}{s}\right)$:

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi * \left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right], \quad (3.2.2)$$

όπου ο αστερίσκος υποδηλώνει το μιγαδικό συζυγές της συνάρτησης και η έλλειψη του δείκτη 0 ότι η συνάρτηση έχει κανονικοποιηθεί. Το s ονομάζεται κλίμακα wavelet και δηλώνει την κλίμακα της συνάρτησης ή αλλιώς την διάρκεια του κυματιδίου.

Συνέλιξη (convolution) είναι μία μαθηματική εφαρμογή σε δύο συναρτήσεις ώστε να παράξουν μία τρίτη συνάρτηση. Στην εφαρμογή αυτή η μία από τις δύο συναρτήσεις σύρεται πάνω στην δεύτερη και σε κάθε κίνηση περικλείεται και διαφορετικό εμβαδό κάτω και από τις δύο συναρτήσεις (σχήμα 3.2). Έτσι παράγεται μία τρίτη συνάρτηση από τις τιμές των ολοκληρωμάτων. Η μέθοδος wavelet βασίζεται σε αυτή την εφαρμογή. Όταν ένα συγκεκριμένο wavelet με δεδομένη κλίμακα σύρεται πάνω στη χρονοσειρά, παράγονται πολλές τιμές ολοκληρωμάτων. Όπου η τιμή του ολοκληρώματος είναι μεγάλη, η συγκεκριμένη κλίμακα ή περίοδος θεωρείται ότι εμφανίζεται στην συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Πιο συγκεκριμένα με τον Windowed Fourier μετασχηματισμό (WFT) μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για τις συχνότητες τοπικά σε ένα σήμα. Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Fourier σε ένα συρόμενο τμήμα μήκους T σε μία χρονοσειρά βήματος δt και συνολικού μήκους $N\delta t$ προκύπτουν συχνότητες από T^{-1} έως $(2\delta T)^{-1}$ για κάθε τμήμα. Η τελευταία είναι η συχνότητα Nyquist που αναφέρεται παρακάτω.



Σχήμα 3.2 Συνέλιξη (convolution) (Wikipedia)

Μία εκδοχή του θεωρήματος της συνέλιξης εκφράζει ότι η συνέλιξη δύο συναρτήσεων f και g ισούται με τον ανάστροφο μετασχηματισμό Fourier του γινομένου των μετασχηματισμών Fourier των δύο συναρτήσεων,

$$f * g = F^{-1}\{F\{f\} \cdot F\{g\}\} \quad (3.2.3)$$

όπου ο αστερίσκος υποδηλώνει την συνέλιξη και η τελεία τον πολλαπλασιασμό.

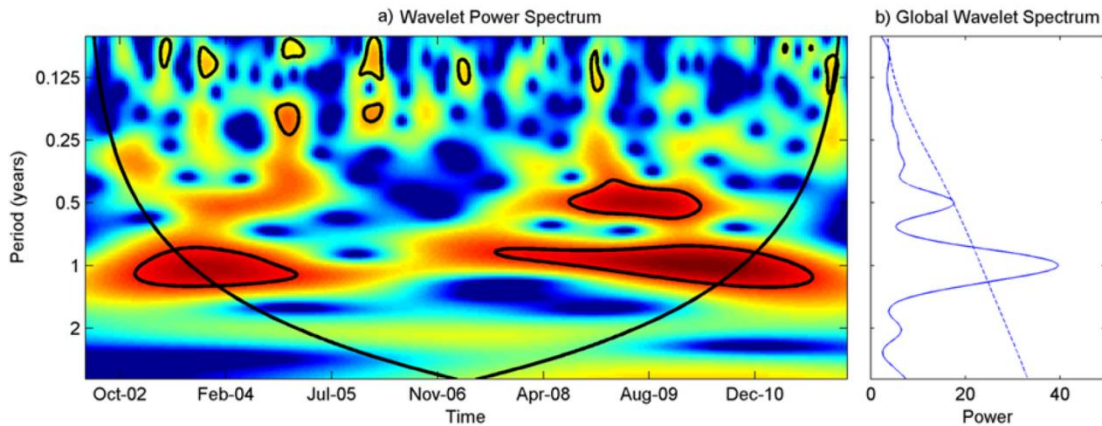
Χρησιμοποιώντας αυτή την εκδοχή ο συνεχής μετασχηματισμός wavelet της χρονοσειράς x_n γίνεται γρηγορότερα και δίνεται από τον τύπο (3.2.4)

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \psi^*(s\omega_k) e^{i\omega_k n \delta t} \quad (3.2.4)$$

όπου η γωνιακή συχνότητα ορίζεται ως $\omega_k = \begin{cases} \frac{2\pi k}{N\delta t} : k \leq N/2 \\ -\frac{2\pi k}{N\delta t} : k > N/2 \end{cases}$, s είναι η κλίμακα, X_k είναι ο

διακριτός μετασχηματισμός Fourier της χρονοσειράς x_n , $\psi(s\omega_k)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier της $\psi\left(\frac{t}{s}\right)$ και ο αστερίσκος δηλώνει τον μιγαδικό συζυγή.

Αλλάζοντας την κλίμακα s των wavelets και σύροντάς τα κατά μήκος της χρονοσειράς εξάγεται μία εικόνα η οποία απεικονίζει με χρώμα το πλάτος του μετασχηματισμού συναρτήσεως της κλίμακας και συναρτήσεως του χρόνου (σχήμα 3.3). Αυτή είναι και η διαφορά μεταξύ του μετασχηματισμού wavelet και του μετασχηματισμού Fourier, καθώς ο δεύτερος απεικονίζει μόνο το πλάτος συναρτήσεως της συχνότητας.



Σχήμα 3.3 Wavelet Power Spectrum και Global Wavelet Spectrum (Αναφορές)

3.2.3 Κανονικοποίηση

Για να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ των μετασχηματισμών wavelet (3.2.4) σε κάθε κλίμακα, κανονικοποιείται η συνάρτηση wavelet έτσι ώστε να έχει ενέργεια μονάδα

$$\hat{\psi}(s\omega_k) = 2\pi s/\delta t^{1/2}\psi_0(s\omega_k) \quad (3.2.5).$$

Εφαρμόζοντας αυτή την κανονικοποίηση για κάθε κλίμακα ισχύει ότι

$$\sum_{k=0}^{N-1} |\hat{\psi}(s\omega_k)|^2 = N \quad (3.2.6)$$

όπου N τα συνολικά σημεία και τότε το πλάτος του μετασχηματισμού wavelet εξαρτάται μόνο από το πλάτος του μετασχηματισμού Fourier. Με τη βοήθεια της σχέσης (3.2.2) η κανονικοποίηση γίνεται

$$\psi\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right] = \left(\frac{\delta t}{s}\right)^{1/2}\psi_0\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right], \quad (3.2.7)$$

όπου η $\psi_0(\eta)$ έχει κανονικοποιηθεί.

3.2.4 Κλίμακες

Το σετ των κλιμάκων εξαρτάται από την μητρική συνάρτηση που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση της συνάρτησης Morlet δημιουργείται μία μη ορθογώνια βάση και οι κλίμακες γράφονται σε δυνάμεις του δύο προκειμένου να εξαχθεί μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα:

$$s_j = s_0 2^{j\delta j}, \quad j = 0, 1, \dots, J \quad (3.2.8)$$

$$J = \delta j^{-1} \log_2\left(\frac{N\delta t}{s_0}\right), \quad (3.2.9)$$

όπου s_0 είναι η μικρότερη κλίμακα και J η μεγαλύτερη. Η επιλογή της s_0 γίνεται με βάση το χρονικό βήμα δt των χρονοσειρών που μελετώνται. Το χρονικό βήμα είναι αυτό που καθορίζει την μέγιστη συχνότητα που μπορεί να εντοπιστεί στο σήμα. Η συχνότητα αυτή, που ονομάζεται Nyquist, και δίνεται από τον τύπο $f_N = \frac{1}{2\delta t}$ αντιστοιχεί στη μικρότερη περίοδο που μπορεί να εντοπιστεί η οποία είναι διπλάσια του χρονικού βήματος $s_0 = 2\delta t$. Η κατώτατη συχνότητα που μπορεί να εντοπιστεί στο σήμα δίνεται από το μέγεθος της χρονοσειράς t και αντιστοιχεί σε $f_{min} = \frac{2}{t}$ καθώς σε μια χρονοσειρά η μέγιστη περιοδικότητα που μπορεί να εντοπιστεί είναι το μισό του συνολικού διαστήματος. Οι συχνότητες που ανήκουν έξω από αυτό το διάστημα ή στα όριά του δεν είναι έγκυρες καθώς υπόκεινται σε ένα φαινόμενο που ονομάζεται aliasing το οποίο μετατοπίζει την τιμή τους.

Η επιλογή ενός αποδοτικά μικρού δj εξαρτάται από το βάθος στο χώρο συχνοτήτων της συνάρτησης wavelet. Για τη συνάρτηση Morlet το μέγιστο δj που δίνει επαρκές δείγμα κλιμάκων είναι το 0.5. Συγκεκριμένα στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται η τιμή 0.25.

3.2.5 Κλίμακα Wavelet και Fourier συχνότητα

Η κλίμακα s δηλώνει περίοδο, όχι όμως την περίοδο που αντιστοιχεί στις συχνότητες Fourier. Σύμφωνα με τη μέθοδο των Meyers et al. (1993) η σχέση μεταξύ της περιόδου Fourier και της κλίμακας wavelet για μία συγκεκριμένη συνάρτηση wavelet μπορεί να υπολογιστεί αν εφαρμοστεί ένα συνημιτονοειδές κύμα μιας συγκεκριμένης συχνότητας στο συνεχή μετασχηματισμό wavelet και στη συνέχεια υπολογιστεί η κλίμακα στην οποία το πλάτος του WPS γίνεται μέγιστο. Για την συνάρτηση Morlet η σχέση αυτή είναι $\lambda = 1.03 s$ όπου λ η περίοδος Fourier. Παρατηρείται ότι στην συγκεκριμένη συνάρτηση η κλίμακα s και η περίοδος Fourier σχεδόν ταυτίζονται.

3.2.6 Φάσμα wavelet και Κώνος επιρροής

Ο κώδικας που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή στηρίζεται στη δουλειά των Torrence and Compro, 1998. Σαν έξοδο έχει δύο φάσματα wavelet, ένα που απεικονίζει το πλάτος συναρτήσεων των συχνοτήτων και της χρονοσειράς, το οποίο ονομάζεται wavelet power spectrum (WPS), και ένα το οποίο δείχνει το πλάτος συναρτήσεων των συχνοτήτων, παρόμοιο με ένα φάσμα Fourier, και το οποίο ονομάζεται global wavelet spectrum (GWS). Στα δύο αυτά διαγράμματα υπάρχουν περιοχές στις οποίες τα αποτελέσματα έχουν 95% επίπεδο εμπιστοσύνης. Αυτές οι περιοχές υποδηλώνονται από τα μαύρα περιγράμματα (contours) στο WPS και από την διακεκομμένη κόκκινη γραμμή στο GWS.

Στο WPS εμφανίζεται μία λεπτή μαύρη γραμμή, η οποία έχει σχήμα κώνου. Το κομμάτι που βρίσκεται μέσα σε αυτή τη γραμμή ονομάζεται κώνος επιρροής και οριοθετεί την περιοχή όπου τα αποτελέσματα είναι έγκυρα. Η ανάγκη γι'αυτή την περιοχή έρχεται από το γεγονός ότι οι χρονοσειρές που μελετώνται είναι πεπερασμένες και μη περιοδικές με αποτέλεσμα να υπεισέρχονται σφάλματα λόγω των φαινομένων των άκρων μιας και ο μετασχηματισμός Fourier υποθέτει ότι τα δεδομένα είναι περιοδικά. Για να αποφεύγονται αυτά τα φαινόμενα μπορούν να προστεθούν μηδενικά (zero padding) στην αρχή και στο τέλος μιας χρονοσειράς έτσι ώστε να φτάσει ο αριθμός των δεδομένων στην επόμενη δύναμη του 2 και ο αλγόριθμος να επιτύχει την μέγιστη ταχύτητα.

Τα αποτελέσματα των δύο αυτών τεχνικών ανάλυσης, fast Fourier και wavelet μετασχηματισμό, στις χρονοσειρές των ηλιακών κηλίδων, του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου B_z , του γεωμαγνητικού δείκτη A_p και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Γενικά

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω τεχνικές στις χρονοσειρές των ηλιακών κηλίδων, της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, του γεωμαγνητικού δείκτη Ap και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, προκύπτει ένα πλήθος διαγραμμάτων από τα οποία επιλέγονται και παρουσιάζονται αυτά με την καταλληλότερη ανάλυση και συνοχή. Στα αποτελέσματα διακρίνονται πολλές ενδιαφέρουσες περιοδικότητες διαφόρων κλιμάκων. Περιοδικότητες από δύο ημέρες έως ένα μήνα θεωρούνται μικρής κλίμακας περιοδικότητες. Από δύο μήνες έως δύο χρόνια θεωρούνται μεσαίας κλίμακας και από δύο χρόνια και πάνω θεωρούνται μεγάλης κλίμακας. Οι περιοδικότητες αυτές δίνουν πολλές πληροφορίες και θα χρησιμοποιηθούν για την πρόγνωση του Διαστημικού καιρού.

4.1 Συλλογή δεδομένων

Η παρούσα ανάλυση αφορά την χρονική περίοδο από το 1965 έως το 2018, η οποία καλύπτει τους ηλιακούς κύκλους 20 ως 24. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες και μηνιαίες χρονοσειρές, από την 1 Ιανουαρίου 1965 έως τις 31 Μαρτίου 2018, για την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (cosmic-ray intensity-CRI), όπως καταγράφεται από το σταθμό νετρονίων της Μόσχας (γεωγραφικές συντεταγμένες 55.47° N, 37.32° E, μαγνητική δυσκαμψία 2.43 GV, υψόμετρο 200 m) και ημερήσιες χρονοσειρές από την 1 Ιανουαρίου 2001 έως τις 31 Δεκεμβρίου 2003, όπως καταγράφονται από τους σταθμούς νετρονίων της Αθήνας (γεωγραφικές συντεταγμένες 37.97° N, 23.78° E, μαγνητική δυσκαμψία 8.53 GV, υψόμετρο 260 m) και του Lomnický štít (γεωγραφικές συντεταγμένες 49.20° N, 20.22° E, μαγνητική δυσκαμψία 3.84 GV, υψόμετρο 2634 m). Τα δεδομένα αυτά, διορθωμένα με την πίεση, έχουν ληφθεί από την βάση δεδομένων μετρητών νετρονίων (High resolution Neutron Monitor Database-NMDB) (www.nmdb.eu/nest/).

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες και μηνιαίες τιμές, από την 1 Ιανουαρίου 1965 έως τις 31 Μαρτίου 2018, του αριθμού των ηλιακών κηλίδων (solar sunspot number-SSN) από το WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels (www.sidc.be/silso/datafiles).

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες τιμές από την 1 Ιανουαρίου 1965 έως τις 31 Μαρτίου 2018 και μηνιαίες τιμές από τον Ιανουάριο του 1965 έως τον Φεβρουάριο του 2011 για τον γεωμαγνητικό δείκτη Ap (Ap geomagnetic index), από το National Oceanic and

Atmospheric Administration (NOAA)
(ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP). Τέλος,

χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες τιμές από την 1 Ιανουαρίου 1995 έως τις 31 Μαρτίου 2018 και 27-ήμερες τιμές από τον Ιανουάριο του 1995 έως τον Μάρτιο του 2018 της Bz συνιστώσας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (Interplanetary magnetic field-IMF) στο γεωκεντρικό ηλιακό μαγνητοσφαιρικό (Geocentric Solar Magnetospheric-GSM) σύστημα συντεταγμένων από το NASA Goddard Space Flight Center, Space Physics Data Facility (omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html). Οι μηνιαίες τιμές του δείκτη Ap, καθώς και οι ημερήσιες και 27-ήμερες τιμές της Bz συνιστώσας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, αναφέρονται σε μικρότερα χρονικά διαστήματα λόγω έλλειψης διαθέσιμων δεδομένων στο υπόλοιπο διάστημα.

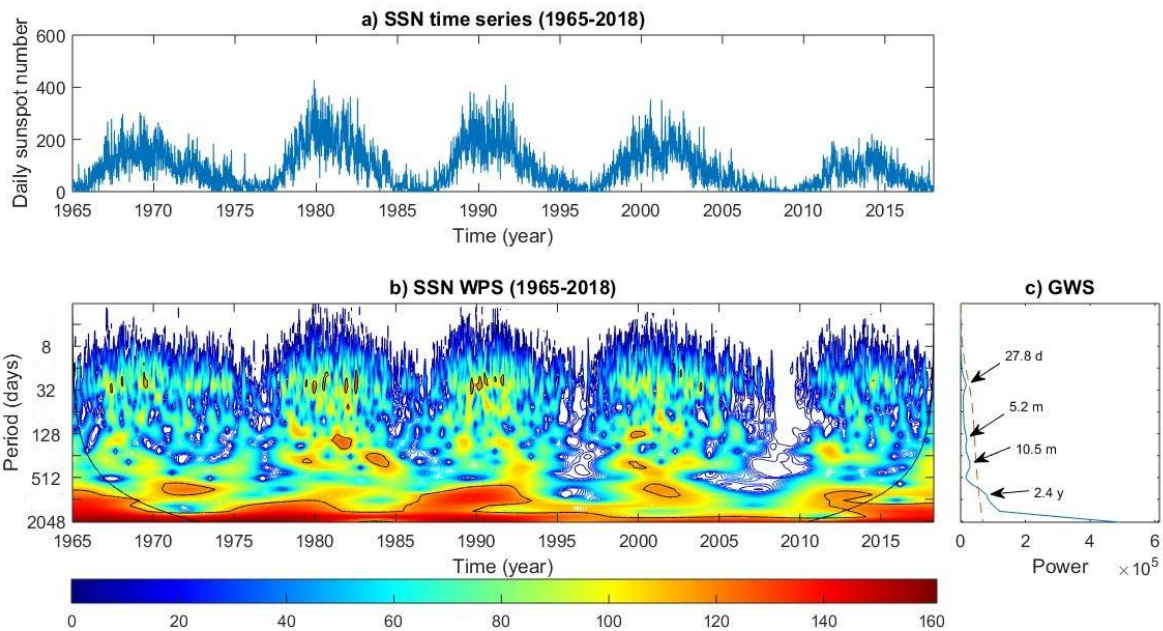
4.2 Φασματική ανάλυση των ηλιακών κηλίδων

α) Μέθοδος wavelet

Η ανάλυση wavelet που εφαρμόστηκε σε ημερήσιες τιμές των ηλιακών κηλίδων, δίνει μικρής-, μεσαίας-, και μεγάλης κλίμακας περιοδικότητες οι οποίες αναγράφονται στον **πίνακα 4.1** και αναπαριστώνται στο **σχήμα 4.1**. Στο πάνω παράθυρο αυτού του διαγράμματος φαίνεται το προφίλ της ημερήσιας μεταβολής των ηλιακών κηλίδων για το χρονικό διάστημα 1965-2018 και διακρίνεται ξεκάθαρα ο ενδεκαετής κύκλος. Στο κάτω παράθυρο αναπαρίσταται το wavelet power spectrum (WPS) αυτής της παραμέτρου στην κλίμακα από 2 έως 2048 ημέρες, ενώ στο δεξιά παράθυρο αναπαρίσταται το global wavelet spectrum (GWS) των ηλιακών κηλίδων. Οι περιοδικότητες με την μεγαλύτερη σημασία είναι αυτές που αντιστοιχούν στις κορυφές του GWS. Το 95% επίπεδο εμπιστοσύνης υποδηλώνεται από τα μαύρα περιγράμματα στο WPS και από την διακεκομμένη κόκκινη γραμμή στο GWS. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα εμφανίζονται η 27-ήμερη περιοδικότητα, η 5.2- και 10.5-μηνών και η 2.4-χρόνων. Η γνωστή 27-ήμερη περιοδικότητα οφείλεται στην περιστροφή του Ήλιου. Η 5.2-μηνών περιοδικότητα, γνωστή και ως περίοδος Rieger, εμφανίζεται συνήθως στο μέγιστο ενός ηλιακού κύκλου (Rieger et al., 1984). Δημιουργείται από το ισχυρό μαγνητικό πεδίο το οποίο παράγεται στη ζώνη μεταφοράς του Ήλιου και παρασύρεται προς τα έξω προκαλώντας παροδικές διαταραχές σε διάφορες παραμέτρους στο διαπλανητικό χώρο. Γι'αυτό το λόγο η περιοδικότητα αυτή αλλά και παράγωγά της, καθώς και τύπου Rieger περιοδικότητες, διακρίνονται και στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Οι 10.5-μηνών και 2.4-χρόνων περιοδικότητες ανήκουν σε μία κατηγορία περιοδικοτήτων που ονομάζεται quasi-biennial oscillations (QBOs) και περιλαμβάνει περιοδικότητες από 0.6 έως 4 χρόνια. Οι περιοδικότητες αυτές είναι πολύ κοινές διακυμάνσεις στην ηλιακή δραστηριότητα, στις διαπλανητικές παραμέτρους, στους γεωμαγνητικούς δείκτες και στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας

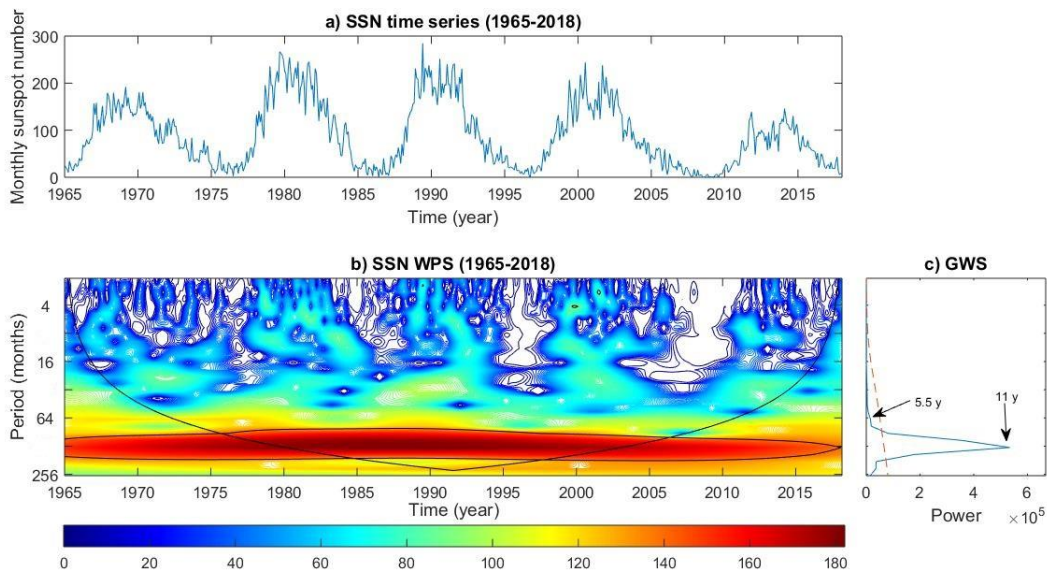
(Bazilevskaya et al., 2014). Οι QBOs θεωρούνται βασικές διακυμάνσεις των δεικτών της ηλιακής δραστηριότητας σε κλίμακες μικρότερες από 11 χρόνια και πιθανότατα σχετίζονται με τον μηχανισμό του ηλιακού δυναμό στο εσωτερικό του Ήλιου (Chowdhury, Kudela, and Moon, 2016).

Η περίοδος Rieger και η 10.5-μηνών είναι ισχυρότερες στους ηλιακούς κύκλους 21 και 23, ενώ η 2.4-χρόνων είναι ισχυρότερη στους κύκλους 20, 22 και 24. Επιβεβαιώνεται έτσι η όμοια συμπεριφορά μεταξύ περιττών και άρτιων κύκλων που έχει αναφερθεί σε προηγούμενες εργασίες (Otaola, Perez-Enriquez, and Valdes-Galicia, 1985; Mavromichalaki, Marmatsouri, and Vassilaki, 1988; Durney, 2000; Yoshida, 2014). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ανά 11 χρόνια αναστρέφεται η πολικότητα του ηλιακού μαγνητικού πεδίου και άρα ανά 22 χρόνια ολοκληρώνεται ένας μαγνητικός κύκλος. Επομένως είναι λογικό κάποιες χαρακτηριστικές περιοδικότητες της ηλιακής δραστηριότητας να εμφανίζονται ανά 22 χρόνια (Mavromichalaki, Belehaki, and Rafios, 1998; Mavromichalaki et al., 2017) και γι' αυτό κάποιες δουλειές χωρίζουν τις περιόδους μελέτης σε μαγνητικούς κύκλους (Singh and Badruddin, 2017).



Σχήμα 4.1 Ημερήσιο προφίλ των ηλιακών κηλίδων (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 2018 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

Επιπροσθέτως, εφαρμόζεται η wavelet ανάλυση και σε μηνιαίες τιμές των ηλιακών κηλίδων και προκύπτουν επιπλέον περιοδικότητες όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.2**, του οποίου η κλίμακα είναι από 2 έως 256 μήνες. Οι περιοδικότητες αυτές είναι οι 11-χρόνων και 5.5-χρόνων όπως φαίνεται πολύ ξεκάθαρα από το WPS και το GWS του **σχήμα 4.2**. Η 11-χρόνων περιοδικότητα είναι ο ηλιακός κύκλος και η 5.5-χρόνων περιοδικότητα είναι η δεύτερη αρμονική του η οποία οφείλεται στην ασύμμετρη φύση του ηλιακού κύκλου (Currie, 1976; Sugiura, 1980; Mursula, Usoskin, and Zieger, 1997). Οι wavelet και Fourier μέθοδοι συμπεριλαμβάνουν στο φάσμα και τα πολλαπλάσια και υποπολλαπλάσια των κυρίαρχων περιοδικοτήτων.



Σχήμα 4.2 Μηνιαίο προφίλ των ηλιακών κηλίδων (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 256 μήνες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

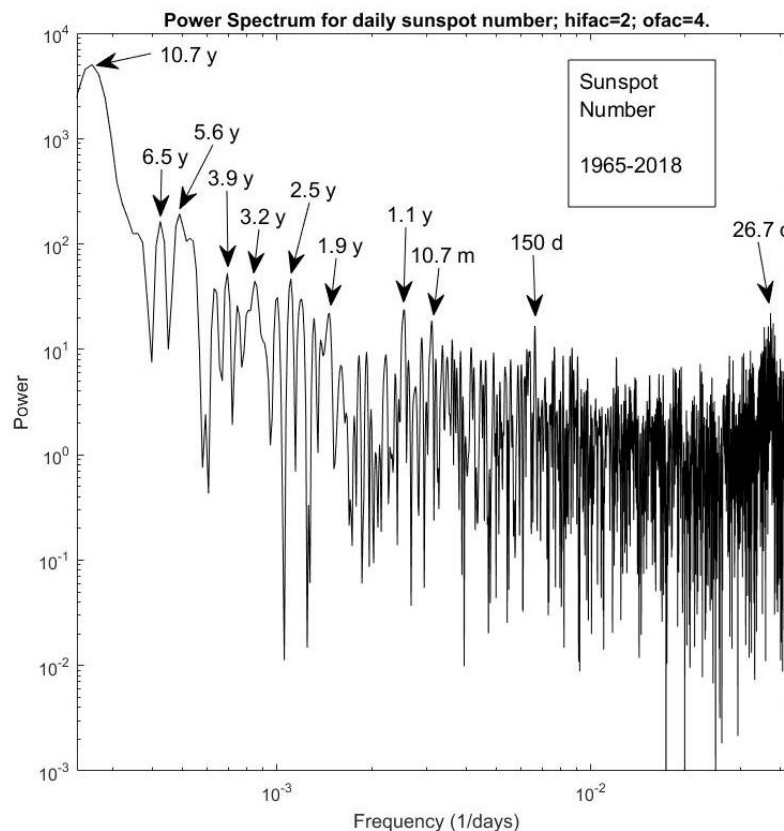
Wavelet Periodicities			
	Short-term	Mid-term	Long-term
SSN	27.8 d	5.2 m, 10.5 m	2.4 y, 5.5 y, 11 y

Πίνακας 4.1 Σημαντικές περιοδικότητες από την Wavelet ανάλυση των ηλιακών κηλίδων για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

β) Μέθοδος Fourier

Στο **σχήμα 4.3** φαίνεται το Lomb-Scargle φάσμα του fast Fourier μετασχηματισμού της ημερήσιας χρονοσειράς των ηλιακών κηλίδων για το χρονικό διάστημα 1965-2018. Οι σημειωμένες κορυφές έχουν επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και αναγράφονται στον **πίνακα 4.2**. Εκτός από τις περιοδικότητες που προκύπτουν από την wavelet ανάλυση, βρέθηκαν και η 1.1-χρόνων περιοδικότητα που οφείλεται στην περιστροφή της Γης γύρω από τον Ήλιο, οι 1.9-, 3.2- και 3.9-χρόνων περιοδικότητες οι οποίες ανήκουν στις QBOs. Τέλος βρέθηκε και μία περιοδικότητα 6.5-χρόνων που μπορεί να εξηγείται ως η τρίτη αρμονική του μαγνητικού κύκλου.

Η διαφορά της Fourier από την wavelet ανάλυση είναι ότι η Fourier ανάλυση δίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές των συχνοτήτων, αλλά με την wavelet ανάλυση μπορεί να γίνει προσδιορισμός του χρονικού διαστήματος στο οποίο μία συγκεκριμένη συχνότητα ήταν ισχυρή και να προκύψουν συμπεράσματα όπως αυτό των κοινών χαρακτηριστικών μεταξύ περιττών και άρτιων κύκλων (Mavromichalaki, Marmatsouri, and Vassilaki, 1988).



Σχήμα 4.3 Lomb-Scargle φάσμα της ημερήσιας χρονοσειράς των ηλιακών κηλίδων για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

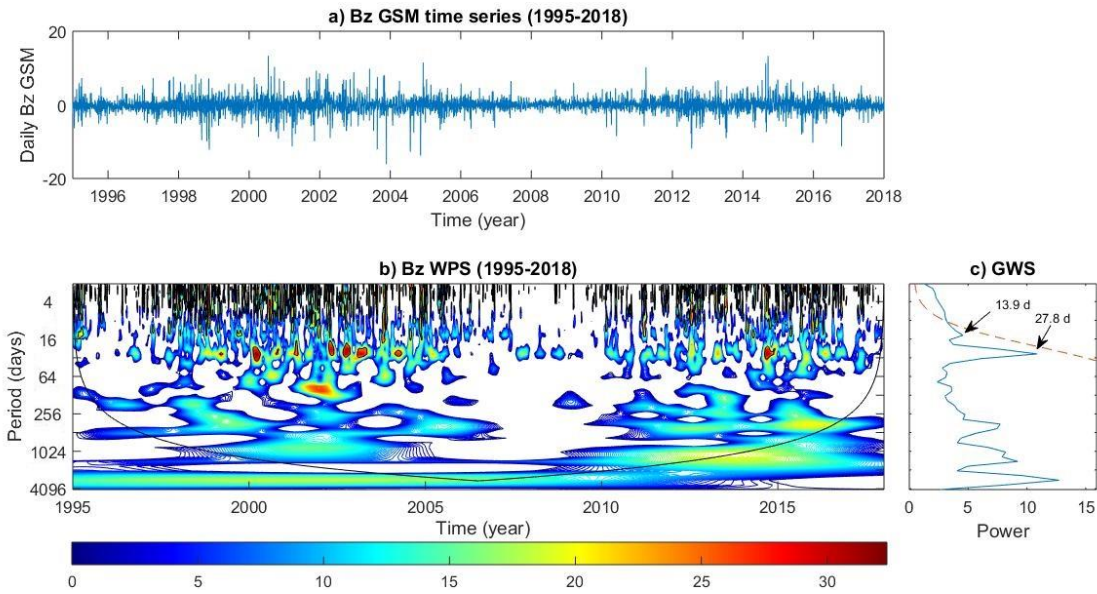
Fast Fourier Transform (FFT) (Lomb—Scargle) Periodicities			
Confidence level 95%			
	Short-term	Mid-term	Long-term
SSN	26.7 d	5 m, 10.7 m, 1.1 y, 1.9 y	2.5 y, 3.2 y, 3.9 y, 5.6 y, 6.5 y, 10.7 y

Πίνακας 4.2 Σημαντικές περιοδικότητες από την Lomb-Scargle ανάλυση των ημερήσιων χρονοσειρών των ηλιακών κηλίδων για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

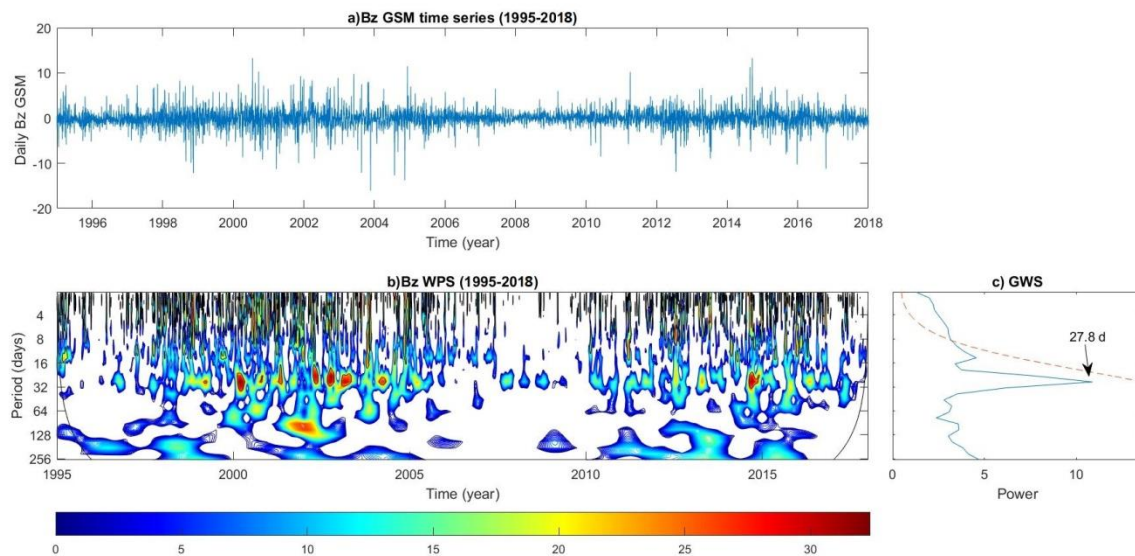
4.3 Φασματική ανάλυση του Διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου

α) Μέθοδος Wavelet

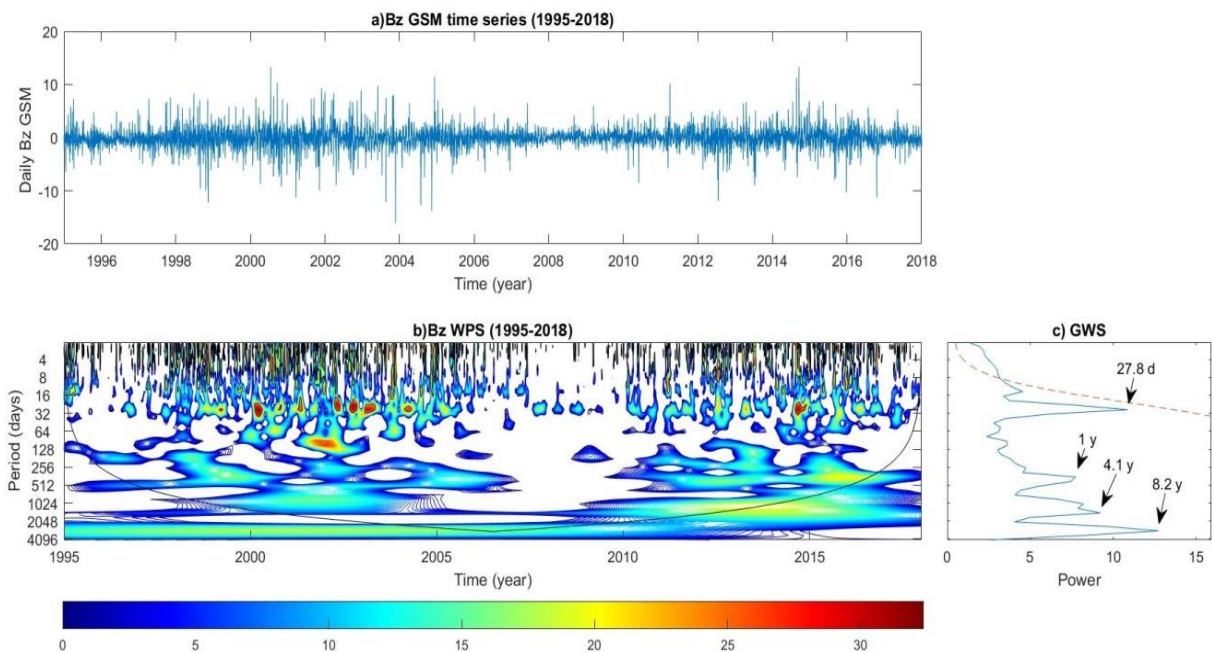
Οι περιοδικότητες που προκύπτουν από το WPS της ημερήσιας χρονοσειράς της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για το χρονικό διάστημα 1995-2018 φαίνονται στα **σχήματα 4.4, 4.5, 4.6** και αναγράφονται στον **πίνακα 4.3**. Η κλίμακα των **σχημάτων 4.4** και **4.6** είναι από 2 έως 4096 ημέρες, ενώ του **σχήματος 4.5** είναι από 2 έως 256 ημέρες καθώς το διάγραμμα αυτό εστιάζει στην 27-ήμερη περιοδικότητα. Συγκεκριμένα απεικονίζονται οι 13.9- και 27-ημερών περιοδικότητες που είναι οι πιο ισχυρές αυτής της παραμέτρου ενώ οι υπόλοιπες 1-, 4.2- και 8.2- χρόνων είναι πολύ πιο χαμηλά από το 95% επίπεδο εμπιστοσύνης, όπως φαίνεται από το GWS του **σχήματος 4.6**.



Σχήμα 4.4 Ημερήσιο προφίλ της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 4096 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1995-2018.



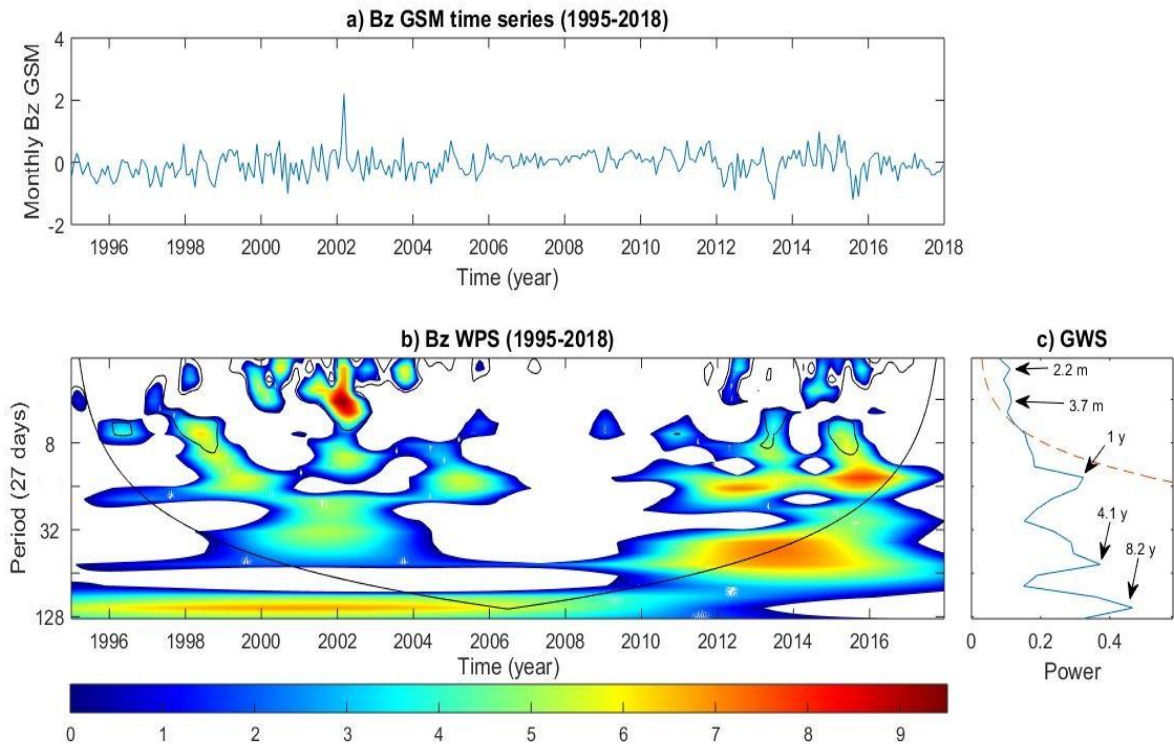
Σχήμα 4.5 Ημερήσιο προφίλ της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 256 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1995-2018.



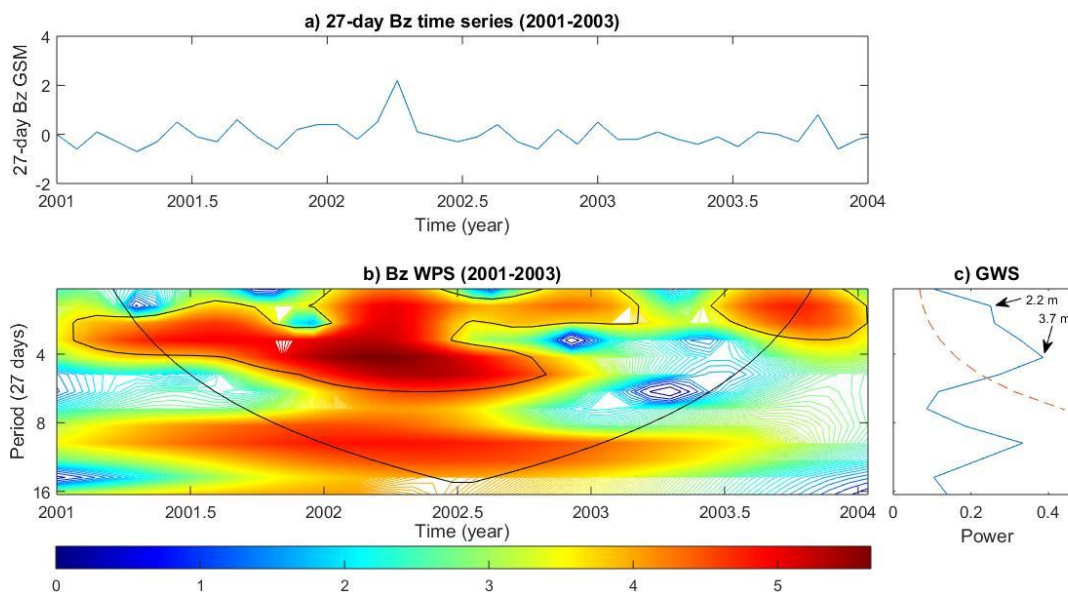
Σχήμα 4.6 Ημερήσιο προφίλ της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 4096 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1995-2018.

Προκειμένου να εντοπιστούν μεγαλύτερης κλίμακας περιοδικότητες θα πρέπει να παραληφθούν οι παραπάνω περιοδικότητες και αυτό επιτυγχάνεται παίρνοντας χρονοσειρά 27-ήμερων τιμών. Έτσι, η wavelet ανάλυση των 27-ήμερων τιμών της Bz συνιστώσας για το χρονικό διάστημα 1995-2018 φαίνεται στο **σχήμα 4.7**. Η κλίμακα αυτού του διαγράμματος είναι από 54 έως 3,456 ημέρες και βγάζει τις περιοδικότητες 2.2- και 3.7-μηνών, οι οποίες βρίσκονται πάνω από 95% επίπεδο εμπιστοσύνης και πιθανότατα είναι πολλαπλάσια της 27-ημέρης περιστροφής του Ήλιου, την 1-χρόνων, η οποία βρίσκεται λίγο κάτω από αυτό το επίπεδο εμπιστοσύνης και τέλος τις περιοδικότητες 4.1- και 8.2-χρόνων, οι οποίες βρίσκονται πολύ πιο κάτω από το 95% επίπεδο εμπιστοσύνης. Οι περιοδικότητες αυτές φαίνονται στο GWS του **σχήματος 4.7** και αναγράφονται στον **πίνακα 4.3**. Στο WPS του ίδιου διαγράμματος φαίνεται ότι οι περιοδικότητες 2.2- και 3.7-μηνών ήταν ισχυρές γύρω από το έτος 2002, γι'αυτό περιορίζουμε το χρονικό διάστημα της έρευνας στα έτη 2001-2003, **σχήμα 4.8**, το οποίο καλύπτει τη μέγιστη φάση και μέρος της καθοδικής του κύκλου 23, προκειμένου να μελετηθούν αναλυτικότερα αυτές οι περιοδικότητες. Ο χρονικός αυτός περιορισμός της

έρευνας γίνεται για να επαληθευτούν οι περιοδικότητες αυτές στην παράμετρο Bz, αλλά γίνεται και στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας για να ελεγχθεί αν στο ίδιο χρονικό διάστημα εμφανίζονται οι ίδιες περιοδικότητες. Μία τέτοια συσχέτιση θα επαλήθευε την άμεση σχέση που έχουν αυτές οι δύο παράμετροι. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζονται παρακάτω, στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο.



Σχήμα 4.7 27-ήμερο προφίλ της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 128 μήνες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1995-2018.



Σχήμα 4.8 27-ήμερο προφίλ της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 16 μήνες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 2001-2003.

Wavelet Periodicities			
	Short-term	Mid-term	Long-term
IMF Bz	13.9 d, 27.8 d	2.2 m, 3.7 m, 1 y	-

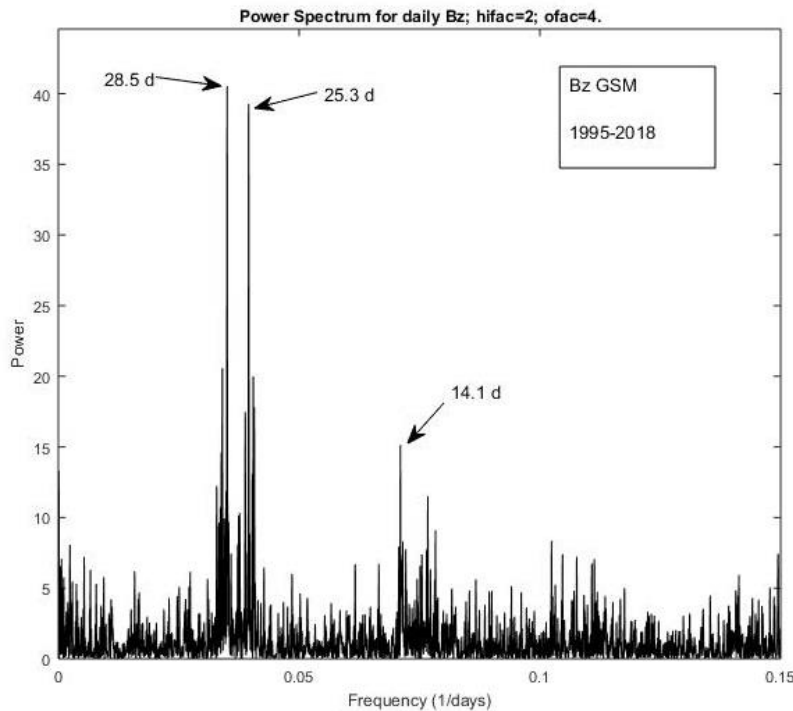
Πίνακας 4.3 Σημαντικές περιοδικότητες από την Wavelet ανάλυση της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για το χρονικό διάστημα 1995-2018.

β) Μέθοδος Fourier

Το Lomb-Scargle φάσμα της ημερήσιας χρονοσειράς της Bz συνιστώσας για το χρονικό διάστημα 1995-2018 φαίνεται στο **σχήμα 4.9** και τα αποτελέσματα που απεικονίζει στον **πίνακα 4.4**. Οι περιοδικότητες αυτές που έχουν 95% επίπεδο εμπιστοσύνης, αντιστοιχούν στις 14.1 και 28.5 ημέρες. Τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και στην εργασία του Chang (2014) για το χρονικό διάστημα 1997-2012. Αυτό που είναι πολύ ενδιαφέρον όμως στο διάγραμμα αυτό, είναι ότι αυτές οι δύο κορυφές χωρίζονται σε δύο μικρότερες κορυφές η κάθε μία. Αυτή η διαίρεση οφείλεται στο γεγονός ότι η μέτρηση της Bz συνιστώσας του διαπλανητικού

μαγνητικού πεδίου από το διάστημα κυμαίνεται ελαφρώς, γι'αυτό και η κορυφή δεν είναι καλά ορισμένη. Ο Chang (2014) υπέδειξε ότι μία θεμελιώδης περίοδος μπορεί να επηρεάζει την κυρίαρχη 27-ήμερη περίοδο και γι'αυτό να διαιρείται η κορυφή. Συγκεκριμένα, πρότεινε ένα άμεσο μοντέλο όπου μία ταλάντωση συχνότητας διαμορφώνεται από έναν τυχαίο παράγοντα και βρήκε ότι αυτός ο τυχαίος παράγοντας στην περίπτωση του Bz είναι η περιοδικότητα του ενός χρόνου. Αυτό το αποτέλεσμα βρίσκεται σε συμφωνία με το αποτέλεσμα αυτής της εργασίας όπου η ενός έτους περιοδικότητα, όπως φαίνεται από το GWS του **σχήματος 4.7**, είναι ακριβώς κάτω από το 95% επίπεδο εμπιστοσύνης (Baranji and Ludmany, 2003). Σύμφωνα με τους Poblet and Azpilicueta (2018), η φυσική διεργασία που οφείλεται στο 27-ήμερο σήμα της μαγνητικής δραστηριότητας, σχετίζεται με τον ηλιακό άνεμο και όχι την ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι ο συγκεκριμένος διχασμός βρέθηκε και στο αντίστοιχο φάσμα του γεωμαγνητικού δείκτη Ap, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 4.14**. Αντιθέτως, ο διχασμός αυτός δεν εμφανίζεται στα φάσματα Fourier των ηλιακών κηλίδων και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.9 Lomb-Scargle φάσμα της ημερήσιας χρονοσειράς της Bz συνιστώσας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για το χρονικό διάστημα 1995-2018.

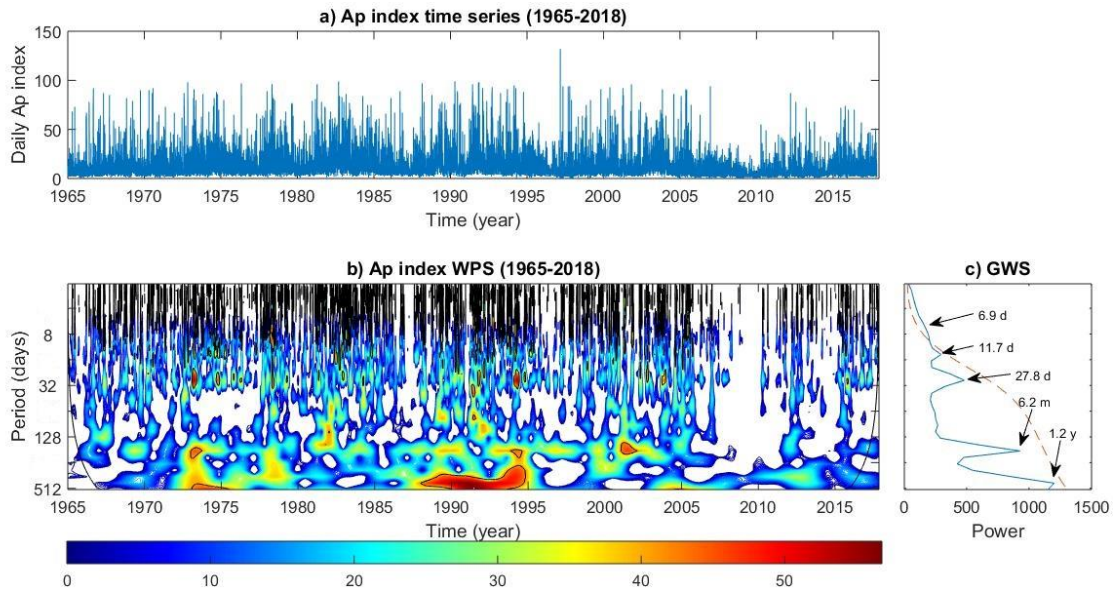
Fast Fourier Transform (FFT) (Lomb—Scargle)			
Periodicities			
Confidence level 95%			
	Short-term	Mid-term	Long-term
IMF Bz	14.1 d, 28.5 d	-	-

Πίνακας 4.4 Σημαντικές περιοδικότητες από την Lomb-Scargle ανάλυση της ημερήσιας χρονοσειράς της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για το χρονικό διάστημα 1995-2018.

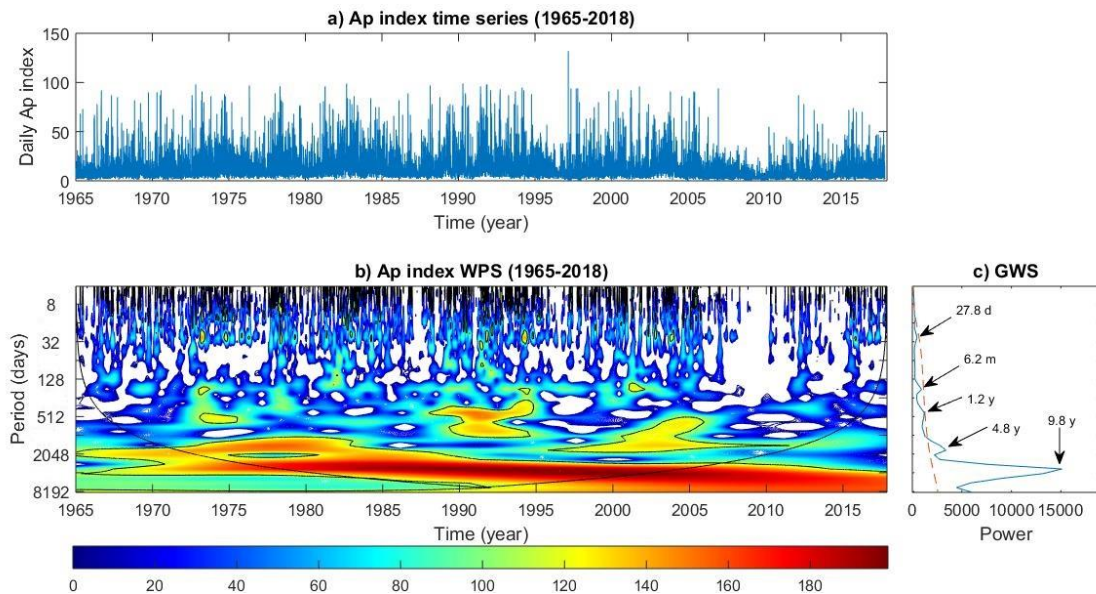
4.4 Φασματική ανάλυση του Γεωμαγνητικού δείκτη Ap

α) Μέθοδος Wavelet

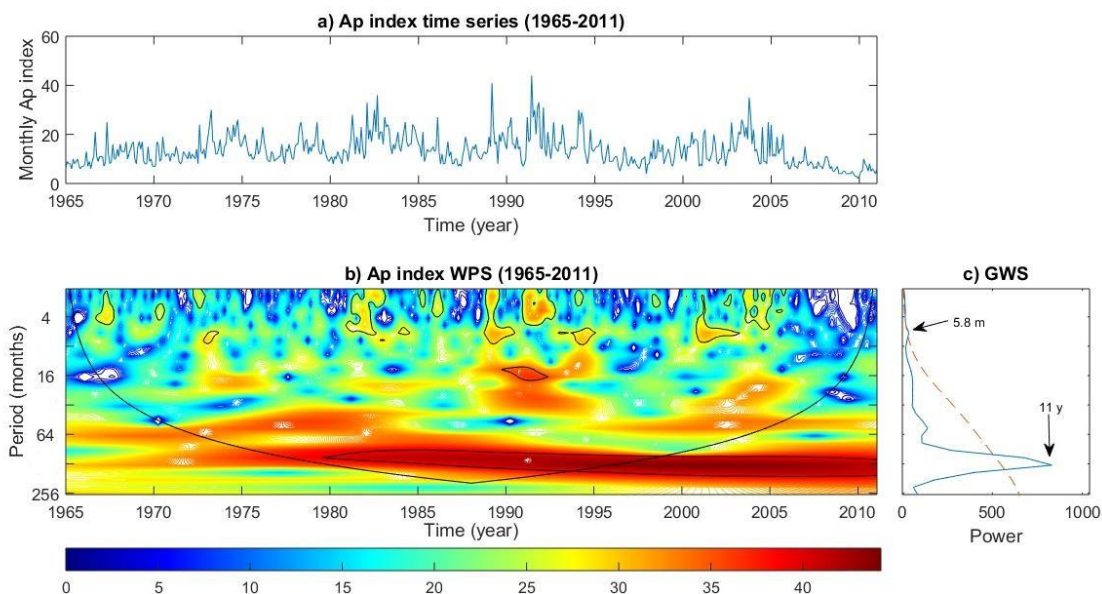
Από την wavelet ανάλυση της ημερήσιας χρονοσειράς του γεωμαγνητικού δείκτη Ap για το χρονικό διάστημα 1965-2018 προκύπτει το **σχήμα 4.10** με κλίμακα από 2 ημέρες έως 512 ημέρες. Στο GWS του **σχήματος 4.10** φαίνονται η πρώτη, δεύτερη και τέταρτη αρμονική της 27-ήμερης περιστροφής και οι 6-μηνών και 1.2-χρόνων περιοδικότητες, οι οποίες είναι πολύ χαρακτηριστικές για τον δείκτη αυτό και ανήκουν στις QBOs (Paularena, Szabo, and Richardson, 1995). Στη συνέχεια, αλλάζοντας την κλίμακα του WPS από 4 έως 8192 ημέρες, βγαίνει το **σχήμα 4.11** το οποίο απεικονίζει επιπλέον την πρώτη και δεύτερη αρμονική του 11-ετούς ηλιακού κύκλου. Η ανάλυση της μηνιαίας χρονοσειράς του δείκτη Ap για την κλίμακα από 2 έως 256 μήνες φαίνεται στο **σχήμα 4.12** και δείχνει την 6-μηνών περιοδικότητα και τον ενδεκαετή κύκλο. Παρατηρείται ότι τα GWS του γεωμαγνητικού δείκτη Ap είναι πιο ομαλά και ξεκάθαρα απ'ότι των υπολοίπων παραμέτρων. Όλες οι παραπάνω περιοδικότητες συγκεντρώνονται στον **πίνακα 4.5**.



Σχήμα 4.10 Ημερήσιο προφίλ του γεωμαγνητικού δείκτη Ap (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 512 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1965-2018.



Σχήμα 4.11 Ημερήσιο προφίλ του γεωμαγνητικού δείκτη Ap (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 4 έως 8192 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1965-2018.



Σχήμα 4.12 Μηνιαίο προφίλ του γεωμαγνητικού δείκτη Ap (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 256 μήνες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1965-2011.

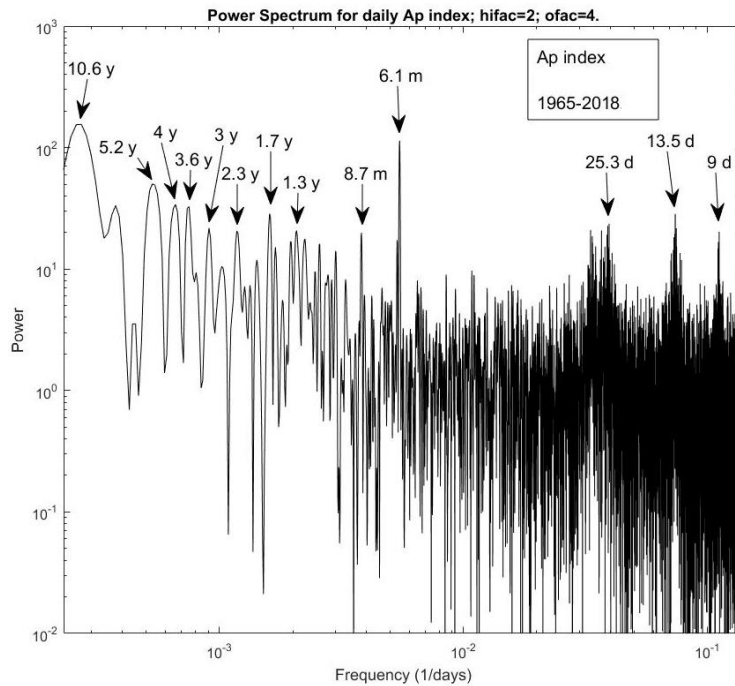
Wavelet Periodicities			
	Short-term	Mid-term	Long-term
Ap index	6.9 d, 11.7 d, 27.8 d	6.2 m, 1.2 y	5.5 y, 11 y

Πίνακας 4.5 Σημαντικές περιοδικότητες από την Wavelet ανάλυση του γεωμαγνητικού δείκτη Ap για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

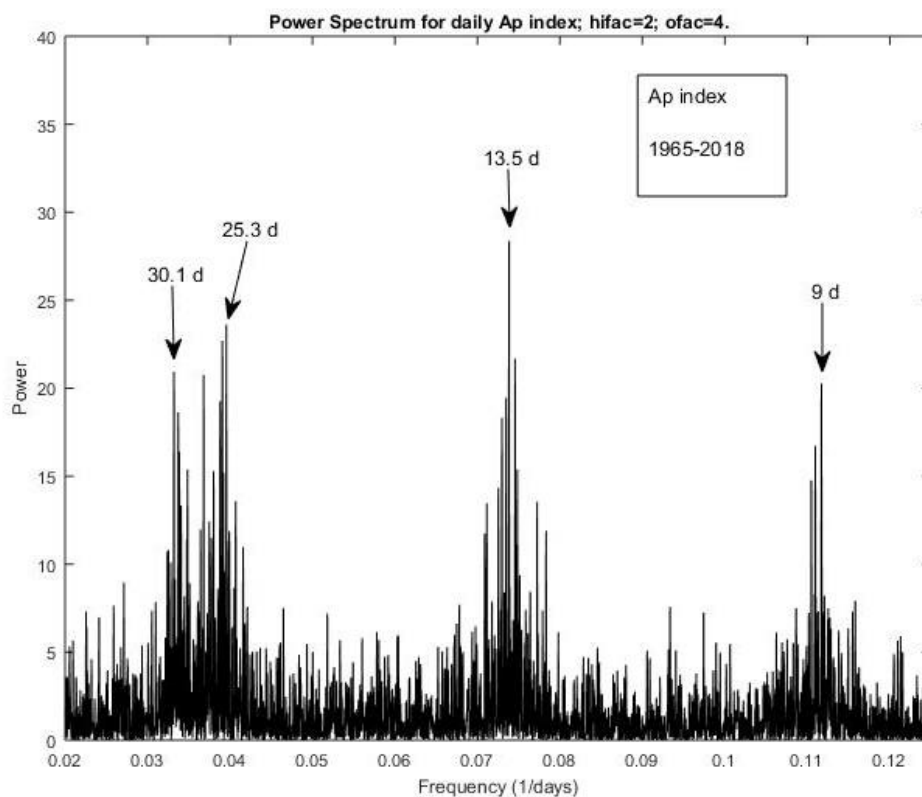
β) Μέθοδος Fourier

Το Lomb-Scargle φάσμα αυτού του δείκτη φαίνεται στο **σχήμα 4.13**. Εκτός από τις περιοδικότητες που βρέθηκαν από την ανάλυση wavelet, η ανάλυση Fourier δίνει επιπλέον τις περιοδικότητες 1.3- και 1.7-χρόνων, οι οποίες θεωρούνται πολλαπλάσια της περιόδου Rieger, τις 2.3-, 3-, 3.6- και 4-χρόνων οι οποίες ανήκουν όλες στις QBOs. Οι περιοδικότητες αυτές συγκεντρώνονται στον **πίνακα 4.6**. Τα αποτελέσματα αυτά είναι παρόμοια με αυτά των ηλιακών κηλίδων καθώς οι ηλιακές διαταραχές μεταφέρονται στην ηλιόσφαιρα μέσω των ανοιχτών μαγνητικών γραμμών και του ηλιακού ανέμου και γι'αυτό εντοπίζονται και στις

ηλιοσφαιρικές και μαγνητοσφαιρικές παραμέτρους, καθώς και στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας όπως θα δούμε παρακάτω. Επιπροσθέτως σε αυτές τις περιοδικότητες, στο **σχήμα 4.13** εμφανίζεται και η διαίρεση της κορυφής της 27-ήμερης περιστροφής σε δύο κορυφές όπως ακριβώς και στην περίπτωση της συνιστώσας Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Το **σχήμα 4.14** εστιάζει σε αυτή τη διαίρεση.



Σχήμα 4.13 Lomb-Scargle φάσμα της ημερήσιας χρονοσειράς του γεωμαγνητικού δείκτη Ap για το χρονικό διάστημα 1965-2018.



Σχήμα 4.14 Lomb-Scargle φάσμα της ημερήσιας χρονοσειράς του γεωμαγνητικού δείκτη Ap για το χρονικό διάστημα 1965-2018 το οποίο απεικονίζει το διχασμό της 27-ήμερες κορυφής.

Fast Fourier Transform (FFT) (Lomb—Scargle) Periodicities			
Confidence level 95%			
	Short-term	Mid-term	Long-term
Ap index	9 d, 13.5 d, 25.3 d	6.1 m, 8.7 m, 1.3 y, 1.7 y	2.3 y, 3 y, 3.6 y, 4 y, 5.2 y, 10.6 y

Πίνακας 4.6 Σημαντικές περιοδικότητες από την Lomb-Scargle ανάλυση της ημερήσιας χρονοσειράς του γεωμαγνητικού δείκτη Ap για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

4.5 Φασματική ανάλυση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας

4.5.1 Μεγάλης κλίμακας ανάλυση

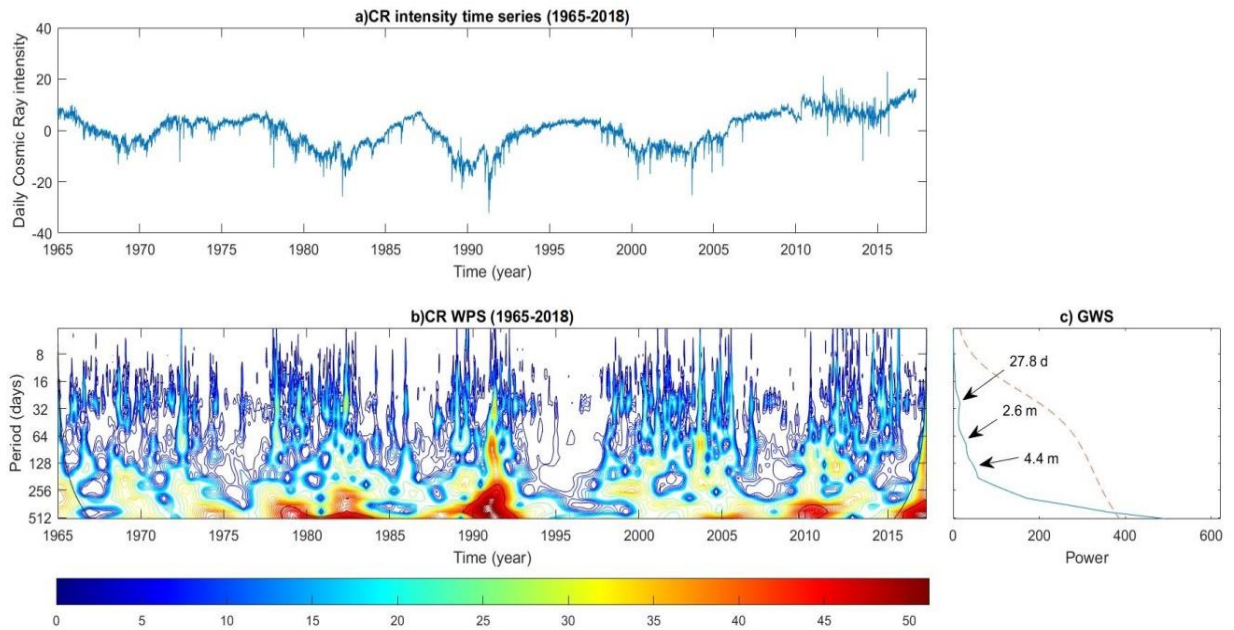
α) Μέθοδος Wavelet

Από την wavelet ανάλυση της ημερήσιας χρονοσειράς της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας προκύπτουν πολλά διαγράμματα με διαφορετικές κλίμακες. Το **σχήμα 4.15** απεικονίζει την wavelet ανάλυση για την κλίμακα από 4 ημέρες έως 512 ημέρες. Στο διάγραμμα αυτό διακρίνουμε τις περιοδικότητες των 27 ημερών, των 2.6- και 4.4 μηνών με επίπεδο εμπιστοσύνης πολύ πιο κάτω από το 95%. Όσον αφορά την περίοδο των 27 ημερών που είναι γνωστή περιοδικότητα για την κοσμική ακτινοβολία (Kudela, Ananth, and Venkatesan, 1991; Mavromichalaki et al., 2003b; Chowdhury, Kudela, and Moon, 2016), δεν εμφανίζεται στην συγκεκριμένη ανάλυση των 53 χρόνων, καθώς οι μεγαλύτερες περιοδικότητες που εντοπίζονται στο διάστημα αυτό έχουν πολύ μεγαλύτερη ένταση με αποτέλεσμα να επικαλύπτεται η ένταση της 27-ήμερης. Παρακάτω που αλλάζει το χρονικό διάστημα της μελέτης, η 27-ήμερη περιοδικότητα εντοπίζεται με επίπεδο εμπιστοσύνης μεγαλύτερο του 95%.

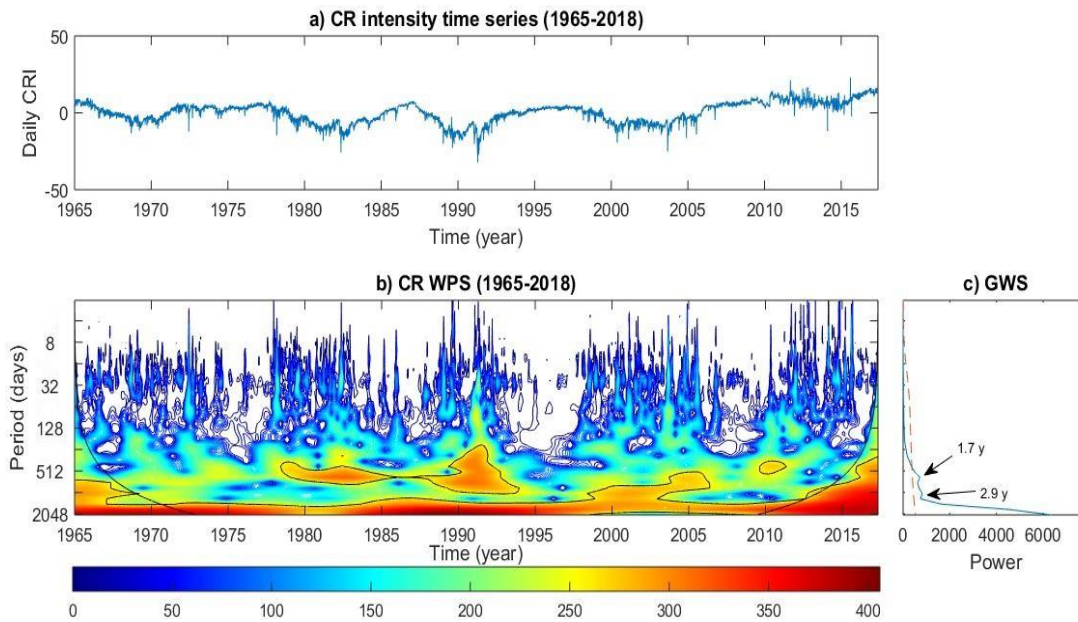
Το **σχήμα 4.16** απεικονίζει την wavelet ανάλυση αυτής της χρονοσειράς για την κλίμακα από 2 ημέρες έως 2048 ημέρες. Σε αυτό το διάγραμμα φαίνονται οι περιοδικότητες 1.7- και 2.9 χρόνων. Η 1.7-χρόνων περιοδικότητα είναι πολλαπλάσιο της περιόδου Rieger και η 2.9-χρόνων ανήκει στις QBOs, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο των ηλιακών κηλίδων. Οι διαφορές μεταξύ περιττών και άρτιων κύκλων (Otaola, Perez-Enriquez, and Valdes-Galicia, 1985) όσον αφορά περιόδους μικρότερες από τρία χρόνια δεν είναι τόσο ξεκάθαρες όσο στο WPS της ηλιακής δραστηριότητας της αντίστοιχης χρονικής κλίμακας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτό συμβαίνει επειδή οι μεγάλης κλίμακας περιοδικότητες είναι πολύ πιο ισχυρές από τις μικρής κλίμακας περιοδικότητες όσον αφορά την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, και επειδή αναλύονται παράλληλα, η ισχύς των τελευταίων επικαλύπτεται.

Από την wavelet ανάλυση της μηνιαίας χρονοσειράς για το ίδιο χρονικό διάστημα βγάζει το **σχήμα 4.17** για την κλίμακα από 2 μήνες έως 256 μήνες. Στο GWS διακρίνονται οι περιοδικότητες 11- και 18.5-χρόνων. Οι περιοδικότητες αυτές δηλώνουν τον 11-ετή και 22-ετή κύκλο αντίστοιχα. Ο 22-ετής μαγνητικός κύκλος από την θεωρία εμφανίζεται ως περιοδικότητα 18.5-χρόνων στο φάσμα. Η διαφορά αυτή οφείλεται πιθανότατα στο γεγονός ότι για ένα

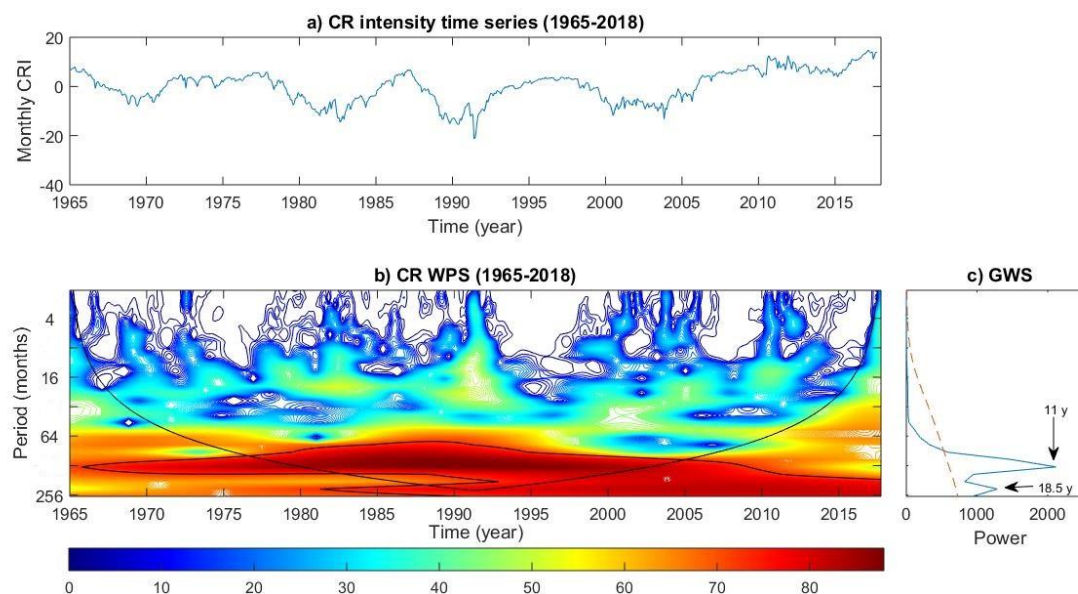
δοσμένο χρονικό διάστημα διεξαγωγής της έρευνας, οι ανιχνεύσιμες συχνότητες έχουν ένα συγκεκριμένο εύρος και οι συχνότητες στα άκρα αυτού του εύρους μπορεί να μετατοπίζονται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται “aliasing”. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοδικότητα αυτή εμφανίζεται μέσα στον κώνο επιρροής μόνο στο φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας και όχι στα φάσματα των υπολοίπων παραμέτρων, γεγονός που επιβεβαιώνει την άμεση σχέση μεταξύ μαγνητικού πεδίου και έντασης κοσμικής ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.15 Ημερήσιο προφίλ της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 4 έως 512 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1965-2018.



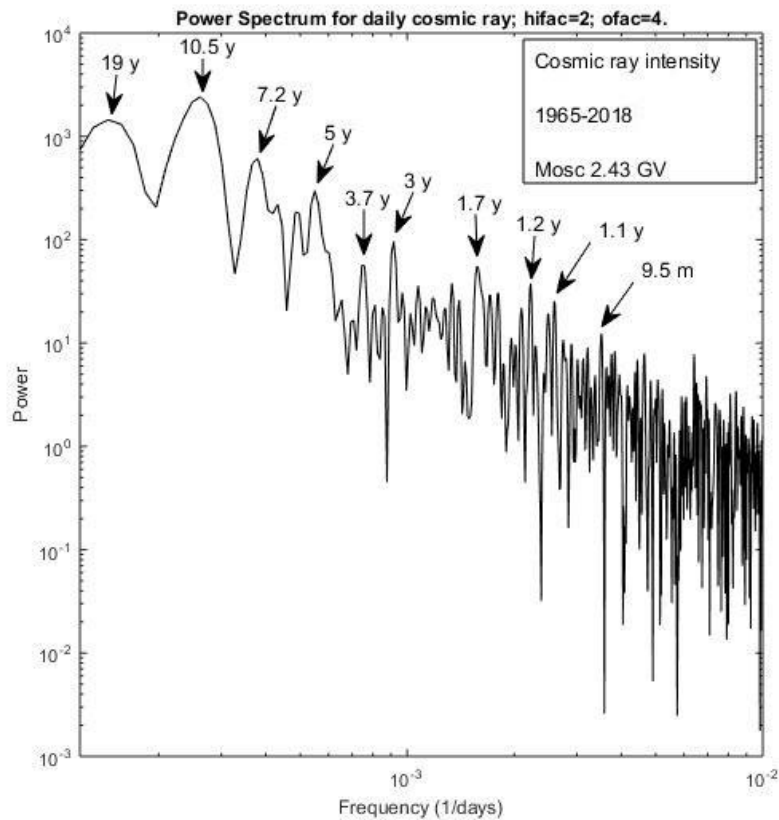
Σχήμα 4.16 Ημερήσιο προφίλ της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 2048 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1965-2018.



Σχήμα 4.17 Μηνιαίο προφίλ των ηλιακών κηλίδων (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 256 μήνες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

β) Μέθοδος Fourier

Το **σχήμα 4.18** απεικονίζει την Lomb-Scargle ανάλυση της ημερήσιας χρονοσειράς της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Οι σημειωμένες κορυφές έχουν επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Η πρώτη κορυφή με αυτό το επίπεδο εμπιστοσύνης είναι των 9.5-μηνών. Η περιοδικότητα αυτή ανήκει στις QBOs, οφείλεται δηλαδή στις διεργασίες που συμβαίνουν στη ζώνη μεταφοράς του Ήλιου και γι'αυτό και η περιοδικότητα αυτή εμφανίζεται και στην ηλιακή δραστηριότητα διά μέσου των ηλιακών κηλίδων με μία μικρή μεταβολή στην τιμή της. Μετά την περιοδικότητα αυτή εμφανίζεται η ετήσια περιοδικότητα της περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο και η 1.2- και 1.7-χρόνων οι οποίες είναι πολλαπλάσια της περιόδου Rieger. Οι περιοδικότητες αυτές εμφανίζονται στο φάσμα παρόλο που δεν εμφανίζεται η περίοδος Rieger και αυτό συμβαίνει λόγω της διαφοράς στην ένταση αυτών καθώς η ένταση είναι ανάλογη της περιοδικότητας. Στη συνέχεια, εμφανίζονται οι περιοδικότητες 3- και 3.7-χρόνων, οι οποίες ανήκουν στις QBOs, η 5-χρόνων που είναι η δεύτερη αρμονική του 11-ετούς κύκλου, η 7.2-χρόνων που είναι η τρίτη αρμονική του 22-ετούς κύκλου και η 10.5-χρόνων που είναι ο ενδεκαετής ηλιακός κύκλος και η 19-χρόνων που αντιπροσωπεύει τον μαγνητικό κύκλο. Όλες οι παραπάνω περιοδικότητες απεικονίζονται στον **πίνακα 4.8**. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η ηλιακή δραστηριότητα με την γεωμαγνητική και την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας είναι αλληλένδετα συνδεδεμένες και γι'αυτό και δίνουν τις ίδιες περιοδικότητες. Πιο συγκεκριμένα, τα φαινόμενα που συμβαίνουν στον Ήλιο φτάνουν στην μαγνητόσφαιρα υπό μορφή μαγνητικών συννέφων που “καταπίνουν” τη Γη και επομένως σχεδόν ταυτόχρονα διαμορφώνουν την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.18 Lomb-Scargle φάσμα της ημερήσιας χρονοσειράς της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

4.5.2 Μικρής κλίμακας ανάλυση

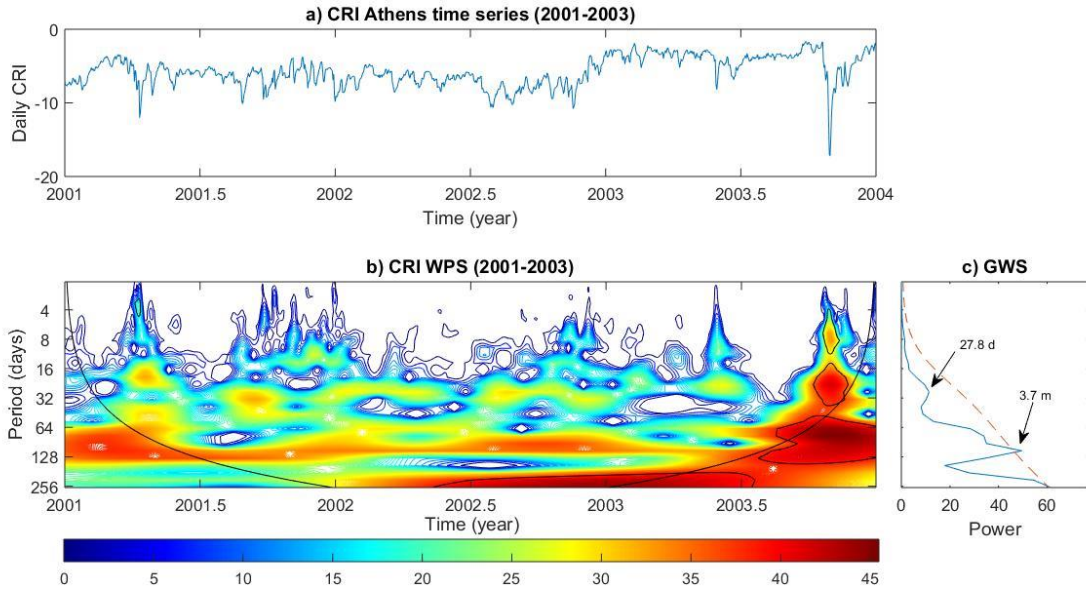
α) Μέθοδος Wavelet

Στο υποκεφάλαιο του Bz δείκτη περιορίστηκε η μελέτη στο χρονικό διάστημα 2001-2003 καθώς σε αυτό το χρονικό διάστημα εμφανίστηκαν οι περιοδικότητες 2.2- και 3.7-μηνών και ο ίδιος περιορισμός γίνεται για την κοσμική ακτινοβολία προκειμένου να διεξαχθούν οι ίδιες περιοδικότητες και να επαληθευθεί η άμεση σχέση αυτών των δεικτών.

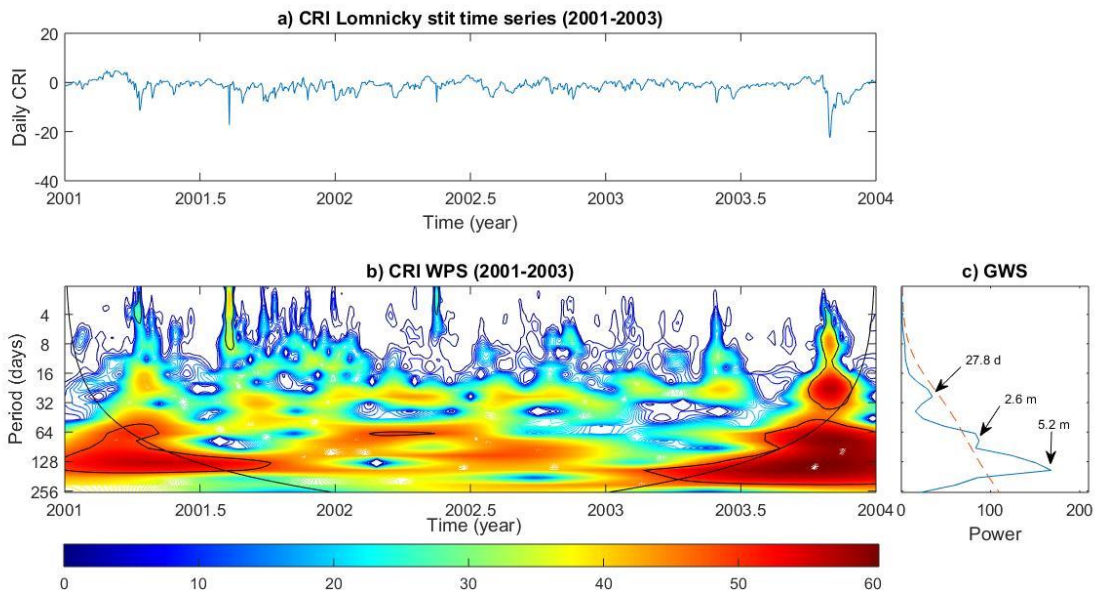
Στα **σχήματα 4.19, 4.20 και 4.21** φαίνεται η wavelet ανάλυση των ημερήσιων χρονοσειρών της κοσμικής ακτινοβολίας για το χρονικό διάστημα 2001-2003 και για την κλίμακα από 2 έως 256 ημέρες για τους σταθμούς της Αθήνας, του Lomnicky stit και της Μόσχας αντίστοιχα. Οι περιοδικότητες που προκύπτουν είναι η 27-ήμερη και στα τρία διαγράμματα, η 2.6-μηνών στα διαγράμματα των σταθμών Lomnicky stit και Μόσχας, η 3.7-μηνών στα διαγράμματα της Αθήνας και της Μόσχας και η 5.2-μηνών στα διαγράμματα του

Lomnický štít και της Μόσχας. Οι περιοδικότητες αυτές καθώς και αυτές που προκύπτουν από την μεγάλη κλίμακας ανάλυση, αναγράφονται στον **πίνακα 4.7**. Αυτό που παρατηρείται σε αυτά τα διαγράμματα είναι ότι οι εντάσεις των περιοδικοτήτων στο GWS του σταθμού του Lomnický štít είναι μεγαλύτερες απ'ότι στους άλλους δύο σταθμούς κατά ένα μεγάλο ποσοστό καθώς ο σταθμός αυτός βρίσκεται στο μεγαλύτερο υψόμετρο, 2634 m, από τους άλλους δύο. Παρόλο που ο σταθμός της Μόσχας έχει μικρότερη μαγνητική δυσκαμψία και θα αναμενόταν να έχει τις μεγαλύτερες εντάσεις, το υψόμετρό του είναι 200 m, επομένως στη συγκεκριμένη περίπτωση το υψόμετρο του σταθμού υπερτερεί της μεγαλύτερης μαγνητικής δυσκαμψίας, όσον αφορά την ανίχνευση περιοδικοτήτων.

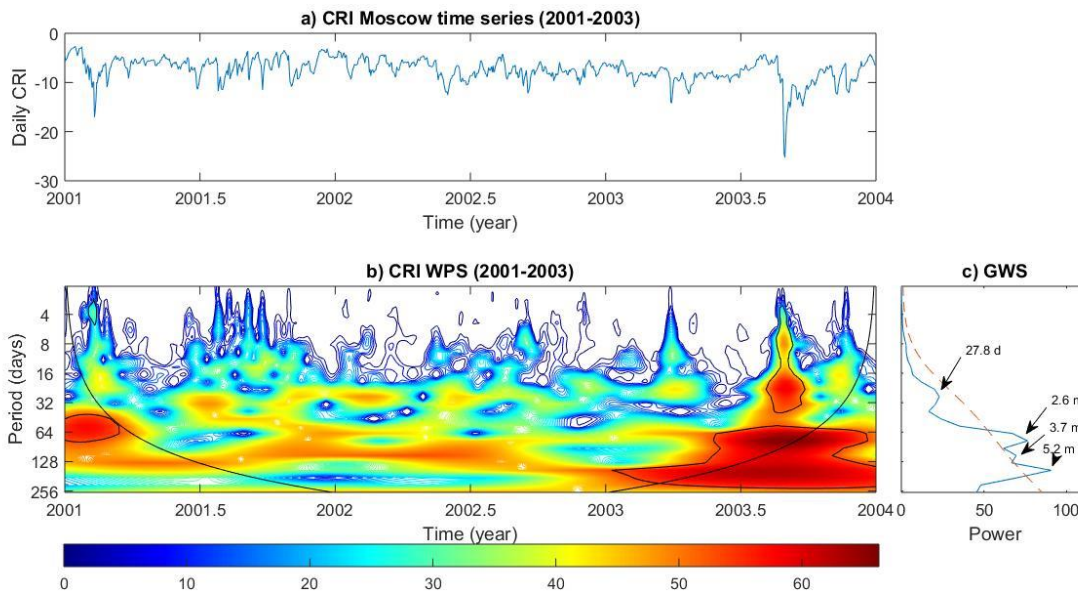
Ενώ προηγουμένως που το χρονικό διάστημα ήταν από το 1965 έως το 2018, η 27-ήμερη περιοδικότητα και η περίοδος Rieger εμφανίζονταν στα φάσματα της κοσμικής ακτινοβολίας με πολύ μικρό επίπεδο εμπιστοσύνης, εδώ που περιορίστηκε το χρονικό διάστημα άρα και το εύρος των πιθανών περιοδικοτήτων, οι περιοδικότητες αυτές εμφανίζονται με επίπεδο εμπιστοσύνης μεγαλύτερο του 95%. Το συμπέρασμα είναι ότι για την ανίχνευση μικρής κλίμακας περιοδικοτήτων είναι καταλληλότερο ένα μικρό χρονικό διάστημα και ειδικά στο μέγιστο και στη καθοδική φάση ενός ηλιακού κύκλου, καθώς εξαιρούνται από την μελέτη μεγάλης κλίμακας περιοδικότητες οι οποίες εξ'ορισμού έχουν και μεγαλύτερη ένταση με αποτέλεσμα να επικαλύπτουν τις μικρής κλίμακας περιοδικότητες.



Σχήμα 4.19 Ημερήσιο προφίλ της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 256 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 2001-2003.



Σχήμα 4.20 Ημερήσιο προφίλ της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 256 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 2001-2003.



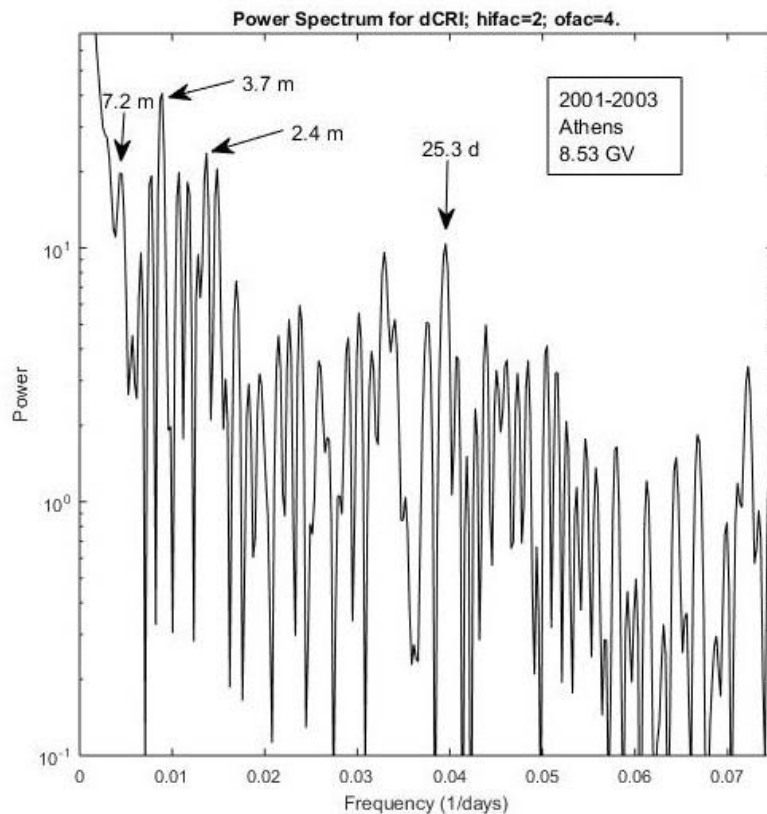
Σχήμα 4.21 Ημερήσιο προφίλ της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (a), wavelet power spectrum (WPS) (b), και global wavelet spectrum (GWS) (c) αυτής της παραμέτρου για την χρονική κλίμακα από 2 έως 256 ημέρες (WPS και GWS) για το χρονικό διάστημα 2001-2003.

Wavelet Periodicities					
	Short-term		Mid-term		Long-term
	Μικρής κλίμακας ανάλυση	Μεγάλης κλίμακας ανάλυση	Μικρής κλίμακας ανάλυση	Μεγάλης κλίμακας ανάλυση	
CRI	27.8 d	-	2.6 m, 3.7 m, 5.2 m	1.7 y	2.9 y, 11 y, 18.5 y

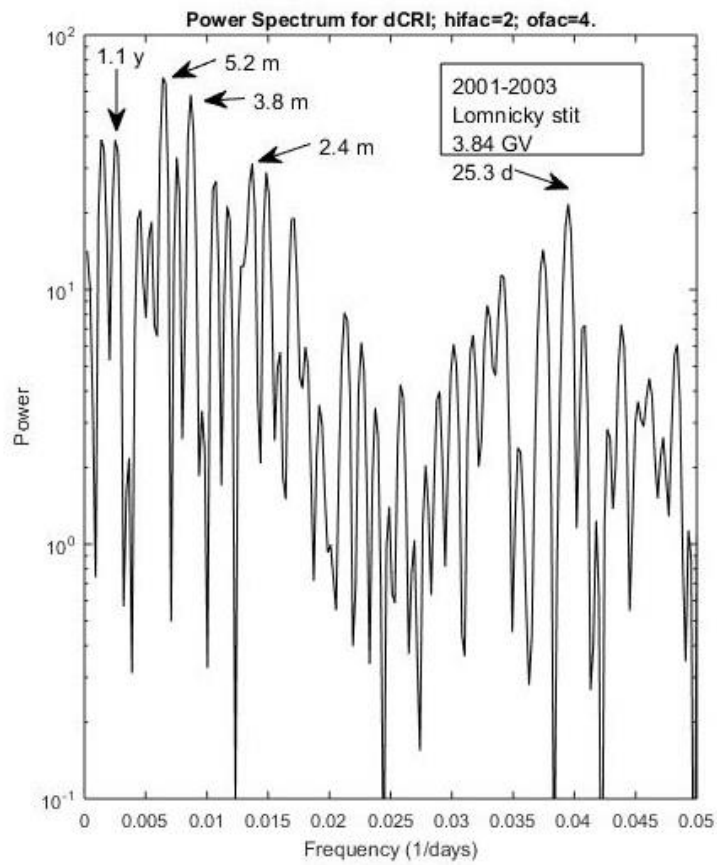
Πίνακας 4.7 Σημαντικές περιοδικότητες από την Wavelet ανάλυση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για το χρονικό διάστημα 1965-2018 (μεγάλης κλίμακας ανάλυση) και 2001-2003 (μικρής κλίμακας ανάλυση).

β) Μέθοδος Fourier

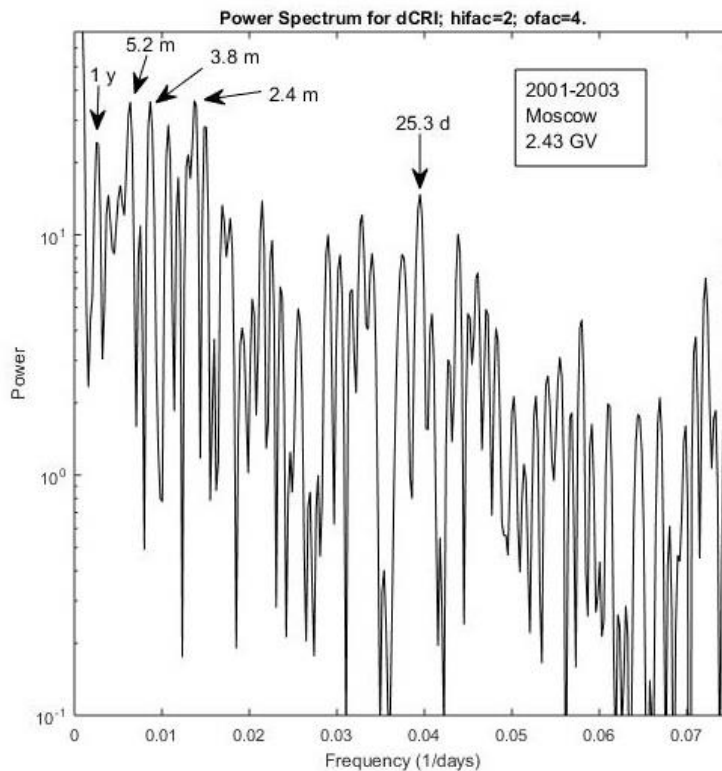
Τα **σχήματα 4.22, 4.23** και **4.24** είναι τα Lomb-Scargle φάσματα των σταθμών της Αθήνας, του Lomnicky stit και της Μόσχας αντίστοιχα. Στα φάσματα αυτά απεικονίζονται όλες οι περιοδικότητες που αναφέρθηκαν και παρπάνω στη μέθοδο wavelet και επιπλέον στο φάσμα της Αθήνας εμφανίζεται και η περίοδος των 7.2-μηνών. Η περίοδος αυτή ανήκει στις Rieger τύπου περιοδικότητες και ανιχνεύεται και με τους δύο τρόπους ανάλυσης, wavelet και Lomb-Scargle, στην κοσμική ακτινοβολία, στην εργασία των Chowdhury και Kudela (2018). Οι περιοδικότητες αυτές μαζί με τις μεγάλης κλίμακας περιοδικότητες που προκύπτουν από τη Fourier ανάλυση φαίνονται στο **πίνακα 4.8**.



Σχήμα 4.22 Lomb-Scargle φάσμα της ημερήσιας χρονοσειράς της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από το σταθμό νετρονίων της Αθήνας για το χρονικό διάστημα 2001-2003.



Σχήμα 4.23 Lomb-Scargle φάσμα της ημερήσιας χρονοσειράς της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από το σταθμό νετρονίων του Lomnický stit για το χρονικό διάστημα 2001-2003.



Σχήμα 4.24 Lomb-Scargle φάσμα της ημερήσιας χρονοσειράς της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από το σταθμό νετρονίων της Μόσχας για το χρονικό διάστημα 2001-2003.

Fast Fourier Transform (FFT) (Lomb—Scargle) Periodicities					
Confidence level 95%					
	Short-term		Mid-term		Long-term
	Μικρής κλίμακας ανάλυση	Μεγάλης κλίμακας ανάλυση	Μικρής κλίμακας ανάλυση	Μεγάλης κλίμακας ανάλυση	
CRI	25.3 d	-	2.4 m, 3.8 m, 5.2 m, 7.2 m	9.5 m, 1.2 y, 1.7y	3 y, 3.7 y, 5 y, 7.2 y, 10.5 y, 19 y

Πίνακας 4.8 Σημαντικές περιοδικότητες από την Lomb-Scargle ανάλυση της ημερήσιας χρονοσειράς της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για το χρονικό διάστημα 1965-2018 (μεγάλης κλίμακας ανάλυση) και 2001-2003 (μικρής κλίμακας ανάλυση).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα-Προοπτικές

5.1 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν περιοδικότητες μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας οι οποίες εντοπίστηκαν στον αριθμό των ηλιακών κηλίδων, την Bz συνιστώσα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, τον γεωμαγνητικό δείκτη Ap και την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Η μελέτη αυτή επεκτάθηκε από το 1965 έως το 2018, καλύπτοντας ένα χρονικό διάστημα 53 χρόνων το οποίο περιλαμβάνει τους ηλιακούς κύκλους 20 ως 24. Προκειμένου να εντοπιστούν σημαντικές περιοδικότητες στις παραπάνω παραμέτρους εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι ανάλυσης, ο fast Fourier μετασχηματισμός και η wavelet ανάλυση. Επιβεβαιώθηκαν πολλές περιοδικότητες που έχουν προκύψει σε παλαιότερες εργασίες και επιπλέον ορίστηκαν καινούργιες. Επιπροσθέτως, επιβεβαιώθηκε το αποτέλεσμα του Chang (2014) για τον διχασμό της 27-ήμερης περιοδικότητας στην Bz παράμετρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και επιπλέον το ίδιο φαινόμενο εντοπίστηκε για πρώτη φορά στον γεωμαγνητικό δείκτη Ap.

Πιο συγκεκριμένα, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

α) Μεγάλης κλίμακας περιοδικότητες (>2 χρόνια)

Η **μεγάλης κλίμακας περιοδικότητα των 11-χρόνων** εμφανίζεται στον αριθμό των ηλιακών κηλίδων, τον γεωμαγνητικό δείκτη Ap και την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και στις δύο μεθόδους ανάλυσης όπως ήταν αναμενόμενο (Forbush, 1954). Στην περίπτωση της Bz συνιστώσας αυτή η περιοδικότητα δεν είναι ξεκάθαρη για το λόγο ότι η ένταση της συγκριτικά με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες περιοδικότητες είναι πολύ ασθενής.

Η γνωστή **22-ετής** περιοδικότητα εμφανίζεται στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (Mavromichalaki et al., 2003b) με την τιμή ~19-χρόνων και δηλώνει την άμεση σχέση της παραμέτρου αυτής με την ηλιακή δραστηριότητα. Όπως έχει επισημανθεί από Mavromichalaki et al. (2003b), αυτή η περιοδικότητα σχετίζεται με τον μαγνητικό κύκλο λόγω της αλλαγής της πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου που συμβαίνει κάθε 22 χρόνια. Επιπλέον, η περιοδικότητα των **~7-χρόνων**, η οποία βρέθηκε στις χρονοσειρές του αριθμού των ηλιακών κηλίδων και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, φαίνεται να συνδέεται με τον 22-ετή μαγνητικό κύκλο ως η τρίτη αρμονική του.

Άλλες μεγάλης κλίμακας περιοδικότητες που βρέθηκαν στην εργασία αυτή είναι η **~2.4-χρόνων** στις ηλιακές κηλίδες και τον δείκτη Ap, η **3-χρόνων** στις ηλιακές κηλίδες, τον δείκτη Ap και την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, η **~3.6-χρόνων** στον δείκτη Ap και την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και η **~4-χρόνων** στις ηλιακές κηλίδες και τον δείκτη Ap.

β)Μεσαίας κλίμακας περιοδικότητες (30 ημέρες – 2 χρόνια)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι περιοδικότητες ~**1.3-** και **1.7-χρόνων**, οι οποίες βρέθηκαν σε όλες τις παραμέτρους εκτός από την συνιστώσα Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και είναι πολλαπλάσια της περιόδου Rieger. Η 1.3-χρόνων περιοδικότητα στον γεωμαγνητική δείκτη Ap έχει βρεθεί και από τους Paularena, Szabo, and Richardson (1995), ενώ η 1.7-χρόνων στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας έχει βρεθεί από τους Valdes-Galicia, Perez-Enriquez, and Otaola (1996).

Οι κυρίαρχες περιοδικότητες, όπως η **5-μηνών**, γνωστή και ως περίοδος Rieger, και η **6-μηνών**, εμφανίζονται μόνο στις ηλιακές κηλίδες και τον δείκτη Ap. Αυτά τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με τα αποτελέσματα προηγούμενων εργασιών (Rieger et al., 1984; Prabhakaran Nayar et al., 2002; Baranyi and Ludmany, 2003; Joshi, Pant, and Manoharan, 2006; Chowdhury and Dwivedi, 2011; Bazilevskaya et al., 2014).

Πέρα, όμως, από τις ήδη γνωστές περιοδικότητες που επαληθεύτηκαν, προσδιορίστηκαν και καινούργιες. Τέτοιες είναι οι **2.2-** και **3.7-μηνών** περιοδικότητες οι οποίες βρέθηκαν στην συνιστώσα Bz και την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και πιθανότατα είναι πολλαπλάσια της 27-ήμερης ηλιακής περιστροφής, η **9.5-μηνών** στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και η **10.6-μηνών** και **1.9-χρόνων** στον αριθμό των ηλιακών κηλίδων.

γ)Μικρής κλίμακας περιοδικότητες (2 – 30 ημέρες)

Η μικρής κλίμακας περιοδικότητα των **27 ημερών**, που οφείλεται στην ηλιακή περιστροφή, εμφανίζεται και με τις δύο μεθόδους ανάλυσης για το χρονικό διάστημα 1965-2018, στις παραμέτρους των ηλιακών κηλίδων, της συνιστώσας Bz και του δείκτη Ap. Αυτά τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα αποτελέσματα των Joshi, Pant, and Manoharan (2006), Chang (2014), Singh and Badruddin (2017), Poblet and Azpilicueta (2018) και άλλων ερευνητών.

Αξίζει να αναφερθεί ότι αν και η 27-ήμερη περίοδος δεν βρέθηκε στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας για το χρονικό διάστημα 1965-2018, βρέθηκε παρ'όλα αυτά για το χρονικό διάστημα 2001-2003. Πολλές δουλειές βασίζονται στην ανίχνευση της 27-ήμερης περιοδικότητας σε χρονοσειρές της κοσμικής ακτινοβολίας όπως αυτή μετριέται από τους μετρητές νετρονίων. Τέτοιες είναι των Kudela, Ananth, and Venkatesan (1991), Mavromichalaki et al. (2003b) και Chowdhury, Kudela, and Moon (2016). Ο λόγος για τον οποίο δεν εμφανίστηκε στην εργασία αυτή στο μεγάλο χρονικό διάστημα είναι ότι σε αυτό υπάρχουν και περιοδικότητες μέγαλης κλίμακας, όπως των 11-χρόνων, οι οποίες είναι πάρα πολύ πιο ισχυρές από τις μικρής κλίμακας περιοδικότητες, όπως των 27-ημερών, όσων αφορά την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, έτσι εφόσον αναλύονται ταυτόχρονα μικρής και μεγάλης κλίμακας και γίνεται κανονικοποίηση στην ένταση τους, οι μικρής κλίμακας υπερκαλύπτονται από τις μεγάλης κλίμακας περιοδικότητες. Επιπλέον, η περιοδικότητα της περιστροφής του Ήλιου δεν είναι άμεσα συνδεδεμένη με την διαμόρφωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και γι'αυτό δεν φαίνεται στην φασματική ανάλυση μεγάλων χρονικών περιόδων.

Στην εργασία αυτή εμφανίζεται και ο **διαχωρισμός της 27-ήμερης κορυφής** στο Fourier φάσμα της Bz συνιστώσας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και του γεωμαγνητικού δείκτη Ap. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει για την συνιστώσα Bz και υπονοείται για τον δείκτη Ap στην εργασία του Chang (2014), όπου θεωρείται ότι μία μεγάλης κλίμακας διαταραχή μπορεί να προκαλέσει τον διαχωρισμό στην κυρίαρχη κορυφή των 27-ημερών, επειδή στο φάσμα των δεικτών της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, η συχνότητα των 27-ημερών διαμορφώνεται από την 1-έτους διαταραχή. Στην εργασία αυτή η ~1-έτους περιοδικότητα βρέθηκε και στις δύο παραμέτρους.

Ένα ακόμα συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή την εργασία είναι ότι όλες οι μικρές και μεσαίες κλίμακας περιοδικότητες του δείκτη Ap που φαίνονται στο global wavelet spectrum της wavelet ανάλυσης είναι ομαλές και ξεκάθαρες κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου (Singh and Badruddin, 2017). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εμφάνιση των περιοδικοτήτων της ηλιακής περιστροφής και των αρμονικών της, **6.9-, 9- και 13.5-ημερών**, στο global wavelet spectrum, καθιστά τον γεωμαγνητικό δείκτη Ap κατάλληλο για την πρόγνωση Διαστημικού καιρού (Baker, 1998). Πρόσφατα, πολλά κέντρα πρόγνωσης Διαστημικού καιρού χρησιμοποιούν αυτή την παράμετρο ως δείκτη των συνθηκών του Διαστημικού καιρού σε καθημερινές αναφορές πρόγνωσης (spaceweather.phys.uoa.gr).

Τέλος, με βάση τα εξαγόμενα φασμάτα wavelet των τεσσάρων παραμέτρων που εξετάστηκαν σε αυτή την εργασία, βγαίνει το συμπέρασμα ότι το μέγιστο και η καθοδική φάση των ηλιακών κύκλων χαρακτηρίζονται από περιοδικότητες με μεγαλύτερη ένταση σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται κατά το ελάχιστο και την ανοδική φάση των κύκλων. Γι'αυτό οι φάσεις αυτές του κύκλου είναι καταλληλότερες για τη μελέτη μικρών και μεσαίων περιοδικοτήτων. Αυτή η έρευνα μπορεί να αποβεί χρήσιμη στην επιστημονική κοινότητα για την παρακολούθηση φαινομένων και εφαρμογών του Διαστημικού καιρού.

Μία σύνοψη των αποτελεσμάτων που έχουν προσδιοριστεί για τις τέσσερις παραμέτρους από τις μεθόδους fast Fourier και wavelet ανάλυση ημερήσιων και μηνιαίων τιμών, δίνονται στους **πίνακες 5.1 και 5.2** αντίστοιχα.

Fast Fourier Transform (FFT) (Lomb—Scargle)				
Confidence level 95%				
Periodicities	SSN	IMF Bz	Ap index	CRI
Short-term	-	-	9 d,	-
	-	14.1 d	13.5 d	-
	26.7 d	28.5 d	25.3 d	-
Mid-term	5 m	-	6.1 m	-
	10.7 m	-	8.7 m	9.5 m
	1.1 y, 1.9 y	-	1.3 y, 1.7 y	1.2 y, 1.7y
Long-term	2.5 y	-	2.3 y	-
	3.2 y	-	3 y	3 y
	-	-	3.6 y	3.7 y
	3.9 y	-	4 y	-
	5.6 y	-	5.2 y	5 y
	6.5 y	-	-	7.2 y
	10.7 y	-	10.6 y	10.5 y
	-	-	-	19 y

Πίνακας 5.1 Σημαντικές περιοδικότητες από την Lomb-Scargle ανάλυση των ημερήσιων χρονοσειρών των ηλιακών κηλίδων, της συνιστώσας Bz, του γεωμαγνητικού δείκτη Ap και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

Wavelet Analysis				
Periodicities	SSN	IMF Bz	Ap index	CRI
Short-term	-	-	6.9 d	-
	-	-	-	-
	-	13.9 d	11.7 d	-
	27.8 d	27.8 d	27.8 d	-
Mid-term	-	2.2 m, 3.7 m	-	-
	5.2 m	-	6.2 m	-
	10.5 m	-	-	-
	-	1 y	1.2 y	1.7y
Long-term	2.4 y	-	-	-
	-	-	-	2.9 y
	-	-	-	-
	5.5 y	-	-	-
	11 y	-	11 y	11 y
	-	-	-	18.5 y

Πίνακας 5.2 Σημαντικές περιοδικότητες από την Wavelet ανάλυση των ηλιακών κηλίδων, της συνιστώσας Bz, του γεωμαγνητικού δείκτη Ap και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για το χρονικό διάστημα 1965-2018.

5.2 Προοπτικές

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή τη μελέτη είναι πολύ ενδιαφέροντα για την διεθνή επιστημονική κοινότητα και ελπίζουμε ότι θα χρησιμοποιηθούν σε περαιτέρω μελέτες και άλλων ηλιακών και γεωμαγνητικών παραμέτρων με σκοπό να γίνει πιο σαφής και κατανοητός ο μηχανισμός σύνδεσης των ηλιακών και διαπλανητικών παραμέτρων με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας η οποία καταγράφεται στους επίγειους μετρητές.

Ήδη έχει ξεκινήσει μία καινούργια εργασία σε συνεργασία με τους διακεκριμένους ερευνητές Dr. V. Yanke και Dr. A. Belov του ινστιτούτου IZMIRAN της Ρωσικής Ακαδημίας

Επιστημών, έτσι ώστε να εφαρμοστούν οι ίδιες τεχνικές ανάλυσης στις παραμέτρους a_{10} , γ και b του φάσματος των διακυμάνσεων της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας το οποίο δίνεται στον τύπο (5.1)

$$\frac{\Delta N}{N} = \alpha_{10} \frac{(10 + R)^\gamma}{(b + R)^\gamma} \quad (5.1)$$

και στην τυπική απόκλιση του μοντέλου, σ , με στόχο να προσδιοριστούν περιοδικότητες στις χρονοσειρές αυτών των παραμέτρων προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η φύση του φάσματος. Επίσης θα γίνει μελέτη και προσδιορισμός των περιοδικοτήτων στην ανισοτροπία της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφεται στο επίπεδο της εκλειπτικής.

Αναφορές

Babcock, H. W.: 1961, "The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-Year Cycle", *Astrophys. J.* **133**, 572.

Baker, D.N.: 1998, What is space weather? *Adv. Space Res.* **22**, 7. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)01095-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01095-8).

Baranyi, T., Ludmány, A.: 2003, Semiannual behavior of monthly mean of B_z component of geoeffective ($K_p > 3$) coronal mass ejections, Solar variability as an input to the Earth's environment. In: Wilson, A. (ed.) *Proceedings of ICSC 2003 – solar variability as an input to the earth's environment*, **SP-535**, ESA, Noordwijk, 563 ISBN 92-9092-845-X.

Bazilevskaya, G., Broomhall, A.M., Elsworth, Y., Nakariakov, V.M.: 2014, A combined analysis of the observational aspects of the quasi-biennial oscillation in the solar magnetic activity, *Space Sci. Rev.* **186**, 359. DOI: [10.1007/s11214-014-0068-0](https://doi.org/10.1007/s11214-014-0068-0)

Brigham, E. O.: 1988, *The fast Fourier transform and its applications*, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, ISBN:0-13-307505-2

Chowdhury, P., Dwivedi, B.N.: 2011, Periodicities of Sunspot Number and Coronal Index Time Series during Solar Cycle 23, *Solar Phys.*, **270**, 365. DOI: [10.1007/s11207-011-9738-1](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9738-1)

Chowdhury, P., Kudela, K., Moon, Y.J.: 2016, A Study of Heliospheric Modulation and Periodicities of Galactic Cosmic Rays During Cycle 24, *Solar Phys.* **291**, 581. DOI: [10.1007/s11207-015-0832-7](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0832-7)

Currie, R.G.: 1976, Long period magnetic activity - 2 to 100 years, *Astrophys. Space Sci.* **39**, 251. DOI: [10.1007/BF00640525](https://doi.org/10.1007/BF00640525)

Durney, Bernard R.: 2000, On the Differences Between Odd and Even Solar Cycles, *Solar Phys.* **196**, 421. DOI: [10.1023/A:1005285315323](https://doi.org/10.1023/A:1005285315323)

Forbush, S.E.: 1954, World-Wide Cosmic-Ray Variations, 1937-1952. *J. Geophysical Res.* **59**, 525. DOI: [10.1029/JZ059i004p00525](https://doi.org/10.1029/JZ059i004p00525)

Heon-Young Chang: 2014, Frequency-modulated solar rotational periodicity of geomagnetic indices, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, 86. DOI: [10.1093/pasj/psu064](https://doi.org/10.1093/pasj/psu064)

Joshi, B., Pant, P., Manoharan, P.K.: 2006, Periodicities in sunspot activity during Solar Cycle 23, *Astron. Astrophys.* **452**, 647. DOI: [10.1051/0004-6361:20064978](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20064978)

Katsavrias, C., Preka-Papadema, P., Moussas, X.: 2012, Wavelet Analysis on Solar Wind Parameters and Geomagnetic Indices, *Solar Phys.* **280**, 623. DOI: [10.1007/s11207-012-0078-6](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0078-6)

Kudela, K., Sabbah, I.: 2016, Quasi-periodic variations of low energy cosmic rays, *Sci. China Technol. Sci.* **59**, 547. DOI: [10.1007/s11431-015-5924-y](https://doi.org/10.1007/s11431-015-5924-y)

- Kudela, K., Ananth, A.G., Venkatesan, D.: 1991, The low-frequency spectral behavior of cosmic ray intensity, *J. Geophys. Res.* **96**, 15871. DOI: [10.1029/91JA01166](https://doi.org/10.1029/91JA01166)
- Kudela, K., Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Gerontidou, M.: 2010, On midterm periodicities in cosmic rays, *Solar Phys.* **266**, 173. DOI: [10.1007/s11207-010-9598-0](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9598-0)
- Mavromichalaki, H., Belehaki, A., Rafios, X.: 1998, Simulated effects at Neutron Monitor Energies: Evidence of the 22-year Cosmic Ray Variation, *Astron. Astrophys.* **330**, 764.
- Mavromichalaki, H., Marmatsouri, E., Vassilaki, A.: 1988, Solar-cycle phenomena in Cosmic-ray intensity: Differences between even and odd cycles, *Earth, Moon Planets* **42**, 233. DOI: [10.1007/BF00058488](https://doi.org/10.1007/BF00058488)
- Mavromichalaki, H., Preka-Papadema, P., Liritzis, I., Petropoulos, B., Kurt, V.: 2003a, Short-term variations of cosmic-ray intensity and flare-related data in 1981-1983, *New Astron.* **8**, 777. DOI: [10.1016/S1384-1076\(03\)00066-6](https://doi.org/10.1016/S1384-1076(03)00066-6)
- Mavromichalaki, H., Preka-Papadema, P., Petropoulos, B., Tsagouri, I., Georgakopoulos, S., Polygiannakis, J.: 2003b, Low and high frequency spectral behaviour of cosmic ray intensity for the period 1953-1996, *Ann. Geophys.* **21**, 1681. DOI: [10.5194/angeo-21-1681-2003](https://doi.org/10.5194/angeo-21-1681-2003)
- Mavromichalaki, H., Preka-Papadema, P., Theothoropoulou, A., Paouris, E., Apostolou, Th.: 2017, A study of the possible relation of the cardiac arrhythmias with the magnetic field polarity reversals, *Adv. Space Res.* **59**, 366. DOI: [10.1016/j.asr.2016.08.024](https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.08.024)
- Mursula, K., Usoskin, I., Zieger, B.: 1997, On the Claimed 5.5-year Periodicity in Solar Activity, *Solar Phys.* **176**, 201. DOI: [10.1023/A:1004982203293](https://doi.org/10.1023/A:1004982203293)
- Otaola, J. A., Perez-Enriquez, R., Valdes-Galicia, J. F.: 1985, Difference between even and odd 11-year cycles in cosmic ray intensity, In: Jones, F.C., Adams, J., Mason, G.M. (eds.) *Proc. 19th ICRC*, **4**, CP-2376, NASA GSFC, Greenbelt, 493
- Paularena, K.I., Szabo, A., Richardson, J.D.: 1995, Coincident 1.3-year periodicities in the Ap geomagnetic index and the solar wind, *Geophys. Res. Lett.* **22**, 3001. DOI: [10.1029/95GL02802](https://doi.org/10.1029/95GL02802)
- Poblet, F.L., Azpilicueta, F.: 2018, 27-day variation in solar-terrestrial parameters: Global characteristics and an origin based approach of the signals, *Adv. Space Res.* **61**, 2275. DOI: [10.1016/j.asr.2018.02.016](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.02.016)
- Pothitakis, G., Preka-Papadema, P., Moussas, X., Caroubalos, C., Alissandrakis, C., Tsitsipis, P., Kontogeorgos, A., Hillaris, A.: 2009, Relation between coronal type II bursts, associated flares and CMEs, Universal Heliophysical Processes, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 257, 299

Prabhakaran Nayar, S.R., Radhika, V.N., Revathy, K., Ramadas, V.: 2002, Wavelet Analysis of solar, solar wind and geomagnetic parameters, *Solar Phys.* **208**, 359. DOI: [10.1023/A:1020565831926](https://doi.org/10.1023/A:1020565831926)

Rieger, E., Share, G. H., Forrest, D. J., Kanbach, G., Reppin, C., Chupp, E. L.: 1984, A 154-day periodicity in the occurrence of hard solar flares, *Nature* **312**, 623. DOI: [10.1038/312623a0](https://doi.org/10.1038/312623a0)

Simpson, J.A.: 2000, The Cosmic Ray Nucleonic Component: The Invention and Scientific Uses of the Neutron Monitor, *Space Sci. Rev.* **93**, 11. DOI: [10.1023/A:1026567706183](https://doi.org/10.1023/A:1026567706183)

Singh, Y.P., Badruddin: 2017, Short- and mid-term oscillations of solar, geomagnetic activity and cosmic ray intensity during the last two solar magnetic cycles, *Planet. Space Sci.*, **138**, 1. DOI: [10.1016/j.pss.2017.02.011](https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.02.011)

Sugiura, M.: 1980, What do we expect in magnetic activity in the current solar cycle?, *EOS Trans. Am. Geophys. Union* **61**, 673. DOI: [10.1029/EO061i043p00673](https://doi.org/10.1029/EO061i043p00673)

Torrence, C., Compo, G.P.: 1998, A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bull. Am. Meteor. Soc.* **79**, 61. DOI: [10.1175/1520-0477](https://doi.org/10.1175/1520-0477)

Valdes-Galicia, J. F., Perez-Enriquez, R., Otaola, J. A.: 1996, The cosmic-ray 1.68-Year variation: a clue to understand the nature of the Solar-cycle, *Solar Phys.* **167**, 409. DOI: [10.1007/BF00146349](https://doi.org/10.1007/BF00146349)

Yoshida, A.: 2014, Difference between even- and odd-numbered cycles in the predictability of solar activity and prediction of the amplitude of cycle 25, *Ann. Geophys.* **32**, 1035. DOI: [10.5194/angeo-32-1035-2014](https://doi.org/10.5194/angeo-32-1035-2014)

Zechmeister, M., Kürster, M.: 2009, The generalised Lomb-Scargle periodogram. A new formalism for the floating-mean and Keplerian periodograms, *Astron. Astrophys.* **496**, 577. DOI: [10.1051/0004-6361:200811296](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200811296)

Βιβλιογραφία

Κοσμική Ακτινοβολία, Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη Ε., Εκδόσεις Συμμετρία 2005

Στα μονοπάτια του Ήλιου, Πρέκα-Παπαδήμα Π., Δανέζης Μ., Θεοδοσίου Σ., Καργιολάκη Δ., Εκδόσεις Δίαυλος

Αστροφυσική Πλάσματος, Τσίγγανος Κ., Πανεπιστημιακό σύγγραμμα

Fourier and Wavelet Analysis, Bachmann G., Narici L., Beckenstein E., Εκδόσεις Springer

Ιστοσελίδες

Σχήμα 2.2

(<https://www.google.com/search?q=cosmic+ray+energy+spectrum&tbm=isch&source=univ&client=firefox-b-d&sa=X&ved=2ahUKEwiht7LAhfXhAhXS-KQKHVChAvEQsAR6BAqJEAE&biw=1056&bih=501#imgrc=zpbdGSyDIdwf0M:>)

Σχήμα 2.3 (<https://ionpowergroup.com/how-it-works-on-earth/>)


Σχήμα 2.5 (https://www.google.com/search?q=neutron+monitor+network&client=firefox-b-d&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=0ahUKEwiv0JO85ubiAhXDzaQKHb0VDG0Q_AUICiqB&biw=1280&bih=607&dpr=1.5#imgrc=2Xp2qF9Hlq7TOM:)

Σχήμα 2.6 (https://www.researchgate.net/figure/Diagram-of-the-stations-presenting-data-in-real-time-in-the-inner-frame-and-ready-to_fig3_227064916)

Σχήμα 3.1 (https://www.researchgate.net/figure/Fast-Fourier-Transform-FFT-of-return-series_fig3_317290909)

Σχήμα 3.3 (https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&biw=1280&bih=607&tbm=isch&sa=1&ei=nDv-XOKQEMmGwPAPmoi_iAM&q=wavelet+spectrum&oq=wavelet+spectrum&gs_l=img.3..35i39j0i19j0i8i30i19.859625.865519..865798...3.0..0.137.1263.0j10.....0....1..gws-wiz-img.KN2jzWTIYfw#imgrc=no97gQzWv8RXHM:)

Spectral Analysis of Solar and Geomagnetic Parameters in Relation to Cosmic-ray Intensity for the Time Period 1965 – 2018

M. Tschla¹ · M. Gerontidou¹ · H. Mavromichalaki¹ 

Received: 9 November 2018 / Accepted: 14 January 2019
© Springer Nature B.V. 2019

Abstract Spectral analysis of solar and geomagnetic parameters as well as of cosmic-ray intensity was performed aiming to identify possible new periodicities and confirm the well-known ones. Specifically, short-, mid-, and long-term periodicities of these parameters such as sunspot number, Bz-component of the interplanetary magnetic field, geomagnetic Ap index, and cosmic-ray intensity over the time period 1965–2018, covering five solar cycles from Cycles 20 to 24, are presented. For this purpose, two different techniques, fast Fourier transformation and wavelet analysis, have been used in order to ensure accuracy in the frequency values and also their localization in the time series. The periodicities resulting from our comprehensive study, including the well-known 11-year and 27-day periods, the harmonics of the 5.5-year and of the 6-, 9-, and 13.9-day periods, respectively, and the ≈ 1.3 -year and 1.7-year periods, were found in all of the above parameters except for the Bz-component of the interplanetary magnetic field. New periodicities such as the ≈ 10 -month period for sunspot number and cosmic-ray intensity and the ≈ 3 -year period for sunspot number, Ap index, and cosmic-ray intensity, were also determined. Furthermore, the newly introduced splitting of the 27-day periodicity into two adjacent peaks was confirmed in the Fourier spectra of the interplanetary magnetic field and the geomagnetic Ap index. It was concluded that several common periodicities appear in solar activity: the Ap index, and the cosmic-ray intensity. This result, in association with the fact that the spectral behavior of geomagnetic-activity parameters, provides invaluable information about the physical processes involved, and indicates that the Ap index might be used as a suitable index for space-weather forecasting.

Keywords Cosmic-ray intensity · Sunspot number · Periodicities · Geomagnetic indices · Interplanetary magnetic field

✉ H. Mavromichalaki
emavromi@phys.uoa.gr

¹ Nuclear and Particle Physics Department, Faculty of Physics, National and Kapodistrian University of Athens, Zografos, 15784 Athens, Greece

1. Introduction

Galactic cosmic rays (GCRs) are energetic charged particles that originated outside our solar system and have energies in the range of $10^6 - 10^{20}$ eV nucleon⁻¹. These high-energy GCRs travel through the heliosphere, and when they reach the Earth's atmosphere, they trigger particle and electromagnetic cascades, creating a great variety of secondary particles called secondary cosmic rays. An important characteristic of cosmic rays inside the solar cavity is their temporal variability on a wide range of timescales. This temporal variation of cosmic-ray intensity must be due to the interaction of cosmic-ray particles with the interplanetary magnetic field (IMF) that is carried by the solar wind. Moreover, there is a well-known anticorrelation between cosmic rays and solar activity as measured by the sunspot number (SSN). Therefore, the issue that arises is to find out the pattern of the IMF and its flow to determine the temporal and spatial evolution of their configurations and to relate them to cosmic-ray variations.

The availability of continuous measurements of the cosmic-ray intensity (CRI) as registered by the network of neutron monitors (Simpson, 2000) as well as of the solar and interplanetary data allows us to investigate the relationships among cosmic rays, IMF, and solar activity. Although periodicities in CRI have been widely studied by several authors (*e.g.* Kudela, Ananth, and Venkatesan, 1991; Mavromichalaki *et al.*, 2003a, 2003b; Kudela *et al.*, 2010; Chowdhury, Kudela, and Moon, 2016) and in solar and geomagnetic parameters were also reported by many researchers (*e.g.* Paularena, Szabo, and Richardson, 1995; Prabhakaran Nayar *et al.*, 2002; Chowdhury and Dwivedi, 2011; Poblet and Azpilicueta, 2018), it is worthwhile to update the common periodicities for a more extended time period and/or to find new ones.

Valdes-Galicia, Perez-Enriquez, and Otaola (1996) and Mavromichalaki *et al.* (2003b) have reported on a short-term variation of 1.68 years in the CRI observed at the Earth in the neutron monitors' range of energy. This variation might appear as a consequence of phenomena rooted in the solar interior that are related to the emergence and transport of magnetic flux. Recently, Singh and Badruddin (2017) examined the past two solar magnetic cycles (1968–1989 and 1989–2014); they found that in addition to the well-known periodicities, like the 27-day (synodic period), the 154-day (Rieger period), the semi-annual, the annual, the 1.3-year, and 1.7-year period, the first (27-day), second (13.5-day), and third (9.0-day) solar-rotation harmonics in the geomagnetic Ap index are observed consistently; annual and ≈ 1.85 -year variations are also observed. Several significant mid-range periodicities, such as ≈ 175 , 133, 113, 104, 84, and 63 days, are detected in sunspot activity, as reported by Joshi, Pant, and Manoharan (2006). In that study, the spectral analysis of sunspot number, sunspot areas, and solar-flare index during Solar Cycle 23 was presented. An important conclusion was that the periodic variations in the northern and southern hemispheres of the Sun present a kind of asymmetrical behavior, while periodicities of ≈ 175 days and ≈ 133 days are highly significant in the sunspot data of the northern hemisphere.

Additionally, Kudela and Sabbah (2016) studied the quasi-periodic and irregular temporal variability of low-energy cosmic rays from ground-based direct measurements such as neutron monitors and muon detectors. They concluded that wavelet spectra are useful tools for studying the fine structure of quasi-periodic variations and their temporal behavior. Studies dedicated to the periodic behavior of the solar and interplanetary magnetic field have also been reported by several authors (Baranyi and Ludmány, 2003; Chang, 2014), and as Bazilevskaya *et al.* (2014) stated, many features of solar quasi-biennial oscillations (QBOs) with timescales of 0.6–4 years are common to different observations. These features include variable periodicity and intermittence with signs of stochasticity.

For the present spectral analysis, daily and monthly values of the above-mentioned time series of sunspot number, IMF, Ap index, and CRI, covering Solar Cycles 20–24 over 1965 to 2018, have been used. We apply two spectral techniques, the wavelet technique (Torrence and Compo, 1998) and the fast Fourier transformation (Brigham, 1988), in order to define significant periodicities on various timescales. These are separated into short-term (referring to periods from 2 to about 30 days), mid-term (from > 30 days to two years), and long-term (greater than two years) periodicities. A comparison of the results obtained from the two methods of analysis for the different time series is performed and yields interesting conclusions.

2. Data and Analysis Technique

2.1. Data Selection

The present analysis concerns the time period from 1965 until 2018, covering Solar Cycles 20–24. Daily and monthly values from 1 January 1965 to 31 March 2018 of the cosmic-ray data recorded by the Moscow neutron-monitor station (geographical coordinates 55.47°N, 37.32°E, cutoff rigidity 2.43 GV) and corrected for pressure were obtained from the high-resolution Neutron Monitor Database (NMDB) (www.nmdb.eu/nest/). Moreover, daily and monthly values from 1 January 1965 to March 2018 of the sunspot number (SSN) measurements from WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels (www.sidc.be/silso/datafiles), have been used. Daily data from 1 January 1965 to 31 March 2018 and monthly data from January 1965 to February 2011 of the geomagnetic Ap index were taken from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP), while daily data from 1 January 1995 to 31 March 2018 and 27-day data from January 1995 to March 2018 for the Bz-component of the IMF in the Geocentric Solar Magnetospheric (GSM) coordinate system from the NASA Goddard Space Flight Center, Space Physics Data Facility (omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html), were also used. It is noted here that the monthly data of the Ap index and the daily and monthly data of the Bz-component of the IMF refer to shorter time intervals than the other parameters due to the lack of available data covering the rest of the time intervals.

2.2. Methods of Analysis

In order to find possible periodic variations in the examined time series, the fast Fourier transform and the wavelet technique (Torrence and Compo, 1998; Katsavrias, Preka-Papadema, and Moussas, 2012) were applied to the selected time series.

The Fourier transform decomposes a function of time (signal) into the frequencies that make it up. This transform of a function of time itself is a complex-valued function of frequency, whose absolute value represents the amount of that frequency present in the original function, and whose complex argument is the phase offset of the basic sinusoid at that frequency. The Fourier transform is called the frequency domain representation of the original signal. The Fourier analysis indicates that any signal can be analyzed in a sum of trigonometric functions.

The periodogram analysis method developed by Lomb and Scargle (Zechmeister and Kürster, 2009) used in this work is a method of estimating a frequency spectrum, based on

the least-squares fit of sinusoids to data samples, similar to the Fourier analysis and also known as the least-squares spectral analysis (LSSA).

Likewise, the wavelet analysis can decompose any signal into a sum of wavelets that originate from a mother wavelet function. A wavelet is a wave-like oscillation with amplitude that begins at zero, increases, and then decreases back to zero. It can be visualized as a “brief oscillation” like one recorded from a heart monitor. The term wavelet function is used to refer to either orthogonal or non-orthogonal wavelets. The Morlet function, which we use as mother function in this work, is a set of non-orthogonal wavelets and can be used with either the discrete or the continuous wavelet transform. The continuous wavelet transform was used in our case, and the functions that we studied were time series $[x_n]$ with equal time-spacing $[\delta t]$ and $n = 0, \dots, N - 1$.

The Fourier transform of a discrete sequence is known as the discrete Fourier transform (DFT),

$$X_k = \sum_{n=0}^N x_n e^{-2i\pi kn/N}. \quad (1)$$

The wavelet transform of the discrete sequence x_n is defined as the convolution of x_n with a scaled and translated version of the mother wavelet function, which is denoted as $\psi(\frac{t}{s})$. The term t denotes time and the term s , called scale, denotes a time interval or a period. Convolution is a mathematical operation on two functions to produce a third one. This operation includes shifting of the first function along the second one, producing integral values of the point-wise multiplication of the two functions. These values define the third function. The wavelet technique is based on this operation. Wavelets with different scales are shifting along the time series, and wherever in the time series the integral value is high, the specific scale or period is considered to have occurred.

More specifically, a version of the convolution theorem states that the convolution of two functions f and g equals the inverse Fourier transform of the point-wise product of Fourier transforms,

$$f * g = F^{-1}\{F\{f\} \cdot F\{g\}\}, \quad (2)$$

where the asterisk denotes convolution and the dot denotes multiplication.

This version is applied to the continuous wavelet transform of x_n as given by

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \psi^*(s\omega_k) e^{i\omega_k n \delta t}, \quad (3)$$

where the angular frequency is defined as $\omega_k = \begin{cases} \frac{2\pi k}{N\delta t}, & k \leq N/2 \\ -\frac{2\pi k}{N\delta t}, & k > N/2 \end{cases}$ and s is the scale, X_k is the discrete Fourier transform of x_n , $\psi(s\omega_k)$ is the Fourier transform of $\psi(\frac{t}{s})$, and the asterisk denotes the complex conjugate.

By varying the wavelet scale $[s]$ and translating along the localized time index n , one can construct a picture showing both the amplitude of any features *versus* the scale and how this amplitude varies with time, as is shown in Figures 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 12, and 13. This is the difference between a wavelet transform and a Fourier transform, which only shows the amplitude of each frequency.

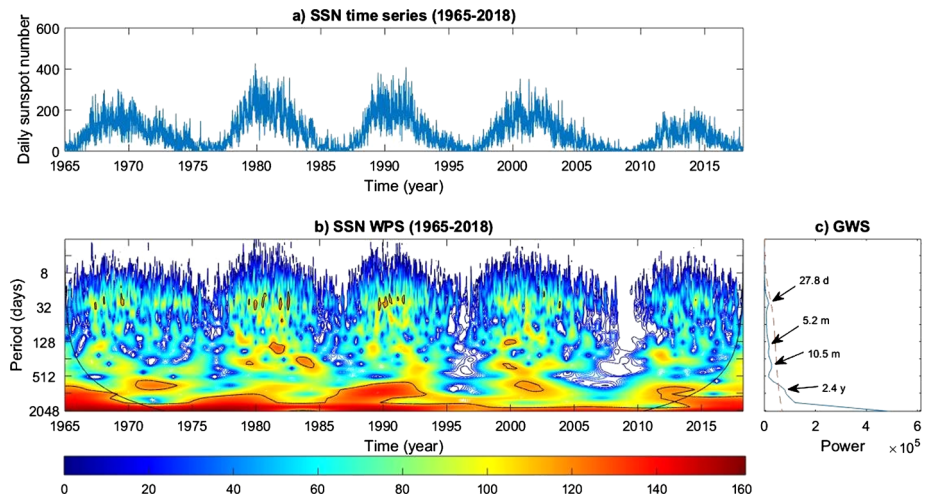


Figure 1 Temporal profile of the daily values of sunspot number (a), the wavelet power spectrum (WPS) (b), and the global wavelet spectrum (GWS) (c) of this parameter in the period range from 2 to 2048 days (lower panels) for the time interval 1965–2018.

3. Results

Applying the two techniques described above to the time series of the sunspot number, the Bz-component of the IMF, the geomagnetic Ap index, and the CRI, a number of diagrams are obtained, of which only those with the best-fit resolution and coherence are cited in this work. Many interesting periodic variations are outlined, giving useful conclusions for space-weather studies.

3.1. Sunspot Number

The wavelet analysis applied on the daily values of the sunspot-number time series gave a number of short-, mid-, and long-term periodicities that we list in Table 2, and the corresponding diagrams are presented in Figure 1. In the upper panel of this figure the temporal profile of the daily time series displays the well-known 11-year variation. In the lower panel the wavelet power spectrum (WPS) of this parameter in the range of 2–2048 days is illustrated, while in the right panel the global wavelet spectrum (GWS) of the sunspot number is illustrated. The periodicities that we are interested in are those corresponding to the peaks in the GWS. The 95% confidence level is indicated by the thick black contours in WPS and by the dashed red curve in the GWS. In this figure, the 27-day, 5.2-, 10.5-month, and 2.4-year periodicities are obvious. The well-known 27-day periodicity is due to the rotation of the Sun. The 5.2-month periodicity, known as the Rieger period, often appears during the maximum of the solar cycle (Rieger *et al.*, 1984). It is caused by the strong magnetic field that is generated in the convection zone of the Sun and is driven outward, causing temporal distributions of various parameters in the interplanetary medium. For this reason, we detect an integral multiple of that periodicity in the CRI. The 10.5-month and 2.4-year periodicity belong to the QBOs, which cover a wide temporal interval of 0.6–4 years. These are well-known variations in solar activity, interplanetary parameters, geomagnetic indices, and CRI (Bazilevskaya *et al.*, 2014). The QBOs are considered as one of the basic variations of solar-activity indices on scales shorter than 11 years, and they are probably intrinsic properties

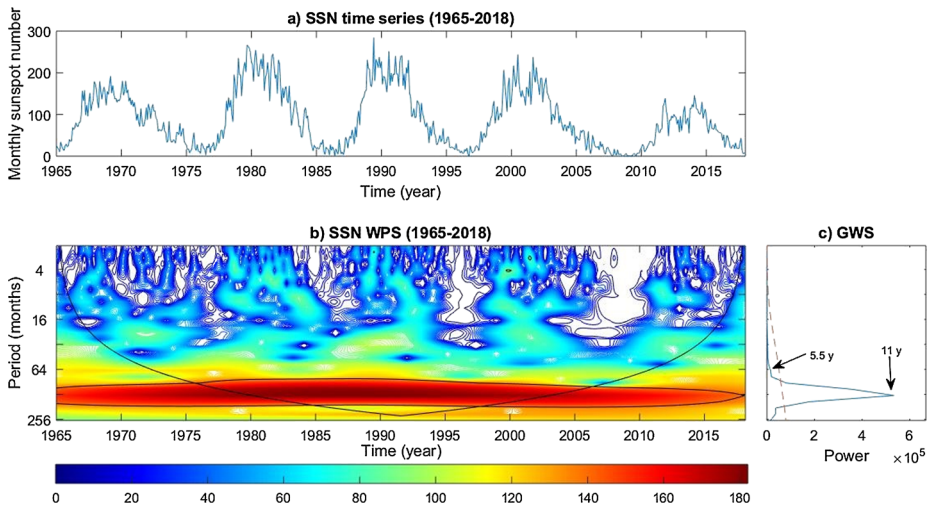


Figure 2 Temporal profile of the monthly values of the sunspot number (a), the wavelet power spectrum (WPS) (b) and the global wavelet spectrum (GWS) (c) of this parameter in the period range from 2 to 256 months (*lower panels*) for the time interval 1965–2018.

of the Sun related to the solar-dynamo mechanism (Chowdhury, Kudela, and Moon, 2016). We note that the Rieger and the 10.5-month period are stronger in Solar Cycles 21 and 23, and the 2.4-year period is stronger in Solar Cycles 20, 22, and 24. So, we are driven to the conclusion, which has also been noted in previous works, that odd and even cycles have characteristics in common (Otaola, Perez-Enriquez, and Valdes-Galicia, 1985; Mavromichalaki, Marmatsouri, and Vassilaki, 1988; Durney, 2000; Yoshida, 2014). This is because the polarity of the solar magnetic field reverses every 11 years around the maximum of the solar cycle, causing the 22-year magnetic cycle (Mavromichalaki, Belehaki, and Rafios, 1998; Mavromichalaki *et al.*, 2017). Some phenomena, like these periodicities, therefore follow a 22-year periodicity, and this is why specific works divide the time periods into magnetic cycles (Singh and Badruddin, 2017).

Moreover, the wavelet technique applied to the monthly values of the sunspot-number time series presented the same periodicities as above, as shown in Figure 2. The WPS clearly indicates the 11-year solar cycle and its second harmonic 5.5-year periodicity caused by the enhanced power of the second harmonic that arises from the asymmetric nature of the solar cycle (Currie, 1976; Sugiura, 1980; Mursula, Usoskin, and Zieger, 1997). As we see subsequently, the fast Fourier transform also includes in the spectrum the multiples and submultiples of the dominant frequencies.

The Lomb–Scargle power spectrum of the sunspot-number time series obtained from the fast Fourier analysis is depicted in Figure 3. The noted peaks are above the 95% confidence level and are given in Table 1. In addition to the above periodicities obtained from the wavelet analysis, there is a 1.1-year periodicity that is related to the Earth’s orbit around the Sun, and 1.9-, 3.2-, and 3.9-year periodicities that belong to the QBOs. Moreover, there is a 6.5-year periodicity that may be explained as the third harmonic of the magnetic cycle. The difference from the wavelet analysis is that Fourier analysis gives a better estimate of the frequency components, but the advantage of the wavelet analysis is that we can define the time interval in which the specific frequency has occurred, and we can also come to conclusions

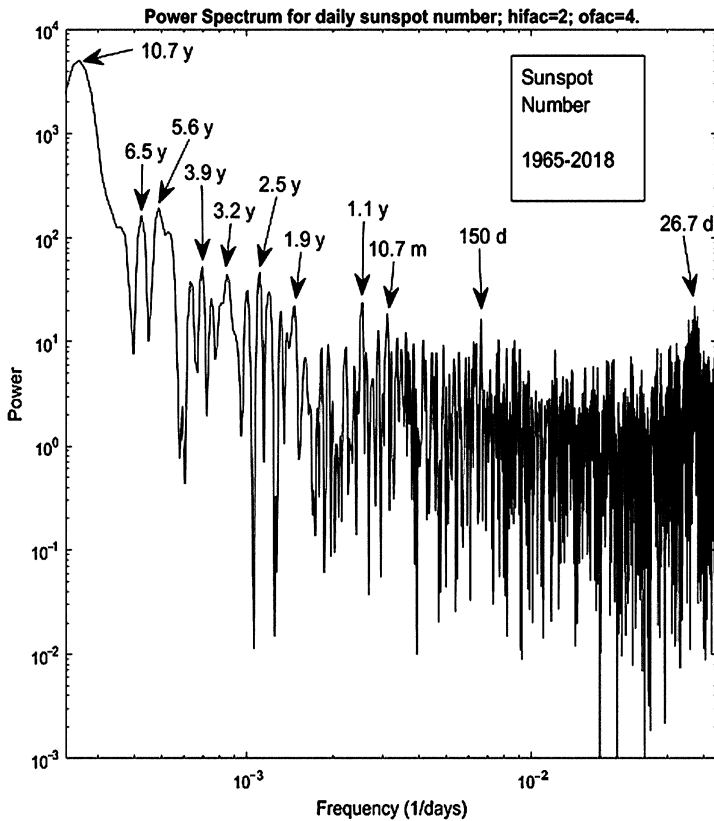


Figure 3 Lomb–Scargle power spectrum of the daily sunspot-number time series during the interval 1965–2018.

such as the common characteristics between odd and even solar cycles (Mavromichalaki, Marmatsouri, and Vassilaki, 1988).

3.2. Interplanetary Magnetic Field

The WPS obtained from the daily values of the IMF Bz-component is shown in Figure 4, while the resulting periodicities are illustrated in Table 2. It depicts the 13.9- and 27-day periodicities as being the most powerful ones for this parameter, while the rest of them are far below the 95% confidence level indicated by the dashed line. In the WPS of the monthly values of the Bz-time-series, which is depicted in Figure 5, we detect the 2.2- and 3.7-month periodicities above the 95% confidence level. We also detect the 1-year periodicity, which is right below the 95% confidence level, and the 4.1- and 8.2-year periodicities, which are far below this confidence level. In the Lomb–Scargle power spectrum of the Bz-time-series that is shown in Figure 6, the resulting periodicities that are above the 95% confidence level are at 14.1 and 28.5 days.

It is interesting to note here that our analysis shows that the 27-day periodicity as well as its second harmonic are split into two peaks. This implies that the Bz-component of the IMF as measured at the near-Earth environment is slightly variable. This is why the peak is not narrow and well defined. Chang (2014) indicated that a fundamental period

Table 1 Significant peaks from the Lomb–Scargle analysis of the daily values of the sunspot number, Bz, geomagnetic Ap index, and CRI time series during the interval 1965–2018.

Fast Fourier Transform (FFT) (Lomb–Scargle)

Confidence level 95%

Periodicities	SSN	IMF Bz	Ap index	CRI
Short-term	–	–	9 d,	–
	–	14.1 d	13.5 d	–
	26.7 d	28.5 d	25.3 d	–
Mid-term	5 m	–	6.1 m	–
	10.7 m	–	8.7 m	9.5 m
	1.1 y, 1.9 y	–	1.3 y, 1.7 y	1.2 y, 1.7 y
Long-term	2.5 y	–	2.3 y	–
	3.2 y	–	3 y	3 y
	–	–	3.6 y	3.7 y
	3.9 y	–	4 y	–
	5.6 y	–	5.2 y	5 y
	6.5 y	–	–	7.2 y
	10.7 y	–	10.6 y	10.5 y
	–	–	–	19 y

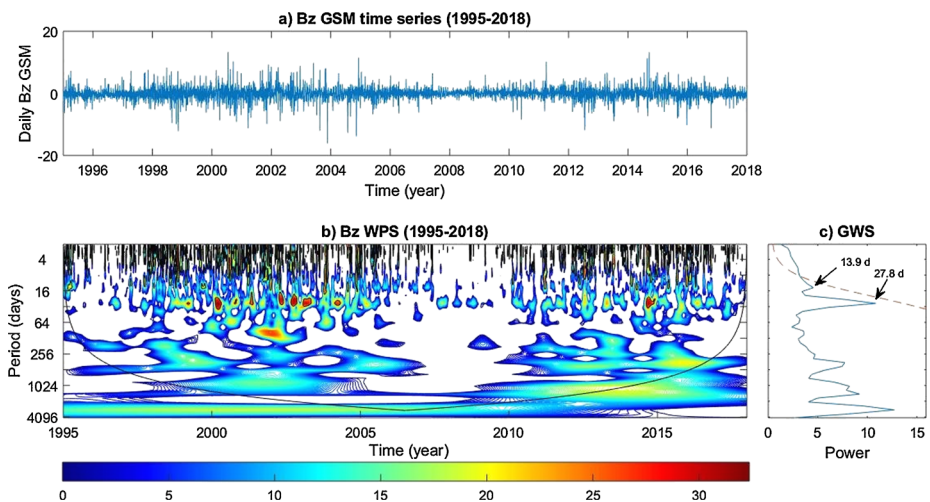


Figure 4 Temporal profile of the daily values of the Bz-component of IMF (a), the wavelet power spectrum (WPS) (b), and the global wavelet spectrum (GWS) (c) of this parameter in the period range from 2 to 4096 days (lower panels) for the time interval 1995–2018.

may cause sidelobes around the dominant 27-day periodicity, and therefore the peak is split. Specifically, he implemented a straightforward model of an oscillation frequency modulated by an arbitrary agent and found that this arbitrary agent is the one-year period. This result agrees with our result of a one-year periodicity that is just below the 95% confidence level in Figure 5 (Baranyi and Ludmány, 2003). According to Poblet and Azpilicueta (2018), the

Table 2 Significant peaks from the wavelet analysis in sunspot number, Bz, geomagnetic Ap index, and CRI during the interval 1965–2018.

Wavelet Analysis				
Periodicities	SSN	IMF Bz	Ap index	CRI
Short-term	–	–	6.9 d	–
	–	–	–	–
	–	13.9 d	11.7 d	–
	27.8 d	27.8 d	27.8 d	–
Mid-term	–	2.2 m, 3.7 m	–	–
	5.2 m	–	6.2 m	–
	10.5 m	–	–	–
	–	1 y	1.2 y	1.7 y
Long-term	2.4 y	–	–	–
	–	–	–	2.9 y
	–	–	–	–
	5.5 y	–	–	–
	11 y	–	11 y	11 y
	–	–	–	18.5 y

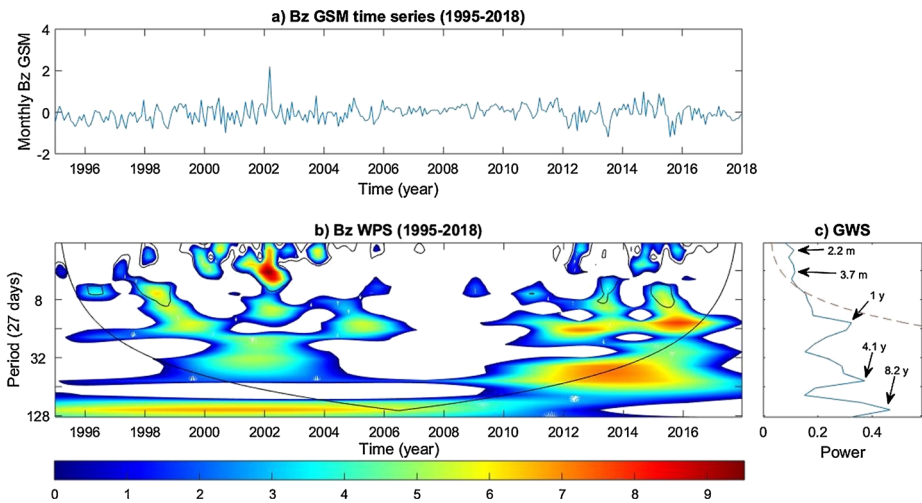


Figure 5 Temporal profile of the monthly values of the Bz-component of IMF (*upper panel*), the wavelet power spectrum (WPS) and the global wavelet spectrum (GWS) of this parameter in the period range from 2 to 128 months (*lower panels*) for the time interval 1995–2018.

physical process responsible for the 27-day signal in the magnetic activity is related to the solar wind and not to the solar electromagnetic radiation.

It is interesting to note that in this work a similar splitting was found also in the Lomb–Scargle power spectrum of the geomagnetic Ap index depicted below in Figure 11. It is noted that this splitting does not appear in the sunspot-number and CRI power spectra.

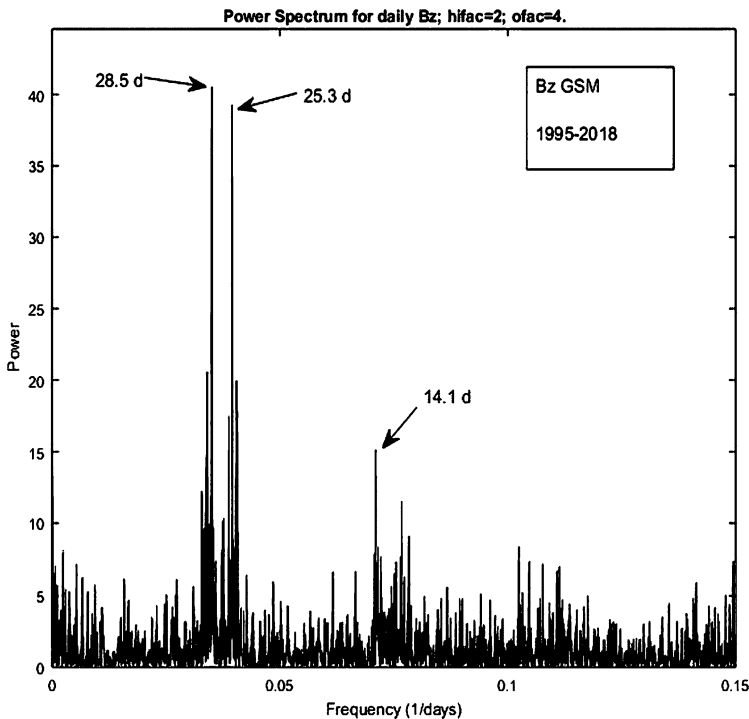


Figure 6 Lomb–Scargle power spectrum of the Bz-GSM time series during 1995–2018.

3.3. Geomagnetic Ap Index

The WPS of the daily time series of the geomagnetic Ap index is depicted in Figure 7, and it shows the first, second, and third harmonic of the 27-day rotational period, the 6-month periodicity that is well known for the Ap index, and the 1.2-year periodicity, which both belong to QBOs (Paularena, Szabo, and Richardson, 1995). The first and second harmonics of the 11-year solar cycle can also be observed in Figure 9, which also depicts the WPS of the daily time series of the geomagnetic Ap index in a different time range. The WPS of the monthly time series of the Ap index is depicted in Figure 8 and shows the semi-annual periodicity and the 11-year solar cycle. We observe that the GWS of the Ap index is clear and smoother than those of the other parameters.

The Lomb–Scargle power spectrum of the Ap index is shown in Figure 10. In addition to the periodicities from WPS, 1.3- and 1.7-year periodicities are also present, and they are considered to be multiples of the Rieger period. Moreover, 2.3-, 3-, 3.6-, and 4-year periodicities are depicted and belong to QBOs. These periodicities are similar to those of the sunspot number because the solar disturbances are transferred to the heliosphere through the open magnetic flux or solar wind and are detected in heliospheric and magnetospheric parameters and in CRI, as we show below. In addition to these periodicities, the splitting of the 27-day periodicity into two peaks, as was mentioned above, is also depicted in Figure 10. For a better understanding, this splitting is shown separately in Figure 11.

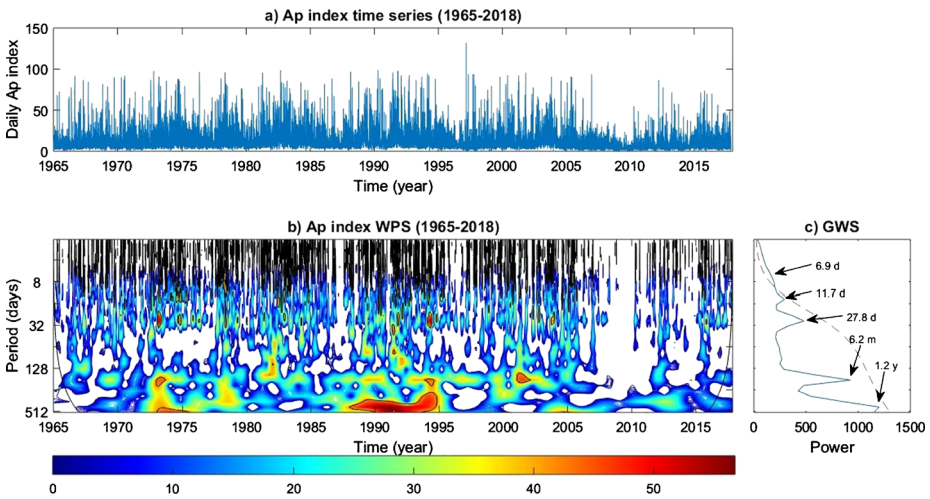


Figure 7 Temporal profile of the daily values of the geomagnetic Ap index (a), the wavelet power spectrum (WPS) (b), and the global wavelet spectrum (GWS) (c) of this parameter in the period range from 2 to 512 days (*lower panels*) for the time interval 1965–2018.

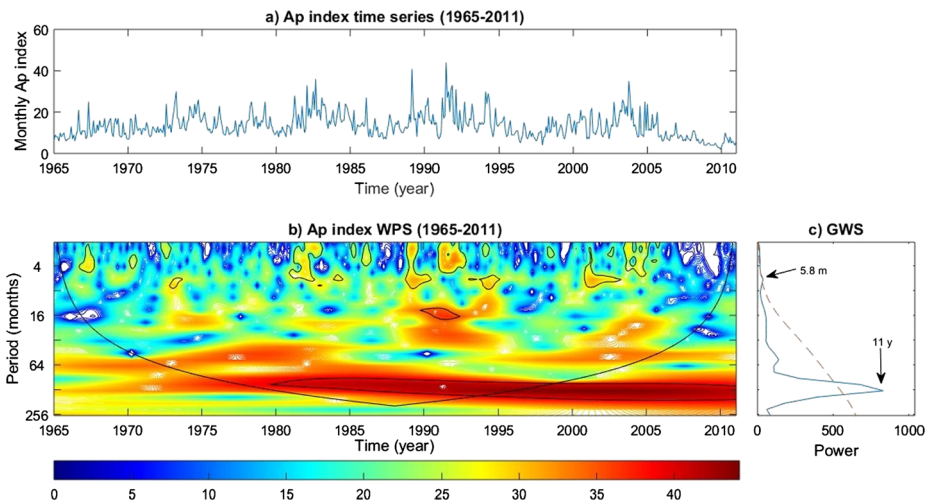


Figure 8 Temporal profile of the monthly values of the geomagnetic Ap index (a), the wavelet power spectrum (WPS) (b), and the global wavelet spectrum (GWS) (c) of this parameter in the period range from 2 to 256 months (*lower panels*) for the time interval 1965–2011.

3.4. Cosmic-ray Intensity

The WPS of the daily time series of the CRI is shown in Figure 12. In these time series, the 1.7- and 2.9-year periodicities are observed. The 1.7-year periodicity is an integral multiple of the Rieger period, while the 2.9-year periodicity belongs to the QBOs, as has already been mentioned in the sunspot-number section. The differences between odd and even cycles (Otaola, Perez-Enriquez, and Valdes-Galicia, 1985) regarding periods shorter than three

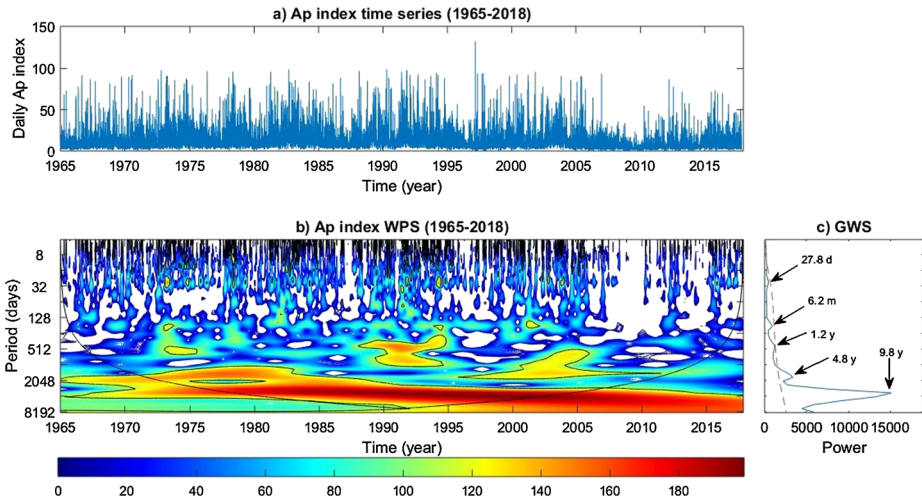


Figure 9 Temporal profile of the daily values of the geomagnetic Ap index (a), the wavelet power spectrum (WPS) (b), and the global wavelet spectrum (GWS) (c) of this parameter in the period range from 4 to 8192 days (lower panels) for the time interval 1965–2018.

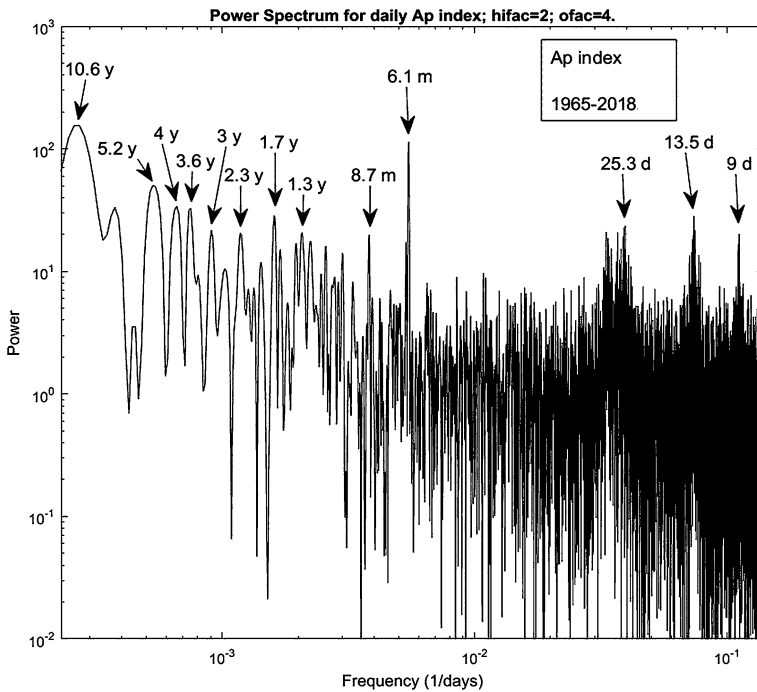


Figure 10 Lomb–Scargle power spectrum of the geomagnetic Ap index time series during the interval 1965–2018.

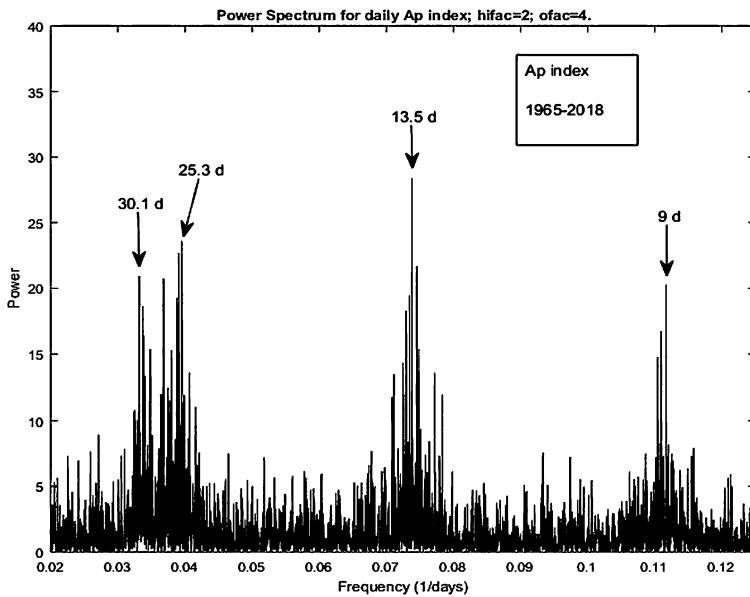


Figure 11 Lomb–Scargle power spectrum of the geomagnetic Ap index time series indicating the splitting of the 27-day periodicity during 1965–2018.

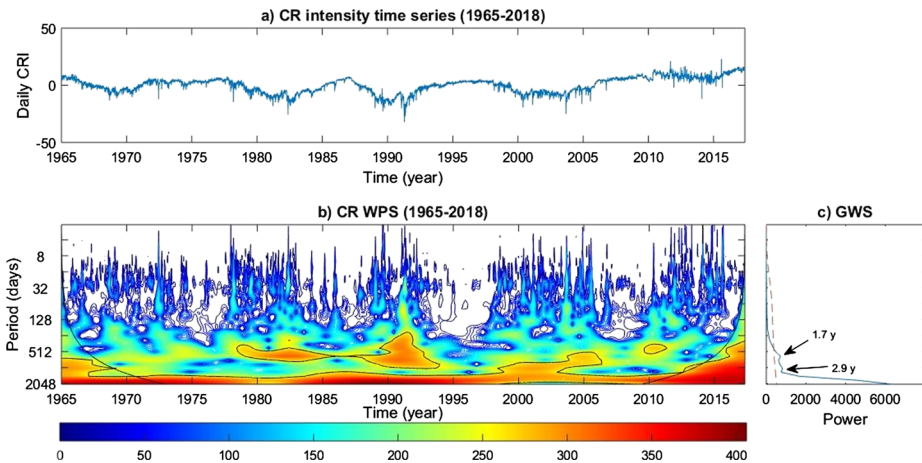


Figure 12 Temporal profile of the daily values of the cosmic ray intensity (a), the wavelet power spectrum (WPS) (b), and the global wavelet spectrum (GWS) (c) of this parameter in the period range from 2 to 2048 days (lower panels) for the time interval 1965–2018.

years are not so clear as in the WPS of the solar activity because the long-term periodicities are much more powerful than the short-term ones, leading to the latter being overshadowed.

In addition, the WPS of CRI for the monthly time series is shown in Figure 13. In addition to the solar-cycle variation, the periodicity of 18.5 years of the magnetic cycle inside the cone of influence is observed. Note here that this periodicity appears only in the CRI and

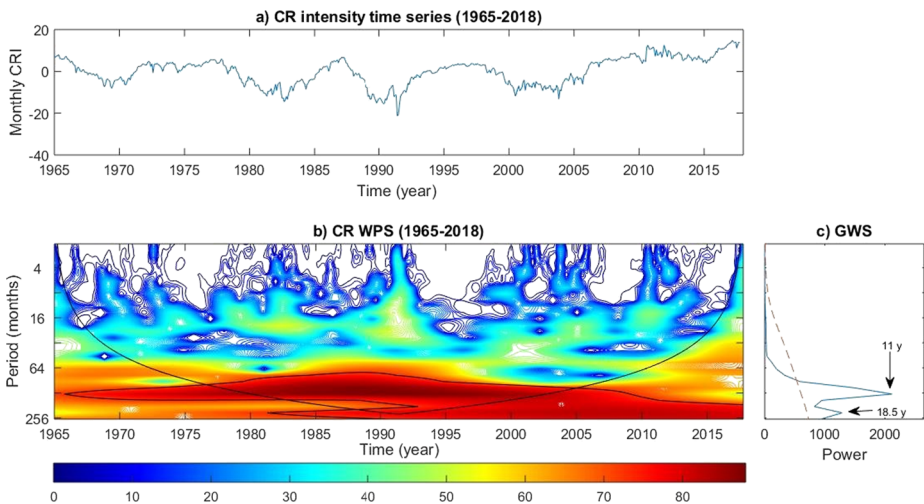


Figure 13 Temporal profile of the monthly values of the cosmic-ray intensity (a), the wavelet power spectrum (WPS) (b), and the global wavelet spectrum (GWS) (c) of this parameter in the period range from 2 to 256 months (lower panels) for the time interval 1965–2018.

not for the rest of the parameters. This confirms the direct connection between magnetic field and CRI.

The periodicities that are mentioned earlier in the sunspot number and geomagnetic Ap index are also present in the Lomb–Scargle power spectrum of the CRI, as shown in Figure 14. In addition to the CRI periodicities from WPS, in this figure we also detect 9.5-month, 1.1-year, and 7.2-year periodicities. The 1.1-year periodicity is due to the Earth’s orbit around the Sun, and the 7.2-year periodicity is probably related to the magnetic cycle as its third harmonic.

A summary of the periodicities that we have found for the four time series using fast Fourier and wavelet analysis on a daily and monthly basis are given in Tables 1 and 2, respectively.

4. Conclusions

We studied periodicities on various timescales such as short-, mid-, and long-term periodicities that are detected in the solar sunspot activity, the Bz-component of the IMF, the geomagnetic Ap index, and the CRI. This study extends from 1965 to 2018, covering a long time interval of 53 years, comprising Solar Cycles 20 to 24. Two different techniques of analysis, the fast Fourier Transform and the wavelet analysis, were applied to the above-mentioned parameters in order to define their significant periodicities. Several periodicities resulting from previous studies are confirmed, and new periodicities are determined. The result of Chang (2014) of the splitting of the 27-day periodicity in the Bz-component of the interplanetary magnetic field has been confirmed as well, and this splitting is noted also for first time in this work in the geomagnetic Ap index.

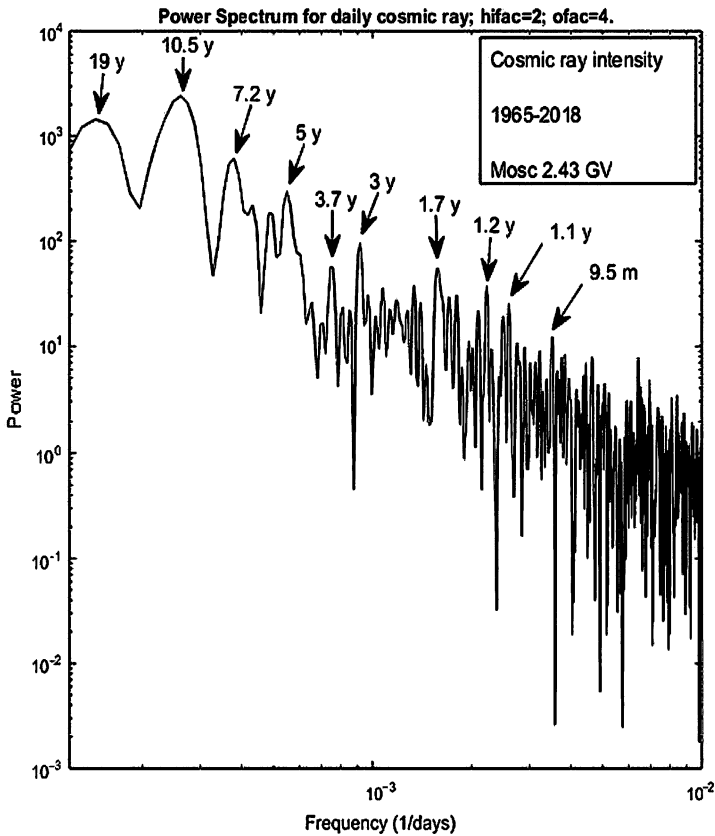


Figure 14 Lomb–Scargle power spectrum of CRI time series during 1965–2018.

More specifically, the following main conclusions have been obtained:

a) Long-term Periodicities

The long-term periodicity of 11 years appears to exist in the examined parameters SSN, geomagnetic Ap index, and CRI in both techniques, as expected (Forbush, 1954). In the case of the Bz-component of the IMF, this variation is not clear.

In our examined period covering five solar cycles (Cycles 20–24), the well-known periodicity of 22 years found in the CRI (Mavromichalaki *et al.*, 2003b) seems to appear with a value of ≈ 19 years and denotes the direct relationship of the CRI with solar activity. As was pointed out by Mavromichalaki *et al.* (2003b), this periodicity is associated with the magnetic cycle due to the solar magnetic-polarity reversal. Moreover, the ≈ 7 -year periodicity found in SSN and CRI time series appears to be related to the 22-year cycle, being its third harmonic. The ≈ 2.4 -year period in the SSN and in the Ap-index, the 3-year period in SSN, Ap index, and CRI, the ≈ 3.6 -year period in Ap and CRI, and the ≈ 4 -year period in SSN and Ap are new periodicities determined in this work.

b) Mid-term Periodicities

The observed mid-term periodicities of ≈ 1.3 years and 1.7 years, found in all of the above parameters except for the Bz-component of IMF, are integral multiples of the Rieger period. The 1.3-year periodicity in the geomagnetic Ap index was also found by Paularena,

Szabo, and Richardson (1995), while the 1.7-year periodicity in CRI was determined by Valdes-Galicia, Perez-Enriquez, and Otaola (1996).

The fundamental periods, like the five-month period known as the Rieger period and the semi-annual period, appear only in the SSN and the Ap index. These results are consistent with those of previous works (Rieger *et al.*, 1984; Prabhakaran Nayar *et al.*, 2002; Baranyi and Ludmány, 2003; Joshi, Pant, and Manoharan, 2006; Chowdhury and Dwivedi, 2011; Bazilevskaya *et al.*, 2014).

We can note here that in addition to the above-mentioned variations, many other periodicities that to our knowledge have not been defined before were determined here. The 2.2- and 3.7-month periodicity in the IMF Bz, the 9.5-month in the CRI, and the ≈ 10.6 -month and the 1.9-year periodicities in SSN are new periodicities determined in this work.

c) Short-term Periodicities

The short-term periodicity of 27 days, due to the solar rotation, is revealed by both techniques in the parameters SSN, Bz, and Ap. This result is in agreement with the results found by Joshi, Pant, and Manoharan (2006), Chang (2014), Singh and Badruddin (2017), Poblet and Azpilicueta (2018), and others.

It is worthwhile to mention that although the 27-day fluctuation in CRI is detected, it is not observed in the corresponding figures because the CRI power of the long-term 11-year periodicity much larger than the power of the 27-day periodicity. We note that many works, such as those by Kudela, Ananth, and Venkatesan (1991), Mavromichalaki *et al.* (2003b), Chowdhury, Kudela, and Moon (2016), are based on the detection of the 27-day periodicity in CRI recorded by neutron monitors. This periodicity is not easy to determine in the CRI power spectrum of our analysis because together with the short- and mid-term periodicities, the long-term periodicities are simultaneously analyzed, being much more powerful than the short-term ones. Moreover, this period due to the synodic rotation period of the Sun is not directly connected with the modulation of the CRI, and thus it is not shown in the spectral analysis of long-time periods.

Moreover, we detect a splitting in the 27-day peak in the Fourier power spectrum of the Bz-component of the IMF and the Ap index. This result is also emphasized in the work of Chang (2014), indicating that a long-term variation may cause a splitting in the principal peak of the 27-day periodicity because in the power spectrum of geomagnetic-activity indices, the 27-day peak is frequency-modulated by the periodic one-year variation. It is noted here that the \approx one-year variation is already found in this work for both parameters by the two techniques.

Furthermore, all short- and mid-term periodicities of the Ap index as shown in the global wavelet spectrum from the wavelet analysis are smooth and clear during the examined period (Singh and Badruddin, 2017). Together with the presence of the solar-rotation harmonics at 9 and 13.5 days in the global wavelet spectrum, this establishes the geomagnetic Ap index as a suitable index for space-weather monitoring (Baker, 1998). Currently, many space-weather forecasting centers use this parameter as an indicator of space-weather conditions issued in daily forecasting reports (spaceweather.phys.uoa.gr).

Finally, based on the obtained wavelet power spectra of the four parameters examined here, we can outline that the maximum and the declining phases of the solar cycles are characterized by the most significant periodicities, and so they are the most appropriate time periods for the study of short- and mid-term variations. This research can be useful to the scientific community for the monitoring of many space-weather effects and applications.

Acknowledgements We gratefully acknowledge the wavelet software provided by C. Torrence and G. Compo (paos.colorado.edu/research/wavelets/) and the Neutron Monitor Database-NMDB, funded under

the European Union's FP7 Program (contract no. 213007). We acknowledge the National Geophysical Data Centre-NOAA, the World Data Center of Kyoto, the Sunspot Index and Long-term Solar Observations-SILSO, and the OMNIWeb of the NASA Goddard Space Flight Center. Thanks are also due to C. Katsavrias and to the anonymous reviewer for suggestions that significantly improved this work.

Disclosure of Potential Conflicts of Interest The authors declare that they have no conflicts of interest.

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

References

- Baker, D.N.: 1998, What is space weather? *Adv. Space Res.* **22**, 7. DOI.
- Baranyi, T., Ludmány, A.: 2003, Semiannual behavior of monthly mean of B_z component of geoeffective ($K_p > 3$) coronal mass ejections, Solar variability as an input to the Earth's environment. In: Wilson, A. (ed.) *Proceedings of ICSC 2003 – Solar Variability as an Input to the Earth's Environment SP-535*, ESA, Noordwijk, 563. ISBN 92-9092-845-X.
- Bazilevskaya, G., Broomhall, A.M., Elsworth, Y., Nakariakov, V.M.: 2014, A combined analysis of the observational aspects of the quasi-biennial oscillation in the solar magnetic activity. *Space Sci. Rev.* **186**, 359. DOI.
- Brigham, E.O.: 1988, *The Fast Fourier Transform and Its Applications*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River. ISBN 0-13-307505-2.
- Chang, H.-Y.: 2014, Frequency-modulated solar rotational periodicity of geomagnetic indices. *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, 86. DOI.
- Chowdhury, P., Dwivedi, B.N.: 2011, Periodicities of sunspot number and coronal index time series during Solar Cycle 23. *Solar Phys.* **270**, 365. DOI.
- Chowdhury, P., Kudela, K., Moon, Y.J.: 2016, A study of heliospheric modulation and periodicities of galactic cosmic rays during Cycle 24. *Solar Phys.* **291**, 581. DOI.
- Currie, R.G.: 1976, Long period magnetic activity – 2 to 100 years. *Astrophys. Space Sci.* **39**, 251. DOI.
- Durney, B.R.: 2000, On the differences between odd and even solar cycles. *Solar Phys.* **196**, 421. DOI.
- Forbush, S.E.: 1954, World-wide cosmic-ray variations, 1937 – 1952. *J. Geophys. Res.* **59**, 525. DOI.
- Joshi, B., Pant, P., Manoharan, P.K.: 2006, Periodicities in sunspot activity during Solar Cycle 23. *Astron. Astrophys.* **452**, 647. DOI.
- Katsavrias, C., Preka-Papadema, P., Moussas, X.: 2012, Wavelet analysis on solar wind parameters and geomagnetic indices. *Solar Phys.* **280**, 623. DOI.
- Kudela, K., Ananth, A.G., Venkatesan, D.: 1991, The low-frequency spectral behavior of cosmic ray intensity. *J. Geophys. Res.* **96**, 15871. DOI.
- Kudela, K., Sabbah, I.: 2016, Quasi-periodic variations of low energy cosmic rays. *Sci. China, Technol. Sci.* **59**, 547. DOI.
- Kudela, K., Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Gerontidou, M.: 2010, On midterm periodicities in cosmic rays. *Solar Phys.* **266**, 173. DOI.
- Mavromichalaki, H., Belehaki, A., Rafios, X.: 1998, Simulated effects at neutron monitor energies: evidence of the 22-year cosmic ray variation. *Astron. Astrophys.* **330**, 764.
- Mavromichalaki, H., Marmatsouri, E., Vassilaki, A.: 1988, Solar-cycle phenomena in cosmic-ray intensity: differences between even and odd cycles. *Earth Moon Planets* **42**, 233. DOI.
- Mavromichalaki, H., Preka-Papadema, P., Liritzis, I., Petropoulos, B., Kurt, V.: 2003a, Short-term variations of cosmic-ray intensity and flare-related data in 1981 – 1983. *New Astron.* **8**, 777. DOI.
- Mavromichalaki, H., Preka-Papadema, P., Petropoulos, B., Tzagouri, I., Georgakopoulos, S., Polygiannakis, J.: 2003b, Low and high frequency spectral behaviour of cosmic ray intensity for the period 1953 – 1996. *Ann. Geophys.* **21**, 1681. DOI.
- Mavromichalaki, H., Preka-Papadema, P., Theodoropoulou, A., Paouris, E., Apostolou, Th.: 2017, A study of the possible relation of the cardiac arrhythmias with the magnetic field polarity reversals. *Adv. Space Res.* **59**, 366. DOI.
- Mursula, K., Usoskin, I., Zieger, B.: 1997, On the claimed 5.5-year periodicity in solar activity. *Solar Phys.* **176**, 201. DOI.
- Otaola, J.A., Perez-Enriquez, R., Valdes-Galicia, J.F.: 1985, Difference between even and odd 11-year cycles in cosmic ray intensity. In: Jones, F.C., Adams, J., Mason, G.M. (eds.) *Proc. 19th ICRC*, **4**, CP-2376, 493. NASA GSFC, Greenbelt.

- Paularena, K.I., Szabo, A., Richardson, J.D.: 1995, Coincident 1.3-year periodicities in the Ap geomagnetic index and the solar wind. *Geophys. Res. Lett.* **22**, 3001. [DOI](#).
- Poblet, F.L., Azpilicueta, F.: 2018, 27-day variation in solar-terrestrial parameters: global characteristics and an origin based approach of the signals. *Adv. Space Res.* **61**, 2275. [DOI](#).
- Prabhakaran Nayar, S.R., Radhika, V.N., Revathy, K., Ramadas, V.: 2002, Wavelet analysis of solar, solar wind and geomagnetic parameters. *Solar Phys.* **208**, 359. [DOI](#).
- Rieger, E., Share, G.H., Forrest, D.J., Kanbach, G., Reppin, C., Chupp, E.L.: 1984, A 154-day periodicity in the occurrence of hard solar flares. *Nature* **312**, 623. [DOI](#).
- Simpson, J.A.: 2000, The cosmic ray nucleonic component: the invention and scientific uses of the neutron monitor. *Space Sci. Rev.* **93**, 11. [DOI](#).
- Singh, Y.P., Badruddin: 2017, Short- and mid-term oscillations of solar, geomagnetic activity and cosmic ray intensity during the last two solar magnetic cycles. *Planet. Space Sci.* **138**, 1. [DOI](#).
- Sugiura, M.: 1980, What do we expect in magnetic activity in the current solar cycle? *Eos Trans. AGU* **61**, 673. [DOI](#).
- Torrence, C., Compo, G.P.: 1998, A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79**, 61. [DOI](#).
- Valdes-Galicia, J.F., Perez-Enriquez, R., Otaola, J.A.: 1996, The cosmic-ray 1.68-year variation: a clue to understand the nature of the solar-cycle. *Solar Phys.* **167**, 409. [DOI](#).
- Yoshida, A.: 2014, Difference between even- and odd-numbered cycles in the predictability of solar activity and prediction of the amplitude of cycle 25. *Ann. Geophys.* **32**, 1035. [DOI](#).
- Zechmeister, M., Kürster, M.: 2009, The generalised Lomb–Scargle periodogram. A new formalism for the floating-mean and Keplerian periodograms. *Astron. Astrophys.* **496**, 577. [DOI](#).